

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: M4101 Zemědělské inženýrství

Studijní obor: Pozemkové úpravy a převody nemovitostí

Katedra: Katedra krajinného managementu

Vedoucí katedry: prof. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zhodnocení různých protipovodňových opatření v povodí
při extrémních srážko-odtokových situacích

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Žlábek, Ph.D.¹

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Tachecí, Ph.D.²

Autor: Tomáš Pomije

V Týně nad Vltavou, duben 2011

¹ Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Studentská 13, 370 05 České Budějovice

² DHI, a.s., Na Vrších 5, 100 00 Praha 10

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Zemědělská fakulta
Katedra pozemkových úprav
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš POMIJE**
Studijní program: **M4101 Zemědělské inženýrství**
Studijní obor: **Pozemkové úpravy a převody nemovitostí**

Název tématu: **Zhodnocení různých protipovodňových opatření v povodí při extrémních srážko-odtokových situacích.**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je objasnit vliv různých protipovodňových opatření v povodí na odtokové charakteristiky. Řešení bude zaměřeno na extrémní srážko-odtokové situace s cílem posoudit účinnost navrhovaných opatření.

1. Výběr vhodné lokality k řešení v rámci DP.
2. Sběr dat a mapových podkladů.
3. Vytvoření hydrologického modelu řešeného území v systému MIKE SHE.
4. Kalibrace a validace modelu.
5. Simulace navrhovaných opatření v řešeném území. 6. Vyhodnocení získaných poznatků.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- K. Beven - Rainfall-runoff modelling, the primer (2001)
Maidment, D. R. Handbook of hydrology. New York : McGraw-Hill, 1993
Refsgaard, J.C. Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological models. Journal of Hydrology, 198 (1-4), 1997, s. 69-97
Daňhelka, J. Operativní hydrologie: hydrologické modely a nejistota předpovědí. Sborník prací ČHMÚ, Praha, 2007, 104 s.
Daňhelka, J., Krejčí, J., Šálek, M., Šercl, P., Zezulák, J. Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. ČZU Praha, Praha, 2002, 214 s.
Kovář, P. Využití hydrologických modelů pro určování maximálních průtoků na malých povodích. ČZU Praha, Praha, 2000, 136 s.
Závěrečné a periodické zprávy projektů NAZV QC0242, QH3301 a QH82095

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Žlábek
Katedra pozemkových úprav

Datum zadání diplomové práce: 25. března 2009

Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2011


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13 ④
370 05 České Budějovice

L.S.


doc. Ing. Tomáš Kvítek, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 25. března 2009

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Týně nad Vltavou, 12. 4. 2011

.....
Tomáš Pomije

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Pavlu Žlábkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, za cenné rady a připomínky a za poskytnutí podkladů pro mou práci. Mé poděkování také patří Ing. Pavlu Tachecí, Ph.D. ze společnosti DHI a.s. za poskytnutí softwaru Mike SHE a za pomoc při řešení problematik s tímto softwarem spojených.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je objasnění vlivu různých protipovodňových opatření při extrémních srážko-odtokových situacích na řešeném území. Za tímto účelem byl pro území povodí Kopaninského potoka vytvořen hydrologický model v aplikaci Mike SHE. Zároveň byly vypracovány různé scénáře návrhů protipovodňových opatření, které prošly simulací v modelu Mike SHE. Výsledné údaje ze simulací sloužily jako podklad pro hodnocení účinnosti a aplikovatelnosti scénářů pro dané povodí.

Klíčová slova: protipovodňová opatření; hydrologické modelování; Mike SHE

Abstract

The aim of this thesis is to clarify the impact various flood control in extreme rainfall-runoff situations in an interest basin. For this purpose, for the catchment of Kopaninsky river has been set up hydrological model in Mike SHE application. Also have been executed scenarios of different flood control, which passed through the simulation in model Mike SHE. The resulting data from simulations serve as a basis for evaluating the effectiveness and applicability of scenarios for the catchment.

Key words: flood control; hydrologic simulation; Mike SHE

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Literární přehled.....	10
2.1 Voda a krajina	10
2.2 Hydrologie	12
2.2.1 Oběh vody v krajině	12
2.2.2 Hydrologická bilance	14
2.2.3 Odtok vody z povodí.....	16
2.2.3.1 Formy odtoku z povodí.....	17
2.2.3.2 Faktory ovlivňující odtok.....	18
2.2.4 Extrémní srážko-odtokové situace	21
2.2.4.1 Sucha.....	21
2.2.4.2 Povodně	21
2.2.4.3 Protipovodňová opatření.....	22
2.3 Výzkum na malých povodích.....	24
2.4 Hydrologického modelování.....	25
2.4.1 Hydrologické modely.....	25
2.4.2 Klasifikace hydrologických modelů	27
2.4.2.1 Hledisko rozdělení proměnných	27
2.4.2.1.1 Deterministické modely	27
2.4.2.1.2 Stochastické modely.....	29
2.4.2.2 Hledisko linearity.....	30
2.4.2.3 Hledisko prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin	30
2.4.2.4 Hledisko délky časové základny.....	31
2.4.3 Meteorologické a hydrologické vstupy do modelů.....	31
2.4.4 Výběr hydrologického modelu.....	34
3. Materiál.....	36
3.1 Povodí Kopaninského potoka	36
3.1.1 Geografie.....	37
3.1.2 Hydrologie	38
3.1.3 Geomorfologie	38
3.1.4 Geologie	39
3.1.5 Pedologie.....	39
3.1.6 Klimatické poměry.....	41
3.1.6.1 Teplota	42
3.1.6.2 Srážky	42

3.1.6.3	Vítr	43
3.1.7	Využití území	44
3.2	Charakteristika modelu Mike SHE	44
3.2.1	Struktura modelu	45
3.2.2	Nároky na vstupní data	46
3.2.3	Kalibrace modelu	47
4.	Metody	48
4.1	Úprava vstupních dat a nastavení modelu	48
4.2	Kalibrace a validace modelu	55
4.3	Navrhovaná protipovodňová opatření	57
4.3.1	Víceúčelový poldr	57
4.3.2	Zatrávnění území	59
4.3.2.1	Zatrávnění půdy dle infiltrační kapacity	59
4.3.2.2	Zatrávnění půdy dle svažitosti terénu	61
4.3.2.3	Zatrávnění dle infiltrační kapacity a svažitosti terénu	63
5.	Výsledky a diskuze	65
5.1	Kalibrace a validace modelu	65
5.2	Hodnocení vlivu protipovodňových opatření na vybrané situaci	67
5.2.1	Výběr situace	67
5.2.2	Hodnocení opatření	69
5.2.2.1	Zatrávnění půdy dle infiltrační kapacity	69
5.2.2.2	Zatrávnění půdy dle svažitosti terénu	71
5.2.2.3	Zatrávnění dle infiltrační kapacity a svažitosti terénu	73
5.2.2.4	Víceúčelový poldr	75
5.2.3	Optimální návrh protipovodňového opatření	76
5.2.4	Shrnutí vlivu protipovodňových opatření	77
6.	Závěr	81
7.	Seznam použité literatury a zdrojů	82
7.1	Literatura	82
7.2	Ostatní zdroje	90
8.	Seznam obrázků, tabulek a příloh	91
8.1	Seznam obrázků	91
8.2	Seznam tabulek	93
8.3	Seznam příloh	94
9.	Přílohy	95

1. Úvod

Protipovodňová opatření a jejich účinnost je v současné době velmi aktuální téma. V důsledku extrémních povodní z nedávných let a jejich medializací vzrostl zájem společnosti na zmírnění škod, které by v budoucnu mohly povodně opět způsobit. Pro návrh a dimenzování protipovodňových opatření na specifické podmínky jejich umístění lze využít nástroje hydrologického modelování. Tyto nástroje se díky rychlému rozvoji počítačové techniky a informačních technologií dynamicky rozvíjejí, zdokonalují a získávají stále širší využití v hydrologii a vodním hospodářství.

Cílem této diplomové práce je objasnění vlivu a určení účinnosti různých scénářů protipovodňových opatření během extrémních srážko-odtokových situací na zvoleném povodí. Vyhodnocení proběhne na základě výsledků simulací v hydrologickém modelu Mike SHE od dánské společnosti DHI, ve kterém budou veškeré návrhy protipovodňových opatření navrženy a testovány.

Prvním krokem bude volba vhodné lokality, na které bude účinnost protipovodňových opatření hodnocena. Z tohoto území bude nutné získat a zpracovat potřebná data za vybrané časové období vstupující do aplikace Mike SHE, kde bude vytvořen hydrologický model zvolené oblasti. Po nastavení modelu a jeho kalibraci bude model validován. Validací bude potvrzeno správné nastavení celého modelu pro daný časový úsek. Vybraná protipovodňová opatření budou zpracována a vložena do modelu povodí v Mike SHE. Z výsledků simulací navrhovaných opatření v řešeném území bude vyhodnocena jejich účinnost při extrémních srážko-odtokových situacích a opodstatněnost jejich případné realizace.

2. Literární přehled

2.1 Voda a krajina

Krajina není statický prvek, ale dynamický objekt, protože její jednotlivé složky se mění a tyto změny mají vliv ve svých důsledcích na její celkové utváření. Změny v krajině vlivem přírodních nebo socioekonomických impulsů mají vliv i na lidskou společnost a její činnost, a proto při studiu krajiny je nutno nejen tyto změny registrovat a znát, ale předvídat také směr jejich vývoje a důsledky pro socioekonomickou sféru (*HAVRLANT, BUZEK, 1985*).

Existence krajiny je podmíněna větším nebo menším zastoupením všech krajinných složek a voda je nesporně nenahraditelným komponentem v této soustavě vytvářející krajině prostředí. V této soustavě však nemá vedoucí úlohu a sama osobě nemůže vytvořit krajinu (*MEZERA et al., 1979*).

Rozdělení vody na Zemi je značně nerovnoměrné. Jsou oblasti s nadbytkem vody, ale také oblasti, kde je ceněna každá kapka. Koloběh vody, jehož motorem je sluneční soustava, vykazuje sice v jednotlivých klimatických oblastech určitou pravidelnost, ale jsou známy jeho výrazné změny i během historické doby. Oblasti s dostatkem srážek se měnily na pouště a naopak. Ale i tam, kde donedávna byl od přírody dostatek vody, dochází k jejímu nedostatku, protože jí lidstvo potřebuje stále více (*HADAČ, 1982*).

Na povrchu soustředěná voda do koryta je základem říční sítě, která je neodmyslitelným prvkem krajiny humidního rázu. Vodní toky v krajině mohou být přirozené nebo umělé, přičemž v závislosti na srážkovém režimu a charakteru podloží může korytem protékat voda stále nebo sezónně. Pro vývoj krajiny jsou důležité katastrofální vodní stavy, kdy dochází k narušení břehových pásem a dna, mění se průběh koryta a dochází k silnému odnosu rozpuštěných i nerozpuštěných látek z povodí. Pro erozní činnost vodních toků je důležité zastoupení hrubého materiálu na dně koryta, který je posunován, převalován, nebo se pohybuje salutací, kdežto jemnější materiál se pohybuje v suspenzi a jeho erozní účinky jsou prakticky nulové (*HAVRLANT, BUZEK, 1985*).

Stav krajiny bezprostředně souvisí s jejím vodním režimem a ten je obrazem vodního hospodářství. Hustá říční síť s vodními nádržemi a množství rybníčních soustav jsou však působivou součástí krajiny jen v případě, že splňují ještě další nároky na ně kladené. Jakost vody vyplývající z rozsahu ochrany povrchových a

podzemních vod je pro rozvoj vodního prostředí prvořadá. Její význam však stoupá ve spojení s rozmanitostí v morfologii koryt vodních toků, s průtokovými poměry ve vztahu na kapacitu koryt a se související hladinou podzemních vod, s druhy opevnění koryt, se stavem břehových a doprovodných porostů, atd. (*RUNŠTUKOVÁ, 1993*).

Vodní toky a nádrže jsou často ve stavu, který poškozuje krajinu a nepřipouští jejich účelné využívání. Zaplavují a zabahňují příbřežní polohy, zanášejí se splaveninami a zarůstají, mají nerovné dno, břehy a podobně, a proto vyžadují jisté úpravy, které zlepšují jejich hospodářský stav a estetický vzhled (*JŮVA, 1981*).

Cílem úprav drobných vodních toků je především obnova jejich ekologické funkce, obnova přirozených přírodních biotopů, a to přírodě blízkými způsoby. Je však potřeba při přípravě projektů úprav mít na zřeteli, že kromě stále současného upřednostňování ekologické funkce a v návaznosti i funkce biologické je zcela neopominutelnou a i rovnocennou složkou funkce vodohospodářská (*EHRLICH, ONDR, ZÁMIŠOVÁ, 1993*).

Již v roce 1948 byly zahájeny práce na prvním státním vodohospodářském plánu. Tím dala Československá republika příklad dalším státům v péči o systematický dlouhodobý rozvoj vodního hospodářství a tehdejší státní vodohospodářský plán (SVH) se stal vzorem pro obdobné dokumenty v jiných zemích. Po roce 1960 vyvstávala stále naléhavěji potřeba tento materiál revidovat a přepracovat. Druhé vydání tohoto významného dokumentu neneslo již název státní, ale směrný vodohospodářský plán (*MEZERA, 1979*). V 80. letech minulého století se začaly prosazovat úpravy toků blízké přírodním podmínkám. Počátkem 90. let bylo jednoznačně konstatováno, že na velké části území je devastován vodní režim, a to vlivem nevhodného využívání území a nekvalifikovanými zásahy do krajiny. Důsledkem je omezená schopnost krajiny zadržovat vodu. Mezi negativními zásahy byly zařazeny i neuvážené úpravy vodních toků. Schválením Programu revitalizace říčních systémů (PRŘS) v roce 1992, měl být zahájen proces obnovy, stabilizace a péče o vodní režim krajiny finančně podporován státem. Následná implementace legislativy EU do legislativního procesu ČR vede i vodní hospodaření ČR k systémovému přístupu vůči životnímu prostředí.

Opatření ke zlepšení vodního režimu v krajině si vyžadují značné finanční prostředky. Je v zájmu státu, aby na opatření související s vodním hospodářstvím, zakotvená v příslušných akčních plánech, našel dostatek zdrojů ve státním rozpočtu

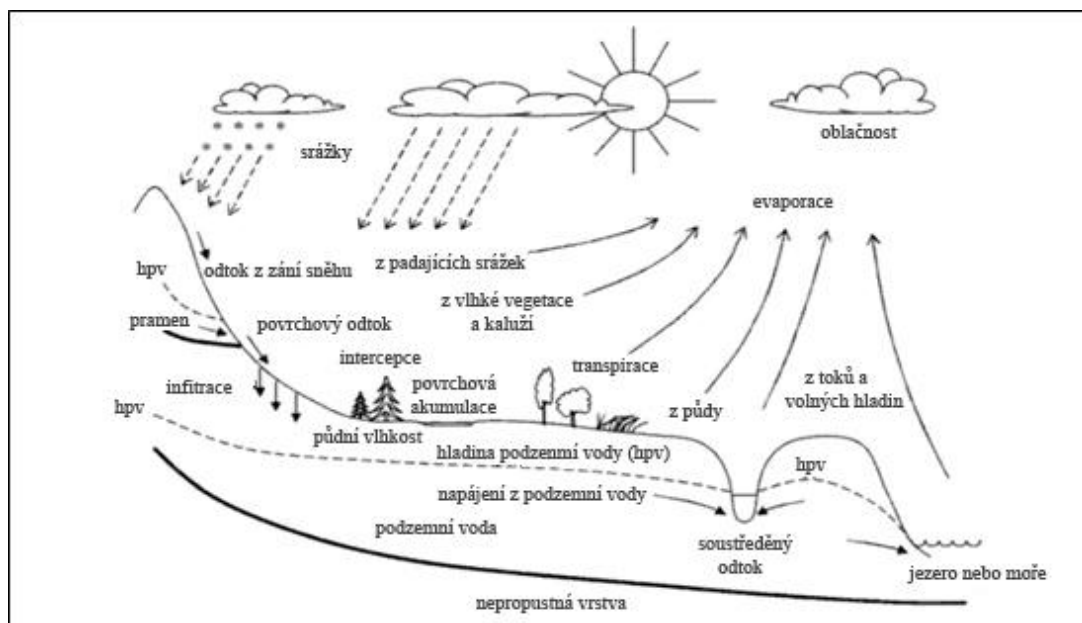
(*RUNŠTUKOVÁ, 1993*), protože voda je jedním z limitujících faktorů života a je třeba hospodařit s ní daleko rozumněji než dosud (*HADAČ, 1982*).

2.2 Hydrologie

Dle *ČSN 75 0101 (2008)* je hydrologie vědní obor zabývající se zákonitostmi časového a prostorového rozdělení a oběhu vody na Zemi, jakož i jejími fyzikálními, chemickými a biologickými vlastnostmi.

2.2.1 Oběh vody v krajině

Pro vodu na Zemi je charakteristický její neustálý oběh, spojený se změnou skupenství. Oběh vody je uzavřený a nazýváme jej hydrologickým cyklem nebo koloběhem. Zdrojem energie potřebné k oběhu vody v přírodě jsou Slunce a Země (*ŠILAR, 1996*). Tento cyklus je znázorněn obrázkem 2-1.



Obrázek 2-1: Hydrologický cyklus

zdroj: (*BRUTSAERT, 2005*) přeloženo do českého jazyka

Hydrologický cyklus představuje procesy a pochody zapojené do cirkulace vody ze zemského povrchu a vodních těles do atmosféry a zpět (*BROOKS, 2003*). Je to nepřetržitý proces, v němž je voda vypařována z oceánů a dále se pohybuje do vnitrozemí jako masa vlhkého vzduchu (*BEDIENT, HUBER, 2002*). Prostřednictvím

kondenzace či desublimace se vodní pára mění do podoby srážek a vrací se zpět přímo do oceánu, nebo zahájí trasu k oceánům prostřednictvím zemského povrchu (SHAW, 1994).

Často se srážky, dříve než dosáhnou povrchu, vypaří nebo se zachytí intercepční na vegetaci a dalších površích, ze kterých mohou být následně evaporovány zpět do atmosféry nebo stečou na zemský povrch (SUBRAMANYA, 2007). Základní rozdělení výparu je na transpiraci a evaporaci. Evaporace je proces, při kterém voda přechází z kapalného stavu do stavu plynného. U transpirace tento proces probíhá skrz metabolismus rostlin. Evaporaci a transpiraci od sebe špatně rozlišujeme, a proto je často spojujeme a souhrnně nazýváme jako evapotranspirace (DEODHAR, 2009). Nutný vstup do evapotranspirace, bez kterého by proces nemohl proběhnout, je tok energie na evaporovaný nebo transpirovaný povrch a proud vzduchu odnášející vodní páry od těchto ploch (BROOKS, 2003).

Voda, která dosáhla povrchu, se nazývá efektivní srážka a může se vypařit v místě dopadu, infiltrovat do půdy nebo může vytvořit povrchový odtok (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1996).

Povrchový odtok má tendenci se lokálně shromažďovat, a to buďto v kalužích nebo v malých depresích jako povrchová akumulace, nebo ve strouhách či příkopech, kde pokračuje jako soustředěný odtok, který nakonec skončí ve větším vodním útvaru, jako je jezero nebo oceán (BRUTSAERT, 2005).

Část infiltrovaných srážek je v půdě vázána kapilárními silami při zemském povrchu a vypařuje se, část je spotřebována rostlinstvem a vrací se zpět do atmosféry transpirací (ŠILAR, 1996). V půdě může dále docházet k perkolaci a k vytváření hypodermického odtoku. Právě tento typ odtoku nejspíše představuje největší složku odtoku při intenzivních srážkových událostech (DAŇHELKA, 2007). Další část přechází do vody podzemní, zvolna se pohybuje a vytváří skrytý příron podzemní vody nebo vyvěrá na povrch v pramenech. Část také proniká do větších hloubek a objevuje se po delší době (REDDY, 2005) často ve značné vzdálenosti např. v pramenech a vrtech.

Mezi evaporací, transpirací, srážkami, povrchovým odtokem, vsakem pod povrch a vývěrem na zemský povrch, které tvoří soubor dějů označovaný obecně jako hydrologický cyklus, se vytváří dynamický rovnovážný vztah, který se označuje jako hydrologická bilance (ŠILAR, 1996).

2.2.2 Hydrologická bilance

Hydrologický cyklus lze kvantitativně popsat hydrologickou bilancí, která je v podstatě rovnicí kontinuity. To znamená, že hydrologická bilance je časová závislost změny zásoby vody v daném prostoru (*HORNBERGER, 1998*), která se nejčastěji stanovuje pro hydrologické povodí a hydrologický rok.

Hydrologické povodí

Hydrologické povodí je ohraničená oblast, ze které všechny vstupní srážky odečou jedním uzávěrovým profilem. Je to důležitá fyziografická jednotka, která rozhoduje o předpokládaném odtoku při průchodu srážkové události přes toto území. Rozloha jednotlivých povodí se může pohybovat od několika hektarů po tisíce čtverečních kilometrů u hlavních povodí (*BEDIENT, HUBER, 2002*).

- Orografické povodí – území tvořené nepropustnými horninami a omezeno rozvodnicí, která probíhá po hřbetech a vyvýšeninách a která odděluje povodí od povodí sousedního.
- Hydrogeologické povodí – v území s propustným povrchem zasahuje skutečné povodí toku za hranice orografického povodí, protože voda ze srážek se dostává do vodního toku i z území ležícího za rozvodnicí a to infiltrací a podzemními vodními cestami (*ŠILAR, 1996*).

Hydrologický rok

Hydrologický rok je kontinuální dvanácti-měsíční období, určené takovým způsobem, že celková změna retence vody v krajině je minimální. Počátek hydrologického roku je převážně závislý na klimatických podmínkách. V některých zemích hydrologický rok začíná počátkem suchého období, v jiných zase počátkem vlhkého či zimního období (*TALLAKSEN, VAN LANEN, 2004*). V České republice a ostatních zemích střední Evropy začíná hydrologický rok 1. listopadu a končí 31. října následujícího kalendářního roku, jehož letopočtem se hydrologický rok označuje (*ŠILAR, 1996*).

