

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA FYZICKÉ GEOGRAFIE A GEOEKOLOGIE



**MODELOVÁNÍ PRŮBĚHU EXTREMNÍCH POVODNÍ
V KONTEXTU KRAJINNÝCH ZMĚN A INTEGROVANÉ
PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY**

MODELLING THE COURSE OF EXTREME FLOODS IN THE CONTEXT OF
LANDSCAPE CHANGES AND INTEGRATED FLOOD PROTECTION

Disertační práce

Michal Jeníček

Praha, červen 2009

Školitel disertační práce: RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem „Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany“ vytvořil na základě vlastních zjištění a s pomocí materiálů uvedených v seznamu literatury. Prohlašuji, že žádná část práce nebyla použita za účelem získání jiných akademických titulů.

V Praze dne 21. 6. 2009

Michal Jeníček

Rád bych poděkoval RNDr. Jakubovi Langhammerovi, Ph.D. za vedení disertační práce a za cenné rady a připomínky, které přispěly k úspěšnému zakončení studia a napsání této práce. Poděkování patří i kolegům z katedry fyzické geografie a geoekologie za pomoc při terénních pracích. Děkuji také své partnerce Ireně za jazykovou korekturu práce a především za trpělivost a psychickou podporu, kterou mi po celou dobu dodávala.

Motto:

„In many ways, hydrologic modeling is more an art than a science, and it is likely to remain so.”

...

„It is unlikely that the results of an objective analysis of modeling methods can ever be substituted for the subjective talents of an experienced modeler.”

Loague a Freeze, 1985

OBSAH

ÚVOD A CÍLE PRÁCE	10
ČÁST A: TEORETICKÉ POZNATKY A METODICKÉ POSTUPY	13
1 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ	14
1.1 KONCEPT INTEGROVANÉ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY	14
1.2 HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ JAKO NÁSTROJ HODNOCENÍ PRŮBĚHU POVODNÍ	16
1.2.1 HYDROLOGICKÝ MODEL	16
1.2.2 KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ	17
1.2.3 VYUŽITÍ GIS V HYDROLOGICKÉM MODELOVÁNÍ	19
1.2.4 VÝBĚR VHODNÉHO MODELU	20
1.3 ZMĚNY V KRAJINĚ A POVODNĚ	21
1.3.1 PŘÍSTUPY K HODNOCENÍ Vlivu ZMĚN V KRAJINĚ NA PRŮBĚH POVODNÍ	21
1.3.2 MODELOVÁNÍ Vlivu ZMĚN V KRAJINĚ NA PRŮBĚH POVODNÍ	22
1.4 SUCHÉ RETENČNÍ NÁDRŽE V PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANĚ	23
1.5 VÝZKUM SNĚHOVÉ POKRÝVKY	24
1.5.1 HISTORICKÝ PŘEHLED VÝZKUMU SNĚHU	24
1.5.2 METODY MĚŘENÍ SNĚHOVÉ POKRÝVKY	24
1.5.3 MODELOVÁNÍ ODTOKU ZE SNĚHU	26
2 MATERIÁL A METODY	28
2.1 PODKLADOVÁ DATA A METODY JEJICH ZPRACOVÁNÍ	28
2.1.1 MONITORING HYDROLOGICKÝCH A KLIMATOLOGICKÝCH VELIČIN	28
2.1.2 GEODETICKÁ MĚŘENÍ	29
2.1.3 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU (DMT)	30
2.1.4 ZPRACOVÁNÍ SRÁŽKOVÝCH DAT	31
2.1.5 METODY PLOŠNÉ INTERPOLACE HODNOT	32
2.1.6 OSTATNÍ PODKLADOVÁ DATA	34
2.2 CHARAKTERISTIKA MODELU HEC-HMS	34
2.2.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA MODELU	34
2.2.2 STRUKTURA MODELU A SCHEMATIZACE POVODÍ	34
2.2.3 KOMPONENTY MODELU	37
2.2.3.1 Meteorologický model (Meteorological Model)	37
2.2.3.2 Model odtokové ztráty (Runoff Volume Model)	40
2.2.3.3 Model přímého odtoku (Direct Runoff Model)	41
2.2.3.4 Model podzemního odtoku (Baseflow Model)	42
2.2.3.5 Korytový model (Channel Model)	42
2.2.3.6 Další komponenty	43
2.2.4 PARAMETRY SIMULACE A KALIBRACE MODELU	43
2.2.5 INTEGRACE GIS A DALŠÍCH PROGRAMŮ	45
2.3 CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTÁLNÍCH POVODÍ	46
2.3.1 POVODÍ BLANICE	46
2.3.2 POVODÍ CHOMUTOVKY	47

2.3.3	POVODÍ BYSTŘICE	49
ČÁST B: PŘÍPADOVÉ STUDIE		51
1	HISTORICKÉ ZMĚNY KRAJINNÉHO POKRYVU A JEJICH VLIV NA PRŮBĚH POVODNÍ	52
1.1	ÚVOD	52
1.2	MATERIÁL A METODY	52
1.2.1	ZMĚNY KRAJINNÉHO POKRYVU	52
1.2.2	ODVOZENÍ HODNOT CN	54
1.2.3	MĚŘENÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ ÚDOLÍ NIVY	57
1.2.4	ČASOVÉ ŘADY SRÁŽEK A PRŮTOKŮ	57
1.2.5	SESTAVENÍ MODELU, POUŽITÉ MODELOVACÍ TECHNIKY	58
1.2.6	MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ	59
1.3	VÝSLEDKY	60
1.3.1	KALIBRACE A VERIFIKACE	60
1.3.2	VARIANTNÍ SIMULACE	61
1.4	DISKUZE	64
1.4.1	NEJISTOTA VSTUPŮ	65
1.4.2	NEJISTOTA MODELU	66
1.5	DÍLČÍ ZÁVĚRY	67
2	MODELOVÁNÍ VLIVU SUCHÝCH NÁDRŽÍ NA PRŮBĚH POVODNÍ	69
2.1	ÚVOD	69
2.2	MATERIÁL A METODY	69
2.2.1	MĚŘENÍ VELIKOSTI A OBJEMU NÁDRŽÍ	69
2.2.2	ČASOVÉ ŘADY SRÁŽEK A PRŮTOKŮ	71
2.2.3	SESTAVENÍ MODELU, POUŽITÉ MODELOVACÍ TECHNIKY	72
2.2.4	MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ	73
2.3	VÝSLEDKY	73
2.3.1	KALIBRACE A VERIFIKACE	73
2.3.2	VARIANTNÍ SIMULACE	74
2.4	DISKUZE	78
2.4.1	NEJISTOTA VSTUPŮ	78
2.4.2	NEJISTOTA MODELU	78
2.5	DÍLČÍ ZÁVĚRY	80
3	MODELOVÁNÍ ODTOKU ZE SNĚHOVÉ POKRÝVKY V LESE A NA OTEVŘENÝCH PLOCHÁCH	81
3.1	ÚVOD	81
3.2	MATERIÁL A METODY	82
3.2.1	STANOVENÍ VODNÍ HODNOTY SNĚHU	82
3.2.2	VARIANTY KRAJINNÉHO POKRYVU	83
3.2.3	VLIV KRAJINNÉHO POKRYVU NA TÁNÍ SNĚHOVÉ POKRÝVKY	84
3.2.4	ČASOVÉ ŘADY TEPLoty VZDUCHU, SRÁŽEK A PRŮTOKŮ	85
3.2.5	SESTAVENÍ MODELU, POUŽITÉ MODELOVACÍ TECHNIKY	86
3.2.6	MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ	87

3.3	VÝSLEDKY.....	88
3.3.1	KALIBRACE MODELU HEC-HMS	88
3.3.1.1	<i>Simulace od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006.....</i>	88
3.3.1.2	<i>Simulace od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006.....</i>	91
3.3.2	MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ ODTOKU ZE SNĚHU	92
3.4	DISKUZE	94
3.4.1	NEJISTOTA VSTUPŮ.....	94
3.4.2	NEJISTOTA MODELU	95
3.5	DÍLČÍ ZÁVĚRY.....	96
ČÁST C: DISKUZE A ZÁVĚRY		98
1	DISKUZE	99
1.1	KONCEPT INTEGROVANÉ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY	99
1.2	HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ JAKO NÁSTROJ INTEGROVANÉ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY.....	101
1.3	HYDROLOGICKÁ NEJISTOTA.....	102
1.3.1	NEJISTOTA VSTUPŮ.....	103
1.3.2	NEJISTOTA HYDROLOGICKÉHO MODELU	104
1.3.2.1	<i>Prostorové a časové měřítko</i>	104
1.3.2.2	<i>Počáteční podmínky.....</i>	106
1.3.2.3	<i>Kalibrace modelu</i>	106
1.4	MOŽNÉ SMĚRY DALŠÍHO VÝZKUMU	107
2	ZÁVĚRY	109
ČÁST D: SOUHRNY		112
1	POUŽITÁ LITERATURA	113
2	SEZNAM OBRÁZKŮ	126
3	SEZNAM TABULEK.....	127
4	SEZNAM PŘÍLOH.....	128
ČÁST E: PŘÍLOHY.....		129

SEZNAM ZKRATEK

API	Antecedent Precipitation Index (ukazatel předchozích srážek)
ATI	Antecedent Temperature Index (ukazatel předchozí teploty)
CC	Cold Content (teplotní deficit)
CN	Curve Number (číslo CN křivky)
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CZEPOS	Česká síť permanentních stanic pro určování polohy
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DDE	Dynamic Data Exchange
DDF	Degree Day Factor (teplotní index)
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
DMIP	Distributed Model Intercomparison Project
DMT	Digitální model terénu
DMÚ	Digitální model území
DPZ	Dálkový průzkum Země
DSS	Data Storage System
DSS	Decision Support Systems
DWD	Deutscher Wetterdienst
ET	Evapotranspirace
GeoSI AČR	Geografická služba Armády České republiky
GIS	Geographic Information System (geografický informační systém)
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
HSP	Hydrologická skupina půdy
IDW	Inverse Distance Weighted
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPO	Integrovaná protipovodňová ochrana
MŽP ČR	Ministerstvo životního prostředí České republiky

PET	Potenciální evapotranspirace
PVP	Předchozí vláhové podmínky
RMSE	Root Mean Squared Error (střední kvadratická chyba odhadu)
RVK	Retenční vodní kapacita
SAC-SMA	Sacramento Soil Moisture Accounting
SCE	Sníh celkový (celková výška sněhové pokrývky)
SCS CN	Soil Conservation Service Curve Number
SCS	Soil Conservation Service
SMA	Soil Moisture Accounting
SWE	Snow Water Equivalent (vodní hodnota sněhu)
TIN	Triangulated Irregular Network (trojúhelníková nepravidelná síť)
TS	Totální stanice
UFA AVČR	Ústav fyziky atmosféry Akademie Věd České republiky
UH	Unit Hydrograph (jednotkový hydrogram)
USACE	United States Army Corps of Engineers
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
VD	Vodní dílo
VGHMÚř	Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad
VÚV T. G. M	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka
WMO	World Meteorological Organisation (Světová meteorologická organizace)
WMS	Watershed Modelling System
ZABAGED	Základní báze geografických dat

ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Povodně od nepaměti znamenají pro člověka významné ohrožení. Účinná ochrana sídel před jejich projevy představuje jeden ze základních úkolů hydrologie a vodního hospodářství. Pohledy na protipovodňovou ochranu se v průběhu staletí vyvíjely a stále vyvíjejí v reakci na rozvoj poznatků o procesech probíhajících v přírodě, na základě zkušenosti s extrémními povodněmi a také v důsledku zlepšujících se technologických možností umožňujících kvantifikovat vliv nejrůznějších opatření. Dříve uplatňovaný „centralizovaný“ přístup k protipovodňové ochraně spočíval v realizaci izolovaných strukturálních opatření převážně technického rázu. Uvedený přístup byl úzce propojen i s dalšími odvětvími jako je energetika, zásobování pitnou vodou nebo rekreace.

V dnešní době se naproti tomu stále častěji uplatňuje tzv. integrovaná protipovodňová ochrana (Langhammer et al., 2008b; Dumbrovský et al., 2006). Hlavním rysem tohoto přístupu je komplexní řešení protipovodňové ochrany v rámci celého povodí namísto izolovaných opatření (Drbal et al., 2007). Decentralizovaný přístup spočívá v možnosti vytvoření více menších, tzv. „měkkých“ opatření, která jsou lokalizována v celé ploše povodí (malé vodní nádrže, změna využití půdy, vhodné agrotechnické postupy). Jednotlivá opatření jsou tedy integrována v krajině (Schulte et al., 2007). Uvedený přístup plní také funkci ekologickou a opírá se o platnou legislativu Evropské Unie a České republiky.

Problematicku řešenou v rámci disertační práce je možné rozdělit do třech částí, které tvoří hlavní pilíře integrované protipovodňové ochrany (IPPO). První a třetí část se věnují hodnocení vlivu opatření IPPO, která mohou být realizována v ploše povodí, druhá část se zabývá opatřeními, která je možné realizovat v korytě a údolní nivě. Pro každou ze třech částí jsou v disertační práci uvedeny výsledky konkrétní případové studie.

První studie provedená v povodí jihočeské Blanice kvantifikuje pomocí dále popsaných metod změny v extremitě povodní v podmínkách měnicí se struktury krajinného pokryvu. Uvedené výsledky mohou být vodítkem pro pozitivní změny v krajině, které by mohly mít za následek zmírnění průběhu a následků extrémních hydrologických jevů.

Druhá studie provedená v povodí Chomutovky v Krušných horách kvantifikuje vliv suchých retenčních nádrží (poldrů) jako prvku integrované protipovodňové ochrany na průběh povodní při různých extremitách příčinných srážek. Uvedená opatření stojí na rozhraní mezi strukturálními (technickými) a přírodě blízkými opatřeními a v současné době představují často aplikovaný typ řešení protipovodňové ochrany (Szolgay a Danáčová, 2007; Řehák a Svatoš, 2006).

Třetí studie provedená v povodí Bystřice v Krušných horách se snaží prohloubit poznatky v oblasti akumulace a tání sněhové pokrývky se zaměřením na vliv lesa a otevřených ploch jako faktoru, který významně zasahuje do procesu tání sněhu. Vegetace je jedním z faktorů, který může ovlivnit průběh tání a velikost kulminace (Pobříslavská a Kulasová, 2000). Výsledky modelování mohou přispět k návrhu efektivní ochrany před jarními povodněmi.

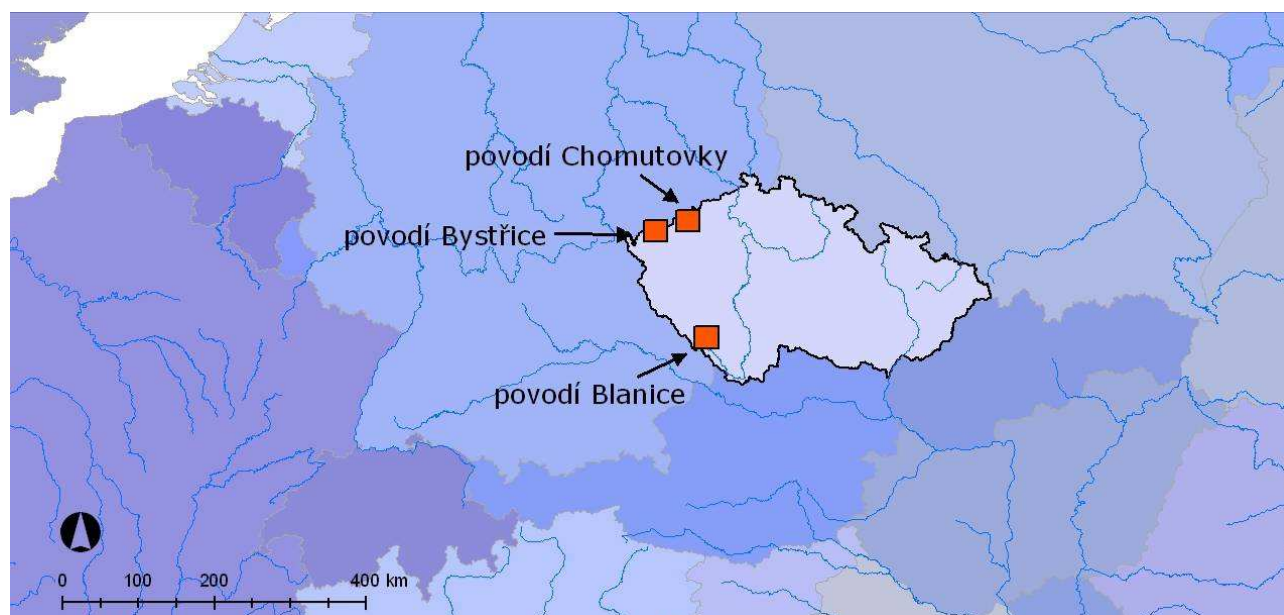
Na počátku výzkumu byly vytyčeny následující hlavní cíle. Dílčí cíle, které byly formulovány před zpracováním každé případové studie, jsou uvedeny v části B.

- 1) Zhodnocení významu opatření integrované protipovodňové ochrany v podmínkách měnící se krajiny
Otázka: Mohou maloplošná, přírodě blízká protipovodňová opatření konkurovat tradičnímu pojetí protipovodňové ochrany v České republice?
- 2) Modelování vlivu současných a historických změn krajinného pokryvu na letní a zimní povodně na vybraných povodích
Otázka: Jak velký je vliv testovaných variant a opatření na snížení kulminačního průtoku povodně?
- 3) Zhodnocení modelů a metod použitých při srážko-odtokovém modelování, určení hydrologické nejistoty
Otázka: Jsou použité metodické a analytické postupy vhodné?

Je důležité zdůraznit, že práce si neklade za cíl realizaci testovaných opatření. Jedná se o modelové studie, jejichž cílem je kvantifikace vlivu daných opatření na konkrétním experimentálním území a obecné posouzení použitých modelů a modelovacích technik.

Jedním z nástrojů geografické analýzy, kterým je možné kvantifikovat vliv výše naznačených opatření je hydrologické modelování, založené na podrobném terénním průzkumu a analýze historických i aktuálních datových podkladů nástroji GIS. Nedílnou součástí disertační práce je také posouzení použitelnosti tohoto nástroje a nejistot nutně spjatých s jeho aplikací. Pro modelování byl použit koncepční model HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*), který se řadí do skupiny celistvých (lumped) modelů s prvky distribuovaného uspořádání (Feldman, 2000; Scharffenberg a Fleming, 2008; Ford et al., 2008). Modelovaný systém (povodí) se dělí na menší celky, subpovodí, ke kterým jsou vztahovány parametry charakterizující stav v povodí, včetně počátečních podmínek na začátku modelovaného období.

V první studii byly analýzy prováděny v povodí jihočeské Blanice po závěrový profil Podedvorský Mlýn (plocha povodí 209,6 km²). Druhým modelovým povodím byla Chomutovka v Krušných horách po závěrový profil III. Mlýn. Plocha povodí vypočtena na základě digitálních podkladů je 44,5 km². Takto vymezené povodí sloužilo pouze pro kalibraci modelu, hlavní analýzy byly prováděny v horní části povodí po profil Tišina (nad Dietrovou štolou, plocha povodí je 14,5 km²). Jako modelové území pro třetí studii bylo použito povodí Bystřice v Krušných horách po závěrový profil Ostrov (127,6 km²). Na obrázku 1 je vyznačena poloha sledovaných povodí v rámci střední Evropy.



Obr. 1 Poloha modelových povodí Blanice, Chomutovky a Bystřice v rámci České republiky

Práce je z hlediska své struktury rozdělena do pěti hlavních částí A až E. Část A je rozdělena na dvě kapitoly. První kapitola shrnuje dosavadní poznatky, které se vztahují k řešené problematice. Druhá kapitola obsahuje obecné metodické postupy, které byly při řešení použity a které jsou společné všem případovým studiím. Část A tak tvoří metodické pozadí celé disertační práce.

Část B je věnována třem případovým studiím, ve kterých jsou uvedeny výsledky čtyřletého výzkumu. Struktura každé studie je koncipována jako samostatný odborný článek, je tedy tvořena metodikou, ve které jsou uvedeny použité postupy, výsledky práce, dílčí diskuzí a závěry.

Část C shrnuje dosažené poznatky a především diskutuje použité metodické a analytické postupy a snaží se vyjádřit nejistotu, která je nedílnou součástí každého výzkumu. Diskuze je rozdělena do čtyř kapitol – diskuze konceptu protipovodňové ochrany, diskuze hydrologického modelování, diskuze hydrologické nejistoty a na závěr jsou uvedeny možné směry budoucího výzkumu v dané problematice. Podstatnou částí třetího bloku jsou závěry.

V části D jsou uvedeny seznamy použité literatury, obrázků, tabulek a příloh. Poslední část E je věnována přílohám.

ČÁST A:
TEORETICKÉ POZNATKY A METODICKÉ
POSTUPY

1 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ

1.1 KONCEPT INTEGROVANÉ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY

Ochrana měst a obcí před průběhem a následky povodní představuje jeden ze základních úkolů hydrologie a vodního hospodářství. Vytvoření účinné ochrany je velice obtížné a přístup k této problematice prošel během svého vývoje mnoha změnami. Oproti původnímu „centralizovanému“ přístupu k protipovodňové ochraně se stále častěji uplatňuje tzv. integrovaná protipovodňová ochrana (Langhammer et al., 2008b; Dumbrovský et al., 2006). Hlavním rysem tohoto přístupu je komplexní řešení protipovodňové ochrany v rámci celého povodí namísto izolovaných opatření převážně technického rázu (Drbal et al., 2007). Přírodě blízká opatření plní jak funkci vodohospodářskou, tak ekologickou a celý koncept se opírá o platnou legislativu vycházející ze směrnice Evropského parlamentu a Evropské rady 2000/60/ES ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky (MŽP ČR, 2009a) a na ní navazující opatření např. zákon č. 254/2001 Sb. o vodách a vyhláška č. 142/2005 Sb. o plánování v oblasti vod.

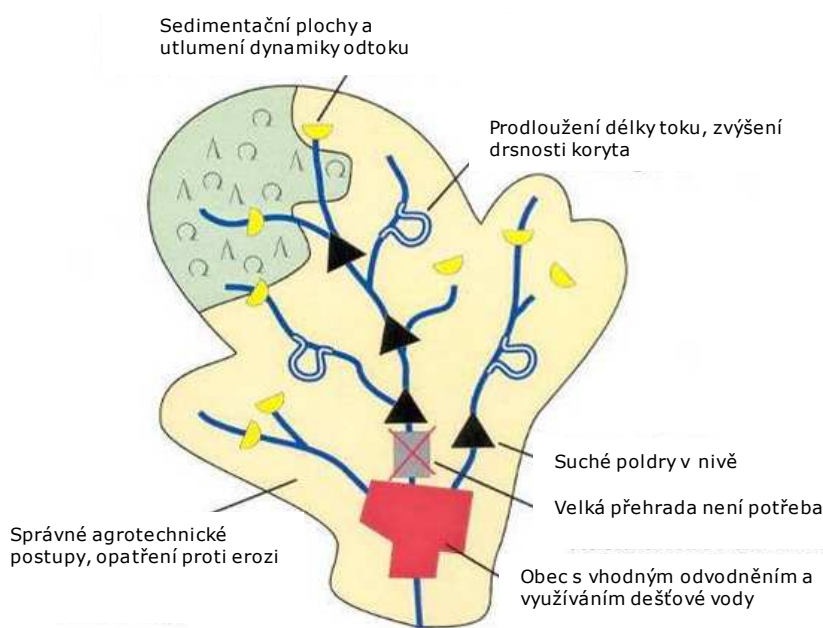
Celoevropská diskuze, která byla zesílena po velkých povodních v nedávných letech, vyústila k sestavení a přijetí směrnice Evropského parlamentu a Evropské rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik, jejímž cílem je „snížit nepříznivé účinky na lidské zdraví, životní prostředí, kulturní dědictví a hospodářskou činnost, které souvisejí s povodněmi ve společenství“ (MŽP ČR, 2009b). Směrnice ukládá členským státům předběžné vyhodnocení povodňových rizik pro každou oblast povodí a vytvoření map povodňového nebezpečí a map povodňových rizik a vypracování plánů pro zvládání povodňových rizik. Ty se mají soustředit především na prevenci, včetně systémů předpovědí a varovných systémů, a mohou zahrnovat také podporu udržitelného využívání území, zlepšení retence vody v krajině a kontrolované zaplavení oblasti v případě výskytu povodně.

Ačkoliv je IPPO do velké míry zakotvena v současné legislativě EU a České republiky, její přesná definice je obtížná. Jednotliví autoři (např. Dumbrovský et al., 2006; Assmann, 1999; Langhammer et al., 2008b) uvádějí konkrétní studie na vybraných povodích, ve kterých volně formulují obecné zásady IPPO doplněné o přehled navrhovaných nebo realizovaných opatření. Z uvedených studií vyplývá obecný rys integrované protipovodňové ochrany, tedy že IPPO je realizována v kontextu celého sledovaného povodí kombinací klasických strukturálních (technických) opatření a tzv. „měkkých“ opatření, která lze označit jako přírodě blízká a která jsou realizována v ploše celého povodí. Z uvedených i dalších studií (např. Szolgay a Danáčová, 2007; Řehák a Svatoš, 2006; Šnebergerová a Fošumpaur, 2007), které se zabývaly návrhem IPPO v různých povodích Česka a Slovenska (Opava, Orlice a Třebůvka, Loučka, dolní Morava), se jako nejčastější řešení uplatňuje výstavba suchých poldrů v údolních nivách, která je doplněna o přírodě blízká opatření ve smyslu změn využití půdy, úprav koryt nebo zlepšení agrotechnických postupů.

Opatření integrované protipovodňové ochrany je možné podle Schulteho et al. (2007) a Assmanna (1999) rozdělit do několika skupin (tab. 1). Rozlišit lze opatření přírodní a opatření v intravilánu obcí. Z této klasifikace vychází prostorové rozmístění opatření, které je uvedeno na obrázku 2.

Tabulka 1 Opatření decentralizované integrované protipovodňové ochrany (upraveno podle Schulte, 2007 a Wegner, 1992)

Typ opatření	V zástavbě	Mimo zástavbu
Opatření v ploše	Zadržení a využití dešťové vody	Změny krajinného pokryvu, změny v lesním hospodářství
	Účinné odvodnění	Změna zemědělských postupů obdělávání půdy
	Zatravnění střech	Správné odvodnění komunikací a cestní sítě
		Vytvoření zasakovacích pásů, mezí
Opatření v korytě	Umožnit volný průtok vody	Retence vody pomocí suchých poldrů v nivě
	Zadržení škodlivých látek	Využití kaskády nádrží pro retenci vody ve strmých korytech toků
		Revitalizace koryt, umožnění rozlivů
		Úpravy drenážní sítě dříve odvodněných oblastí (například rašelinišť)
Bodová opatření	Zařízení k zadržení dešťové vody	Nádrže
		Retence s využitím náspů komunikací



Obr. 2 Koncept decentralizované integrované protipovodňové ochrany (podle Assmann, 1999)

Uvedené postupy lze podle Schulteho et al. (2007) kombinovat v závislosti na konkrétních hydrologických a geomorfologických podmínkách v povodí. K ověření účinnosti opatření je možné využít hydrologické modelování společně s analýzami v prostředí GIS a DPZ, monitoringem hydrologických a klimatologických veličin, geodetickými měřeními nebo hydroekologickým monitoringem. V předložené disertační práci byly pomocí dále popsanych metod testovány účinky dvou skupin opatření – změny krajinného pokryvu (a jejich vliv na zimní i letní povodně) a retence vody v povodí pomocí suchých nádrží (poldrů) v pramenných oblastech vodních toků. Změny

krajinného pokryvu patří mezi „měkká“, přírodě blízká opatření, které plní především funkci retence vody v krajině, a to nejen při povodňových průtocích, ale také v období sucha. Naproti tomu četné studie (Drbal et al., 2007; MŽP ČR, 2008) ukazují na omezenou schopnost pro snížení kulminací extrémních povodní. Účinnost suchých nádrží je determinována především jejich kapacitou a systémem řízení a lze na ně pohlížet jako na kompromis mezi klasickými strukturálními a měkkými opatřeními.

1.2 HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ JAKO NÁSTROJ HODNOCENÍ PRŮBĚHU POVODNÍ

1.2.1 HYDROLOGICKÝ MODEL

Matematický model srážko-odtokového procesu představuje zjednodušený kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami hydrologického systému. Ten je definován jako systém převážně fyzikálních procesů působících na vstupní proměnné, které pak transformuje ve výstupní veličiny. V matematickém vyjádření jde o algoritmus řešení soustavy rovnic, které popisují strukturu a chování systému (Clarke, 1973 In Fleming, 1979). Srážko-odtokové a hydrodynamické modely našly svoje uplatnění při řešení nejrůznějších hydrologických úkolů, které lze shrnout do tří kategorií:

- Operativní hydrologické předpovědi
- Návrhová a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství
- Výzkumná činnost

V prvním případě se jedná o aplikaci modelu v operativní hydrologii, kdy vstupní data tvoří kromě stavových veličin také okamžité údaje z automatických meteorologických stanic nebo radarů. Data jsou v tomto případě automaticky předávána modelu a prioritou je rychlost jejich zpracování a převedení na krátkodobou předpověď vodního stavu či průtoku v určitém profilu. Ve druhém případě, v oblasti vodního hospodářství, jde jednak o dlouhodobější řešení protipovodňové ochrany (např. stavba přehrad, poldrů, změna vegetačního pokryvu a další hydrotechnická či hydromeliorační opatření), ale také je použití hydrologických a hydrodynamických modelů užitečné při řešení nejrůznějších technických staveb od plavebních kanálů, čističek odpadních vod až po mosty. Pod třetí kategorií využití hydrologického modelu se skrývá především výzkum komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis. Pro tyto účely jsou často zřizována experimentální povodí s rozsáhlou sítí měřících stanic. V neposlední řadě mohou výstupy z hydrologického modelu sloužit jako vstupní veličiny dalších modelů, například modelů šíření znečištění ve vodním prostředí (Jeníček, 2007a).

Z uvedené klasifikace vyplývá obecně rozdělení do dvou kategorií – modely porozumění (*models for understanding*) a modely rozhodování (*decision models*). Toto rozdělení (Wainwright a Mulligan, 2004) nevychází pouze z hydrologického modelování, ale je zobecněním platným pro jakoukoliv oblast lidské činnosti, kde se modely uplatňují (modely přírodních procesů, ekonomické modely, populační modely, DSS, atd.). Modely porozumění se pomocí určitých zjednodušení snaží

popsat chování systému (povodí) a jsou tak nástrojem k pochopení zákonitostí přírodních procesů probíhajících v povodí. Modely rozhodování vychází sice ze stejných principů, jejich účel ale spočívá především v podpoře rozhodování ve vodním hospodářství například při projektování protipovodňových opatření nebo v operativní hydrologii.

Obecnou i podrobnější charakteristikou hydrologických modelů, jejich klasifikací nebo možnostmi a omezeními využití se zabývají četné studie a publikace, například Kulhavý a Kovář (2002), Daňhelka et al. (2003) nebo Starý (2004). Ze zahraničních příspěvků lze zmínit například publikace Wainwright a Mulligan (2004), Beven (2001), Blöschl a Grayson (2002) a mnoho dalších autorů, kteří aplikovali nejrůznější hydrologické modely a výrazně tím přispěli k vývoji metod popisujících srážko-odtokový proces. Výše uvedené práce dokazují, že důraz je kladen především na přesnější zpracování srážkových polí jako vstupu do modelu, hlavně v podobě radarových odhadů (Cole a Moore, 2008).

Významný prostor je také věnován postupům kalibrace modelu, především procesu automatické optimalizace vstupních parametrů (Khakbaz et al., 2009; Liu, 2009). Častým tématem je vývoj metod popisujících proudění v nenasycené zóně půdního profilu a prostorová variabilita půdních parametrů (Quinn et al., 2005; Manfreda et al., 2007). Významným příspěvkem do problematiky hydrologických a hydrodynamických modelů byl projekt DMIP (*Distributed Model Intercomparison Project*), který si dal za cíl srovnání několika srážko-odtokových a hydrodynamických modelů a jejich přístupů (Smith et al., 2004; Reed et al, 2004).

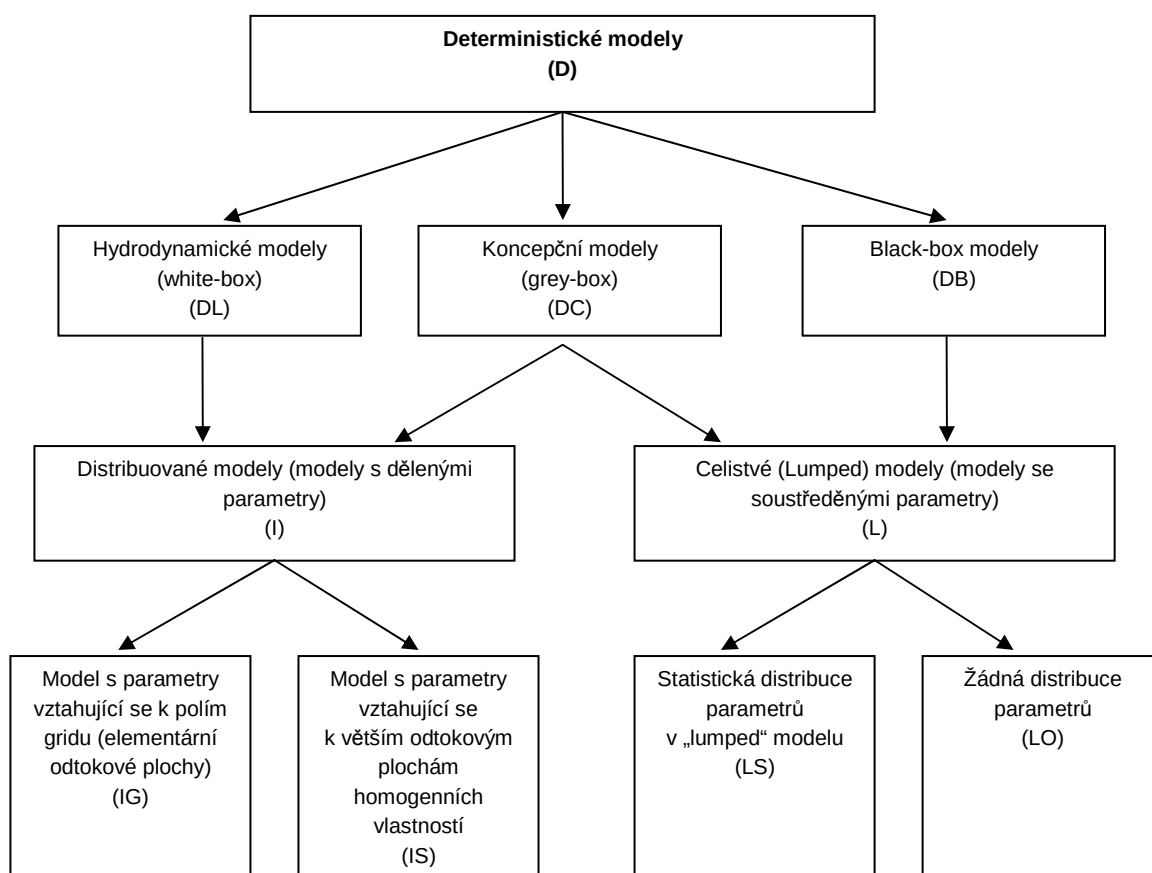
Využitelné informace o metodách výpočtu jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu poskytují obsáhlé publikace věnované hydrologii, například Baumgartner, Liebscher (1996), Dyck a Peschke (1983) nebo Maidment (1993). Mnoho z těchto i dřívějších přístupů je zahrnuto v metodikách a doporučeních WMO (*World Meteorological Organisation*), například USACE (1994), Becker a Serban (1990) a WMO (1983).

1.2.2 KLASIFIKACE HYDROLOGICKÝCH MODELŮ

Do dnešní doby byla vyvinuta celá řada modelů, které se od sebe odlišují různými přístupy k jednotlivým komponentám srážko-odtokového procesu nebo ke struktuře zkoumaného povodí, často v důsledku toho, za jakým účelem a pro jakou oblast byl model vyvíjen. Postupem času se ukázaly podobnosti nebo naopak odlišnosti v jednotlivých pojetích, podle kterých se pak hydrologické modely začlenily do různých kategorií. Uvedená klasifikace podle WMO vychází z několika principů (Becker a Serban, 1990):

- Rozdělení dle účelu aplikace
- Klasifikace z hlediska typu systému
- Klasifikace z hlediska typu hydrologického procesu
- Klasifikace podle stupně kauzality
- Klasifikace podle míry časové a prostorové diskretizace

Nejdůležitější a také nejčastěji používaná kritéria dělení představují stupeň kauzality a dělení podle prostorové a časové diskretizace. Podle prvně zmíněného principu se dělí modely na deterministické a stochastické. Deterministické modely jsou popsány vztahem závislých (výstupních) proměnných a nezávislých (vstupních) proměnných (obr. 3). Stochastické modely primárně neobsahují vazbu mezi příčinou a důsledkem, přičemž se odlišují pravděpodobnostní modely a modely generování časových řad. V praxi se často využívá obou přístupů. Stochastická složka je přítomna nejen ve většině modelů v oblasti plánování a projekční činnosti vodohospodářských staveb, ale někdy se využívá i v operativní hydrologii, zejména pro dlouhodobé předpovědi (Daňhelka et al., 2003). Obecně lze říci, že deterministický přístup v současnosti převažuje.



Obr. 3 Klasifikace deterministických modelů (podle Becker a Serban, 1990)

Z diagramu (obr. 3) je také zřejmé členění podle prostorové diskretizace. V dnešní době se kromě distribuovaných a celistvých modelů odlišují také modely semi-distribuované. Parametry těchto modelů nejsou vztahovány dílčím povodím (jako je tomu u lumped přístupu) ani k pravidelné síti (jako v případě distribuovaného přístupu), ale k relativně malým jednotkám, které jsou z hlediska svých fyzickogeografických charakteristik homogenní.

V koncepčním deterministickém přístupu lze jen stěží postihnout všechny vstupní parametry a proměnné, které ovlivňují výstupní veličiny. Každý takový model je zatížen určitou chybou, která je složena ze dvou dílčích chyb – chyba měřených veličin a vlastní chyba modelu. Obě je možné popsat určitým pravděpodobnostním rozdělením (Becker a Serban, 1990).

1.2.3 VYUŽITÍ GIS V HYDROLOGICKÉM MODELOVÁNÍ

Vlastním simulacím v hydrologických modelech předchází zpracování obrovského množství prostorových dat. Geografické informační systémy (GIS) představují ideální nástroj nejen pro uvedené zpracování dat, ale také pro následnou vizualizaci vypočtených hodnot (viz Jeníček a Němečková, 2007). Základní koncept použití GIS v hydrologickém a hydrodynamickém modelování je podle Adamce et al. (2007) tvořen třemi hlavními kroky. Prvním krokem je příprava dat (tzv. pre-processing) v konkrétním nástroji GIS a jejich export do hydrologického modelu. Druhý krok tvoří simulace modelu a třetím krokem je následný export výsledných dat do prostředí GIS a jejich zpracování, vizualizace a interpretace (tzv. post-processing).

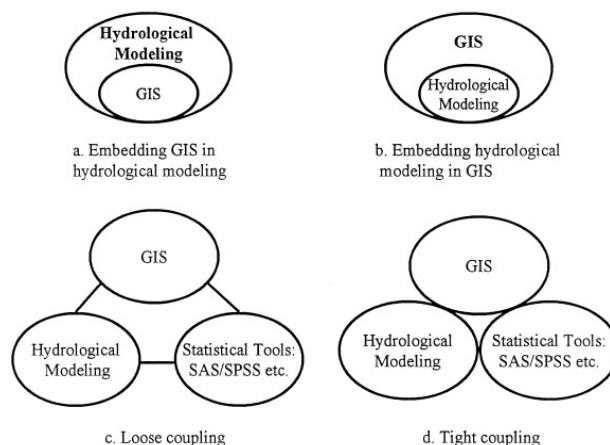
Podle Sui a Maggio (1999) existují v současné době čtyři hlavní přístupy k propojení GIS a hydrologických modelů (obr. 4). První z nich spočívá v zahrnutí GIS do hydrologického modelu. Tím je možné přímo v prostředí modelu zpracovávat prostorová data. To dává uživateli možnost využít nejnovější poznatky hydrologického modelování. Nevýhodou je případná nekompatibilita s komerčními GIS softwary. Příkladem tohoto propojení je model WMS, který vznikl jako samostatně se vyvíjející větev modelu HEC-1 a který v sobě integruje nástroje pro pre- a post-processing prostorových dat.

Druhý, opačný případ, je zapojení hydrologického modelu do GIS. Zahrnutí celého výpočetního procesu v rámci GIS se ale neukazuje jako výhodné, spíše jsou vyvíjeny pouze dílčí nástroje GIS pro zpracování prostorových a časových dat a jejich následný export do hydrologického nebo hydrodynamického modelu. Příkladem jsou rozšíření pro ESRI produkty, jako GeoHMS, GeoRAS (extenze pro modely HEC-HMS a HEC-RAS) nebo ArcHydro.

Asi nejčastějším příkladem je tzv. volná vazba mezi GIS a modelem. Tento typ vazby nevykazuje žádné programové propojení mezi GIS a konkrétním modelem. Data jsou zpracována v GIS nebo v statistických nástrojích, upravena do potřebného formátu a přenesena do modelu. Výsledky simulací modelu jsou předány zpět GIS k dalšímu zpracování.

V případě těsné vazby mezi modelem a GIS, nebo statistickým nástrojem existuje programové propojení mezi jednotlivými částmi založené například na bázi DDE (*Dynamic Data Exchange*) nebo .NET platformy.

Uvedená propojení uvádí také Al-Sabhan et al. (2003), který zdůrazňuje vazby na webové aplikace, zejména u modelů pro operativní předpověď. V prostředí GIS je také možné odhadovat některé parametry povodí, a tím lépe vystihnout jejich prostorovou variabilitu. Jak uvádí Schumann et al. (2000), tato skutečnost pozitivně přispívá k procesu manuální nebo automatické kalibrace parametrů, která je prováděna přímo v modelu. Pro podmínky České republiky je významným přínosem práce Šercla (2009), která se věnuje stanovení parametrů hydrologických modelů na základě fyzicko-geografických charakteristik povodí odvozených v nástrojích GIS. Motivací jeho práce byl fakt, že většina standardních hydrologických údajů poskytovaných ČHMÚ pro vypracování projektů je zpracovávána pro malá nepozorovaná povodí.



Obr. 4 Typy vazeb mezi GIS a hydrologickými modely (Sui a Maggio, 1999)

1.2.4 VÝBĚR VHODNÉHO MODELU

Při výběru vhodného modelu je dobré vzít v úvahu několik kritérií, které závisí například na charakteru zkoumaného povodí nebo na dostupných datových podkladech. Souhrn těchto kritérií je následující (Jeníček, 2007a):

- Přizpůsobivost místním podmínkám a úkolu, na který je model aplikován
- Schopnost simulovat odtokový proces v prostorovém i časovém kroku, který odpovídá velikosti povodí
- Propojení srážko-odtokového modelu s podrobným korytovým (routing) modelem
- Dostupnost dat, která jsou modelem vyžadována
- Vazba na podpůrné programy, např. pro zpracování dat, vytváření grafických výstupů, zapojení GIS
- Komerční dostupnost modelu, dostupná systémová podpora, reference

Základním předpokladem je, aby byl použitý model schopen simulovat srážko-odtokové procesy v daných fyzicko-geografických podmínkách. Je třeba uvážit, jestli pro řešení dané problematiky použít model celistvý, distribuovaný nebo semi-distribuovaný. Cílem nejrůznějších projektů může být také snaha o aplikaci různých modelovacích konceptů, jejichž výsledkem je analýza kladů a záporů použitých přístupů (Smith et al., 2004). Při modelování na rozlehlejších povodích, u kterých nabývá na významu komponenta postupu vody v korytě toku, může být výhodné kombinovat srážko-odtokový model s vhodným routing modelem (viz např. Havlík, 2003). Při využití modelu v hydrologické prognóze je výhodou zapojení softwarových prostředků pro sběr, přenos a databázové zpracování dat. Při práci s daty se také stále více uplatňuje zapojení GIS.

1.3 ZMĚNY V KRAJINĚ A POVODNĚ

1.3.1 PŘÍSTUPY K HODNOCENÍ Vlivu ZMĚN V KRAJINĚ NA PRŮBĚH POVODNÍ

Základní přístupy, které je možné využít ke kvantifikaci vlivu změn v krajině na povodně, je možné rozdělit do dvou základních kategorií:

- Stochastické metody
- Deterministické metody

Stochastický přístup v kvantifikaci vlivu změn v krajině vychází především ze statistického vyhodnocení pozorovaných údajů, především srážek a odtoku. Nutnou podmínkou je existence dlouhých časových řad srážek a průtoků. Pomocí vybraných statistických metod, například korelační, regresní nebo shlukové analýzy, je možné detekovat změny v průběhu časových řad a označit potenciální období, ve kterých došlo ke změně průběhu srážek nebo odtoku. Takto identifikovaná období je nutné podrobit další analýze za účelem zjištění příčiny uvedených odchylek.

Změnami odtoku identifikované na pozorovaných datech pomocí analýzy jednoduchých a podvojných součtových řad se dlouhodobě zabývají např. Kliment a Matoušková (2006, 2008), kteří analyzovali změny odtoku na různých povodích v České republice a došli k závěru, že změny nalezené pomocí analýzy součtových řad srážek a průtoků korespondují se změnami krajiny především v době intenzifikace zemědělství a meliorací toků. Zmíněné úpravy se negativně promítly do hydrologické bilance povodí. V práci Píchala (2009) byly změny odtoku pomocí stejné metodiky sledovány na povodích Loupnice, Bíliny, Chomutovky a Rolavy v Krušných horách. Změny v bilanci srážek a odtoku v různé míře identifikované na uvedených povodích ukázaly na roli odlesnění vrcholových částí Krušných hor vlivem imisní kalamity v 70. a 80. letech minulého století. Z provedených analýz vyplynula také velká nejistota výsledků, která je dána problematickými podklady, především vstupními časovými řadami. Díky časté nutnosti doplnění chybějících údajů byla do výsledků zanesena možná nejistota a výsledné hodnoty je nutné vnímat jako orientační. Gan (1998) ve své práci sledoval pomocí Kendalova testu trendy srážkového a teplotního režimu a možné oteplování klimatu v kanadských prériích a na základě rozboru časových řad z předešlých 37 let prokázal oteplování oblasti a také zvyšování výskytu suchých období.

Deterministický přístup, který je stěžejním přístupem použitým v této disertační práci, vychází z metod hydrologického modelování. V obecné rovině se jedná o zjišťování vztahu mezi vstupními a výstupními veličinami, tedy o vyjádření kauzality přírodních procesů. V deterministickém modelování jde o popis fyzikálních procesů, které působí na vstupní proměnné a které se transformují ve výstupní veličiny. V matematickém vyjádření jde o algoritmus řešení soustavy rovnic, které popisují strukturu a chování systému (Clarke, 1973). Jak je uvedeno v následující kapitole, deterministický přístup je v hodnocení změn odtoku velmi rozšířený a je zřejmé, že se hydrologické modely staly standardním nástrojem pro kvantifikaci vlivu změn v krajině na povodně a pro posuzování účinnosti různých protipovodňových opatření.

Obecně lze říci, že statistické analýzy jsou vhodným nástrojem bilančního posouzení změn srážko-odtokového režimu, nicméně pro hodnocení krátkých epizodních událostí se jeví jako vhodnější použití hydrologického modelování. K aplikaci obou uvedených přístupů slouží celá řada doplňkových metod, které umožňují sběr a analýzu podkladových dat. Jedná se především o analytické metody obsažené v nástrojích GIS (Unucka a Adamec, 2008; Jeníček a Němečková, 2007; Brůna, 2003) a dálkového průzkumu Země (Bicanová, 2008).

Přírodní i antropogenní změny v krajině a jejich dopad na přírodní procesy jsou tradičním výzkumným tématem (Dostál a Langhammer, 2007; Langhammer, 2008b), který často sleduje trendy ve vývoji krajiny a následně kvantifikuje dopady změn na lidskou společnost. K hodnocení změn jsou standardně používány nejrůznější analytické metody (terénní mapování, analýza pomocí GIS a DPZ) a ke kvantifikaci dopadu změn jsou používány jak deterministické, tak stochastické metody hodnocení (viz Langhammer, 2007b).

1.3.2 MODELOVÁNÍ VLIVU ZMĚN V KRAJINĚ NA PRŮBĚH POVODNÍ

Využitím hydrologických modelů ke kvantifikaci vlivu vegetace na extrémní povodně se zabývá řada autorů. Půdní a vegetační podmínky hrají při generování odtoku velmi významnou roli. K důležitým pracím zabývajícím se uvedenou problematikou patří studie Fohrer et al. (2001), Klöcking a Haberlandt (2002) nebo Unucka a Adamec (2008). Tito autoři se zabývali především vlivem antropogenních změn v krajině na odtok z povodí. Velký důraz je kladen na roli lesa (Robinson et al., 2003). Zimmermann et al. (2006) sledoval vliv změn landuse na hydrologické vlastnosti půdy, například na rychlost infiltrace a nasycenou hydraulickou vodivost. Hlavním výsledkem uvedeného výzkumu bylo zjištění „paměťového efektu“ půdy v závislosti na předchozí vegetaci, tedy, že hydrologické vlastnosti půdy zůstávají po určitou dobu neměnné.

Nedílnou součástí výzkumů je také modelování na různých měřítkových úrovních. Tímto se ve svých studiích zabýval například Payraudeau et al., (2003). Vliv hypotetických změn krajinného pokryvu na kulminace N-letých povodní zkoumala na povodí Hronu Hlavčová et al. (2008). Výsledky ukázaly na prudké snížení kulminace při uvažování přírodní (potenciální) vegetace, nicméně při různých variantách současné vegetace již rozdíly nebyly tak výrazné. Nejistoty vzniklé v modelování neodráží jen dostupnost a kvalitu vstupních dat, ale také koncepci použitého modelu a způsob parametrizace skutečných procesů probíhajících v přírodě. Z tohoto pohledu je podle Hlavčové et al. (2009) potřeba výsledky ověřit pomocí přímých experimentů a modelováním na jiných povodích.

Při posuzování vlivu krajinného pokryvu na odtok z povodí existují v podmínkách České republiky četná specifika. V 70. a 80. letech minulého století docházelo k výrazné změně struktury zemědělského půdního fondu spojené s hydrotechnickými opatřeními (hydromeliorace, napřimování toků, odvodnění rašelinišť). Uvedené změny měly nesporný význam pro koncentraci odtoku v povodí (v negativním smyslu). Vývoj po roce 1989 směřuje ke snaze o návrat toků svému přírodnímu režimu. Důvodem je snaha o zvýšení retenční schopnosti krajiny a zmírnění následků extrémních povodní. Uvedené problematice se věnuje řada autorů, např. Langhammer a Vajskebr (2006), Langhammer, (2007a), Doležal et al. (2004), Kliment a Matoušková (2008).

Ve vrcholových oblastech Krušných a Jizerských hor vzniklo během 70. a 80. let ještě další specifikum – zničení lesních porostů vlivem přítomnosti obrovského množství škodlivých látek v ovzduší pocházející z průmyslové činnosti člověka. Také tato skutečnost mohla mít významný vliv na koncentraci odtoku, především v pramenných oblastech. Podobný význam může mít také kůrovcová kalamita na Šumavě. Detekcí míst zasažených kůrovcem a holých sečí pomocí metod DPZ se zabýval Hais et al., 2009. Nové metody, které vznikají na základě podobných studií, mohou být obecně využity pro přesnější analýzy změn krajinného pokryvu především na malých územích.

1.4 SUCHÉ RETENČNÍ NÁDRŽE V PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANĚ

Koncepční posun od klasického pojetí protipovodňové ochrany k „decentralizovanému“ chápání opatření je zřejmý z mnoha studií, např. Fohrer et al. (2001), Bölscher a Schulte (2007) nebo Drbal et al. (2007). V České republice je v rámci integrované protipovodňové ochrany bezesporu zajímavou výzvou výzkum pramenných oblastí toků, které byly narušeny lidskou činností, např. rašelinišť (Kocum a Janský, 2008) nebo důsledky způsobené masivním úhynem lesních porostů (Blažková a Kolářová, 1994) a obecně vlivem krajinného pokryvu na odtok z povodí (Pobříslavská a Kulasová, 2000; Jeníček, 2007b; Jeníček, 2009a). Z výsledků výzkumů je zřejmé, že integrovaná protipovodňová ochrana může být účinným doplňkem klasických opatření, obecně je ale nemůže v plné míře nahradit (Langhammer et al., 2008b; Drbal, et al., 2007). Ne vždy je také ochrana před povodněmi jediným účelem daných opatření. Další jsou např. energetika nebo zásobování pitnou vodou.

Z dosavadních výzkumů klimatické změny také vyplývá, že naše území může být zasaženo výraznějšími výkyvy hydrologických extrémů, tedy nejenom povodněmi, ale i suchem a zmenšením zásob podzemní vody (IPCC, 2007, Horáček et al., 2008). V tomto případě jsou technická opatření (například nádrže) obtížně nahraditelná a konkrétní řešení bude vždy vycházet z širšího pojetí vodohospodářského managementu povodí.

To vyplývá i z výsledků studie koncepčního řešení protipovodňové ochrany na Opavě (MŽP ČR, 2008, Mana, 2007). Diskuze o zvýšení ochrany měst a obcí v povodí Opavy se obnovila po povodni 1997, po které byly na celém území zaznamenány obrovské škody. V této souvislosti byla aktuální otázka vybudování nádrže Nové Heřmínovy. Proti tomuto záměru se ale zvedla obrovská vlna kritiky, protože výstavba nádrže by znamenala zatopení velké části stejnojmenné obce. Proto byla vypracována řada studií (viz Langhammer et al., 2008b), které měly za úkol vytvořit a kvantifikovat vliv různých variant opatření (Mana, 2007). Vliv všech opatření byl zjišťován pomocí hydrologického modelování, čímž byla zajištěna srovnatelnost variant. S ohledem na další faktory tvořící podklady pro rozhodování (kromě odborných a ekonomických také sociální, psychologické a politické) byla podle usnesení vlády ze dne 21. 4. 2008 č. 444 (Vláda ČR, 2008) vybrána varianta menší nádrže Nové Heřmínovy doplněná o další „měkká“ opatření, jako jsou revitalizace toků, suché poldry a zlepšení zemědělských postupů a využití půdy.

Podobné projekty byly provedeny i na jiných povodích, například Orlici (Řehák a Svatoš, 2006), v povodí Loučky (Dumbrovský et al., 2006) nebo na dolní Moravě (Szolgay a Danáčová, 2007).

Ze zahraničních studií je obdobný přístup zřejmý ze studie Quinn et al. (2001) provedené v Kalifornii. Cíle této studie by se daly formulovat jako snaha o přizpůsobení managementu povodí (kvalita vody, funkce ekosystémů, zásobování pitnou vodou, atd.) měnícím se klimatickým podmínkám, především možnému zvýšení četnosti extrémních klimatických a následně hydrologických jevů. Výsledkem bylo vytvoření systému podpory rozhodování (DSS), který je schopný odhadnout míru zranitelnosti ekologické a vodohospodářské funkce povodí v závislosti na klimatických změnách a zároveň formulovat kroky potřebné pro zmírnění dopadů těchto změn.

Významem suchých nádrží jako prvku protipovodňové ochrany se zabýval také Schulte et al. (2009) nebo Jamitzky (2006). V povodí horní Flöhy/Flájského potoka po závěrový profil Olbernhau (na území ČR jde o Flájský a Načetínský potok a jejich přítoky) bylo cílem jejich výzkumu navrhnout přírodě blízká opatření (ve smyslu dělení uvedených na počátku kapitoly), která mohou zvýšit retenční schopnost krajiny a zároveň snížit odtokovou odezvu na extrémní povodně. Výsledkem bylo vytvoření katalogu protipovodňových opatření pro dané území a přesná kvantifikace jejich vlivu na povodně, včetně zohlednění různých variant realizace s různou dobou opakování kulminačního průtoku.

1.5 VÝZKUM SNĚHOVÉ POKRÝVKY

1.5.1 HISTORICKÝ PŘEHLED VÝZKUMU SNĚHU

Historický přehled vědeckého zájmu o sníh přináší například publikace „Snow and glacier hydrology“ (Singh a Singh, 2001). Zvýšený zájem o tuto problematiku lze vysledovat do počátku 20. stol., ačkoliv dílčí studie věnované sněhu jsou i staršího data (Singh a Singh, 2001). Významné bylo období výzkumů ve 20. a 30. letech, které vyvrcholilo založením komisí věnovaných problematice sněhu a ledu. Příkladem je International Glaciological Society založená roku 1936 nebo International Commission on Snow and Ice, která byla založena roku 1936. Hlavní roli v této době hrály výzkumy v alpských zemích, vyzdvihován je rovněž význam japonských výzkumů. Do doby těsně po druhé světové válce jsou datovány první pokusy o modelování odtoku z tajícího sněhu. V Česku a na Slovensku lze počátky disciplíny hydrologie sněhu položit do 60. let 20. stol. (např. Ferda et al., 1971). Mezi první práce zabývající se sněhovou pokrývkou se ale dají zařadit výzkumy profesora Františka Augustina z počátku minulého století.