Rovnice hydrologické bilance

Hydrologickou bilanci (obrázek 2-2) lze dle *BROOKS (2003)* zjednodušeně vyjádřit jako:

$$I - O = \Delta S$$

kde:

I = inflow (přírůstek vody),

O = outflow (úbytek vody),

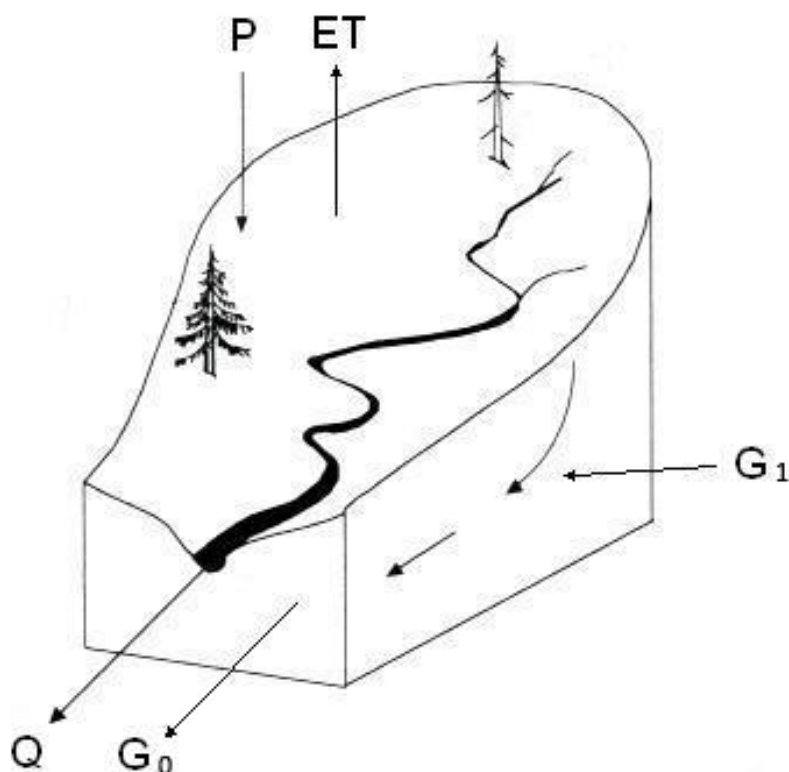
ΔS = změna objemu vody.

Tuto rovnici dále upřesňuje například *ŠILAR (1996)*, když do přírůstku množství vody I ve zkoumaném území zahrnuje:

- srážky P_s ,
- povrchový přítok P_{pv} ,
- podzemní přítok P_{pz} ,
- přírůstek vody přiváděné z jiného území P_{pr} .

A v úbytku vody O ve zkoumaném území zahrnuje:

- evapotranspirace O_{ev} ,
- povrchový odtok O_{pv} ,
- úbytek odčerpávané vody O_{od} , pokud se již nevrací zpět do území.



Obrázek 2-2: Hydrologická bilance povodí

zdroj: (MOLDAN, ČERNÝ, 1994) upraveno dle: (SERRANO, 1997)

P – srážky

G_1 – přítok podzemní vody

ET – evapotranspirace

G_0 – odtok podzemní vody

ΔS – množství vody, které zvýšilo nebo snížilo zásoby povrchové a podzemní vody

2.2.3 Odtok vody z povodí

Odtok vody z povodí je celkové množství vody proteklé uzávěrovým profilem. Měrný (specifický) odtok q je průtok vztážený na jednotku plochy S_p k zájmovému profilu. Specifickým odtokem tedy definujeme množství vody, které v průměru odečte z plošné jednotky povodí (ha, km²) za jednotku času (s, min).

Velikost odtoku lze také charakterizovat průtokem Q . Průtok je množství vody, které protéká za jednotku času příčným profilem toku, měříme jej obvykle v m³/s (KRAVKA, 2009).

$$q = Q/S_p \quad [l/s/km^2]$$

Kde:

q = specifický odtok,

Q = průtok (l/s),

S_p = plocha povodí (km²).

Převedení průtoků na specifický odtok umožňuje lépe porovnat vlastnosti jednotlivých povodí. Specifický odtok v delším období sucha vyjadřuje odtok podzemní vody z povodí, nazývá se též specifickou vydatností podzemní vody (ŠILAR, 1996).

2.2.3.1 Formy odtoku z povodí

O formě odtoku rozhoduje intenzita deště a jeho doba trvání. Odtok vody představuje tu část srážek, která se dostává do povrchových vod. Podle způsobu, jakým se srážková voda do povrchových toků dostává, se celkový odtok rozděluje na několik složek:

- **povrchový odtok** – část vody odtékající po povrchu terénu
 - a) **soustředěný** – probíhá v hydrologické síti;
 - b) **plošný (nesoustředěný)** – probíhá neorganizovaně po celých plochách svahů v podobě ronu, a po dosažení vodního toku, či vytvoření erozních rýh, se mění na soustředěný odtok;

- **podpovrchový odtok**
 - a) **hypodermický** – voda z celkového odtoku, která odtéká pod povrchem terénu, ale není v kontaktu s hladinou podzemní vody; část hypodermického odtoku se dostane do povrchového toku bezprostředně po skončení deště, zbylá část až po určitém čase;
 - b) **podzemní odtok** – část celkového odtoku, která odtéká jako součást podzemní vody.

Podle času, za který se srážková voda dostane do povrchových toků, rozděluje se odtok vody na přímý odtok a na základní odtok (*KRAVKA, 2009*).

- **Přímý odtok** – souhrnné označení pro povrchový a prosakující podpovrchový odtok, který stále nedosáhl hladiny podzemní vody během trvání deště nebo bezprostředně po něm (*CUDLÍN, 1999*).
- **Základní odtok** – představuje složku podzemních vod v celkovém odtoku a po uplynutí určitého času nebo v období bez srážek představuje veškerý povrchový odtok (*ŠTAMBEROVÁ, 1998*).

2.2.3.2 Faktory ovlivňující odtok

Pohyb vody v krajině je ovlivněn zejména těmito charakteristikami:

Půdní a geologické charakteristiky

Půdní a geologické poměry v povodí ovlivňují především infiltrační a retenční schopnosti půdy, a tím rozdělení vody ze srážek na plošný odtok povrchový a plošný odtok podzemní. Nepropustné horniny nebo horniny, z nichž vznikají nepropustné zvětraliny, způsobují rychlý povrchový odtok a v území je pak nedostatek podzemní vody. Vodnost toků v takovém povodí prudce kolísá. Podstatně vyrovnanější jsou průtoky na řekách s povodím propustným (*JANDORA, STARA, STARÝ, 2002*).

Sklon a expozice

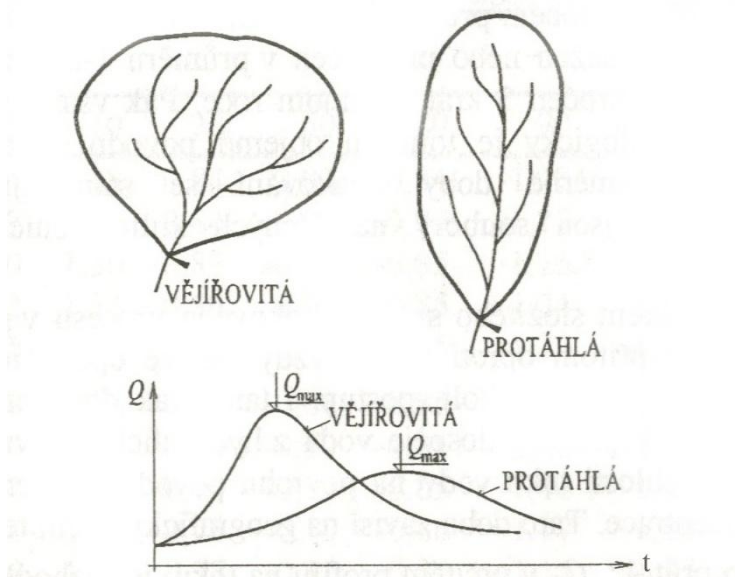
Sklon a expozice ovlivňují ostatní fyzicko-geografické vlastnosti povodí (půda, vegetace) a klimatické charakteristiky. Expozice vůči slunci ovlivňuje především intenzitu evapotranspirace a tání sněhové pokrývky díky intenzivnějšímu přísunu energie na exponované plochy. Expozice a sklon vzhledem ke směru větru ovlivní množství srážek, které dopadají na zemský povrch a podmínky pro akumulaci sněhu (*DAŇHELKA, 2007*). Dále pak s vyšším sklonem terénu povodí se nepříznivě snižuje efektivní retence povodí a nepříznivě zvyšuje maximální specifický odtok z povodí (*PRUDKÝ, SPITZ, 2003*).

Plocha povodí

S rostoucí velikostí plochy povodí obvykle roste hodnota kulminačního průtoku, zároveň je však tvar povodňové vlny výrazně ploší (DAŇHELKA, 2007).

Tvar povodí a uspořádání říční sítě

Vliv tvaru povodí a uspořádání říční sítě se projevuje výrazně za povodní (JANDORA, STARA, STARÝ, 2002), kdy ovlivňují tvar povodňové vlny vzniklé souběhem povodňových vln z jednotlivých částí povodí. Příznivější je stromovité (protáhlé) uspořádání říční sítě (obrázek 2-3), v němž nedochází k interferenci povodňových vln z přítoků. Naopak pro vznik a vývoj povodňových vln s velkým kulminačním průtokem je vhodné zejména vějířovité uspořádání toků povodí. Nepravidelná říční síť se může projevit v charakteristickém tvaru povodňových vln, které mohou mít například více vrcholů (DAŇHELKA, 2007).



Obrázek 2-3: Srovnání vlivu stromovité a vějířovité říční sítě na průběh odtoku

zdroj: (JANDORA, STARA, STARÝ, 2002)

Pokryv zemského povrchu (landuse)

Landuse označuje typ pokryvu zemského povrchu (vegetace, vodní plochy, zemědělské plochy, urbanizovaná území), který determinuje míru intercepce daného území a jeho infiltrační vlastnosti (rychlost infiltrace). Tím je výrazně ovlivněna intenzita rychlé složky odtoku (povrchový odtok). Nejrychlejší odtok nastává u zpevněných ploch, kde se navíc odtokový koeficient blíží 100 %. Pro vznik

rychlého odtoku jsou nepříznivé také zemědělské plochy bez dostatečného zapojení pěstovaných plodin chránících půdní povrch. Vegetační pokryv ovlivňuje rovněž míru evapotranspirace.

V případě zemědělských ploch jsou charakteristiky infiltrace a evapotranspirace výrazně proměnné v průběhu roku v závislosti na fázi vývoje rostlin (*DAŇHELKA, 2007*). Způsob zemědělského obdělávání může také podstatně ovlivnit zadržování vody na povrchu půdy.

Lesní porosty mají nesporný vyrovnávací účinek na rozdělení odtoku, zejména na snížení velkých vod, a poskytují ochranu půdy před vodní erozí. Příznivé účinky jsou však podmíněny správnou skladbou a polohou lesa (*JANDORA, STARA, STARÝ, 2002*).

Klimatické charakteristiky

Z dlouhodobého pohledu ovlivňují především charakter vegetace, ve střednědobém horizontu determinují aktuální nasycení půdy (úhrn předchozích srážek a ztráty evapotranspirací). Pro vlastní odtok jsou však nejdůležitější aktuální srážkové úhrny, zejména jejich množství a intenzita (*DAŇHELKA, 2007*).

Antropogenní vliv

Vodní režim v povodí je značně ovlivněn též lidskou činností a hospodařením v povodí. Člověkem řízené technické zásahy v povodí zaměřené k využívání zdrojů biosféry pro uspokojování potřeb společnosti můžeme rozdělit na příznivé a nepříznivé na vodní režim povodí.

- **Příznivé** – budování nádrží, úprava toků, regulace vodních režimů půd, protipovodňová a protierozní opatření, lesní hospodářství, atd.
- **Nepříznivé** – intenzivní rostlinné a živočišné výroby, intenzivní průmyslové výroby, rozvoj energetické základny, intenzivní povrchové a hlubinné těžby, rozvoj průmyslové a občanské výstavby, kalamitní těžba lesních porostů, atd. (*KRAVKA, 2009*).

2.2.4 Extrémní srážko-odtokové situace

S výskytem extrémních hydrologických odtoků, tj. povodní i sucha, je nezbytné počítat. To se vztahuje i na jejich možný výskyt v katastrofálních rozměrech. Žádné výsledky hydrologického a vodohospodářského výzkumu ani sebestoprověřitelnější opatření ve vodohospodářské praxi jim nemohou zabránit. Schopnost jejich včasného rozpoznání, předpovědi a dostupnost účinných prostředků operativního řízení, resp. přímo řízení v reálném čase, je však naprosto logickým požadavkem a předpokladem jejich úspěšného zvládnutí (*PATERA, 2002*).

2.2.4.1 Sucha

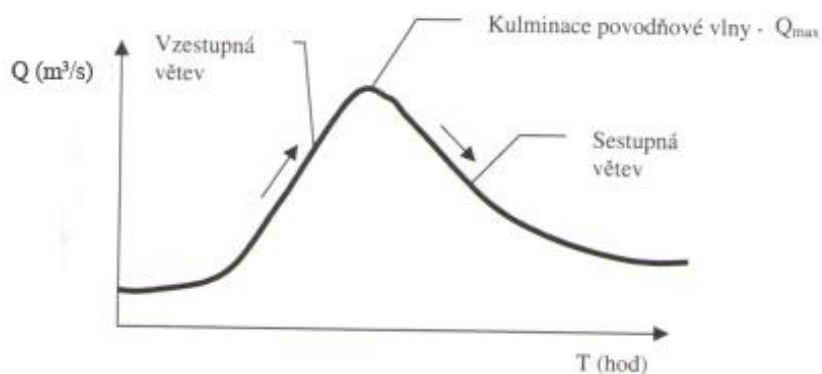
Setrvalé nízké a minimální průtoky (malé vody) v tocích jsou hospodářsky důležité, protože omezují využití vody pro zásobování průmyslu i obyvatelstva, pro účely energetické, závlahy a další. Nejmenší průtoky vznikají v období, kdy na delší dobu přestává povrchový odtok, takže zásoby podzemní vody jsou značně vyčerpány. Na horských tocích je to u nás na konci zimního období, kdy srážky zůstávají ležet v povodí ve formě sněhu, nejčastěji v únoru. Na nížinných tocích se projevují koncem suchého léta nebo na podzim, kdy bývají delší období beze srážek a kdy se menší srážka za poměrně vysokých teplot zcela vypaří (*JANDORA, STARA, STARÝ, 2002*).

2.2.4.2 Povodně

Povodeň je přechodné výrazné zvýšení hladiny toku, způsobené náhlým zvětšením průtoku, nebo dočasným zmenšením průtočnosti koryta (*KRAVKA, 2009*). V našich geografických, klimatických a hydrologických podmínkách je účelné rozeznávat povodně dešťové, sněhové a smíšené.

Povodeň může být popsána příčinnými charakteristikami. Například u dešťových povodní mezi tyto charakteristiky začleňujeme příčinnou srážku, její intenzitu, srážkový úhrn a jeho rozložení v čase, ale také nasycení povodí předchozími srážkami. Povodeň se pak dále charakterizuje podle jejího pozorovaného průběhu kulminačním průtokem, objemem a tvarem povodňové vlny (*PATERA, KAŠPÁREK, 2002*). Povodňovou vlnu definujeme jako fázi odtoku, vyznačující se přechodným zvětšením a následným poklesem průtoků. Graficky se znázorňuje jako hydrogram. V hydrogramu povodňové vlny (obrázek 2-4) je

vyznačen začátek (počáteční průtok), vzestupná větev, kulminace, sestupná větev, konec (návrat k počátečnímu průtoku). Trvání povodňové vlny je doba mezi začátkem a koncem v daném profilu, délka povodňové vlny je vzdálenost mezi začátkem a koncem v trati toku (KRAVKA, 2009).



Obrázek 2-4: Hydrogram povodňové vlny

zdroj: (KRAVKA, 2009)

Povodně se klasifikují podle pravděpodobnosti překročení kulminačních průtoků p , resp. pravděpodobnosti překročení objemů povodní. Nebo se využívá průměrná doba opakování kulminačních průtoků N , resp. průměrná doba opakování objemů povodní. Mluvíme potom o N -leté vodě Q_N : 1-leté, 2-leté, 5-leté nebo 100-leté, u níž předpokládáme, že je to hodnota průtoku (hladina průtoku), která je v dlouhodobém průměru 1x za N let dosažena nebo překročena. Pravděpodobnostní překročení kulminačních průtoků a průměrné doby opakování se stanovují pomocí metod teorie pravděpodobnosti. Podkladem jsou soubory naměřených kulminačních průtoků, respektive objemů povodní (JANDORA, STARA, STARÝ, 2002).

2.2.4.3 Protipovodňová opatření

Protipovodňová opatření jsou jednou ze základních složek říčního inženýrství. V celé jejich historii šlo vesměs o stavby veřejné – financované státem, regionem, obcí, sdružením občanů (ČAMROVÁ, JÍLKOVÁ *et al.*, 2006).

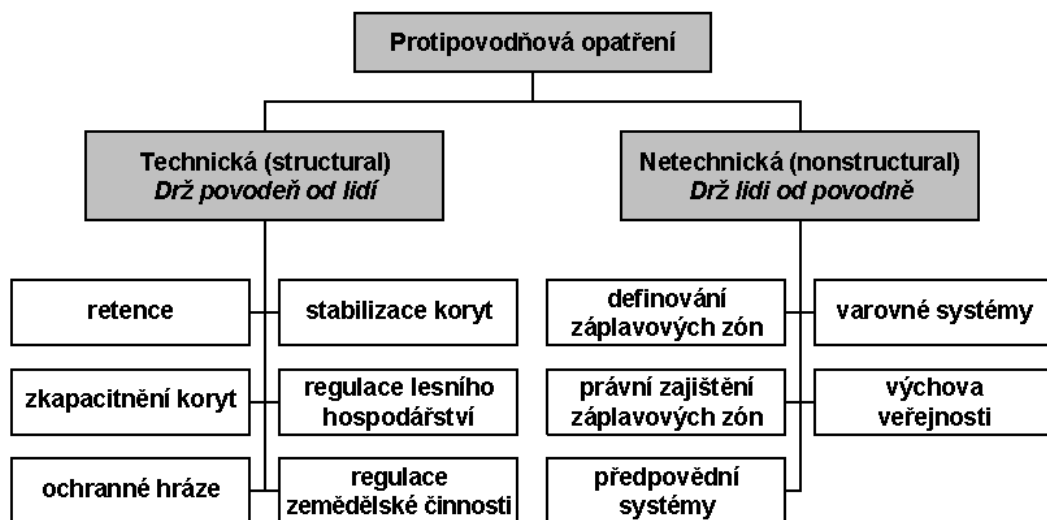
Protipovodňová opatření v povodí je dle HRÁDEK, KUŘÍK (2003) třeba chápat jako součást komplexních ochranných opatření v povodí, jejichž hlavním cílem je:

- zvyšování akumulace a retence vody v povodí,
- protierozní ochrana půdního fondu,
- protipovodňová ochrana ohroženého území.

V rámci klasifikace protipovodňových opatření z hlediska filosofie protipovodňové ochrany lze charakterizovat zejména: technická opatření a netechnická opatření.

Příkladem technických opatření jsou retenční nádrže, zkapacitňování koryt, jejich stabilizace (opevňování), výstavba ochranných hrází, inženýrská a inženýrsko-biologická opatření ke snížení eroze a zvýšení retence v povodí.

Do netechnických (nestavebních) opatření patří zejména definování záplavových zón a jejich právní zajištění, předpovědní a varovné systémy, výchova veřejnosti k odpovědnému chování při povodňových rizikových situacích (HROMÁDKA, KORYTÁROVÁ, 2009). Toto členění znázorňuje obrázek 2-5.



Obrázek 2-5: Klasifikace protipovodňových opatření

zdroj: (ČAMROVÁ, JÍLKOVÁ et al., 2006)

Ať se udělají protipovodňová opatření na jakýkoli průtok, skoro vždy se může vyskytnout povodeň ještě větší. S extrémními jevy se člověk musel naučit žít a bude si na ně muset opět zvyknout. Na druhé straně se však nemůže postavit do role pasivního účastníka, ale musí se snažit, aby svými vlastními chybami zbytečně nezvětšoval negativní důsledky povodní (ČAMROVÁ, JÍLKOVÁ et al., 2006).

2.3 Výzkum na malých povodích

K rozhodování o mnoha praktických otázkách jsou nutné kvantitativní podklady o hydrologické bilanci, o srážkoodtokových vztazích a o režimu jakosti vody v povodích různé velikosti, a to jak o aktuálním stavu, tak o vývoji v minulosti, trendech a alternativách budoucího vývoje. Základem pro taková hodnocení jsou dlouhodobá sledování v malých povodích o ploše řádu od desítek po jednotky ha, výjimečně až desítky km², která jsou co do přírodních, technických i hospodářských podmínek dostatečně homogenní (DOLEŽAL *et al.*, 2006).

Tato malá povodí, respektive povodí drobných vodních toků, charakteristická sběrnou plochou o velikosti jednotek až desítek km², se stávají stále častěji středem pozornosti vodohospodářů, neboť je dnes citlivěji vnímána skutečnost, že již zde se vytváří podmínky hospodárného a uceleného využívání vodních zdrojů (MAŠÍN, KULHAVÝ, 1998).

Měření v malých povodích mohou být dostatečně podrobná k odhalení mechanismů a chemismů vlivu hospodářských činností, ochrany půdy a péče o vodní komponentu v krajině. Empirické studium v měřítku malých povodí pak může být doplněno o výsledky fyzikálně založených simulačních modelů. Vzhledem k variabilitě počasí a k pomalosti vývoje půdních vlastností, urbanizace území a zemědělsko-hospodářských trendů musí být sledování v povodích dlouhodobé a komplexní, předjímající praktické otázky, na které bude třeba v budoucnu odpovídat, které však dnes třeba ještě nejsou naléhavé. V povodích sledovaných po delší období lze věrohodně zachytit dopady politických, hospodářských i odborných změn přístupů ke krajině. Přímé vlivy na srážkoodtokový proces lze ovšem vysledovat i v kratších obdobích. Malá povodí poskytují i prostor pro přípravu a realizaci aktivních experimentů. Jedná se o jakési „polní laboratoře“, z nichž některé výsledky nalézají přímé uplatnění v praxi, jiné je třeba zobecnit a kombinovat pro použití ve větších povodích, čemuž napomáhá souběžný výzkum ve vnořených povodích různé velikosti (DOLEŽAL *et al.*, 2006).

2.4 Hydrologického modelování

Obecný pojem modelování znamená nahrazení posuzovaného objektu kvazi-objektem nebo modelem za účelem čerpání informací o objektu z modelu. Model může být viděn jako pracovní analogie reálného objektu, což umožňuje podobnost ale ne identitu vlastností.

Termín modelování hydrologických systémů obvykle znamená použití matematických a logických výrazů, které definují kvantitativní vztahy mezi charakteristiky hydrologického systému a faktory tvořící hydrologický systém (*WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1994*). Ten je definován jako systém převážně fyzikálních procesů, působící na vstupní proměnné, jež pak transformuje ve výstupní veličiny (*JENÍČEK, 2005*).

Matematická reprezentace srážko-odtokového procesu má dlouhou historii, ale až dynamický rozvoj počítačových technologií zhruba od 80. let minulého století (*JENÍČEK, 2007*) umožnil hydrologům provádět komplexní, opakované výpočty při použití velkého množství dat (*WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1994*).

2.4.1 Hydrologické modely

Model lze chápat jako nástroj pro uspořádání, respektive transformaci existujících informací do forem přímo využitelných pro určitá hodnocení nebo opatření. Pomocí modelů se lépe využijí informace obsažené v datech. Proto jsou modely potenciálně spolehlivějším prostředkem pro odhad budoucího vývoje (*BUCHTELE, 2002A*).