1.5.2 METODY MĚŘENÍ SNĚHOVÉ POKRÝVKY

Základní údaje reprezentující sněhovou pokrývkou z hydrologického hlediska představují výška sněhové pokrývky (SCE) a vodní hodnota sněhu (SWE). Vodní hodnota je obtížněji měřitelná než výška, ale pro hydrologii představuje daleko cennější údaj, který v sobě přímo obsahuje informaci o množství vody akumulované ve sněhové pokrývce. Měřicí techniky je možné rozdělit do tří skupin:

- Staniční měření (měření pomocí permanentně umístěných zařízení)
- Mobilní terénní výzkum (expediční měření)
- Údaje získané pomocí dálkového průzkumu Země (DPZ)

Z novějších studií, které se věnují problematice měření sněhové pokrývky, je možné zmínit například práci Carroll a Cressie (1997). Uvedená studie se zaměřila na vývoj metodiky pro americkou NWS (*National Weather Service*) s cílem vyvinout způsob stanovení vodní hodnoty sněhu pro potřebu hydrologických předpovědí. Pomocí geostatistického modelu byla vytvořena závislost zkoumané veličiny na nadmořské výšce území pomocí dostupných pozorování ze stanic měřící výšku sněhové pokrývky. V práci Sorteberg et al. (2001) je nejvýznamnější pozornost věnována metodám stanovení výšky sněhové pokrývky přímým měřením a pomocí sněhových polštářů. Testovaná metodika byla poté ověřována pomocí matematického modelování. V práci Blöschl et al. (2005) je dokumentován výzkum měření vodní hodnoty sněhu (SWE, *Snow Water Equivalent*) v Rakousku. Pro zjištění rozložení SWE byla aplikována celá řada metod, kromě interpolace měřených bodových hodnot také využití dat DPZ a charakteristik povodí. Cílem bylo snížit celkovou nejistotu rozložení SWE. Pro verifikaci vstupních dat byl použit hydrologický model HBV.

Družicové systémy představují nejperspektivnější oblast vývoje DPZ a v současné době je na ně směřována hlavní pozornost. Obecně je pro měření využívána viditelná část spektra s blízkým infračerveným zářením a dále mikrovlnné pásmo. Zdá se, že i přes rychlý vývoj jsou tato data využitelná stále pouze na regionální úrovni (státy, povodí 1. a 2. řádu). Použití družicových snímků je testováno například pro horská povodí Alp, kde se zdá, že při korekci dat kalibrací s pozemním měřením je možné dosáhnout rozumné přesnosti při určování vodní hodnoty (Ranzi et al., 1998). Využití DPZ při zjišťování charakteristik o sněhové pokrývce dokumentují Rango a Shalaby (1998) nebo Gidda et al. (2002). Plošné pokrytí povrchu sněhem může být detekováno jednak na základě pozorování ve viditelné části spektra a také na základě radarových (mikrovlnných) dat (např. Riggs a Hall, 2004, Solberg et al. 2004, Koskinen, 2001). Radarová data jsou vhodná pro pozorování i dalších parametrů, například množství kapalně vody ve sněhu nebo výšky sněhové pokrývky, která pak může být použita pro odvození SWE (Storvold et al., 2006). Tait (1998) testoval metody zjišťování SWE za použití pasivní mikrovlnné radiace. Nejrozšířenějším způsobem určování vodní hodnoty sněhu využitím DPZ je detekce míry zeslabení přirozeného terestrického gama záření vodou akumulované ve sněhové pokrývce. Tato metoda je využívána zejména v severní části USA a Kanady, kde se měření vodní hodnoty provádí pravidelně od 80. let 20. stol. (Carroll, 2001). U zájmové oblasti musí být nejdříve změřena intenzita gama záření bez sněhové pokrývky. V období se sněhovou pokrývkou pak letadlo měří gama záření po stejné trase a na základě rozdílu měřených hodnot je vypočítávána vodní hodnota. Experimentálně se využívá i fotogrammetrických metod, které jsou ovšem zdrojem informací pouze o výšce sněhové pokrývky.

V České republice se problematice odtoku ze sněhové pokrývky s důrazem na metody sněhoměrných měření a statistickému vyhodnocení věnuje např. Barták (1995). Odhadem vodní hodnoty sněhu za využití dat měřených na klimatologických stanicích se zabýval Němec (2006). Výsledky vypočtené navrhovaným způsobem ukázaly na dobrou shodu měřených staničních a vypočtených hodnot SWE. Obecně lze velké rozdíly v prostorové distribuci sněhové pokrývky nalézt při ukládání a tání sněhu na otevřených plochách a v lese (Pobříšlová a Kulasová, 2000). Uvedené skutečnosti ale pravděpodobně platí pouze na lokální úrovni. V regionálním a globálním

měřítku pravděpodobně rozhodují nadřazené faktory jako je nadmořská výška a celkový úhrn srážek.

1.5.3 MODELOVÁNÍ ODTOKU ZE SNĚHU

V současné době je měření a modelování odtoku z tajícího sněhu u nás i v zahraničí věnována významná pozornost. Tání sněhu vlivem zvýšené teploty, doprovázené dešťovými srážkami, představují v České republice častou příčinu vzniku povodně. V zahraničí začala udávat současný směr výzkumu práce Obleda a Rosse (1977). Uvedení autoři vytvořili vlastní hydrologický model odtoku z tajícího sněhu. Tento model byl testován v severní části francouzských Alp jak na volných, tak na zalesněných povodích. Testováním různých matematických modelů tání sněhové pokrývky se zabývali Stähli a Jansson (1998). Fernández (1998) analyzoval různé metody založené na energetické bilanci. Essery (2003) testoval ve vysokohorském prostředí distribuovaný model MOSES, přičemž poukazuje na to, že významného zpřesnění bylo dosaženo rozdělením povodí na více zón podle nadmořské výšky. Ještě lepších výsledků bylo dosaženo zahrnutím vlivu vegetace.

Testováním modelu WaSIM-ETH na zaledněném alpském povodí se věnoval Verbunt et al. (2003). Uvedený model používá metodu teplotního indexu se zahrnutím sluneční radiace, což je obecně faktor, který významně zpřesňuje výsledky této metody oproti zahrnutí pouze teploty vzduchu. Pro výpočet akumulace a tání sněhové pokrývky je často používána metoda teplotního indexu v celé řadě variant (Ohmura, 2001; Hock, 2003). Weigert a Schmidt (2005) poukázali na jiný problém vznikající při modelování odtoku v zimních podmínkách. Jejich výzkum byl zaměřen na infiltraci vody při zmrzlé půdě za použití modelu EROSION 3D.

Také v České republice má modelování odtoku ze sněhu dlouholetou tradici. Základní přehled o problematice tání sněhu (včetně srážko-odtokového modelování) podává publikace Zezulák a Krejčí (2001). Blažková (1994) aplikovala v experimentálních povodích Jizerských hor model HBV-ETH. Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu pomocí modelu HBV se věnovala Hrušková (2006). Aktuální intenzivní výzkum na Slovensku dokumentují ve svém příspěvku Holko a Kostka (2007). Důraz výzkumu leží především v měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu na vybraných povodích. Výsledky jsou aplikovány v operativní hydrologii. Také v České republice se výzkum podřizuje především potřebám operativní hydrologie. Sněhová měření se stala standardní součástí aplikované hydrologie (Daňhlek a Řiřicová, 2005; Hančarová, 2006; Kašpárek, 2006).

V modelování odtoku ze sněhové pokrývky lze rozlišit dva základní okruhy metod:

- Metody založené na energetické bilanci (*energy balance methods*)
- Metoda indexů (*degree-day methods*)

Fyzikální přístup k modelování odtoku ze sněhové pokrývky se opírá o energetickou bilanci. Tato metoda sleduje a kvantifikuje toky na rozhraní atmosféra – sníh – půda. Energetickou bilanci lze popsat rovnicí 1.

$$Q_m = Q_{nr} + Q_h + Q_e + Q_p + Q_g + Q_q \quad (1)$$

kde Q_m je saldo energie dostupné na tání sněhu [$W \cdot m^{-2}$], Q_{nr} je radiační bilance, Q_h a Q_e je latentní a turbulentní teplo na rozhraní sněh – atmosféra, Q_p je teplo dodané srážkami, Q_g je teplo dodané půdou a Q_q je změna tepla uvnitř sněhové pokrývky (vše v $W \cdot m^{-2}$). Podle Singha a Singha (2001) je možné spočítat objem vody z tajícího sněhu podle rovnice 2.

$$M = 0,0031 \cdot Q_m \quad (2)$$

Určení jednotlivých členů energetické bilance je dosti složité, proto se často používá tzv. metody indexů. Ty využívají spojitosti mezi táním sněhu a snadno dostupnou veličinou, která má vztah k energetické bilanci (teplota vzduchu, srážky). Nejrozšířenější metodou je metoda teplotního indexu (*temperature index*). Indexem je v tomto případě teplota vzduchu a úbytek vodní hodnoty sněhové pokrývky M ($mm \cdot d^{-1}$) je počítán podle rovnice 3.

$$M = a \cdot (T - T_c) \quad (3)$$

kde a ($mm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$) udává úbytek vodní hodnoty sněhu za den způsobený změnou teploty vzduchu T o $1^\circ C$ oproti kritické hodnotě T_c , při které začíná proces tání. T je průměrná teplota vzduchu. Hodnota T_c se pohybuje mezi $0 - 2^\circ C$. Hodnota teplotního faktoru není stálá a mění se v závislosti na fyzikálních vlastnostech sněhu nebo na globální radiaci (je tedy závislá například na vegetačním krytu). Hodnoty se pohybují v rozmezí $1 - 7 mm \cdot ^\circ C^{-1} \cdot d^{-1}$. Existují různé modifikace, kromě teploty je možné zohlednit radiaci (Beven, 2001). Modelovací technika teplotního indexu je podrobně vysvětlena v části A, kapitole 2.

2 MATERIÁL A METODY

V následující kapitole jsou charakterizována podkladová data a metodické postupy, které jsou obecně využívány při řešení úkolů spojených s modelováním vlivu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany na průběh a následky povodní a které byly společné pro zpracování všech případových studií. Kapitola je rozdělena do třech částí. V první jsou uvedeny postupy týkající se podkladových dat, metod jejich sběru a následného zpracování. Druhá část se věnuje charakteristice modelu HEC-HMS, který byl hlavním modelovacím nástrojem použitý při řešení všech případových studií. Třetí část kapitoly tvoří stručná charakteristika zájmových území. Specifické metodické postupy použité při výzkumu v rámci disertační práce jsou uvedeny v kapitole „Materiál a metody“, která je součástí každé případové studie (část B).

2.1 PODKLADOVÁ DATA A METODY JEJICH ZPRACOVÁNÍ

2.1.1 MONITORING HYDROLOGICKÝCH A KLIMATOLOGICKÝCH VELIČIN

Pro analýzu srážko-odtokového režimu představují zásadní vstup data srážek a průtoků vztahujících se ke sledovanému povodí. V hydrologickém modelování jsou data využívána především pro kalibraci a následnou verifikaci modelu. Pro hodnocení jsou v disertační práci využívána převážně data ze stanic ČHMÚ a podniků povodí. Vzhledem k nedostatečnému množství těchto stanic, které chybí především v pramenných oblastech vodních toků, zavedla katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK od roku 2006 v rámci projektu VaV SM/2/57/05 (Langhammer et al., 2008a) vlastní monitoring hydrologických a klimatologických veličin. Vzhledem k umístění stanic a povaze měření jsou data při povodních využívána v rámci protipovodňové služby integrovaného záchranného systému (Česák et al., 2008a). Katedra provozuje ke konci roku 2008 v České republice 39 hladinoměrů a klimatologických stanic například v povodích Otavy, Blanice, Lužnice, Ohře, Střely a Opavy. Další stanice jsou instalovány v Kyrgyzstánu a v Peru.

Kontinuální monitoring výšky hladiny a vybraných fyzikálně-chemických parametrů v tocích je založen především na systému automatických měřících zařízení firmy Fiedler-Mágr (Fiedler-Magr, 2009). Měřicí sestava je složena z řídicí jednotky a ultrazvukového nebo tlakového snímače hladiny (obr. 5). V případě dostupného signálu GSM je jednotka doplněna modulem pro přenos dat technologií GPRS na internetový server. Data se odesílají v pravidelném intervalu nebo při dosažení limitních, případně gradientních hodnot. Sít stanic je možné použít jako varovný systém, který umožňuje zasílání SMS zpráv. Přístroje provádí kontinuální měření nejčastěji v intervalu 10 minut s přesností 1 mm. V profilech hladinoměrů jsou pravidelně prováděna měření průtoků hydrometrickou vrtulí za účelem vytvoření konsumpčních křivek. Kromě hladinoměrů jsou instalovány čtyři meteorologické stanice a několik člunkových srážkoměrů pro monitoring úhrnu dešťových srážek (obr. 5). V rámci kompletně vybavených meteorologických stanic jsou k dispozici data teploty a vlhkosti vzduchu ve výšce 2 m, přízemní teploty vzduchu, teploty půdy v několika

hloubkových úrovních, sluneční radiace, rychlosti a směru větru a úhrnu srážek (v některých případech včetně sněhových srážek).



Obr. 5 Klimatologická stanice na Hřebečné v Krušných horách (vlevo), ultrazvukový hladinoměr v pramenné oblasti Otavy (vpravo). Foto M. Jeníček, J. Kocum

V práci byly použity naměřené hodnoty ze sítě stanic katedry. Jednalo se o průtoky v časovém kroku 10 minut ze tří tlakových hladinoměrů umístěných na horním toku Bystřice a Chomutovky v Krušných horách a data srážek a teplot ze dvou klimatologických stanic umístěných na Hřebečné (Abertamy) a na Hoře Sv. Šebestiána. Uvedené stanice byly instalovány v letech 2006 až 2008 a jejich data byla využita pro kalibraci a verifikaci hydrologického modelu.

2.1.2 GEODETICKÁ MĚŘENÍ

Měření bodových polí v terénu pomocí elektrooptických přístrojů (např. totální geodetické stanice) umožňuje ve spojení s velice přesným systémem GPS navigace korigovaným systémem CZEPOS vytvoření bodového pole s vysokou přesností pro následné modelování v prostředí GIS. Zaměřené bodové pole, které vstupuje do modelů GIS, zpřesňuje představu o terénní situaci a umožňuje přesně vypočítat morfometrické charakteristiky, které jsou nezbytné při hydrologickém modelování.

Na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK v Praze je používána totální geodetická stanice Leica TCRP1202+. Tato totální stanice (TS) v sobě kombinuje jednak totální stanici a také přesnou GPS. Celý systém (tzv. Smart Station) je navíc doplněn samoobslužným radiovým spojením TS a výtyčky. Díky online- nebo post-processingové korekci dat v systému CZEPOS (česká síť permanentních stanic pro určování polohy) poskytované Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním a datovému přenosu GPRS je dosaženo přesnosti okolo 1 cm v horizontální poloze a 2-3 cm v poloze vertikální (Česák et al., 2008b). Katedra používá také starší systém Leica TCR 705,

který stejně jako výše zmíněná novější stanice umožňuje v kombinaci s geografickou GPS Leica GS20 a systémem CZEPOS měřit v režimu jak online-processingu, tak post-processingu (obr. 6).

Pro přesná polohová měření je využíván také Přístroj Laser Ace skotské firmy MDL Laser Systems, který umožňuje měření výšek, délek, ploch, objemů a sklonů (obr. 6). Využívá k tomu laserového dálkoměru a sklonoměru. Data mohou být ukládána do přístroje a následně přenesena do počítače. Přístroj byl v rámci práce využit pro doplňková měření příčných profilů. Jeho výhoda spočívá ve výrazně jednodušší obsluze a díky své nízké hmotnosti a malým rozměrům je vhodný zejména při měření na větších územích.



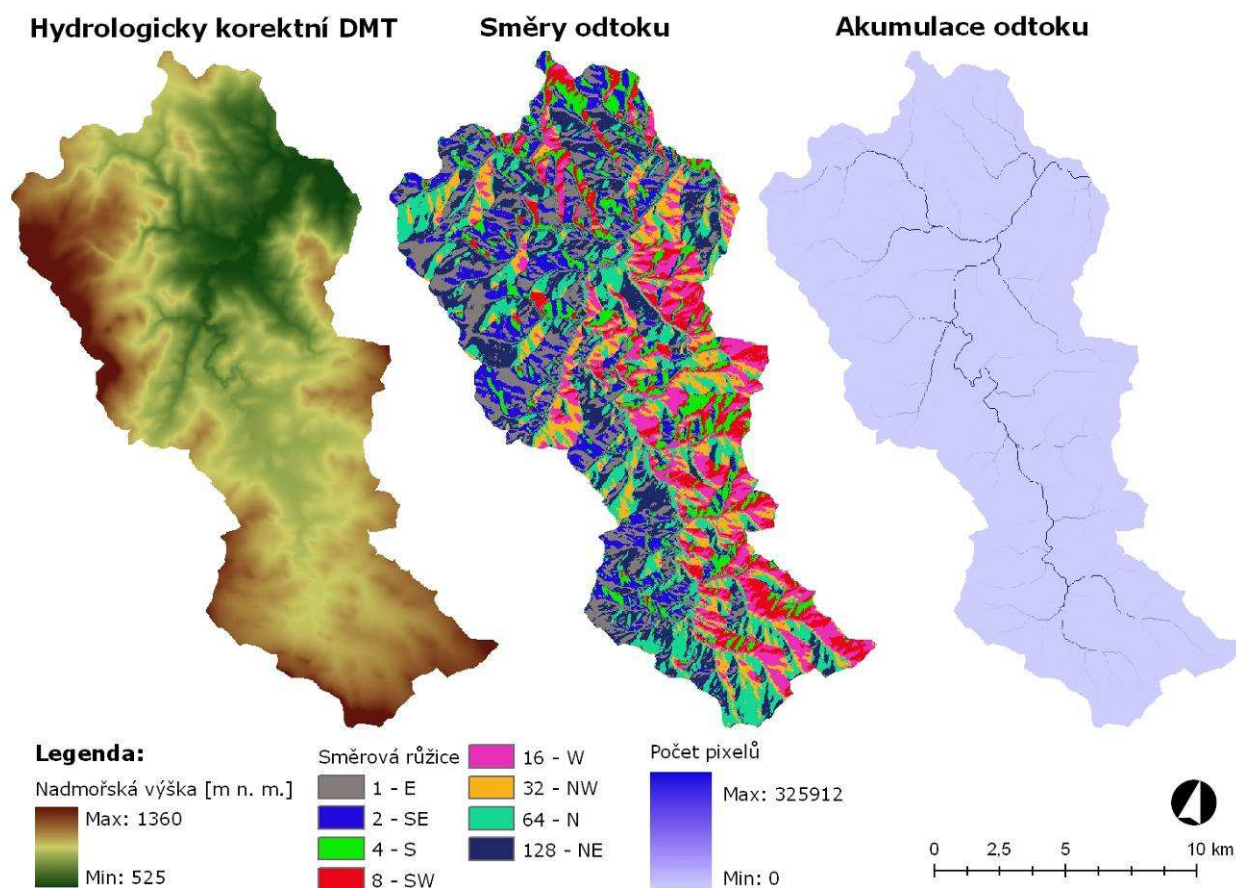
Obr. 6 Totální geodetická stanice (vlevo), laserový dálkoměr a sklonoměr LaserAce (vpravo). Foto J. Česák, M. Jeníček

2.1.3 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU (DMT)

Pro zpracování případových studií byl použit vektorový model DMÚ 25, který byl vytvořen na podkladě map Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu (VGHMÚř) Geografické služby Armády České republiky (GeoSl AČR). Vektorový model byl převeden do formátu GRID s prostorovým rozlišením 25 m, který byl poté základem všech souvisejících výpočtů. Zpracování DMT probíhalo v programu ArcGIS verze 9.2 a 9.3 pomocí extenzí Spatial Analyst, 3D Analyst a ArcHydro Tools. Extenze ArcHydro Tools je součástí datového modelu ArcHydro (Maidment, 2002) a slouží k výpočtu některých hydrologických charakteristik založených na analýze digitálního modelu terénu. Tyto charakteristiky byly nezbytné pro běh modelu HEC-HMS, kde sloužily jako vstupní parametry jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu. Jednalo se především o morfometrické charakteristiky terénu, jako sklony povodí a údolnice a vzdálenosti dotoku potřebných k výpočtu doby koncentrace, případně funkce přímého odtoku time-area (určuje dobu, za kterou je odvodněna část povodí o určité ploše).

Prvním krokem zpracování rastrového DMT bylo vytvoření hydrologicky korektního modelu terénu, tedy modelu terénu, který neobsahuje bezodtoké sníženiny. Pro každý pixel modelu platí, že

vždy existuje sousední pixel, který má nižší nebo stejnou hodnotu nadmořské výšky. Analýzou upraveného modelu terénu byly vytvořeny rastry směrů odtoku („*Flow direction grid*“ – vyjadřuje směr odtoku vody z každého pixelu) a akumulace odtoku („*Flow accumulation grid*“ – každé buňce rastru je přiřazen počet buněk, ze kterých voda odtéká do dané buňky). Zmíněné rastry jsou na příkladu povodí Blanice zobrazeny na obr. 7.



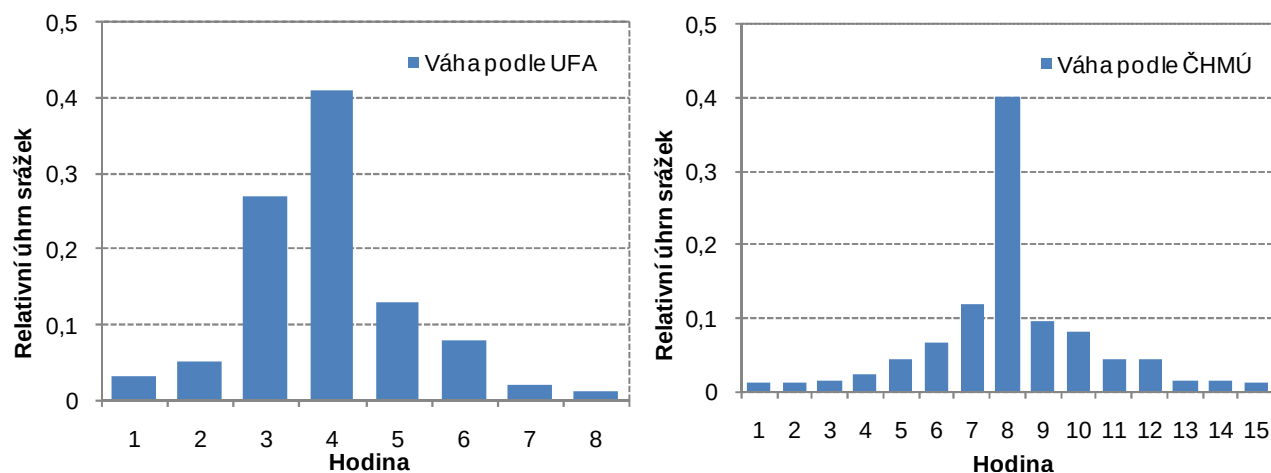
Obr. 7 Zpracování digitálního modelu terénu na příkladu povodí Blanice po profil Podedvorský Mlýn

2.1.4 ZPRACOVÁNÍ SRÁŽKOVÝCH DAT

Údaje o úhrnu srážek na povodí je zásadní vstupní informace každého srážko-odtokového modelu. V modelu HEC-HMS je tato informace vztažena ke každému dílčímu povodí, čímž je možné do jisté míry zachovat heterogenitu prostorového rozložení srážek. V případových studiích byla hodnocena velikost a čas výskytu kulminace jednak při skutečných událostech a také při teoretických událostech s jednodenním úhrnem srážek s dobami opakování 10, 20, 50 a 100 let.

Skutečné události byly použity pro kalibraci a verifikaci modelu a pro simulaci vlivu modelovaných opatření. Použity byly bodové údaje srážkových úhrnů z okolních stanic daného povodí. Ke stanovení plošných úhrnů byly využity metody plošné interpolace hodnot (část A, kapitola 2.1.5), konkrétně metody ordinárního a univerzálního krigingu. Zpracování proběhlo v programu ArcGIS pomocí extenzí Spatial Analyst a Geostatistical Analyst. Výsledky za analyzované události jsou součástí každé případové studie (část B).

Ve dvou případových studiích proběhly simulace teoretických událostí, ve kterých byly modelovány odezvy povodí na jednodenní úhrn srážek s proměnnou dobou opakování (10, 20, 50 a 100 let). Postup stanovení návrhových úhrnů srážek je popsán v jednotlivých případových studiích. Protože modelování probíhalo v kratším časovém kroku než jeden den, bylo nutné využít návrhový hyetogram k rozdělení denního úhrnu srážek na hodinové úhrny. Využit byl návrhový hyetogram podle Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky (UFA AV ČR, v.v.i.), který na základě analýzy skutečných událostí rozděluje denní úhrn srážek do 8 hodin (Řezáčová et al., 2005). Jiné časové rozložení srážek bylo také odvozeno na Českém hydrometeorologickém ústavu (Kulasová et al., 2004). Oba návrhové hyetogramy jsou uvedeny na obrázku 8.



Obr. 8 Návrhový hyetogram podle UFA AV ČR, v.v.i. (vlevo) a podle ČHMÚ (vpravo)

2.1.5 METODY PLOŠNÉ INTERPOLACE HODNOT

Plošná interpolace hodnot byla prováděna při analýze bodových hodnot srážek a teplot, charakteristik sněhové pokrývky a při interpretaci geodetických měření potřebných pro výpočet objemů potenciálních retenčních ploch. Pro interpolaci a extrapolaci dat, která mají většinou charakter bodových měření, je v současné době nejvíce využíváno statistických programů a nástrojů GIS, které umožňují aplikaci celé řady geostatistických metod (Kraus, 2007; Dorninger et al., 2008; Ninyerola et al., 2007). Obecnou výhodou interpolací v prostředí GIS je možnost snadnější implementace vlivu dalších faktorů na interpolovanou veličinu. Pomocí mapové algebry lze zohlednit například vliv nadmořské výšky, expozice, sklonu svahu a vegetace. Interpolace představují aplikaci algoritmu váženého průměru pro odhad hodnot sledované veličiny v okolí známých (naměřených) hodnot. Mezi základní metody používané při analýzách v prostředí GIS patří například:

- Kriging
- IDW (Inverse Distance Weighted)
- Spline
- Natural Neighbour
- Orografická interpolace

– Metoda Thiessenových polygonů

Kriging – jedná se o geostatistickou aproximační metodu, tedy metodu, která nezachovává původní hodnoty (Kraus, 2007, Hwang et al., 2004). Váha je počítána podle funkce – variogramu (lineární, exponenciální, kvadratický, gaussovský atd.). Odhady jsou počítány na základě vážených lineárních průměrů a pro každé místo je soustava vah optimalizována tak, aby šlo o co nejpravděpodobnější hodnotu, tedy aby byl výsledný rozptyl odhadu co nejmenší. Metoda krigingu nabízí ve většině GIS softwarů možnost nastavení řady parametrů. Její výhodou je, že se jedná o metodu velmi sofistikovanou a univerzální, která je vhodná pro velké množství veličin. Metoda ordinárního a univerzálního krigingu byla využita v uvedených studiích pro interpolaci srážkových polí pro kalibraci a verifikaci hydrologického modelu.

IDW (Inverse Distance Weighted) – při výpočtu je použit vážený průměr (Chow et al., 1988). Jedná se o deterministickou exaktní interpolační metodu, ve které jsou hodnoty měřených bodů váženy převrácenou sumou vzdáleností od počítaného bodu. Vzdálenost měřených bodů od hledaného bodu je zdůrazněna exponentem. Čím je exponent vyšší, tím má měřená hodnota vyšší váhu a tím menší je ovlivnění ostatními body. IDW je poměrně jednoduchá interpolace, která upřednostňuje bližší měřené body před vzdálenějšími. Její nevýhodou je vytváření „očí“ okolo datového bodu. Vyžaduje tedy pečlivé nastavení váhy – exponentu a počtu bodů, ze kterých je výsledná hodnota počítána. Obecně není moc vhodná pro interpolaci srážek, uspokojivé výsledky ale dává při modelování terénu.

Spline – je metodou minimální křivosti, která patří k deterministickým exaktním metodám. Využívá kubických funkcí pro tvorbu interpolačních křivek (Meloun a Militký, 2004). Křivost se postupně mění a každá část povrchu je tak reprezentována samostatnou polynomickou funkcí odvozenou z lokálních hodnot. Zároveň je zajištěna spojitost sousedních polynomických funkcí na jejich styku. Metoda je vhodnější pro území většího rozsahu a v rámci práce byla společně s metodami IDW a Kriging testována jako jedna z možných metod interpolace sněhoměrných měření (Jeníček et al., 2008).

Natural Neighbour – patří mezi geostatistické exaktní metody, která využívá metodu nejbližšího souseda. Základem je vytvoření Voronoi diagramů pro každý počítaný bod sítě. Hodnota veličiny je v každém bodě vypočtena váženým průměrem podle plochy dané dílčí části (stejně jako v případě určení plošného úhrnu srážek u Thiessenových polygonů).

Orografická interpolace – metoda využívá závislosti interpolované veličiny na nadmořské výšce. Na základě bodových měření je stanoven regresní vztah obou veličin (je-li závislost signifikantní). Orografická interpolace je vhodná při stanovení plošného úhrnu srážek, rozložení teplot vzduchu nebo při stanovení rozložení výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu. Ve všech případech je vhodné použít shlazený model terénu. Pomocí mapové algebry je možná jednoduchá automatizace procedur v nástrojích GIS (Šercl, 2008). Pomocí uvedené metody byly zpracovány některé mapy Atlasu podnebí Česka (Tolasz et al., 2007). V rámci práce byla tato metoda použita pro stanovení plošného rozložení teploty vzduchu, výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu na povodí Bystřice.

Metoda Thiessenových polygonů – nejedná se v pravém slova smyslu o interpolaci. Základem je výpočet váženého průměru úhrnu srážek, kde vahou je plocha Thiessnova polygonu, který je vytvořen jednoznačným postupem a přiřazen každé stanici. Vypočtená hodnota je uvnitř každého polygonu stejná. Thiessenovy polygony se vytvářejí na základě Delaunayovy triangulační sítě (základ TIN). Metoda Thiessenových polygonů je vhodná zejména v případech nerovnoměrného rozmístění stanic. Naproti tomu nezohledňuje orografické poměry (nadmořská výška, orientace svahu), které mohou například u srážek hrát klíčový význam.

2.1.6 OSTATNÍ PODKLADOVÁ DATA

Mezi ostatní podkladová data použitá při zpracování případových studií patřila především hydrografická data povodí a data půdního krytu. Hydrografická data byla tvořena údaji o rozvodnicích povodí a říční síti. Pro výpočty byla použita vektorová data databáze DIBAVOD (digitální báze vodohospodářských dat), kterou vytváří a průběžně aktualizuje Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i. (VÚV T. G. M., 2009). Základem této databáze je vektorový model ZABAGED (Základní báze geografických dat), který je zpracován na podkladě Základních map ČR v měřítku 1:10 000. Půdní typy v zájmových povodích byly určeny na základě Půdní mapy 1:50 000 České geologické služby. Hydrologické charakteristiky půd (retenční vodní kapacita a infiltrační rychlost), které jsou nezbytné pro stanovení hodnot CN, byly zpracovány v rastru 1x1 km na Výzkumném ústavu meliorací a ochrany půdy, v.v.i. Specifické datové podklady a podrobný popis jejich zpracování je uveden v rámci jednotlivých případových studií (část B).

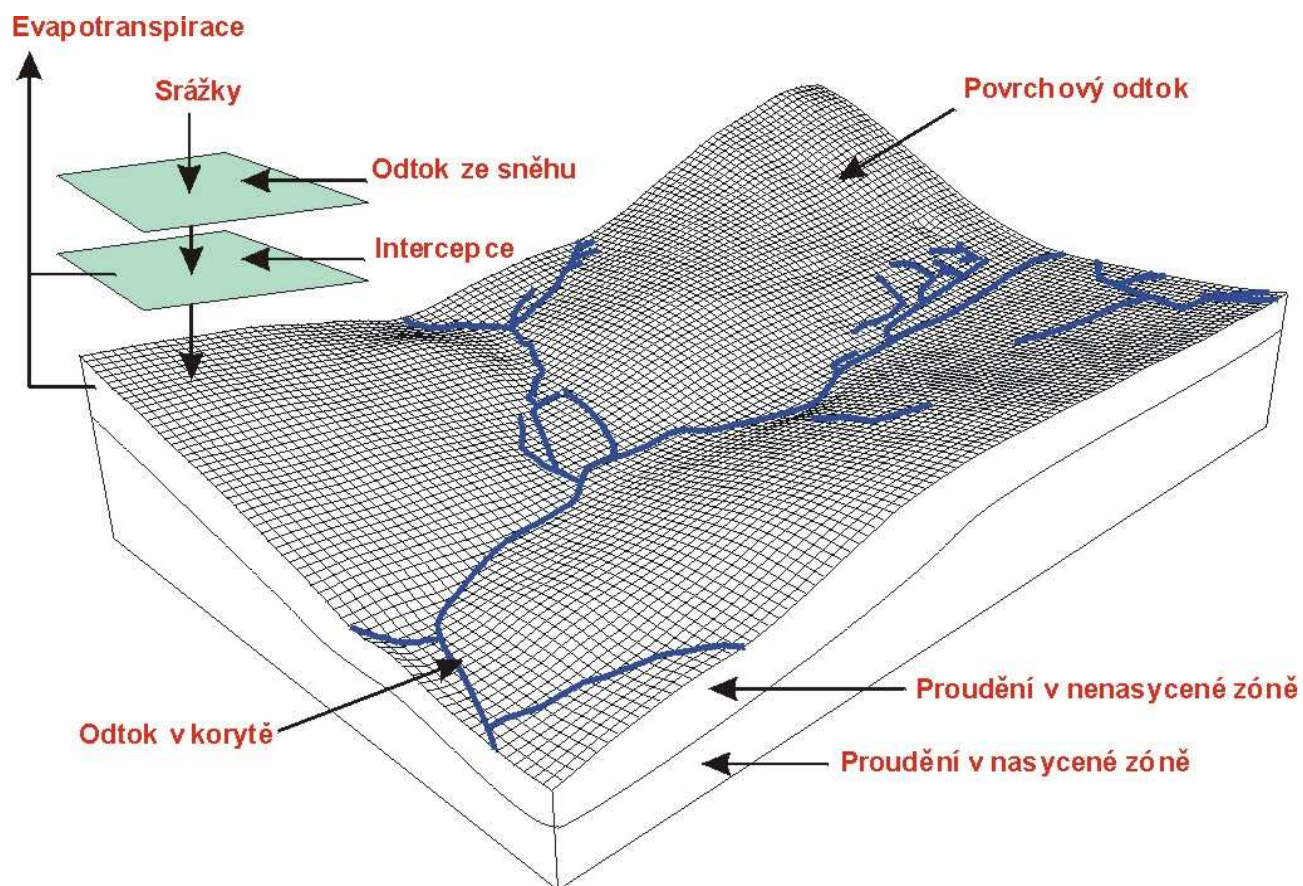
2.2 CHARAKTERISTIKA MODELU HEC-HMS

2.2.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA MODELU

Model HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) je pokračovatelem známého modelu HEC-1 vyvíjeným od 60. let armádou USA. Jedná se především o celistvý (lumped) model se soustředěnými parametry. Některé komponenty mohou ale vykazovat znaky modelů distribuovaných, například komponenta gridded SCS CN, tedy upravená metoda SCS CN s distribuovanými vstupy dat nebo model ModClark, který je možné použít při výpočtu přímého odtoku. Model je dostupný pro komerční využití ve verzi 3.3 v licenci freeware. Model HEC-HMS je uznávaný, široce používaný srážko-odtokový model, který je možné využít k řešení celé řady hydrologických úkolů a je využíván jak v České republice, tak v zahraničí. Model je dostupný na internetové adrese <http://www.hec.usace.army.mil/>.

2.2.2 STRUKTURA MODELU A SCHEMATIZACE POVODÍ

Obecnou charakteristikou většiny modelů je rozdělení povodí na několik, většinou vertikálně uspořádaných zón, které jsou počítány konceptem lineární nádrže (O'Connor, 1976). Jejich zjednodušená struktura je uvedena na obrázku 9. Popis jednotlivých komponent vycházející z článku Jeníčka (2006) je uveden v následujícím textu.



Obr. 9 Obecná struktura srážko-odtokového modelu (podle Jeníček, 2006)

Srážky (dešťové i sněhové) – do hydrologických modelů vstupují ve formě časových řad ze srážkoměrných stanic, případně jsou převedeny na plošný úhrn srážek. Pro výpočet akumulace a tání sněhové pokrývky jsou používány metody radiační bilance nebo teplotního indexu.

Evapotranspirace a intercepce – evapotranspirace (ET) je meteorologický faktor, který hraje významnou roli při transformaci srážky na výsledný odtok. Evapotranspiraci tvoří dvě složky – evaporace (fyzikální výpar z abiotických složek geosféry) a transpirace (spotřeba vody vegetací). Získat data o aktuálním výparu je často velmi složité a časově náročné. Proto se jako vstup do hydrologických modelů většinou používá tzv. potenciální evapotranspirace (PET). Ta vyjadřuje maximální možný výpar z volné vodní hladiny při aktuálních meteorologických podmínkách (teplotě, tlaku a vlhkosti vzduchu, síle větru, množství globálního záření atd.). Interpecí je míněno dočasné zadržení srážek na vegetaci, odkud se vypaří nebo propadne na povrch. Z tohoto hlediska představuje uvedený proces nádrž. Jakmile dojde k jejímu naplnění, začíná proces odtoku.

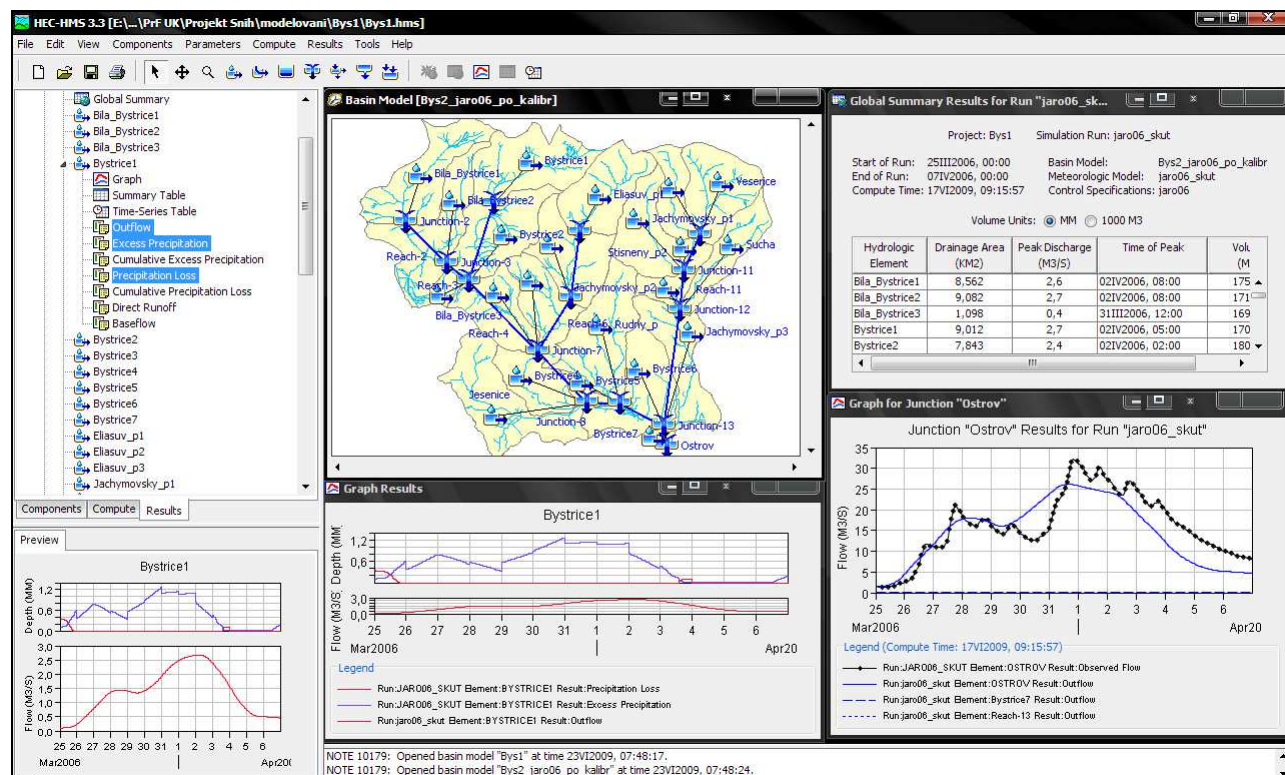
Povrchový odtok z povodí – jedná se o nejrychlejší část odtoku. Rozlišuje se mezi odtokem typu „infiltration excess“ (Hortonovský typ odtoku), „saturation excess“ (Dunneho odtok) a tzv. „return flow“. Jednotlivé typy odtoku popisuje například Beven (2001) nebo Baumgartner a Liebscher (1996). Pro výpočet je nejčastěji využíván jednotkový hydrogram (Unit Hydrograph) a jeho nejrozumnější modifikace (Clarkův, Snyderův, SCS). Princip této metody je podrobně popsán v literatuře (např. Chow et al., 1988). Častý je také výpočet metodou kinematické vlny (Dyck a Peschke, 1983).

Podpovrchový odtok v nenasycené zóně půdního profilu – také označován jako interflow. Často se jedná o nejdůležitější komponentu koncentrace odtoku. Inteflow vzniká prouděním v mikro- a makropórech. Pro výpočet bývá v modelu k dispozici celá řada metod, například SCS CN křivek (*Soil Conservation Service Curve Number*), Green-Ampt metoda nebo SMA (*Soil Moisture Accounting*). Metody jsou založeny na jednodušších i poměrně složitých postupech, od dvouvrstvého modelu, přes gravitační model proudění až po model založený na řešení Richardsovy rovnice (Bear, 1972).

Podzemní odtok – jde o nejpomalejší část odtoku. V závislosti na konkrétním modelu jsou často používanými metodami model exponenciálního poklesu (Chow et al., 1988) nebo konstantního odtoku. Obvyklý je také 2D a 3D model proudění podzemní vody založený na metodě konečných diferencí.

Odtok v korytě – rozšířenými modely jsou například Muskingum, Muskingum-Cunge, Lag model, model kinematické vlny nebo transportní difuzní rovnice. Tyto metody jsou většinou založeny na řešení základních rovnic proudění v otevřených korytech – rovnice kontinuity a momentové rovnice, dohromady označované jako St. Venantovy rovnice (viz např. Maidment, 1993; Feldman, 2000).

Schematizace povodí se v modelu HEC-HMS provádí v jednoduchém grafickém editoru, kde se pomocí dostupných nástrojů vytvoří stromová struktura povodí. Takto je možné například vytvořit reprezentaci subpovodí, soutoku, úseku toku, nádrže, kanálu nebo odběru vody. Jednotlivé elementy je nutné propojit do dendritické sítě. Ukázka uživatelského prostředí modelu HEC-HMS je uvedena na obrázku 10.



Obr. 10 Ukázka uživatelského prostředí modelu HEC-HMS

2.2.3 KOMPONENTY MODELU

Komponenty modelu HEC-HMS popisují jednotlivé procesy srážko-odtokového cyklu. Jejich struktura odpovídá obecné struktuře hydrologického modelu.

- Meteorologický model (*Meteorological Model*)
- Model objemu odtoku (*Runoff Volume Model*)
- Model přímého odtoku (*Direct Runoff Model*)
- Model podzemního odtoku (*Baseflow Model*)
- Korytový model (*Channel Model*)
- Ostatní komponenty – model výpočtu nádrže, kanálu, odběru vody atd.

Pro výpočet uvedených komponent je možné použít celou řadu modelovacích technik. Jejich přehled je uveden v tabulce 2. V následujícím textu jsou podrobněji popsány pouze ty modelovací techniky, které byly použity v případových studiích uvedených v disertační práci.

Tabulka 2 Modelovací techniky v HEC-HMS

<i>Runoff Volume Model</i>	<i>Direct Runoff Model</i>	<i>Baseflow Model</i>	<i>Channel Model</i>
Deficit and constant rate	Clark's UH	Bounded recession	Kinematic wave
Gridded deficit and constant rate	Kinematic wave	Constant monthly	Lag
Initial and constant rate	ModClark	Linear reservoir	Modified Puls
Exponential	SCS UH	Nonlinear Boussinesq	Muskingum
Green – Ampt	Snyder's UH	Recession	Muskingum-Cunge
SCS CN	User-specified S-graph		Straddle Stagger
Gridded SCS CN	User specified UH		
Smith Parlange			
SMA (Soil Moisture Accounting)			
Gridded SMA			

2.2.3.1 Meteorologický model (*Meteorological Model*)

Dešťové srážky

Dešťové srážky vstupují do modelu ve formě časových řad, které se mohou vztahovat ke stanici nebo k dílčímu povodí. Uživatel si volí časový krok vstupních dat. Data je možné také zadat v distribuované formě jako vstupní grid. Na základě provedených simulací a zkušenosti autora s modelem se jako nejlepší řešení jeví zpracování plošných úhrnů srážek v externích programech s využitím vhodné metody a následné manuální zadání výsledných vstupních řad do modelu.

Evapotranspirace

K výpočtu evapotranspirace lze použít metody Monthly Average, u které je možné zadat průměrnou hodnotu výparu pro každý měsíc. Je tedy možné zohlednit roční chod evapotranspirace. Propracovanější metoda je Priestley-Taylor, včetně možnosti zadání vstupních dat v gridové formě (Gridded Priestley-Taylor). Vzhledem k modelování krátkých extrémních událostí nebyla

evapotranspirace zohledněna, což lze vzhledem k daným podmínkám považovat za přijatelné zjednodušení.

Sněhový model

Model HEC-HMS umožňuje pro výpočet akumulace a tání sněhové pokrývky použít pouze metodu teplotního indexu ve dvou variantách zadání vstupních parametrů. První varianta (Temperature Index) umožňuje zadání parametrů v podobě typické pro lumped model – souhrnné hodnoty za každé dílčí povodí (u tohoto modelu je dílčí povodí rozděleno na výškové pásy). Druhou možností je využití varianty „Gridded Temperature Index“, ve které se parametry zadávají v distribuované formě. V tomto případě je nutné využít pro výpočet přímého odtoku podobně koncipovanou metodu ModClark. Metoda teplotního indexu použitá v modelu HEC-HMS je propracovanou metodou, která zohledňuje jak tání během vypadávání kapalných srážek, tak tání v bezesrážkovém období. Pomocí teploty je počítána celková bilance sněhové pokrývky a její teplotní deficit (*Cold Content*). Snaží se tak maximálně vystihnout celkovou energetickou bilanci sněhu.

Teplota vzduchu je v hydrologickém modelování široce používanou veličinou, kterou je možné zjednodušeně vystihnout výměnu energie na rozhraních atmosféra – sněhová pokrývky – zemský povrch. Teplotní index je definován jako denní úbytek vodní hodnoty sněhu při zvýšení teploty o jeden stupeň Celsia nad kritickou teplotu, při které začíná proces tání. Ve své nejjednodušší podobě lze model tání sněhu vyjádřit rovnicí 4.

$$M = DDF \cdot \max(0, T_a - T_b) \quad (4)$$

kde M je množství roztátého sněhu v $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, DDF je teplotní index (*degree-day factor*) v $\text{mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, T_a je průměrná teplota vzduchu (*air temperature*) ve $^\circ\text{C}$ a T_b je kritická teplota ve $^\circ\text{C}$, při které začíná proces tání (*base temperature*). Z rovnice vyplývá, že tání probíhá pouze v případě $T_a > T_b$. Uvedená rovnice je základním výpočtem v modelu HEC-HMS.

K výpočtu hodnoty T_a je možné použít nejen hodinové hodnoty teploty vzduchu, ale také například maximální a minimální teploty vzduchu nebo průměr hodinových teplot vzduchu nad bodem mrazu. Kritická teplota T_b se může pohybovat kolem hodnoty 0°C nebo blízko ní (DeWalle a Rango, 2008; Feldman, 2000). Při pohledu na jednotlivé členy rovnice je zřejmé, že určení teplotního indexu tání DDF je pro výpočet klíčový. Jak je uvedeno v tabulce 3, je tento parametr ovlivňován velkým množstvím faktorů. Není tedy překvapivé, že parametr DDF dosahuje velkého rozpětí hodnot, od $1 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ do $8 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Využitím průměrné denní teploty vzduchu společně s konstantní hodnotou teplotního indexu není možné dostatečně správně simulovat denní chod tání. K tomu je zapotřebí využít spíše přístup založený na aplikaci energetické bilance. Na jejím základě je možné odvodit proměnné hodnoty indexu (Hock, 1999 In DeWalle a Rango, 2008; Kuusisto, 1980). Teplotní index se také mění v závislosti na sezónních změnách struktury sněhové pokrývky. K jejich vystižení je možné použít starší, ale stále používaný vztah podle Martince (1960) uvedený v rovnici 5.

$$DDF = 1,1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \quad (5)$$

kde ρ_s je hustota sněhu v kg.m^{-3} a ρ_w je hustota vody. Martinec (1960) využil k tomuto odvození průměr kladných teplot vzduchu během dne. Existuje tedy předpoklad, že výsledné hodnoty budou nižší, než v případě použité průměrné denní teploty vzduchu (DeWalle a Rango, 2008).

Jedním z faktorů ovlivňujících tání sněhu je lesní porost. Uvedený faktor je stěžejním pro výsledky uvedené v jedné z případových studií v části B. Odlišný krajinný pokryv má jednoznačný vliv na ukládání a především na tání sněhové pokrývky. V případě tání sněhové pokrývky způsobuje les zastínění a tedy nižší přijaté teplo a v bezesrážkovém období pomalejší tání. Tento faktor má vliv především v době jarního odtávání sněhu. Federer et al. (1972) odvodil v povodích na severovýchodě USA hodnoty teplotního indexu $4,5\text{--}7,5 \text{ mm.}^\circ\text{C}^{-1}.\text{d}^{-1}$ pro otevřené plochy, $2,7\text{--}4,5 \text{ mm.}^\circ\text{C}^{-1}.\text{d}^{-1}$ pro listnaté lesy a $1,4\text{--}2,7 \text{ mm.}^\circ\text{C}^{-1}.\text{d}^{-1}$ pro jehličnaté lesy. Vztah uvedený v rovnici 6 byl experimentálně odvozený na povodích ve Finsku (Kuusisto, 1980).

$$DDF = 0,292 - 0,164.C_c \quad (6)$$

kde C_c je podíl plochy pokryté lesem.

Tabulka 3 Faktory ovlivňující teplotní index tání DDF (podle DeWalle a Rango, 2008)

Ovlivňující faktor	Příčina	Vliv na teplotní faktor
Sezónní vliv	S postupující sezónou pokles teplotního deficitu a albeda, zvýšení krátkovlnné radiace a hustoty sněhu	DDF se postupně zvyšuje
Otevřená plocha vs. lesní porost	Stínění a ochrana proti větru	V lese nižší DDF a menší prostorová variabilita
Reliéf	Variabilita krátkovlnného záření a expozice vůči větru	Vyšší DDF na jižních svazích
Plošné pokrytí sněhovou pokrývkou	Prostorová variabilita tání	DDF v povodí klesá s pokrytím povodí sněhovou pokrývkou
Znečištění povrchu sněhu	Prach a další nečistoty (větve) snižují albedo	Vyšší DDF
Srážky	Srážky dodávají zjevné teplo, oblaky snižují sluneční radiaci	Obecně je DDF nižší v deštivých dnech, kdy převládá zatažená obloha
Ledovcová vs. sněhová pokrývka	Ledovcový led má nižší albedo než sníh	Vyšší DDF v ledovcových povodích
Další meteorologické podmínky pro danou teplotu vzduchu	Tání vyšší při vyšších rychlostech větru, vyšší radiaci nebo vyšší vlhkosti při dané teplotě vzduchu	Vyšší DDF

K výpočtu tání používá model HEC-HMS také výpočet teplotního deficitu sněhové pokrývky (CC , *Cold content*). Teplotní deficit vyjadřuje vodní hodnotu (mm), která musí roztát, aby teplota sněhové pokrývky dosáhla hodnoty 0°C . Hodnotu teplotního deficitu model počítá na základě funkce předchozí teploty (ATI , *antecedent temperature index*), která zohledňuje pro určení teploty sněhové pokrývky průběh teploty vzduchu.

Model HEC-HMS počítá vodní hodnotu sněhu v každém časovém kroku pro každé dílčí povodí. Na základě vstupní teploty určí, jestli jsou srážky kapalné nebo pevné a tedy jestli se snižuje nebo zvyšuje vodní hodnota sněhu. Dílčí povodí jsou dále rozčleněna na výšková pásma (zadáva uživatel) a společně se zadaným výškovým gradientem teploty je možné zohlednit akumulaci nebo tání sněhu v různých výškových pásmech dílčích povodí. Před výpočtem je nutné určit celou řadu parametrů, které jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 Vstupní parametry metody teplotního indexu v modelu HEC-HMS

Platí pro	Parametr	Popis
Modelované povodí	PX Temperature [°C]	Teplota rozlišující mezi kapalnými a pevnými srážkami
	Base Temperature [°C]	Teplota, při které začíná tání sněhu
	Wet Meltrate [mm.°C.d ⁻¹]	Teplotní index tání v době vypadávání srážek
	Rain Rate Limit [mm.d ⁻¹]	Denní srážkový úhrn, při jehož překročení se počítá s Wet Meltrate
	ATI-Meltrate Coefficient	Koeficient, který je používán při výpočtu indexu tání v každém časovém kroku
	ATI-Meltrate Function	Závislost ATI a teplotního indexu tání (zohlednění sezonality tepl. indexu)
	Cold Limit [mm.d ⁻¹]	Prahová hodnota denního úhrnu srážek (pro výpočet tepl. deficitu)
	ATI-Coldrate Coefficient	Koeficient, který je používán při výpočtu teplotního deficitu v každém časovém kroku
	ATI-Coldrate Function	Závislost ATI a teplotního deficitu (zohlednění sezonality tepl. deficitu)
	Water Capacity [%]	Objem kapalné vody ve sněhové pokrývce (na počátku simulace)
	Groundmelt Method	Zvolení metody zohlednění tání způsobené kladnou teplotou povrchu
	Groundmelt [mm.d ⁻¹]	Intenzita tání způsobená kladnou teplotou povrchu (v případě zvolení metody „konst. hodnoty“ v předchozím kroku)
Subpovodí	Lapse Rate [°C/1000 m]	Vertikální gradient teploty
Výškové pásmo subpovodí	Percent [%]	Plocha výškového pásma v daném subpovodí
	Elevation [m n. m.]	Průměrná nadmořská výška daného pásma
	Initial SWE [mm]	Počáteční hodnota SWE (vodní hodnoty sněhu)
	Initial Cold Content [mm]	Počáteční hodnota teplotního deficitu
	Initial Liquid Water [mm]	Počáteční objem kapalné vody ve sněhové pokrývce
	Initial Cold Content ATI [°C]	Počáteční hodnota ATI pro výpočet teplotního deficitu
	Initial Melt ATI [°C.d ⁻¹]	Počáteční hodnota ATI pro výpočet teplotního faktoru tání

2.2.3.2 Model odtokové ztráty (Runoff Volume Model)

Zahrnuje několik modelů, které má uživatel k dispozici (tab. 2). Další popis zahrnuje pouze metodu SCS CN, která byla použita pro výpočet odtokové ztráty ve všech případových studiích.

Modelovací technika SCS CN (*Soil Coservation Service Curve Number*) byla vyvinuta americkým ústavem pro ochranu půdy (USACE, 1994; Feldman, 2000). Tato metoda stanovuje efektivní úhrn srážek a tedy odtokovou ztrátu za použití konceptu CN křivek podle rovnice 7.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} [\text{mm}] \quad (7)$$

kde P_e je kumulativní efektivní úhrn srážek v čase t , P je kumulativní úhrn srážek v čase t , I_a je počáteční ztráta (*Initial Abstraction*) a S je potenciální maximální retence půdy (odpovídá hydrolimitu plné vodní kapacity), která je vypočtena z CN křivky podle rovnice 8.

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \text{ [mm]}, \quad (8)$$

Pro odhad počáteční ztráty je možné použít metodiku Soil Conservation Service (SCS). Protože vztah uvedený v rovnici 9, byl experimentálně ověřován na malých povodích v USA, bývá často výsledná hodnota kalibračním parametrem.

$$I_a = 0,2 \cdot S \text{ [mm]} \quad (9)$$

K výpočtu CN křivky byl ve všech případových studiích využit její vztah k hydrologické skupině půdy (HSP) a typu krajinného pokryvu. Přesné metodiky stanovení jsou součástí konkrétních případových studií.

2.2.3.3 Model přímého odtoku (*Direct Runoff Model*)

Model HEC-HMS umožňuje použít pro výpočet přímého odtoku celé řady metod, které jsou uvedeny v tabulce 2. Podrobně je v následujícím textu popsán výpočet parametrů Clarkova jednotkového hydrogramu, který byl použit ve všech případových studiích. Princip metody jednotkového hydrogramu (UH) je podrobně popsán v literatuře (např. Chow et al., 1988).

Pro výpočet je nutné stanovit hodnoty parametrů doby koncentrace T_c (*Time of Concentration*) a transformačního faktoru R_c (*Storage coefficient*) charakterizující dobu zdržení v povodí. Koeficient T_c byl vypočten podle metodiky SCS, která k jeho určení využívá charakteristiku doby doběhu T_{lag} (*Lag Time*, rovnice 10).

$$T_{lag} = \frac{L^{0,8} \cdot (S + 1)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}} \text{ [hod]}, \quad (10)$$

kde L je maximální délka toku v povodí ve stopách, S je potenciální maximální retence půdy v palcích (vypočtená z CN křivky) a Y je sklon povodí v %. Doba koncentrace T_c je vypočtena podle rovnice 11.

$$T_{lag} = 0,6 \cdot T_c \text{ [hod]}, \quad (11)$$

Transformační koeficient R_c byl stanoven podle metodiky USGS (U. S. Geological Survey; Straub et al., 2000, rovnice 12).

$$R_c = A \cdot L^B \cdot S_{1085}^C \text{ [hod]}, \quad (12)$$

kde L je maximální délka toku v povodí v mílich, S_{1085} je sklon ve ft/mi (stopy na míli) mezi 10 % a 85 % maximální délky údolnice a A , B , C jsou koeficienty. Na ČHMÚ byly pro Českou republiku stanoveny na $A = 80$, $B = 0,342$ a $C = -0,79$ (Šercl, 2009).

2.2.3.4 Model podzemního odtoku (Baseflow Model)

Z metod výpočtu podzemního odtoku byl použit model exponenciálního poklesu. Ten definuje velikost podzemního odtoku v daném čase pomocí počátečního podzemního odtoku (rovnice 13):

$$Q_t = Q_0 \cdot k^t \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}], \quad (13)$$

kde Q_t [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je podzemní odtok v čase t , Q_0 [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] je počáteční podzemní odtok a k [-] je poklesová konstanta. Kromě počáteční hodnoty a konstanty poklesu bylo nutné zadání prahové hodnoty (vyjádřené jako hodnota průtoku nebo jako podíl tohoto průtoku vzhledem k velikosti kulminace), při které se začne povrchový odtok opět zvyšovat. Všechny parametry byly určeny analýzou hydrogramu a na základě dostupné literatury (např. Feldman, 2000).

2.2.3.5 Korytový model (Channel Model)

Metody odtoku v korytě jsou často založeny na řešení základních rovnic proudění v otevřených korytech – rovnice kontinuity a momentové rovnice (dohromady označovány jako St. Venantovy rovnice, viz např. Feldman, 2000). V případových studiích byly použity metody Muskingum a Muskingum-Cunge.

Metoda hydrologického routingu Muskingum vyžaduje zadání dvou parametrů – K [hod] a X [-]. Parametr K určuje dobu, za kterou v daném povodí proteče voda korytem (postupová doba) a X je váha vyjadřující vliv klínové retence v rámci daného úseku. Rychlost postupu vlny korytem za normálního stavu může být stanovena na podkladech měření hydrometrickou vrtulí a rychlost může být následně podle metodiky USACE (1994) upravena koeficientem, který měřenou hodnotu přizpůsobí pravděpodobným rychlostem postupu povodňové vlny za povodně. Parametr X dosahuje pro horské toky hodnoty 0,2 až 0,3.

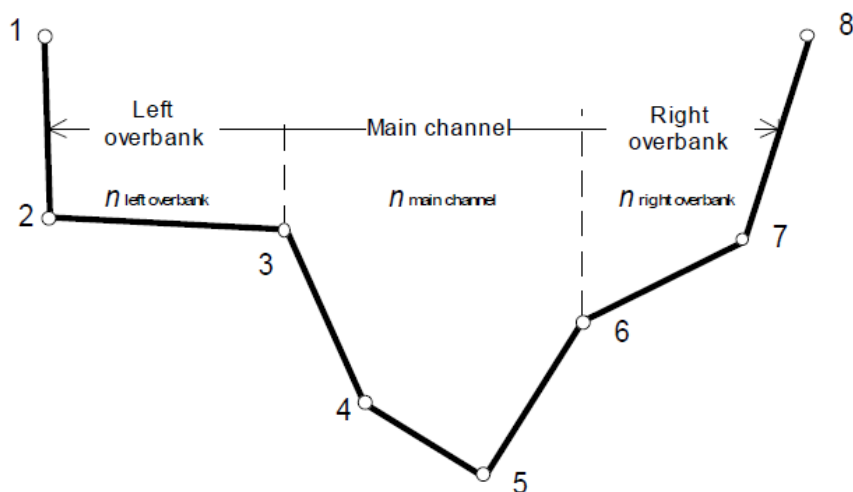
Metoda Muskingum-Cunge popisuje z metod hydrologického routingu nejlépe proudění vody v korytě. K výpočtu využívá St. Venantovy rovnice ve zjednodušené podobě – rovnici kontinuity a difuzní aproximaci věty o hybnosti (rovnice 14 a 15).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (14)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (15)$$

kde A je plocha průtočného profilu, Q je průtok, q_L je boční přítok, x je délka úseku, t je čas, S_f je sklon dna, S_0 sklon hladiny a y je hloubka v rámci úseku. V této podobě věty o hybnosti jsou při výpočtu hybnosti uvažovány pouze gravitační síly (vyjádřené pomocí sklonu dna), energetický

gradient (vyjádřený pomocí sklonu hladiny) a tlakový gradient (vyjádřen pomocí změny hloubky v rámci úseku). Oproti modelu dynamické vlny (St. Venantovy rovnice bez zjednodušení) nejsou uvažovány změny rychlosti v úseku a v čase. Metoda vyžaduje zadání délky úseku, sklonu úseku, Manningova součinitele drsnosti pro koryto, levou inundaci a pravou inundaci a příčný profil koryta a údolní nivy. Ten je zadáván ve zjednodušené podobě, například pomocí osmi charakteristických bodů (obr. 11). Vybrané hodnoty Manningova součinitele drsnosti jsou uvedeny v tabulce 5.



Obr. 11 Ukázka zjednodušeného příčného profilu pro metodu Muskingum-Cunge (Feldman, 2000)

Tabulka 5 Vybrané hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro koryto a údolní nivu (Bruner, 2008)

Typ povrchu	Manningův součinitel drsnosti		
	Minimum	Průměr	Maximum
Koryto – přímé, bez stupňů a tůní, bez kamenů	0,025	0,030	0,033
Koryto – přímé, bez stupňů a tůní, s kameny	0,030	0,035	0,04
Koryto – se zákruty, s tůněmi a kameny	0,035	0,045	0,050
Koryto – štěrkové dno s betonovými břehy	0,017	0,020	0,025
Údolní niva – bez křoví, nízká tráva	0,025	0,030	0,035
Údolní niva – bez křoví, vysoká tráva	0,030	0,035	0,050
Údolní niva – řídké křoví a stromy v létě	0,040	0,060	0,080
Údolní niva – les bez nízkých stromů, malý podrost, proudění pod korunami	0,080	0,100	0,120

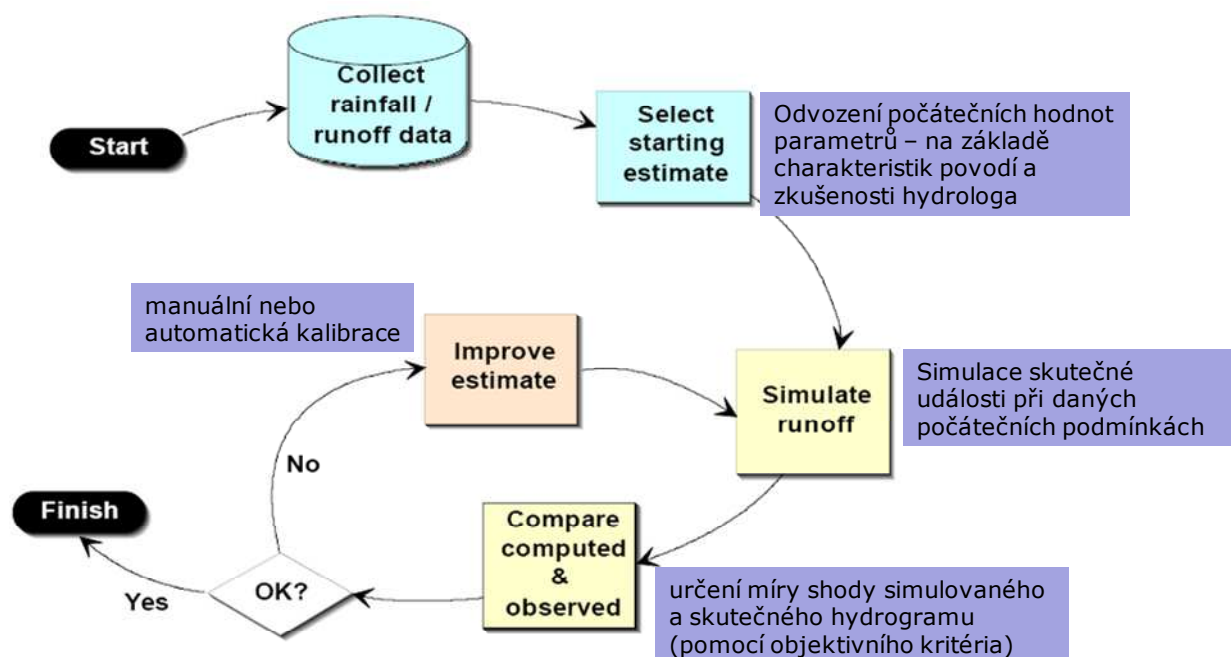
2.2.3.6 Další komponenty

Model HEC-HMS umožňuje vložit do povodí také některé hydrotechnické objekty jako nádrže, kanály, odběry vody nebo naopak zdroje vypouštění a přesně definovat jejich charakter. V případě nádrží, které byly použity v jedné z případových studií, se zadávají přesné objemy nádrže a parametry hráze a hrázových struktur (výpustí, přelivů atd.).

2.2.4 PARAMETRY SIMULACE A KALIBRACE MODELU

Kalibrací modelu se rozumí optimalizace parametrů použitých při výpočtu s cílem zjistit skutečné chování systému (povodí) a připravit tím srážko-odtokový model například pro operativní běh nebo návrhové simulace. Provádí se na skutečně proběhlých událostech, kde je možné pravdivost

výpočtu ověřit pomocí pozorovaných dat. Obecný postup při kalibraci hydrologického modelu je zobrazen na obrázku 12.



Obr. 12 Obecný postup při kalibraci modelu (podle Feldman, 2000; upraveno)

Model HEC-HMS umožňuje jak manuální, tak automatickou kalibraci parametrů. Vzhledem k povaze a uplatnění modelu (pro povodí do 500 km²) se optimalizace parametrů většinou neprovádí na dlouhých časových řadách, ale spíše na jednotlivých událostech kratšího trvání (Daňhelka et al., 2003). V obou případech je nutné stanovit okrajové podmínky, tedy rozsah hodnot, kterých může daný parametr nabývat. Pro automatickou kalibraci je možné v modelu HEC-HMS využít dvě metody – Univariate gradient a Nelder Mead. Popis obou metod lze najít v manuálu programu (Feldman, 2000). V obou případech jde o iterační postup hledání nejlepší shody podle vybraného kritéria, například sumy kvadratických odchylek pozorovaného a simulovaného průtoku. Vzhledem k tomu, že odhad parametrů se provádí na základě fyzicko-geografických charakteristik povodí, je možné model HEC-HMS uplatnit i pro simulaci procesů na nepozorovaném povodí, to znamená na povodí, kde nejsou dostupné časové řady pozorovaných průtoků, na jejichž základě je možné kalibraci provést (viz např. Šercl, 2009).

Verifikací se rozumí ověření vypočtených parametrů na skutečně proběhlých událostech nebo přímo v operativním běhu. Verifikací (někdy je možné setkat se s termínem validace) probíhá na jiné události než předchozí kalibrace.

Úspěšnost kalibrace a verifikace je posuzována podle objektivního kritéria, tedy hodnoty, která je v podstatě číselné vyjádření chyby. V případě hydrologických modelů je posuzována míra shody simulovaného a pozorovaného hydrogramu. Objektivní kritéria mohou být například:

- Relativní chyba kulminace ME
- Relativní objemová chyba VE

- Suma absolutních nebo středních kvadratických odchylek
- Koeficient variace PE
- Chyba času kulminace (fázový posun)
- Kritérium Nash-Sutcliffe

Pro hodnocení v rámci případových studií byly použity kritéria Nash-Sutcliffe, relativní (procentní) chyba kulminace a chyba času kulminace. Kritérium Nash-Sutcliffe je pro kalibraci hydrologického modelu pravděpodobně nejčastěji používaným objektivním kritériem. Jeho výpočet je zřejmý z rovnice 16.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{OB_i} - Q_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{OB_i} - \bar{Q}_{OB})^2} \quad (16)$$

kde Q_{OB} je pozorovaný průtok, Q_{SIM} je modelovaný průtok, $\bar{Q}_{OB}$ je průměrný pozorovaný průtok. Výsledkem je číslo v intervalu $(-\infty, 1>$, ve kterém hodnota 1 odpovídá absolutní shodě pozorovaného a simulovaného hydrogramu. Za uspokojivou simulaci lze označit hodnotu kritéria vyšší než 0,5. Pro vyjádření relativní chyby kulminace je možné použít jednoduchý vztah vyjádřený rovnicí 17.

$$ME = \frac{MAXQ_{SIM} - MAXQ_{OB}}{MAXQ_{OB}} \quad (17)$$

Při kalibraci se uživatel setkává s mnoha problémy. Jedná se o poměrně časově náročnou proceduru, jejíž řešení bývá často nejednoznačné. To znamená, že zjištěné parametry mohou „sedět“ pro kalibrační období, ale v operativním běhu, kdy jsou pro každou událost jiné podmínky, nemusí být výsledky už tolik přesvědčivé. Často se také stává, že kalibrace může mít více řešení, to znamená, že zvýšení jednoho parametru se dá vykompenzovat snížením jiného, což může platit pro kalibrační období, při verifikaci to ale může být značně odlišné. Kalibraci také stěžuje fakt, že vliv parametrů na výsledný průtok nemusí být (a nebývá) lineární, neplatí tedy princip proporcionality. Obecným problémem bývá také použité měřítko a to jak prostorové (dané schematizací povodí), tak časové (dané časovým krokem vstupních řad a výpočtu). Přejít na jiný prostorový nebo časový krok většinou vyžaduje novou kalibraci. Problémům spojené s kalibrací je věnována část kapitoly diskuze (část C).

2.2.5 INTEGRACE GIS A DALŠÍCH PROGRAMŮ

Pro model HMS byla ve spolupráci s firmou ESRI (Inc., Redlands, USA) vytvořena nadstavba ArcGIS 9.x, která se nazývá GeoHMS. Ta umožňuje za pomoci digitálního modelu terénu počítat základní hydrologické charakteristiky povodí – vrstvy hranice povodí, směř odtoku pro každé pole gridu, akumulace vody. Vytváří také hydrologicky korektní model terénu, tzn. model s vyplněnými

bezodtokými sníženinami a obsahuje nástroje pro výpočet některých parametrů modelu HMS (například pro výpočet přímého odtoku). Výsledná data je možné jednoduše importovat do prostředí HMS. Podobnými funkcemi disponuje také extenze ArcHydro Tools, která je součástí datového modelu ArcHydro (Maidment, 2002) a slouží k výpočtu hydrologických charakteristik založených na analýze digitálního modelu terénu. Charakteristika některých funkcí ArcHydro Tools je součástí kapitoly 2.1.3 v části A.

Vstupní i výstupní data modelu jsou uchovávána ve speciálním databázovém systému DSS (Data Storage System). Struktura ukládání je stejná u všech programů z dílny HEC (například hydrodynamický model HEC-RAS). K jejich vizualizaci, jednoduché editaci a exportu do jiných formátů (Excel) byl vytvořen software HEC-DSS Vue.

2.3 CHARAKTERISTIKA EXPERIMENTÁLNÍCH POVODÍ

Jednotlivé případové studie byly zpracovány na třech zájmových územích v České republice. Poloha povodí v rámci České republiky je zobrazena na obrázku 1.

- Povodí Blanice
- Povodí Chomutovky
- Povodí Bystřice

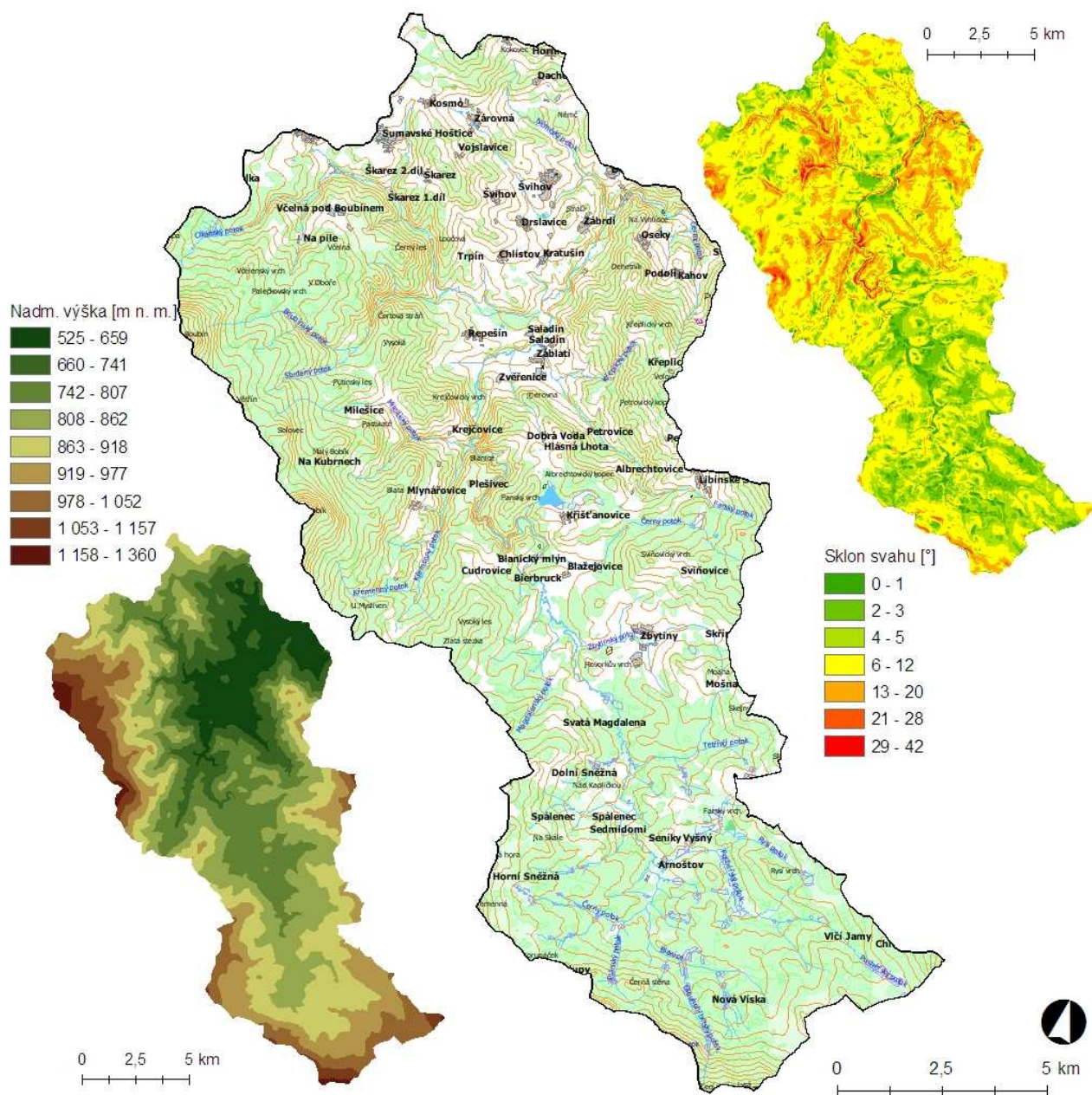
2.3.1 POVODÍ BLANICE

Na povodí Blanice byla vypracována případová studie vlivu historických změn krajinného pokryvu na průběh extrémních povodní. Povodí Blanice bylo v této studii vymezeno po závěrový profil Podedvorský Mlýn, ve kterém se nachází limnigraf s dobou měření od roku 1949. Plocha povodí vypočtená na základě digitálních podkladů DIBAVOD je 209,6 km². Mapa povodí je uvedena na obrázku 13.

Na povodí Blanice proběhly v uplynulých dvou stoletích významné změny ve struktuře krajinného pokryvu, a proto před vlastním výzkumem existoval předpoklad velkého vlivu těchto změn na povodně. Uvedená skutečnost byla hlavní motivací výběru tohoto povodí. K výběru přispěl také dlouholetý zájem katedry fyzické geografie a geoekologie PřF UK o problematiku antropogenních změn v krajině a jejich dopad na extrémní povodně (viz např. Langhammer et al., 2008a). Povodí Otavy bylo od počátku středem zájmu tohoto výzkumu a podrobnější analýzy byly často prováděny na dílčím povodí Blanice. Z tohoto důvodu existuje z celého území velké množství měřených a analyzovaných dat. Pro zpracování případové studie byly velmi důležité existující podklady o historickém zkrácení říční sítě (Langhammer a Vajskebr, 2006).

Povodí Blanice je z geologického hlediska součástí Moldanubika, které je tvořené metamorfity prostoupenými horninami moldanubického plutonu. Pramennou oblast Blanice tvoří zbytky zarovnaných povrchů Želnavské hornatiny, které se dochovaly v místech, kam dosud nezasáhla zpětná eroze vodních toků (Demek et al., 1965). Severně od reliktního zarovnaného povrchu je reliéf modelován zpětnou erozí, ke které došlo vlivem zdvihu Šumavy v období neogénu a pleistocénu.

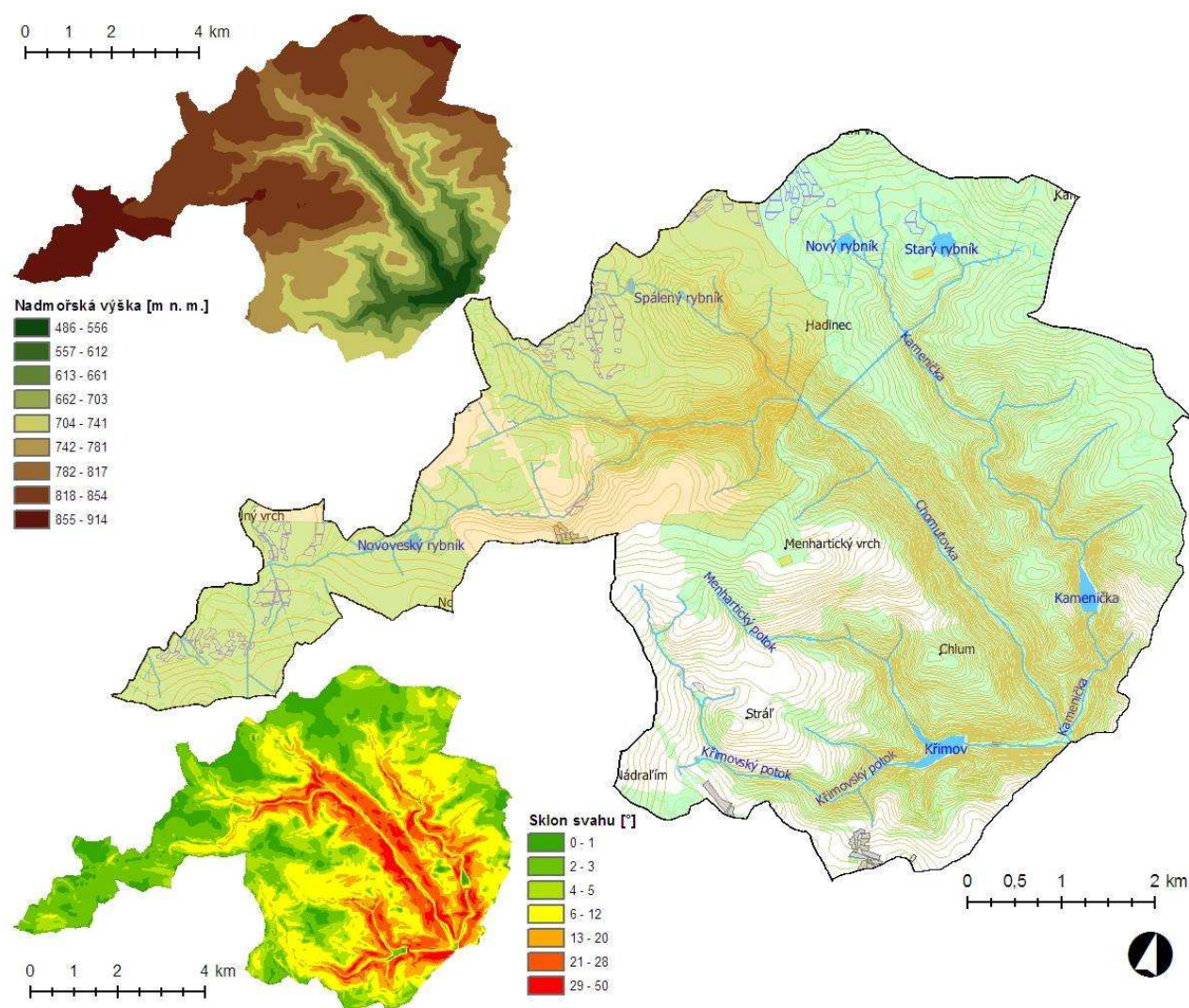
Říční údolí jsou hluboká a sevřená a celá oblast je charakteristická vysokou vertikální členitostí (Křížek a Engel, 2004).



Obr. 13 Mapa povodí Blanice

2.3.2 POVODÍ CHOMUTOVKY

Na povodí Chomutovky proběhlo modelování vlivu suchých retenčních nádrží na extrémní povodně. Pro potřeby výzkumu bylo povodí vymezeno po závěrový profil III. Mlýn, který se nachází nedaleko města Chomutov. V tomto místě je umístěn limnigraf s řadou pozorování vodních stavů od roku 1961. Plocha povodí nad uvedeným profilem vymezená na podkladech databáze DIBAVOD je 44,5 km². Mapa povodí je uvedena na obrázku 14. Vliv navrhovaných opatření byl sledován na části povodí po profil Tišina s plochou 14,5 km² (v mapě vyznačeno oranžovou barvou).



Obr. 14 Mapa povodí horní Chomutovky

Jedním z důvodů výběru povodí Chomutovky byla skutečnost, že tok protéká městem Chomutov (cca 50 tis. obyvatel) a vytváří tak potenciální ohrožení za povodně. V hřebenové části Krušných hor došlo v 70. a 80. letech k masivnímu úhynu lesních porostů vlivem extrémně vysokých emisí SO_2 z průmyslové činnosti koncentrované v podkrušnohorských pánvích (Lomský et al., 2002). Změny se nevyhnuly ani povodí Chomutovky a pravděpodobně tak přispěly ke změnám v odtokovém režimu.

Povodí Chomutovky se stalo jedním ze zájmových území v rámci projektu INTERREG IIIA „DINGHO - Dezentraler, integrierter und grenzübergreifender Hochwasserschutz in den deutsch-tschechischen Einzugsgebieten der Kammlagen des Mittleren Erzgebirges“, který byl v letech 2005 – 2008 řešen na institutu geografických věd Freie Universität Berlin a na kterém se katedra podílela. Spolupráce probíhala také s Povodím Ohře, s.p. pro které mohou mít v budoucnu výsledky projektu aplikační přínos.

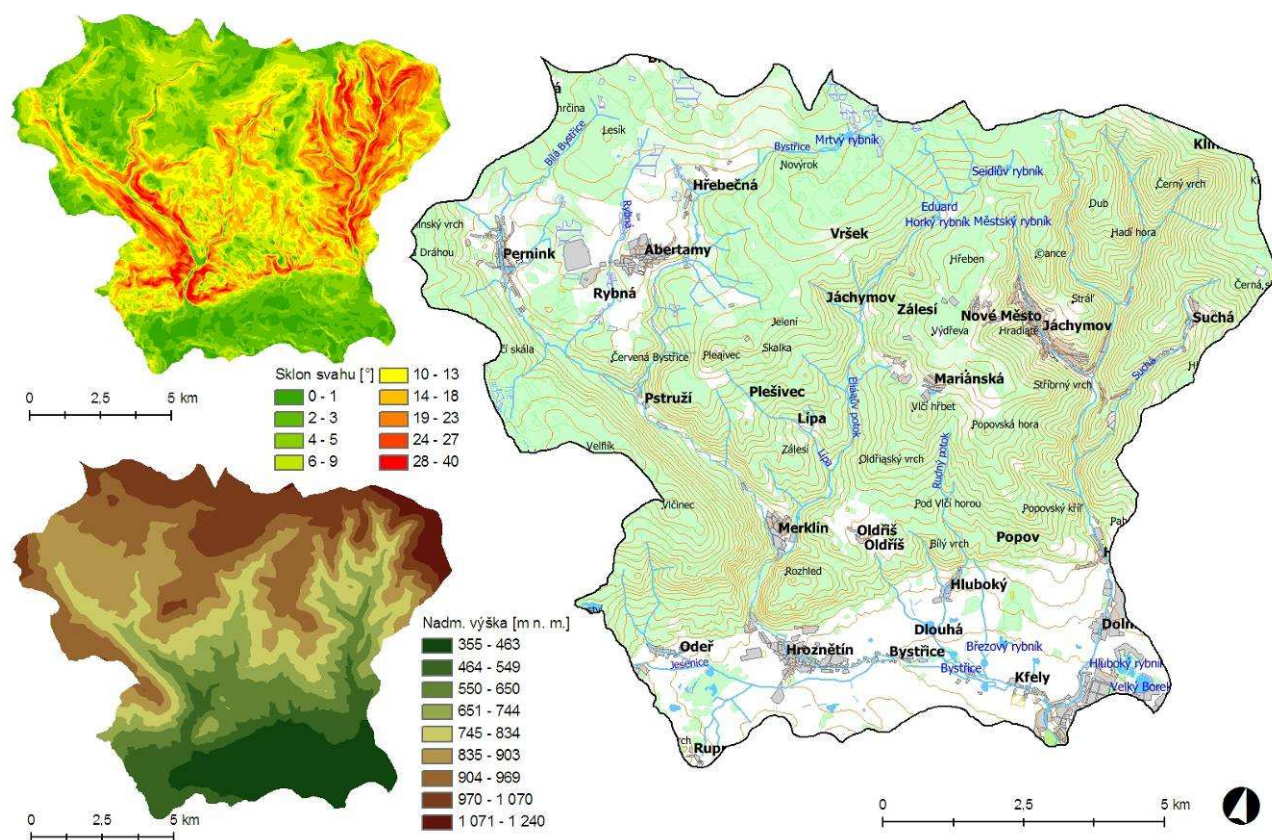
Pro dnešní charakter povodí Chomutovky mělo největší význam působení zvětrávacích a erozních procesů a činnost vodních toků. Hluboké údolí Chomutovky je podmíněno geologickou strukturou a velmi strmě spadá do podkrušnohorských pánví. V údolí Chomutovky je patrný průnik zpětnou

erozí hluboko do vrcholových částí Krušných hor. Nejvýraznější vliv na současnou podobu povodí mělo působení periglaciálních procesů v pleistocénu, při nichž docházelo k formování svahů, a to převážně mrazovým zvětráváním a soliflukcí.

Z hlediska formování odtoku představuje reliéf území významný faktor určující průběh povodně. Mírně zvlněný ráz krajiny v oblasti hlavního hřebene skýtá možnosti uplatnění opatření integrované protipovodňové ochrany, konkrétně malých retenčních nádrží. Uvedené faktory je možné posoudit na základě digitálního modelu terénu a mapy sklonu svahů (obr. 14). Klima povodí Chomutovky určuje poloha území v oblasti převládajícího západního až severozápadního proudění vzduchu a orografie pásma, které tvoří překážku frontálním systémům postupující nejčastěji od severozápadu. Díky uvedené skutečnosti se v tomto území silně uplatňuje orografický (návětrný) efekt.

2.3.3 POVODÍ BYSTRICE

Na povodí Bystřice v centrální části Krušných hor byla zpracována případová studie, jejímž cílem bylo modelování odtoku z tajícího sněhu v různých podmínkách krajinného pokryvu. Pro potřeby studie bylo toto povodí vymezeno po závěrový profil Ostrov, kde se od roku 2000 nachází limnigrafická stanice Českého hydrometeorologického ústavu s měřením vodních stavů. Plocha povodí je 127,6 km² (obrázek 15).



Obr. 15 Mapa povodí Bystřice

Povodí Bystřice bylo vybráno díky vysoké průměrné nadmořské výšce a s tím spojené vysoké akumulaci sněhové pokrývky během zimního období a častým povodním způsobeným táním sněhu. Na tomto povodí začal v zimě 2008/2009 monitoring výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty

sněhu. Dalším sledovaným územím je přilehlé povodí Zlatého potoka, které je odvodňováno do Německa (povodí Mulde). Důležitým impulsem pro výběr povodí Bystřice byla spolupráce s podnikem Povodí Ohře, s.p. v oblasti integrované protipovodňové ochrany a jeho zájem o výzkum procesů spjatých s ukládáním a táním sněhové pokrývky.

Z geologického hlediska je povodí Bystřice součástí krušnohorského antiklinorního pásma. To je tvořeno převážně krystalickými břidlicemi (rulami a svory) a granitoidy. Na jihu je celé pásmo ohraničeno krušnohorským zlomem, na sever pokračuje směrem do Saska, kde se noří pod mladší sedimentární útvary (Škvor, 1975).

Charakter území je důsledkem především čtvrtohorních zvětrávacích a erozních procesů a činnosti vodních toků. Klima území je určeno polohou v oblasti převládajícího západního až severozápadního proudění vzduchu a výrazné cyklonální činnosti, která způsobuje velkou proměnlivost počasí. Výrazný vliv na podnebí má z regionálního hlediska stavba celého území. Hřeben Krušných hor tvoří překážku pro frontální systémy postupující od severozápadu. Orografie pásma vytváří vhodné podmínky pro uplatnění orografického efektu a zvýšení srážkových úhrnů na německé straně horského pásma a v hřebenových oblastech. Na jihovýchod od Krušných hor se naopak vytváří srážkový stín. Nejenom tyto faktory mají za následek vysoké srážky a rychlý odtok a bývají jednou z příčin vzniku povodní.

ČÁST B:

PŘÍPADOVÉ STUDIE

1 HISTORICKÉ ZMĚNY KRAJINNÉHO POKRYVU A JEJICH VLIV NA PRŮBĚH POVODNÍ

1.1 ÚVOD

Uvedená studie kvantifikuje na podkladě použitých dat a modelovacích metod změny v extremitě povodní v podmínkách měnícího se krajinného pokryvu za posledních 160 let. Hodnocení probíhalo na povodí jihočeské Blanice po závěrový profil Podedvorský Mlýn (nad VD Husinec, obr. 13). Výběr uvedeného povodí byl na jedné straně motivován předpokladem významných změn ve struktuře krajiny a na druhé straně dlouholetým výzkumem antropogenních změn v krajině, který je v tomto povodí prováděn na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK. Přehledná mapa povodí Blanice je uvedena na obrázku 13.

Cíle případové studie vychází z obecných cílů disertační práce definovaných v úvodu práce. Dílčí cíle je možné shrnout do následujících bodů:

- Určení prostorových změn ve struktuře krajiny od poloviny 19. století do současnosti
- Kvantifikace vlivu zjištěných změn na průběh extrémních povodní
- Zhodnocení modelů a metod použitých při srážko-odtokovém modelování, určení nejistoty

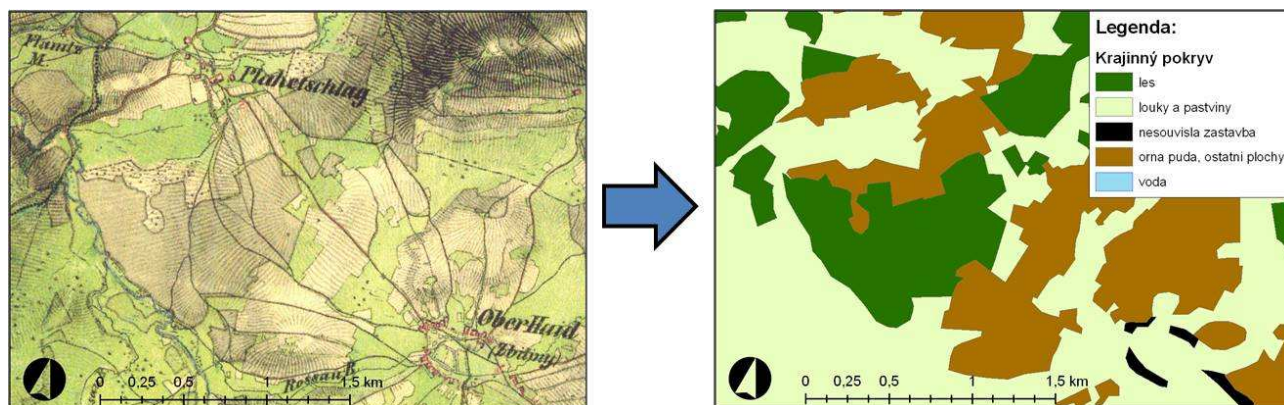
Práce navazuje na výsledky dosažené na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK v uplynulých letech, především na výzkum antropogenního ovlivnění říční sítě a jeho dopadu na povodně (Langhammer a Vilímek, 2008), na studium geomorfologických projevů povodní (Křížek a Engel, 2008) a na identifikaci rizikových prvků říční sítě pro průběh povodní (Langhammer, 2007a; Langhammer, 2008a; Langhammer a Sitař, 2008). Významnou část tvoří výzkum historického zkrácení říční sítě v povodí Otavy (Langhammer a Vajskebr, 2006) a hodnocení změn srážko-odtokového režimu toků analýzou časových řad (např. Kliment a Matoušková, 2006; Kliment a Matoušková, 2008). Studie přímo navazuje na dosavadní zaměření práce autora, který je situován převážně v pramenných oblastech toků (např. Jeníček, 2007b; Jeníček, 2009a).

1.2 MATERIÁL A METODY

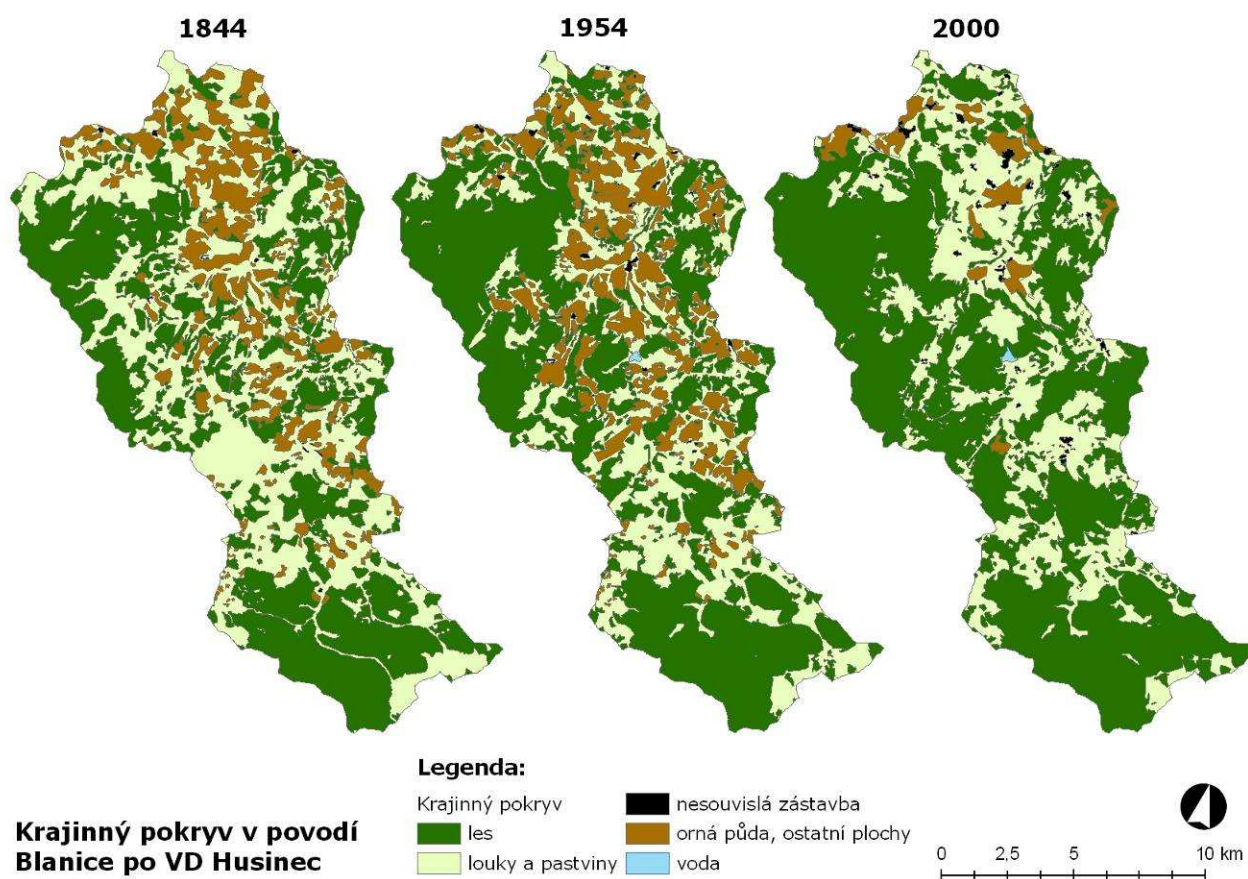
1.2.1 ZMĚNY KRAJINNÉHO POKRYVU

Historické změny krajinného pokryvu byly analyzovány na povodí Blanice po závěrový profil Podedvorský Mlýn nad vodním dílem Husinec (obr. 13). Plocha povodí stanovená na základě digitálních podkladů databáze DIBAVOD je 209,6 km². Změny byly sledovány ve třech časových horizontech na podkladě map 2. vojenského mapování z roku 1844, vojenského mapování z roku 1954 (tzv. mapy Generální Štábu Armády ČR) a na základě současné databáze DMÚ 25 zpracovávané v letech 1996 až 2000 (VGHMÚř, 2009). Pro kontrolu dat a analýzu zjištěných trendů byly využity také databáze CORINE Landcover 2000 (EEA, 2009) a LUCC – Land

use/cover change 1845-2000 (Bičík, 2009). Historické mapy vojenského mapování byly nejprve georeferencovány v souřadnicovém systému JTSK a následně v programu ArcGIS digitalizovány. Pro hodnocení krajinného pokryvu bylo odlišeno 5 tříd – lesy, louky a pastviny, nesouvislá zástavba, orná půda a ostatní plochy, vodní plochy. Na obrázku 16 je jako ukázka uveden výřez mapy 2. vojenského mapování a odpovídající výřez digitalizované mapy. Výsledné digitalizované mapy jsou uvedeny na obr. 17 a ve větším rozlišení také v přílohách 1-3).



Obr. 16 Výřez mapy 2. vojenského mapování (1844) a odpovídající výřez digitalizované mapy (okolí Blanického Mlýna a obce Zbytiny)

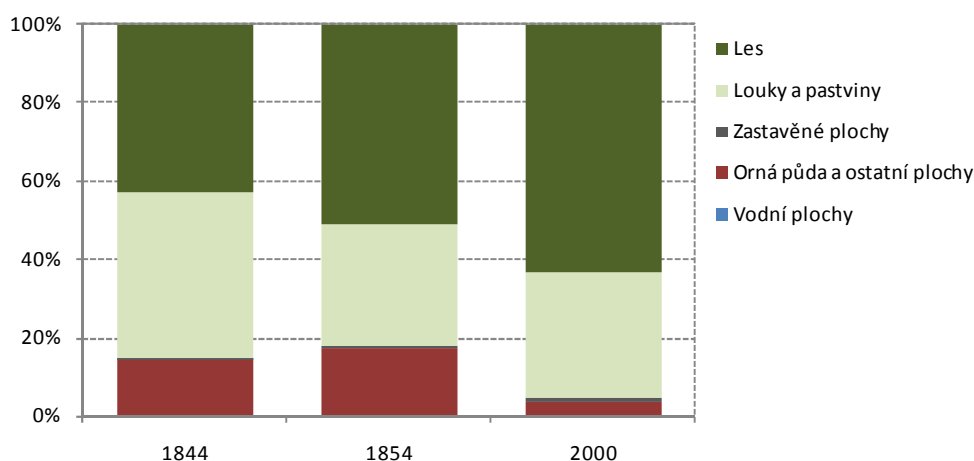


Obr. 17 Krajinný pokryv v povodí Blanice po VD Husinec v letech 1844, 1954 a 2000 (podkladová data: DIBAVOD, mapy vojenského mapování, DMÚ 25)

Tabulka 6 a obrázek 18 ukazují zastoupení jednotlivých tříd v rámci sledovaného povodí Blanice po profil Podedvorský Mlýn (VD Husinec). Z výsledných map i z tabulky je viditelný trend nárůstu lesních ploch především od roku 1954 do současnosti a zároveň ve stejném období pokles výměry orné půdy na minimální hodnoty. Výchozím předpokladem dalších analýz tedy bylo, že se tyto změny promítly do reakce povodí na extrémní srážkové události, přičemž výraznější změna by měla být modelována mezi lety 1954 a 2000.

Tabulka 6 Zastoupení tříd krajinného pokryvu v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn v letech 1844, 1954, 2000

Typ krajinného pokryvu	2. vojenské mapování (1844)		Vojenské mapování 50. léta (1954)		DMÚ 25 (2000)	
	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]	[km ²]	[%]
Les	89,87	42,87	106,46	50,79	133,05	63,47
Louky a pastviny	88,66	42,30	65,92	31,45	67,22	32,07
Zastavěné plochy	0,30	0,15	0,81	0,39	1,91	0,91
Orná půda a ostatní plochy	30,78	14,68	36,30	17,32	7,27	3,47
Vodní plochy	0,01	0,00	0,13	0,06	0,17	0,08
Celkem	209,62	100,00	209,62	100,00	209,62	100,00



Obr. 18 Relativní zastoupení tříd krajinného pokryvu v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn v letech 1844, 1954, 2000

1.2.2 ODVOZENÍ HODNOT CN

K výpočtu hodnoty CN křivky byl využit její vztah k hydrologické skupině půdy (HSP) a typu krajinného pokryvu. Hydrologická skupina půdy byla podle metodiky Šercla (2006) stanovena ve vztahu k infiltrační rychlosti, retenční vodní kapacitě půdy (RVK) a sklonitosti. Podle uvedených charakteristik lze půdy rozdělit do kategorií A – D (tabulka 7).

Metodika podle Šercla (2006), udává vztah mezi HSP a krajinným pokryvem na základě tabulky 8. Některé hodnoty byly upraveny podle původní studie, která byla zpracována americkým ústavem pro ochranu půdy (SCS – Soil Conservation Service; Mockus, 1964).

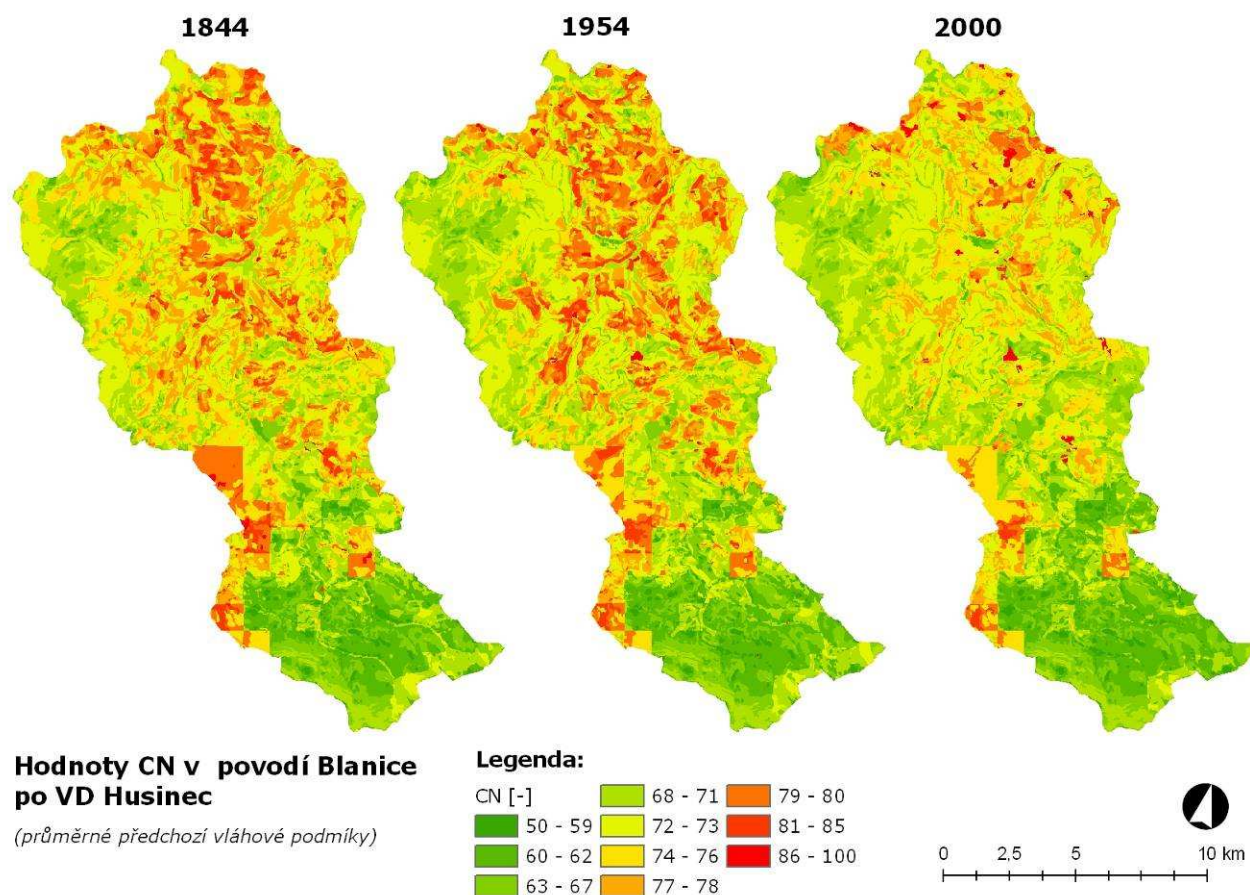
Tabulka 7 Charakteristiky hydrologických skupin půd (HSP) z hlediska retenční vodní kapacity, infiltrační rychlosti a sklonitosti (upraveno podle Novák, 2003; Šercl, 2006)

HSP	Rámcová zrnitostní charakteristika	Retenční vodní kapacita [l.m^{-2}]	Infiltrační rychlost [mm.min^{-1}]	Průměrný sklon [%]
A	p, hp	nízká RVK (60 l.m^{-2})	vysoká rychlost ($> 2,5$)	0 – 2
	p, hp + skelet, lesní půdy	nízká RVK (35 l.m^{-2})		
B	ph	nižší střední RVK (140 l.m^{-2})	střední rychlost ($0,08 - 2,5$)	2 – 5
	ph + skelet, lesní půdy	nižší střední RVK – 80 l.m^{-2})		
	h	vysoká RVK (320 l.m^{-2})		
	h + skelet, lesní půdy	vysoká RVK (210 l.m^{-2})		
C	jh	vyšší střední RVK (220 l.m^{-2})	nízká rychlost ($0,025 - 0,08$)	5 – 10
	jh + skelet, lesní půdy	vyšší střední RVK (130 l.m^{-2})		
D	jv, j	střední RVK (150 l.m^{-2})	velmi nízká rychlost ($< 0,025$)	> 10
	jv, j + skelet, lesní půdy	střední RVK (90 l.m^{-2})		

Tabulka 8 Hodnoty CN v závislosti na vybraném typu krajinného pokryvu a hydrologické skupině půdy. Údaje ve sloupcích A-D označují hodnotu CN pro danou hydrologickou skupinu půdy (Šercl, 2006, upraveno)

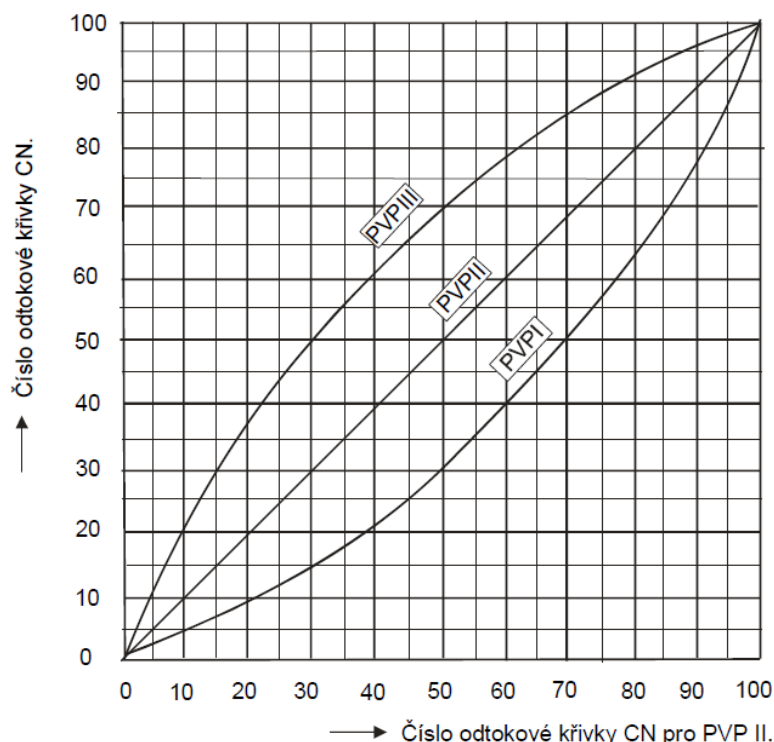
Třída CORINE	Kategorie využívání území	A	B	C	D
112	Nesouvislá městská zástavba	77	85	90	92
211	Nezavlažovaná orná půda	64	73	83	87
231	Louky a pastviny	49	69	79	84
243	Zemědělské oblasti s přirozenou vegetací	58	69	77	80
311	Listnaté lesy	45	61	74	80
312	Jehličnaté lesy	45	61	74	80
313	Smíšené lesy	45	61	74	80
321	Přírodní louky	45	60	73	79
324	Nízký porost v lese	45	60	72	78
412	Rašeliniště	90	90	90	90
512	Vodní plochy	100	100	100	100

Na základě převodní tabulky 8 byly vytvořeny pro každý stav krajinného pokryvu tři rastry obsahující informaci o hodnotě CN (Curve Number) podle infiltrační rychlosti, RVK a sklonitosti („CN_{inf}“, „CN_{rvk}“ a „CN_{sklon}“). Rastry byly vytvořeny v programu ArcGIS pomocí mapové algebry v prostorovém rozlišení 50 m. Výsledný grid CN pro každý stav krajinného pokryvu vznikl podle metodiky Šercla (2006) kombinací výše zmíněných gridů. Nejprve byl funkcí „CN_{prum} = PRŮMĚR (CN_{inf}; CN_{rvk}; CN_{sklon})“ vytvořen pomocný průměrný grid. Následně byl tento grid zkombinován s gridem CN podle infiltrační rychlosti operací „CN_{final} = MAX (CN_{prum}; CN_{inf})“. Tím byl zdůrazněn význam infiltrační rychlosti pro koncentraci odtoku v povodí. Výsledné rastry pro stavy krajinného pokryvu 1844, 1954 a 2000 jsou zobrazeny na obrázku 19. Funkcí „Zonal Statistics“ byly vypočteny průměrné hodnoty CN pro každé dílčí povodí, které patřily k základním vstupním údajům modelu HEC-HMS (příloha 7).



Obr. 19 Hodnoty CN v povodí Blanice po VD Husinec pro stav krajinného pokryvu v roce 1844, 1954 a 2000

Odvozené hodnoty CN křivek udávají stav z hlediska průměrného nasycení půdy předchozími srážkami, tzv. PVP II (předchozí vláhové podmínky). Míra nasycení je dána celkovým úhrnem srážek v předchozích pěti dnech. Podle Janečka et al. (2002) lze rozlišit tři úrovně nasycení půdy – PVP I, PVP II, PVP III. Při PVP I je nasycení ve vegetačním období menší než 36 mm, u PVP II je v rozmezí 36 a 53 mm a při PVP III (plné nasycení půdy) spadlo v předchozích pěti dnech více jak 53 mm srážek. Podle předchozího úhrnu srážek dochází k přepočtu hodnoty CN na základě grafu uvedeného na obrázku 20. Pro návrhové účely jsou doporučeny simulace pro průměrné předchozí vláhové podmínky, tedy PVP II.