Při operativním provozu hydrologických předpovědních modelů lze celý předpovědní proces rozdělit na tři části:

- a) **příprava a zpracování dat pro běh modelu** – zahrnuje sběr dat, jejich primární zpracování a kontrolu, zpracování dalších informací o stavu sledovaných ukazatelů včetně očekávaných změn (např. manipulace na nádržích, předpověď srážek atd.);

- b) **vlastní zpracování předpovědi hydrologických prvků pro zvolené časové období a prostor (bod)** – v průběhu výpočtu může docházet k interaktivním zásahům obsluhy modelu (změna stavových podmínek, operativní změna parametrů, případné odstranění chyb vstupních dat, které nabyly podchyceny v průběhu první fáze);
- c) **interpretace výstupu (předpovědi) pro potřeby jejího dalšího využití** – například pro řízení vodohospodářských systémů, protipovodňovou ochranu, ochranu životního prostředí atd. Přičemž výstup modelů může být vstupem do další aplikace (*DANĚLKA, 2007*).

Hydrologické modelování se stalo důležitým prvkem v plánování a řízení vodního hospodářství, ve výzkumné činnosti a v systémech pro tvorbu předpovědí (*WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2009*). Jejich použití dále upřesňuje *JENÍČEK (2005)*:

- a) **modely používané v operativní hydrologii** – aplikace modelu v operativní hydrologii, kdy vstupní data tvoří mimo stavové veličiny také okamžité údaje z automatických 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;
- b) **modely aplikované pro návrhovou a projekční činnost v oblasti vodního hospodářství** – dlouhodobá řešení protipovodňové ochrany, řešení nejrůznějších technických staveb (plavební kanály, ČOV, mosty atd.);
- c) **modely využívané ve výzkumu** – možnosti dalšího vývoje modelu, výzkum jednotlivých komponent srážko-odtokového procesu a jejich přesnější popis (pro tyto účely jsou často zřizována tzv. experimentální povodí s nadstandartní sítí měřících stanic).

Použití hydrologických modelů je v dnešní době a v podmínkách střední Evropy naprostou nezbytností. Projevilo se to zvláště v průběhu velkých povodní na území České republiky, avšak i při menších a lokálních povodňových událostech (*DANĚLKA, 2007*).

2.4.2 Klasifikace hydrologických modelů

Do dnešní doby bylo vyvinuto velké množství modelů zabývajících se simulováním hydrologických procesů. K řešení problematiky jsou používány různé přístupy, následkem čehož je možné hydrologické modely klasifikovat z různých hledisek právě na základě zvoleného přístupu (*DANĚLKA, 2007*). Klasifikace by měla uživateli pomoci s výběrem vhodného modelu, který je použitelný pro řešení konkrétní problematiky (*JENÍČEK, 2005*).

Matematické modely v hydrologii lze dle *KOVÁŘ (1990)* rozdělit podle několika hledisek (obrázek 2-6):

- a) rozdělení proměnných,
- b) linearity,
- c) prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin,
- d) délky časové základny.

2.4.2.1 Hledisko rozdělení proměnných

Toto dělení je v hydrologii jedno z nejpoužívanějších a modely se podle tohoto pohledu dělí na deterministické a stochastické (*JENÍČEK, 2005*). Přestože hydrologické procesy vždy obsahují deterministické i stochastické prvky a modely popisující jejich chování zahrnují elementy charakteristické pro oba přístupy (*DANĚLKA, 2007*), lze je na základě dominantního principu rozdělit na zmíněné skupiny.

2.4.2.1.1 Deterministické modely

Jsou vždy spojovány s časovými proměnnými, pro které neplatí žádné rozdělení pravděpodobností a jejich vzájemné vztahy jsou ryze příčinné, neboli deterministické (*KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000*). Účelem deterministických modelů v hydrologické aplikaci je popsat matematickými vztahy určité fyzikální představy

části hydrologického cyklu nebo jeho celku (KOVÁŘ, 1990) a lze je dále dělit podle stupně složitosti těchto matematických vztahů.

- **Black box modely** – vztahy jsou dány empirickým odvozením bez definování přesných hydrologických vztahů a parametrů uvnitř systému. Jejich nevýhodou je nemožnost operativní kontroly smysluplnosti výstupu a nemožnost zásahu obsluhy do výpočtu (DAŇHELKA, 2007).

Modely neuronových sítí

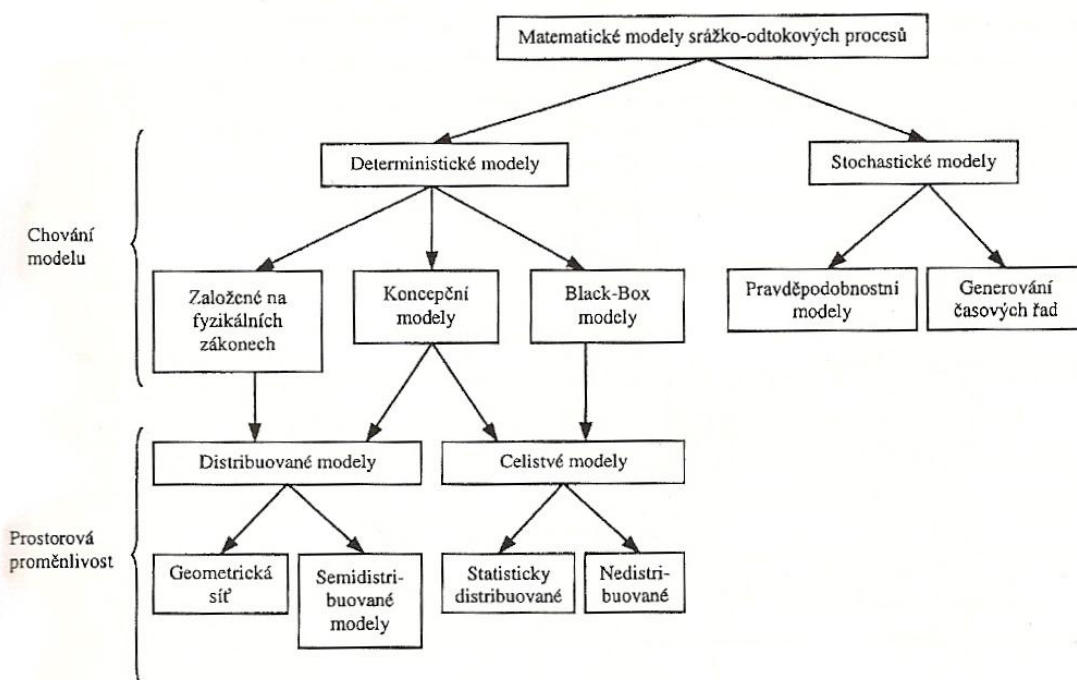
Zvláštním druhem Black box modelů jsou umělé neuronové sítě (NS), které se v poslední době stále více používají jako alternativní způsob řešení řady hydrologických problémů. Tyto sítě mohou být považovány za modelovací nástroj složený ze vzájemně propojených jednotek – tzv. umělých neuronů (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2009). Princip fungování NS spočívá ve zjednodušeném napodobování procesů probíhajících v nervové soustavě živých organismů. Základní charakteristikou modelu NS je schopnost učit se a ukládat nabyté poznatky v rámci interneuronových spojení. Při učení se NS snaží rozpoznat a zapamatovat si vztahy a závislosti ve vstupních datech. NS nacházejí uplatnění při řešení komplexních úloh, při kterých je s výhodou využíváno strojové učení (HAVLÍČEK, 2010).

- **Koncepční modely (grey box)** – tento přístup reflektuje fyzikální zákony ve zjednodušené (koncepční) formě a obsahuje i určitou dávku empiricky odvozených vztahů (JENÍČEK, 2005). Obsluha modelu může na základě svých zkušeností ovlivnit výsledek modelu (DAŇHELKA, 2007).
- **Modely na fyzikálních základech (white box)** – snaží se respektovat principy zachování hmoty, hybnosti a energie. Problémem, který silně limituje jejich použití, je nedostupnost většiny vstupních dat (KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000). Uživatelské zásahy do modelů tohoto typu jsou teoreticky zbytečné a vzhledem ke komplikovanosti i prakticky vyloučené (DAŇHELKA, 2007).

2.4.2.1.2 Stochastické modely

Představují skupinu modelů, které se dají charakterizovat absencí vazebnosti mezi příčinou a následkem hydrologického jevu v rámci charakterizovaného systému (DAŇHELKA, 2007).

- **Pravděpodobnostní modely** – u těchto modelů jsou jednotlivé hydrologické parametry jako například maximální či minimální průtoky charakterizovány určitým pravděpodobnostním rozdělením.
- **Modely generování časových řad** – použití těchto modelů je možné při extrapolaci časových řad pozorovaných parametrů, přičemž se zachovávají jejich statistické charakteristiky (JENÍČEK, 2005).



Obrázek 2-6: Klasifikace hydrologických modelů

zdroj: (KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000)

2.4.2.2 Hledisko linearity

Linearita nebo nelinearita modelu je další obecnou kvalitativní charakteristikou modelu. V deterministickém smyslu rozdělujeme modely:

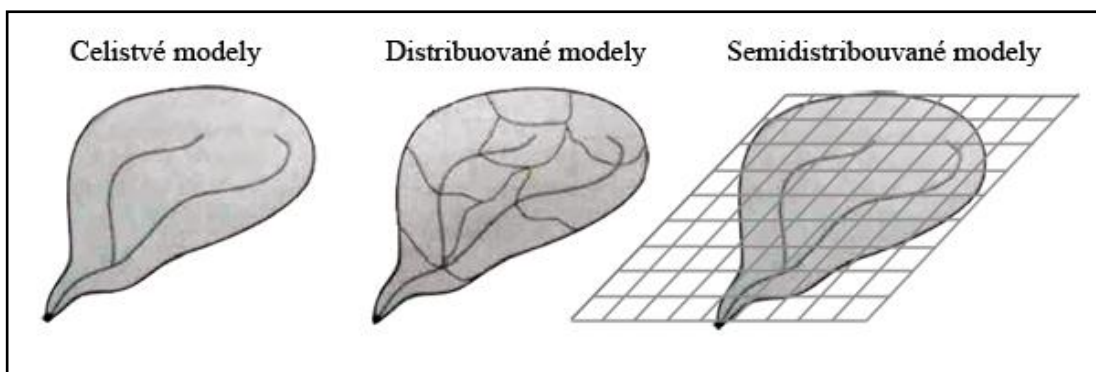
- **lineární modely** – jsou popsány lineární diferenciální rovnicí (nebo rovnicemi). Platí zde princip superpozice a jejich výstup závisí pouze na funkci chování systému (*KOVÁŘ, 1990*);
- **nelineární modely** – popisují je nelineární diferenciální rovnice a odezva systému závisí na funkci chování systémů a na intenzitě vstupu (*KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000*).

Ve stochastickém smyslu je model lineární, existují-li lineární vztahy mezi stavovými veličinami (*KOVÁŘ, 1990*).

2.4.2.3 Hledisko prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin

Hydrologické modely můžeme rozdělit na modely distribuované, které považují povodí jako prostorově variabilní systém, a modely celistvé popisující povodí z hlediska průměrných hodnot (*JENKINS, PETERS, RODHE, 1994*). Určitým přechodem mezi oběma skupinami modelů jsou modely semidistribuované (*KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000*). Toto rozdělení je znázorněno obrázkem 2-7.

- **Celistvé modely (lumped models)** – parametry a vstupy pro celou simulovanou oblast jsou vyjádřeny jednou reprezentativní hodnotou (*DANĚHELKA, 2007*).
- **Distribuované** – prostorové změny vstupních a stavových veličin jsou řešeny v uzlových bodech zvolené geometrické sítě (*KOVÁŘ, 1990*).
- **Semidistribuované** – eliminují nevýhody předchozích dvou typů. Dělí zájmovou oblast na dílčí homogenní podoblasti (*DANĚHELKA, 2007*).



Obrázek 2-7: Prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin jednotlivých modelů

zdroj: (DAŇHELKA, 2007)

2.4.2.4 Hledisko délky časové základny

Dle délky časové základny lze modely dělit do dvou skupin.

- **Kontinuální modely** – využívají dlouhé časové řady srážek a dalších hydrometeorologických dat.
- **Epizodní modely** – využívají kratší řady dat a slouží pro modelování jednotlivých významných srážko-odtokových epizod (KULHAVÝ, KOVÁŘ, 2000).

2.4.3 Meteorologické a hydrologické vstupy do modelů

Prudký vývoj výpočetní techniky umožňuje použití stále složitějších a rozsáhlejších modelovacích systémů schopných v krátké době zpracovat velké objemy dat a tím lépe postihnout a předpovědět modelovaný jev, např. průtok, zátopu, dynamické jevy v atmosféře apod. (VEVERKA, ŘIČICOVÁ, 2002). Výsledky všech hydrologických modelovacích systémů jsou jednoznačně závislé na vstupních datech, a to především na jejich kvalitě, reprezentativnosti a aktuálnosti. Kvalita naměřených dat je dána mírou odchylky těchto dat v porovnání se skutečností a je ovlivněna také jejich homogenitou v čase (LETT, DAŇHELKA, 2002).

Srážky

Údaje o srážkách jsou jednoznačně nejvýznamnějším vstupem do hydrologických modelů a jejich přesnost zásadně ovlivňuje výsledky modelování.

Z možných údajů o srážkách nás nezajímají pouze celkové úhrny za časový interval, ale také doba trvání deště, intenzita v jednotlivých fázích a plošné rozložení na modelovaném povodí (*LETT, DAŇHELKA, 2002*). Jako vstupní informace o spadlých srážkách jsou využívána především operativní data profesionální sítě meteorologických stanic a sítě dobrovolných pozorovatelů. Dalším zdrojem úhrnů srážek mohou být měřidla podniků Povodí a srážky měřené v některých hydrologických stanicích (*VEVERKA, ŘIČICOVÁ, 2002*).

Teplota vzduchu

Teplota vzduchu je používána hlavně jako vstupní hodnota do sněhových komponent modelů. Při měření teplot je vhodné zajistit krátký časový krok, protože teploty mají poměrně výrazný denní chod, který jednoznačně determinuje zejména odtávání sněhové pokrývky, dynamiku jejího vývoje, popřípadě skupenství srážek při jejich výskytu v období přechodu teploty přes hranici bodu mrazu (*LETT, DAŇHELKA, 2002*).

Evapotranspirace

Evapotranspirace představuje v mnoha našich povodích 70-80 % celkového srážkového úhrnu. Znalost její dynamiky je proto velmi podstatná pro zpřesnění simulace odtoku (*BUCHTELE, 2002B*).

Za posledních 50 let bylo vyvinuto velké množství více či méně empirických metod od mnoha vědců a specialistů po celém světě pro odhad evapotranspirace v odlišných klimatických podmínkách. V současnosti je FAO Pentan-Monteith metoda doporučována jako jediná standardní metoda. Je to metoda s velkou pravděpodobností správného výsledku referenční evapotranspirace v širokém rozsahu lokalit a klimatických podmínek (*ALLEN et al., 1998*).

Sněhová pokrývka

Z informací o sněhové pokrývce je z hydrologického hlediska nejvýznamnější informace o vodní hodnotě sněhu, která udává množství vody obsažené ve sněhu. Tato hodnota je na rozdíl od informace o výšce sněhu přímo použitelná ve výpočtu hydrologické bilance v povodí.

Ze zkušeností vyplývá, že největší pozornost je třeba věnovat informacím o množství sněhu na počátku jeho akumulace v době, kdy sněhem ještě není pokryta celá plocha povodí, a na jaře v době změny energetické bilance, a tím přechodu od akumulace sněhu k tání (*DAŇHELKA, 2007*).

Vodní stavy a průtoky

Znalost průtoků ve vodním toku je významná jako podklad pro hydrologické rozbory při zjišťování vodní bilance zkoumaného území a spolu s měřením vodních stavů je velmi důležitým základem dalších hydrologických výpočtů (*ŠILAR, 1996*). Informace o průtocích v korytech modelovaných toků označuje *DAŇHELKA (2007)* jako hlavní hydrologické vstupy do hydrologických modelů.

Data o nádržích

Nádrže ovlivňují přirozený režim odtoku a mají výrazný vliv i na transformaci povodňových vln procházejících nádrží. Na vodních dílech se shromažďují data o odtoku, přítoku a kótě hladiny (*LETT, DAŇHELKA, 2002*).

Geografická data

Kromě operativních hydrometeorologických dat jsou v hydrologických modelech využívány i statické údaje o povodí ve formě informací o významných fyzicko-geografických charakteristikách a objektech významných pro provoz modelu (*DAŇHELKA, 2007*). Mezi základní geografická data používaná v hydrologických modelech patří:

- digitální model terénu,
- sklon povodí (spádnice),
- vegetační pokryv a využití území,
- hydrologické charakteristiky půd,

- rozvodnice,
- vodní toky,
- pozorovací objekty,
- koryto – příčný profil,
- objekty a překážky proudění (mosty, budovy).

2.4.4 Výběr hydrologického modelu

V dnešním světě existuje mnoho dostupných hydrologických modelů a celá řada z nich může splnit náš zamýšlený cíl (*SINGH, FREVERT, 2002*). Při výběru vhodného modelu je dobré vzít v úvahu několik kritérií, jejichž souhrn je následující:

- **přizpůsobivost místním podmínkám a úkolu, na který je model aplikován** – je vhodné, aby byl použitý model schopen simulovat srážko-odtokové procesy v daných fyzicko-geografických podmínkách;
- **schopnost simulovat odtokový proces v prostorovém i časovém kroku, který odpovídá velikosti povodí** – uvážení, zda pro řešení dané problematiky použít model celiství nebo distribuovaný, kontinuální nebo epizodní;
- **dostupnost vyžadovaných dat** – modely mohou mít své specifické nároky na vstupní data, proto je nutné posoudit jejich dostupnost;
- **vazba na podpůrné programy** – při nasazení modelu je výhodou zapojení softwarových prostředků pro sběr, přenos a databázové zpracování dat;
- **dostupnost modelu** – existují modely volně šiřitelné a jednak modely, jejichž cena není nikterak nevýznamná;
- **dostupná systémová podpora** – podpora uživatelů, distributor, jazyková lokalizace, verze produktu atd. (*JENÍČEK, 2005*).

Při každém výběru modelu hraje nezanedbatelnou roli také osobní zaujatost (*SINGH, FREVERT, 2002*) a předchozí znalosti a zkušenosti uživatele. Platí totiž jednoznačně, že fyzikálně výstižný komplexní model může poskytnout spolehlivější výsledky, je-li v rukou zasvěceného odborníka (*BUCHTELE, 2002A*).

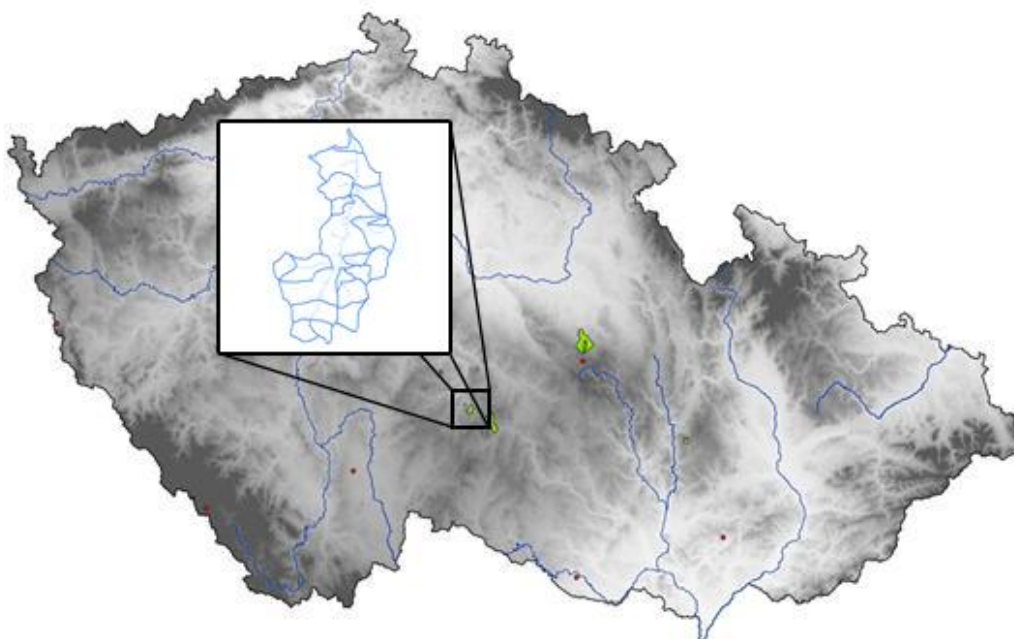
3. Materiál

3.1 Povodí Kopaninského potoka

VÚMOP, v.v.i. provozuje od roku 1985 experimentální povodí Kopaninský potok. To původně sloužilo pro výzkum regulační drenáže na lučních stanovištích. Jedná se o typické malé zemědělské povodí (IV. řádu) v povodí Želivky s typickým způsobem využití území (zastoupení kultur, způsob zemědělského hospodaření, hospodaření v lesních porostech, podíl odvodněných ploch, zastoupení sídel a samot). Jeho polohu v rámci České republiky obsahuje obrázek 3-1.

Od roku 1992 je na povodí Kopaninského toku systematicky ve 14-ti denních intervalech sledován průtok a kvalita vody nejen na hlavním toku, ale i na jeho přítocích, což například dovoluje stanovit funkci a podíl jednotlivých lokalit na odnosu dusíku (*KVÍTEK et al., 2007*). V roce 2004 byly jednotlivé profily Kopaninského potoka postupně dovybavovány kontrolním monitoringem průtoků a jakosti vod.

Standardně jsou na povodí Kopaninského potoka měřeny hodnoty srážek, teploty vody a vzduchu, radiace, vlhkosti vzduchu, rychlosti a směru větru, výparu, výšky a objemové hmotnosti sněhu. Dále jsou zjišťovány jednotlivé průtoky, kvalita vody a hladina podzemní vody.

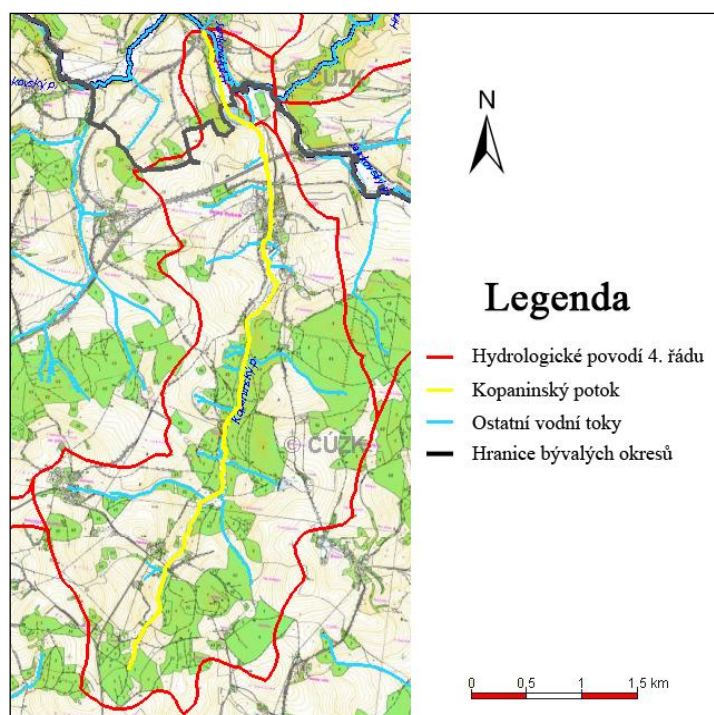


Obrázek 3-1: Geografické umístění povodí v rámci ČR

zdroj: (WWW.HYDROMELIORACE.CZ) upraveno pro potřeby vlastní práce

3.1.1 Geografie

Kopaninský potok se nalézá v kraji Vysočina (bývalé okresy Pelhřimov a Humpolec) a protéká katastrálním územím obcí Strměchy, Žirov, Velký Rybník a Kletečná. Celková rozloha tohoto povodí 4. řádu se rovná 917,8 ha, sklon povodí je 2,6 % a průměrná nadmořská výška 523 m n. m. Samotný tok je značen jako páteřní tok základního hydrologického povodí s délkou 6,544 řkm. Přesnou polohu vystihuje obrázek 3-2, geografické charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 3-1.



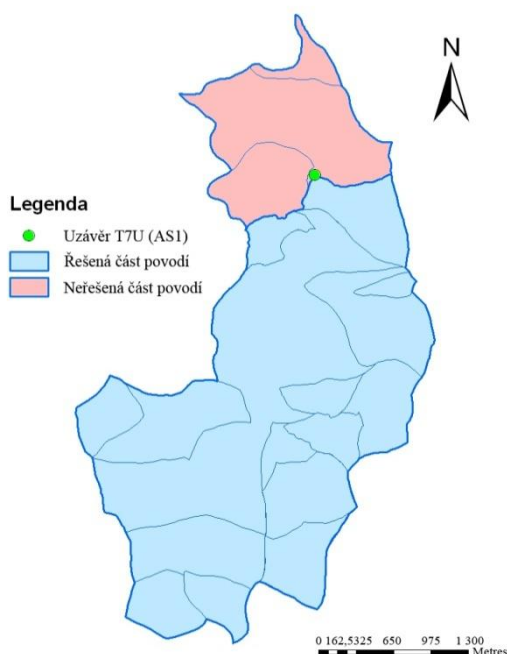
Obrázek 3-2: Mapa povodí Kopaninského potoka

Poloha a příslušnost povodí	
okres	Pelhřimov, Humpolec
název toku	Kopaninský potok
délka toku	6,544 řkm
souřadnice GPS (profil T7U)	N 49.48839°; E 15.30704°
plocha povodí	917,8 ha
hydrologické číslo	1-09-02-031

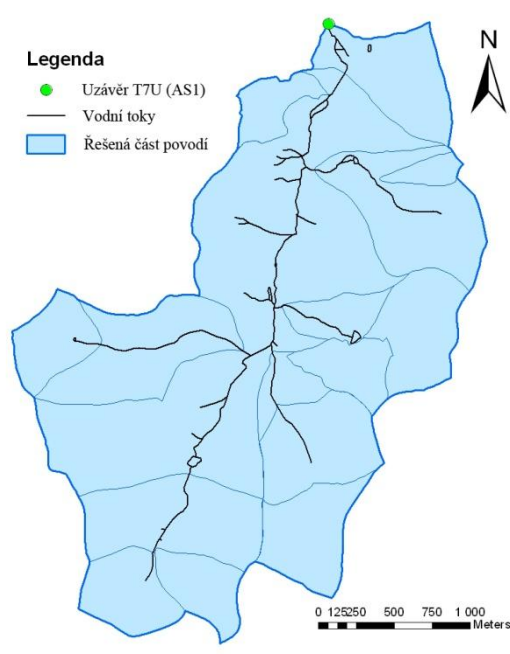
Tabulka 3-1: Poloha a příslušnost povodí Kopaninského potoka

3.1.2 Hydrologie

Povodí Kopaninského potoka nese číslo hydrologického pořadí 1-09-02-031/0 a spadá tudíž pod povodí řeky Vltava (II). Recipientem kopaninského potoka je Jankovský potok, který se dále vlévá do řeky Želivky. Kopaninský potok má několik menších přítoků, pro zjednodušení modelu bylo však pracováno pouze s šesti přítoky. Zájmová oblast pro účely této práce nezahrnuje celou plochu povodí, ale pouze území, které je uzavřeno uzávěrovým profilem T7U. Rozloha této plochy je 710,3 ha. Zmíněný stav znázorňují obr. 3-4 a 3-5. Dvacetileté průtoky tohoto toku (Q_{20}) jsou $10,38 \text{ m}^3/\text{s}$, a stoleté (Q_{100}) se rovnají hodnotě $14,03 \text{ m}^3/\text{s}$.



Obrázek 3-4: Povodí Kopaninského potoka



Obrázek 3-4: Zájmová část povodí

3.1.3 Geomorfologie

Povodí Kopaninského potoka náleží k Českomoravské vrchovině, přesněji se zařazuje do Křemešnické vrchoviny (*PODHRÁZSKÁ, UHLÍŘOVÁ, 2005*), která má rovinný charakter. Tento obecně rovinný reliéf je rozřezán hlubokými údolními řek (*VÁŇA et al., 2001*). Uzávěrový profil T7U má nadmořskou výšku 479 m, nejvyšší vrch povodí Pavlíčkův kopec má 624 m. Průměrná nadmořská výška povodí se pohybuje kolem 550 m (*PODHRÁZSKÁ, UHLÍŘOVÁ, 2005*). Tabulka 3-2 obsahuje celkové geomorfologické zařazení v rámci České republiky.

Geomorfologické zařazení	
systém	Hercynský
provincie	Česká vysočina
subprovincie	Česko-moravská soustava
oblast	Českomoravská vrchovina
celek	Křemešnická vrchovina
podcelek	Želivská pahorkatina, Humpolecká vrchovina
okrsek	Košetická a Vyskytenská pahorkatina

Tabulka 3-2: Geomorfologické zařazení povodí Kopaninského potoka

3.1.4 Geologie

Oblast je součástí nejstarší strukturní jednotky Českého masivu - moldanubika. Z hlediska stratigrafie její sedimentární základ tvoří nejnižší proterozoikum až archaikum. Převážně je zde možné nalézt biotitické a sillimanit-biotitické pararuly, které místy mohou být částečně migmatizovány. Moldanubikum bylo vyzdviženo během hercynské orogeneze. Alpínská orogeneze způsobila vznik nových zlomů a rozlámání Českého masivu. Kvartér je zde zastoupen zvětráváním skalních bloků a vývojem říčních niv (VÁŇA *et al.*, 2001).

Geologické podloží tvoří ruly a místy křemence. Horniny krystalinika mají sníženou puklinovou propustnost, která v dosahu zvětrávacích procesů závisí hlavně na charakteru zvětralin. Z kvartérních sedimentů mají větší hydrogeologický význam fluvialní akumulace sedimentů údolních niv a některá mocnější eluvia. Propustnost kvartéru se mění podle uloženin. Pro území jsou charakteristické mělké zvodně vázané na povrchovou zónu kvartérních uloženin, zónu zvětrávání, případně přípovrchového rozpojení hornin. Oběh vody má lokální charakter. Infiltrace probíhá v celé ploše kolektoru v závislosti na propustnosti zvětralinového pláště. K odvodňování dochází v úrovni nebo nad místní erozní bází (PODHRÁZSKÁ, UHLÍŘOVÁ, 2005).

3.1.5 Pedologie

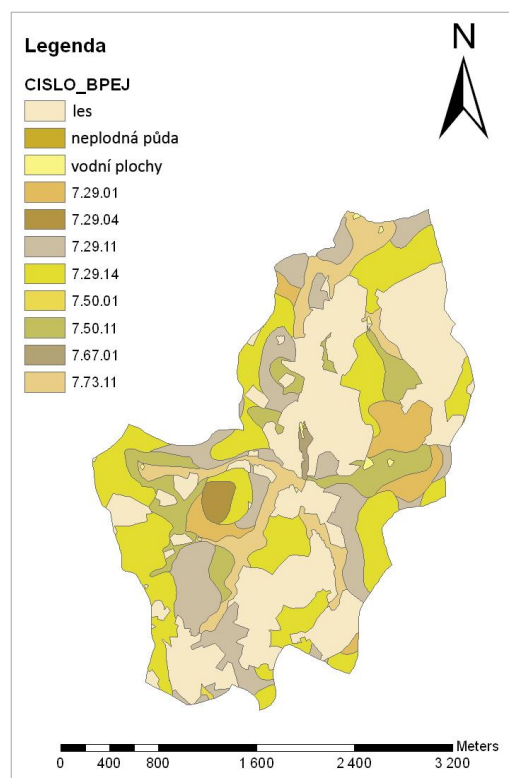
Pro povodí jsou charakteristické kambizemě modální na rulách, středně těžké až střední lehčí. Plošně výrazně jsou dále zastoupeny kambizemě oglejené a pseudogleje modální na rulách. V zamokřených oblastech, zpravidla s výskytem

svahových pramenišť, dominují pseudogleje modální. Lokálně se vyskytují v povodí i gleje modální (PODHRÁZSKÁ, UHLÍŘOVÁ, 2005).

V povodí mají zastoupení převážně lesní půdy (které nejsou BPEJ blíže specifikované) a dále pak HPJ 29, 50, 67 a 73 (tabulka 3-3).

Základní charakteristiky HPJ v území	
HPJ 29	Hnědé půdy, hnědé půdy kyselé a jejich slabé oglejené formy převážně na rulách, žulách a svorech a na výlevných kyselých horninách; středně těžké až lehčí, mírně šterkovité, většinou s dobrými vláhovými poměry
HPJ 50	Hnědé půdy oglejené a oglejené půdy na různých horninách (hlavně žulách, rulách) s výjimkou hornin v HPJ 48, 49; zpravidla středně těžké, slabé až středně šterkovité až kamenité, dočasně zamokřené
HPJ 67	Glejové půdy mělkých údolí a rovinných celků při vodních tocích; středně těžké až velmi těžké, zamokřené, po odvodnění vhodné převážně pro louky
HPJ 73	Oglejené půdy zbažinělé a glejové půdy svahových poloh; středně těžké až velmi těžké, zamokřené a s výskytem svahových pramenišť, i po odvodnění vhodné jen pro louky

Tabulka 3-3: Základní charakteristiky HPJ v území



Obrázek 3-5: Půdní mapa

3.1.6 Klimatické poměry

Povodí Kopaninského potoka se dle Končeka nachází v klimatické oblasti vrchovinné, mírně teplé, mírně vlhké (B5). Takto definovaná lokalita je charakteristická normálním až krátkým létem, s mírným jarem a podzimem, zima je normálně dlouhá, mírně chladná, suchá až mírně suchá s normální až krátkou sněhovou pokrývkou. Počet letních dnů se pohybuje v rozmezí 30 - 40 a počet dní se sněhovou pokrývkou fluktuuje mezi 60 – 100.

Klimatická charakteristika zájmové oblasti podle Quittovy klasifikace (tabulka 3-4) spadá na rozhraní mírně teplých oblastí MW4 (MT4) a MW7 (MT7).

MW4 – krátké léto, mírné, suché až mírně suché, přechodné období krátké s mírným jarem a mírným podzimem, zima je normálně dlouhá, mírně teplá a suchá s krátkým trváním sněhové pokrývky.

MW7 – normálně dlouhé, mírné, mírně suché léto, přechodné období je krátké, s mírným jarem a mírně teplým podzimem, zima je normálně dlouhá, mírně teplá, suchá až mírně suchá s krátkým trváním sněhové pokrývky.

Parametr	Klimatické oblasti	
	MW4	MW7
Počet letních dní	20 - 30	30 - 40
Počet dní s průměrnou teplotou 10° a více	140 - 160	140 - 160
Počet dní s mrazem	110 - 130	110 - 130
Počet ledových dní	40 - 50	40 - 50
Průměrná lednová teplota	-2 - -4	-5 - -6
Průměrná červencová teplota	16 - 17	16 - 17
Průměrná dubnová teplota	6 - 7	6 - 7
Průměrná říjnová teplota	6 - 7	7 - 8
Průměrný počet dní se srážkami 1mm a více	110 - 120	100 - 120
Suma srážek ve vegetačním období	350 - 450	400 - 450
Suma srážek v zimním období	250 - 300	250 - 300
Počet dní se sněhovou pokrývkou	60 - 80	60 - 80
Počet zatažených dní	150 - 160	120 - 150
Počet jasných dní	40 - 50	40 - 50

Tabulka 3-4: Klimatická klasifikace dle Quitta

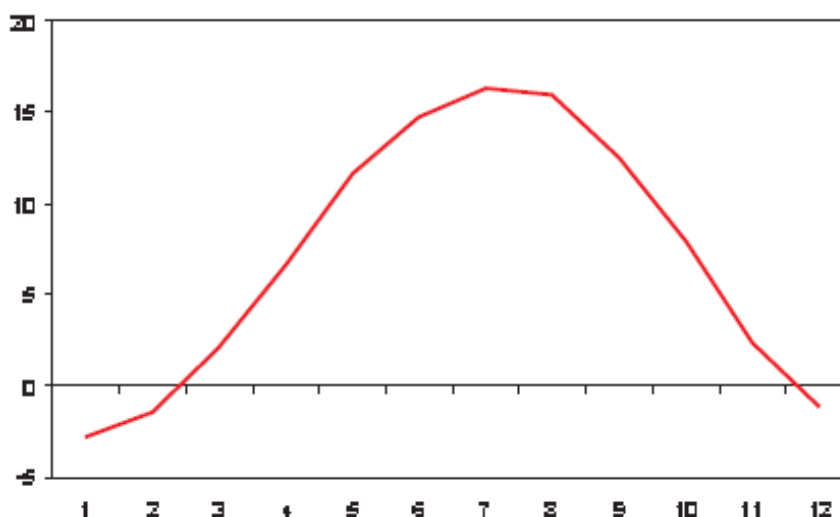
zdroj: (ATLAS PODNEBÍ ČESKA, 2007)

3.1.6.1 Teplota

Klimatický region B5 stanovuje průměrné roční teploty 6 – 7 °C. Tyto hodnoty jsou ověřeny a zpřesněny díky kontinuálnímu měření teploty na 15 km vzdálené observatoři Košetice (obrázek 3-6), která je specializovaným pracovištěm zabezpečujícím účast České republiky v mezinárodních programech monitoringu kvality přírodního prostředí v regionálním měřítku, a díky měření automatické meteorologické stanice, která je umístěna v uzávěrovém profilu T7U.

Observatoř Košetice: průměrná roční teplota (za období 1961 - 1990) – 7,1°C

Automatická stanice: průměrná roční teplota (za období 2001 - 2007) – 7,6°C



Obrázek 3-6: Observatoř Košetice - průměrné měsíční teploty vzduchu (za období 1961 - 1990)

zdroj: (VÁŇA et al., 2001)

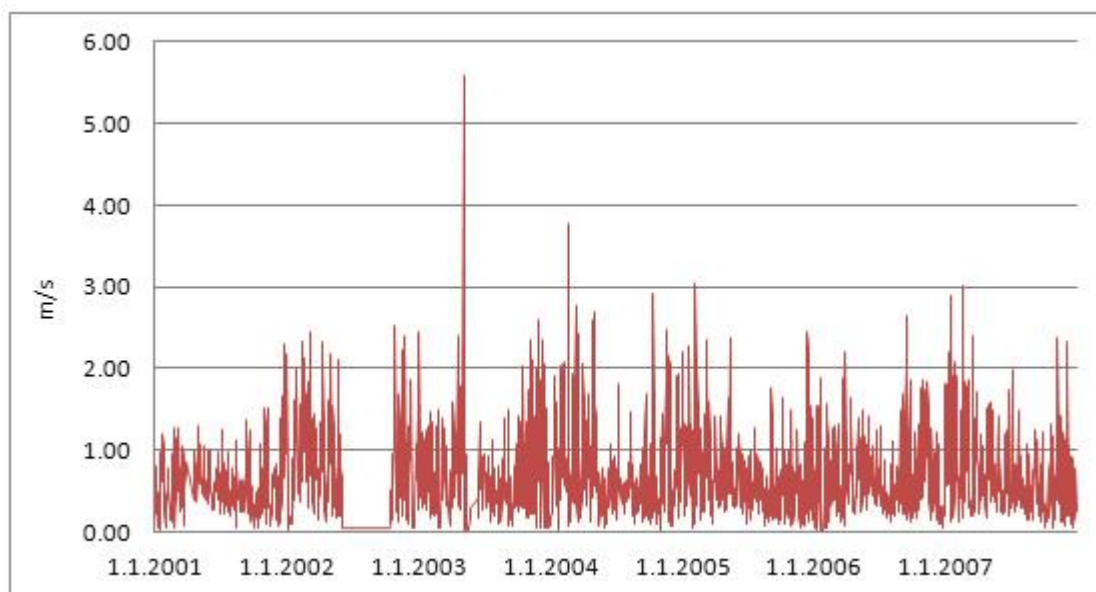
3.1.6.2 Srážky

Srážkový úhrn na území povodí je sledován pomocí měření na třech stanovištích: kontinuálně pracující automatická stanice a dva srážkoměry s lidskou obsluhou v lokalitách „U Turků“ a „U Němců“.

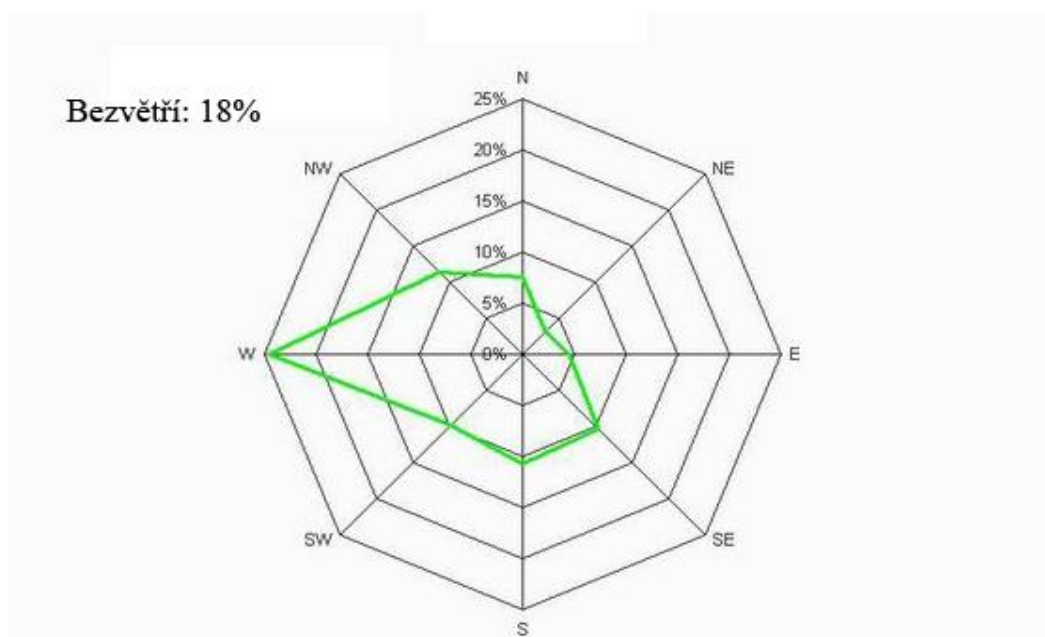
Dlouhodobý roční průměr srážek je 665 mm. Srážkový úhrn ve vegetačním období se pohybuje od 350 do 450 mm, v zimních měsících od 250 do 300 mm.

3.1.6.3 Vítr

Směr a rychlost větru je pro každou oblast velmi specifická. Data o směru větru byla získána z observatoře Košetice (obrázek 3-8), data o rychlosti větru (obrázek 3-7) pro povodí Kopaninského potoka pocházejí z automatické stanice instalované na okraji obce Velký rybník - uzávěrový profil T7U. Zjištěny byly převažující západní větry o ročním průměru 0,69 m/s.



Obrázek 3-7: Automatická stanice - průměrné denní rychlosti větru (za období 2001 - 2007)

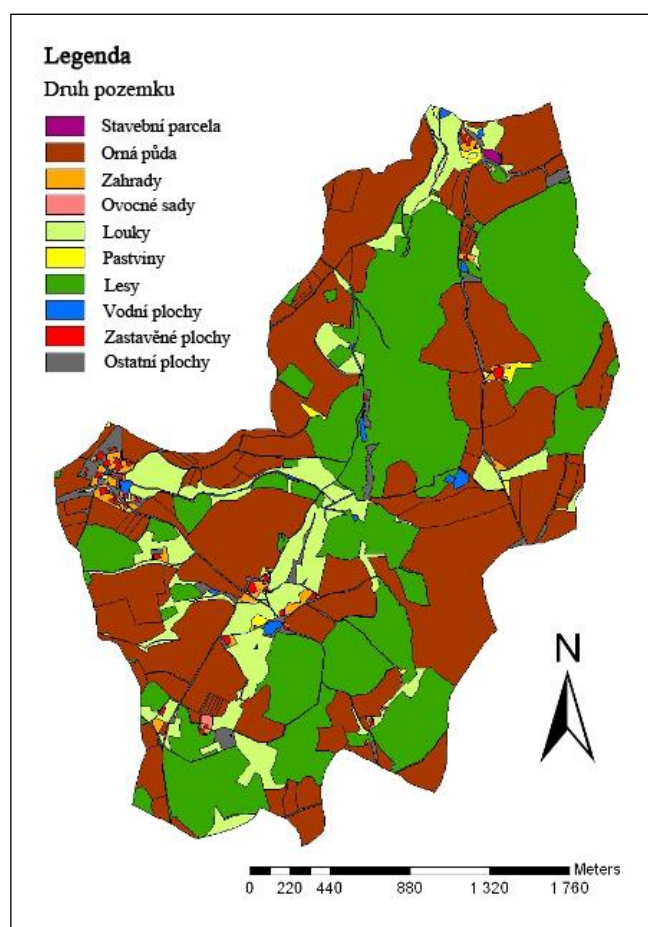


Obrázek 3-8: Observatoř Košetice - relativní četnost větru (za období 1983 - 2002)

zdroj: (VÁŇA et al., 2001)

3.1.7 Využití území

Dle získaných podkladů v zájmovém území povodí převažuje zemědělská půda. Orná půda se rozkládá na ploše 300 ha, travní porosty trvalého charakteru mají výměru 107,1 ha, lesy 262,5 ha, zahrady a sady 7,3 ha a ostatní 33,6 ha. Skladba zemědělských plodin odpovídá přírodním podmínkám. Převládají obilniny a řepka olejná, významný podíl má kukuřice a hrách, méně se pěstují okopaniny a krmné směsky. Přehlednou situaci využití území v roce 2007 znázorňuje obrázek 3-9.



Obrázek 3-9: Využití půdy - stav v roce 2007

3.2 Charakteristika modelu Mike SHE

Mike SHE je globální, dynamický hydrologický model pro simulace základních procesů v zemní fázi hydrologického cyklu (WWW.DHI.CZ, 2011). Srážko-odtokový model Mike SHE je produkt dánské společnosti DHI (Danish Hydraulic Institute) a lze ho zařadit mezi distribuované, fyzikálně založené, kontinuální či epizodní modely.