Obr. 20 Nomogram odvození hodnot CN na základě nasycení půdy předchozími srážkami (Janeček et al., 2002)

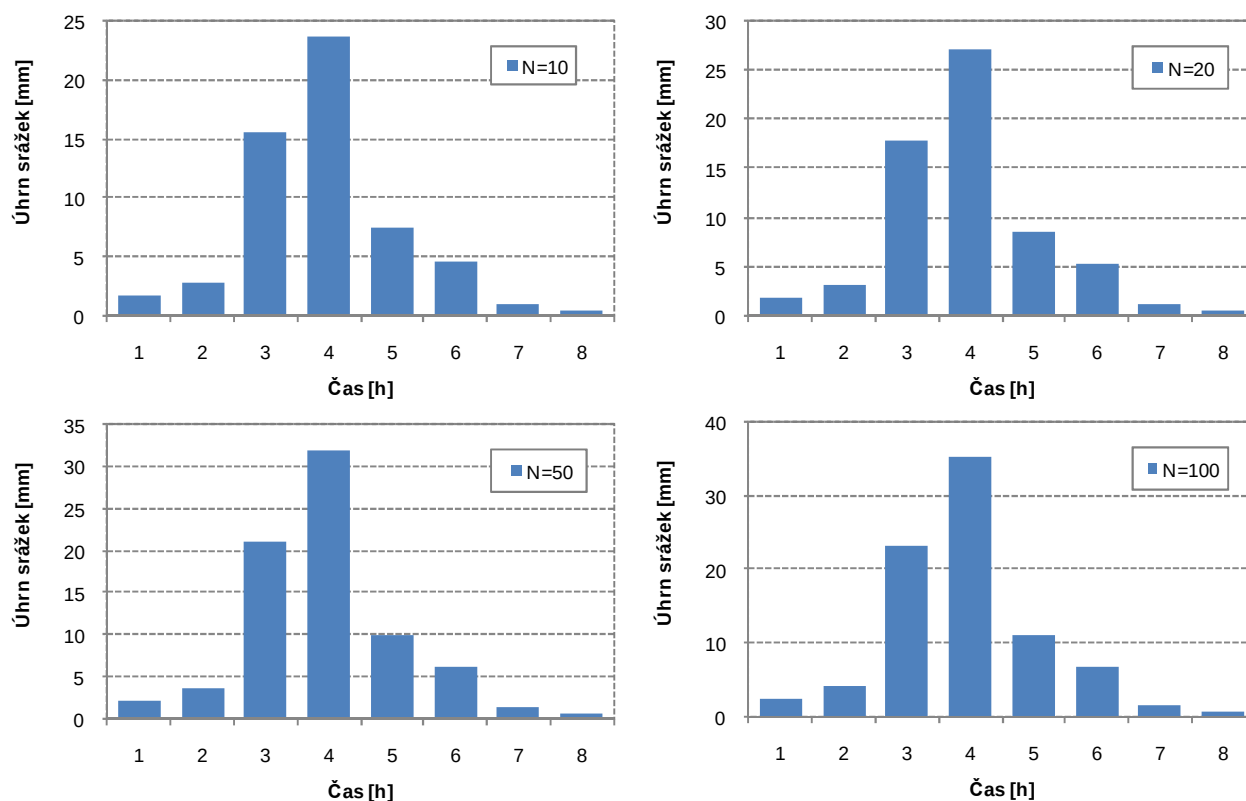
1.2.3 MĚŘENÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ ÚDOLÍ NIVY

Důležitým vstupem modelu HMS jsou údaje o morfometrii koryta a údolní nivy. Na základě použité metody Muskingum-Cunge vstupují data do modelu ve formě zjednodušených příčných profilů. Data byla také použita pro hydrodynamické modelování, a proto bylo přistoupeno k podrobnému změření příčných profilů horní Blanice v úseku Arnoštov – VD Husinec pomocí totální geodetické stanice a laserového dálkoměru a sklonoměru. Bylo vyměřeno celkem 60 příčných profilů v kroku 300 – 700 metrů podle členitosti údolní nivy. Zaměřeny také byly všechny hydrotechnické objekty na toku, například mosty (Česák et al., 2008B).

1.2.4 ČASOVÉ ŘADY SRÁŽEK A PRŮTOKŮ

Časové řady srážek a průtoků pro kalibrační a verifikační události byly získány z pozorovací sítě ČHMÚ. Denní srážkové úhrny byly získány ze stanic Husinec, Kubova Huť, Horní Vltavice, Lenora, Mlynářovice, Zbytiny, Ktíš a Frantoly. Interpolací metodou kriging byly pomocí zonální statistiky v prostředí ArcGIS získány plošné hodnoty denního úhrnu srážek pro každé dílčí povodí. Dalším krokem byl výpočet hodinových intenzit srážek pro každé subpovodí. Hodinové úhrny srážek byly dostupné ze stanic Husinec, Lenora a Ktíš. Jednotlivým dílčím povodím bylo přiřazeno relativní rozdělení hodinových intenzit srážek takové jako má stanice, která je nejbližší danému subpovodí. Hodinové intenzity srážek byly následně získány přepočtem na denní úhrn srážek dílčího povodí. Denní a hodinové průměrné průtoky byly dostupné ze stanic Blanický Mlýn a Podedvorský Mlýn.

Při modelování teoretických událostí byla hodnocena velikost kulminace a čas výskytu kulminace při různých extremitách vstupních srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Na povodí Blanice byly návrhové hodnoty vypočteny z řady denních úhrnů srážek z okolních stanic z let 1980 – 2002 za předpokladu logaritmicko-normálního rozložení maximálních úhrnů denních srážek v každém roce. Pro vyjádření hodinových intenzit srážek byl použit návrhový hyetogram podle Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd České republiky, v.v.i, který uvažuje rozložení denního úhrnu srážek do osmi hodin (Řezáčová, et al., 2005). Pro povodí Blanice byla pro danou extremitu použita pouze jedna časová řada srážek, čímž byl zaveden zjednodušující předpoklad prostorově homogenního rozdělení návrhových srážek na povodí (obr. 21).



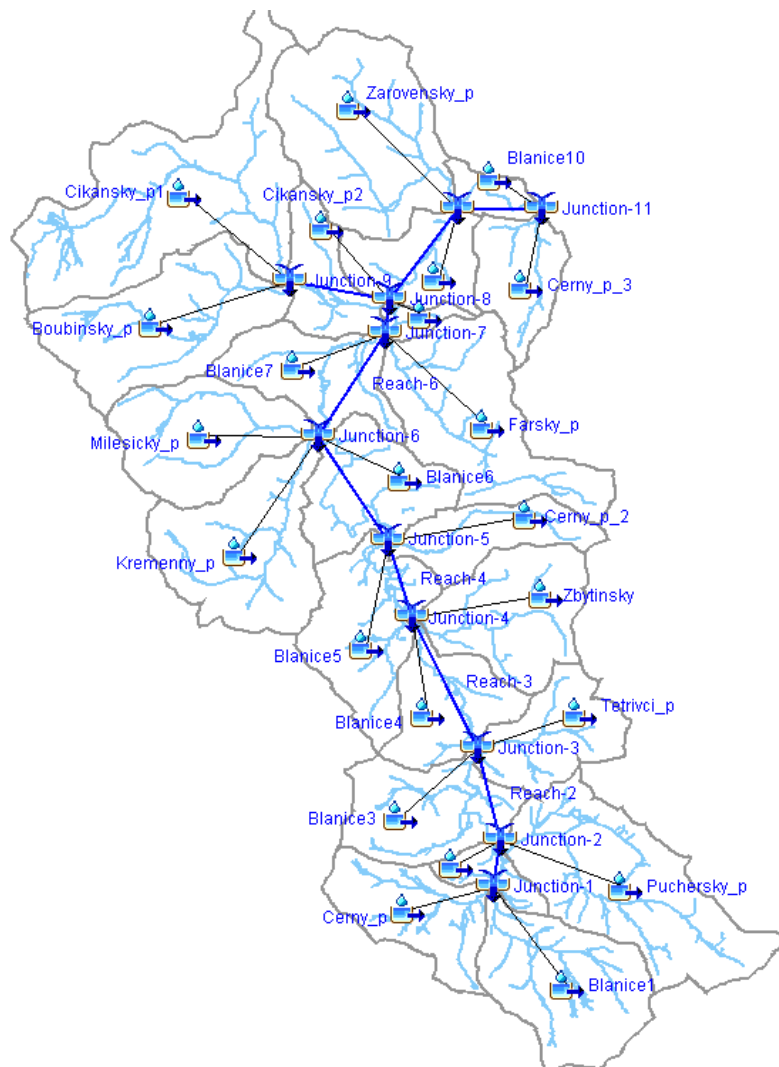
Obr. 21 Hodinové intenzity srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let podle teoretického návrhového hyetogramu UFA AV ČR použité pro povodí Blanice

1.2.5 SESTAVENÍ MODELU, POUŽITÉ MODELOVACÍ TECHNIKY

Podle kroků, uvedených v části A, byl v programovém prostředí HEC-HMS sestaven diskretizovaný model povodí (obr. 22). Pro každé dílčí povodí modelu (celkem 23 dílčích povodí) byly odvozeny parametry charakterizující jejich strukturu a chování (příloha 7).

Hlavní modelovací technika použitá v modelu HEC-HMS byla metoda SCS CN (viz Feldman, 2000). Pro výpočet dalších komponent srážko-odtokového procesu bylo použito standardních metod, které jsou v podobných případech často aplikovány. Pro stanovení přímého odtoku (*Direct-Runoff Model*) byla použita metoda Clarkova jednotkového hydrogramu, pro výpočet podzemního odtoku (*Baseflow Model*) byla použita metoda exponenciálního poklesu. Ta definuje velikost podzemního odtoku v daném čase pomocí počátečního podzemního odtoku. Potřebné parametry

byly určeny analýzou hydrogramu a na základě dostupné literatury (Feldman, 2000). Pro výpočet postupu povodňové vlny v korytě toku (*Channel Model*) byla použita metoda Muskingum-Cunge, která z metod hydrologického routingu nejlépe popisuje proudění vody v korytě (využívá difuzní aproximace věty o hybnosti). Jednotlivé modelovací techniky jsou podrobně popsány v obecné metodice v části A.



Obr. 22 Schéma povodí Blanice po VD Husinec v modelu HEC-HMS

1.2.6 MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ

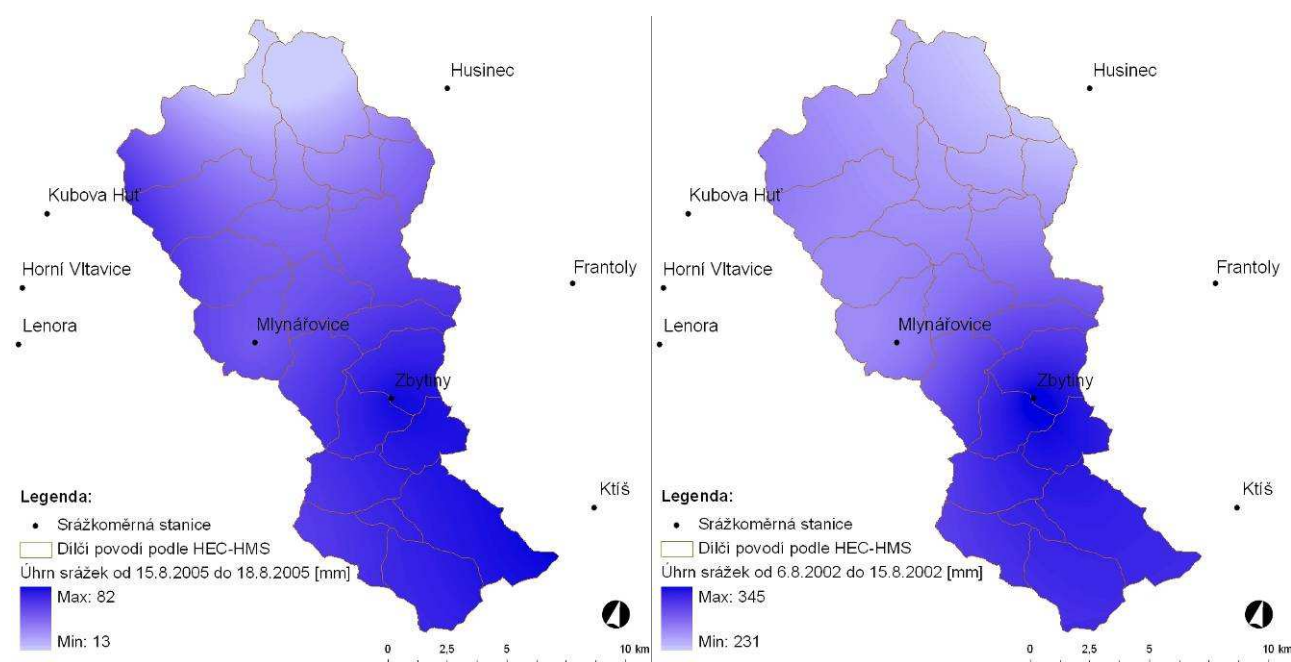
Vliv změn krajinného pokryvu na odtok z povodí byl hodnocen na základě skutečných i teoretických (N-letých) událostí. Hodnocena byla velikost kulminace a čas výskytu kulminace při různých extremitách jednodenního úhrnu srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Simulace různých extremit umožnily sledování vlivu vegetačního krytu na velikost povodně. Reakce povodí na srážkovou událost při změnách krajinného pokryvu byla hodnocena ve třech časových horizontech – 1845, 1945 a 2000, které odpovídají stavu krajinného pokryvu na základě zpracovaných dat vojenských map. Časový krok výpočtu modelu byl vzhledem k velikosti povodí

nastaven na 30 minut. Evapotranspirace nebyla uvažována, což lze označit vzhledem k modelování krátkých povodňových událostí jako přijatelné zjednodušení.

1.3 VÝSLEDKY

1.3.1 KALIBRACE A VERIFIKACE

Sestavený model byl kalibrován na první vlně povodňové události ze srpna 2005 (15. 8. 2005 – 18. 8. 2005) a verifikován na povodni ze srpna 2002 (6. 8. 2002 – 15. 8. 2002). Na obr. 23 je zobrazeno rozložení srážek obou událostí. Interpolace bodových staničních hodnot byla provedena pomocí metody univerzálního krigingu v programu Surfer s následným zpracováním v programu ArcGIS.



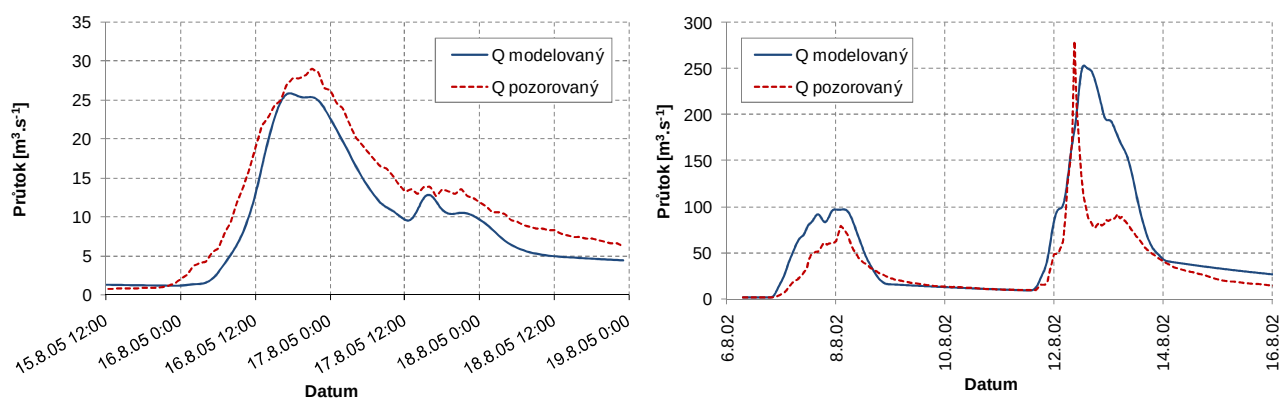
Obr. 23 Rozložení celkového úhrnu srážek na povodí Blanice v období 15. 8. 2005 – 18. 8. 2005 (kalibrační událost, vlevo) a 6. 8. 2002 – 15. 8. 2002 (verifikační událost, vpravo)

Kalibrace modelu probíhala ve dvou časově navazujících krocích. Nejprve byla manuální kalibrací upravena hodnota doby koncentrace T_c (přímý odtok), poklesové konstanty ReC a prahové hodnoty $Ratio\ To\ Peak$ (obě podzemní odtok). Následně proběhla automatická kalibrace parametrů CN (objem odtoku), T_c a R_c (oba přímý odtok). Použita byla kalibrační metoda „Univariate Gradient“, přičemž odchylky pozorovaného a simulovaného hydrogramu byly sledovány podle parametru střední kvadratické chyby RMSE (*Root Mean Square Error*) při zohlednění velikosti kulminace (*Peak-Weighted RMSE*). Přehled kalibrovaných parametrů a relativní změnu parametrů po kalibraci ukazuje tabulka 9.

Tabulka 9 Přehled kalibrovaných parametrů. Ve sloupci „Koeficient“ je uvedena relativní změna parametru po kalibračním procesu

Parametr	Model	Název	Koeficient
CN	Runoff-Volume Model	CN Curve - hodnota CN křivky (SCS CN)	0,9
T_c	Direct-Runoff Model	Time of Concentration - doba koncentrace (Clark UH)	2,65 – 6,05
R_c	Direct-Runoff Model	Storage Coefficient - určuje dobu zdržení vody v dílčím povodí (Clark UH)	0,44 – 2,25
ReC	Baseflow Model	Recession Constant – poklesová konstanta podzemního odtoku	1,5
Ratio to Peak	Baseflow Model	Threshold Value – prahová hodnota, kdy po poklesu podzemního odtoku nastává vzestup (zadávána relativně ke kulminaci)	1,14

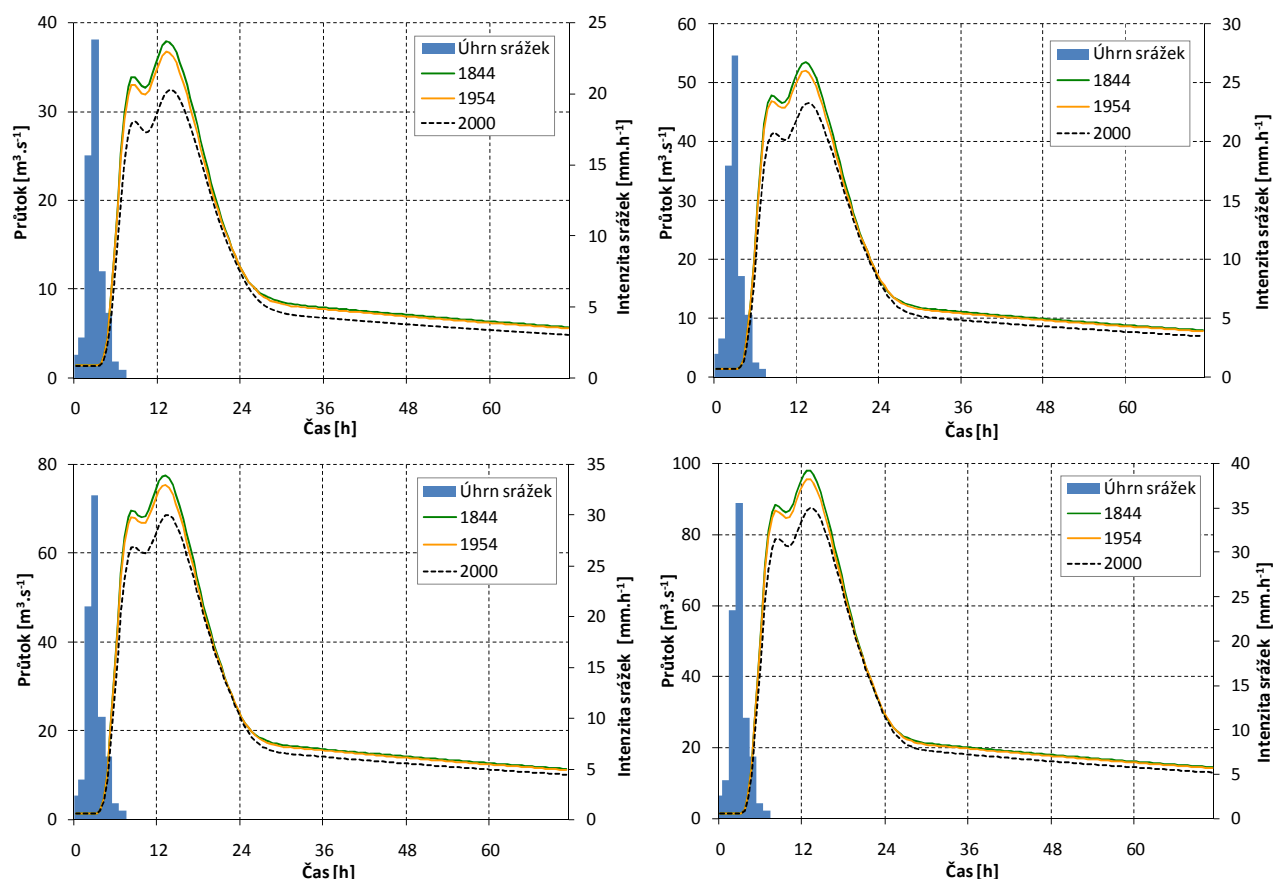
Kritérium Nash-Sutcliffe, které vyjadřuje míru shody simulovaného a pozorovaného hydrogramu dosáhlo hodnoty 0,88 (při absolutní shodě je kritérium rovno 1). Procentní chyba kulminace pozorované a modelované vlny je 10,9 %. Model byl verifikován na povodni ze srpna 2002 (6. 8. 2002 – 16. 8. 2002). Na obrázku 24 je vidět relativně dobrá shoda ve velikosti kulminace (chyba 9,5 %), simulovaná vlna se ale zpozdila za skutečnou o 4 hodiny. Společně s odlišnou poklesovou větví simulovaného hydrogramu to bylo příčinou velmi nízkého Nash-Sutcliffova kritéria (-0,28), přičemž vizuální shoda obou hydrogramů se jeví uspokojivě. Pro model by byla lepší verifikace na jiné události než uvedené extrémní události z roku 2002, která by byla z hlediska extremity a průběhu podobná kalibrační události. Ověření modelu HEC-HMS na povodni ze srpna 2002 potvrdilo i problémy vznikající při použití metody SCS CN na událostech tvořených více srážkovými epizodami. Verifikace na první vlně události (6. 8. 2002 – 9. 8. 2002) dává o něco lepší výsledky ukazatele Nash-Sutcliffe (0,06).



Obr. 24 Kalibrace modelu na povodni v srpnu 2005 (vlevo) a verifikace modelu na povodni v srpnu 2002 (vpravo)

1.3.2 VARIANTNÍ SIMULACE

Zkalibrovaný a verifikovaný model byl použit pro simulaci teoretických a skutečných povodňových vln odlišné extremity. Výsledky jsou zobrazeny na obrázku 25 a v tabulce 10. V každém grafu na obrázku 25 je zobrazen hydrogram odtoku při uvažování různých stavů krajinného pokryvu – v roce 1844, 1954 a 2000.



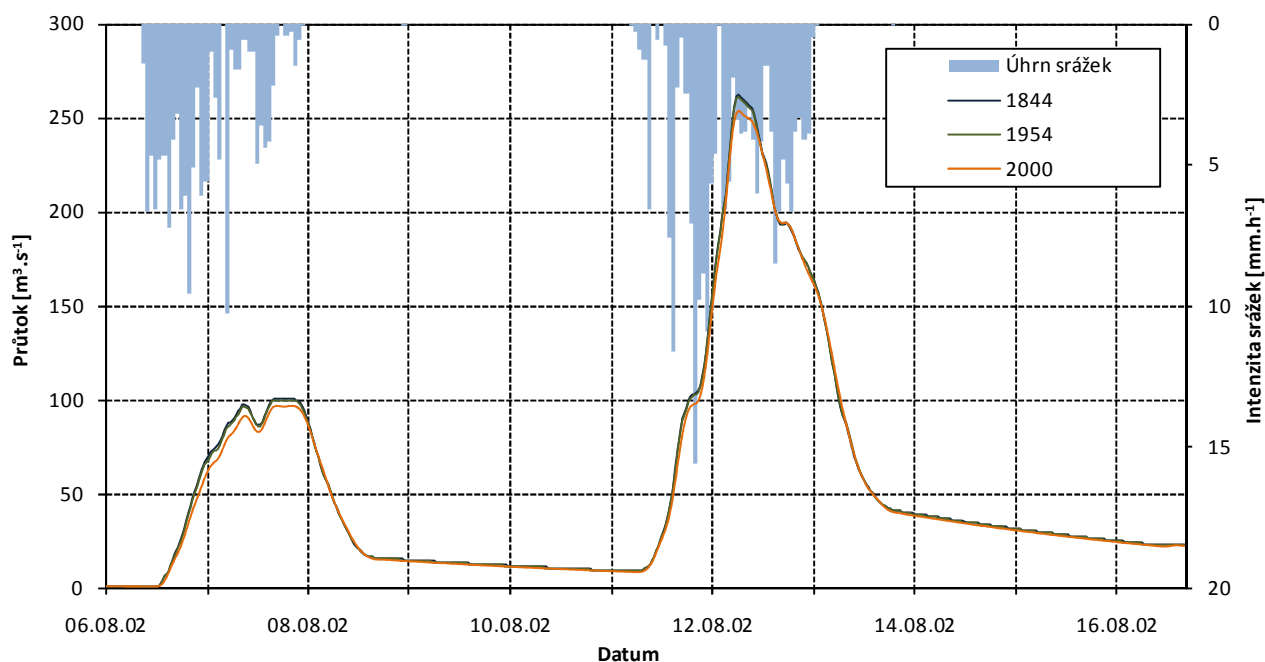
Obr. 25 Simulované teoretické hydrogramy průtoku v profilu Podedvorský Mlýn v obdobích 1844, 1954 a 2000 při 1-denním úhrnu srážek s průměrnou dobou opakování 10 let (vlevo nahoře), 20 let (vpravo nahoře), 50 let (vlevo dole) a 100 let (vpravo dole).

Tabulka 10. Vybrané parametry simulovaných událostí

	N10	N20	N50	N100
Úhrn srážek [mm]	57,2	65,5	76,7	85,3
$Q_k [m^3.s^{-1}] - 1844$	37,9	53,6	77,4	98,0
$Q_k [m^3.s^{-1}] - 1954$	36,7	52,1	75,4	95,6
$Q_k [m^3.s^{-1}] - 2000$	32,5	46,6	68,4	87,4
Pokles 2000 / 1844 [%]	-14,3	-12,9	-11,6	-10,8
Pokles 2000 / 1954 [%]	-11,6	-10,4	-9,3	-8,5

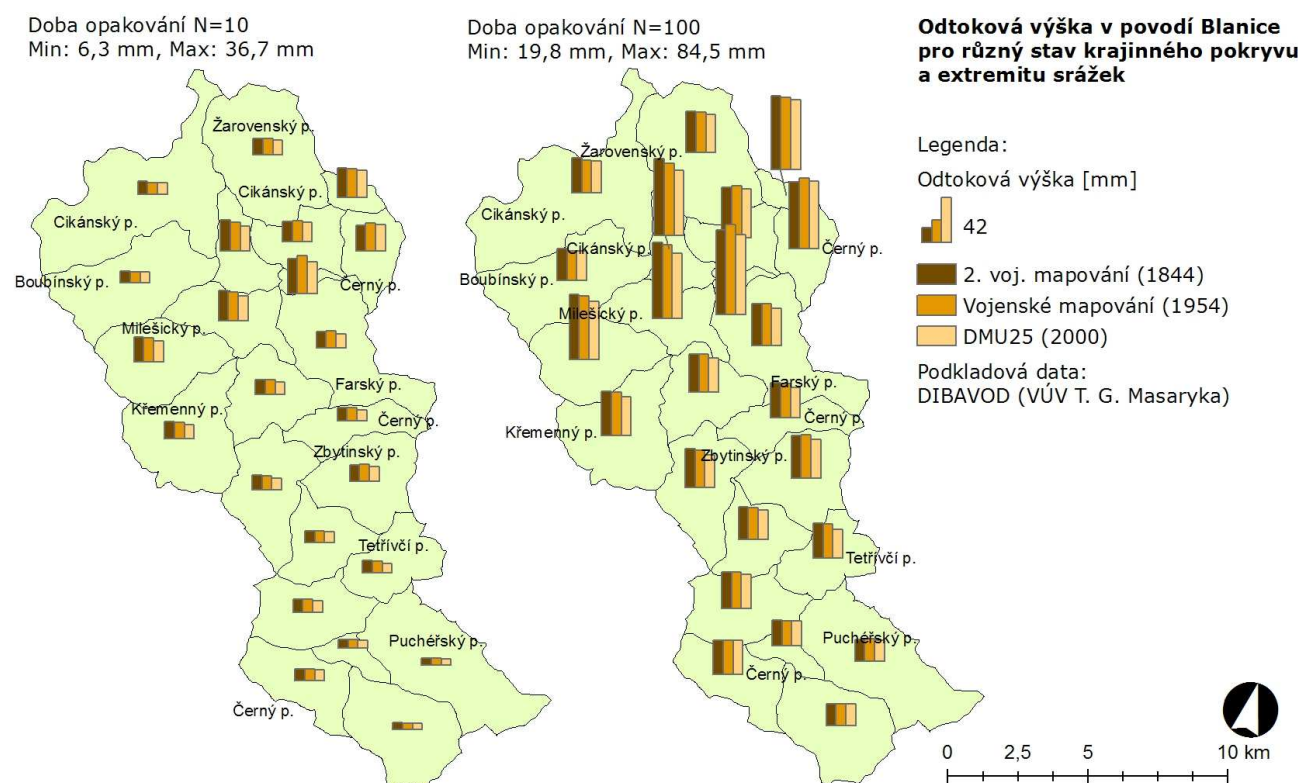
Z grafů jsou zřejmé nižší kulminační průtoky pro stav krajinného pokryvu v roce 2000 pro všechny extremity vstupních srážek. Do uvedených výsledků se promítl analyzovaný stav krajinného pokryvu v jednotlivých letech, ze kterého je zřetelný trend úbytku orné plochy a nárůst lesních porostů (viz tabulka 6). Tato skutečnost se logicky promítla do simulovaných hydrogramů. Největší procentuální snížení kulminace mezi lety 1844 a 2000 bylo zaznamenáno u povodně s nejkratší dobou opakování (10 let) – 14,3 %. U stoleté povodně už je snížení méně významné, 10,8 %. Ačkoliv je nutné zdůraznit, že tyto výsledky je potřeba brát vzhledem k celkové nejistotě modelu (dané nutným zjednodušením vstupních dat nebo modelovacích technik) jako orientační, je přesto možné usuzovat na snižující se vliv krajinného pokryvu na odtok z povodí se zvyšující se

extremitou vstupních srážek. Výsledky simulace povodně v srpnu 2002 pro různé stavy krajinného pokryvu jsou uvedeny v obrázku 26.



Obr. 26 Simulace povodně v roce 2002 (6. 8. 2002 – 16. 8. 2002) pro stavy krajinného pokryvu v obdobích 1844, 1954 a 2000

Podle výsledků projektu „Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002“ (Bouček et al., 2003) odpovídala doba opakování kulminačního průtoku povodně v profilu Podedvorský Mlýn 200-500 let. Z grafu je zřejmý velmi malý vliv jednotlivých stavů krajinného pokryvu na průběh povodně. Hydrogramy průtoku v roce 1844 a 1954 jsou prakticky totožné (pokles kulminace v roce 1954 o 0,6 %). Model simuloval nepatrný pokles mezi rokem 1954 a 2000 o 3 %. Při hodnocení je ale nutné vzít do úvahy nejistotu modelu, která vychází především z použitých vstupních dat a modelovacích technik. Výsledky přesto potvrzují zanedbatelný vliv změn krajinného pokryvu na kulminaci povodně u vysokých extremit (dob opakování kulminačního průtoku). Odtoková výška v dílčích povodích pro jednotlivé stavy krajinného pokryvu je uvedena na obrázku 27.



Obr. 27 Odtoková výška (v mm) v dílčích povodích Blanice pro dobu opakování srážek 10 let a 100 let

Mapy na obrázku 27 ukazují pomocí kartodiagramů absolutní čísla odtokové výšky v dílčích povodích pro krajinný pokryv ve zkoumaných letech a při úhrnu vstupních srážek s dobou opakování 10 let a 100 let. Je zde zřejmý velký rozdíl v absolutních sumách odtokové výšky a ve většině dílčích povodí je znatelný poklesový trend odtoku od poloviny 19. století do současnosti. Evidentní je celkově vysoký vliv krajinného pokryvu na odtok, kdy v jižní části povodí s převažujícím zastoupením lesů je odtoková výška výrazně nižší než v severní části povodí, kde je velké procento orných ploch. Celkový úhrn srážek je přitom v jednotlivých částech povodí totožný a nelze mu tedy přisuzovat pozorované rozdíly. V jižní části povodí nebyly zaznamenány prakticky žádné změny v povodňovém režimu oproti severní části, ve které došlo za posledních 160 let k významnému nárůstu lesů a poklesu orné půdy.

1.4 DISKUZE

Při modelování vlivu krajinného pokryvu na odtok z povodí je nutné si uvědomit, že faktorů, které mohly být příčinou změny odtoku je celá řada. V této práci byl uvažován vliv krajinného pokryvu a zkrácení říční sítě (Langhammer a Vajskebr, 2006), nikoliv například vliv meliorací nebo dalších antropogenních a přírodních změn (Langhammer a Vilímek, 2008), ke kterým došlo v průběhu sledovaného období od roku 1844 do roku 2000. Provedené simulace měly povahu citlivostní analýzy, ve které byl sledován vliv malého množství parametrů na odtok z povodí. V celkovém efektu ale mohou převažovat jiné faktory (např. zmíněné napřímení toků a meliorace) a skutečné projevy povodní mohou být odlišné. Z těchto důvodů je třeba výsledky vnímat jako orientační a spíše než absolutní velikosti kulminací nebo objemů povodňových vln se zabývat relativními

změnami v rámci modelovaného období. Provedený výzkum ukázal na řadu nejistot vycházejících z různých fází modelování a dal vzniknout řadě otázek, k jejichž zodpovězení bude nutný další výzkum. Přesto lze konstatovat, že dílčí cíle uvedené v úvodu studie byly splněny.

Obecně se problémy a nejistoty spojené s řešením daného hydrologického úkolu pomocí vybraného srážko-odtokového modelu dají rozdělit do několika kategorií, které souvisí s jednotlivými fázemi hydrologického modelování.

- Nejistota vstupů
- Nejistota hydrologického modelu

1.4.1 NEJISTOTA VSTUPŮ

Nejistotou vstupů se rozumí nejistoty vzniklé nepřesnostmi vstupních dat dané jejich sběrem, interpretací a analýzou. Digitalizace historických mapových podkladů byla provázena celou řadou obtíží, a proto i výsledné mapy mohou být zatíženy určitou chybou. Problémy vycházely z několika okruhů.

Jedním z nich bylo zasazení map do souřadnicového systému JTSK (georeferencování). Ačkoliv jsou původní mapy 1:28 800 založeny na podrobných mapách Stablního katastru (měřítko 1:2 800), docházelo přesto k odchylkám v prostorovém umístění mapových prvků. Z tohoto důvodu také nebylo možné použít mapy tzv. 1. vojenského mapování z druhé poloviny 18. stol., které nebyly vytvářeny na přesném geodetickém podkladu (Brůna, 2003). Odchylna vzniklá zasazením do systému JTSK byla natolik velká, že by to znamenalo další zanesenou chybu do modelování a interpretace výsledků by již nebyla možná. Na uvedený problém narazili také Langhammer a Vajskebr (2006) při využití map pro hodnocení zkrácení říční sítě.

Druhý okruh možných chyb vznikl při samotné digitalizaci, především při identifikaci jednotlivých typů krajinného pokryvu na základě legendy původních papírových map. Ačkoliv je podle legendy možné barevně rozlišit typy krajinného pokryvu, bylo to díky stáří map a s tím spojené špatné identifikaci barev v některých případech velmi obtížné. Je tedy možné, že v ojedinělých případech mohlo dojít k chybné interpretaci obsahu mapy (nejčastěji mezi třídami louky a orná půda). Určitým vodítkem při interpretaci byla studie Brůna (2003) a mapový klíč zpracovaný Laboratoří geoinformatiky Univerzity J. E. Purkyně (UJEP, 2009). Třetím okruhem nejistot je celková rozloha těchto tříd, které nezaujímají velké plochy – zastavěné a vodní plochy. Díky malé ploše těchto mapových prvků může být relativní chyba vzniklá při digitalizaci poměrně vysoká, nicméně právě pro celkově malou rozlohu je absolutní chyba ve výsledných simulacích zanedbatelná.

N-letý srážkový úhrn byl ve všech případech určen pro celé povodí a následně byly na základě návrhového hyetogramu vypočteny hodinové úhrny (Řezáčová et al., 2005). Tento postup je bezpochyby zjednodušením. Přínosnější by bylo pomocí vhodné interpolace sestavit více časových řad úhrnů srážek zvláště pro každé dílčí povodí, čímž by se zajistilo přesnější vystižení distribuce srážek v povodí (Szolgay et al., 2009). Možností do budoucna zůstává testování skutečných hyetogramů místo teoretických.

1.4.2 NEJISTOTA MODELU

Při modelování je základní otázkou použití vhodných metod. V této studii je použita metoda SCS CN dostupná jako modelovací technika v systému HMS (Feldman, 2000). Výhody spočívají především v její jednoduchosti a dostupnosti dat. Metoda ale používá četná zjednodušení, která její využití limitují (předpokládá stejnoměrné rozložení srážek v čase i prostoru, nezohledňuje klasické teorie proudění vody v nenasycené zóně půdního profilu). Přesto je hojně využívána v Česku i v zahraničí (Unucka a Adamec, 2008). Výhody a nevýhody metody SCS CN shrnuje tabulka 11. Při simulacích se nepříznivě projevila jedna z nevýhod metody SCS CN. Ta dává nesprávné výsledky v případě, že během simulované události dojde k přerušení srážek. Případná druhá vlna pak neodpovídá skutečnosti, což se projevilo na poklesové větvi simulace události povodně ze srpna 2002 (obr. 24). Bohužel v době řešení nebyla k dispozici jiná data, na kterých by bylo možné zmíněné teze ověřit. Do budoucna zůstává nutné ověření výsledků pomocí metody, která bude přesněji vystihovat fyzikální zákonitosti proudění vody v nenasycené a nasycené zóně půdního profilu.

Tabulka 11 Výhody a nevýhody metody SCS CN (Feldman, 2000; upraveno)

Výhody	Nevýhody
Jednoduchá, předvídatelná a stabilní metoda	Parametry nejsou v souladu s klasickými teoriemi proudění v nenasycené zóně půdního profilu
Závisí na jednom parametru, který je funkcí hydrologické skupiny půdy, vegetace a předchozího nasycení	Při dlouhotrvajících srážkách se infiltrace blíží nule. Spíše by měla nabývat konstantní nenulové hodnoty
Parametry jednoduše odvoditelné	Vyvinuta pro malá zemědělská povodí v USA, nejistá platnost metody v jiných podmínkách
Metoda intenzivně vyvíjena, široce uznávána	Není zohledněna intenzita srážek (shodná ztráta při úhrnu srážek 25 mm za jednu hodinu nebo za jeden den)
	Nevhodná pro dlouhodobé simulace, problém dočasného přerušení deště v době simulace

Obecným problémem při aplikaci většiny modelů jsou informace o půdních datech. Model půdní vlhkosti je přitom u koncepčního přístupu nejdůležitější komponentou. Navzdory tomu je odvození půdních parametrů často velmi obtížné a zatíženo značnou chybou, která je nejčastěji dána použitým prostorovým měřítkem, kdy je velmi obtížné vystihnout prostorovou variabilitu půdních parametrů (Sangati et al., 2009). V případě lumped modelu HEC-HMS a použité metody SCS CN je odvození průměrné hodnoty parametru CN pro jedno dílčí povodí velikosti 5-10 km² na hranici použitelnosti. Uvedená skutečnost se promítla v kalibraci, ve které byl parametr CN zohledněn. Na základě výsledků je možné se domnívat, že pro zachování prostorové heterogenity půdních (i jiných) vlastností by bylo výhodnější použít distribuovaný nebo semi-distribuovaný přístup, což uvádí také Hlavčová et al. (2009). Dříve stanovené parametry by při použití distribuovaného přístupu bylo nutné překalibrovat. Uvedenou problematikou se zabýval již Refsgaard a storm (1996), Finnerty et al. (1997) nebo Kabat et al. (1997). Potvrzují to ale i novější studie, například

Moreda et al. (2006), který zkoumal postup kalibrace parametrů konkrétních povodí při využití celistvého modelu (CONT-API) místo distribuovaného modelu (SAC-SMA). Z tohoto pohledu by mohlo být přínosné použití distribuovaných vstupů hodnot CN v gridové síti namísto hodnot vztažených k dílčímu povodí (viz např. Sangati et al., 2009), což model HEC-HMS umožňuje. Společně s dalšími distribuovanými procedurami (např. metodou ModClark pro výpočet přímého odtoku v gridové síti) by uvedený postup mohl vést k lepším výsledkům zatížených menší nejistotou. Pro ověření by byl nutný další výzkum.

Presnějšímu stanovení půdních vlastností pro potřeby metody SCS CN je v České republice věnována značná pozornost (např. Novák et al., 2003; Šercl, 2006). Klíčovou roli sehrává určení hydrologické skupiny půdy (HSP) a následné stanovení hodnoty CN. Starší metodika, která byla dříve použita na povodí Blanice, vycházela ze stanovení HSP ve vztahu k hlavním půdním jednotkám databáze BPEJ (Jeníček, 2009a). Pro odvození HSP byla uvažována pouze infiltrační rychlost, zatímco v této studii byly hodnoty CN stanoveny kombinací infiltrační rychlosti, retenční vodní kapacity a sklonu (Šercl, 2006). Hodnoty CN stanovené podle novější metodiky dosahují zhruba o 20 % vyšších hodnot, což způsobuje nižší odtokovou ztrátu a tedy obecně vyšší přímý odtok z povodí. Výše uvedené skutečnosti je nutné zohlednit v kalibraci modelu.

Jak je zřejmé z výsledků simulací, významný vliv lze přisoudit nastavení počátečních podmínek, které velmi výrazně ovlivňují výsledný hydrogram. Proto je třeba této problematice věnovat velkou pozornost. Nejdůležitější z těchto podmínek je počáteční nasycení půdy. V metodě SCS CN se zohledňuje již při určování hodnoty CN. Simulace provedené pro různé stavy předchozího nasycení potvrdily význam nasycení půdy na průběh povodně a ukázaly na snižující se vliv vegetace při nasycení půdy vodou.

Výhody a nevýhody použití dalších modelovacích technik, například metod výpočtu přímého odtoku nebo proudění vody v korytě, jsou obecnějšího rázu a jsou součástí závěrečné diskuze.

1.5 DÍLČÍ ZÁVĚRY

Modelování vlivu historických změn vegetačního pokryvu na odtokový proces pomocí modelu HEC-HMS proběhlo ve čtyřech scénářích – při uvážení jednodenního úhrnu srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Stav krajinného pokryvu charakterizovaly roky 1844, 1950 a 2000. Hlavní modelovací technikou, která počítala celkový objem odtoku, byla metoda SCS CN (Soil Conservation Service Curve Number).

Výsledky potvrdily očekávání a ukázaly rozdílnou reakci povodí při různém krajinném pokryvu. Vzhledem k výraznému zvýšení lesních porostů a úbytku orné půdy od roku 1845 do současnosti, byly nejpříznivější kulminační průtoky dosaženy pro stav pokryvu v roce 2000. Výsledky potvrdily obecný předpoklad, že vliv krajinného pokryvu na odtokové poměry klesá se vzrůstající extremitou povodně. Také při vyšším počátečním nasycení povodí vlivem předchozích srážek má vegetace na výslednou povodeň výrazně nižší vliv než v případě nasycení nižšího.

Modelování vlivu krajinného pokryvu na průběh povodní ukázalo také na celou řadu nejistot vycházející jednak z charakteru vstupních dat a také z použitého modelu HEC-HMS a modelovacích technik. Nejistoty provázející aplikaci metody SCS CN použité k výpočtu objemu odtoku jednoznačně ukázaly na nutnost použití dalších metod, které by simulovaly na základě přesnějšího fyzikálního popisu procesu infiltrace a interflow. Určité zpřesnění výsledků by mohlo přinést i použití distribuovaných a semi-distribuovaných modelů, namísto lumped přístupu vyplývajícího z použitých metod.

2 MODELOVÁNÍ VLIVU SUCHÝCH NÁDRŽÍ NA PRŮBĚH POVODNÍ

2.1 ÚVOD

Uvedená studie kvantifikuje vliv suchých retenčních nádrží jako prvku integrované protipovodňové ochrany na průběh extrémních povodní. Uvedený vliv byl kvantifikován v povodí horní Chomutovky v Krušných horách po závěrový profil Tišina. Plocha povodí, na kterém byl sledován vliv suchých nádrží je 14,5 km². Kalibrace a verifikace modelu proběhla na větší části povodí po profil III. Mlýn (44,5 km²), kde je umístěn limnigraf s řadou pozorování od roku 1961. Přehledná mapa povodí je uvedena na obrázku 14. Výsledky studie byly publikovány v Jeníček (2009b) a v Jeníček (2008a).

Cíle případové studie vychází z obecných cílů práce definovaných v úvodu práce. Dílčí cíle je možné shrnout do následujících bodů:

- Posouzení vlivu vybraného typu maloplošných řešení integrované protipovodňové ochrany na extrémní povodně
- Zhodnocení použitého modelu (HEC-HMS) a metod použitých při modelování

2.2 MATERIÁL A METODY

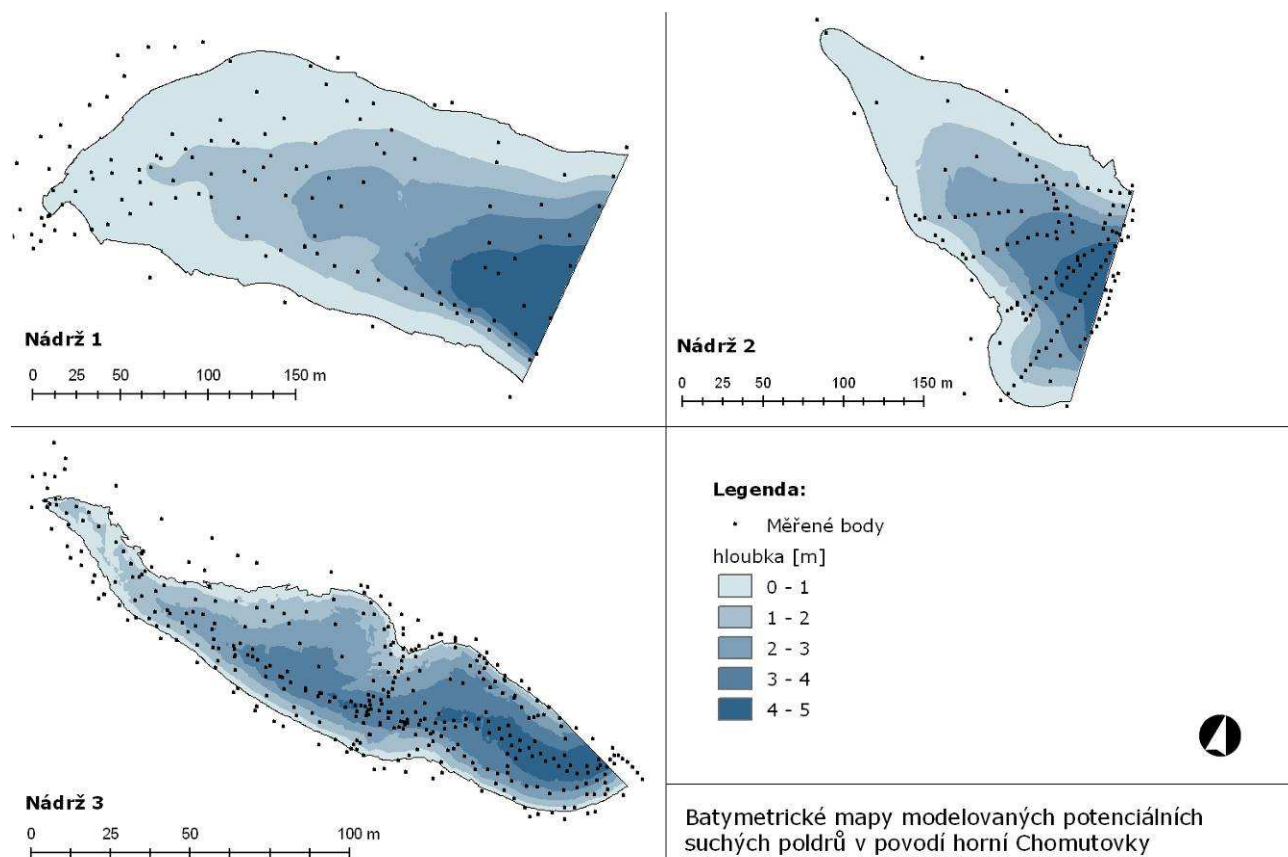
2.2.1 MĚŘENÍ VELIKOSTI A OBJEMU NÁDRŽÍ

V pramenné oblasti Chomutovky byly v blízkosti hlavního hřebene Krušných hor vybrány tři lokality vhodné pro dočasné zadržení povodňových průtoků. Výhodou při umístění nádrží jsou relativně ploché zarovnané povrchy vrcholových částí Krušných hor, které jsou z hlediska umístění nádrží a celkových možných retenčních objemů poměrně příznivé.

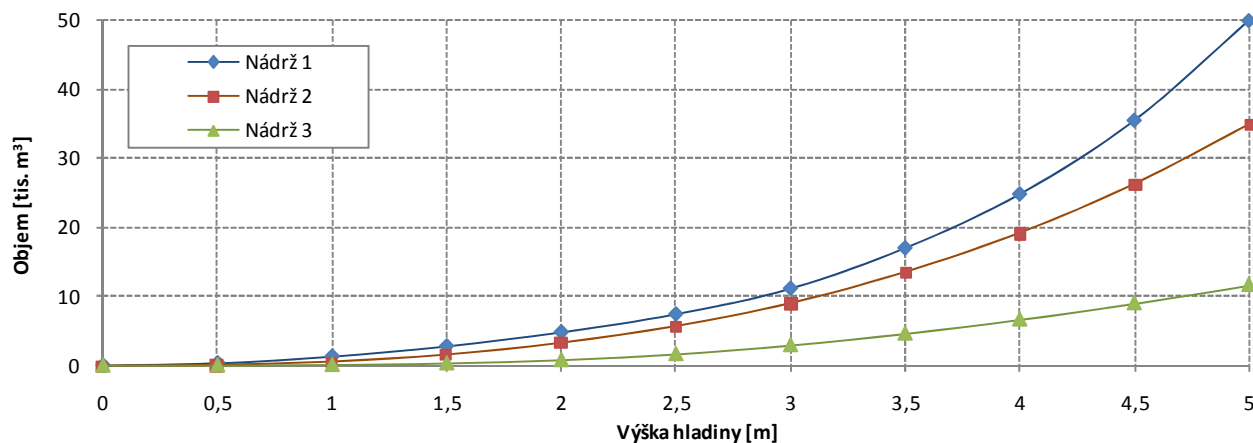
V prvním kroku proběhl výběr šesti lokalit na základě analýzy digitálního modelu terénu a nástroji GIS byly vypočteny parametry nádrží, především jejich objemy. Následně proběhlo přesné změření tří vybraných lokalit pomocí totální geodetické stanice (obr. 28, ve větším rozlišení v přílohách 4-6). Dalším zpracováním změřených dat v prostředí ArcGIS byly spočteny charakteristiky nádrží (objem, zatopená plocha, batymetrická křivka). Každá nádrž je modelem HEC-HMS reprezentována pomocí batymetrické křivky, přesněji pomocí závislosti objemu nádrže na nadmořské výšce hladiny (obr. 29). Byly modelovány dvě velikostní varianty neřízených suchých nádrží, s celkovým objemem 50,7 tis. m³ a 96,6 tis. m³. Přesné parametry jednotlivých nádrží jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12. Vybrané parametry hypotetických suchých nádrží v povodí horní Chomutovky (Zdroj: vlastní měření)

		Objem [tis. m ³]	Plocha [ha]	Pata hráze [m n. m.]	Koruna hráze [m n. m.]	Přeliv [m n. m.]
Varianta A	Nádrž 1	24,8	1,80	825,5	829,5	829,0
	Nádrž 2	19,2	1,27	803,5	807,5	807,0
	Nádrž 3	6,7	0,44	754,0	758,0	757,5
Varianta B	Nádrž 1	50,0	3,36	825,5	830,5	830,0
	Nádrž 2	34,9	1,88	803,5	808,5	808,0
	Nádrž 3	11,7	0,56	754,0	759,0	758,5



Obr. 28 Batymetrické mapy hypotetických suchých nádrží v povodí horní Chomutovky (Zdroj: vlastní měření)



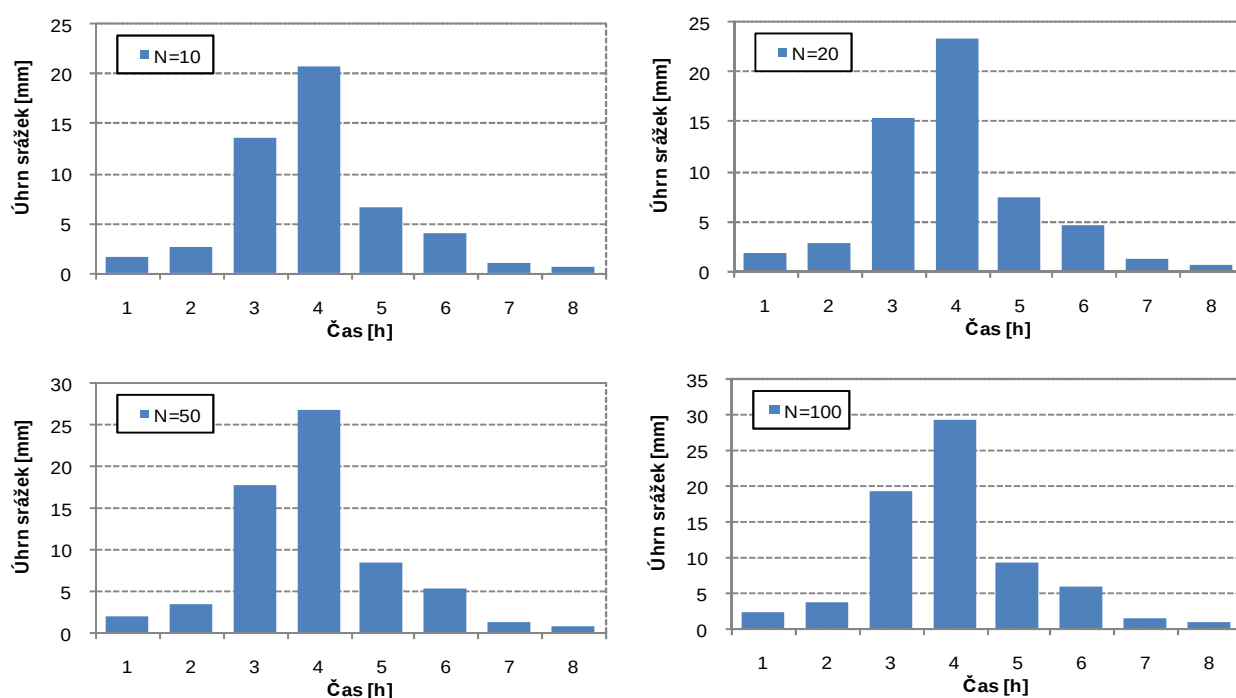
Obr. 29 Závislost objemu nádrže na relativní výšce hladiny suchých nádrží v povodí horní Chomutovky

2.2.2 ČASOVÉ ŘADY SRÁŽEK A PRŮTOKŮ

Denní srážkové úhrny pro kalibrační událost ze září roku 2007 byly získány ze stanic Kamenička, Křímov, Celná, Přísečnice a Hora Svatého Šebestiána. Pro verifikaci modelu (povodeň v srpnu 2002) byla využita data ze stanic Kamenička, Křímov, Výsluní, Celná, Přísečnice a Měděnec. Uvedené stanice provozují Český hydrometeorologický ústav a Povodí Ohře, s.p., stanici na Hoře Svatého Šebestiána provozuje od roku 2007 katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK. Denní úhrny srážek pro kalibrační a verifikační události byly interpolovány v programech Surfer a ArcGIS metodou ordinárního sférického krigingu z dat denních úhrnů srážek z okolních stanic. Pomocí zonální statistiky byly odvozeny plošné úhrny pro každé dílčí povodí.