Jedná se o propracovaný model s vazbou na GIS (JENÍČEK, 2005), který je vhodný pro analýzu, plánování a řízení v oblasti vodních zdrojů, povodí a životního prostředí, dále pak má širokou oblast uplatnění při posuzování vzájemných interakcí mezi povrchovou a podzemní vodou a při řešení zásadních technických zásahů v povodí (WWW.DHI.CZ, 2011). Mike SHE lze při řešení těchto problematik použít jak v regionálních studiích pokrývajících celé povodí, tak ve studiích místních zaměřených na specifické problémy v malém měřítku.

3.2.1 Struktura modelu

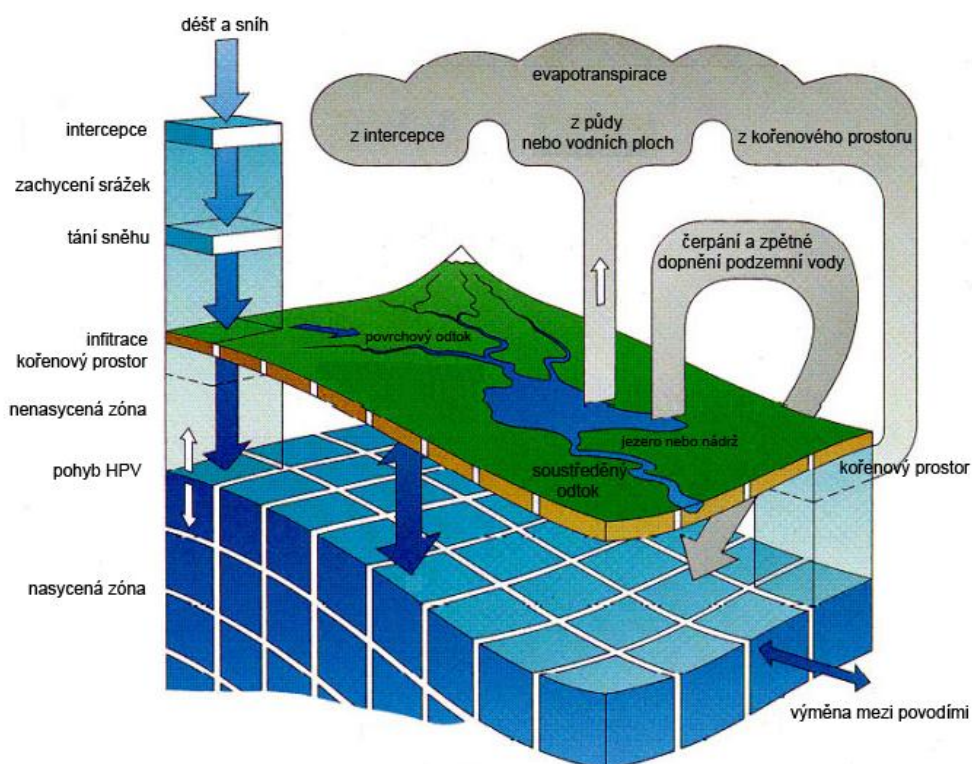
Model Mike SHE zahrnuje hlavní procesy v hydrologickém cyklu a obsahuje komponenty pro jejich výpočet v jednotlivých fázích (evapotranspirace a srážky, povrchový odtok z povodí, podpovrchový odtok v nenasycené zóně půdního profilu, podzemní odtok, odtok v korytě a jejich interakce). Každý z těchto procesů může být dle cíle studie, dostupnosti dat a rozhodnutí uživatele zastoupen na různých úrovních územního rozložení a složitosti. Jednotlivé simulované procesy v modelu Mike SHE jsou znázorněny na obrázku 3-10.

Základní komponenty Mike SHE

- **Evapotranspirace** - ze vstupních časových řad referenční evapotranspirace se počítají aktuální hodnoty pomocí Kristensen-Jensenovy metody na základě aktuálního obsahu vody v půdě a vegetačního pokryvu,
- **povrchový odtok** – výpočet založen na 2D metodě konečných diferencí šíření vlny,
- **soustředěný odtok** – komponenta MIKE 11 - 1D kinematická vlna aproximovaná metodou konečných rozdílů ve vystřídáném schématu,
- **podpovrchový odtok v nenasycené zóně** – pro výpočet proudění v zóně mezi povrchovým odtokem a hladinou podzemní vody je používána 1D

vertikální aproximace Richardsovy rovnice, nenasycená zóna je složena ze tří schematizovaných půdních horizontů,

- **podzemní odtok** - 2D a 3D model prodění podzemní vody založený na metodě konečných diferencí,
- **tání sněhu** - degree-day faktor pro stanovení empirického vztahu mezi teplotou vzduchu a mírou tání.



Obrázek 3-10: Simulované hydrologické procesy modelem Mike SHE

zdroj: (WWW.DHI.COM) přeloženo do českého jazyka

3.2.2 Nároky na vstupní data

Srážkoodtokový model Mike SHE pracuje s ASCII formáty, prostřednictvím GIS nadstaveb zpracovává data ve formátu ESRI shapefile, která lze převést do DHI formátů.

Model Mike SHE nemá stanovená povinná data. Povinná vstupní data se odvíjejí od modelovaných hydrologických procesů a od problémů, které mají být řešeny. Nicméně následující základní charakteristiky modelu jsou dle *DHI (2009)* požadovány ve většině případů modelování:

- **simulační plocha** – nejčastěji ve formě polygonu,
- **topografie** – jako bodová nebo mřížková data,
- **srážky** – naměřené hodnoty.

Dalšími daty, která Mike SHE nejčastěji vyžaduje vzhledem k modelovaným hydrologickým procesům, jsou:

- **referenční evapotranspirace** – staniční data nebo výpočty z meteorologických dat,
- **teplota vzduchu** – pro výpočet tání sněhu,
- **solární radiace** – pro výpočet tání sněhu,
- **vymezení dílčích povodí** – pro rozdělení odtoku v povodí,
- **říční síť** – směrové řešení a příčné řezy pro výpočet soustředěného odtoku,
- **landuse** – využití území pro výpočet odtoku,
- **půdní poměry** – pro výpočet infiltrace a odtoku,
- **geologie** – pro výpočet podpovrchového odtoku.

3.2.3 Kalibrace modelu

Kalibrace je proces, při němž se iteračně mění hodnoty parametrů a testuje se shoda pozorovaného a simulovaného hydrogramu, s cílem nalézt nejvhodnější sadu parametrů poskytující nejlepší shodu simulace a pozorování pro kalibrované povodí (DAÑHELKA, 2007).

Srážkoodtokový model Mike SHE lze kalibrovat ručně, což je dlouhotrvající proces, nebo lze použít nástroj AUOTOCAL. Ten je také produktem dánské společnosti DHI a slouží pro automatickou kalibraci a optimalizaci parametrů modelových nástrojů skupiny Mike ZERO.

Úspěšnost kalibrace je hodnocena použitím objektivních statistických kritérií, důležité a nezastupitelné je ale rovněž vizuální posouzení shody simulované a pozorované řady. Kalibrační odvozenou sadu parametrů nelze nikdy považovat za dokonalou. Její platnost je v podstatě omezena na velikostní rozsah událostí vyskytujících se v kalibračním a validačním období a v daný stav povodí (DAÑHELKA, 2007).

4. Metody

4.1 Úprava vstupních dat a nastavení modelu

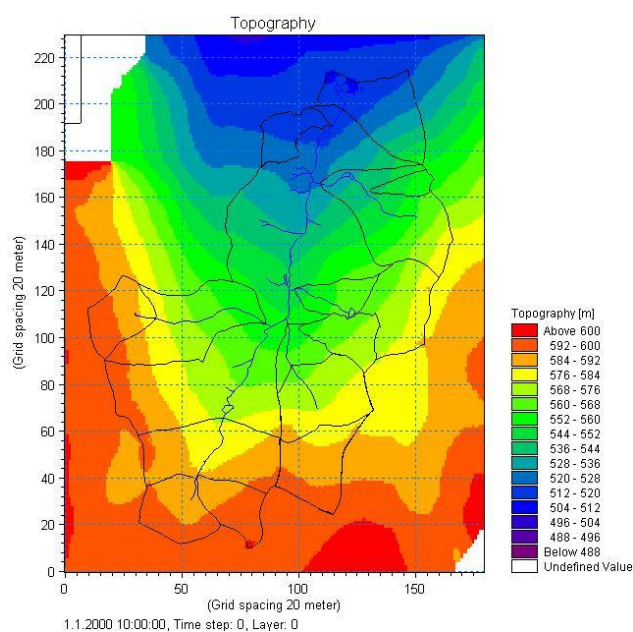
Pro simulaci hydrologických procesů na povodí Kopaninského potoka byly zvoleny hydrologické roky 2006 a 2007. Díky kontinuálním měřením VÚMOPu na povodí byla data pro potřeby této práce z velké části dostupná. Pro vstup do modelu je však bylo nutné zpracovat či upravit do vhodné podoby pro model Mike SHE.

Simulační plocha (Model domain and grid)

Simulační plocha složí k určení a prostorovému vymezení modelovaného území. Její nastavení je základní krok v Mike SHE. Všechna následně definovaná prostorová data, jako například topografie, jsou před zpracováním interpolována do této plochy. Pro její určení lze použít nadefinovaný DHI soubor ve formátu *.dfs2 nebo GIS polygon ve formátu *.shp.

Topografie

Digitální model terénu byl vytvořen modelem Mike SHE na základě interpolace vrstevnic o intervalu 2 m, které byly do modelu vloženy v GIS formátu *.shp. Výsledný DMT je zobrazen na obr. 4-1.



Obrázek 4-1: DMT povodí Kopaninského potoka s vyznačením dílčích povodí a říční sítě

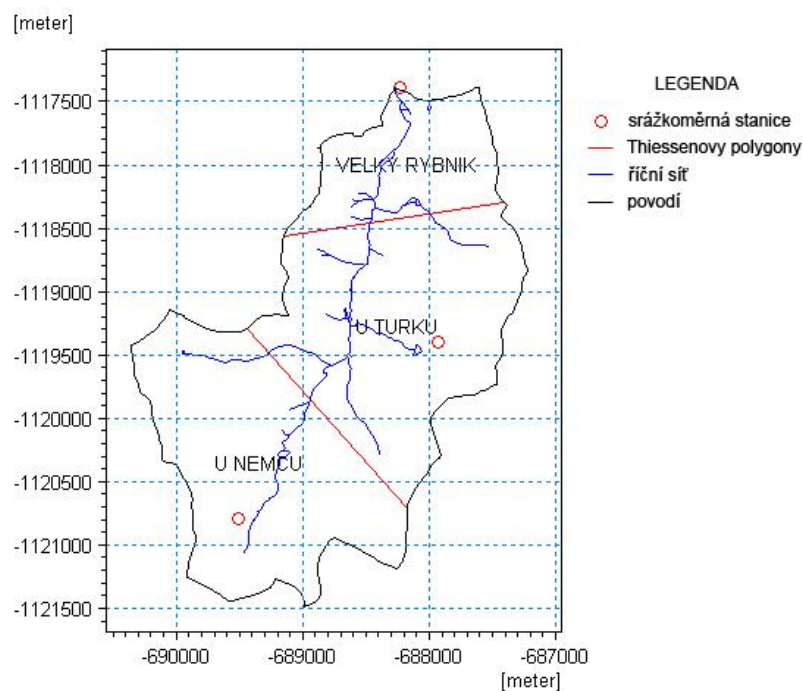
Srážky

Srážky do modelu vstupují jako časové řady denních hodinových úhrnů. Data byla získána kontinuálním měřením srážek na povodí pomocí automatické meteorologické stanice AS1 a srážkoměrných stanic „U Turků“ a „U Němců“. Hodinové intervaly jsou zaznamenávány pouze automatickou stanicí. Data ze zbylých stanic mají interval denní, proto byla upravena pomocí vzorců:

$$Sh_T = \frac{Sh_{AS1}}{Sd_{AS1}} \times Sd_T ; Sh_N = \frac{Sh_{AS1}}{Sd_{AS1}} \times Sd_N$$

kde: Sh_T = hodinový úhrn srážek pro daný den a hodinu ve stanici „U Turků“,
 Sd_T = denní úhrn srážek pro daný den ve stanici „U Turků“,
 Sh_N = hodinový úhrn srážek pro daný den a hodinu ve stanici „U Němců“,
 Sd_N = denní úhrn srážek pro daný den ve stanici „U Němců“,
 Sh_{AS1} = hodinový úhrn srážek pro daný den a hodinu ve stanici AS1,
 Sd_{AS1} = denní úhrn srážek pro daný den ve stanici AS1.

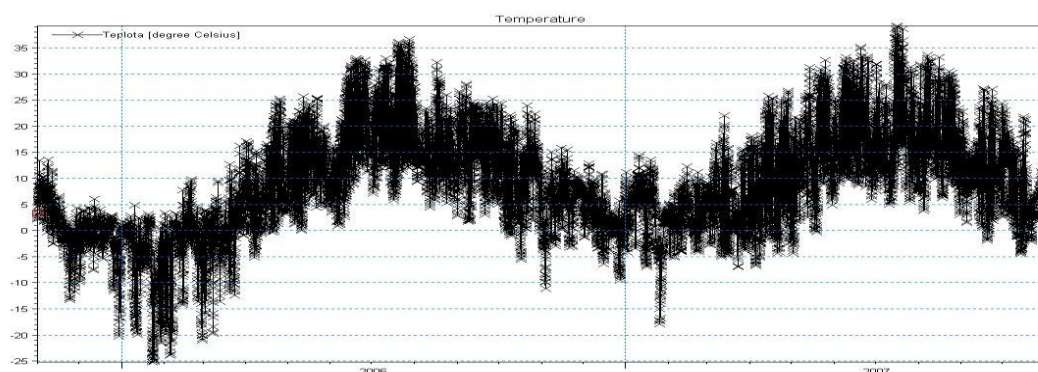
Průměrná srážka pro povodí Kopaninského potoka byla stanovena metodou Thiessenových polygonů. Výsledné rozdělení je viditelné na obr. 4-2.



Obrázek 4-2: Rozdělení povodí Thiessenovými polygony

Teplota vzduchu

Obdobně jako srážky vstupuje teplota vzduchu do modelu v podobě časových řad s hodinovým intervalem (obrázek 4-3). Teplota byla měřena ve dvoumetrové výšce automatickou meteorologickou stanicí.



Obrázek 4-3: Časová řada naměřených hodinových hodnot teploty vzduchu pro hydrologické roky 2006 a 2007

Degree-day faktor

Degree-day modely předpokládají empirický vztah mezi teplotou vzduchu a mírou tání. Teplota vzduchu je nejčastěji používaná proměnná, ale i jiné proměnné, jako čistá radiace, rychlost větru, tlak vodních par nebo sluneční záření, jsou rovněž používány (SINGH, SINGH, 2001).

Evapotranspirace

Hodnoty vstupní časové řady referenční evapotranspirace se počítají Penman-Monteith metodou. Základní vzorec pro výpočet referenční evapotranspirace podle metodiky FAO je následující:

$$ET = \frac{0,408 * \Delta * (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T - 273,16} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * u_2)}$$

kde:

ET = referenční evapotranspirace [$\text{mm} \cdot \text{den}^{-1}$],

R_n = radiace na povrchu hypotetického povrchu, v podstatě její bilance [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

G = tok tepla v půdě [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{den}^{-1}$],

T = teplota vzduchu ve 2 m [$^{\circ}\text{C}$],

u_2 = rychlost větru ve 2 m [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

e_s = tlak nasycení vodní páry při teplotě měřené v meteorologické budce
[kPa],

e_a = tlak vodní páry vypočítaný podle teploty měřené v meteorologické budce
[kPa],

$e_s - e_a$ = sytostní doplněk [kPa],

Δ = sklon křivky napětí vodních par při dané teplotě vzduchu, tj. derivace
závislosti mezi měrnou vlhkostí vzduchu nasyceného vodními parami a
teplotou vzduchu [$\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$],

γ = psychrometrická konstanta [$\text{kPa}\cdot\text{°C}^{-1}$].

Uvedený vzorec pro výpočet referenční evapotranspirace byl odvozen z originální Penman-Monteithovy rovnice a z rovnic pro výpočet aerodynamického a povrchového odporu. Po příslušné úpravě ho lze použít i pro výpočet referenční evapotranspirace v jiném časovém horizontu - hodina, 10 dní, měsíc (KOHUT, 2003).

Ze vstupních časových řad referenční evapotranspirace si model Mike SHE počítá aktuální hodnoty evapotranspirace pomocí Kristensen-Jensenovy metody, která zohledňuje i vegetační pokryv, respektive redukční funkce odvozené z LAI a hloubky kořenového systému, a obsah vody v půdě.

$$E_{AT} = f_1(LAI) \cdot f_2(\theta) \cdot RDF \cdot ET$$

kde:

E_{AT} = aktuální evapotranspirace ($\text{mm}\cdot\text{den}^{-1}$),

$f_1(LAI)$ = funkce založená na ploše listové pokrývnosti,

$f_2(\theta)$ = funkce založená na vlhkosti půdního profilu v kořenové zóně,

RDF = funkce kořenového systému,

ET = referenční evapotranspirace.

LAI

Index listové plochy (obvykle zkrácený na LAI nebo jednoduše na L) je definován jako celková jednostranná plocha všech listů v nadzemní části ve vybraném regionu. Je to bezrozměrná veličina, ačkoliv jednotka m^2/m^2 je často uvedena jako připomínka jejího významu (GOBRON, VERSTRAETE, 2008). Zjednodušeně je LAI množství listové plochy nadzemní části vegetace na jednotku povrchu plochy.

LAI je klíčová konstrukční charakteristika vegetace a zemského pokryvu kvůli úloze zelených listů v širokém rozsahu biologických a fyzikálních procesů - například evapotranspirace (SCURLOCK *et al.*, 2001).

Hodnoty LAI jsou ve srážkoodtokovém modelu Mike SHE součástí využití území a vstupují také do výpočtu aktuální evapotranspirace. Průběh LAI pro jednotlivé zemědělské plodiny, které se v průběhu simulované doby objevily, a pro lesní porost byl odhadován na základě těchto zdrojů: ELLEN (2003), HAY, PORTER (2006), KOSTREJ (1998), MARKOVÁ (2002), OLŠOVSKÁ *et al.* (2007), PETR, ČERNÝ (1980), SCURLOCK (2001), SMITH *et al.* (2003), VAŠÁK (2000), ŽALUD (1993).

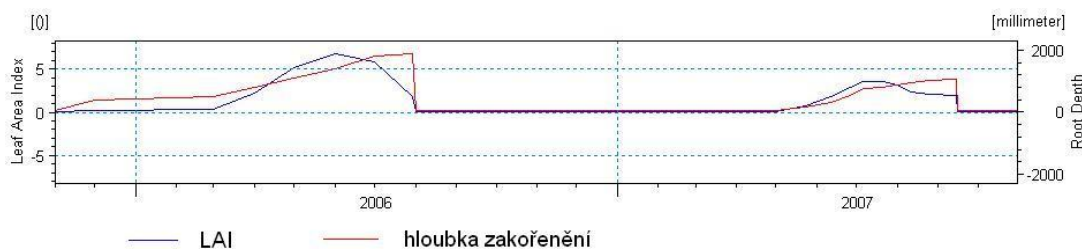
Hloubka kořenového systému

Kořeny pěstovaných rostlin jsou podzemní částí, která se široce rozšiřuje napříč zemědělskou půdou a absorbuje vodu a minerály, které kořeny vedou do stonku a listů (WEAVER, 1926). Hloubka, kterou jsou kořeny rostlin schopny dosáhnout, má důležitý význam pro celou hydrologickou bilanci ekosystému a také pro cyklus uhlíku a živin (CANADELL *et al.*, 1996).

Obdobně jako LAI byla hloubka kořenového systému odhadována pro veškeré plodiny rostoucí na zájmové ploše povodí po dobu simulovaného období. Pokladem pro odhad byly tyto zdroje: CANADELL (1996), WEAVER (1926).

Využití území – Land Use

Veškerá plocha pozemků na povodí byla rozčleněna do jedenácti tříd dle jejich využití v hydrologickém roce 2006, 2007. Byly použity tyto třídy: parcela nenalezena v SPI, stavební parcela, orná půda, zahrady, ovocné sady, louky, pastviny, lesy, vodní plochy, zastavěné plochy, ostatní plochy. U orné půdy bylo dále zjišťováno, jaké plodiny se na ní v tomto dvouletém intervalu pěstovaly. Výsledkem tohoto šetření bylo 85 kombinací využití půdy, pro které byly stanoveny hodnoty LAI a hloubky kořenového systému. Ukázka využití orné půdy je na obr. 4-4.



Obrázek 4-4: Časová řada modelových hodnot LAI a hloubky zakoření pro pšenici ozimou a kukuřici

Nenasycená zóna

Rozmístění HPJ na povodí byla stanovena ze získaných podkladů vymežující BPEJ. Složení půdních profilů bylo určeno následovně (obrázek 4-1): horních 3,95 m profilu bylo rozděleno na 3 horizonty (A, B, C). Těmto horizontům byly přiřazeny hydraulické charakteristiky, které byly pro účely jiné práce laboratorně zjištěny z v terénu odebraných vzorků. Z důvodu, že hydrologické vlastnosti horizontů HPJ 67 nebyly k dispozici, byla HPJ 67 sjednocena s HPJ 73.

Horizont	Hloubka od [m]	Hloubka do [m]
A	0,00	0,25
B	0,25	0,55
C	0,55	3,95

Tabulka 4-1: Hloubky horizontů pro všechny HPJ

Nasyčená zóna

Nasyčená zóna v použitém modelu je zjednodušeně schematizována jako 1 vrstva proměnné mocnosti s jednotnými hydraulickými parametry pro jednotlivé půdní horizonty.

Drenáž

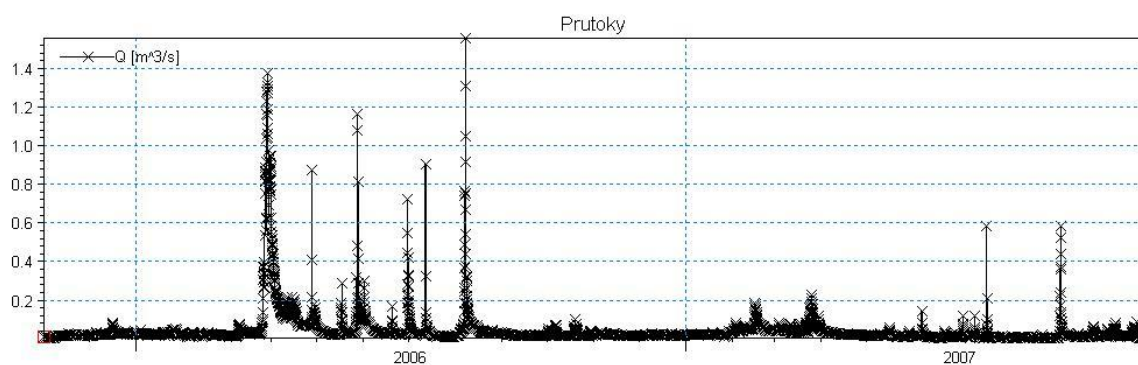
Pro určení odvodněných území byly použity digitalizované podklady (projekty odvodnění, které byly přizpůsobené pro použití modelem Mike SHE).