Hodinová data byla dostupná ze stanic Přísečnice, Celná a Křímov pro událost z roku 2002, pro událost z roku 2007 navíc i ze stanic Kamenička a Hora Svatého Šebestiána. Pro přepočet denních úhrnů srážek na hodinové v každém dílčím povodí byl použit hyetogram, který vzniknul průměrem relativních hodinových vah všech známých hyetogramů v každém časovém kroku.

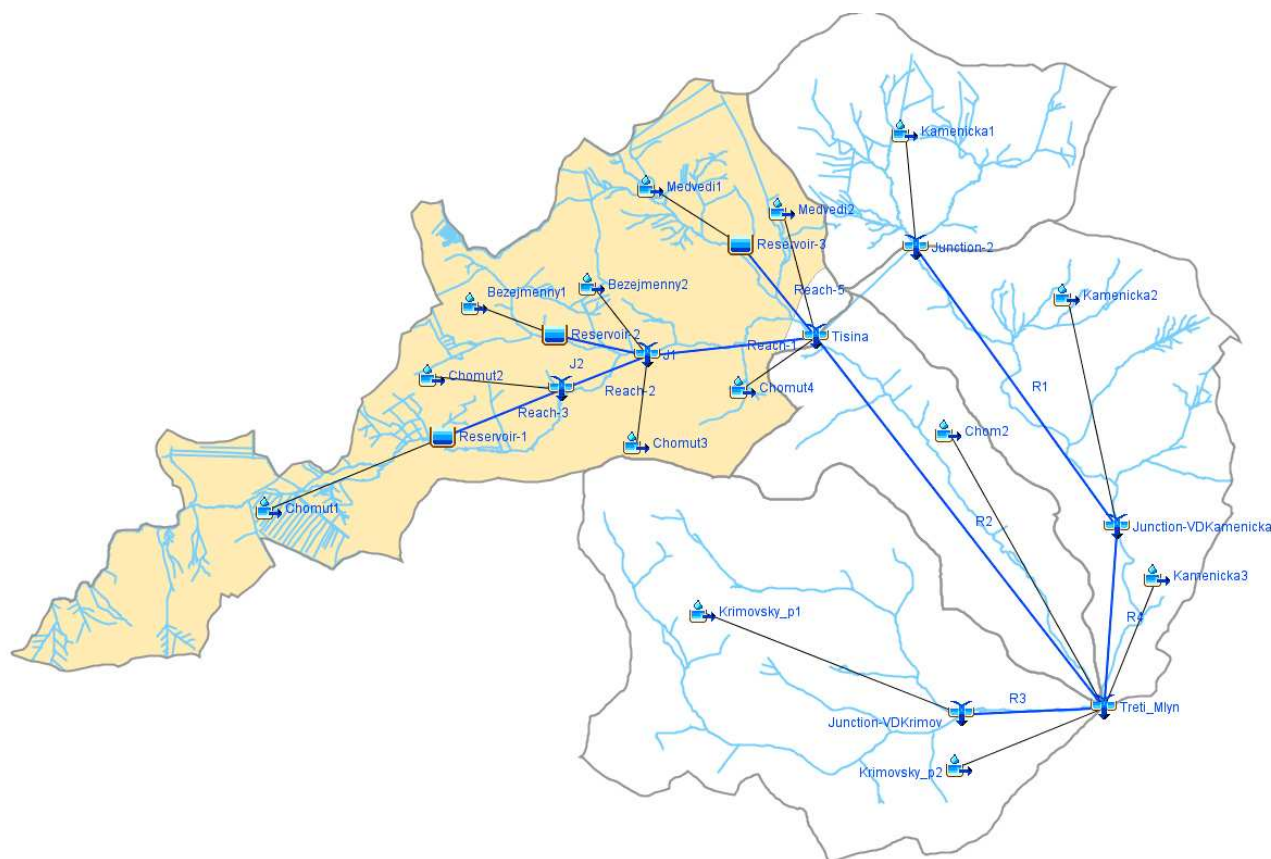
Při modelování teoretických událostí byla hodnocena velikost kulminace a čas výskytu kulminace při extremitách jednodenních srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Byly použity oficiální hodnoty návrhových srážek ČHMÚ vztahujících se k nedaleké srážkoměrné stanici Výsluní. N-leté srážky s určitou dobou trvání se stanovují za předpokladu logaritmicko-normálního rozdělení maximálních denních úhrnů srážek za dobu pozorování stanice. Pro vyjádření hodinových intenzit srážek byl použit návrhový hyetogram podle Ústav fyziky atmosféry Akademie věd České republiky, v.v.i (Řezáčová et al., 2005), který uvažuje rozložení denního úhrnu srážek do osmi hodin (viz část A, kap. 2). Na povodí horní Chomutovky byla pro danou extremitu použita pouze jedna časová řada srážek, čímž byl zaveden zjednodušující předpoklad prostorově homogenního rozdělení návrhových srážek na povodí (obr. 30).



Obr. 30 Hodinové intenzity jednodenních srážek s dobami opakování 10, 20, 50 a 100 let v povodí Chomutovky

2.2.3 SESTAVENÍ MODELU, POUŽITÉ MODELOVACÍ TECHNIKY

Schéma povodí tak, jak je interpretováno modelem HEC-HMS, je zobrazeno na obrázku 31. Na obrázku je také znázorněno umístění uvažovaných malých vodních nádrží (označení Reservoir-1 až Reservoir-3). Byly vytvořeny dvě schematizace povodí. Opatření byla navrhována v povodí po závěrový profil Tišina, a proto i modelování teoretických událostí bylo omezeno povodím, které je uzavřeno zmíněným profilem (v obrázku oranžovou barvou). Kalibrace a verifikace modelu probíhala na větší části povodí po profil III. Mlýn, ke kterému existuje dlouhá časová řada průtoků nezbytná pro správnou kalibraci modelu.



Obr. 31 Schéma povodí Chomutovky v modelu HEC-HMS. Oranžovou barvou je vyznačena část povodí po profilu Tišina, na kterém byl sledován účinek retenčních nádrží.

Pro každé dílčí povodí modelu (celkem 14 dílčích povodí) byly odvozeny parametry charakterizující jejich strukturu a chování (příloha 8). Pro výpočet komponent srážko-odtokového procesu bylo použito standardních metod, které jsou v podobných případech často aplikovány a které byly ve většině případů použity i u ostatních případových studií. Pro výpočet objemu odtoku (*Runof-Volume Model*) byla použita metoda SCS CN (viz Feldman, 2000). Pro stanovení přímého odtoku (*Direct-Runoff Model*) byla použita metoda Clarkova jednotkového hydrogramu, pro výpočet podzemního odtoku (*Baseflow Model*) byla použita metoda exponenciálního poklesu. Ta definuje velikost podzemního odtoku v daném čase pomocí počátečního podzemního odtoku. Potřebné parametry byly určeny analýzou hydrogramu a na základě dostupné literatury (Feldman, 2000). Pro výpočet postupu povodňové vlny v korytě (*Channel Model*) toku byla použita metoda Muskingum. Jednotlivé modelovací techniky jsou podrobně popsány v obecné metodice v části A.

2.2.4 MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ

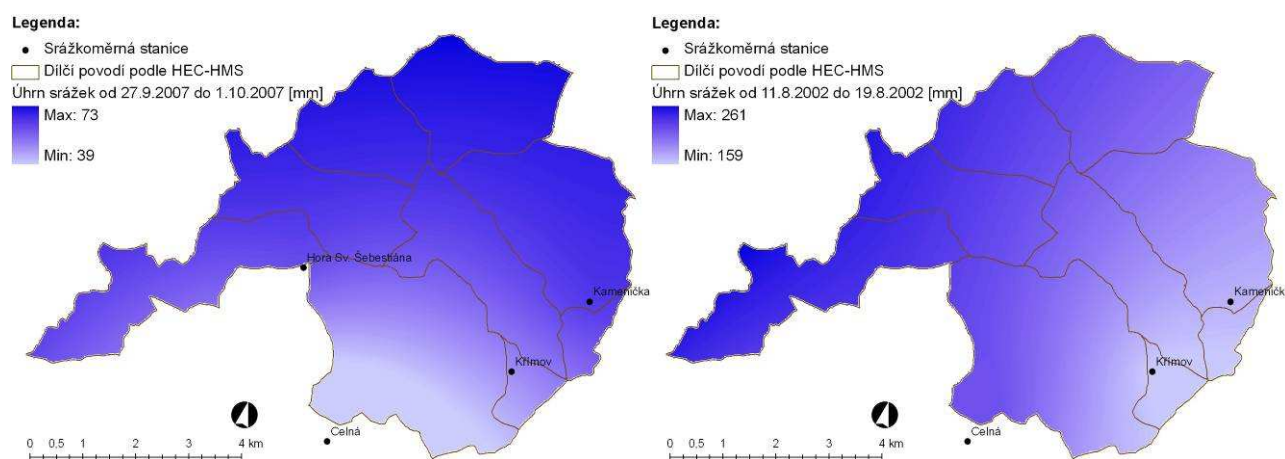
Do sestaveného a zkalibrovaného modelu povodí byly implementovány tři hypotetické suché retenční nádrže (schematicky znázorněno na obrázku 31). Varianta “A” předpokládala tři neřízené suché nádrže o maximální výšce hráze 4 metry (bezpečnostní přeliv ve výši 3,5 metru) a celkovém objemu 50,7 tis. m³. Varianta “B” předpokládala výšku hráze 5 metrů (bezpečnostní přeliv ve výšce 4,5 metru) a celkový objem 96,6 tis. m³. Objemy všech nádrží byly vypočteny v programu ArcGIS na základě dat změřených v terénu pomocí totální geodetické stanice (viz část A, kapitola 2.1.2).

Modelování změny odtokové odezvy mezi současným stavem a hypotetickým stavem s nádržemi proběhlo na základě skutečných i teoretických (N-letých) událostí. Hodnocena byla velikost kulminace a čas výskytu kulminace při různých extremitách jednodenního úhrnu srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Časový krok výpočtu modelu byl vzhledem k velikosti povodí nastaven na 15 minut. Evapotranspirace nebyla uvažována, což lze označit vzhledem k modelování krátkých povodňových událostí jako přijatelné zjednodušení.

2.3 VÝSLEDKY

2.3.1 KALIBRACE A VERIFIKACE

Sestavený model po profil III. Mlýn byl kalibrován na první vlně povodňové události ze září 2007 (27. 9. 2007 – 1. 10. 2007) a verifikován na povodni v srpnu 2002 (11. 8. 2002 – 19. 8. 2002). Interpolace bodových staničních hodnot úhrnu srážek byla provedena pomocí krigingu v programu Surfer s následným zpracováním v programu ArcGIS (obr. 32).



Obr. 32 Rozložení celkového úhrnu srážek na povodí Chomutovky v období 27. 9. 2007 – 1. 10. 2007 (kalibrační událost, vlevo) a 11. 8. 2002 – 19. 8. 2002 (verifikační událost, vpravo)

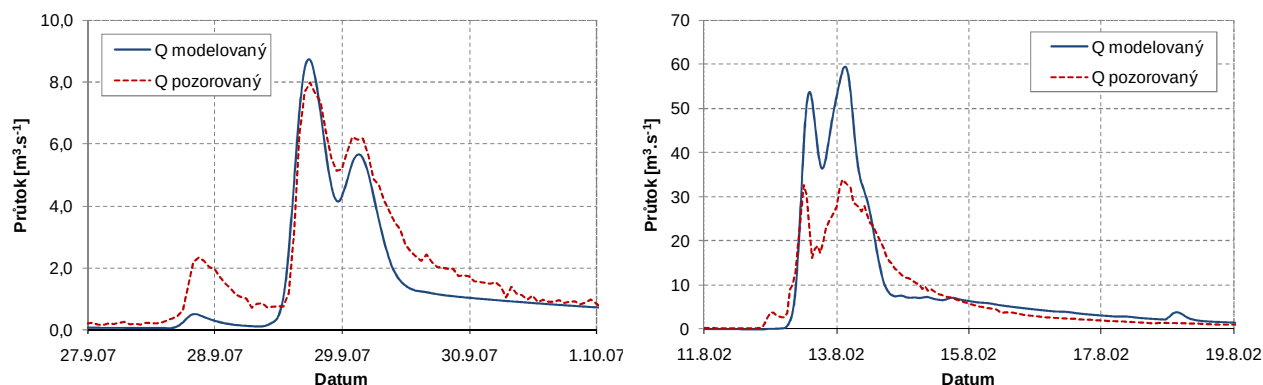
Kalibrace modelu proběhla pomocí automatické optimalizační procedury „Univariate Gradient“. Uvedená metoda sleduje postupnými iteracemi odchylky pozorovaného a simulovaného hydrogramu v závěrovém profilu na základě střední kvadratické chyby RMSE (*Root Mean Square Error*) při zohlednění velikosti kulminace (*Peak-Weighted RMSE*). Bylo provedeno více kalibračních běhů, které se lišily různými kombinacemi kalibrovaných parametrů. Nejlepší výsledky byly dosaženy kalibrací parametrů I_a (počáteční ztráta), CN (hodnota CN křivky) a T_c

(doba koncentrace). Parametry *ReC* a *Ratio to Peak* byly kalibrovány manuálně. Přehled kalibrovaných parametrů a relativní změnu parametrů po kalibraci ukazuje tabulka 13.

Tabulka 13 Přehled kalibrovaných parametrů. Ve sloupci koeficient je uvedena relativní změna parametru po kalibraci

Parametr	Model	Název	Koeficient
I_a	Runoff-Volume Model	Initial Abstraction - počáteční ztráta	0,9
CN	Runoff-Volume Model	Curve Number	1
T_c	Direct-Runoff Model	Time of Concentration	1,02 - 1,52
ReC	Baseflow Model	Recession Constant - míra poklesu podzemního odtoku	0,82
Ratio to Peak	Baseflow Model	Threshold Value - hodnota, kdy po poklesu podzemního odtoku nastává vzestup (poměr vzhledem ke kulminaci)	1

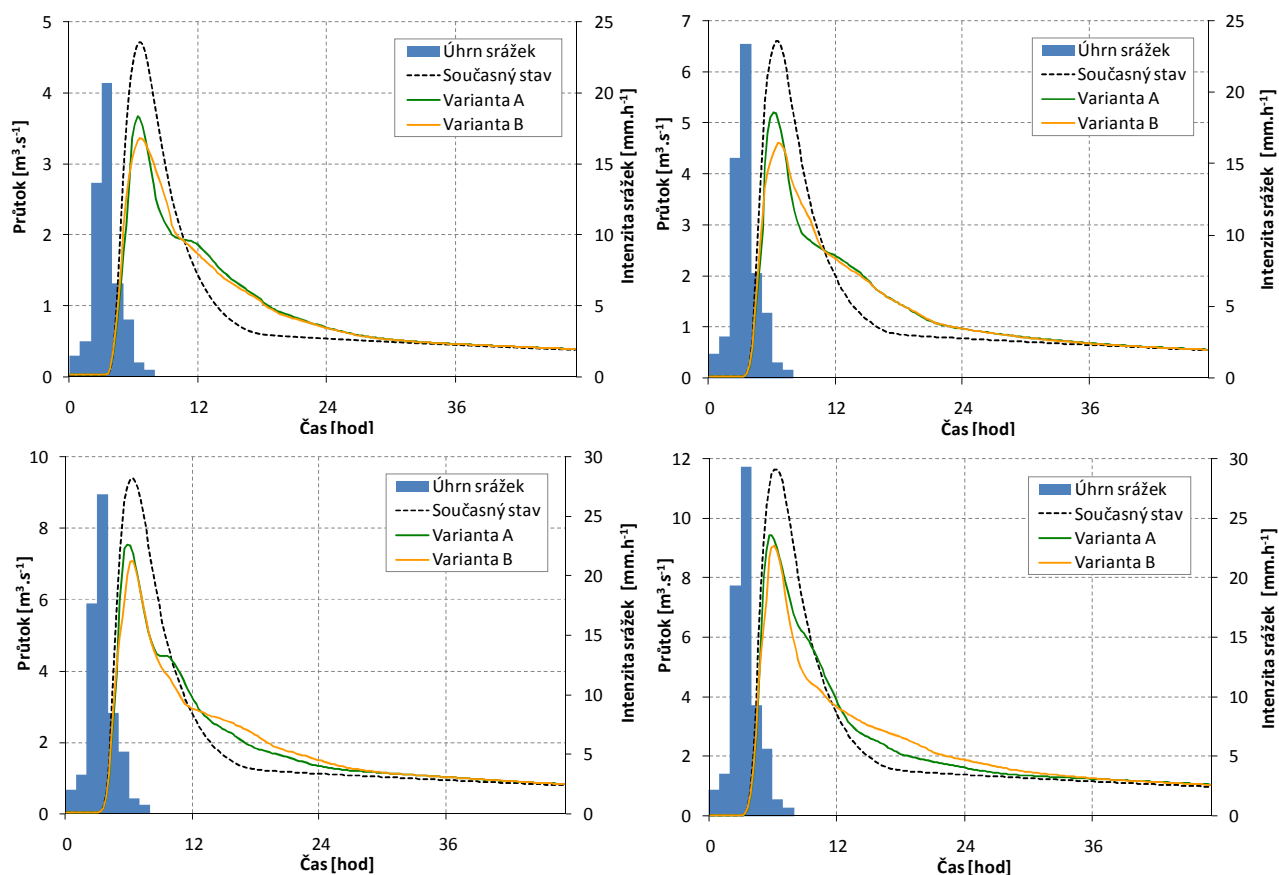
Kritérium Nash-Sutcliffe, které vyjadřuje míru shody simulovaného a pozorovaného hydrogramu dosáhlo hodnoty 0,84 (při absolutní shodě je kritérium rovno 1). Procentní chyba kulminace pozorovaná a modelované vlny je 8,4 %. Model byl verifikován na povodni ze srpna 2002 (11. 8. 2002 – 19. 8. 2002), kritérium Nash-Sutcliffe dosáhlo hodnoty 0,28. Nižší hodnota byla způsobena výrazným nadhodnocením kulminace (chyba kulminace 43,2 %). K výrazným odchylkám na vzestupné i sestupné větvi hydrogramu ale nedochází. Také fázový posun kulminace je uspokojivý, jedna hodina. Obtížnost kalibrace se při použití výše uvedených metod ukázala jako největší slabinou modelu. Jak je uvedeno dále v diskuzi, problém spočívá především v modelování průběhu povodňové vlny, kterou vyvolalo více po sobě následujících srážkových epizod. Výsledky kalibrace a verifikace modelu jsou uvedeny v obrázku 33.



Obr. 33 Kalibrace modelu na povodni v září 2007 (vlevo) a verifikace modelu na povodni v srpnu 2002 (vpravo)

2.3.2 VARIANTNÍ SIMULACE

Zkalibrovaný a verifikovaný model byl použit pro simulaci teoretických a skutečných povodňových vln odlišné extremity. Výsledky simulací při zahrnutí obou variant nádrží a pro současný stav jsou uvedeny na obrázku 34 a v tabulce 14. V každém grafu na obrázku 34 jsou uvedeny hydrogramy odtoku pro současný stav (bez vlivu nádrží) a pro dva hypotetické stavy s nádržemi.



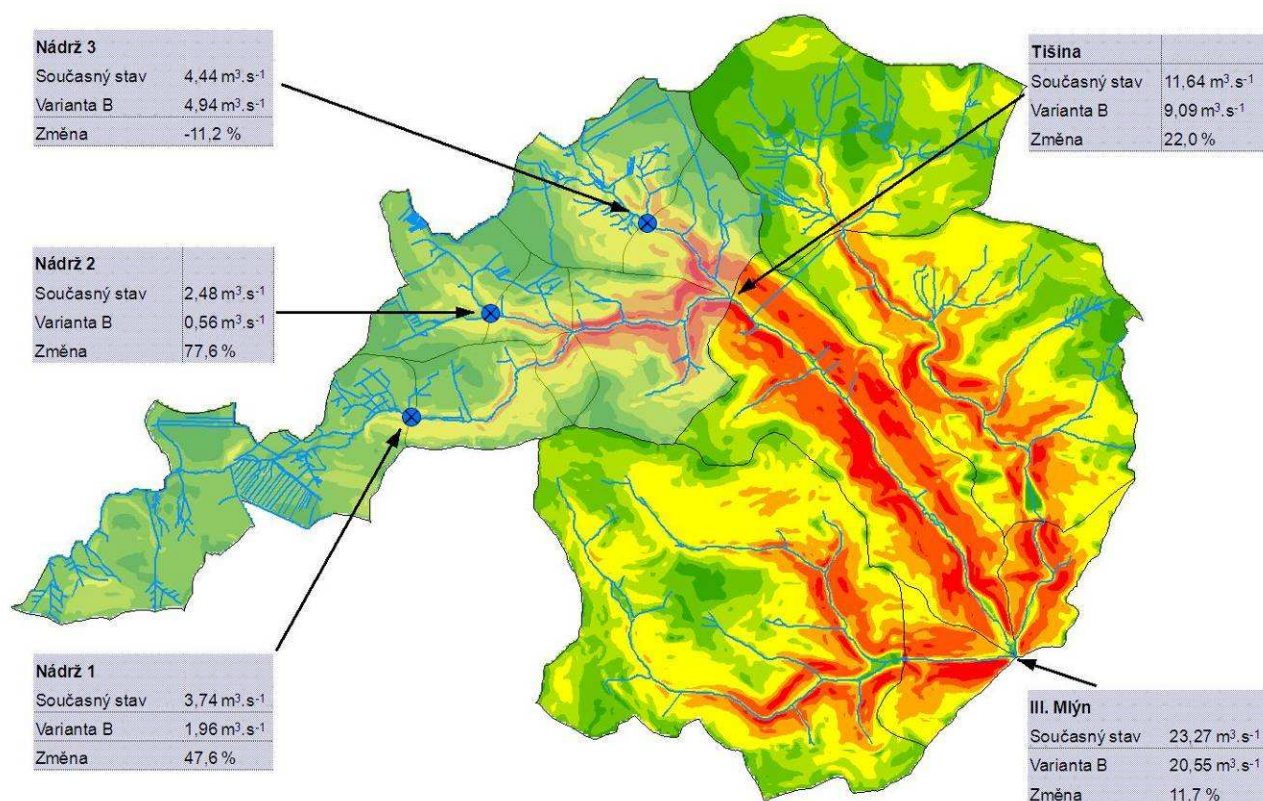
Obr. 34 Vliv potenciálních retenčních nádrží na odtokový proces v povodí Chomutovky po profil Tišina při různých N -letostech vstupních srážek – doba opakování 10 (vlevo nahoře), 20 (vpravo nahoře), 50 (vlevo dole) a 100 let (vpravo dole).

Ze všech grafů na obrázku 34 je viditelný pokles kulminace v případě implementace malých vodních nádrží v povodí. První varianta “A” dle očekávání simuluje méně výrazné snížení oproti variantě “B”, která předpokládá celkově vyšší objem nádrží. Kromě různých objemů může být důvodem výhodnější rozmístění propustků a přelivů v hrázi, které počítá s větším zdržením a celkovým zploštěním povodňové vlny. Během simulací se ukázalo, že právě rozmístění propustků má velký vliv na velikost výsledné kulminace. Při určování parametrů hrázového tělesa se vycházelo z předpokladu, že největší vliv bude mít umístění více propustků v různých výškových úrovních, což znamená, že se zvyšující se hladinou vody v nádrži bude postupně stoupat i odtok z nádrže. Tím se plnění nádrže rozloží do delšího časového úseku a vliv na velikost kulminačního průtoku je mnohem významnější.

Tabulka 14 Vybrané parametry simulovaných událostí v profilu Tišina

	N10	N20	N50	N100
Úhrn srážek [mm]	50,1	56,7	65,1	71,2
Q_k - současný stav [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	4,72	6,61	9,41	11,64
Q_k - varianta A [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	3,67	5,22	7,55	9,45
Q_k - varianta B [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	3,36	4,62	7,10	9,09
Pokles současný / A [%]	22,31	21,14	19,75	18,85
Pokles současný / B [%]	28,82	30,22	24,52	21,95

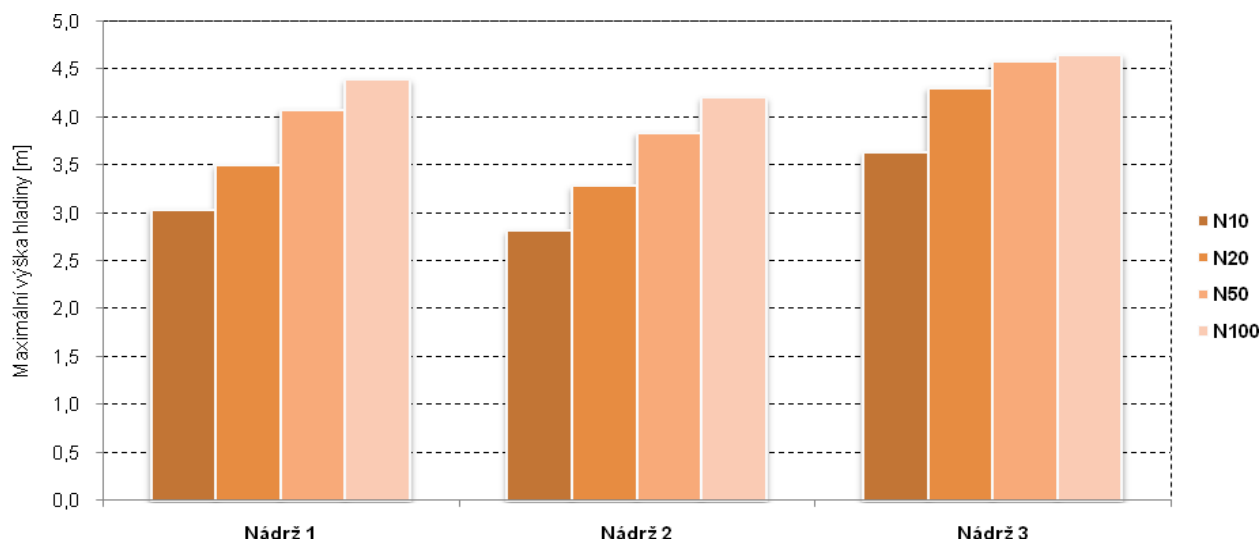
Tabulka 14 ukazuje vliv modelovaných nádrží na kulminaci povodně v profilu Tišina. Pro hodnocení výsledků je také důležité sledování vlivu nádrží dále po toku. Obrázek 35 ukazuje vliv nádrží jednak v profilech, které tyto nádrže uzavírají a také v profilu III. Mlýn, který se nachází již nedaleko města Chomutov. Z obrázku je zřejmý efekt nádrží i v tomto profilu (pokles kulminace o 11,7 % v případě jednodenního úhrnu srážek s dobou opakování 100 let). Dosažené výsledky zdůrazňují možnosti tohoto typu protipovodňových opatření. Simulované zvýšení kulminace u třetí nádrže ukazuje na malou kapacitu nádrže, která při stoletém úhrnu srážek ztrácí schopnost kulminaci snížit. Voda v nádrži odtéká přes bezpečnostní přeliv, což je možné ověřit na obrázku 36.



Obr. 35 Změna kulminace povodně oproti současnému stavu způsobené úhrnem srážek s dobou opakování 100 let při uvažování vyšší kapacity nádrží (varianta B). Údaje se vztahují vždy k části povodí, které je uzavřeno vyznačeným profilem.

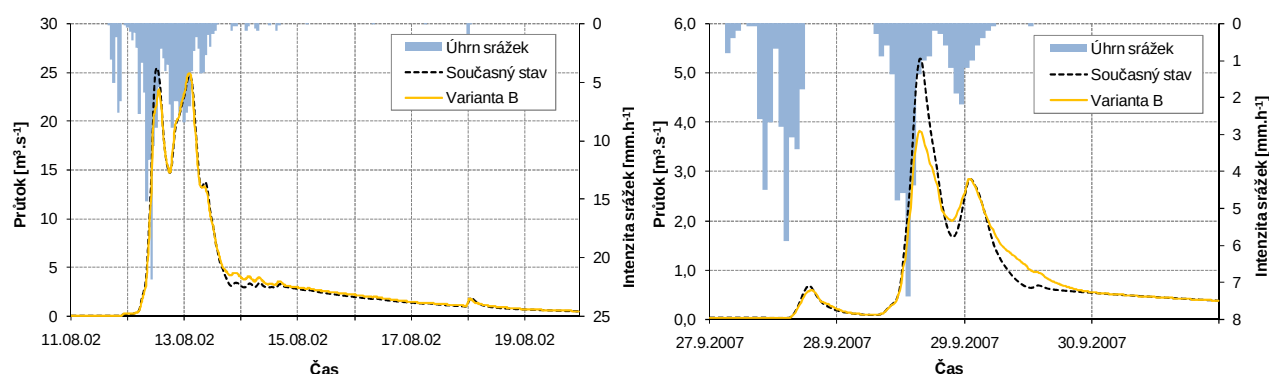
Při testování polohy a velikosti propustků v hrázi byla sledována dosažená maximální výška hladiny při jednotlivých simulacích. Cílem bylo umístit propustky tak, aby byl při jednodenním

úhrnu srážek s dobou opakování 100 let využitý veškerý retenční potenciál nádrží. Na obrázku 36 je zobrazena maximální dosažená výška hladiny pro každou nádrž při simulovaných extremitách. Z uvedeného hlediska se negativně projevila nedostatečná kapacita třetí nádrže, která nebyla schopná ovlivnit průtok v případě povodně způsobené srážkami s dobou opakování 50 a 100 let.



Obr. 36 Maximální dosažená výška hladiny v nádržích při různých extremitách. Zobrazena je varianta „B“ – maximální výška hráze 5 metrů, bezpečnostní přeliv ve výšce 4,5 m.

Ověření kapacity nádrží, a lokalizace propustků a bezpečnostního přelivu proběhlo pro největší změřenou letní povodeň na Chomutovce (podle srážkového úhrnu, kulminace i objemu povodňové vlny) – povodeň v srpnu 2002. Příčinné srážky dosáhly hodnoty 237 mm během tří dnů. Simulace ukázala, že vliv případných nádrží by existoval pouze u první vlny (pokles z $25,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $23,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tedy o 8,7 % se zpožděním kulminace o 45 minut). U druhého maxima, které proběhlo o 12 hodin později, již k ovlivnění kulminace nedošlo ($Q_k = 24,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Ačkoliv povodňová vlna bezpečně prošla nádržemi (nebylo dosaženo koruny hráze), je zřejmé, že modelovaná opatření jsou schopna ovlivnit povodeň jen do určité extremity. To prokázala simulace povodně ze září 2007, kdy bylo dosaženo významnějšího poklesu kulminace povodňové vlny (obr. 37).



Obr. 37 Vliv potenciálních suchých nádrží na snížení kulminace povodní v srpnu 2002 a září 2007

2.4 DISKUZE

Stejně jako v předchozí studii, je hlavním diskutovaným okruhem vyjádření hydrologické nejistoty spojené se sběrem a analýzou vstupních dat a s modelováním srážko-odtokového procesu. Z uvedeného vyplývá i možné rozdělení nejistoty na dvě skupiny.

- Nejistota vstupů
- Nejistota hydrologického modelu

V této dílčí diskuzi jsou uvedeny specifické body vztahující se k dané studii. Obecnější záležitosti vyplývající z použitých dat a modelových technik jsou součástí závěrečné diskuze v části C.

2.4.1 NEJISTOTA VSTUPŮ

Nejistotou vstupů se rozumí nejistoty vzniklé nepřesností vstupních dat dané jejich sběrem, interpretací a analýzou. Z pohledu srážek jako základního vstupu do hydrologického modelu vyplývá nejistota z jejich prostorové a časové interpretace. Ta je důležitá jak pro správnou kalibraci a verifikaci modelu, tak pro modelování návrhových událostí. Na povodí horní Chomutovky byl N-letý úhrn srážek stanoven pro celé povodí jako neměnný, a proto rozložení srážek neodráží pravděpodobnou variabilitu vyšších úhrnů na návětrné straně Krušných hor v hřebenových oblastech a nižších úhrnů srážek v jižní části povodí spadající do podkrušnohorských pánví. Uvedený vliv byl přímo v povodí Chomutovky kvantifikován v práci Růžičkové (2009), která jako vstupní data do srážko-odtokového modelu použila jak bodová měření srážkoměrů, tak radarových odhadů. Naproti tomu účelem modelování vlivu nádrží na odtok z povodí nebylo vystihnout přesnou variabilitu srážek a její dopad na průběh povodní (viz např. Sangati et al, 2009). Klíčová byla stejně jako v případě simulací vlivu krajinného pokryvu v podstatě analýza citlivosti modelu na změnu některých parametrů, v tomto případě parametrů spojených s retenčním potenciálem říční sítě v podobě suchých poldrů.

Ostatní vstupní data, především geodetická měření a metody jejich zpracování (určení objemů retenčních prostorů analýzou v GIS) jsou založena na přesných metodách sběru a následné analýze a lze je považovat ve srovnání s interpretací srážek jako relativně přesná.

2.4.2 NEJISTOTA MODELU

Pro správnou interpretaci výsledků je nutné zdůraznit fakt, že ačkoliv byly modelovány úhrny srážek s různými dobami opakování, doba opakování simulovaného průtoku nemusí být shodná. Jinými slovy, úhrn srážek s dobou opakování 100 let nemusí generovat povodeň se stejnou dobou opakování. Příčina se skrývá již v samotné definici N-letého úhrnu srážek a N-letého průtoku jako statistické veličiny, která je počítána na základě pozorované časové řady a její extrapolaci do oblasti nepozorovaných extrémních hodnot. Faktorů, které ovlivňují průtok v závěrovém profilu, je celá řada a kromě úhrnu srážek jimi mohou být další proměnné faktory, například charakter srážek (stratiformního nebo konvektivního typu), prostorové a časové rozložení srážek, počáteční nasycení, přítomnost sněhové pokrývky nebo zmrzlá půda.

Při modelování je základní otázkou použití vhodných metod. V této studii je použita metoda SCS CN dostupná jako modelovací technika v systému HMS. Ačkoliv je metoda uznávaná a často využívaná, používá četná zjednodušení, která její využití limitují. Výhody a nevýhody byly diskutovány v rámci studie dopadů změn krajinného pokryvu na povodně v části B, kapitole 1.4.2. Stejně jako ve zmíněné studii, i zde se nepříznivě projevila jedna z nevýhod metody SCS CN. Ta dává nesprávné výsledky v případě, že během simulované události dojde k přerušení srážek. Simulovaná vlna pak neodpovídá skutečnosti, což se projevilo při verifikaci modelu na povodni ze srpna 2002 (obr. 33). Uvedenou skutečnost ovšem nelze označit jako jedinou příčinu nesprávné verifikace (kvantifikovanou kritériem Nash-Sutcliffe). Příčiny mohou spočívat i ve zjednodušené distribuci plošných úhrnů srážek (nedostatečné pokrytí měřicími stanicemi). Nejpravděpodobnější příčinou nadhodnocení kulminace při verifikační události je fakt, že v modelu nemohl být z důvodu nedostatku dat modelován vliv dvou malých vodních děl nacházejících se na přítocích Chomutovky – VD Křimov a VD Kamenička. Data o odtocích z nádrží byla k dispozici pro každý den pouze ve formě průtoku v 7:00. Z těchto hodnot nebyl zřejmý účinek nádrží na transformaci povodňové vlny obou přítoků. Vzhledem k manipulačním řádům a informacím o zásobním prostoru nádrží lze předpokládat, že obě nádrže měly na snížení kulminace v závěrovém profilu vliv. V modelu, který tyto nádrže neuvažoval, pak logicky došlo k nadhodnocení kulminace. Tento fakt prokázaly i simulace Růžičkové (2009). Přes tuto poměrně významnou nejistotu se zdá, že chyba vnesená do následných teoretických simulací není limitující. Tyto teoretické simulace byly navíc prováděny na menším povodí než kalibrační proces (po profil Tišina), ve kterém se uvedené nádrže nevyskytují.

Klíčovým parametrem je celkový objem systému nádrží a samozřejmě také jejich rozmístění v povodí. Při hledání vhodných lokalit je důležitým faktorem nejen potenciální retenční prostor uvažované nádrže, ale také velikost povodí, které tato nádrž uzavírá. Díky konfiguraci terénu v hřebenových částech Krušných hor jsou nejvyšší objemy dostupné nedaleko od rozvodnice, což efektivnost navrhovaných opatření snižuje. Díky navrženému celkovému objemu nádrží je možné snížit kulminaci povodně způsobené úhrnem srážek s dobou opakování 100 let. U větších extremit srážkových úhrnů, jako byla například povodeň v roce 2002, již není navrhovaná kapacita dostatečná.

Kromě celkového objemu nádrží, který je jinak při posouzení účinnosti primární charakteristikou, má velký vliv na výsledné snížení odtoku z nádrže charakter hráze, především velikost a rozmístění propustků a bezpečnostního přelivu. Při modelování je potřeba dopředu stanovit na jak velkou povodeň nádrže koncipovat. Protože navrhovaný systém opatření má charakter neřízených suchých poldrů, není možné odtok z nádrže během povodně jakkoliv regulovat. Z výsledků vyplývá, že pokud je systém nádrží stavěn pro úhrn srážek s dobou opakování 100 let, může se stát, že při nižších úhrnech není nádrž zcela zaplněna (obr. 36). Při vyšších úhrnech, a tedy i rychlejší a větší odezvě povodí, je nádrž velmi rychle zaplněna a svůj účel přestává plnit ve chvíli, kdy voda začne přetékat přes bezpečnostní přeliv. Kalibrační parametrů hráze (úpravy počtu a velikosti propustků) lze docílit ideálního účinku na požadovanou extremitu.

Při modelování a „ladění“ velikosti a umístění hrázových struktur (propustků) se osvědčil koncept umístění propustků ve více úrovních tělesa hráze. Tímto byl docílen zvyšující se odtok z nádrže v závislosti na výšce hladiny a bylo takto dosaženo nejpriznivějšího poklesu maximálního průtoku.

Podobně koncipovaný systém nádrží byl navržen také v povodí horní Flöhy na saské straně Krušných hor (Bölscher a Schulte, 2007; Schulte et al., 2009). V tomto případě byl systém nádrží kalibrován na průtok s dobou opakování 100 let, což je z návrhového pohledu vhodnější řešení. Při zpracování studie na Chomutovce bohužel nebyla k dispozici data o průtocích s určitou dobou opakování, proto byla použita srážková data.

2.5 DÍLČÍ ZÁVĚRY

Modelování vlivu opatření integrované protipovodňové ochrany na povodňové události proběhlo na povodí horní Chomutovky pomocí modelu HEC-HMS. Byly modelovány čtyři scénáře, které se lišily extremitou vstupních srážek (jednodenní úhrn srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let). Simulace proběhly pro dvě varianty suchých retenčních nádrží, které se lišily maximální výškou hráze a tedy i celkovým retenčním objemem, který je možné použít pro dočasné zadržení povodňové vlny.

Při modelování prvního scénáře (jednodenní úhrn srážek s dobou opakování 10 let) došlo u menší varianty nádrží k poklesu kulminace o 22,3 %, při scénáři úhrnu srážek s dobou opakování 100 let došlo k poklesu o 18,9 %. V případě větších objemů nádrží (varianta „B“) bylo snížení výraznější (o 28,9 %, resp. o 22 %).

Bez vlivu na kulminaci byla převedena povodeň ze srpna 2002, čímž byla ověřena bezpečnost systému, nicméně se potvrdil výchozí předpoklad, že takto nastavený systém malých vodních nádrží má vliv jen do určité extremity.

Při hledání nejúčinnějšího řešení rozmístění hrázových struktur (propustků, přelivu) se nejlépe osvědčilo rozmístění propustků v různých výškových úrovních hráze. Tím dochází ke zvýšení odtoku během postupného zmenšování retenčního prostoru.

Numerické modelování reakce povodí na extrémní srážky ukázalo na celou řadu nejistot vycházející jednak z charakteru vstupních dat a také z použitého modelu HEC-HMS a modelovacích technik. Parametrizací hrázových struktur lze dosáhnout velkých rozdílů výsledných hydrogramů a je tedy nutné věnovat velkou pozornost hledání optimálního řešení.

3 MODELOVÁNÍ ODTOKU ZE SNĚHOVÉ POKRÝVKY V LESE A NA OTEVŘENÝCH PLOCHÁCH

3.1 Úvod

Uvedená studie kvantifikuje na podkladě použitých dat a modelovacích metod změny v extremitě povodní v podmínkách měnícího se krajinného pokryvu. Hodnocení probíhalo na povodí Bystřice po závěrový profil Ostrov (plocha povodí 127,6 km²). Výběr uvedeného povodí v Krušných horách byl motivován především jeho vysokou nadmořskou výškou, se kterou souvisí vysoké zásoby sněhové pokrývky a časté povodně z tání sněhu. Centrální část Krušných hor je spojena i s dalším výzkumem (např. Ledvinka, 2008; Jeníček, 2008a) a také je předmětem spolupráce s podnikem Povodí Ohře, s.p., pro který jsou informace o sněhové pokrývce cenným vstupem do modelu HYDROG používaný dispečinkem pro operativní předpovědi. Povodí Bystřice je jedno z nejvýše položených a je zde předpoklad největších zásob sněhové pokrývky ukládaných během zimního období. Přehledná mapa povodí Bystřice je uvedena na obrázku 15.

Cíle studie vychází z obecných cílů práce definovaných v úvodu práce. Dílčí cíle je možné shrnout do následujících bodů:

- Zhodnocení vlivu vybraných fyzicko-geografických faktorů (vegetace a nadmořské výšky) na dynamiku akumulace a tání sněhové pokrývky
- Modelování odtoku ze sněhové pokrývky, kvantifikace vlivu krajinného pokryvu na proces tání sněhové pokrývky a vytvoření scénářů odtoku při různých variantách krajinného pokryvu
- Zhodnocení modelů a metod použitých při srážko-odtokovém modelování, určení nejistoty

Pro zkoumání odtokových poměrů a pro případnou předpověď odtoku z tající sněhové pokrývky je klíčová znalost množství vody akumulované ve sněhové pokrývce před nástupem jarního tání. Určení tohoto množství není ovšem s ohledem na prostorovou variabilitu charakteristik sněhové pokrývky vůbec jednoduché. Údaje o sněhové pokrývce ze staničních měření se zejména v horském terénu mohou zásadně lišit od skutečných podmínek, které panují v povodí i v nejbližším okolí stanice.

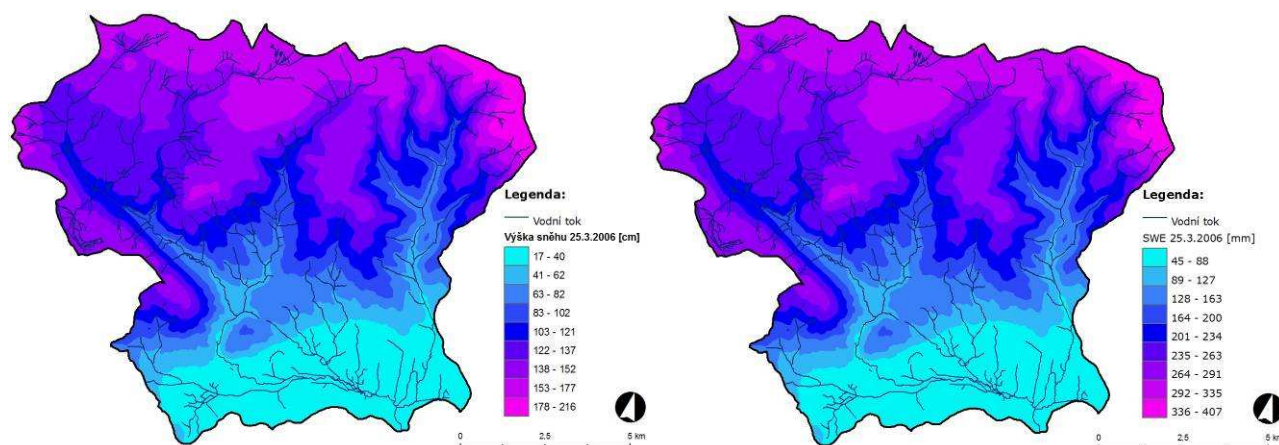
Měření sněhové pokrývky a modelování odtoku ze sněhu je na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK nové téma, jehož intenzivní výzkum začal v roce 2007. První výsledky podrobných měření, kterých bylo dosaženo v experimentálních povodích na Šumavě, byly publikovány v Jeníček et al., 2008a. V rámci diplomové práce autora (Jeníček, 2005) byl pro simulace v povodí Černé Vody v Krušných horách aplikován německý koncepční model NASIM. Jedna ze simulací byla provedena také na povodni způsobené táním sněhu, přičemž byla aplikována jednoduchá metoda teplotního indexu, která zahrnovala dva parametry – hodnotu teplotního indexu a opravný koeficient zohledňující radiaci.

3.2 MATERIÁL A METODY

3.2.1 STANOVENÍ VODNÍ HODNOTY SNĚHU

Modelování odtoku ze sněhové pokrývky proběhlo na povodí Bystřice, které je povodím třetího řádu o rozloze 127,6 km². Pravidelná expediční měření prováděná v posledních letech katedrou fyzické geografie a geoekologie v pramenných oblastech toků Šumavy a Krušných hor (Jeníček et al., 2008) není možné aplikovat na povodí této rozlohy. Pro stanovení charakteristik sněhu byla proto použita metoda, která vychází pouze z dat permanentních stanic ČHMÚ a Povodí Ohře, s.p. Metodika stanovení vodní hodnoty sněhu na povodí Bystřice po profil Ostrov je založena na předpokladu lineární závislosti výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu na nadmořské výšce. Tato závislost byla ověřena na základě dat měřených na pozorovacích stanicích Povodí Ohře, ČHMÚ a DWD v povodí Ohře po profil VD Nechanice (plocha povodí 3614 km²). Analýzou dat výšky sněhové pokrývky celkem ve dvanácti termínech od 27. 11. 2008 do 3. 3. 2009 byla sledována míra závislosti pomocí koeficientu determinace R^2 . Koeficient determinace se pohyboval v rozmezí od 0,64 do 0,84, přičemž dalších zpřesnění (až do $R^2 = 0,9$) lze dosáhnout kontrolou dat, například vyloučením zjevně chybných hodnot nebo eliminací vlivu nulových hodnot. Je nutné zdůraznit, že uvedené úpravy jsou do značné míry subjektivním zásahem zpracovatele.

Výška sněhové pokrývky a vodní hodnota sněhu byla na povodí Bystřice po profil Ostrov zpracována za účelem získání kalibračních dat pro simulaci jarního tání v roce 2006. Zpracování dat proběhlo pomocí nástrojů GIS, konkrétně v programu ArcGIS 9.3. Výchozím předpokladem bylo, že závislost na nadmořské výšce je natolik dominantní, že vliv dalších faktorů (vegetace atd.) není pro akumulaci sněhu významný. V prvním kroku byl pro termín 25. 3. 2006 (odpovídající počátku simulace) vytvořen lineární regresní vztah obou sledovaných veličin na nadmořské výšce. Koeficient determinace R^2 byl u výšky sněhu roven 0,79, u vodní hodnoty sněhu dosáhl hodnoty 0,72. Následovalo vytvoření digitálního modelu terénu (DMT), na který byly aplikovány základní hydrologické korekce (vyplnění bezodtokých depresí). Pomocí funkce „*Single Output Map Algebra*“ byl DMT přepočítán podle regresní závislosti v daném termínu měření. Následnými korekcemi (nahrazení záporných hodnot gridu za nulové) byly získány rastry výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu v prostorovém rozlišení použitého modelu terénu (25 x 25 m). Následnou aplikací funkce „*zonal statistic*“ lze získat průměrné hodnoty veličin pro jednotlivá dílčí povodí použitého hydrologického modelu. Výsledné mapy výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu dne 25. 3. 2006 jsou uvedeny na obrázku 38. Vodní hodnoty sněhu za jednotlivá dílčí povodí získané zonální statistikou v prostředí ArcGIS byly zohledněny při kalibraci modelu v období od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006.



Obr. 38 Výška sněhové pokrývky a vodní hodnota sněhu (SWE) v povodí Bystřice po profil Ostrov dne 25. 3. 2006

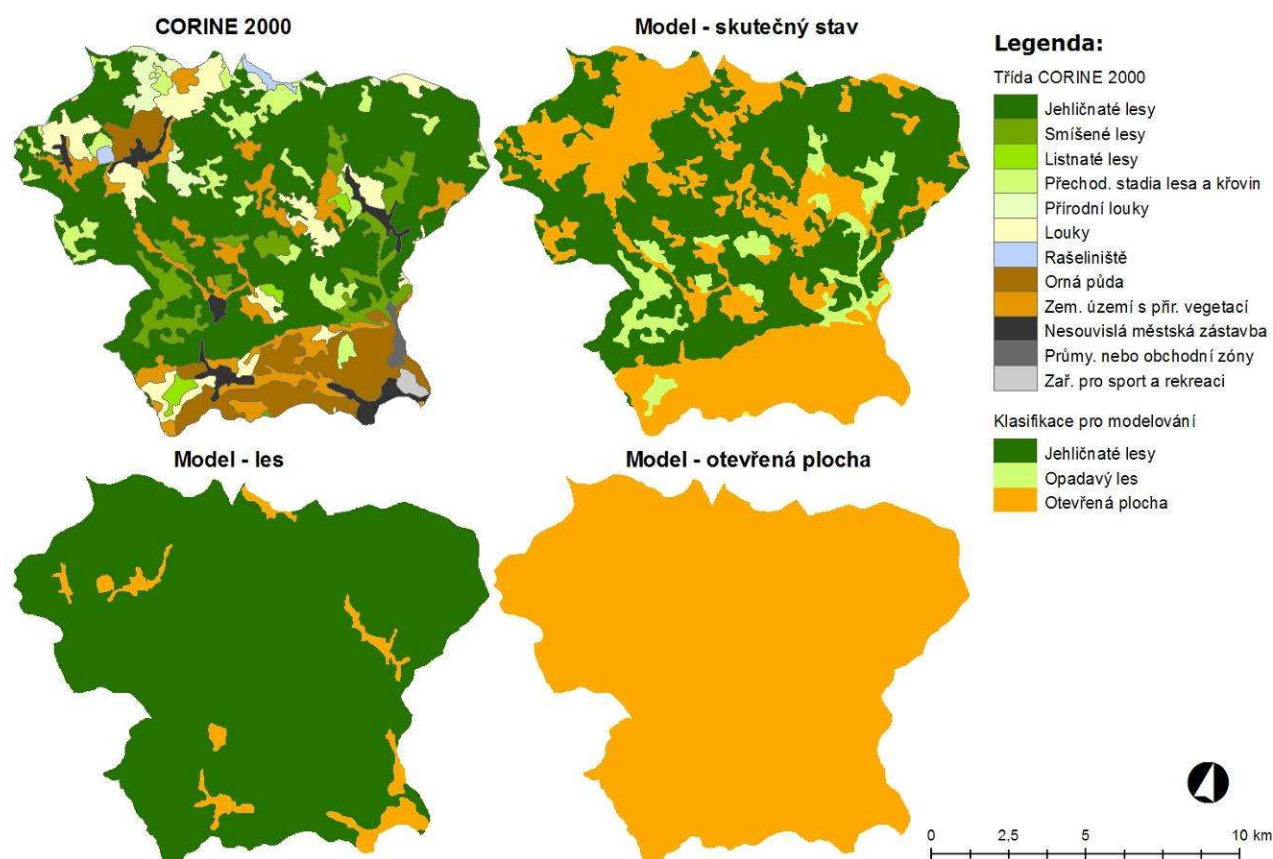
3.2.2 VARIANTY KRAJINNÉHO POKRYVU

Modelování vlivu krajinného krytu na odtok z povodí proběhlo pro tři scénáře krajinného pokryvu hodnocené na podkladě databáze CORINE Land cover (EEA, 2009). První variantou byl současný stav, druhou variantou byl hypotetický stav, ve kterém byly listnaté lesy, smíšené lesy, orná půda, louky a pastviny nahrazeny jehličnatým lesním porostem. Třetí varianta byla simulována za předpokladu nahrazení všech lesů za louky a pastviny. Takto mohl být vliv vegetace na tání sněhové pokrývky sledován při zohlednění tří hlavních typů pokryvu – jehličnatý les, opadavý les a otevřená plocha. Do těchto třech kategorií byly následně překlasifikovány stávající třídy CORINE (viz tabulka 15).

Mapy všech variant skutečného i hypotetického krajinného pokryvu v povodí Bystřice jsou uvedeny na obrázku 39. Tabulka 15 ukazuje absolutní a relativní zastoupení jednotlivých tříd krajinného pokryvu. V tabulce je také uvedeno zařazení do kategorií, které byly použity pro parametrizaci sněhového modelu.

Tabulka 15 Krajinný pokryv v povodí Bystřice podle databáze CORINE Landcover (EEA, 2009)

Třída CORINE 2000	Plocha [km ²]	Podíl	Třída sněh
Jehličnaté lesy	65,3	51,2 %	Jehličnatý les
Smíšené lesy	8,2	6,4 %	Opadavý les
Listnaté lesy	1,1	0,9 %	Opadavý les
Přechodná stádia lesa a křoviny	8,4	6,6 %	Otevřená plocha
Přírodní louky	3,2	2,5 %	Otevřená plocha
Louky	10,3	8,1 %	Otevřená plocha
Rašeliniště	0,7	0,6 %	Otevřená plocha
Orná půda	12,4	9,8 %	Otevřená plocha
Zemědělská území s přirozenou vegetací	12,3	9,6 %	Otevřená plocha
Nesouvislá městská zástavba	4,4	3,4 %	Otevřená plocha
Průmyslové nebo obchodní zóny	0,6	0,5 %	Otevřená plocha
Těžba hornin	0,0	0,0 %	Otevřená plocha
Zařízení pro sport a rekreaci	0,5	0,4 %	Otevřená plocha
Suma	127,6	100,0 %	



Obr. 39 Krajinový pokryv v povodí Bystřice pro současné a hypotetické stavy pokrytí (EEA, 2009, upraveno)

3.2.3 VLIV KRAJINNÉHO POKRYVU NA TÁNÍ SNĚHOVÉ POKRÝVKY

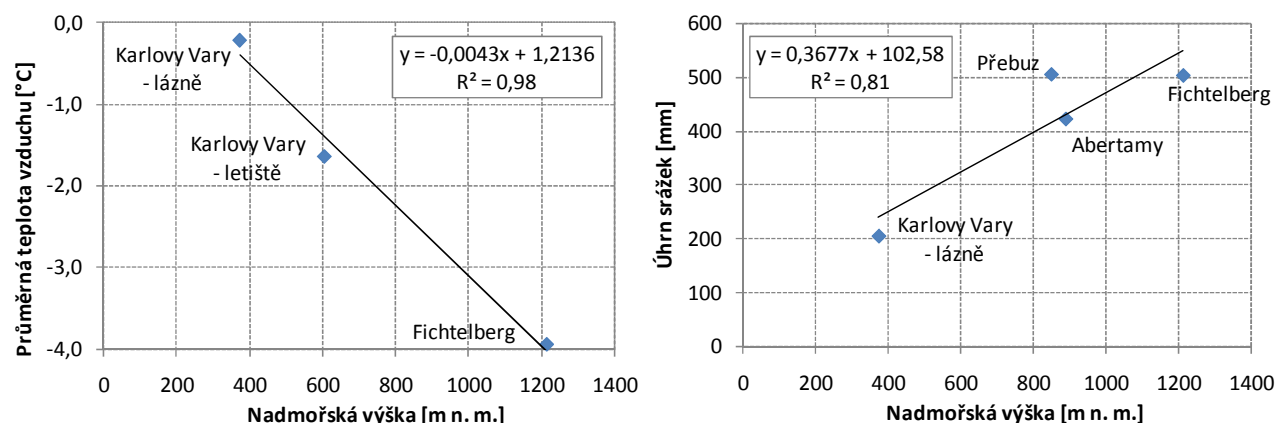
Při simulacích odtoku s různými variantami krajinového pokryvu se vycházelo z předpokladu, že odtok ze sněhové pokrývky je ovlivňován vegetací, především přítomností lesního porostu nebo otevřených ploch v povodí. Rychlost tání je možné v metodě teplotního indexu vyjádřit pomocí teplotního faktoru tání (*DDF*, *degree-day factor*). Ten je odlišně zohledněn ve srážkovém (*Wet Meltrate Factor*) i bezsrážkovém období (*Meltrate Factor*). Provedené simulace předpokládaly neměnnost faktoru *DDF* během vypadávání srážek. Rozdílný chod tání byl předpokládán pouze v bezsrážkovém období, ve kterém existuje předpoklad vyšší radiace vlivem slunečního záření. Rozdílnými hodnotami *DDF* se zabýval například Federer et al. (1972), který odvodil v povodích na severovýchodě USA hodnoty teplotního indexu $4,5\text{--}7,5 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ pro otevřené plochy, $2,7\text{--}4,5 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ pro listnaté lesy a $1,4\text{--}2,7 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ pro jehličnaté lesy. Na základě uvedených rozpětí byly odvozeny hodnoty faktoru *DDF* pro povodí Bystřice jako vážený průměr hodnot dle Federera, kde váhou je plošné zastoupení jednotlivých typů pokrytí. Hodnota *DDF* odvozená pro skutečný stav byla následně kalibrována. Výsledkem kalibrace byl opravný koeficient, kterým byly přenášobeny původně odvozené hodnoty *DDF* (viz tabulka 16).

Tabulka 16 Hodnoty teplotního faktoru tání DDF použité při simulacích

Varianta	Současný stav	Les	Otevřená plocha
DDF [mm.°C.d ⁻¹]	3,8	2,4	5,8
DDF [mm.°C.d ⁻¹] po kalibraci	4,1	2,7	6,3

3.2.4 ČASOVÉ ŘADY TEPLOTY VZDUCHU, SRÁŽEK A PRŮTOKŮ

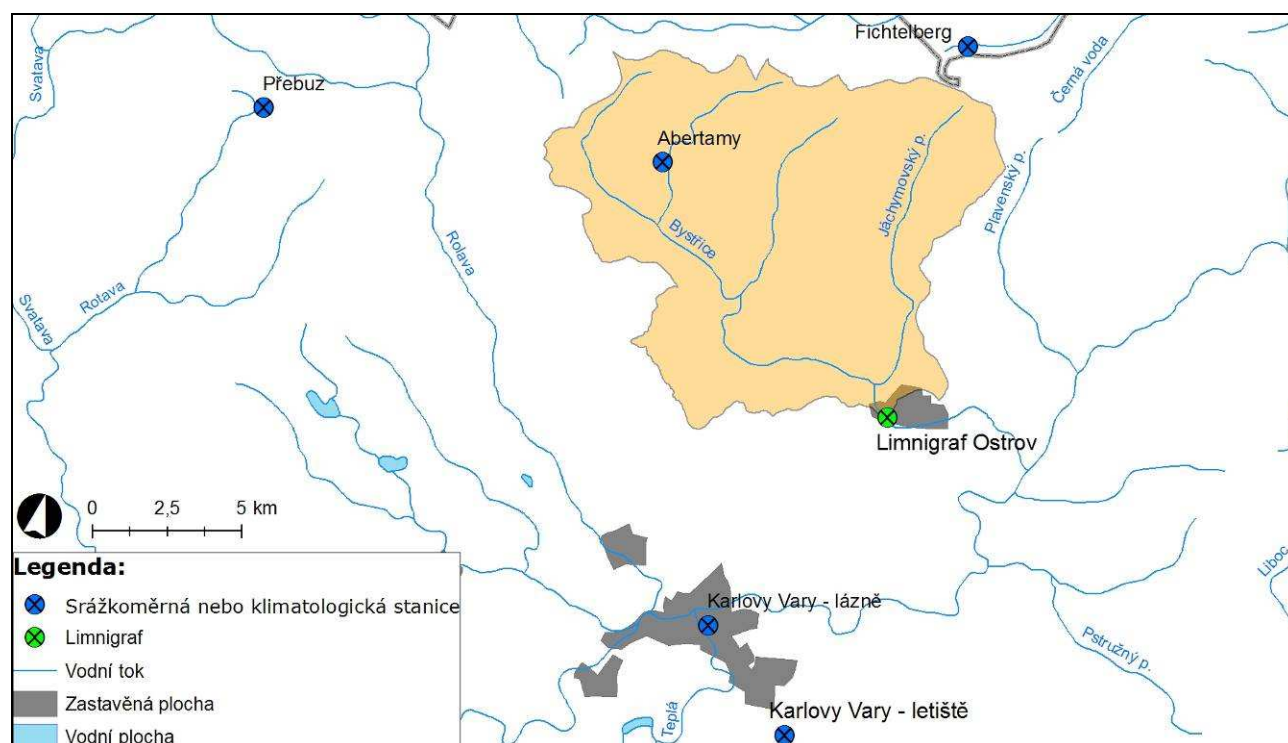
Časové řady teploty vzduchu pro kalibrační období 1. 11. 2005 – 7. 4. 2006 byly získány pouze ze stanic Karlovy Vary – lázně, Karlovy Vary – letiště a Fichtelberg. Ke stanovení průměrných teplot vzduchu pro každé dílčí povodí byla využita jejich závislost na nadmořské výšce. Koeficient determinace dosáhl hodnoty 0,98. Regresní vztah ukazuje levý graf na obrázku 40.



Obr. 40 Závislost teploty vzduchu (levý graf) a úhrnu srážek (pravý graf) na nadmořské výšce v období 1. 11. 2005 – 7. 4. 2006

Časové řady srážek a průtoků pro kalibrační období byly získány z pozorovací sítě ČHMÚ a Povodí Ohře, s.p. Denní srážkové úhrny byly získány ze stanic Karlovy Vary – lázně, Přebuz, Abertamy a Fichtelberg. Ke stanovení plošných úhrnů srážek pro každé dílčí povodí byla stejně jako u teplot vzduchu využita závislost úhrnu srážek z jednotlivých stanic na nadmořské výšce. Koeficient determinace dosáhl hodnoty 0,81. Regresní vztah ukazuje pravý graf na obrázku 40. Rozmístění srážkoměrných, klimatologických a limnigrafických stanic, které byly v práci použity je zobrazeno na obr. 41.

Výpočet průměrné teploty a průměrného úhrnu srážek na povodí jak v kalibračním, tak v modelovém období, byl vypočten v programu ArcGIS pomocí mapové algebry nad shlazeným modelem terénu (v prostorovém rozlišení 250 m), tedy podobnou metodikou jako v případě výpočtu vodní hodnoty sněhu (viz kapitola 3.2.1).

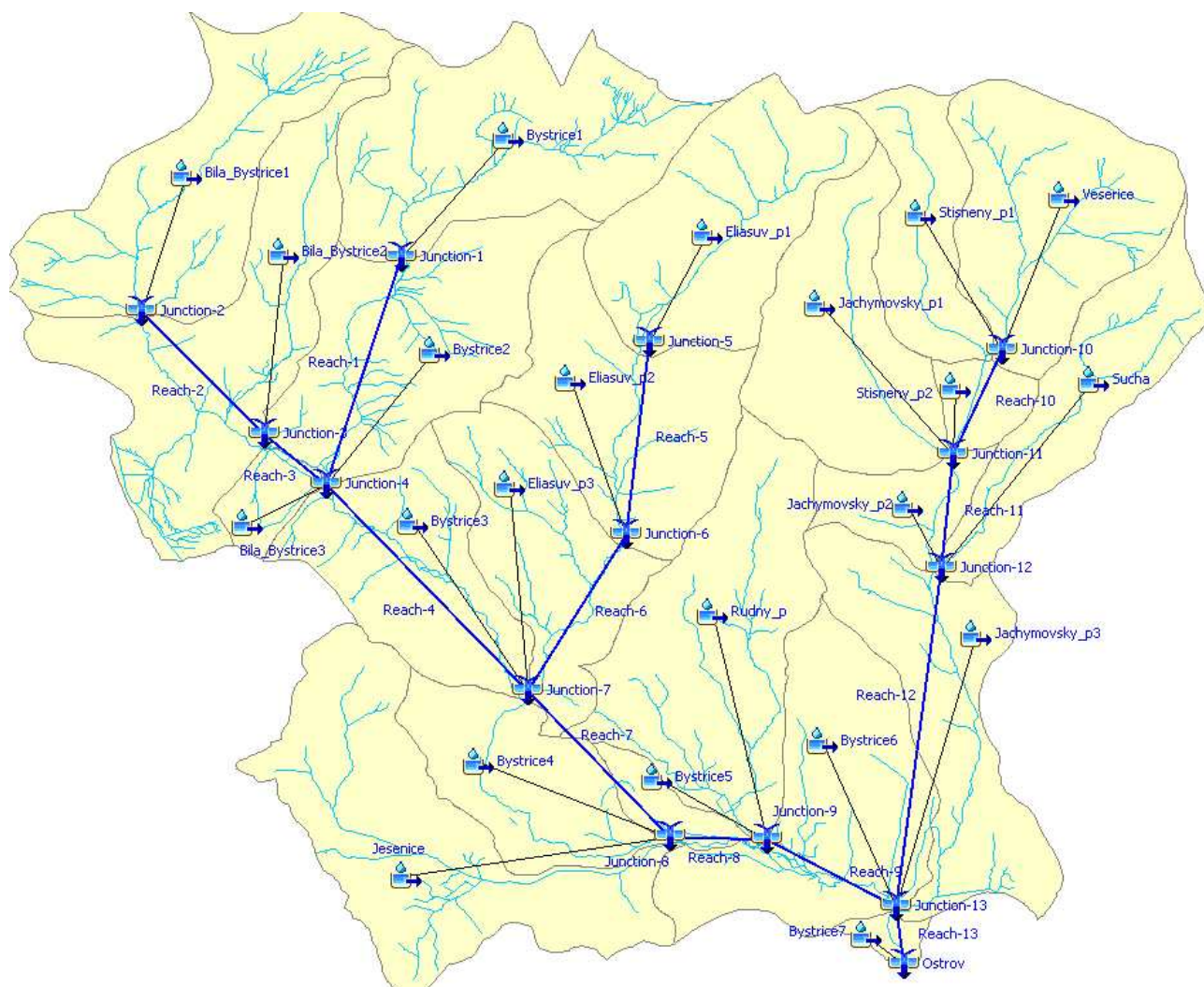


Obr. 41 Schematická mapa rozmístění srážkoměrných, klimatologických a limnigrafických stanic v povodí Bystřice

3.2.5 SESTAVENÍ MODELU, POUŽITÉ MODELOVACÍ TECHNIKY

Podle kroků, uvedených v souhrnné metodice v části A byl v programovém prostředí HEC-HMS sestaven diskretizovaný model povodí (obr. 42). Pro každé dílčí povodí modelu (celkem 22 dílčích povodí) byly odvozeny parametry charakterizující jejich strukturu a chování (viz příloha 9). Pro výpočet parametrů komponent srážko-odtokového procesu bylo použito standardních metod, které jsou v podobných případech často aplikovány a které byly ve většině případů použity i u ostatních případových studií. Pro výpočet objemu odtoku (*Runof-Volume Model*) byla použita metoda SCS CN (viz Feldman, 2000). Pro stanovení přímého odtoku (*Direct-Runoff Model*) byla použita metoda Clarkova jednotkového hydrogramu, pro výpočet podzemního odtoku (*Baseflow Model*) byla použita metoda exponenciálního poklesu. Ta definuje velikost podzemního odtoku v daném čase pomocí počátečního podzemního odtoku. Potřebné parametry byly určeny analýzou hydrogramu a na základě dostupné literatury (Feldman, 2000). Pro výpočet postupu povodňové vlny v korytě toku (*Channel Model*) byla použita metoda Muskingum-Cunge, která z metod hydrologického routingu nejlépe popisuje proudění vody v korytě (využívá difuzní aproximace věty o hybnosti).

Nejdůležitější modelovou technikou použitou v této studii byl sněhový model. Byla použita metoda teplotního indexu, která počítá akumulaci a tání sněhu na základě vstupních hodnot úhrnu srážek a teploty vzduchu. Všechny uvedené modelovací techniky jsou podrobně popsány v souhrnné metodice v části A.



Obr. 42 Schéma povodí Bystrice po závěrový profil Ostrov v modelu HEC-HMS

3.2.6 MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ

Modelování pomocí HEC-HMS proběhlo ve dvou navazujících krocích. V prvním kroku proběhla kontinuální simulace od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006. Jejím cílem byla kalibrace parametrů přímého odtoku (T_c a R_c) a především odvození počátečních hodnot SWE (vodní hodnoty sněhu). Ty byly v druhém kroku použity jako vstupní parametry epizodní simulace, povodeň od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006 způsobená táním sněhové pokrývky.

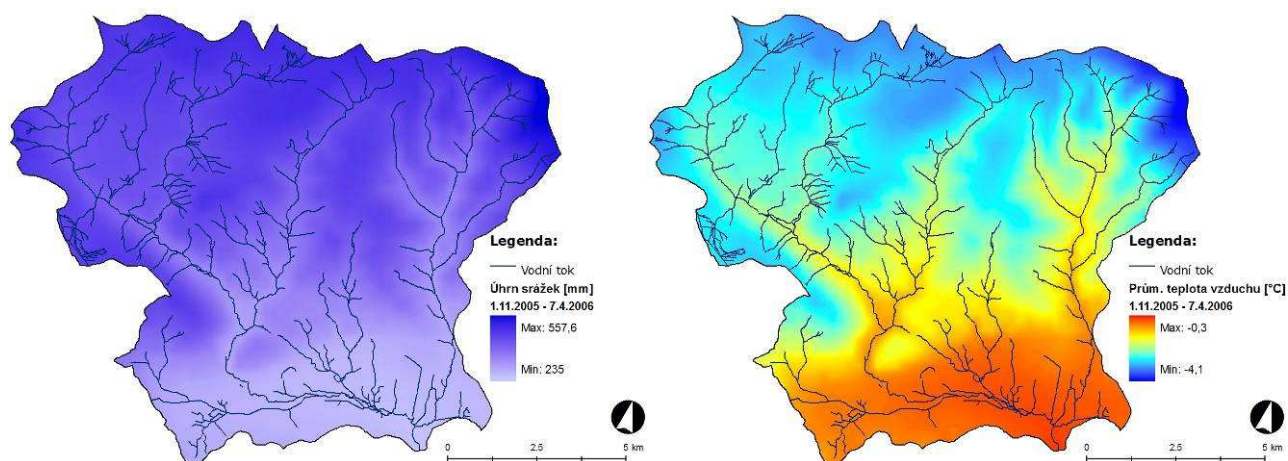
Na uvedené události byl sledován vliv vegetačního pokryvu na průběh tání a odtoku ze sněhové pokrývky. Byly modelovány tři varianty krajinného pokryvu sestavené podle metodiky uvedené v kapitole 3.2.2, tedy varianta současného stavu a dále hypotetické varianty s převažujícím lesním porostem, resp. bez lesního porostu, pouze se zastoupením otevřených ploch. U těchto variant byl sledován vliv na průběh povodňové vlny. Časový krok výpočtu modelu byl vzhledem k velikosti povodí nastaven na jednu hodinu.

3.3 VÝSLEDKY

3.3.1 KALIBRACE MODELU HEC-HMS

3.3.1.1 Simulace od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006

Variantní simulace proběhly na příkladu jarní povodně od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006. K odvození počátečních podmínek vztahujících se ke sněhové pokrývce pro každý výškový pás dílčího povodí bylo nutné provést dlouhodobou simulaci v období od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006. V tomto období byly kalibrovány jednak parametry přímého odtoku (doba koncentrace T_c a transformační faktor R_c), a také parametry ovlivňující akumulaci sněhové pokrývky, především hodnota konstantní infiltrace roztátého sněhu do půdy. Cílem bylo, aby při znalosti naměřených hodnot byl model schopen správně počítat vodní hodnotu sněhu v daném období. Na základě dlouhodobé simulace byly odvozeny počáteční hodnoty vztahující se ke sněhové pokrývce ke dni 25. 3. 2006, tedy k počátku epizodní simulace s intenzivním táním sněhu a následnou povodní. Rozložení úhrnu srážek a teploty vzduchu v kalibračním období je zobrazeno na obrázku 43.



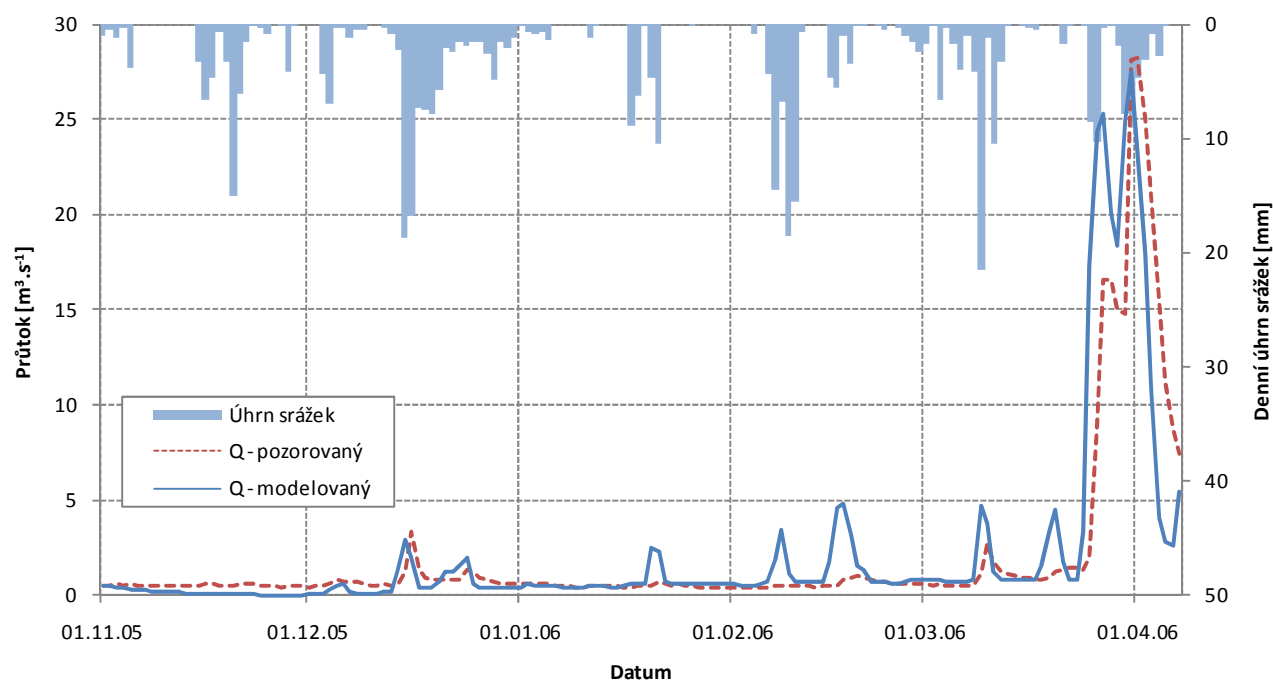
Obr. 43 Úhrn srážek a průměrná teplota vzduchu v povodí Bystřice od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006

Jak je uvedeno výše, cílem kontinuální simulace byla nejen kalibrace modelu, ale také odvození počátečních parametrů pro simulaci povodně na přelomu března a dubna 2006. Seznam kalibrovaných parametrů a opravných koeficientů je uveden v tabulce 17.

Tabulka 17 Přehled kalibrovaných parametrů

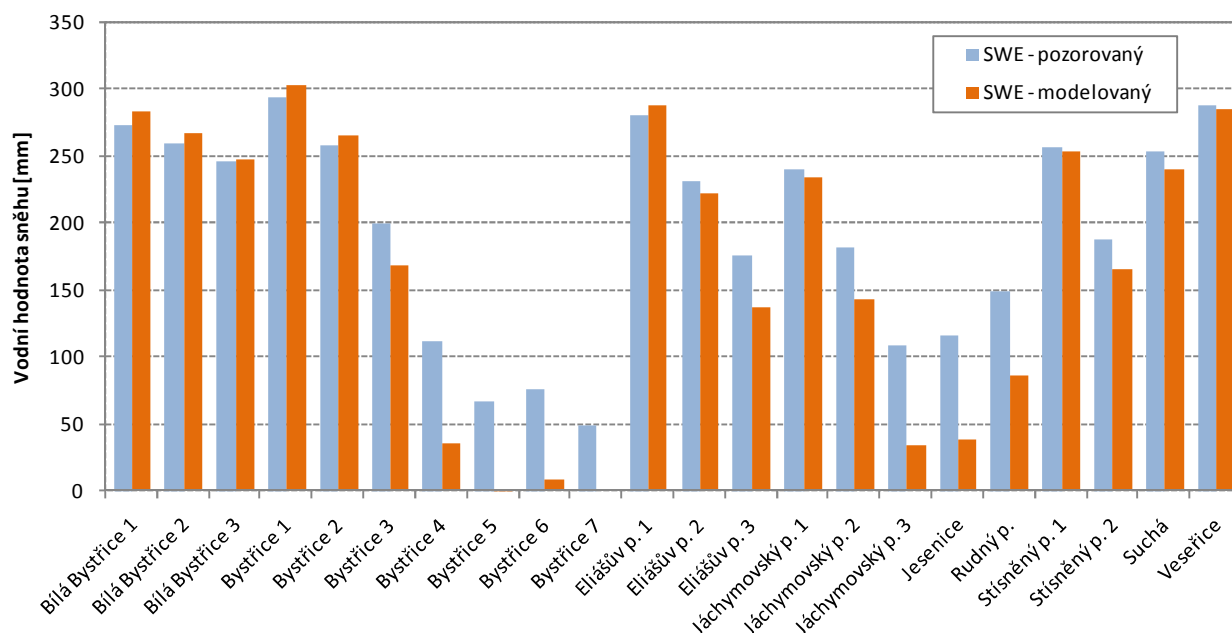
Parametr	Model	Název	Koeficient
T_c	Direct-Runoff Model	Time of Concentration - doba koncentrace	10
R_c	Direct-Runoff Model	Storage Coefficient - určuje dobu zdržení vody v dílčím povodí (Clark UH)	15
ReC	Baseflow Model	Recession Constant - míra poklesu podzemního odtoku	1
Ratio to Peak	Baseflow Model	Threshold Value - hodnota, kdy po poklesu podzemního odtoku nastává vzestup (poměr vzhledem ke kulminaci)	2
Groundmelt	Snowmelt Model	Konstantní infiltrace roztátého sněhu do půdy	1,5

Optimalizace modelovaného hydrogramu na základě pozorovaných dat proběhla pouze s využitím manuálních postupů kalibrace. Využity byly přitom zkušenosti z kalibrací modelu HEC-HMS na nedalekém povodí horní Chomutovky, které je z hlediska fyzickogeografických podmínek podobné, a proto existoval předpoklad podobného chování obou povodí. Problémem byla kalibrace parametrů T_c a R_c , u kterých musel být zohledněn odlišný průběh přímého odtoku během zimního období. Díky tomu byly oproti původně vypočteným hodnotám oba parametry výrazně navýšeny. Hydrogramy modelovaného a pozorovaného průtoku jsou uvedeny na obrázku 44. Při kalibraci byl rovněž sledován průběh akumulace sněhové pokrývky tak, aby se modelované hodnoty co nejvíce přiblížily hodnotám pozorovaným, resp. odvozeným ze staničních měření (obr. 45).



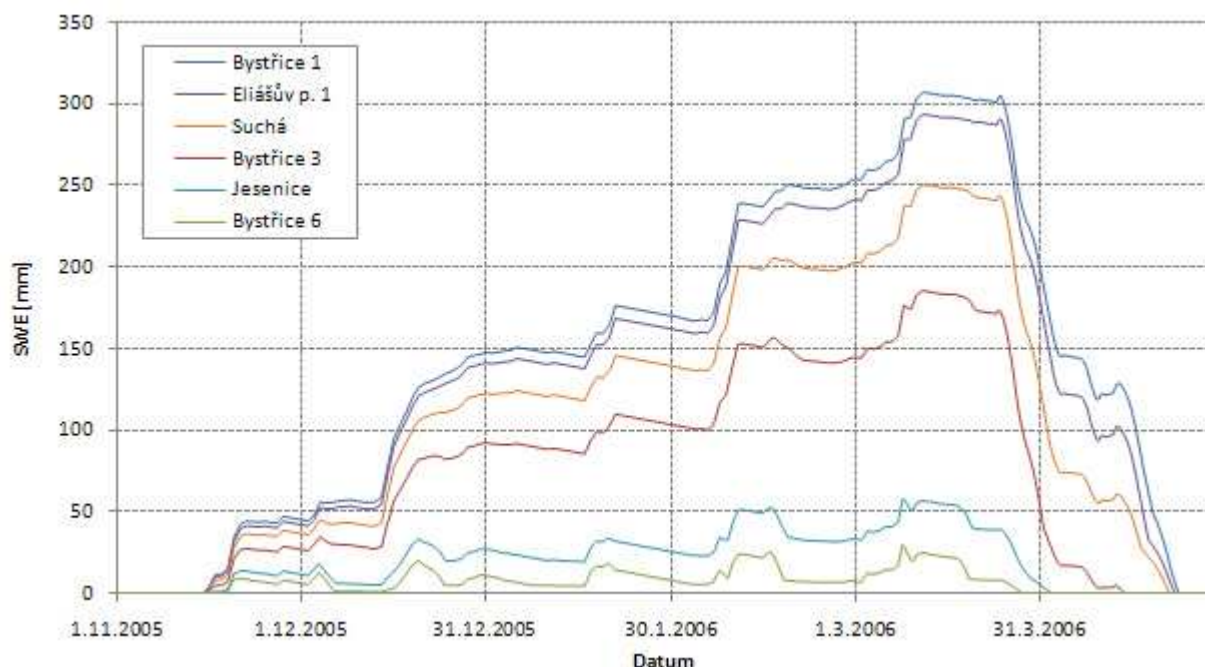
Obr. 44 Kontinuální simulace průtoku od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006

Z grafu na obrázku 44 je vidět uspokojivá shoda průběhu minimálních odtoků a také jarní povodňové vlny modelovaného a pozorovaného hydrogramu. Koeficient Nash-Sutcliffe, který vystihuje míru shody mezi oběma hydrogramy, dosáhl hodnoty 0,67. Chyba objemu odtoku (odtokové výšky) je 5,2 %. Model oproti skutečnosti modeloval několik menších průtokových vln, což bylo pravděpodobně zapříčiněno povahou metody SCS CN, která simuluje objem odtoku a ve výpočtu následuje hned za výpočtem sněhového modelu. Naproti tomu hlavním cílem simulace bylo odvození počátečních hodnot vztahujících se ke sněhové pokrývce, pro který byla tato simulace dostačující.



Obr. 45 Pozorovaná a modelovaná vodní hodnota sněhu v povodí Bystřice dne 25. 3. 2006

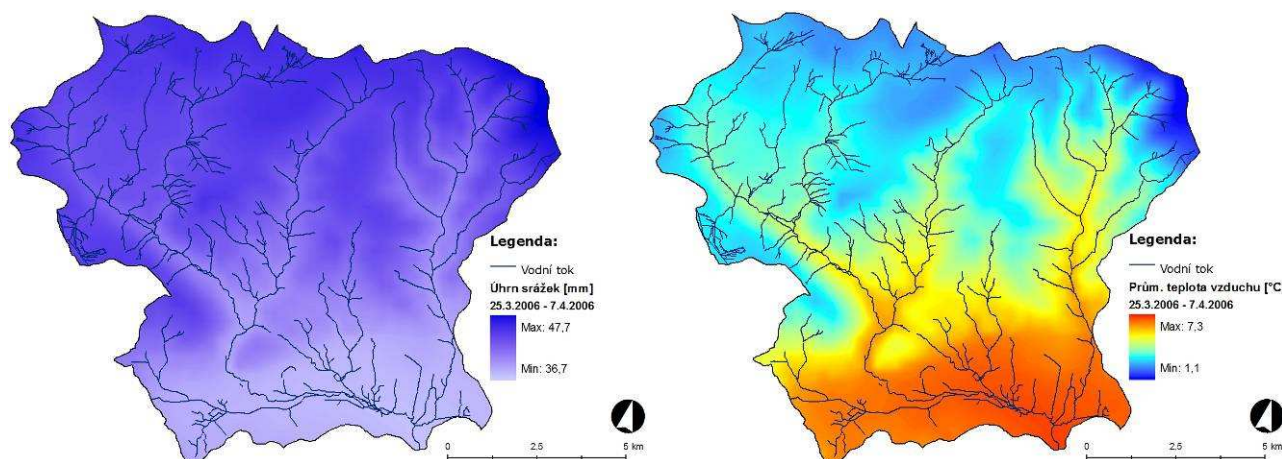
Výsledky modelování plošné distribuce vodní hodnoty sněhu ukázaly na dobrou shodu pozorovaných a simulovaných hodnot (obr. 45). Ze srovnání interpolovaných a modelovaných hodnot je zřejmá poměrně dobrá shoda v horní části povodí. Ve střední a spodní části došlo k podhodnocení pozorovaných hodnot. V některých nejnižše položených dílčích povodích dokonce model v daném termínu nesimuloval přítomnost sněhové pokrývky. Uvedené rozdíly mohou mít svůj původ jak na straně modelu, tak na straně použitých interpolací měřených staničních hodnot.



Obr. 46 Průběh vodní hodnoty sněhu (SWE) na vybraných dílčích povodích

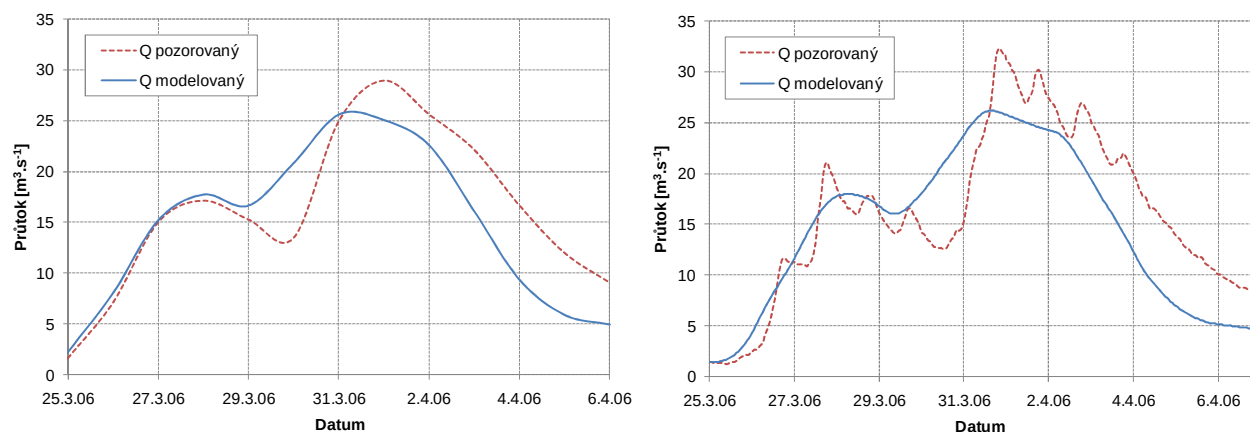
3.3.1.2 Simulace od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006

Na základě výsledků předchozí simulace byla modelována povodeň z jarního tání sněhu na přelomu března a dubna 2006 (25. 3. 2006 – 7. 4. 2006). Vybrané vstupní parametry vztahující se ke sněhové pokrývce jsou uvedeny v příloze 9. Rozložení úhrnu srážek a teploty vzduchu v modelovaném období je zobrazeno na obrázku 47.



Obr. 47 Úhrn srážek a průměrná teplota vzduchu v povodí Bystřice od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006

Během simulace byly kalibrovány parametry odtoku ze sněhu, zejména teplotní faktor tání, který je používán k výpočtu objemu roztátého sněhu. Tento faktor byl odvozen na základě metodiky uvedené v kapitole 3.2.3 a nepřímo tak zohledňuje charakter vegetačního pokryvu v povodí. Simulací povodně na jaře 2006 byl kalibrací odvozen korekční faktor pro uvedený index (hodnota 1,1), který byl aplikován při modelování hypotetických scénářů. Modelování proběhlo v hodinovém kroku. Protože je ale většina vstupních parametrů v denním kroku, byl skutečný hydrogram vytvořen na základě denních průměrů hodinových průtoků. Hlavním důvodem byl především fakt, že použitý sněhový model, který je obsažen v HEC-HMS není schopen pracovat s jinými než denními hodnotami teploty vzduchu a není tedy schopen simulovat denní chod průtoků, který je při tání sněhu častým jevem. Proto byl i skutečný hydrogram v denním kroku, aby se zamezilo chybné interpretaci výsledků. Pro srovnání jsou na obrázku 48 a v tabulce 18 uvedeny výsledky s oběma skutečnými hydrogramy v denním (simulace A) a v hodinovém kroku (simulace B).



Obr. 48 Simulace průtoku od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006 ve srovnání se skutečným hydrogramem v denním kroku (simulace A) a v hodinovém kroku (simulace B)

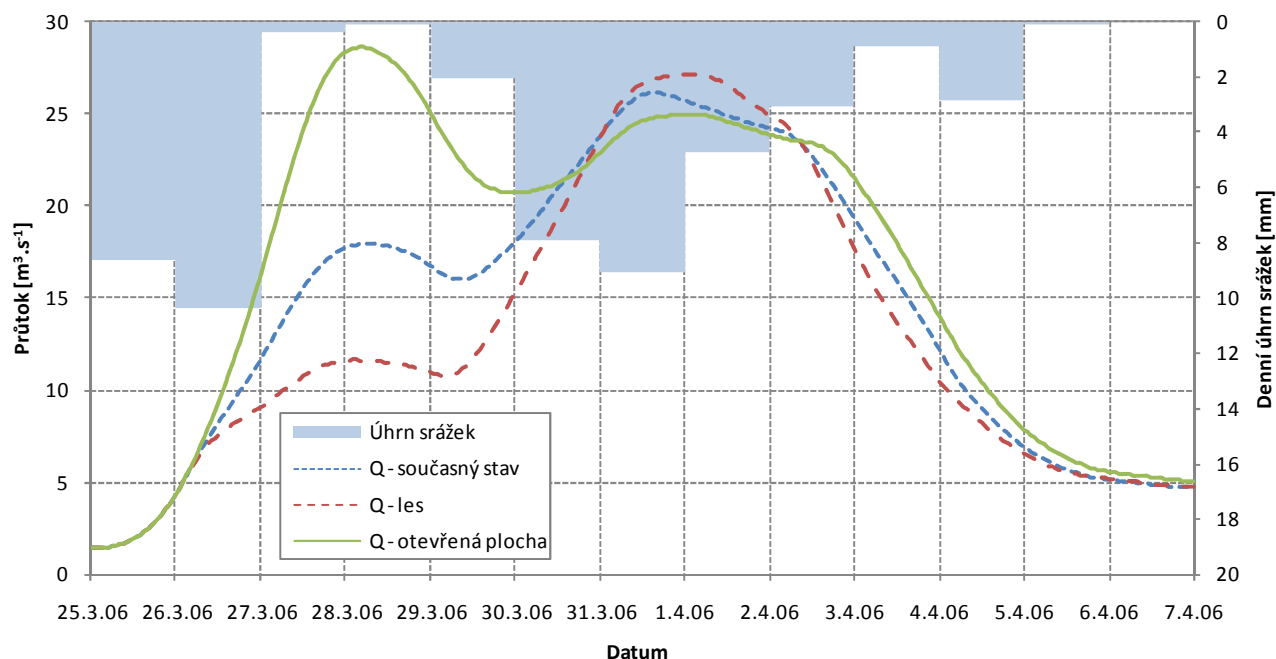
Tabulka 18 Vybrané parametry modelovaných vln

Parametr	Simulace A		Simulace B	
	Hodnota	Změna	Hodnota	Změna
Nash-Sutcliffe	0,69		0,67	
Objem vlny – modelovaný	135,57		135,57	
Objem vlny – pozorovaný	141,45	4,2 %	141,45	4,2 %
Kulminace – modelovaný	26,38		26,9	
Kulminace – pozorovaný	28,75	8,2 %	32,3	16,7
Čas kulminace - modelovaný	31.3.2006 15:00		31.3.2006 15:00	
Čas kulminace - pozorovaný	31.3.2006 20:00	5 hod	31.3.2006 20:00	5 hod

Při simulacích se projevila jedna z nevýhod použití metody SCS CN, která byla použita pro výpočet objemu odtoku. Ta obtížně simuluje odezvu na příčinné srážky, které jsou tvořeny více srážkovými vlnami, což je i případ simulované povodně. Druhá vlna simulace neodpovídá skutečnému stavu. Nástup druhé vlny je oproti skutečnosti velmi rychlý, ačkoliv celková chyba kulminace a objemu je poměrně nízká. Nejistoty vycházející z použitých metod jsou součástí dílčí diskuze uvedené na konci studie a v obecné rovině také v závěrečné diskuzi (část C).

3.3.2 MODELOVÁNÍ SCÉNÁŘŮ ODTOKU ZE SNĚHU

Jak je uvedeno v metodice, byly modelovány scénáře odtoku ze sněhu při různých typech krajinného pokryvu. Ve sněhovém modelu je možné zohlednit denní faktor tání jak ve srážkovém, tak bezesrážkovém období a stanovit jeho hodnotu v závislosti například na dopadajícím slunečním záření. Způsob odvození faktoru tání (DDF) je uveden v metodice. Výsledky modelování pro jednotlivé varianty jsou zobrazeny na obr. 49, parametry modelovaných povodňových vln jsou součástí tabulky 19.



Obr. 49 Hydrogramy průtoku od 25. 3. 2005 do 7. 4. 2006 pro skutečné a hypotetické varianty krajinného pokryvu

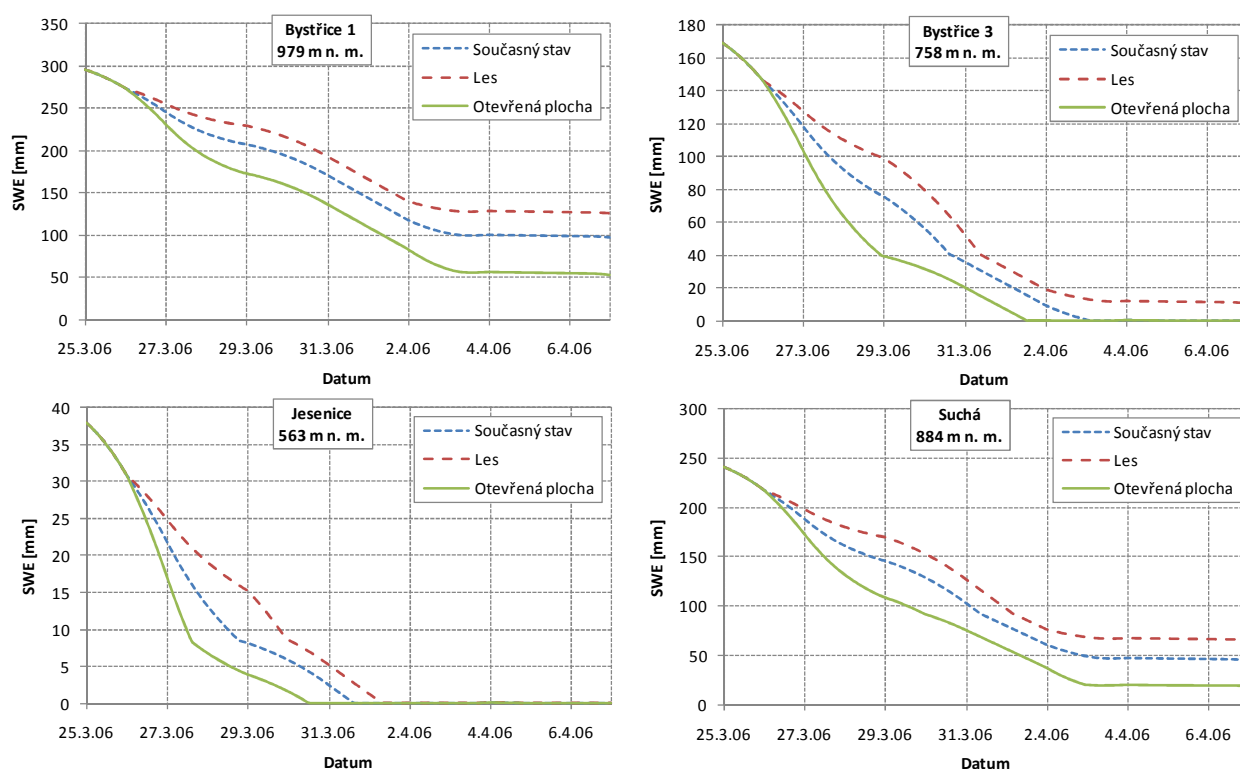
Tabulka 19 Vybrané parametry modelovaných vln

	Skutečný stav	Les	Otevřená plocha	Změna „les“ oproti skut. stavu [%]	Změna „otevřená plocha“ oproti skut. stavu [%]
Q_k - 1. vlna [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	18	11,7	28,7	-35,0	59,4
Q_k - 2. vlna [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	26,2	27,1	25	3,4	-4,6
Odtoková výška [mm]	128,77	115,63	148,74	-10,2	15,5
Čas kulminace - 1. vlna	28.3.06 4:00	28.3.06 2:00	28.3.06 4:00	-2 h	0 h
Čas kulminace - 2. vlna	31.3.06 16:00	1.4.06 2:00	31.3.06 20:00	10 h	4 h

Z výsledných hydrogramů je možné vyvodit vliv různého typu krajinného pokryvu na odtok ze sněhové pokrývky. Příčinné srážky spadly ve dvou dílčích epizodách, a tedy i na výsledném hydrogramu jsou patrné dva vrcholy. V případě modelování současného stavu (podíl lesa 58,5 %) dosáhl kulminační průtok první vlny $18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V případě nahrazení orné půdy, luk a pastvin lesním porostem (podíl lesa 95,1 %) klesl kulminační průtok první vlny na $11,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (o 35 %). Naopak v případě výskytu pouze otevřených ploch v povodí (0 % lesa), byl kulminační průtok o 59,4 % vyšší ($28,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) než v případě modelování skutečného stavu.

Graf ukazuje na významný vliv lesa a otevřených ploch na chod tání sněhové pokrývky. Nicméně v případě, že je událost tvořena dvěma vlnami srážek (a dvěma průtokovými vlnami) to paradoxně může vést ke zvýšení kulminace druhé vlny. Tak tomu bylo v případě provedené simulace (obr. 49). Během první vlny došlo sice v lese k pomalejšímu tání a následné nižší kulminaci než na otevřené ploše, zároveň ale zůstalo v povodí více sněhu, který při další vlně srážek způsobil vyšší kulminaci. V případě, že sníh roztaje během jedné epizody s kladnými teplotami a případnými kapalnými srážkami, nemusí k této situaci dojít. To je možné posoudit z obrázku 50, který ukazuje vývoj vodní

hodnoty sněhu během simulovaného období na vybraných dílčích povodích reprezentující různé nadmořské výšky v rámci celého povodí Bystřice. Z grafů je zřejmé, že v případě lesa dochází ve všech případech k pomalejšímu tání než v případě skutečného stavu nebo v případě, kdy se v povodí nachází pouze otevřené plochy. Při simulaci povodně na jaře 2006 dosáhly rozdíly ve vyšších nadmořských výškách až 80 mm (například dílčí povodí „Bystřice 1“). V některých případech (v obrázku dílčí povodí „Bystřice 3“ s průměrnou nadmořskou výškou 757,5 m n. m.), nestačila v případě lesa sněhová pokrývka během simulovaného období zcela roztát.



Obr. 50 Vývoj vodní hodnoty sněhu (SWE) od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006 na vybraných dílčích povodích

3.4 DISKUZE

Hlavní diskutované okruhy vyjádření hydrologické nejistoty jsou spojeny se sběrem a analýzou vstupních dat a s modelováním srážko-odtokového procesu pomocí zvoleného hydrologického modelu. Z toho vyplývá rozdělení nejistoty na dvě skupiny:

- Nejistota vstupů
- Nejistota hydrologického modelu

3.4.1 NEJISTOTA VSTUPŮ

Od roku 2007 probíhají na katedře fyzické geografie a geoekologie pravidelná měření výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu na experimentálních povodích na Šumavě a v Krušných horách (Jeníček et al., 2008). Tato měření potvrzují řadu důležitých skutečností. Zejména v horských podmínkách vykazují charakteristiky sněhové pokrývky v prostoru vysokou míru

variability, kterou lze pouze obtížně postihnout bodovým měřením na meteorologických stanicích. Na tuto skutečnost však upozorňuje řada autorů a je všeobecně známa (např. Daňhelka a Řiřicová, 2005). Obecně lze největší rozdíly nalézt při konfrontaci množství sněhu uloženého v zalesněném území a na otevřených plochách (Pobříšlová a Kulasová, 2000). Toto ovšem platí při zkoumání v rámci lokálního měřítka zvolené oblasti. Globálně o množství a charakteru akumulace sněhové pokrývky pravděpodobně rozhodují nadřazené faktory, například nadmořská výška.

Z výsledků posledních výzkumů lze vysledovat dynamický vývoj metod dálkového průzkumu Země pro stanovení charakteristik sněhu (Storvold et al., 2006; Riggs a Hall, 2004, Solberg et al. 2004) a je potřeba zmíněným metodám věnovat dostatečnou pozornost. Jejich výhodou může být prakticky online stanovení charakteristik sněhu na velkých územích. Zdá se, že i přes rychlý vývoj metod jsou tato data využitelná stále pouze na regionální úrovni (Ranzi et al., 1998).

Stanovení úhrnu srážek, teplot vzduchu a vodní hodnoty sněhu proběhlo za využití orografické interpolace hodnot. Zatímco interpolace teploty vzduchu není díky vysokému koeficientu determinace 0,98 zatížena velkou nejistotou (ačkoliv použití pouze tří stanic nejistotu zvyšuje), u srážek a vodní hodnoty sněhu mohly vzniknout chyby vyplývající z použití uvedené metody. Jako příklad lze uvést rozdíly mezi simulovanou a vypočtenou vodní hodnotou sněhu v dílčích povodích dne 25. 3. 2006. Zmíněné rozdíly se projeví především ve středních a nižších nadmořských výškách. Uvedená nejistota vychází především z malého počtu měřicích stanic a jejich rozmístění. Určitou mírou nejistoty jsou zatíženy i měřené hodnoty, kdy je pro pozorovatele na stanici obtížné měřit na reprezentativním místě bez vlivu lokálních faktorů (například vlivu větru nebo vegetace).

3.4.2 NEJISTOTA MODELU

Hlavní komponentou modelu HEC-HMS, která byla v této studii použita je sněhový model využívající k výpočtu metodu teplotního indexu. Metoda je poměrně propracovaná, nicméně je velkým zjednodušením skutečných procesů, které při akumulaci a tání sněhu probíhají. Tyto procesy zůstávají z velké části stále skryty a dosud nebyly uspokojivě popsány.

Jedním z faktorů, který je při modelování obtížně postihnutelný, je zmrzlá půda. V modelu je možné uvedený faktor vystihnout buď nepřímo pomocí parametru modelu odtokové ztráty „*Impervious*“, tedy podílem nepropustných ploch nebo přesněji pomocí parametru „*Groundmelt*“ v metodě teplotního indexu. Pomocí tohoto parametru ale není možné postihnout případnou prostorovou variabilitu (zadáva se pro celé povodí) ani časovou proměnlivost (po celou dobu simulace zůstává neměnný). Jak uvádí souhrnná zpráva o vyhodnocení jarní povodně 2006 (VÚV T. G. M, 2006), nebyla v době povodní v roce 2006 půda na horách promrzlá. Důvodem byla akumulace sněhu již od listopadu a její permanentní výskyt v průběhu celé zimy. V nižších polohách byla během zimy půda sice promrzlá, v době největších dešťů již ale byla rozmrzlá. Uvedené je možné nepřímo doložit měřeními na stanici Hora Sv. Šebestiána (860 m n. m.) v zimě 2009, kde je v hloubce 10 cm instalován půdní teploměr. Na stanici byl po velké část zimy zaznamenán výskyt sněhové pokrývky a teplota půdy se pohybovala lehce nad bodem mrazu. Díky uvedeným skutečnostem nebylo během simulací v horských oblastech povodí uvažováno zamrznutí půdy.

Velkou nejistotou je zatížen také teplotní faktor tání (*degree-day factor*, *DDF*), který musí být odvozen jak pro srážkové, tak bezesrážkové období. Díky tomu je možné zohlednit rozdílné tání v bezesrážkovém období na otevřených plochách a v lese (DeWalle a Rango, 2008; Singh a Singh, 2001). V práci byl použit experimentálně zjištěný vztah podle Federera (1972), který ale nemusí být platný pro území České republiky. Proto byly vypočtené hodnoty součástí kalibrace. Významným přínosem by bylo dlouhodobé podrobné měření tohoto parametru v lese a na otevřených plochách v podmínkách České republiky (viz např. Kuusisto, 1980). Zmíněná problematika představuje jeden z návrhů možného výzkumu modelování odtoku ze sněhové pokrývky.

Jako největší nevýhodu metody teplotního indexu lze označit nemožnost zohlednění denního chodu tání sněhové pokrývky. To vyplývá z podstaty jejího výpočtu a nutnosti zadání jak teplotního faktoru, tak například časových řad srážek v denním kroku (Feldman, 2000). Při simulaci povodně v roce 2006 uvedená skutečnost nezapříčinila významné odchylky, protože povodeň byla způsobená nejen vysokými teplotami v celém povodí (i v jeho nejvyšších částech), ale především vysokými úhrny kapalných srážek, které spadly na celém povodí Bystřice. Typický denní chod odtoku díky slunečnímu záření je zaznamenán až na poklesových větvích hydrogramu a v daném případě nehrál zásadní roli. Naproti tomu jarní tání v březnu a v dubnu 2009 ukázalo na fakt, že pro lokálně vysoké průtoky nemusí vždy nutně vypadávat kapalně srážky. V tomto případě se jednalo pouze o tání vlivem vysokých denních teplot vzduchu, které by pravděpodobně modelem teplotního indexu nebyly správně postihnuty. V tomto případě je vhodné použít metod radiační bilance (Beven, 2001), které by změny teploty během dne byly schopné zohlednit.

3.5 DÍLČÍ ZÁVĚRY

V rámci dílčí studie proběhly simulace vlivu lesa a otevřených ploch na dynamiku ukládání a tání sněhové pokrývky a na následný odtok ze sněhu. Byla provedena simulace odtoku v období jarní povodně v roce 2006 (25. 3. 2006 – 7. 4. 2006). Na této události byl pomocí variantních simulací sledován vliv uvedených faktorů na průběh tání a odtoku ze sněhu.

Příčinné srážky byly tvořeny dvěma vlnami, a tedy i na výsledném hydrogramu byly patrné dva vrcholy. V případě modelování současného stavu (podíl lesa 58,5 %) dosáhl kulminační průtok první vlny $18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V případě nahrazení orné půdy, luk a pastvin lesním porostem (podíl lesa 95,1 %) klesl kulminační průtok první vlny na $11,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (o 35 %). Naopak v případě výskytu pouze otevřených ploch v povodí (0 % lesa) byl kulminační průtok o 59,4 % vyšší ($28,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) než v případě modelování skutečného stavu.

Výsledky ukázaly na nejednoznačnost hodnocení a to v případě, že událost je tvořena dvěma vlnami. V případě lesa sice u první vlny dojde k výraznému snížení, naproti tomu zůstanou v povodí vyšší zásoby sněhu, které mohou způsobit vyšší kulminaci případné druhé vlny.

Modelování srážko-odtokových procesů v povodí ukázalo na řadu nejistot vyplývajících jednak ze vstupních dat a jednak z použitého modelu a modelovacích technik. Jednu z nejistot představuje samotný princip měření sněhu v povodí a interpretace dat. Nejistoty použitého modelu vychází

především z parametrizace sněhového modelu (určení teplotního faktoru tání nebo vsaku do půdy) a průběhu výpočtu (není možné zohlednit denní chod tání).

Sněhový model počítal na základě metody teplotního indexu. Vliv vegetace v něm byl zohledněn pomocí faktoru tání v bezesrážkovém období. Uvedený faktor byl odvozen na základě výsledků studií provedených na jiných územích a není jisté, že bude v povodí Bystřice nabývat stejných hodnot. Proto byl uvedený parametr zohledněn v kalibraci, nicméně by mohlo být přínosné, věnovat se v dalším výzkumu experimentálnímu odvození teplotního faktoru tání v lese a na otevřených plochách.

ČÁST C:

DISKUZE A ZÁVĚRY

1 DISKUZE

Výzkum provedený v rámci disertační práce ukázal na celou řadu nejistot vycházejících z různých fází zpracování a dal vzniknout řadě otázek, k jejichž zodpovězení bude nutný další výzkum. Konkrétní problémy vycházející z použitých dat a metod modelování jsou součástí diskuzí v rámci jednotlivých studií. Tato kapitola shrnuje a diskutuje obecné poznatky vzniklé během čtyřletého výzkumu a je rozdělena na několik samostatných částí.

- Koncept integrované protipovodňové ochrany
- Hydrologické modelování jako nástroj integrované protipovodňové ochrany
- Hydrologická nejistota
- Možné směry dalšího výzkumu

1.1 KONCEPT INTEGROVANÉ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY

Z výsledků výzkumů vyplývá, že integrovaná protipovodňová ochrana může být účinným doplňkem klasických opatření, obecně je ale nemůže v plné míře nahradit (viz např. Langhammer et al., 2008b). Ne vždy je také ochrana před povodněmi jediným účelem daných opatření. Z dosavadních výzkumů klimatických změn také vyplývá, že naše území může být zasaženo výraznějšími výkyvy hydrologických extrémů, tedy nejenom povodněmi, ale i suchem a zmenšením zásob podzemní vody (IPCC, 2007; Horáček et al., 2008). V tomto případě jsou technická opatření (například nádrže jako zásobárna pitné vody) obtížně nahraditelná, což dokazují výsledky návrhu variant protipovodňové ochrany na Opavě (MŽP ČR, 2008; Mana, 2007). Jak je zmíněno již v části A, konkrétní řešení protipovodňové ochrany bude vždy vycházet z širšího pojetí vodohospodářského managementu povodí. To ostatně naznačují i některé studie, například Langhammer et al. (2008b), Quinn et al. (2001) nebo Schulte et al. (2009).

Pro případný projekt návrhu protipovodňových opatření je velmi důležité zohlednit nejen faktory spojené s vlastní kvantifikací vlivu, ale také je důležité posoudit ekonomickou účinnost modelovaných opatření. Nezastupitelnou úlohu mají i faktory sociální, psychologické a politické. Význam všech faktorů dokládají například studie provedené v povodí Opavy (MŽP ČR, 2008; Mana, 2007), ve kterých se z hlediska snížení kulminace povodně i ekonomické náročnosti nejprůzračněji jeví varianta velké nádrže Nové Heřmínovy. Ta by ale znamenala pro část obyvatel obrovský zásah do jejich životů (zánik části obce), proto tato varianta nebude nakonec realizována. Uvedená skutečnost dokumentuje jeden z hlavních rozdílů mezi tzv. strukturálními (technickými) a přírodě blízkými (měkkými) opatřeními.

Z ekonomického hlediska je při případném návrhu opatření také nutné zhodnotit náklady na realizaci případných staveb a hodnotu majetku, který jsou daná opatření schopna ochránit. Cílem opatření není zabránit povodni jako takové (jedná se o přirozený přírodní jev), ale zabránit tomu,

aby se povodeň dostala do kontaktu z činností člověka a působila škody (Matějíček a Hladný, 1999).

V práci byly prezentovány tři případové studie, jejichž cílem byla kvantifikace vlivu některých opatření integrované protipovodňové ochrany na průběh povodní. V rámci případových studií byly modelovány jen některé typy opatření, přičemž faktorů, které ovlivňují odtok z povodí je celá řada a mohou souviset se změnami povodí, které se projeví po začlenění daných opatření. Příkladem může být změna vlastností půdy nebo intercepce, které se zřejmě projeví v případě změn krajinného pokryvu, ale které jsou v rámci použitých modelových technik (v tomto případě SCS CN) formulovány nepřímou a poměrně nejasně. Také je potřeba vnímat, že simulace proběhly na konkrétním povodí za konkrétních podmínek a je nepravděpodobné, že stejně výrazný efekt nastane v případě aplikace v jiném povodí. Z těchto důvodů je třeba výsledky vnímat jako orientační a spíše než absolutními velikostmi kulminací nebo objemů povodňových vln je vhodnější se zabývat relativními změnami v rámci modelovaného období. Výše uvedený závěr je významný i z jiného hlediska. Je třeba si uvědomit, že hydrologické modelování je sice silným nástrojem pro kvantifikaci změn odtoku, ale stále se jedná pouze o zjednodušený a diskretizovaný pohled na skutečné procesy probíhající v přírodě, které zůstávají v některých ohledech stále skryté (Loague a Freeze, 1985).

V České republice i v zahraničí byla v posledních letech zpracována řada studií protipovodňové ochrany, které se svými opatřeními blíží konceptu integrované protipovodňové ochrany (např. MŽP ČR, 2008; Řehák a Svatoš, 2006; Szolgay a Danáčová, 2007; Schulte et al., 2009). Na základě těchto studií nelze určit, která opatření jsou nejvhodnější. Konkrétní realizační projekt bude vždy prováděn na konkrétním povodí a bude tak zohledňovat všechna jeho specifika. Suché nádrže mohou být realizovány jak v údolní nivě, tak v pramenných oblastech toků. Ve vrcholových oblastech Šumavy je možné jako suché nádrže využít bývalé retenční nádrže používané k plavení dřeva, tzv. klausy (Kocum a Janský, 2009). Obnova jejich hrází by nemusela být finančně tolik nákladná jako v případě stavby nových nádrží. Protože se jedná o suché nádrže, nedošlo by k narušení současných cenných chráněných ekosystémů (Kocum a Janský, 2008). Výhodou realizace nádrží v pramenných oblastech je retence srážek v místě jejich vzniku, nevýhodou může být typická morfologie terénu, která v horských oblastech ve většině případů neumožňuje zadržení větších objemů.