Říční síť

Během terénního průzkumu území byly GPS metodou zaznamenávány souřadnice lomových bodů toků společně s jejich příčnými profily. Získané údaje byly vloženy do Mike 11. Tato komponenta se skládá ze čtyř hlavních součástí (Network, Cross-sections, Boundary data a HD parameters), které definují soustředěný odtok.

Průtoky

Pro možnost porovnání modelových hodnot průtoků s měřeními stavy je nutné zadat do modelu časovou řadu měřených dvouhodinových průtoků v daném bodě (obrázek 4-5). V tomto případě byly použity průtoky z uzávěrového profilu T7U, pro jejichž měření se používá Thomsonův přepad vybavený ultrazvukovým snímačem výšky hladiny vody nad přepadem s kontinuálním záznamem. Pro dosažení co největší shody modelových průtoků s měřeními probíhá model tzv. kalibrací.



Obrázek 4-5: Časová řada měřených průtoků v uzávěrovém profilu T7U

4.2 Kalibrace a validace modelu

Kalibrace probíhala na datech z uzávěrového profilu T7U z období od 1. 11. 2005 až 31. 10. 2006. Model byl nejprve otestován na hrubé chyby a poté byla provedena hrubá ruční kalibrace, tzn., že hlavní parametry byly ručně upravovány na hodnoty, při kterých se výsledný simulovaný průtok významně přiblíží naměřeným údajům z uzávěrového profilu. Mezi hlavní parametry byly brány:

- a) nasycená půdní vodivost půdních horizontů v nenasycené zóně,
- b) horizontální a vertikální vodivost půdního profilu v nasycené zóně,
- c) drainage time constant - soubor faktorů ovlivňujících režim proudění na odvodněných lokalitách,
- d) bypass – objem srážek vstupující přímo do nasycené zóny prostřednictvím preferenčních cest,
- e) degree-day faktor.

Po hrubé kalibraci byla použita aplikace AUTOCAL. Tato aplikace optimalizovala nastavení hlavních parametrů do podoby, při které simulace nejlépe odpovídala pozorování.

Validace modelu slouží pro potvrzení vhodného nastavení parametrů i pro období, na které nebylo kalibrováno. V tomto případě validace probíhala na hydrologickém roce 2007.

Úspěšnost simulace je obvykle hodnocena pomocí porovnání pozorovaných a simulovaných proměnných. V případě modelu Mike SHE je úspěšnost udávána i pomocí statistických koeficientů, které model sám vypočítává v rámci simulace. V případě této práce byl brán ohled zejména na Nash-Sutcliffe koeficient (R^2) neboli na koeficient účinnosti předpovědi. Dalšími koeficienty, které model vypočítává, jsou: průměrná chyba (ME), průměrná absolutní chyba (MAE), směrodatná odchylka reziduí (STDres) a korelační koeficient (R).

- **Nash-Sutcliffe koeficient (R2)** – nejčastěji používaná bezrozměrná charakteristika pro hodnocení účinnosti modelu, která se dnes řadí ke standardům WMO a umožňuje srovnání přesnosti modelů na různých povodích.

$$R2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \overline{Qobs})^2}$$

kde:

$R2$ = Nash-Sutcliffe koeficient,

$Qobs_i$ = měřený průtok v daném čase i ,

$Qsim_i$ = simulovaný průtok v daném čase i ,

\overline{Qobs} = průměrná hodnota měřených průtoků.

Rozsah hodnot $R2$ je v oblasti 1 až $-\infty$. Pokud je $R2 = 1$ znamená to nejlepší možnou shodu parametrů. Hodnota $R2 < 0$ udává, že lepším odhadem je dlouhodobá průměrná hodnota parametru než náš výstup modelu (KRAUSE *et al.*, 2005).

- **průměrná chyba (ME)** – je dána jako průměrný rozdíl n pozorování v daném bodě t a čase i .

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)}{n}$$

kde:

ME = průměrná chyba,

$Qobs_i$ = měřený průtok v daném čase i ,

$Qsim_i$ = simulovaný průtok v daném čase i ,

n = počet pozorování.

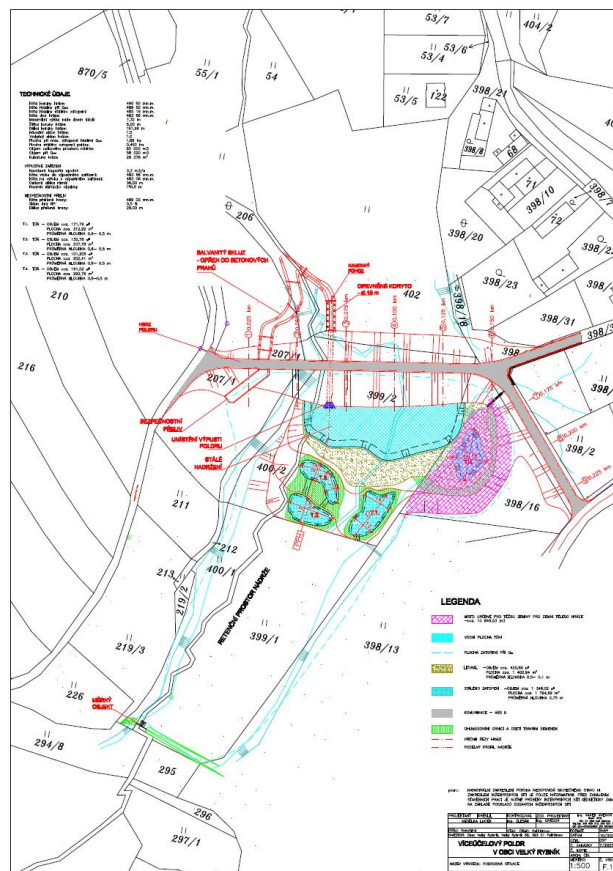
Dle kladné či záporné hodnoty průměrné chyby (ME) lze stanovit, zda je model oproti skutečnosti nadhodnocen (záporná hodnota) nebo podhodnocen (kladná hodnota).

4.3 Navrhovaná protipovodňová opatření

Pro testování a hodnocení protipovodňových opatření byly vybrány ty, které by bylo možno reálně aplikovat na povodí Kopaninského potoka. Jako nejvhodnější se z hlediska modelování v Mike SHE jevílo protipovodňové zatravnění a návrh víceúčelového poldru v dolním toku Kopaninského toku.

4.3.1 Víceúčelový poldr

Vybudování suché nebo polosuché nádrže je účinné technické protipovodňové opatření, kterým lze dosáhnout snížení kulminačního průtoku povodně a rozložení objemu povodňové vlny do delšího časového intervalu dočasnou akumulací vody. Návrh poldru v Mike SHE byl proveden dle projektové dokumentace, kterou pro obec Velký Rybník v roce 2009 vyhotovila projekční kancelář Ing. Radka Gregora ze Žďáru nad Sázavou (obrázek 4-6). Umístění v povodí je vyznačeno na obrázku 4-7.



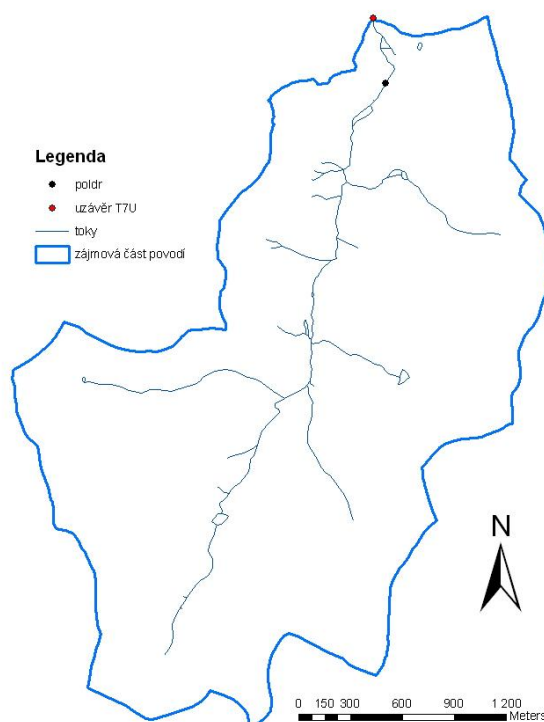
Obrázek 4-6: Ukázka projektové dokumentace víceúčelového poldru v obci Velký Rybník

zdroj: (GREGOR, 2009)

Dle projektu je stavba dimenzována na stoleté průtoky (Q_{100}), které jsou rovny $14,03 \text{ m}^3/\text{s}$. Nastavení parametrů poldru (tabulka 4-2) proběhlo v komponentě Mike 11, která definuje soustředěný odtok v modelu. Rozměry zátopové oblasti poldru byly specifikovány pomocí příčných řezů. Těleso hráze a výpustné zařízení byly nastaveny dle projektové dokumentace a vloženy jako objekt do toku potoka.

Vybrané technické charakteristiky poldru	
objem celkového prostoru nádrže	$60\,000 \text{ m}^3$
plocha při max. zátopové hladině Q_{100}	1,88 ha
objem stálého zatopení	$1\,346,02 \text{ m}^3$
plocha stálého zatopení	0,492 ha
průměrná hloubka stálého zatopení	0,75 m
výška hráze v nejvyšším bodě	7,32 m
délka koruny hráze	191,28 m
rozměr škrtícího objektu	1 x 0,5 m
spodní kapacita výpustného zařízení	$3,3 \text{ m}^3/\text{s}$
délka výpustného zařízení	30 m

Tabulka 4-2: Vybrané technické charakteristiky návrhu víceúčelového poldru v obci Velký Rybník



Obrázek 4-7: Umístění poldru v zájmové části povodí

4.3.2 Zatravnění území

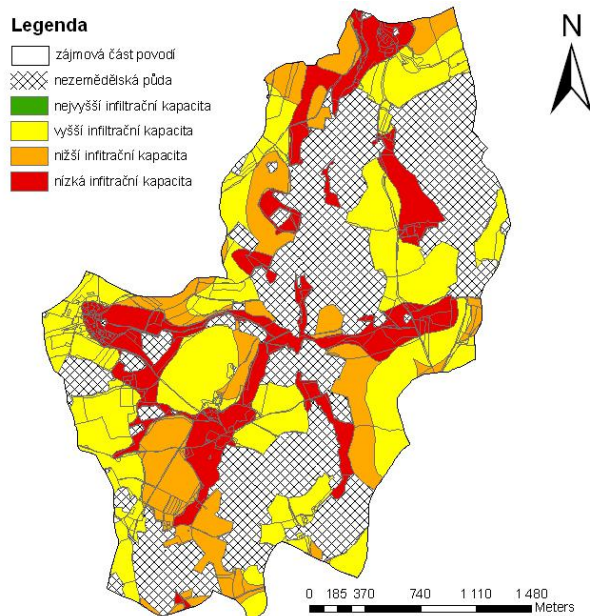
Zatravnění území se řadí do skupiny technických protipovodňových opatření zvyšující retenční schopnost krajiny. Vodohospodářská funkce trvalých travních porostů spočívá v tom, že travní porost během vegetačního období dokáže díky vyššímu obsahu půdní organické hmoty, dobré půdní struktuře a pórovitosti zachytit ve svém půdním profilu poměrně značné množství srážek a minimalizovat povrchový odtok (*KVÍTEK et al., 2007*). Z katalogu vodohospodářských opatření vydaný Ministerstvem zemědělství (*MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2005*) vyplývá, že zlepšení retence v oblasti kořenů travního porostu (cca do 0,2 m) se pohybuje v rozmezí 8 – 10 %. Pro vyhodnocení účinnosti zatravnění byly provedeny dvě simulace. V prvním případě se jednalo o simulaci, u které bylo změněno pouze využití území. Pro druhou simulaci byla u všech půd, kde došlo k zatravnění, o 10 % zvýšena retence půdního horizontu A.

Vyhotoveny byly tři samostatné návrhy zatravnění. Každý z nich se řídil dle jiného principu:

- zatravnění dle infiltrační kapacity půdy,
- zatravnění dle svažitosti území,
- zatravnění dle infiltrační kapacity a svažitosti terénu.

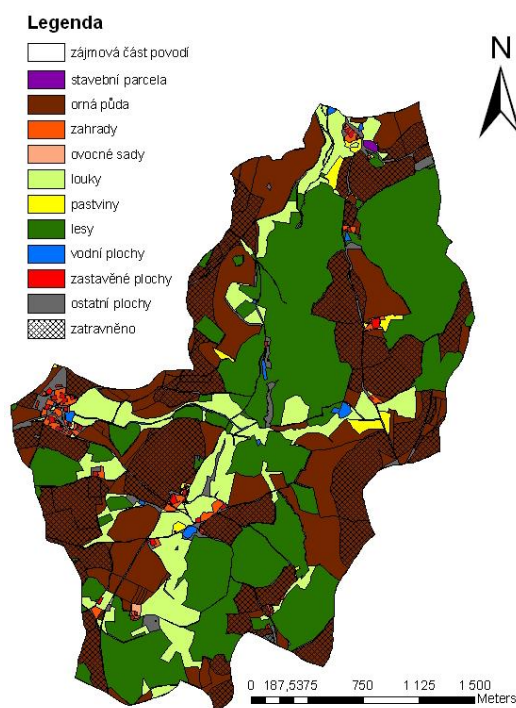
4.3.2.1 Zatravnění půdy dle infiltrační kapacity

Vymezení rozsahu potenciálně zatravnitelných půd vycházelo z uplatnění kategorizace půdy dle jejich infiltrační kapacity. Tato kategorizace je cílem vědecké práce od autorů *JANGLOVÁ, KVÍTEK, NOVÁK (2003)*, jejímž výsledkem byly mimo jiné i podklady pro povodí Kopaninského potoka s určenou infiltrační kapacitou půd na základě BPEJ. Tyto podklady byly upraveny pro potřeby této práce do podoby vyjádřené na obrázku 4-8.



Obrázek 4-8: Infiltrační kapacita půdy na základě syntézy materiálů BPEJ

Pro trvalé zatravnění byla zvolena orná půda s vyšší a s nejvyšší infiltrační kapacitou a nezemědělské půdy. Ty v dané době nesměly již být zatravněny nebo zalesněny a nesměly být využívány jako zahrady, ovocné sady, vodní plochy, stavební pozemky, zastavěné plochy či jako ostatní plochy. Návrh zatravnění je zobrazen obrázkem 4-9, pod kterým jsou v tabulce 4-3 přiloženy charakteristiky území po zatravnění.



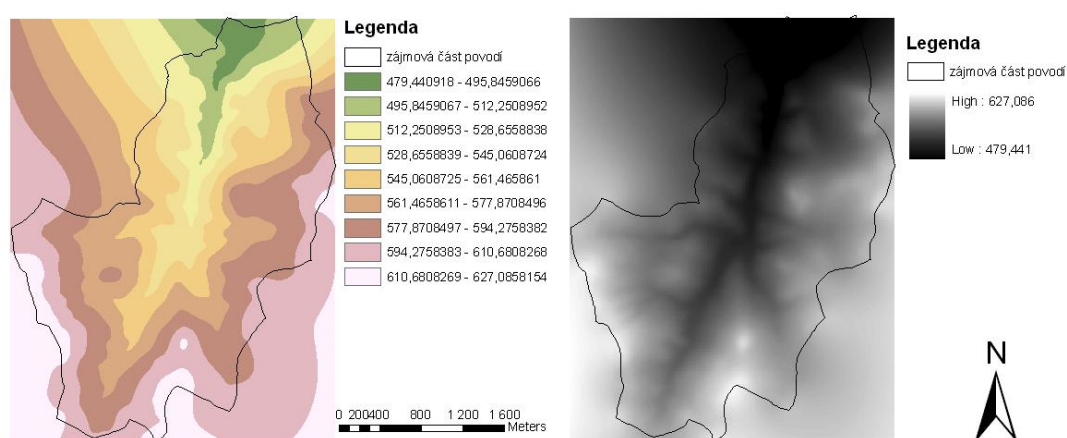
Obrázek 4-9: Návrh zatravnění na základě infiltrační kapacity půd

	Rozloha	Procenta
celková plocha zájmové oblasti	710,30 ha	100 %
původní výměra orné půdy	294,66 ha	41,48 %
nová výměra orné půdy	110,19 ha	15,51 %
původní výměra zatravněné plochy	112,98 ha	15,91 %
nově zatravněná plocha	184,55 ha	25,98 %
nová výměra zatravněné plochy	297,53 ha	41,89 %

Tabulka 4-3: Charakteristiky zájmové části povodí před a po návrhu zatravnění dle infiltrace v roce 2006

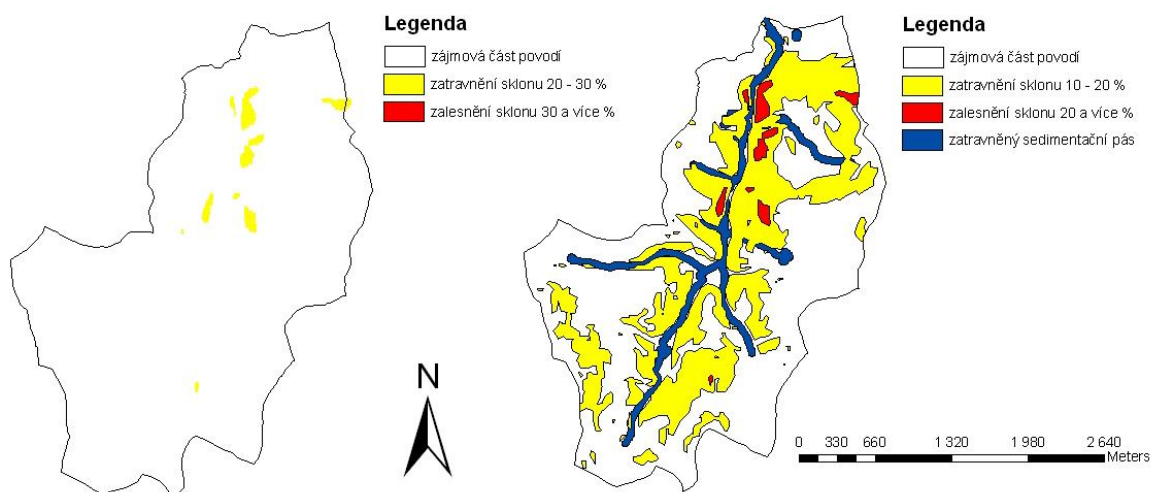
4.3.2.2 Zatravnění půdy dle svazitosti terénu

Druhý protipovodňový návrh zatravnění zvyšující retenční schopnost oblasti je založen na svahových podmínkách povodí. Na základě vrstevnic byl vytvořen v programu ArcGIS rastrový model výškových poměrů ukázaný na obrázku 4-10. Z tohoto modelu byl následně vygenerován model sklonitosti území, ze kterého vychází návrh zatravnění.



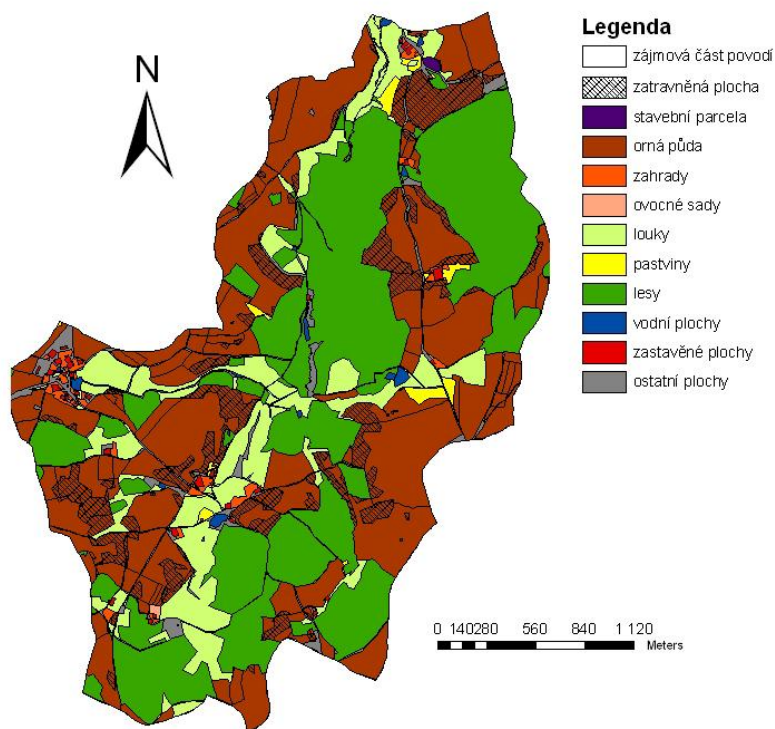
Obrázek 4-10: Výškové poměry

Návrh zatravnění měl v tomto případě dodržovat původní předpoklad, že orná půda se sklonitostí od 0 – 20 % bude moci dále plnit svou funkci, orná půda se sklonem od 20 – 30 % bude zatravněna a orná půda se sklonem nad 30 % bude určena k zalesnění. Po přehodnocení, které proběhlo na základě rozlohy plochy, která měla být zatravněna či zalesněna, se rozmezí hodnot sklonu upravilo. Pro zatravnění byl určen sklon v rozmezí 10 – 20 % a pro zalesnění 20 – 30 %. K zatravnění byly také navrženy 30 m sedimentační pásy od břehové čáry všech vodních toků. Na obrázku 4-11 jsou obě tyto situace viditelné.



Obrázek 4-11: Rozsah zatravnění na základě sklonu území

Z tohoto návrhu byly odebrány již zatravněné a lesní pozemky a pozemky nevhodné pro zatravnění či zalesnění (zahrady, ovocné sady, vodní plochy, stavební pozemky, zastavěné plochy, ostatní plochy). Po této úpravě nezbyly žádné pozemky k zalesnění. Finální podobu návrhu vystihuje obrázek 4-12 spolu s tabulkou 4-4.



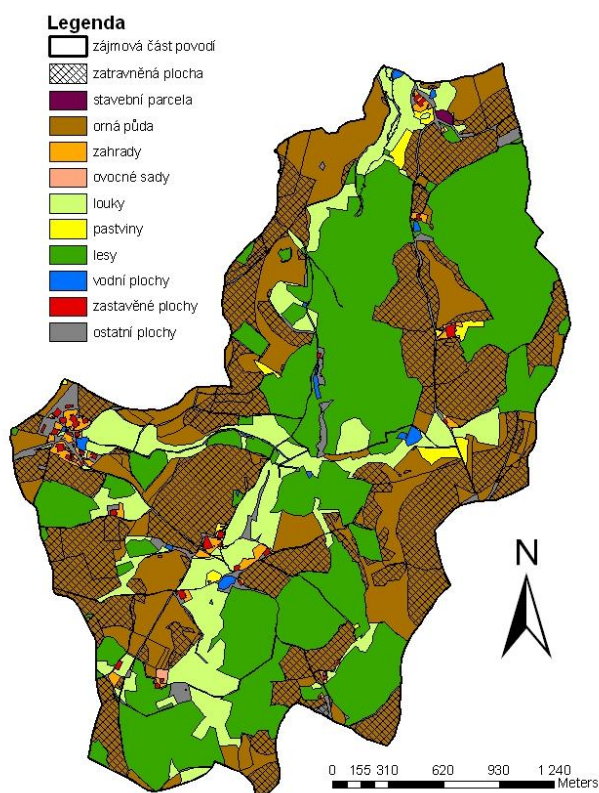
Obrázek 4-12: Návrh zatravnění na základě sklonu území

	Rozloha	Procenta
celková plocha zájmové oblasti	710,30 ha	100 %
původní výměra orné půdy	294,66 ha	41,48 %
nová výměra orné půdy	252,12 ha	35,50 %
původní výměra zatravněné plochy	112,98 ha	15,91 %
nově zatravněná plocha	61,88 ha	8,71 %
nová výměra zatravněné plochy	174, 86 ha	24,62 %

Tabulka 4-4: Charakteristiky zájmové části povodí před a po návrhu zatravnění dle sklonu

4.3.2.3 Zatravnění dle infiltrační kapacity a svažitosti terénu

V této variantě protipovodňového opatření byly použity obě dvě předcházející metody vymezení zatravnění. Zvýšení retenční kapacity a změna evapotranspirace pomocí zatravnění by se v tomto případě mělo na změně průtokových hodnot v uzávěrovém profilu T7U projevit nejznatelněji. Znázornění návrhu zatravnění vystihuje obrázek 4-13 a statistiky jsou uvedeny v tabulce 4-5.