Určité možnosti jsou v tomto ohledu i v pramenných oblastech vodních toků v Krušných horách, které stejně jako na Šumavě umožňují vyšší retenci díky zarovnaným povrchům ve vrcholových částech. V těchto místech existují funkční i nefunkční malé nádrže, které by pro případnou retenci bylo možné využít. V povodí horní Chomutovky jsou tyto funkční nádrže tři a jejich objem se zřejmě vyrovná objemu modelovaných nádrží. V pramenných oblastech toků v Krušných horách je třeba pokračovat v obnově lesních porostů zničených škodlivými látkami v ovzduší vypouštěných v 70. a 80. letech (Lomský et al., 2002) a v zatravňování nebo zalesňování nevhodných zemědělských ploch. Ve strmých úsecích toků je třeba vhodnými opatřeními snižovat rychlosti proudící vody a tím snižovat erozi a zvyšovat retenční schopnost říční sítě.

Mimo pramenné oblasti, v nižších částech povodí, je nezbytné nadále využívat retenční potenciál údolní nivy a umožnit řízené i neřízené rozlivy v místech, kde je to možné. Uvedené by i v budoucnu mělo být jedním z okruhů zájmu základního i aplikovaného výzkumu. Hydrologické a hydrodynamické modelování může společně s nástroji GIS a DPZ hrát nezastupitelnou úlohu při zjišťování retenčního potenciálu krajiny a říční sítě a kvantifikaci vlivu různých opatření na průběh a následky povodní.

1.2 HYDROLOGICKÉ MODELOVÁNÍ JAKO NÁSTROJ INTEGROVANÉ PROTIPOVODŇOVÉ OCHRANY

Výhody a nevýhody použitých modelovacích technik byly popsány v rámci dílčích diskuzí všech případových studií. Zobecnění, uvedená v následujícím textu, vychází ze všech studií a patří tak k hlavním metodologickým výsledkům disertační práce.

Metoda SCS CN (*Soil Conservation Service Curve Number*) byla použita ve všech případových studiích k výpočtu objemu odtoku z povodí. Výhody spočívají především v její jednoduchosti a dostupnosti dat. Metoda ale používá četná zjednodušení, která její využití limitují. Přesto je hojně využívána v Česku i v zahraničí. Výhody a nevýhod metody SCS CN shrnuje tabulka 11 uvedená v rámci případové studie provedené v povodí Blanice (část B).

Při všech simulacích se nepříznivě projevila jedna z nevýhod metody SCS CN. Ta dává těžko interpretovatelné výsledky v případě, že během simulované události dojde k přerušení srážek. Z principu výpočtu vyplývá, že metoda nedokáže zohlednit odtok do hlubších zón půdního profilu (perkolaci). Voda tedy zůstává v půdě a v případě více srážkových vln dává nadhodnocené výsledky efektivních srážek, které se následně transformují do přímého odtoku. Z tohoto hlediska tedy metoda není vhodná pro dlouhodobé simulace, ale je použitelná pouze pro krátkodobé události. Tato skutečnost je nicméně obecně známa (Feldman, 2000). Především v případě výsledků vlivu krajinného pokryvu na odtok zůstává do budoucna nutné ověřit výsledky pomocí metody, která bude přesněji vystihovat fyzikální zákonitosti proudění vody v nenasycené a nasycené zóně půdního profilu. V modelu HEC-HMS se nabízí metody Green-Ampt nebo Soil Moisture Accounting (SMA).

Jak je uvedeno v následující podkapitole, problém výpočtu nebyl způsoben pouze vlastním principem metody SCS CN, ale také její aplikací na dílčí povodí určité velikosti. V tomto případě se nepříznivě projevila distribuce parametrů v celistvém modelu, ve kterém se charakteristiky vztahují k dílčím povodím. Zvláště nepříznivě se to projevuje právě u parametrů půdního modelu, které jsou velmi citlivé na prostorové měřítko (Payraudeau et al., 2003). Proto, jak je uvedeno v dalším textu, by bylo výhodné zvolit kombinaci jiné metody a jiné prostorové distribuce parametrů (např. distribuovaný přístup).

Použití metody Clarkova jednotkového hydrogramu se pro výpočet přímého odtoku naopak jeví jako vhodné. Přesto je ale nutné zvolit vhodné metody výpočtu doby koncentrace T_c a transformačního faktoru R_c . Variantními simulacemi byla prokázána významná citlivost modelu na parametr doby koncentrace, což je nutné zohlednit při kalibraci modelu. Pro výpočet doby

koncentrace je možné použít celou řadu rovnic, které budou bezesporu dávat rozdílné výsledky. Při použití různých výpočtů je možné využít metodiky USDA (1986) nebo manuálu programu HEC-HMS (Feldman, 2000). Jiné metody výpočtu ale nebyly testovány.

Výrazná citlivost na rychlost postupu vody v korytě se naproti tomu nepotvrdila. Lze ale očekávat, že se tak bude dít při zvětšující se ploše povodí. Výhodné pak může být propojení srážko-odtokového modelu a podrobného hydrodynamického modelu pro velká povodí (řádově nad 500 km²). Tento přístup byl použit například u rekonstrukce průběhu povodně na Blanici po závěrový profil Heřmaň, kterou provedl VÚV T. G. Masaryka, v.v.i. (Havlík, 2003).

Použitý sněhový model, konkrétně metoda teplotního indexu se pro daný účel osvědčila. Uspokojivě se jevíly modelované hodnoty akumulovaného sněhu i průběh tání sněhové pokrývky. Nejistoty vycházející z modelování (diskutované v rámci případové studie) se dají přisoudit především vstupním datům. Z hlediska distribuce parametrů zohledňuje sněhový model v rámci dílčího povodí ještě příslušnost do výškového pásu, čímž dochází k lepší distribuci parametrů sněhové pokrývky. Nicméně se lze domnívat, že v případě použití distribuované formy parametrů (což model HEC-HMS u této metody umožňuje), by mohlo dojít k zpřesnění informací o akumulaci a tání sněhu v rámci povodí.

Klíčovým parametrem metody je teplotní faktor DDF. Ten lze odvodit pro celé povodí a stav sněhové vrstvy, je ale obtížné ho vztáhnout k jiným faktorům, které ho mohou ovlivňovat, například vegetaci. Zde by mohlo být přínosem zahrnutí další veličiny pro jeho výpočet, například radiace. Tento závěr uvádí také Beven (2001). Metoda teplotního indexu v modelu HEC-HMS neumožňuje modelovat denní chod tání sněhu. Pro tyto účely je nutné použít metody energetické bilance.

1.3 HYDROLOGICKÁ NEJISTOTA

Hydrologické modelování je nástrojem geografické analýzy, které vychází ze zjednodušeného popisu přírodního systému. Toto zjednodušení s sebou nese i nejistotu. Její vyjádření je v současnosti jedno z hlavních témat hydrologie (Daňhelka, 2005). V diskuzích v rámci případových studií bylo použito dělení na dvě skupiny:

- Nejistoty vstupů
- Nejistota hydrologického modelu

Obě uvedené skupiny tvoří podle Krzysztofowicz a Maranzano (2004) dohromady hydrologickou nejistotu (*Hydrological uncertainty processor*). Kromě toho pro potřeby operativních předpovědí vyčleňuje Krzysztofowicz ještě nejistotu operativní (*Operational uncertainty processor*), danou chybějícími a chybně měřenými daty, a nejistotu vstupů (*Input uncertainty processor*), která vzniká chybou měřících přístrojů a chybou meteorologických předpovědí.

V případových studiích je hydrologická nejistota vyjadřována podle objektivních kritérií, nejčastěji podle kritéria Nash-Sutcliffe, relativní chyby kulminace a relativní chyby objemu povodňové vlny. Existují i další kritéria, například směrodatná chyba odhadu nebo koeficient variace (viz např. Khakbaz et al., 2009; Liu, 2009; Daňhelka et al., 2003). Všechna kritéria se nejčastěji vztahují

k porovnání simulované a pozorované povodňové vlny v průběhu kalibračního procesu. Každé objektivní kritérium má své výhody a nevýhody. Výhodou kritéria Nash-Sutcliffe je, že porovnává hodnoty v každém časovém kroku a vytváří určitou sumu jejich odchylek. Nevýhodou může být například případ, kdy je vzestupná i poklesová větev hydrogramu strmá a oba hydrogramy jsou nepatrně časově posunuté. Fázový posun větví hydrogramů způsobí snížení kritéria Nash-Sutcliffe, ačkoliv vizuální shoda se může zdát uspokojivá. Proto je dobré kombinovat více kritérií, využít také výpočet relativní chyby kulminace, při které se porovnávají pouze kulminační průtoky. Uvedená varianta doplněná v některých případech o další kritéria byla využita i v této práci. Hlavním důvodem byl fakt, že všechny případové studie sledovaly především hodnoty kulminačních průtoků a jejich případné změny.

1.3.1 NEJISTOTA VSTUPŮ

Při shromažďování datových podkladů je potřeba brát v úvahu nároky modelu na vstupní data. Uživatel nemá často možnost zjistit veškeré informace vztahující se k povodí, a to buď v důsledku neexistence dat nebo jejich obtížné dostupnosti. Pro operativní využití je také nezbytné, aby data byla okamžitě k dispozici. Z tohoto pohledu je tedy užitečná robustnost modelu. Aplikací různých datových podkladů se do výsledků zanáší určitá míra nejistoty. Chyby obsažené ve vstupních datech vycházejí ze tří hlavních kategorií:

Nahodilé chyby – chyby vzniklé při zpracování měřených hodnot. U časových řad je lze eliminovat vizuální kontrolou nebo použitím různých kontrolních metod, například podvojná součtová čára, součtová křivka reziduálů, shluková analýza nebo víceprostorová analýza (Daňhelka et al., 2003).

Systematické chyby měření – tyto chyby vychází například z principu měření použitého přístroje a místa měření. Problémem bývá například měření srážek v zimě nebo zaznamenávání extrémních intenzit srážek u překlopných srážkoměrů atd. U dat které byly převzaty od třetích institucí je odhalení uvedených chyb obtížné (např. srážky a teploty vzduchu). Možné chyby dat získané vlastním měřením jsou popsány v dílčích diskuzích.

Chyby prostorové interpretace – tyto chyby vychází z použité metodiky pro převádění bodových hodnot na plošné, nejčastěji se jedná o srážky (kapalné i pevné) a teploty vzduchu. Většina metod je založena pouze na interpolaci hodnot dané veličiny, nezohledňují ale například vliv orografie. V případových studiích byly použity převážně techniky ordinárního krigingu nebo orografické interpolace. V případě průměrných teplot vzduchu, které byly počítány pomocí korelace s nadmořskou výškou, mohou nepřesnosti vznikat díky občasným zimním teplotním inverzím, u kterých je velmi těžké tuto závislost správně vystihnout. Chyby mohou vznikat také při interpretaci půdních charakteristik, které se vyznačují vysokou variabilitou v čase i v prostoru.

Ačkoliv se může zdát, že chyby vzniklé prostorovou interpretací mohou být poměrně rozsáhlé, nebyly srážky ani teploty součástí kalibrace. Důvod byl především ten, že by se zvýšil počet kalibrovaných parametrů a tím by i kalibrace byla obtížná, přičemž není jisté, že by přinesla lepší výsledky. S tímto souvisí i problém „přeparametrizování“, tedy použití velkého množství parametrů pro kalibraci modelu, na který upozorňuje například Beven (2001) nebo Refsgaard a Storm (1996). O prostorové interpretaci pojednává práce Koren et al. (1999), který zkoumal rozdílnou reakci

modelů na prostorovou variabilitu srážek na územích s proměnnou rozlohou. Četné práce vyzdvihují význam zahrnutí radarových odhadů srážek do výpočtu plošných hodnot, například Sangati et al. (2009) nebo Růžicková (2009), která srovnávala reakci modelu HEC-HMS na vstupní srážky spočtené na základě bodových měření a zároveň na základě radarových odhadů na příkladu povodí Chomutovky.

Interpolačním postupům na území České republiky se věnuje ve své práci Šercl (2008), který s uspokojivými výsledky testoval kombinovanou metodu s využitím jak adjustovaných odhadů z meteorologických radarů, tak s pozemních srážkoměrů, přičemž pro interpolaci bodových hodnot využívá vlastní metodu ORO, která je založena na výpočtu závislosti srážek na nadmořské výšce z okolních stanic. Uvedený postup je nejvhodnější pro výpočet dlouhodobých srážek nebo srážek způsobených stratiformní oblačností. Pro interpolaci srážek způsobených konvektivní oblačností tato metoda dobré výsledky nedává, nicméně právě zde je použití radarů výhodou.

Důležitou otázkou je také interpolace návrhových hodnot srážek. V případových studiích byl aplikován zjednodušený předpoklad uniformního rozložení srážek na celém (Chomutovka) nebo na části povodí (Blanice). Zde by mohlo být výhodnější použití interpolace hodnot podle vhodné metodiky. Touto otázkou se zabývali například Szolgay et al. (2009) nebo Řezáčová et al. (2005). Pro další výzkum by aplikace některých metod mohla být výrazným přínosem.

Srážková a teplotní data nejsou jediná bodová data, která jsou do modelu zadávána. Dalšími jsou informace o hydrologických vlastnostech půd, které jsou pro většinu modelů obecným problémem. Model půdní vlhkosti je u koncepčního přístupu nejdůležitější komponentou. Navzdory tomu je odvození půdních parametrů často velmi obtížné a je zároveň zatíženo značnou chybou. Ta je nejčastěji dána použitým prostorovým měřítkem. Díky tomu je velmi obtížné vystihnou prostorovou variabilitu půdních parametrů.

V modelu HEC-HMS a v použité metodě SCS CN je největším problémem odvození hodnot CN. Ty jsou sice na základě použité metodiky odvozeny v pravidelné gridové síti, do modelu ale vstupují průměrné hodnoty za jednotlivá dílčí povodí. Tím dochází k částečnému setření variability půdních parametrů a vzniká tak možný problém pro kalibraci. Řešením může být použití distribuovaného nebo semi-distribuovaného přístupu, což potvrzují i některé další studie, například Hlavčová et al. (2009) nebo Sangati et al. (2009). Protože je problematika lumped a distribuovaného přístupu obecnějšího charakteru, je jí věnována samostatná podkapitola v rámci diskuze.

1.3.2 NEJISTOTA HYDROLOGICKÉHO MODELU

1.3.2.1 *Prostorové a časové měřítko*

Volba měřítka především prostorového se při modelování ukázala jako velmi významný faktor, který má vliv na výsledné simulace a vyjádření nejistoty. Modelování procesů koloběhu vody mezi atmosférou a zemským povrchem vyžaduje znalost reakce modelu na změny časového i prostorového kroku. Jak je uvedeno v práci Jeníčka (2005), četné studie například Payraudeau et al. (2003) a Koren et al. (1999) dokazují, že při změně prostorového kroku dochází ke změně

parametrů modelu a ten následně vyžaduje novou kalibraci. Koren et al. (1999) testoval různé koncepční modely v rozdílných prostorových krocích a došel k závěru, že při použití stejných parametrů se celkový simulovaný průtok snižuje se zvyšujícím se krokem, u jednoho z testovaných modelů až o 25 %. V případě modelování pouze povrchového odtoku je tento pokles ještě výraznější (v jednom případě až o 90 %). Ukázalo se také, že modely, které používají komponentu půdní vlhkosti typu „infiltration excess“ jsou na změny měřítka citlivější než modely typu „saturation excess“.

Metoda SCS CN kombinuje oba modely typu odtoku, je tedy možné se domnívat, že z tohoto hlediska pravděpodobně bude mít vliv typ srážkových událostí (konvektivní srážky, stratiformní srážky), které jsou použity pro kalibraci a verifikaci modelu. Problematika scalingu je častým tématem i dalších publikací, například Beven (2001) a z hlediska změn vegetačního pokryvu také Fohrer et al. (2002). Manfreda et al. (2007) se zabýval prostorovou dynamikou půdní vlhkosti pomocí satelitních dat v různých hloubkách půdního profilu za využití metod statistického downscalingu.

V dílčí diskuzi k případové studii provedené v povodí Blanice jsou uvedeny některé důsledky vztahující se k velikosti dílčích povodí. Ve všech případech se velikost subpovodí použitých pro schematizaci modelu pohybuje od 2 do 10 km², což se zdá jako maximální velikost, kterou je možné pro daný účel použít. Promítlo se to nejenom při zadávání srážkových úhrnů nebo parametrů přímého odtoku, ale především při zadávání hodnot CN pro metodu SCS CN. Zadáním průměrných hodnot se do značné míry eliminuje prostorová variabilita dané veličiny, což se může nepříznivě promítnout při kalibraci modelu. Na základě výsledků je možné se domnívat, že pro zachování prostorové heterogenity půdních (i jiných) vlastností by bylo výhodnější použít distribuovaný nebo semi-distribuovaný přístup, což uvádí také Hlavčová et al. (2009). Dříve stanovené parametry by při použití distribuovaného přístupu bylo nutné překalibrovat. Z tohoto pohledu by mohlo být přínosné použití distribuovaných vstupů hodnot CN v gridové síti namísto hodnot vztažených k dílčímu povodí, což model HEC-HMS umožňuje. Společně s dalšími distribuovanými procedurami (například metodou ModClark pro výpočet přímého odtoku v gridové síti) by uvedený postup mohl vést k lepším výsledkům zatížených menší mírou nejistoty.

Na základě výsledků případových studií se zdá, že nejpříznivěji by se změna prostorové interpretace mohla promítnout nejen při výpočtu objemu odtoku, ale také ve sněhovém modelu při výpočtu charakteristik sněhové pokrývky, například vodní hodnoty sněhu. Uvedené doporučení bude součástí dalšího výzkumu.

Jak je uvedeno v práci Jeníčka (2005) mají koncepční hydrologické modely dlouhou historii vývoje, ve které se uplatňují modely se soustředěnými parametry a také modely s distribuovanými parametry. Distribuované modely zohledňují prostorovou variabilitu parametrů, a tedy lépe reprezentují fyzikální procesy probíhající v povodí. Z uvedené skutečnosti by se mohlo zdát, že distribuované modely by mohly být přesnější, i když například starší práce Oblada et al. (1994), který testoval různou distribuci srážek v experimentálním povodí, tuto domněnku neprokázala. Z výsledků práce se zdá, že hlavním kritériem pro použití lumped nebo distribuovaného (resp. semi-distribuovaného) přístupu bude velikost povodí, přičemž při menším povodí se rozdíly mezi

modely stírají. Vývoj byl také zaznamenán ve využívání koncepčních modelů oproti modelům typu „black-box“. Daňhelka et al. (2003) uvádí, že výhody fyzikálně strukturovaného (koncepčního) přístupu v operativní hydrologii jsou prokazatelné už od předstihu předpovědi $\Delta t = 6$ hodin. Naproti tomu se v poslední době vyvíjí modely založené na aplikaci neuronových sítí, které jsou zástupci přístupu „black-box“ (viz např. Starý, 2004).

V případě volby časového kroku je potřeba vycházet z mnoha hledisek, jako je účel použití modelu, velikost povodí, dostupnost dat uvažovaného rozlišení a jejich kvalita nebo také rychlost výpočtu (důležité pro operativní hydrologii). V případě povodí Chomutovky byl zvolen krok 15 minut, což přineslo komplikace při zadávání časových řad srážek a průtoků, které byly dostupné v kroku 1 hodina. Naproti tomu by použití výpočetního kroku jedna hodina pravděpodobně přineslo nestabilitu výpočtu některých komponent a podcenění kulminačního průtoku. Jednoduché testy časového kroku byly provedeny v práci Jeníčka (2005), kde byl potvrzen významný vliv tohoto faktoru na průběh průtoku a velikost kulminace povodně. Protože události modelované ve zmíněné práci byly způsobeny přívalovými srážkami, počítal použitý semi-distribuovaný model více na bázi „infiltration-excess“. Potvrdil se tak výše popsáný závěr, ke kterému došel Koren et al. (1999). Problémy s časovým krokem byly popsány v rámci případové studie modelování odtoku ze sněhu.

1.3.2.2 Počáteční podmínky

Nastavení počátečních podmínek je velmi důležitým krokem, protože jejich chybné zadání výrazně ovlivňuje výsledný hydrogram. Je proto důležité věnovat této části dostatečnou pozornost. Zvláště u epizodní simulace krátkého trvání má nastavení množství vody v půdě výrazný vliv na odtok. Jako klíčový se jeví výpočet předchozího nasycení půdy předchozími srážkami. V metodě SCS CN se počáteční nasycení zohledňuje při stanovení hodnot CN. K výpočtu je možné využít i koeficient API (*Antecedent Precipitation Index*), v případových studiích bylo ale využito pětidenního předchozího úhrnu srážek. Provedené simulace proběhly pro podmínky průměrného a plného nasycení (tzv. PVPII a PVPIII). Výsledky a další jednoduché testy potvrdily význam předchozího nasycení na průběh povodně, které může velmi výrazně ovlivnit velikost kulminace.

1.3.2.3 Kalibrace modelu

Ve srážko-odtokových modelech se vyskytuje mnoho parametrů popisujících strukturu a chování systému (povodí). Tyto parametry byly odvozeny na základě terénního měření, analýzy podkladů GIS a DPZ nebo na základě rozboru literatury a aplikace hodnot, které byly experimentálně ověřeny na jiných povodích. Odvozené parametry jsou vždy zatíženy určitou mírou nejistoty. Některé hodnoty se ponechávají v modelu tak, jak byly změřeny, jiné mohou být později upravovány kalibrací. Počet kalibrovaných parametrů bývá různý u různých typů modelů. U lumped modelů jich může být jen několik, u semi-distribuovaných modelů mohou teoreticky růst exponenciálně podle počtu elementárních ploch. Příliš mnoho parametrů je problémem především u koncepčních modelů, kdy popis probíhajících procesů vychází z fyzikální podstaty jevu a správnější by tedy bylo brát v úvahu pouze naměřené nebo jinak odvozené hodnoty. Z uvedených důvodů je proto nezbytné určit okrajové podmínky, ve kterých se kalibrovaný parametr může pohybovat. Zmíněné skutečnosti potvrzují například Beven (2001), Refsgaard a Storm (1996) a další, kteří dále

upozorňují na problém „přeparametrizování“, tedy na riziko kalibrace velkého množství parametrů. Kokkonen et al. (2001) využil pro modelování odtoku z malého povodí semi-distribovaný model, ve kterém kalibroval pouze dva parametry, a to vodní hodnotu sněhu a rychlost proudění v korytě.

Refsgaard (1997) určuje tři okruhy podmínek, který by měl uživatel zohlednit před i po kalibraci. První z nich je podmínka, že třídy parametrů (půdní druhy, vegetace atd.) by měly být nastaveny tak, aby bylo možné jednoduše zjistit parametry, nejlépe z již existujících a dostupných dat. Druhou podmínkou by měl uživatel ověřit, které parametry by se měly kalibrovat a které není třeba. Pro první skupinu by měl uživatel určit okrajové podmínky. Třetí podmínka říká, že celkový počet kalibrovaných parametrů by u koncepčních modelů měl být co nejmenší. Důvody jsou jednak metodologické a jednak praktické.

U všech případových studií byly zaznamenány poměrně velké potíže při kalibraci parametrů. Mohlo by se tak zdát, že u modelu HEC-HMS je tento proces jeho největší slabinou. Je důležité si ale uvědomit, že obtíže s kalibrací jsou především odrazem použitých metod. Obecně totiž platí, že je velmi obtížné (pokud vůbec možné) nakalibrovat takový model, který by uspokojivě modeloval všechny druhy událostí (různé extremity, příčiny). Uvedenou skutečnost potvrzují například Beven (2001) nebo Daňhelka et al. (2003). Zřídka se stává, že jedna struktura modelu a jedna sada parametrů je zcela optimální, což se projevilo v případové studii na Blanici, kde v kalibraci dávala jedna sada parametrů uspokojivé výsledky, verifikace ale odhalila některé nedostatky a nakonec musela být pro kalibraci a následnou verifikaci použita jiná sada optimalizovaných parametrů. Takto lze odvodit různé sady parametrů pro různé typy událostí (např. pro různé příčinné srážky nebo pro modelování letních a zimních povodní). Pro model HEC-HMS se tento navržený postup jeví jako slibný.

1.4 MOŽNÉ SMĚRY DALŠÍHO VÝZKUMU

Jak je zdůrazněno na počátku diskuze, ukázal provedený výzkum na celou řadu nejistot vycházejících z různých fází zpracování práce a dal tak vzniknout řadě námětů pro výzkum, kterým by bylo vhodné se na katedře fyzické geografie a geoekologie PřF UK v budoucnu věnovat a jejichž výsledky by mohly přispět k dalšímu pokroku v porozumění procesů probíhajících v přírodě.

Prostorová distribuce parametrů

Jak je uvedeno v diskuzi, řada otázek vznikla na základě přístupu ke schematizaci a následné parametrizaci povodí. Především u prostorové distribuce půdních parametrů se ukázaly problémy vznikající z celistvého (lumped) pojetí prostorové diskretizace. Nabízí se tedy možnost využít jednak distribuovaného nebo semi-distribuovaného modelu a také v rámci modelu HEC-HMS testování metod, které patří z hlediska rozmístění parametrů k distribuovaným. Konkrétně jde o metody *ModClark* (modifikovaná metoda Clarkova jednotkového hydrogramu pro výpočet přímého odtoku) a sněhového modelu *Gridded Temperature Index*. S těmito metodami je možné využít i distribuovaného vstupu dalších parametrů (například CN křivek).

Kalibrace modelů pomocí sad parametrů

Jak plyne z výsledků práce a jak také uvádí četná literatura, je velmi obtížné (pokud vůbec možné) nakalibrovat takový model, který by byl schopný modelovat různé typy událostí. Rozdíly jsou nejenom mezi modelováním letních a zimních povodní, ale také v různém charakteru příčinných srážek (konvektivní, stratiformní srážky). Proto může být přínosná kalibrace více sad parametrů pro modelování různých událostí.

Vliv vegetace na odtok z povodí

Pro simulace změn odtoku vlivem změn krajinného pokryvu byla v práci použita pouze jedna metoda, která vychází ze zjednodušeného konceptu CN křivek. Tato metoda, ukázala na celou řadu nejistot vycházejících z její aplikace především na malých povodích. Proto je pro potvrzení výsledků nutné využít i další metody, které více vychází z fyzikální podstaty proudění v nenasycené zóně půdního pokryvu.

Modelování vlivu retenčních nádrží na povodně

Kromě modelování vlivu malých vodních nádrží v pramenných oblastech by bylo vhodné se zaměřit také na kvantifikaci kapacity údolní sítě a zvyšování retence údolní nivy (například využití velkých suchých poldrů). Zde se kromě srážko-odtokových modelů a nástrojů GIS a DPZ budou uplatňovat také modely hydrodynamické, které jsou schopny simulovat průchod povodňové vlny údolní nivou.

Metody měření sněhu, modelování odtoku ze sněhové pokrývky

Rozvoj pozemních metod a metod DPZ je pro stanovení charakteristik sněhové pokrývky jedním z důležitých směrů současné operativní hydrologie. Rozvoj modelovacích technik pro výpočet akumulace a tání sněhové pokrývky je nedílnou součástí tohoto výzkumu a na katedře fyzické geografie a geoekologie společně ve spolupráci s ČHMÚ a podniky Povodí existuje velký potenciál pro rozvoj základního i aplikovaného výzkumu této problematiky.

2 ZÁVĚRY

V disertační práci byly aplikovány převážně standardní, prověřené a často používané metody, které v některých případech byly přizpůsobeny konkrétním podmínkám. I přes tento fakt přináší práce množství poznatků. Výsledky práce a její přínos je možné vyjádřit ve třech rovinách:

- Metodická
- Aplikační
- Vzdělávací

Metodická rovina

Z metodického hlediska je přínosem práce s modelem HEC-HMS, konkrétně testování modelovacích technik a metod stanovení některých parametrů. Využití metody SCS CN pro výpočet objemu odtoku ukázalo na řadu problémů s její aplikací a byly potvrzeny omezené možnosti využití této metody. Potvrdil se také současný trend ve využití distribuovaného nebo semi-distribuovaného přístupu k modelování hydrologických procesů. Možnosti uvedených přístupů lze vystihnout v kombinaci s rozvíjejícími se metodami GIS a tedy se zlepšenými možnostmi výpočtu parametrů. V práci se ukázaly například rozsáhlé možnosti mapové algebry při práci s rastrovými podklady v programu ArcGIS. Tu je možné využít nejenom při stanovení půdních parametrů, ale také pro vývoj metodiky stanovení rozložení sněhové pokrývky. V tomto případě bylo v práci využito pouze jednoho kritéria pro stanovení charakteristik sněhu (nadmořské výšky), ale do budoucna se nabízí sestavení komplexnější metodiky se zahrnutím více faktorů majících vliv na ukládání sněhu. Práce také zdůraznila potřebu zlepšení kalibračních postupů ve smyslu odvození více sad parametrů, které by následně byly využívány pro modelování různých typů událostí.

Aplikační rovina

Ačkoliv cílem práce nebyl reálný návrh opatření integrované protipovodňové ochrany, výsledky ukázaly, také díky případovým studiím na konkrétních povodích, na možnosti a limity testovaných opatření. Některé poznatky docílené při modelování vlivu suchých nádrží jsou přímo použitelné pro vytvoření reálného projektu. Příkladem mohou být výsledky testování umístění hrázových struktur pro dosažení nejpříznivějšího odtoku z neřízené nádrže. Jako perspektivní se také jeví pokračování v započatém vývoji metodiky pro stanovení výšky sněhové pokrývky a vodní hodnoty sněhu včetně zahrnutí metod DPZ. Katedra fyzické geografie a geoekologie také zvolila cestu vytváření rozsáhlé pozorovací sítě meteorologických a hydrologických veličin, k čemuž přispěly i projekty, jejichž výsledky jsou součástí této disertační práce. Uvedená pozorovací síť, stejně jako ostatní uvedené příklady mají velký význam pro instituce, které jsou za aplikaci poznatků v praxi přímo odpovědné, především podniky Povodí a ČHMÚ.

Vzdělávací rovina

Poněkud opomíjená rovina z hlediska výzkumu je výuka studentů, nicméně pro univerzitu (byť výzkumného typu) se jedná o jednu z klíčových složek její funkce. V rámci projektů, za pomoci kterých byla zpracována disertační práce, vznikla celá řada bakalářských a diplomových prací. Témata integrované protipovodňové ochrany a výzkumu sněhové pokrývky přispěla ke zkvalitnění výuky formou specializovaných předmětů a formou terénních cvičení.

V úvodu práce byly definovány cíle disertační práce, které byly doplněny související otázkou:

Otázka 1) Mohou maloplošná, přírodě blízká protipovodňová opatření konkurovat tradičnímu pojetí protipovodňové ochrany v České republice?

Odpověď: Výsledky případových studií ukázaly, že opatření integrované protipovodňové ochrany mohou být účinným doplňkem klasických opatření, nemohou je ale v plné míře nahradit. Důvody jsou na jedné straně celkové objemy vody, které mohou oba typy opatření zadržet, a na druhé straně objemy srážek, které spadnou na povodí v případě extrémních povodní. Jiným důvodem je také jistá multifunkčnost technických opatření, které slouží například v energetice nebo jako zásobárna pitné vody. Na opatření je třeba pohlížet v kontextu všech faktorů, které hrají nezastupitelnou úlohu při rozhodování. Kromě vlastní účinnosti opatření se jedná o faktory ekonomické, sociální psychologické a politické.

Otázka 2) Jak velký je vliv testovaných variant a opatření na snížení kulminačního průtoku povodně?

Odpověď: V experimentálních územích, kde byla opatření testována, dosáhl vliv změn krajinného pokryvu nebo suchých poldrů na snížení kulminačního průtoku řádu jednotek až prvních desítek procent v závislosti na konkrétním opatření a extremitě povodně. Je zřejmé, že na jiných povodích nemusí být výsledky podobné a je třeba vnímat spíše relativní rozdíly a tendence než absolutní hodnoty. Simulace ukázaly, že vliv daných opatření je významný, nicméně při návrhu reálných projektů bude vždy nutné posuzovat opatření v kontextu celého povodí a jejich ekonomické účinnosti.

Otázka 3) Jsou použité metodické a analytické postupy vhodné?

Odpověď: Hydrologické modelování je nástrojem, který je možné použít pro kvantifikaci opatření integrované protipovodňové ochrany. Nicméně vždy záleží na použitém přístupu k reprezentaci procesů probíhajících v přírodě a na použitých modelových technikách. Jak plyne z dílčích i ze závěrečné diskuze je použití některých modelovacích technik zatíženo poměrně velkou nejistotou a je otázkou, jestli není vhodnější použití jiných přístupů.

Numerické modelování reakce povodí na extrémní srážky ukázalo na řadu nejistot vycházejících jednak z charakteru vstupních dat a také z použitého modelu HEC-HMS a modelovacích technik. Nejistoty provázející aplikaci metody SCS CN použité k výpočtu objemu odtoku ukázaly na nutnost použití dalších metod, které by simulovaly na základě přesnějšího fyzikálního popisu procesů infiltrace a interflow. Další směr výzkumu by měl směřovat směrem k aplikaci distribuovaného a semi-distribuovaného přístupu k reprezentaci povodí a tedy i k prostorovému určení parametrů.

Uvedené přístupy by mohly v některých ohledech zlepšit interpretaci vstupních parametrů, která by se mimo jiné mohla pozitivně projevit v kalibraci. K tomu mohou pomoci i stále se zlepšující techniky GIS, které umožňují účinnější zpracování prostorových dat.

Při použití srážko-odtokových modelů, které je možné využít pro řešení nejrůznějších hydrologických úkolů, je třeba si stále uvědomovat, že i přes pokračující dynamický vývoj jsou modely (nejen) hydrologických systémů výrazným zjednodušením skutečných procesů probíhajících v přírodě. Na závěr je možné citovat Loague a Freeze (1985), kteří vysvětlují, že *„V mnoha ohledech je hydrologické modelování více umění, než věda a je pravděpodobné, že to tak bude i nadále. Předpovědní hydrologické modelování je za normálních okolností prováděno na konkrétním povodí konkrétním modelem a za dohledu hydrologa. Použitelnost výsledků je z velké části dána talentem a zkušeností hydrologa a jeho porozumění matematickým nuancím použitého modelu a hydrologickým nuancím daného povodí. Je nepravděpodobné, že by někdy výsledky získané na základě zkušeností hydrologa mohly být nahrazeny výsledky získané objektivní analýzou modelovacích metod.“* Ačkoliv hydrologické modelování prošlo od té doby rapidním vývojem, platí uvedené teze i v současné době.

ČÁST D:

SOUHRNY

1 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ADAMEC, M., HANZLOVÁ, M., HORÁK, J., UNUCKA, J., ŽIDEK, D. (2007): Modelování hydrologických extrémů s podporou DPZ a GIS. In Langhammer, J. (Ed.): *Změny v krajině a povodňové riziko*, PŘF UK, Praha, s. 51-62.
- [2] AL-SABHAN, W., MULLIGAN, M., BLACKBURN, G. A (2003): A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW. *Computers, Environment and Urban Systems*, 27, s. 9-32.
- [3] ASSMANN, A. (1999): Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen – mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. *Schriftenreihe des Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg*, Heft 11, 139 s.
- [4] BARTÁK, Z. (1995): *Hydrologické předpovědi v povodí vodního díla Nýrsko*. Práce a studie, issue 26, ČHMÚ, s. 9-26.
- [5] BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H. J. (1996): *Lehrbuch der Hydrologie, Allgemeine Hydrologie – Quantitative Hydrologie*. Svazek. 1, Gebr. Borntraeger, Berlin-Stuttgart, 694 s.
- [6] BEAR, J. (1972): *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier publishing, New York, 764 s.
- [7] BECKER, A., SERBAN, P. (1990): *Hydrological models for water – resources system design and operation*. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Geneva, 80 s.
- [8] BEVEN, K. J. (2001): *Rainfall-Runoff Modelling, The Primer*. John Wiley & Sons, Chichester, 360 s.
- [9] BICANOVÁ, M. (2008): Možnosti využití distančních dat za účelem hodnocení kvality habitatu vodních toků. In Matoušková, M. *Ekohydrologický monitoring vodních toků v kontextu evropské Rámcové směrnice o vodní politice*. PŘF UK, Praha, (v tisku).
- [10] BIČÍK, I. (2009): *LUCC - Databáze dlouhodobých změn využití ploch Česka (1845 – 2000)* [online]. [cit. 2009-05-20], PŘF UK, Praha. <<http://lucc.ic.cz/index.php>>.
- [11] BLAŽKOVÁ Š., KOLÁŘOVÁ S. (1994): *Vliv odlesnění na hydrologický režim v oblasti Jizerských hor*. VÚV T. G. Masaryka, Praha, 76 s.
- [12] BLAŽKOVÁ, Š (1994): Výzkum změn tání sněhové pokrývky v Jizerských horách v důsledku odlesnění, s využitím modelu HBV-ETH. In Blažková, Š., Kolářová, S.: *Vliv odlesnění na hydrologický režim v oblasti Jizerských hor*. VÚ Vodohospodářský, Praha, s. 56-65.
- [13] BLÖSCHL, G., GRAYSON, R. (2002): Flächendetaillierte Niederschlag-Abfluss Modellierung. In: *Wiener Mitteilungen, Band 164 – Niederschlag-Abfluss Modellierung – Simulation und Prognose*, Technische Universität Wien, s. 33-55.

- [14] BLÖSCHL, G., KIRNBAUER, R., JANSÁ, J., PARAJKA, J., MERZ, R., HAAS, P. (2005): Určovanie priestorového rozdelenia snehu v Rakúsku. In Holko, L., Kostka, Z. (Eds): *Proceedings of the 10th annual Slovak Snow Meeting*, Ústav hydrologie SAV, Liptovský Mikuláš, s. 11-13.
- [15] BOUČEK ET AL. (2003): Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002. VÚV T. G. Masaryka, v.v.i, Praha.
- [16] BÖLSCHER, J., SCHULTE, A. (2007): Hydrological modelling of decentralised flood protection measures in transnational headwater areas of the Natzchung catchment / Mittleres Erzgebirge. In *Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation 24-26 September* [CD-ROM]. Remote Sensing Department, University of Trier, Trier; s. 29-32.
- [17] BRUNER, G. W. (2008): *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual*. Davis, U. S. Army Corps of Engineers, 411 s.
- [18] BRŮNA, V. (2003): *Povodí horní Blanice v prostředí GIS. Využití historických mapových podkladů pro sledování změn krajinného pokryvu*. Závěrečná zpráva, UJEP, Ústí nad Labem, 43 s.
- [19] CARROLL, T. (2001): *Airborne Gamma Radiation Snow Survey Program* [online]. [cit. 2008-10-31] NOAA, Chanhassen, <<http://www.nohrsc.noaa.gov/special/tom/gamma50.pdf>>.
- [20] CARROLL, S. S., CRESSIE, N. (1997): Spatial modeling of snow water equivalent using covariances estimated from spatial and geomorphic attributes. *Journal of Hydrology*, Volume 190, Elsevier Science s. 42-59.
- [21] CLARKE, R. T. (1973): *Mathematical models in hydrology*. Irrigation and Drainage paper No. 19, FAO, Rome.
- [22] COLE, S. J., MOORE, R. J. (2008): Hydrological modelling using raingauge- and radar-based estimators of areal rainfall. *Journal of Hydrology*, 358, s. 159-181.
- [23] ČESÁK, J., KOCUM, J., KLIMENT, Z., JENÍČEK, M. (2008A): Monitoring odtokového režimu v pramenných oblastech toků. In Langhammer, J.: *Změny v krajině a povodňové riziko*, Sborník výsledků projektu VaV SM/2/57/05, PřF UK, Praha, s. 80-85.
- [24] ČESÁK, J., ŠOBR, M., JENÍČEK, M., KOCUM, J., NĚMEČKOVÁ, S. (2008B): Geodetická měření pro sestavení hydrologických modelů. In Langhammer, J.: *Změny v krajině a povodňové riziko*, Sborník výsledků projektu VaV SM/2/57/05, PřF UK, Praha, s. 269-274.
- [25] DAÑHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEŽULÁK, J. (2003): *Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR*. ČZÚ, Praha, 214 s.
- [26] DAÑHELKA, J., ŘÍČICOVÁ, P. (2005): Vyhodnocení sněhových zásob a odtoku z tání v březnu roku 2005 v ČR. In *Hydrologické dni 2005*, 21.-23.9.2005, SHMÚ, Bratislava, s. 249-255.
- [27] DAÑHELKA, J. (2005): *Nejistota operativních hydrologických předpovědí*. Disertační práce, PřF UK v Praze, Praha, 217 s.

- [28] DEMEK, J. ET AL. (1965): *Geomorfologie Českých zemí*. Nakladatelství ČSAV, Praha, 333 s.
- [29] DEWALLE, D. R, RANGO, A. (2008): *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, 410 s.
- [30] DOLEŽAL, F. ET AL. (2004): *Bilanční odhady příspěvku odvodňovacích soustav k průběhu povodní*. VÚMOP, Praha.
- [31] DORNINGER, M., SCHNEIDER, S., STEINACKER, R. (2008): On the interpolation of precipitation data over complex terrain. *Meteorological and Atmospheric Physics*, 101, s. 175–189.
- [32] DOSTÁL. P., LANGHAMMER, J. (EDS.) (2007): *Modelling natural environment and society*. P3K, Praha, 283 s.
- [33] DRBAL, K., DUMBROVSKÝ, M., GOLÍK, P., STARÝ, M., ŠVANCARA, J. (2007): Koncepce řešení ochrany před povodněmi v povodí horní Opavy. In Jakubíková, A., Broža, V., Szolgay, J. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 13. 11. 2007. Praha a Bratislava, s. 117-128.
- [34] DUMBROVSKÝ, M., KORSUŇ, S., BILÍK, M., SALA, A., MUCHOVÁ, Z. (2006): Optimalizace návrhu integrované celoplošné ochrany říčního povodí. In Jakubíková, A., Broža, V. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 15. 11. 2006. ČVÚT, Praha, s. 107-117.
- [35] DYCK, S., PESCHKE, G. (1983): *Grundlagen der Hydrologie*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 388 s.
- [36] ESSERY, R. (2003): Aggregated and distributed modelling of snow cover for a high-latitude basin. *Global and Planetary Change*, 38, Elsevier Science, s. 115-120.
- [37] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2009): *Corine land cover – data download* [online]. [cit. 2009-05-20], European Environment Agency, Copenhagen.
<<http://www.eea.europa.eu/themes/landuse/clc-download>>.
- [38] FEDERER, C. A., PIERCE, R. S., HORNBECK, J. W. (1972): Snow management seems unlikely. In *Proceedings Symposium on Watersheds in Transition*, American Water Resources Association, s. 212-219.
- [39] FELDMAN A.D. (ED.) (2000): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*. USACE, Davis, 155 s.
- [40] FERDA, J., HLADNÝ, J., BUBENÍČKOVÁ, L., PEŠEK, J. (1971): *Odtokový režim a chemismus vod v povodí Horní Otavy se zaměřením na výskyt rašelinišť*. Sborník prací HMÚ, sv. 17, HMÚ, Praha, s. 22-126.
- [41] FERNÁNDEZ, A. (1998): An energy balance model of seasonal snow evolution. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 23, Elsevier Science, s. 661-666.
- [42] FIEDLER-MÁGR: *Fiedler-Mágr, elektronika pro ekologii* [on-line]. c2009, poslední revize 24. 5. 2009 [cit. 2009-05-24]. < <http://www.fiedler-magr.cz/>>.

- [43] FINNERTY, B. D., SMITH, M. B., SEO, D. J., KOREN, V., MOGLEN, G. E. (1997): Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs. *Journal of Hydrology*, 203, s. 21-38.
- [44] FLEMING, G. (1979): Deterministic models in hydrology. *Irrigation and Drainage paper*, 32, FAO, Rome, 80 s.
- [45] FOHRER N., HAVERKAMP, S., ECKHARDT, K., FREDE, H. G. (2001): Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26, s. 577-582.
- [46] FOHRER, N., MÖLLER, D., STEINER, N. (2002): An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, s. 655-662.
- [47] FORD, D., PINGEL, N., DE VRIES, J. J. (2008): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Application Guide*. USACE, Davis, 116 s.
- [48] GAN, T. Y. (1998): Hydroclimatic trends and possible climatic warming in the Canadian Prairies. *Water Resources Research*, 34 (11), s. 3009-3015.
- [49] GIDDA, C., WHITELEY, H., RUBINSTEIN, I., DONY, R. (2002): Comparison of satellite-based data with modeled snow-water equivalent for open and forested areas. In *Proceedings of 59th Eastern Snow Conference*. Stowe, Vermont USA, s. 45-54.
- [50] HAIS, M., JONÁŠOVÁ, M., LANGHAMMER, J. KUČERA, T. (2009): Comparison of two types of forest disturbance using multitemporal Landsat TM/ETM+ imagery and field vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 113, s. 835-845.
- [51] HANČAROVÁ, E. (2006): Využití výsledků měření sněhové pokrývky pro modelování předpovědí průtoků. In *Proceedings of the 11th annual Snow Meeting*. Czech Hydrometeorological Institute, Jablonec nad Nisou, s. 52-58.
- [52] HAVLÍK, A. (2003): Transformace povodňových vln ze srpna 2002 na Berounce a Blanici. Revital, Praha, 33 s.
- [53] HLAVČOVÁ, K., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S. HORVÁT, O. (2009): The limitations of assessing impacts of land use changes on runoff with a distributed hydrological model: case study of the Hron River. *Biologia*, 64 (3), s. 589-593.
- [54] HOCK, R. (1999): A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*, 45 (149), s. 101-109.
- [55] HOCK, R. (2003): Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of Hydrology*, 282, s. 104-115.
- [56] HOLKO L., KOSTKA Z. (2007): Aktivita Ústavu hydrológie SAV v oblasti hydrológie snehu od snehárskeho stretnutia v roku 2006. In Hríbik, M., Holko, L., Škvarenina, J.: 12. *Stretnutie snehárov*. TU Zvolen, Zvolen, s. 62-67.
- [57] HORÁČEK, S., KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O. (2008): Estimation of climate change impact on water resources by using BILAN water balance model. In Brilly, M and Šraj, M. (Eds.):

- XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management* [CD-ROM]. 2.-4. June 2008, Slovenian National Committee for the IHP UNESCO, Ljubljana, s. 1-8.
- [58] HRUŠKOVÁ, K. (2006): *Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu*. Disertační práce, Masarykova Univerzita, 106 s.
- [59] HWANG, Y., CLARK, M., RAJAGOPALAN, B., GANGOPADHYAY, S., HAY, L. E (2004): *Inter-comparison of spatial estimation schemes for precipitation and temperature* [online]. [cit. 2009-06-19] <<http://civil.colorado.edu/~balajir/my-papers/Yhwang-WRRJul04.pdf>>
- [60] CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W. (1988): *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- [61] IPCC (2007): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* [online]. [cit. 2009-06-20]. <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg2.htm>>.
- [62] JAMITZKY, T. (2006): *Hochwasser im Erzgebirge – Dimensionierung dezentraler Rückhaltemaßnahmen*. Diplomová práce, Freie Universität Berlin, 83 s.
- [63] JANEČEK, M. ET AL.(2002): *Ochrana zemědělské půdy před erozí*. Praha, ISV, 201 s.
- [64] JENÍČEK, M. (2005): *Aplikace matematického modelu NASIM pro simulaci srážko-odtokových poměrů v povodí Černé vody*. Diplomová práce na PřF UK, Praha. 104 s.
- [65] JENÍČEK, M. (2006): Rainfall-runoff modelling in small and middle-large catchments – an overview. *Geografie - Sborník ČGS*, 111 (3), s. 305-313.
- [66] JENÍČEK M., NĚMEČKOVÁ, S. (2007): Využití GIS v hydrologických a hydrodynamických modelech. In Jakubíková, A., Broža, V., Szolgay, J. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 13. 11. 2007. Praha a Bratislava, s. 89-98.
- [67] JENÍČEK, M. (2007A): Modelování srážko-odtokových procesů na malých a středně velkých povodích. In Langhammer, J. (ed.): *Povodně a změny v krajině*, PřF UK v Praze a MŽP ČR, Praha. s. 101-109.
- [68] JENÍČEK, M. (2007B): Effects of land cover on runoff process using SCS CN method in the upper Chomutovka catchment. In *Proceedings of the 1st Scientific Conference on Integrated catchment management for hazard mitigation 24-26 September* [CD-ROM]. Remote Sensing Department, University of Trier, Trier, s. 42-46.
- [69] JENÍČEK, M. (2008A): Modelling the effect of small reservoirs on flood regime in the Chomutovka river basin. In Brilly, M and Šraj, M. (Eds.): *XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management* [CD-ROM]. 2.-4. June 2008, Slovenian National Committee for the IHP UNESCO, Ljubljana, s. 1-7.

- [70] JENÍČEK, M. (2008B): *Modelování vlivu krajinných změn na průběh extrémních povodní*. In Langhammer, J. (Ed): *Změny v krajině a povodňové riziko*, PřF UK, Praha, s. 135-147. <<http://hydro.natur.cuni.cz/floodweb/download.php?akce=vysledky&cislo=9>>.
- [71] JENÍČEK, M., KOCUM, J., JELÍNEK, J. (2008): Monitoring sněhové pokrývky v povodí Rokytky v letech 2007 a 2008. In Broža, V., Szolgay, J., Fošumpaur, P. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 4. 11. 2008, ČVÚT, Praha, s. 227-236.
- [72] JENÍČEK, M. (2009A): Runoff changes in areas differing in land-use in the Blanice River basin – application of the deterministic model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 57 (2), v tisku.
- [73] JENÍČEK, M. (2009B): Der Einfluss des dezentralen Hochwasserschutzes auf das Abflussregime der oberen Chomutovka. In Schulte, A., Roch, I., Janský, B. (Eds): *Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes im Mittleren Erzgebirge*, Berliner Geographische Abhandlungen, Berlin (v tisku).
- [74] KABAT, P., HUTJES, R. W. A., FEDDES, R. A. (1997): The scaling characteristic of soil parameters: From plot scale heterogeneity to subgrid parametrization. *Journal of Hydrology*, 190, s. 363-396.
- [75] KAŠPÁREK, L. (ED.) (2006): *Vyhodnocení jarní povodně 2006 na území ČR* [online]. [cit. 2009-06-01], VÚV T. G. Masaryka, Praha <<http://www.chmi.cz/hydro/pov06/>>.
- [76] KHAKBAZ, B., IMAM, B., HSU, K., SOROOSHIAN, S. (2009): From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models [online]. *Journal of Hydrology*, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.021, [cit. 2009-06-02] Dostupné z: <www.sciencedirect.com>.
- [77] KLIMENT Z., MATOUŠKOVÁ M. (2006): Changes of runoff regime according to human impact on the landscape. *Geografie-Sborník ČGS*, 111, 3, s. 60-72.
- [78] KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M. (2008): Long-term trends of rainfall and runoff regime in upper Otava river basin. *Soil and Water Research*, 3, 3, s. 155-167.
- [79] KLÖCKING, B., HABERLANDT, U. (2002): Impact of land use changes on water dynamics – a case study in temperate meso and macroscale river basins. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, s. 619-629.
- [80] KOCUM, J., JANSKÝ, B. (2008): Hydrologický režim v pramenných oblastech vodních toků. In Langhammer, J.: *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*, PřF UK, Praha, s. 85-97.
- [81] KOCUM, J., JANSKÝ, B. (2009): Retence vody v pramenných oblastech Vydry a Křemelné – případová studie povodí Rokytky. In Černý, D., Dvořák, L. (Eds.): *Weitfällerské slatě. Sborník referátů ze semináře*. Správa NP a CHKO Šumava, Vimperk, s. 26-48.

- [82] KOKKONEN, T., KOIVUSALO, H., KARVONEN, T. (2001): A semi-distributed approach to rainfall-runoff modelling – a case study in a snow affected catchment. *Environmental Modelling & Software*, 16, s. 481-493
- [83] KOREN, V. I., FINNERTY, B. D., SCHAAKE, J. C., SMITH, M. B., SEO, D.-J., DUAN, Q.-Y. (1999): Scale dependencies of hydrologic models to spatial variability of precipitation. *Journal of Hydrology*, 217, s. 285-302.
- [84] KOSKINEN, J. (2001): Snow Monitoring Using Microwave Radar, Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology Laboratory of Space Technology, Report 44
- [85] KRAUS, J. (2007): Geostatistika jako prostorové modelování statistických jevů. *Statistika*, 6, s. 490-502.
- [86] KRZYSZTOFOWICZ, R., MARANZANO, C. J. (2004): Hydrologic uncertainty processor for probabilistic stage transition forecasting. *Journal of Hydrology*, 293, s. 57-73.
- [87] KŘÍŽEK, M., ENGEL, T. (2008): Vývoj povodňových akumulací na Volyňce od roku 2002. In Langhammer, J.: *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*, PřF UK, Praha, s. 222-228.
- [88] KŘÍŽEK, M., ENGEL, Z. (2004): Geomorfologické projevy povodně 2002 v povodí Otavy. In Langhammer, J. *Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní*, Sborník příspěvků semináře grantu GAČR 205/Z052/03 pořádaného v Praze 12. 2. 2004, PřF UK, Praha, s. 86-103.
- [89] KULASOVÁ, B., ŠERCL P., BOHÁČ M. (2004): *Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“*. Závěrečná zpráva. Praha, ČHMÚ.
- [90] KULHAVÝ, Z., KOVÁŘ, P. (2002): *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. VÚMOP, Praha, 123 s.
- [91] KUUSISTO, E. (1980): On the values and variability of degree-day melting factor in Finland. *Nordic Hydrology*, 11, s. 235-242.
- [92] LANGHAMMER, J., VAJSKEBR, V. (2006): Historical Shortening of River Network in the Otava River Basin. *Acta Universitatis Carolinae - Geographica*, 38, 2, s. 109-124.
- [93] LANGHAMMER, J. (2007A): Identification of critical elements in river network in regard to the flood risk. *Acta Universitatis Carolinae – Geographica*, 41, 1-2, s. 151-168.
- [94] LANGHAMMER, J. (ED.) (2007B): *Povodně a změny v krajině*, PřF UK v Praze a MŽP ČR, Praha, 396 s.
- [95] LANGHAMMER, J. (2008A): Identification of Floodplain Elements suitable for use in integrated flood protection using hydromorphological mapping. *Moravian Geographical Reports*, 16, 2, s. 36-46.

- [96] LANGHAMMER, J. (ED.) (2008B): *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*, PřF UK, Praha, 278 s.
- [97] LANGHAMMER, J., SITAŘ, J. (2008): Modelling the impact of anthropogenic modifications to river channels on the course of extreme floods. Case study: August 2002 flood, Blanice River basin, Czechia. *Geografie – Sborník České geografické společnosti*, 113, s. 27-37.
- [98] LANGHAMMER, J. VILÍMEK, V. (2008): Landscape changes as a factor affecting the course and consequences of extreme floods in the Otava river basin, Czech Republic. *Environmental monitoring and assessment*, 144, s. 53-66.
- [99] LANGHAMMER, J. ET AL. (2008A): *Změny v krajině a povodňové riziko*, Sborník výsledků projektu VaV SM/2/57/05, PřF UK, Praha, 283 s.
- [100] LANGHAMMER, J., ŠOBR, M., VANĚK, T. (2008B): Současné přístupy k řešení protipovodňové ochrany na příkladu povodí horní Opavy. In Langhammer, J.: *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*, PřF UK, Praha, s. 52-70.
- [101] LEDVINKA, O. (2008): *Trendy srážkoodtokového režimu v povodí Rolavy*. Diplomová práce, PřF UK v Praze, 122 s.
- [102] LIU, Y. (2009): Automatic calibration of a rainfall–runoff model using a fast and elitist multi-objective particle swarm algorithm. *Expert Systems with Applications*, 36, 9533-9538.
- [103] LOAGUE, K. M., FREEZE, R. A. (1985): A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. *Water Resources Research*, 21, 2, s. 229-248.
- [104] LOMSKÝ, B., MATERNA, J., PFANZ, H. (2002): *SO₂-pollution and forests decline in the Ore Mountains*. VÚLHM. Jíloviště-Strnady, 340 s.
- [105] MAIDMENT, D. R. (1993): *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- [106] MAIDMENT, D. R. (2002): *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Esri Press, 220 s.
- [107] MANA, V. (ED.) (2007): *Návrh strukturálního řešení protierozních a protipovodňových opatření v povodí horní Opavy*. Souhrnná zpráva, Ekotoxa, Brno.
- [108] MANFREDA, S., MCCABE, M. F., FIORENTINO, M., RODRÍGUEZ-ITURBE, I., WOOD, E. F. (2007): Scaling characteristics of spatial patterns of soil moisture from distributed modelling. *Advances in Water Resources*, Vol. 30, Issue 10, s. 2145-2150.
- [109] MARTINEC, J. (1960): The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting. In *Proceedings General Assembly of Helsinki*, IASH, publ. 51, s. 468-477.
- [110] MATĚJÍČEK, J., HLADNÝ J. (1999): Co je třeba o povodních vědět předem. In Matějčíček, J., Hladný, J.: *Povodňová katastrofa 20. století na území České republiky*, MŽP, Praha 1999, s. 6-18.
- [111] MELOUN, M. MILITKÝ, J. (2004): *Statistická analýza experimentálních dat*. Academia, Praha, 953 s.

- [112] MOCKUS, V. (1964): Hydrologic Soil-cover Complexes. In: *National Engineering Handbook. Section IV: Hydrology*, USDA, Springfield.
- [113] MOREDA, F., KOREN, V., ZHANG, Z., REED, S., SMITH, M. (2006): Parameterization of distributed hydrological models: learning from the experiences of lumped modeling. *Journal of Hydrology*, 320, s. 218-237.
- [114] MŽP ČR (2008): *Základní informace MŽP o protipovodňové ochraně v oblasti Nových Heřmínov*. MŽP ČR, Praha.
- [115] MŽP ČR (2009A): *Směrnice Evropského parlamentu a rady 2006/60/ES ze dne 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky* [online]. [cit. 2009-03-15]. <[http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/smernice_ramec_spolecenstvi_vodni_politika/\\$FILE/OOV-RS_60_2000-20001222.pdf](http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/smernice_ramec_spolecenstvi_vodni_politika/$FILE/OOV-RS_60_2000-20001222.pdf)>
- [116] MŽP ČR (2009B): *Směrnice Evropského parlamentu a rady 2007/60/ES ze dne 23. října 2007 o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik* [online]. [cit. 2009-03-15]. <[http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/smernice_2007_60_es/\\$FILE/OOV-2007_60_ES-20071106.pdf](http://www.env.cz/C1257458002F0DC7/cz/smernice_2007_60_es/$FILE/OOV-2007_60_ES-20071106.pdf)>.
- [117] NĚMEC, L. (2006): Vodní hodnota sněhové pokrývky. In *Proceedings of the 11th annual Snow Meeting*. Czech Hydrometeorological Institute, Jablonec nad Nisou, s. 41-43.
- [118] NINYEROLA, M., PONS, X., ROURE, J.M. (2007): Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. *Theoretical and Applied Climatology*, 89, s. 195-209.
- [119] NOVÁK, P. ET AL. (2003): *Zpracování digitálních map hydropedologických charakteristik půd České republiky*. Závěrečná zpráva a výstup 02 projektu QD 1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“, VÚMOP, Praha, 11 s.
- [120] OBLED, CH. ROSSE, B. (1977): Mathematical models of a melting snowpack at an index plot. *Journal of Hydrology*, Volume 32, Elsevier Science, s. 139-163.
- [121] OBLED, CH., WENDLING, J., BEVEN, K. J. (1994): The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data. *Journal of Hydrology*, 159, s. 305-333.
- [122] O'CONNOR, K. M. (1976): A discrete linear cascade model for hydrology. *Journal of Hydrology*, 29, s. 203-242.
- [123] OHMURA, A. (2001): Physical Basis for the Temperature-Based Melt-Index Method. *Journal of applied meteorology*, vol. 40, 4, pp. 753-761.
- [124] PAYRAUDEAU, S., TOURNOUD, M. G., CERNESSEON, F. (2003): Sensitivity of effective rainfall amount to land use description using GIS tool. Case study of a small mediterranean catchment. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, s. 255-262.

- [125] PÍCHAL, J. (2009): *Změny odtokového režimu v pramenných oblastech toků v Krušných horách*. Bakalářská práce, PřF UK, Praha, 50 s.
- [126] POBŘÍŠLOVÁ, J., KULASOVÁ, A. (2000): Ukládání a tání sněhu v lese a na odlesněných partiích Jizerských hor. *Opera Corcontica*, 37, s. 113-119.
- [127] QUINN, N. W. T., MILLER, N. L., DRACUP, J. A., BREKKE, L., GROBER, L. F. (2001): An integrated modeling system for environmental impact analysis of climate variability and extreme weather events in the San Joaquin Basin, California. *Advances in Environmental Research*, 5, s. 309-317.
- [128] QUINN, T., ZHU, A. X., BURT, J. E. (2005): Effects of detailed soil spatial information on watershed modeling across different model scales. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7, s. 324-338.
- [129] RANGO, A., SHALABY, A. I. (1998): Operational applications of remote sensing in hydrology: success, prospects and problems, *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. 43 (6), s. 947-968.
- [130] RANZI, R. ET AL. (1998): Ten Years of Monitoring Areal Snowpack Using NOAA-AVHRR Radiometry and Ground Measurements in the Southern Alps. In *International Conference on Snow Hydrology – The Integration of Physical, Chemical and Biological systems*. USACE, Washington, 89 s.
- [131] REED, S. M., KOREN, V. I., SMITH, M. B., ZHANG, Z., MOREDA, F., SEO, D.-J. (2004): Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, 298, s. 27-60
- [132] REFSGAARD, J. C., STORM, B. (1996): Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M. B., Refsgaard, J. C.: *Distributed hydrological modelling*. Kluwer, Dordrecht, s. 41-54
- [133] REFSGAARD J. C. (1997): Parameterization, calibration, and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198, s. 69-97.
- [134] RIGGS, G., HALL, D. (2004): Snow Mapping with the MODIS Aqua Instrument, In *61st Eastern Snow Conference*, Maine, USA.
- [135] ROBINSON, M., ET AL. (2003): Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective. *Forest Ecology and Management*, 186, s. 85-97.
- [136] RŮŽIČKOVÁ, M. (2009): *Vliv prostorového rozložení srážek v povodí horní Chomutovky na výsledky simulací v modelu HEC-HMS*. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 131 s.
- [137] ŘEHÁK, P., SVATOŠ, P. (2006): Zhodnocení účinnosti soustavy protipovodňových opatření v povodí Třebovky. In Jakubíková, A., Broža, V. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 15. 11. 2006. ČVÚT, Praha, s. 71-77.
- [138] ŘEZÁČOVÁ, D., PEŠICE, P., SOKOL, Z. (2005): An estimation of the probable maximum precipitation for river basins in the Czech Republic. *Atmospheric Research*, 77, s. 407-421.

- [139] SANGATI, M., BORGA, M., RABUFFETTI, D., BECHINI, R. (2009): Influence of rainfall and soil properties spatial aggregation on extreme flash flood response modelling: An evaluation based on the Sesia river basin, North Western Italy [online]. *Advances in Water Resources*, doi:10.1016/j.advwatres.2008.12.007. [cit. 2009-05-26] Dostupné z: <www.sciencedirect.com>.
- [140] SCHARFFENBERG, W. A., FLEMING, M. J. (2008): *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*. USACE, Davis, 289 s.
- [141] SCHULTE, A., BÖLSCHER, J., WENZEL, R., ROCH, I., JANSKÝ, B. (2007): INTERREG IIIA Projekt DINGHO: dezentraler, integrierter und grenzübergreifender Hochwasserschutz im Mittleren Erzgebirge. *Hochwasserschutz und Katastrophenmanagement*, 6, s. 25-28.
- [142] SCHULTE, A., ROCH, I., JANSKÝ, B. (2009): *Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes im Mittleren Erzgebirge*. Geographische Abhandlungen, Berlin (v tisku).
- [143] SCHUMMAN, A. H., FUNKE, R., SCHULTZ, G. A. (2000): Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 240, s. 45-61.
- [144] SINGH, P., SINGH, V. (2001): *Snow and glacier hydrology*. Kluwer Academic Publisher, London, 742 s.
- [145] SMITH, M. B., GEORGAKAKOS, K. P., LIANG, X. (2004): The distributed model intercomparison project (DMIP). *Journal of Hydrology*, 298, s. 1-3.
- [146] SOLBERG, R., AMLIEN, J., KOREN, H., EIKVIL, L., MALNES, E., STORVOLD, R. (2004): Multi-sensor/Multi-temporal Analysis of ENVISAT Data for Snow Monitoring. In *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium (ESA SP-572)*. 6-10 September 2004, Salzburg, Austria.
- [147] SORTEBERG, H. K., ENGESET, R. V., UDNAES, H. C. (2001): A national network for snow monitoring in Norway: Snow pillow verification using observations and models. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 26, Elsevier Science, s. 723-729.
- [148] STARÝ, M. (2004): *Užití umělých neuronových sítí v aplikované hydrologii*. Zkrácená verze habilitační práce. VÚT, Brno, 40 s.
- [149] STÄHLI, M., JANSOON, P. (1998): Test of two SVAT snow submodels during different winter conditions. *Agriculture and Forest Meteorology*, 92, Elsevier Science, s. 29-41.
- [150] STORVOLD, R., MALNES, E., LARSEN, Y., HØGDA, K. A., HAMRAN, S. E., MÜLLER, K., LANGLEY, K. A. (2006): SAR Repote sensing of Snow Parameters in Norwegian Areas – Current Status and Future Perspective, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 20, No. 13, s. 1751–1759
- [151] STRAUB, T. D., MELCHING, CH. S., KOCHER, K. E. (2000): *Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois*. USGS, Urbana (Illinois), 30 s.

- [152] SUI, D. Z., MAGGIO, R. C. (1999): Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23, s. 33-51.
- [153] SZOLGAY, J., DANÁČOVÁ, M. (2007): K modelovému hodnotení účinnosti poldra a ich sústavy. In Jakubíková, A., Broža, V., Szolgay, J. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 13. 11. 2007. Praha a Bratislava, s. 129-136.
- [154] SZOLGAY, J., PARAJKA, J., KOHNOVÁ, S., HLAVČOVÁ, K. (2009): Comparison of mapping approaches of design annual maximum daily precipitation. *Atmospheric Research*, 92, s. 289-307.
- [155] ŠERCL, P. (2006): Metoda CN křivek - průběžná zpráva za ČHMÚ Praha. In *Rozvoj a testování modelovacího systému pro predikci povodňových odtoků v malých povodích*, Zpráva za rok 2005 projektu VaV 1D/1/5/05, DHI Hydroinform a ČHMÚ Praha, 50 s.
- [156] ŠERCL, P. (2008): Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*, 61, 2, s. 33-43.
- [157] ŠERCL, P. (2009): *Vliv fyzicko-geografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln*. Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu, ČHMÚ, Praha, 88 s.
- [158] ŠKVOR (1975): *Geologie české části Krušných hor a Smrčín*. ÚÚG, Praha, 119 s.
- [159] ŠNEBERGEROVÁ, J., FOŠUMPAUR, P. (2007): Posouzení dopadů klimatické změny na zásobní funkci VH soustavy povodí Odry. In Jakubíková, A., Broža, V., Szolgay, J. (Eds.): *Extrémní hydrologické jevy v povodích*. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 13. 11. 2007. Praha a Bratislava, s. 261-268.
- [160] TAIT, A.B. (1998): Estimation of snow water equivalent using passive microwave radiation data. *Remote Sensing Environments*, 64, Elsevier Science, pp. 286-291.
- [161] TOLASZ, R. ET AL. (2007): *Atlas podnebí Česka*. ČHMÚ a UP v Olomouci, Praha a Olomouc, 255 s.
- [162] UJEP (2009): *Prezentace starých mapových děl z území Čech, Moravy a Slezska* [online]. c2005-2009 [cit. 2009-05-24]. <<http://oldmaps.geolab.cz/>>.
- [163] UNUCKA J., ADAMEC M. (2008): Modeling of the land cover impact on the rainfall-runoff relations in the Olse catchment. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56 (4), s. 257-284.
- [164] USACE (1994): *Flood-Runoff Analysis. Engineer Manual 1110-2-1417* [online]. c1994 [cit. 2009-05-29]. <<http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-2-1417/entire.pdf>>.

- [165] USDA (1986): *Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55* [online]. c1986 [cit. 2009-05-29].
<<http://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=22162.wba>>.
- [166] VERBUNT, M., GURTZ, J., JASPER, K., LANG, H., WARMERDAM, P., ZAPPA, M. (2003): The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *Journal of Hydrology*, 282, Elsevier Science, s. 36-55.
- [167] VGHMÚŘ – VOJENSKÝ GEOGRAFICKÝ A HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚŘAD (2009): *Digitální model území* [online]. [cit. 2009-05-20], Geografická služba Armády ČR, Praha.
<<http://www.geoservice.army.cz/htm/geosl.html>>.
- [168] VLÁDA ČR (2008): *Usnesení vlády České republiky ze dne 21. dubna 2008 č. 444 ke konečné variantě opatření na snížení povodňových rizik v povodí horního toku řeky Opavy s využitím přírodě blízkých povodňových opatření*. Praha.
- [169] VÚV, T. G. M. (2006): *Souhrnná zpráva o vyhodnocení jarní povodně 2006 na území ČR*. VÚV T. G. M. a Český hydrometeorologický ústav. Praha, 160 s.
- [170] VÚV, T. G. M. (2009): *Oddělení GIS - O projektu DIBAVOD* [online]. c2009 [cit. 2009-05-24]. <<http://www.vuv.cz/oddeleni-gis/>>.
- [171] WAINWRIGHT, J., MULLIGAN, M. (EDS.) (2004): *Environmental Modelling*. John Wiley & Sons, Chichester, 408 s.
- [172] WEGNER, H. (1992): *Dezentraler Hochwasserschutz*. Wasser & Boden, 1, s. 6-10.
- [173] WEIGERT, A., SCHMIDT, J. (2005): Water transport under winter conditions. *Catena*, 54, s. 193-208.
- [174] WMO-No. 168 (1983): *Guide to hydrological practices, Volume II – Analysis, Forecasting and other application*. WMO, Geneva.
- [175] ZEŽULÁK, J., KREJČÍ, J. (2001): *Modely odtoku ze sněhu*. Lesnická fakulta ČZU Praha, katedra staveb, Praha.
- [176] ZIMMERMANN, B., ELSSENBEER, H., DE MORAES, J. M., (2006): The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest ecology and management*, 222, s. 29-38.
- [177] ZOUBEK, V. ET AL. (1963): *Vysvětlivky k přehledné geologické mapě ČSSR 1:200 000, list M-33-XIII Karlovy Vary*. Nakl. ČSAV, Praha, 290 s.

2 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Poloha modelových povodí Blanice, Chomutovky a Bystřice v rámci České republiky	12
Obr. 2 Koncept decentralizované integrované protipovodňové ochrany (podle Assmann, 1999)	15
Obr. 3 Klasifikace deterministických modelů (podle Becker a Serban, 1990).....	18
Obr. 4 Typy vazeb mezi GIS a hydrologickými modely (Sui a Maggio, 1999).....	20
Obr. 5 Klimatologická stanice na Hřebečné v Krušných horách (vlevo), ultrazvukový hladinoměr v pramenné oblasti Otavy (vpravo). Foto M. Jeníček, J. Kocum.....	29
Obr. 6 Totální geodetická stanice (vlevo), laserový dálkoměr a sklonoměr LaserAce (vpravo). Foto J. Česák, M. Jeníček	30
Obr. 7 Zpracování digitálního modelu terénu na příkladu povodí Blanice po profil Podedvorský Mlýn	31
Obr. 8 Návrhový hyetogram podle UFA AV ČR, v.v.i. (vlevo) a podle ČHMÚ (vpravo)	32
Obr. 9 Obecná struktura srážko-odtokového modelu (podle Jeníček, 2006)	35
Obr. 10 Ukázka uživatelského prostředí modelu HEC-HMS	36
Obr. 11 Ukázka zjednodušeného příčného profilu pro metodu Muskingum-Cunge (Feldman, 2000)	43
Obr. 12 Obecný postup při kalibraci modelu (podle Feldman, 2000; upraveno)	44
Obr. 13 Mapa povodí Blanice	47
Obr. 14 Mapa povodí horní Chomutovky	48
Obr. 15 Mapa povodí Bystřice	49
Obr. 16 Výřez mapy 2. vojenského mapování (1844) a odpovídající výřez digitalizované mapy (okolí Blanického Mlýna a obce Zbytiny)	53
Obr. 17 Krajinný pokryv v povodí Blanice po VD Husinec v letech 1844, 1954 a 2000 (podkladová data: DIBAVOD, mapy vojenského mapování, DMÚ 25).....	53
Obr. 18 Relativní zastoupení tříd krajinného pokryvu v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn v letech 1844, 1954, 2000	54
Obr. 19 Hodnoty CN v povodí Blanice po VD Husinec pro stav krajinného pokryvu v roce 1844, 1954 a 2000	56
Obr. 20 Nomogram odvození hodnot CN na základě nasycení půdy předchozími srážkami (Janeček et al., 2002).....	57
Obr. 21 Hodinové intenzity srážek s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let podle teoretického návrhového hyetogramu UFA AV ČR použité pro povodí Blanice.....	58
Obr. 22 Schéma povodí Blanice po VD Husinec v modelu HEC-HMS	59
Obr. 23 Rozložení celkového úhrnu srážek na povodí Blanice v období 15. 8. 2005 – 18. 8. 2005 (kalibrační událost, vlevo) a 6. 8. 2002 – 15. 8. 2002 (verifikační událost, vpravo).....	60
Obr. 24 Kalibrace modelu na povodni v srpnu 2005 (vlevo) a verifikace modelu na povodni v srpnu 2002 (vpravo)	61
Obr. 25 Simulované teoretické hydrogramy průtoku v profilu Podedvorský Mlýn v obdobích 1844, 1954 a 2000 při 1-denním úhrnu srážek s průměrnou dobou opakování 10 let (vlevo nahoře), 20 let (vpravo nahoře), 50 let (vlevo dole) a 100 let (vpravo dole).....	62
Obr. 26 Simulace povodně v roce 2002 (6. 8. 2002 – 16. 8. 2002) pro stavy krajinného pokryvu v obdobích 1844, 1954 a 2000	63
Obr. 27 Odtoková výška (v mm) v dílčích povodích Blanice pro dobu opakování srážek 10 let a 100 let	64
Obr. 28 Batymetrické mapy hypotetických suchých nádrží v povodí horní Chomutovky (Zdroj: vlastní měření)	70
Obr. 29 Závislost objemu nádrže na relativní výšce hladiny suchých nádrží v povodí horní Chomutovky	70

Obr. 30	Hodinové intenzity jednodenních srážek s dobami opakování 10, 20, 50 a 100 let v povodí Chomutovky	71
Obr. 31	Schéma povodí Chomutovky v modelu HEC-HMS. Oranžovou barvou je vyznačena část povodí po profil Tišina, na kterém byl sledován účinek retenčních nádrží.	72
Obr. 32	Rozložení celkového úhrnu srážek na povodí Chomutovky v období 27. 9. 2007 – 1. 10. 2007 (kalibrační událost, vlevo) a 11. 8. 2002 – 19. 8. 2002 (verifikační událost, vpravo).....	73
Obr. 33	Kalibrace modelu na povodni v září 2007 (vlevo) a verifikace modelu na povodni v srpnu 2002 (vpravo)	74
Obr. 34	Vliv potenciálních retenčních nádrží na odtokový proces v povodí Chomutovky po profil Tišina při různých N-letostech vstupních srážek – doba opakování 10 (vlevo nahoře), 20 (vpravo nahoře), 50 (vlevo dole) a 100 let (vpravo dole).	75
Obr. 35	Změna kulminace povodně oproti současnému stavu způsobené úhrnem srážek s dobou opakování 100 let při uvažování vyšší kapacity nádrží (varianta B). Údaje se vztahují vždy k části povodí, které je uzavřeno vyznačeným profilem.	76
Obr. 36	Maximální dosažená výška hladiny v nádržích při různých extremitách. Zobrazena je varianta „B“ – maximální výška hráze 5 metrů, bezpečnostní přeliv ve výšce 4,5 m.	77
Obr. 37	Vliv potenciálních suchých nádrží na snížení kulminace povodni v srpnu 2002 a září 2007	77
Obr. 38	Výška sněhové pokrývky a vodní hodnota sněhu (SWE) v povodí Bystřice po profil Ostrov dne 25. 3. 2006...83	83
Obr. 39	Krajinný pokryv v povodí Bystřice pro současné a hypotetické stavy pokrytí (EEA, 2009, upraveno)	84
Obr. 40	Závislost teploty vzduchu (levý graf) a úhrnu srážek (pravý graf) na nadmořské výšce v období 1. 11. 2005 – 7. 4. 2006	85
Obr. 41	Schematická mapa rozmístění srážkoměrných, klimatologických a limnigrafických stanic v povodí Bystřice ..86	86
Obr. 42	Schéma povodí Bystřice po závěrový profil Ostrov v modelu HEC-HMS.....	87
Obr. 43	Úhrn srážek a průměrná teplota vzduchu v povodí Bystřice od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006.....	88
Obr. 44	Kontinuální simulace průtoku od 1. 11. 2005 do 7. 4. 2006	89
Obr. 45	Pozorovaná a modelovaná vodní hodnota sněhu v povodí Bystřice dne 25. 3. 2006	90
Obr. 46	Průběh vodní hodnoty sněhu (SWE) na vybraných dílčích povodích.....	90
Obr. 47	Úhrn srážek a průměrná teplota vzduchu v povodí Bystřice od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006.....	91
Obr. 48	Simulace průtoku od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006 ve srovnání se skutečným hydrogramem v denním kroku (simulace A) a v hodinovém kroku (simulace B).....	92
Obr. 49	Hydrogramy průtoku od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006 pro skutečné a hypotetické varianty krajinného pokryvu	93
Obr. 50	Vývoj vodní hodnoty sněhu (SWE) od 25. 3. 2006 do 7. 4. 2006 na vybraných dílčích povodích	94

3 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Opatření decentralizované integrované protipovodňové ochrany (upraveno podle Schulte, 2007 a Wegner, 1992).....	15
Tabulka 2	Modelovací techniky v HEC-HMS	37
Tabulka 3	Faktory ovlivňující teplotní index tání DDF (podle DeWalle a Rango, 2008).....	39
Tabulka 4	Vstupní parametry metody teplotního indexu v modelu HEC-HMS	40
Tabulka 5	Vybrané hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro koryto a údolní nivu (Bruner, 2008).....	43
Tabulka 6	Zastoupení tříd krajinného pokryvu v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn v letech 1844, 1954, 2000	54

Tabulka 7 Charakteristiky hydrologických skupin půd (HSP) z hlediska retenční vodní kapacity, infiltrační rychlosti a sklonitosti (upraveno podle Novák, 2003; Šercl, 2006)	55
Tabulka 8 Hodnoty CN v závislosti na vybraném typu krajinného pokryvu a hydrologické skupině půdy. Údaje ve sloupcích A-D označují hodnotu CN pro danou hydrologickou skupinu půdy (Šercl, 2006, upraveno).....	55
Tabulka 9 Přehled kalibrovaných parametrů. Ve sloupci „Koeficient“ je uvedena relativní změna parametru po kalibračním procesu.....	61
Tabulka 10. Vybrané parametry simulovaných událostí	62
Tabulka 11 Výhody a nevýhody metody SCS CN (Feldman, 2000; upraveno)	66
Tabulka 12. Vybrané parametry hypotetických suchých nádrží v povodí horní Chomutovky (Zdroj: vlastní měření)	70
Tabulka 13 Přehled kalibrovaných parametrů. Ve sloupci koeficient je uvedena relativní změna parametru po kalibraci	74
Tabulka 14 Vybrané parametry simulovaných událostí v profilu Tišina	76
Tabulka 15 Krajinný pokryv v povodí Bystřice podle databáze CORINE Landcover (EEA, 2009)	83
Tabulka 16 Hodnoty teplotního faktoru tání DDF použité při simulacích.....	85
Tabulka 17 Přehled kalibrovaných parametrů.....	88
Tabulka 18 Vybrané parametry modelovaných vln	92
Tabulka 19 Vybrané parametry modelovaných vln	93

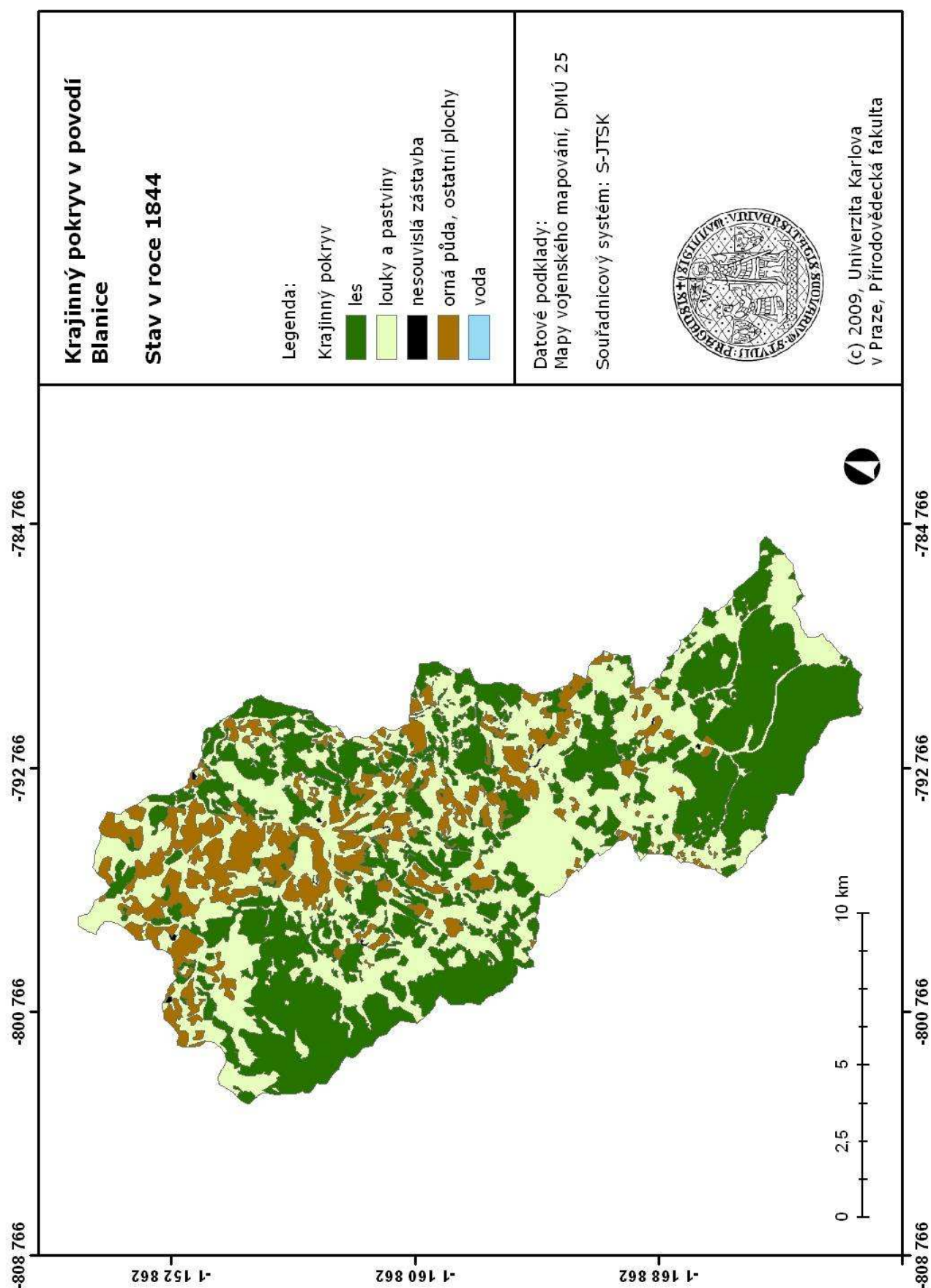
4 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Krajinný pokryv v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn – stav v roce 1844	130
Příloha 2 Krajinný pokryv v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn – stav v roce 1954	131
Příloha 3 Krajinný pokryv v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn – stav v roce 2000	132
Příloha 4 Batymetrická mapa hypotetické nádrže – Nádrž 1	133
Příloha 5 Batymetrická mapa hypotetické nádrže – Nádrž 2	134
Příloha 6 Batymetrická mapa hypotetické nádrže – Nádrž 3	135
Příloha 7 Vybrané parametry modelu HEC-HMS pro povodí Blanice	136
Příloha 8 Vybrané parametry modelu HEC-HMS pro povodí Chomutovky	137
Příloha 9 Vybrané parametry modelu HEC-HMS pro povodí Bystřice	138
Příloha 10 Fotogalerie (foto Michal Jeníček).....	139

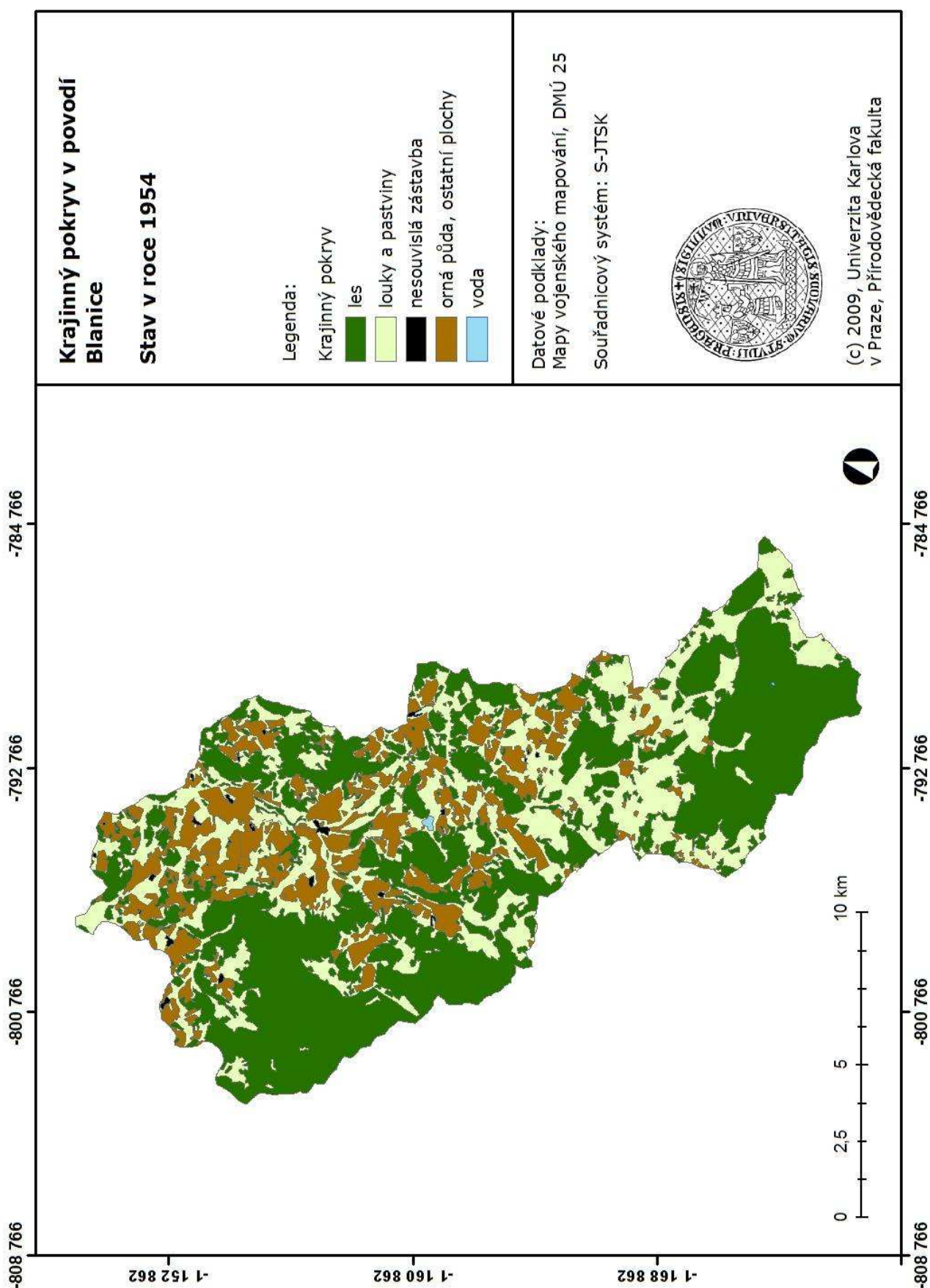
ČÁST E:

PŘÍLOHY

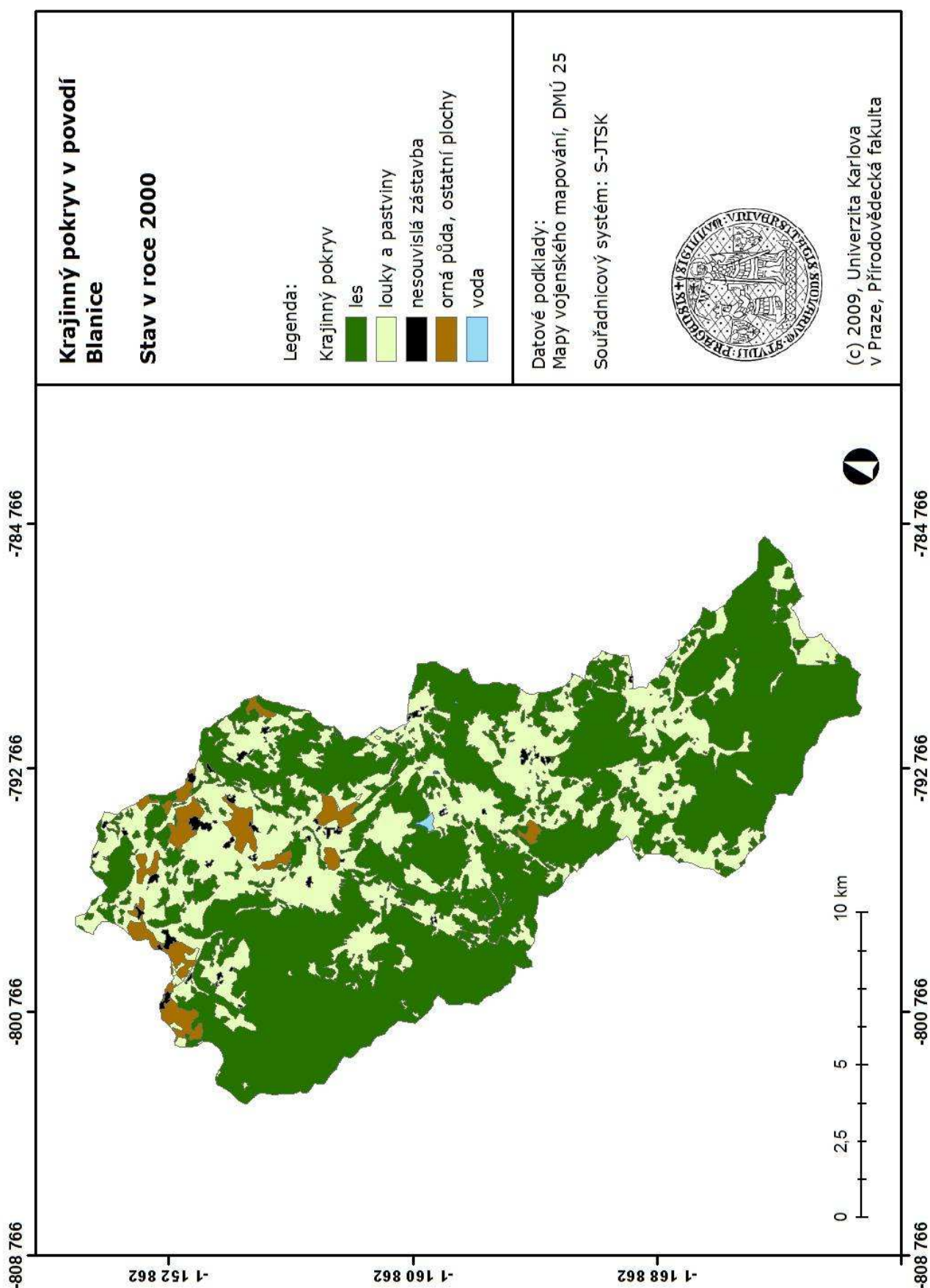
Příloha 1 Krajinový pokryv v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn – stav v roce 1844



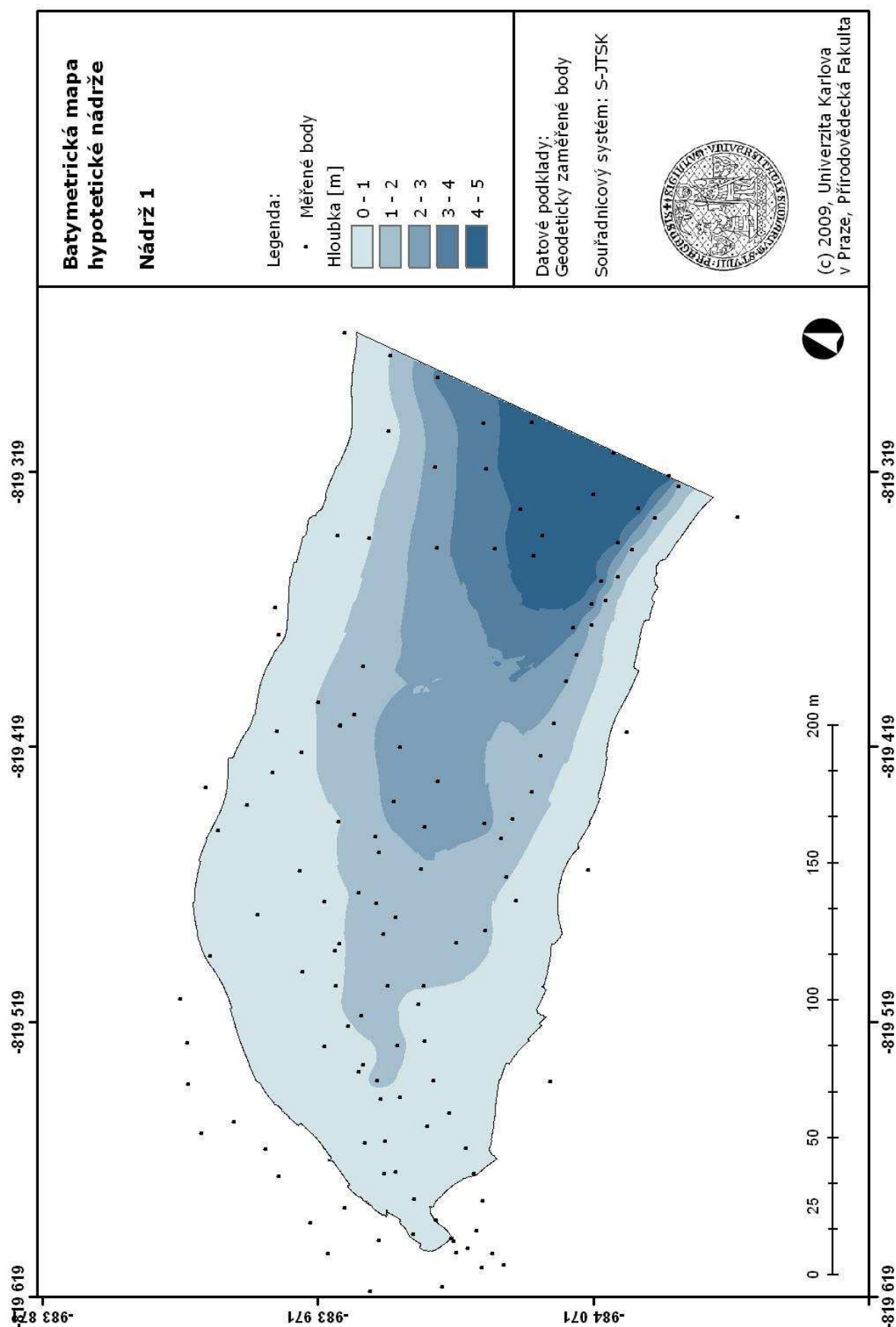
Příloha 2 Krajinový pokryv v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn – stav v roce 1954



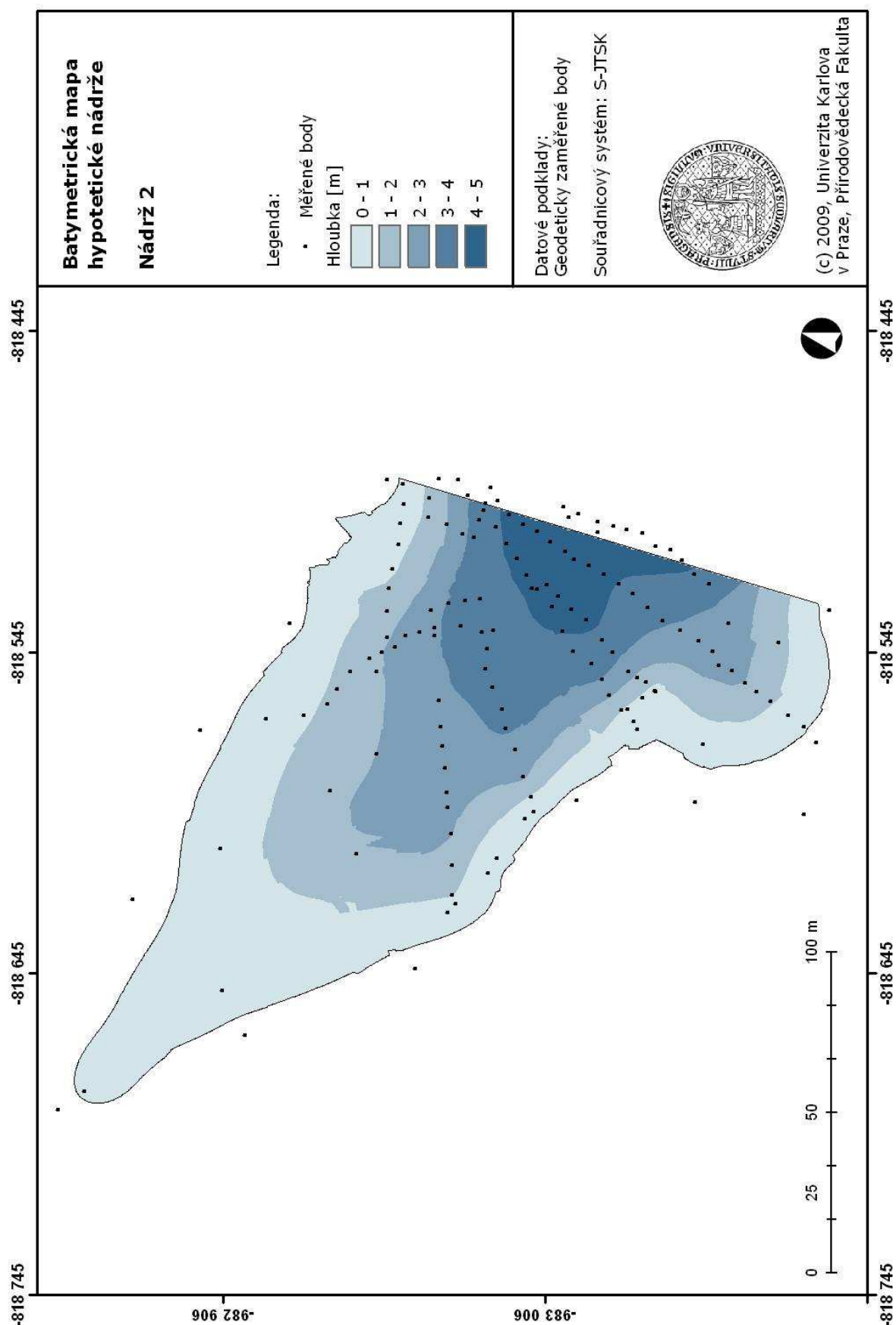
Příloha 3 Krajininný pokryv v povodí Blanice po Podedvorský Mlýn – stav v roce 2000



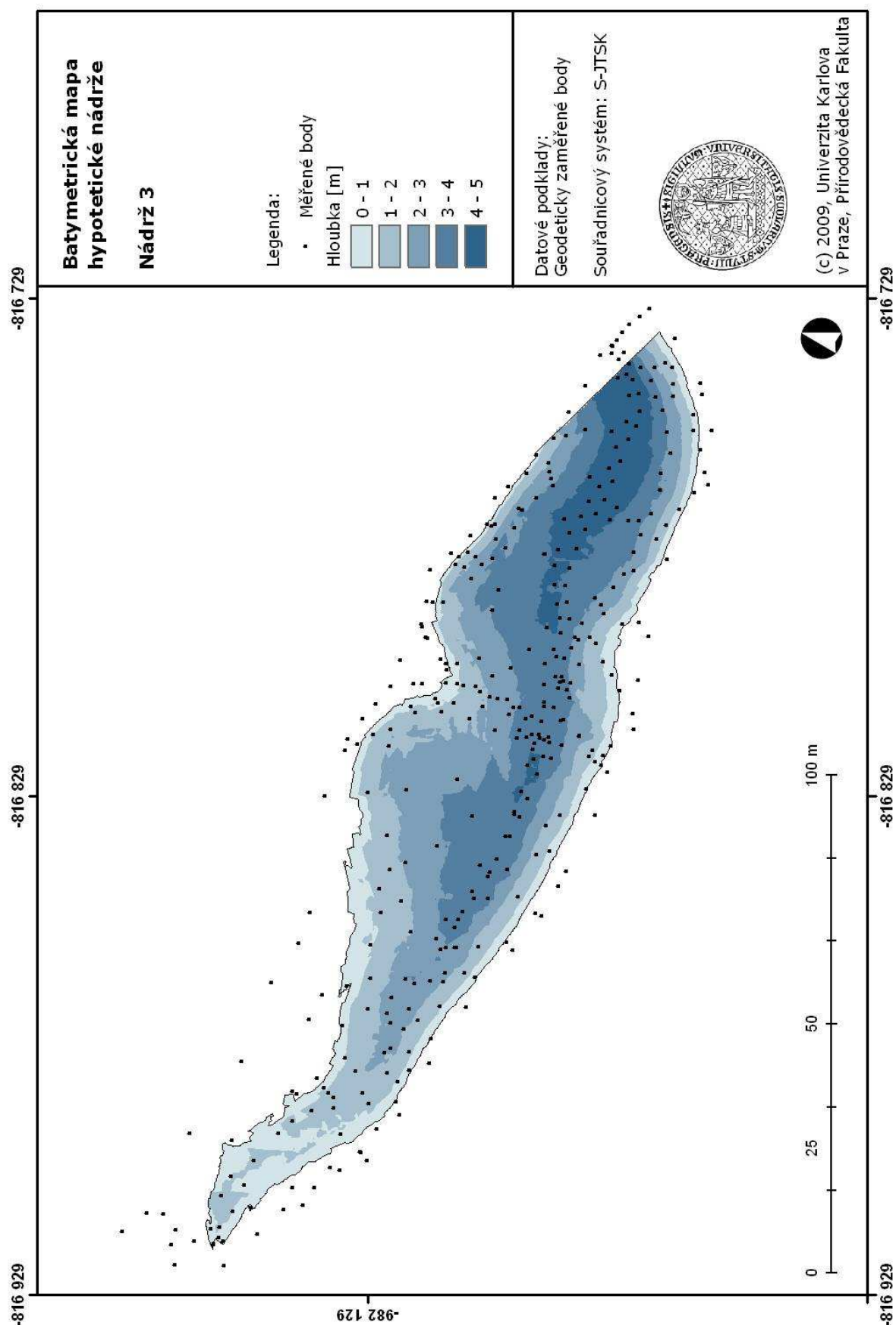
Příloha 4 Batymetrická mapa hypotetické nádrže – Nádrž 1



Příloha 5 Batymetrická mapa hypotetické nádrže – Nádrž 2



Příloha 6 Batymetrická mapa hypotetické nádrže – Nádrž 3



Příloha 7 Vybrané parametry modelu HEC-HMS pro povodí Blanice

Dílčí povodí	Plocha [km ²]	Nadmořská výška [m n. m.]	CN (Runoff-Volume Model)			T _c (Direct-Runoff Model)			Baseflow
			1844	1954	2000	1844	1954	2000	Počáteční průtok [m ³ .s ⁻¹]
Blanice 1	11,508	961,9	58,6	58,4	58,4	16,8	16,9	16,9	0,069
Blanice 10	1,984	586,7	66,9	66,5	65,8	3,3	3,4	3,5	0,043
Blanice 2	2,291	862,8	57,9	57,6	57,4	11,0	11,1	11,1	0,044
Blanice 3	8,616	901,6	62,8	62,7	61,8	9,6	9,6	9,9	0,061
Blanice 4	6,802	826,4	64,4	64,3	63,1	15,4	15,4	16,0	0,056
Blanice 5	9,919	825,1	67,1	66,4	64,5	14,4	14,7	15,6	0,064
Blanice 6	8,220	769,9	66,6	66,5	64,8	13,1	13,1	13,8	0,060
Blanice 7	7,586	705,5	67,8	67,2	65,5	3,5	3,5	3,7	0,058
Blanice 8	1,217	679,6	67,8	68,8	66,7	3,1	3,0	3,2	0,041
Blanice 9	6,090	654,1	67,4	67,8	66,6	3,6	3,5	3,7	0,054
Boubínský p.	13,627	952,6	63,9	63,1	62,8	14,7	15,0	15,2	0,074
Černý p. 1	7,640	935,1	61,5	61,5	61,2	8,8	8,8	8,8	0,058
Černý p. 2	5,717	850,2	64,9	64,6	62,7	14,2	14,3	15,2	0,053
Černý p. 3	5,556	710,8	66,4	67,3	66,5	4,5	4,4	4,5	0,053
Cikánský p. 1	21,837	876,2	66,2	65,0	64,8	17,5	18,1	18,3	0,097
Cikánský p. 2	5,064	668,6	68,7	67,8	66,2	4,0	4,1	4,3	0,051
Farský p.	13,900	792,5	67,3	67,4	65,6	12,9	12,9	13,7	0,075
Křemenný p.	12,747	846,6	65,7	65,3	63,8	8,7	8,8	9,2	0,072
Milešický p.	10,425	912,0	66,2	65,7	64,4	4,4	4,4	4,6	0,066
Puchěřský p.	16,341	933,7	59,2	59,3	58,5	17,2	17,2	17,5	0,082
Tetřívčí p.	6,874	869,2	61,9	61,6	59,1	8,8	8,8	9,5	0,056
Žároveňský p.	15,880	722,2	68,6	68,3	67,4	13,6	13,7	14,1	0,081
Zbytínský p.	9,767	839,9	66,0	66,4	64,5	8,2	8,1	8,6	0,064

Příloha 8 Vybrané parametry modelu HEC-HMS pro povodí Chomutovky

Dílčí povodí	Plocha [km ²]	Nadmořská výška [m n. m.]	Runoff-Volume Model	Direct-Runoff Model		Baseflow
			CN	T _c	R _c	Počáteční průtok [m ³ .s ⁻¹]
Bezejmenný p. 1	1,684	832,9	72,4	1,8	1,2	0,003
Bezejmenný p. 2	0,568	816,1	66,7	1,0	0,8	0,001
Chom2	5,258	699,1	61,3	2,3	1,1	0,010
Chomutovka 1	4,546	868,1	71,0	3,0	3,1	0,009
Chomutovka 2	1,398	831,2	67,0	1,2	2,5	0,003
Chomutovka 3	0,381	826,9	64,9	0,9	0,5	0,001
Chomutovka 4	2,209	801,1	62,2	1,7	0,7	0,004
Kamenička 1	5,363	818,4	63,6	2,1	1,8	0,010
Kamenička 2	7,054	749,3	60,7	6,9	1,4	0,013
Kamenička 3	1,048	601,5	60,3	0,8	0,6	0,002
Křímovský p. 1	10,536	740,1	66,1	5,2	1,5	0,020
Křímovský p. 2	1,118	622,0	62,2	0,6	0,5	0,002
Medvědí p. 1	2,412	815,8	73,7	1,4	0,9	0,005
Medvědí p. 2	1,315	794,1	67,6	1,2	0,6	0,002

Příloha 9 Vybrané parametry modelu HEC-HMS pro povodí Bystřice

Dílčí povodí	Plocha [km ²]	Nadmožská výška [m n. m.]	Runoff- Volume	Direct-Runoff Model		Baseflow	Temperature Index
			CN	T _c	R _c	Počáteční průtok 25.3.2006 [m ³ .s ⁻¹]	SWE 25.3.2006 [mm]
Bílá Bystřice 1	8,562	929,8	63,2	31,5	28,1	0,101	283,6
Bílá Bystřice 2	9,082	895,6	59,7	32,8	27,9	0,107	267,6
Bílá Bystřice 3	1,098	864,6	55,7	11,3	7,4	0,013	248,1
Bystřice 1	9,012	979,0	69,2	24,8	28,4	0,106	303,1
Bystřice 2	7,843	892,5	62,9	26,4	23,2	0,092	265,7
Bystřice 3	5,929	757,5	58,7	16,7	15,2	0,070	169,1
Bystřice 4	4,736	550,3	64,8	16,0	15,4	0,056	34,7
Bystřice 5	1,080	447,3	70,5	15,4	29,0	0,013	0,5
Bystřice 6	7,942	468,5	74,5	21,2	20,7	0,093	7,5
Bystřice 7	0,465	403,2	82,3	9,1	28,9	0,005	0,0
Eliášův p. 1	7,342	947,5	66,5	18,7	19,3	0,086	288,5
Eliášův p. 2	7,046	829,9	62,0	18,5	13,8	0,083	222,5
Eliášův p. 3	5,653	702,9	58,5	19,5	14,4	0,066	136,8
Jáchymovský p. 1	6,359	853,4	68,8	14,3	13,3	0,075	235,2
Jáchymovský p. 2	2,013	716,3	68,3	7,5	6,7	0,024	142,9
Jáchymovský p. 3	6,839	542,8	74,7	19,1	24,1	0,080	33,0
Jesenice	10,061	563,2	69,3	28,9	23,6	0,118	38,0
Rudný p.	9,327	637,6	62,2	24,9	16,3	0,110	86,4
Stísněný p. 1	3,685	891,9	66,3	13,7	13,5	0,043	254,3
Stísněný p. 2	1,171	728,0	66,1	5,4	5,9	0,014	165,1
Suchá	4,901	883,8	67,9	16,7	12,4	0,058	241,0
Veseřice	7,416	963,0	67,6	11,2	12,7	0,087	285,2

Příloha 10 Fotogalerie (foto Michal Jeníček)



Foto 1: Měření sněhové pokrývky v Krušných horách

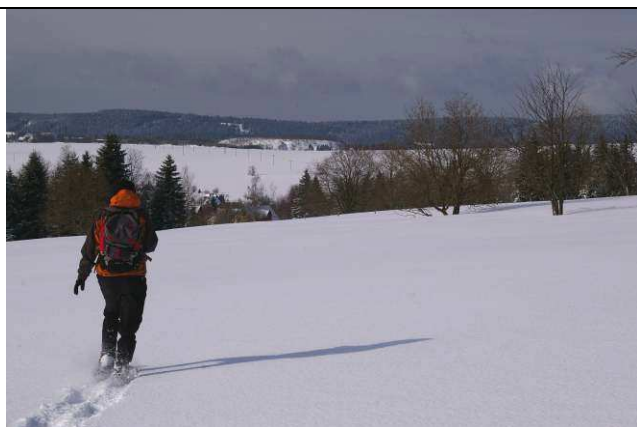


Foto 2: Měření sněhové pokrývky v povodí Bystrice



Foto 3: Klimatická stanice na Hřebečné (povodí Bystrice)



Foto: 4 Bystrice u Abertam



Foto 5: Měření průtoku u hladinoměru na Bystrici



Foto 6: Měření příčných profilů v povodí Blanice



Foto 7: Fluviální jezero na horním toku Blanice



Foto 8: Blanice pod Arnoštovem

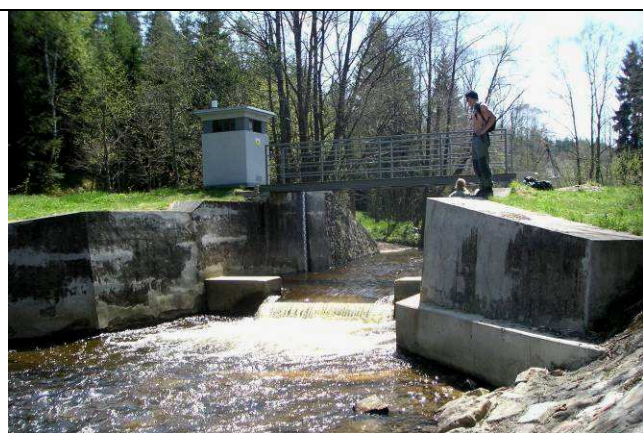


Foto 9: Limnigraf Blanický Mlýn



Foto 10: Klimatická stanice na Hoře Sv. Šebestiána



Foto 11: Pramenná oblast Chomutovky



Foto 12: Chomutovka pod Horou Sv. Šebestiána



Foto 13: Měření průtoků na Chomutovce



Foto 14: Chomutovka při jarním tání



Foto 15: Hladinoměr Tišina na Chomutovce



Foto 16: Sedimentační nádrž na Chomutovce při jarním tání



Foto 17: Hráz nádrže Kamenička z roku 1904



Foto 18: Měření průtoků na limnigrafu III. Mlýn