Obrázek 4-13: Návrh zatravnění dle infiltrační kapacity a sklonu terénu

	Rozloha	Procenta
celková plocha zájmové oblasti	710,30 ha	100 %
původní výměra orné půdy	294,66 ha	41,48 %
nová výměra orné půdy	88,88 ha	12,51 %
původní výměra zatravněné plochy	112,98 ha	15,91 %
nově zatravněná plocha	205,85 ha	28,98 %
nová výměra zatravněné plochy	318,83 ha	44,89 %

Tabulka 4-5: Charakteristiky zájmové části povodí před a po návrhu zatravnění dle infiltrační kap. a sklonu

5. Výsledky a diskuze

5.1 Kalibrace a validace modelu

Výsledky kalibrace

Kalibrace modelu na datech hydrologického roku 2006 proběhla s následným nastavením hlavních parametrů:

- nasycená půdní vodivost půdních horizontů v nenasycené zóně byla nastavena na následující hodnoty - tabulka 5-1,

půdní horizont A	$2e-05 \text{ m.s}^{-1}$
půdní horizont B	$5e-06 \text{ m.s}^{-1}$
půdní horizont C_{HPJ 729}	$7e-07 \text{ m.s}^{-1}$
půdní horizont C_{HPJ 750, HPJ 773, les}	$8e-07 \text{ m.s}^{-1}$

Tabulka 5-1: Nasycená půdní vodivost v nenasycené zóně

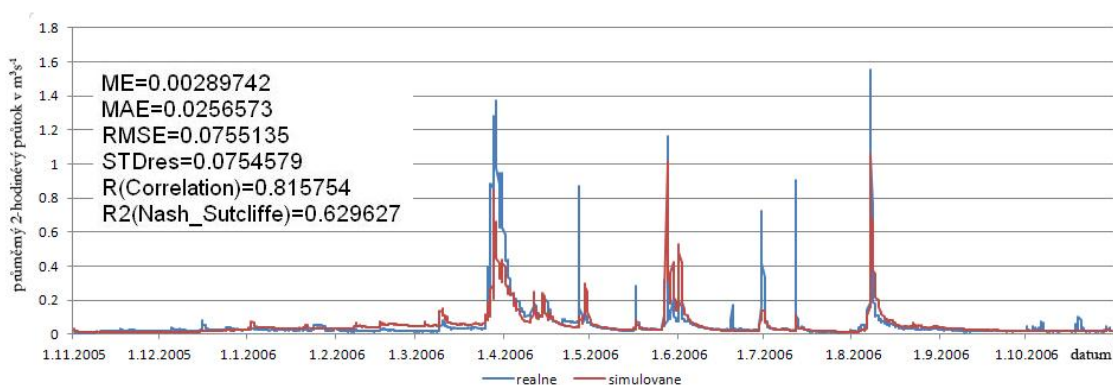
- horizontální a vertikální vodivost půdního profilu v nasycené zóně byla pro každou HPJ nastavena na odlišnou hodnotu - tabulka 5-2,

lesní půda	$1e-04 \text{ m.s}^{-1}$
HPJ 29	$5e-05 \text{ m.s}^{-1}$
HPJ 50	$8e-05 \text{ m.s}^{-1}$
HPJ 73	$1e-05 \text{ m.s}^{-1}$

Tabulka 5-2: Horizontální a vertikální vodivost v nasycené zóně

- pro drainage time constant byla zvolena hodnota $2e-06 \text{ m.s}^{-1}$,
- hodnoty bypass byly pro všechny HPJ nastaveny jednotě na hodnotu 25%,
- degree-day faktor byl v konečné verzi roven 0,8.

Model nastavený na tyto hodnoty vykazoval po simulaci následující statistické charakteristiky. Nash-Sutcliffe koeficient (R^2) = 0,6296, toto číslo představuje již poměrně dobrou shodu simulovaných hodnot s naměřenými hodnotami. U většiny srážko-odtokových situací model velmi dobře simuloval nástup vzestupné i sestupné větve, ale výsledné hodnoty kulminace pokaždé podcenil. $ME = 0.0028$ značí, že celkově model své výsledky podhodnocuje. Veškeré výsledné charakteristiky a porovnání průběhu měřených a simulovaných průtoků nalezneme na obrázku 5-1.

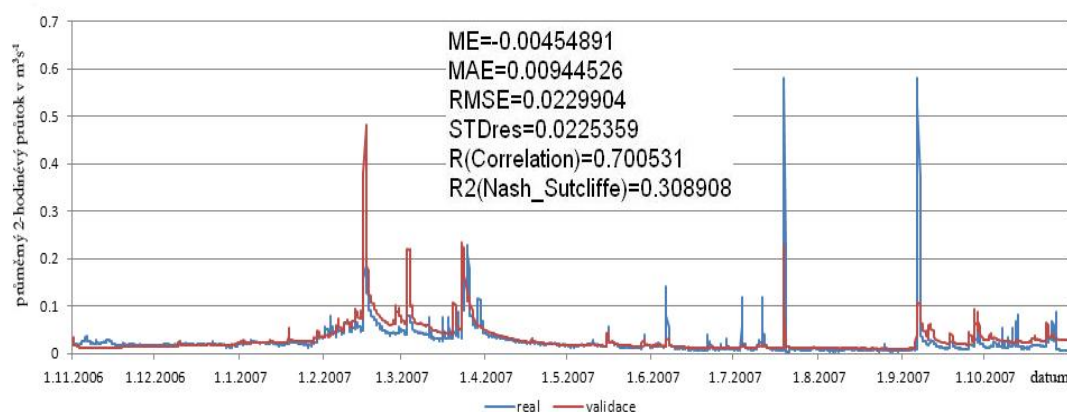


Obrázek 5-1: Průběh měřených a simulovaných průtoků v profilu T7U a výsledné statistické charakteristiky kalibrace

Výsledky validace

Validace modelu byla provedena na datech z období 1. 11. 2006 až 31. 10. 2007, respektive z hydrologického roku 2007. Statistické charakteristiky model vypočetl takto: Nash-Sutcliffe koeficient (R^2) = 0.3089, $ME = -0.0045$. Vyplnil se tímto předpoklad, že úspěšnost validace v koeficientu R^2 je znatelně nižší než v případě kalibrovaného období. Hodnota ME nám značí, že oproti kalibraci model tuto simulaci celkově nadhodnocuje. Celkově se během tohoto simulovaného období vyskytovaly srážko-odtokové situace s menšími průtoky než v hydrologickém roce 2006. Model i přesto na tyto situace relativně dobře reagoval. Úspěšně zachytil nástupní i sestupné větve, hůře si však vedl v odhadu jejich kulminace. Situacím v polovině února a na počátku března roku 2007 model kulminace znatelně nadhodnotil. S největší pravděpodobností zde špatně reagoval na tání sněhu. Naopak nejvýznamnější události téhož roku v druhé polovině července a na počátku září podhodnotil. Celý průběh simulace s konečnými charakteristikami validace obsahuje obrázek 5-2. Závěrem lze konstatovat, že dosažené hodnoty statistických veličin pro

hodnocení shody modelu s měřením je pro následné testování a hodnocení protipovodňových opatření uspokojivé.

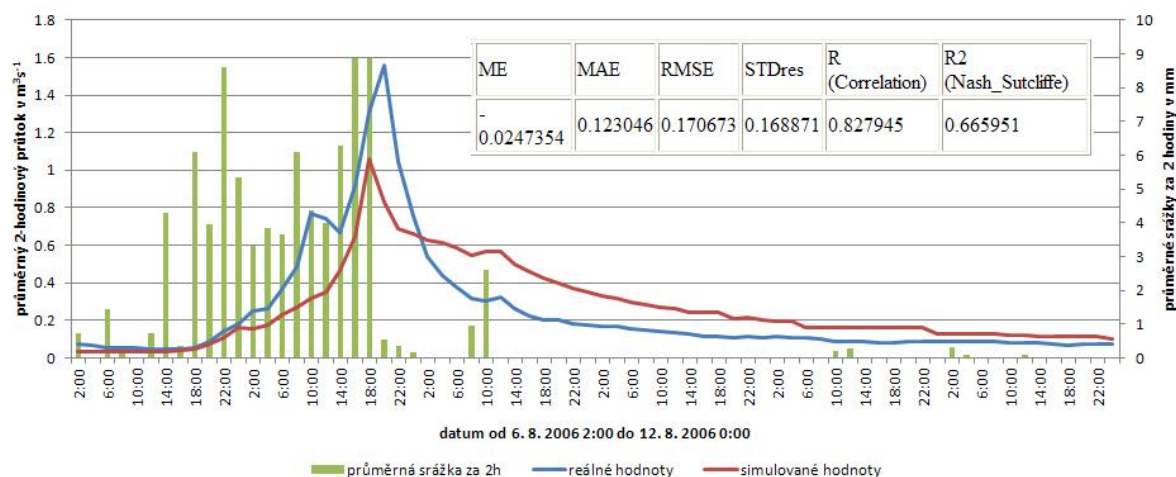


Obrázek 5-2: Průběh měřených a simulovaných průtoků v profilu T7U a výsledné statistické charakteristiky validace

5.2 Hodnocení vlivu protipovodňových opatření na vybrané situaci

5.2.1 Výběr situace

Pro testování protipovodňových opatření byla vybrána nejvýznamnější srážko-odtoková situace za období hydrologického roku 2006. Jmenovitě se jedná o situaci na počátku srpna. Situace nebyla ovlivněna táním sněhové pokrývky a nejlépe vykazovala reakci na provedená opatření. Následující obrázek 5-3 ukazuje statistické výsledky situace a průběh simulace s porovnáním s naměřenými hodnotami.



Obrázek 5-3: S-O situace z období od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006

V tomto případě model zachytil počátek nástupní větve, ale špatně odhadl její rychlost růstu. Čas kulminace srážko-odtokové situace byl posunut o 2 hodiny vpřed,

kulminační průtok model podhodnotil přibližně o $0,49 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Sestupná větev má u simulace naopak pozvolnější pokles oproti skutečnosti. Nash-Sutcliffe koeficient (R^2) = 0.6659 značí dobrou shodu modelu, který dle $ME = -0.0247$ situaci nadhodnocuje.

Abychom získali ještě lepší shodu modelu, byla tato situace podrobená automatické kalibraci nástrojem AUTOCAL. Tento nástroj metodou nejmenších čtverců automaticky vypočetl nejlepší hodnoty zadaných parametrů:

- horizontální a vertikální vodivost půdního profilu v nasycené zóně,

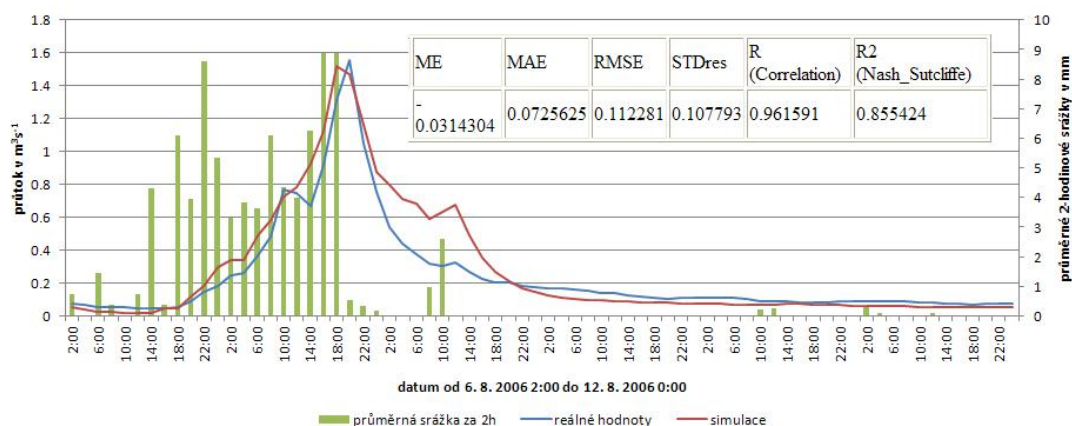
půda	horizontální vodivost	vertikální vodivost
lesní půda	$0.318\text{e-}04 \text{ m.s}^{-1}$	$0.227\text{e-}05 \text{ m.s}^{-1}$
HPJ 29	$0.163\text{e-}04 \text{ m.s}^{-1}$	$0.524\text{e-}06 \text{ m.s}^{-1}$
HPJ 50	$0.730\text{e-}05 \text{ m.s}^{-1}$	$0.139\text{e-}05 \text{ m.s}^{-1}$
HPJ 73	$0.296\text{e-}06 \text{ m.s}^{-1}$	$0.702\text{e-}05 \text{ m.s}^{-1}$

Tabulka 5-3: Horizontální a vertikální vodivost v nasycené zóně dle nástroje AUTOCAL

- drainage time constant = $0.914\text{e-}05 \text{ m.s}^{-1}$,

Nastavení parametrů na tyto hodnoty přineslo zlepšení Nash-Sutcliffe koeficientu: $R^2 = 0,8554$. Průběh simulace také lépe vizuálně odpovídá původním hodnotám, o čemž se je možno přesvědčit na obrázku 5-4.

Nástupní větev svým tvarem dobře odpovídá skutečnosti, doba kulminace se opět posunula, ale průtok v tuto dobu je téměř shodný s naměřenou hodnotou. Sestupná větev z počátku dosahuje stejného poklesu, na hodnotě $0,8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ však pokles zpomaluje. Od průtoku $0,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ však model opět dosahuje dobré shody. Toto nastavení bylo použito k testování účinnosti protipovodňových opatření a mělo by dopomoci k získání přesnějších výsledků účinnosti. V tabulce 5-4 je uvedena podrobnější charakteristika události.



Obrázek 5-4: S-O situace z období od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006 kalibrovaná nástrojem AUTOCAL

Charakteristika S-O události	Skutečnost	Simulace	Simulace AUTOCAL
počátek události	6. 8. 2006 2:00 hod		
konec události	12. 8. 2006 0:00 hod		
celkový úhrn srážek	86,3 mm		
celkový objem srážek	612 988,90 m ³		
nejvyšší hodinová srážka	7,6 mm/hod		
IPS 30	92,6 mm		
čas kulminace	7. 8. 2006 20:00	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00
kulminační průtok	1,5561 m ³ s ⁻¹	1,0602 m ³ s ⁻¹	1,5228 m ³ s ⁻¹
celkový objem odtoku	62 083,08 m ³	68 494,50 m ³	70 229,84 m ³

Tabulka 5-4: Charakteristika S-O události z období od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006

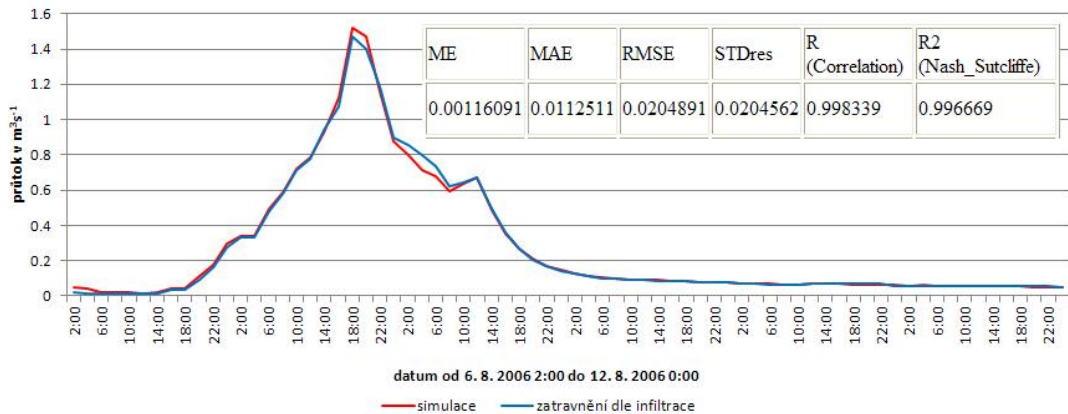
5.2.2 Hodnocení opatření

Hodnocení účinnosti jednotlivých opatření je založeno na porovnání statistických charakteristik ze simulací s opatřením a bez něj. Dále jsou porovnávány nástupné a sestupné větve, kulminační průtok a celkový objem odtoku za danou srážko-odtokovou událost v uzávěrovém profilu T7U.

5.2.2.1 Zatravnění půdy dle infiltrační kapacity

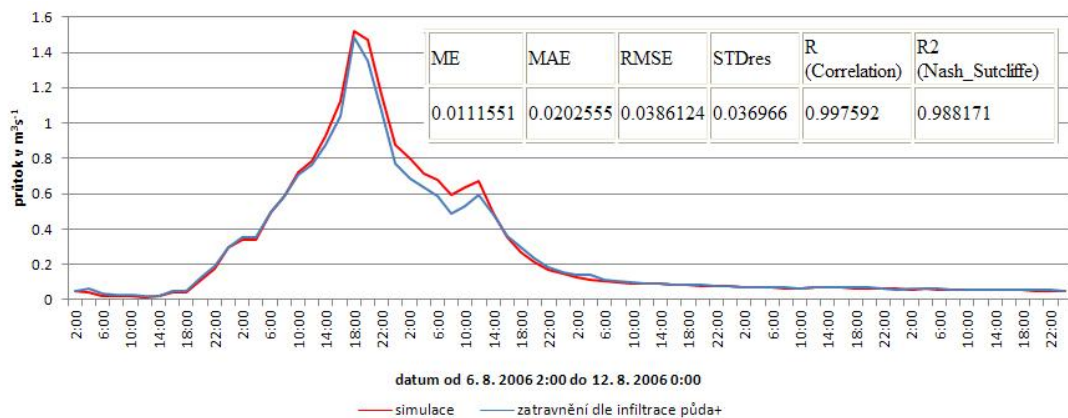
V první fázi byla provedena simulace zahrnující pouze změnu landuse. Výsledné hodnoty průtoků ovlivněné zatravněním byly porovnány se simulací vybrané srážko-odtokové situace (obrázek 5-5). Vzestupná větev měla stejný nástup jako v případě bez zatravnění, kulminační průtok se však zastavil na hodnotě 1,4713

m^3s^{-1} , což znamená snížení oproti původní simulaci o $0,0545 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Čas kulminace zůstal nezměněn. Do půlnoci ze dne 7. 8. na 8. 8. 2006 sestupná větev události klesá rovnoběžně s původní simulací. Po tomto okamžiku model vypočtené průtoky dočasně nadhodnocuje, brzy však sestupná větev opět splývá s původními hodnotami. Objem celkového odtoku profilem T7U zatravněním klesl o 0,45 % na $69\,928,96 \text{ m}^3$ (tabulka 5-5).



Obrázek 5-5: Simulace zatravnění dle infiltrace půdy bez vylepšení retenční schopnosti půd

Ve druhé části hodnocení účinnosti scénáře zatravnění na základě infiltrační schopnosti půd byla uskutečněna simulace s upravenou retencí půdního horizontu A na zatravněných plochách. Již v nástupní větvi je znatelný drobný pokles průtoků, na který v sestupné části navazuje již znatelnější pokles. Doba kulminace události zůstala nezměněna, překvapivě se však o $0,0137 \text{ m}^3$ navýšil kulminační průtok. Popisovaný hydrogram zobrazuje obrázek 5-6.

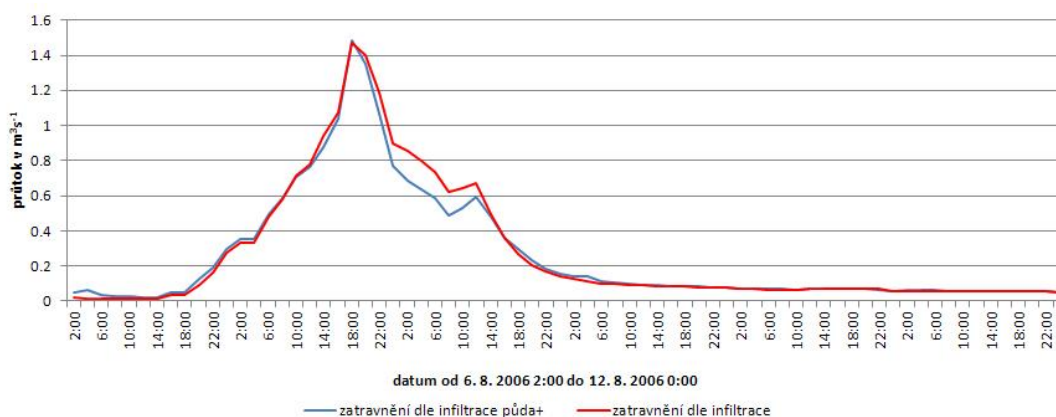


Obrázek 5-6: Simulace zatravnění dle infiltrace půdy s vylepšením retenční schopnosti půd

Zatrvnění v těchto případech sice snížilo kulminační průtoky, ale výsledný protipovodňový efekt tohoto zatrvnění by v reálné situaci nebyl příliš výrazný. V tomto případě je však dle UHLÍŘOVÁ, MAZÍN *et al.* (2005) i ve smyslu vodního zákona žádoucí stanoviště s vysokou relativní infiltrační kapacitou zatrvnit či zalesnit z důvodu ochrany vod před znečištěním živinami a kontaminanty. Celkové charakteristiky zatrvnění dle infiltrační kapacity půd uvádí tabulka 5-5. Pro komplexnost je přiloženo i porovnání obou scénářů zatrvnění (obrázek 5-7).

Charakteristika	Simulace AUTOCAL	Zatrvnění	Zatrvnění PŮDA+
počátek události	6. 8. 2006 2:00 hod		
konec události	12. 8. 2006 0:00 hod		
čas kulminace	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00
kulminační průtok	1,5228 m ³ s ⁻¹ (100 %)	1,4713 m ³ s ⁻¹ (96,62 %)	1,4850 m ³ s ⁻¹ (97,52 %)
celkový objem odtoku	70 229,84 m ³ (100 %)	69 928,96 m ³ (99,57 %)	67 338,43 m ³ (95,88 %)

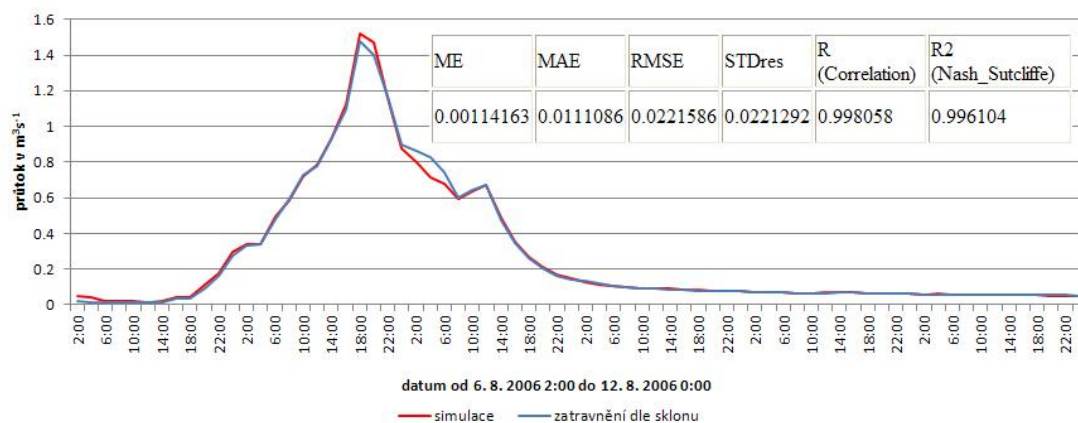
Tabulka 5-5: Charakteristiky výsledného efektu zatrvnění dle infiltrační kapacity půd



Obrázek 5-7: Porovnání scénářů zatrvnění dle infiltrace půd s a bez zlepšení retenční schopnosti půd

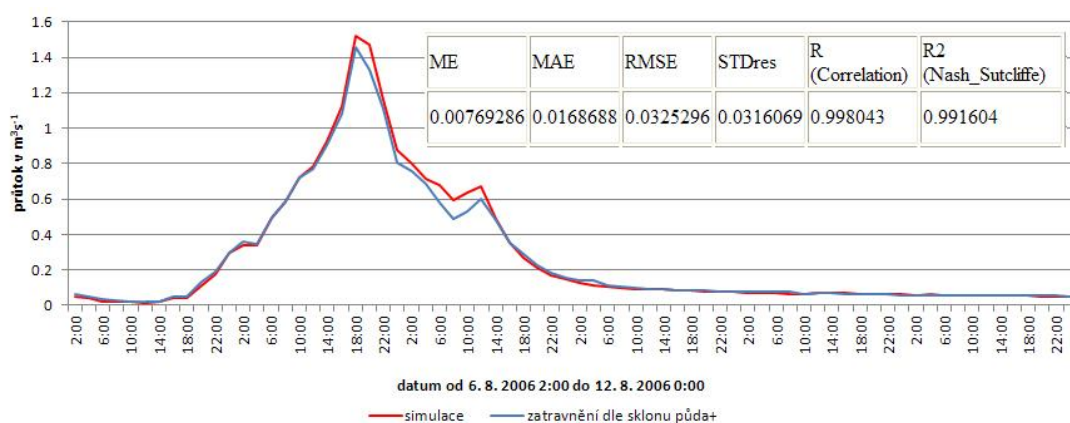
5.2.2.2 Zatrvnění půdy dle svazitosti terénu

Tento scénář zatrvnění přinesl obdobné výsledky simulací jako v případě předchozím. Vzestupná větev simulace bez vylepšených hodnot retenční kapacity (obrázek 5-8) téměř korespondovala s původními hodnotami. Kulminační průtok se zastavil na hodnotě 1,4759 m³s⁻¹, což je snížení o necelých 3,1 % oproti modelu bez zatrvnění. Uprostřed sestupné větve model vypočetl poněkud vyšší průtoky, které by však v reálné situaci již nezpůsobily výrazné problémy.



Obrázek 5-8: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu bez vylepšení retenční schopnosti půd

Po vylepšení retenční schopnosti půdního horizontu A zatravněných půd simulace vykazovala další snížení kulminačního průtoku na $1,4580 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Opět je pozorovatelný rychlejší pokles průtoků v sestupné větvi.

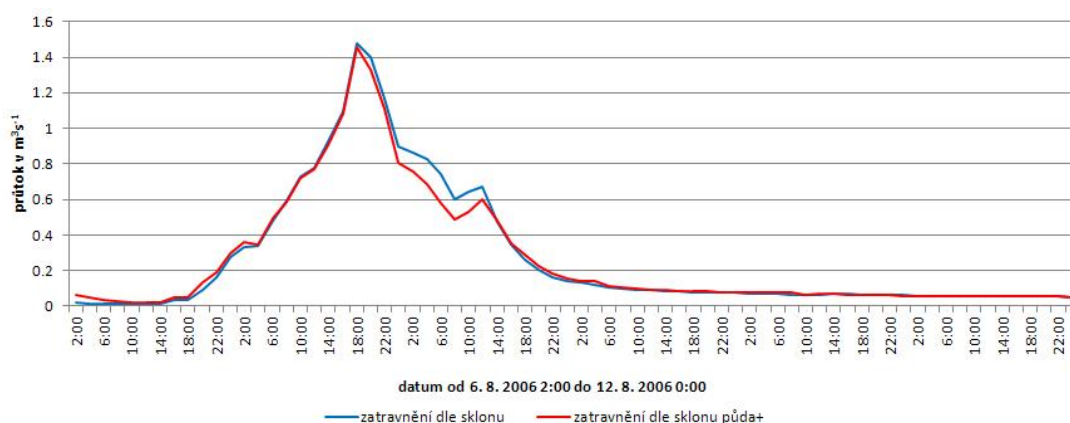


Obrázek 5-9: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu s vylepšenou retenční schopností půd

Návrh zatravnění na základě svažitosti terénu lze zhodnotit obdobě jako návrh zatravnění dle infiltrační kapacity půdy. Nedošlo k výraznému snížení kulminačního průtoku a ani k jeho časovému oddálení. Nově zatravněná plocha je však oproti předchozímu způsobu zatravnění významně nižší a měla by lépe pomoci ke snížení možné eroze půdy. Konečné charakteristiky návrhů zatravnění dle svažitosti terénu obsahuje tabulka 5-6, vizuální porovnání průběhu simulací ukazují obrázek 5-10.

Charakteristika	Simulace AUTOCAL	Zatavnění	Zatavnění PŮDA+
počátek události	6. 8. 2006 2:00 hod		
konec události	12. 8. 2006 0:00 hod		
čas kulminace	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00
kulminační průtok	1,5228 m ³ s ⁻¹ (100 %)	1,4760 m ³ s ⁻¹ (96,93 %)	1,4580 m ³ s ⁻¹ (95,74 %)
celkový objem odtoku	70 229,84 m ³ (100 %)	69 933,89 m ³ (99,58 %)	68 235,86 m ³ (97,16 %)

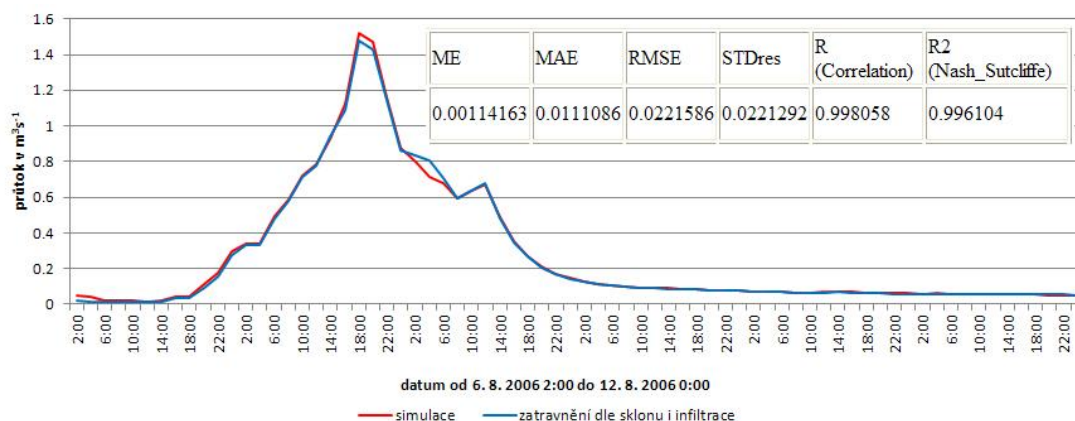
Tabulka 5-6: Charakteristiky výsledného efektu zatavnění dle svažitosti terénu



Obrázek 5-10: Porovnání návrhů zatavnění dle svažitosti terénu s a bez zlepšení retenční schopnosti půd

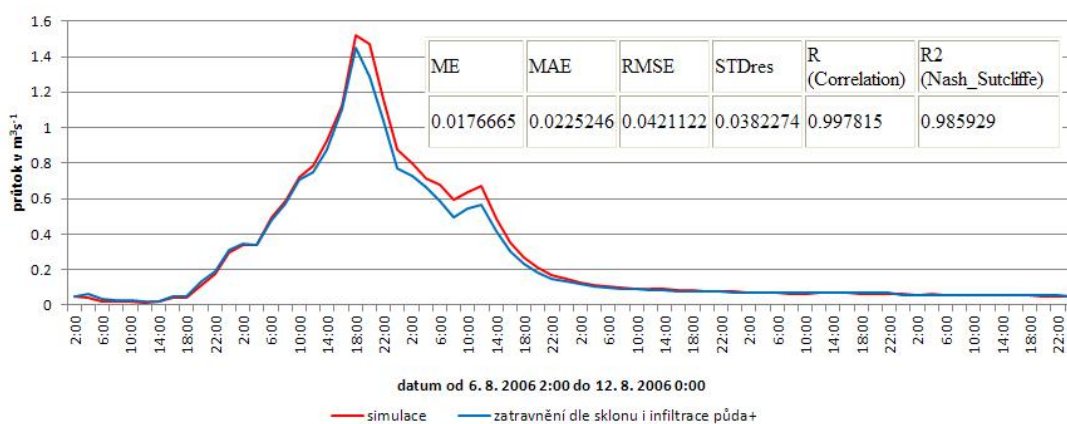
5.2.2.3 Zatavnění dle infiltrační kapacity a svažitosti terénu

Poslední návrh zatavnění kombinuje oba předchozí způsoby. Ve scénáři bez vylepšené retence (obrázek 5-11) zaznamenal kulminační průtok hodnotu 1,4781 m³s⁻¹, avšak opět nedošlo k časovému posunu kulminace. V porovnání s původní simulací vzestupná větev vykazuje přibližně stejné hodnoty průtoků, pokles sestupné větve je znatelný pouze v čase kulminace a dvě hodiny po ní. Celkový objem odtoku, který za srážko-odtokovou situaci protekl profilem, klesl z původních 70 229,84 m³ na 69 327,62 m³.



Obrázek 5-11: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd

Závěrečný model zatravnění (obrázek 5-12), kterému byly upraveny retenční schopnosti půd, dle předpokladu vykazoval ze všech scénářů nejvyšší pokles vypočtených průtoků. Tento pokles je nejvíce znatelný u sestupné větve, která se v celém svém průběhu pohybuje v průměru o $0,0800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pod prvotními hodnotami. Kulminační průtok je roven $1,4476 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a objem odtoku se snížil o 6,52 % na $65\,650,71 \text{ m}^3$.

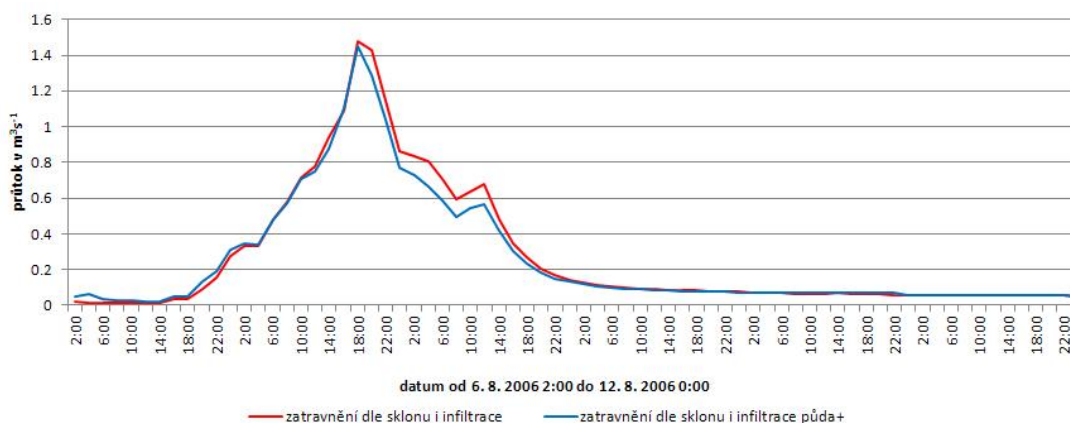


Obrázek 5-12: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd se zlepšením retence půd

Vzájemné porovnání obou simulací přináší obrázek 5-13 a charakteristiky za událost uvádí tabulka 5-7.

Charakteristika	Simulace AUTOCAL	Zatrvnění	Zatrvnění PŮDA+
počátek události	6. 8. 2006 2:00 hod		
konec události	12. 8. 2006 0:00 hod		
čas kulminace	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 18:00
kulminační průtok	1,5228 m ³ s ⁻¹ (100 %)	1,4781 m ³ s ⁻¹ (97,06 %)	1,4476 m ³ s ⁻¹ (95,06 %)
celkový objem odtoku	70 229,84 m ³ (100 %)	69 327,62 m ³ (98,72 %)	65 650,71 m ³ (93,48 %)

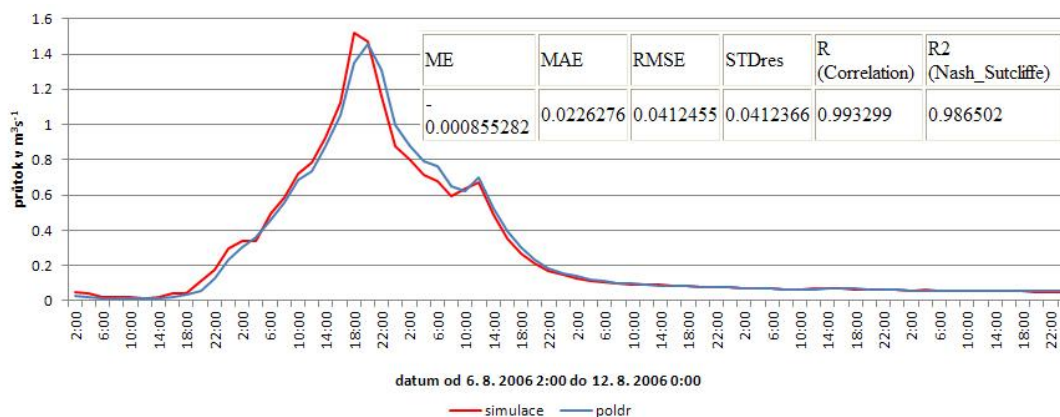
Tabulka 5-7: Charakteristiky výsledného efektu zatrvnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd



Obrázek 5-13: Porovnání návrhů zatrvnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd s a bez zlepšení retence půd

5.2.2.4 Víceúčelový poldr

Předpokládali jsme, že účinek poldru v průběhu simulace dané situace nebude tak výrazný, jako by byl v případě průtoků, které by překročily navrženou kapacitu výpustného zařízení 3,3 m³/s. Tyto průtoky v situaci od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006 naměřeny nebyly, přesto se poldr ukázal jako účelný při snížení kulminačního průtoku a i při oddálení doby kulminace (obrázek 5-14). Efekt víceúčelového poldru se prokázal již během vzestupné větve, kdy mírně snižoval simulované průtoky. Největší význam však poldr vykázal při kulminačních průtocích. Vrchol kulminace klesl o 4,46 % a z časového hlediska byla kulminace posunuta o 2 hodiny později. Objem vody, který byl poldrem zpomalen či zadržen zpětně obohatil průtoky v sestupné větvi. Toto chování hydrogramu lze charakterizovat jako očekávané a žádané. Podrobnější popis situace v průběhu scénáře uvádí tabulka 5-8.



Obrázek 5-14: Simulace vlivu poldru na průběh S-O události

Charakteristika	Simulace <small>AUTOCAL</small>	Poldr
počátek události	6. 8. 2006 2:00 hod	
konec události	12. 8. 2006 0:00 hod	
čas kulminace	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 20:00
kulminační průtok	1,5228 m ³ s ⁻¹ (100 %)	1,4549 m ³ s ⁻¹ (95,54 %)
celkový objem odtoku	70 229,84 m ³ (100 %)	70 451,56 m ³ (100,32 %)

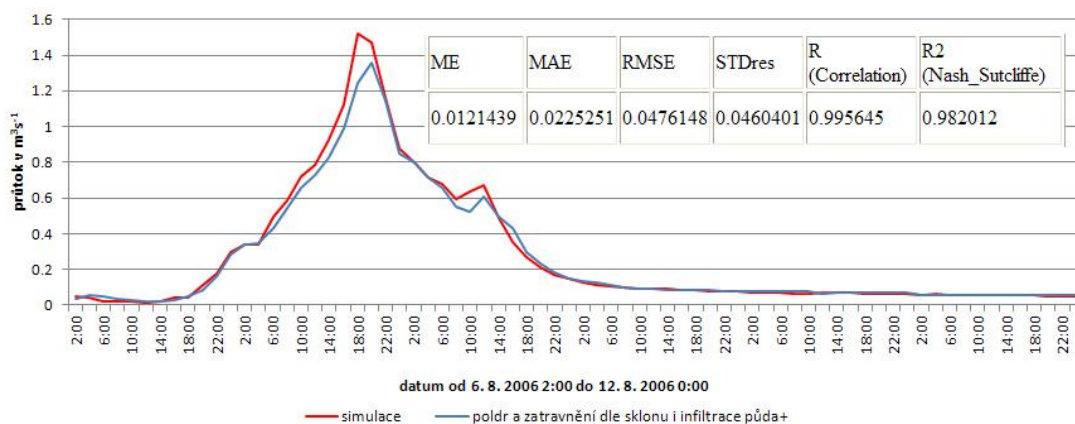
Tabulka 5-8: Charakteristiky výsledného efektu poldru

5.2.3 Optimální návrh protipovodňového opatření

Scénář zatravnění s vylepšenou retencí vytvořený na základě svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd v kombinaci s víceúčelovým poldrem by dle doposud získaných výsledků měl přinést nejlepší ochranu před extrémními průtoky v povodí Kopaninského potoka. Simulace syntézy těchto dvou scénářů (obrázek 5-15) tento předpoklad prokazatelně potvrdila. V nástupní větvi je viditelné zpomalení a zadržení vody protékající poldrem, který také významně snížil kulminaci a posunul ji o 2 hodiny později (tabulka 5-9). Účinek poldru je ve všech fázích znásoben nově zatravněnou plochou. Zatravnění však nejvíce ovlivnilo sestupnou větev. Bez jeho použití (obrázek 5-14) byla sestupná větev nad původními průtoky, v tomto případě se však dostává na dřívější hodnoty a v mnoha místech je i níže.

Tento návrh je vhodný jak při relativně menších srážkách, kdy svou úlohu plní zatravnění i poldr, tak i například při 20 - letých až 100 - letých úhrnech, během kterých i zatravněná půda nestíhá infiltrovat, zvyšuje se podíl soustředěného odtoku a přirozeně tak roste úloha poldru. Na zhodnocení účinnosti při těchto velmi vysokých srážkových úhrnech by model poldru musel být lépe nastaven. V současné

kalibraci na výrazně nižší průtoky není zajištěno, že se model při průtocích vyšších bude chovat dle projektové dokumentace.



Obrázek 5-15: Simulace poldru v kombinaci se zatravněním dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd

Charakteristika	Simulace AUTOCAL	Poldr + zatravnění
počátek události	6. 8. 2006 2:00 hod	
konec události	12. 8. 2006 0:00 hod	
čas kulminace	7. 8. 2006 18:00	7. 8. 2006 20:00
kulminační průtok	1,5228 m ³ s ⁻¹ (100 %)	1,3545 m ³ s ⁻¹ (88,95 %)
celkový objem odtoku	70 229,84 m ³ (100 %)	67 082,13 m ³ (95,38 %)

Tabulka 5-9: Charakteristiky výsledného efektu poldru v kombinaci se zatravněním dle infiltrace a sklonu

5.2.4 Shrnutí vlivu protipovodňových opatření

Každý scénář provedeného opatření prokázal svou účinnost během extrémní srážko-odtokové situace z 6. 8. až 12. 8. 2006. Z různých hledisek lze ale opatření hodnotit odlišně:

- z pohledu snížení hodnoty kulminačního odtoku se nejlépe uplatnila kombinace poldru se zatravněním dle infiltrace a sklonitosti půdy (tabulka 5-10),
- objem soustředěného odtoku z povodí nejvíce procentuálně snížil návrh zatravnění dle infiltrace a sklonitosti půdy; u poldru je naopak znatelné, že na objem odtoku nemá jeho umístění v toku téměř žádný vliv (tabulka 5-11),

Opatření	Kulminační průtok situace
poldr + zatravnění dle infiltrace a sklonu	1,3545 m ³ s ⁻¹ (88,95 %)
zatravnění dle infiltrace a sklonu	1,4476 m ³ s ⁻¹ (95,06 %)
poldr	1,4549 m ³ s ⁻¹ (95,54 %)
zatravnění dle sklonu	1,4580 m ³ s ⁻¹ (95,74 %)
zatravnění dle infiltrace	1,4850 m ³ s ⁻¹ (97,52 %)
simulace AUTOCAL (bez opatření)	1,5228 m ³ s ⁻¹ (100 %)

Tabulka 5-10: Srovnání návrhů opatření podle procentuální účinnosti na snížení kulminačního průtoku

Opatření	Objem soustředěného odtoku za situaci
zatravnění dle infiltrace a sklonu	65 650,71 m ³ (93,48 %)
poldr + zatravnění dle infiltrace a sklonu	67 082,13 m ³ (95,38 %)
zatravnění dle infiltrace	67 338,43 m ³ (95,88 %)
zatravnění dle sklonu	68 235,86 m ³ (97,16 %)
poldr	70 451,56 m ³ (100,32 %)
simulace AUTOCAL (bez opatření)	70 229,84 m ³ (100 %)

Tabulka 5-11: Srovnání návrhů opatření podle vlivu na objem soustředěného odtoku

- c) jednotlivá opatření lze také porovnat podle procentuálního snížení kulminačního průtoku (obrázek 5-12) či objemu odtoku (obrázek 5-13) na jeden ha půdy, který byl zatravněn nebo na něm byl vybudován víceúčelový poldr,

Opatření	Procentuální snížení na 1 ha
poldr	2,3723 %/ha
zatravnění dle sklonu	0,0688 %/ha
poldr + zatravnění dle infiltrace a sklonu	0,0532 %/ha
zatravnění dle infiltrace a sklonu	0,0240 %/ha
zatravnění dle infiltrace	0,0134 %/ha

Tabulka 5-12: Srovnání procentuálního snížení kulminačního průtoku na 1 ha upravené plochy

Opatření	Procentuální snížení na 1 ha
zatravnění dle sklonu	0,0459 %/ha
zatravnění dle infiltrace a sklonu	0,0317 %/ha
zatravnění dle infiltrace	0,0223 %/ha
poldr + zatravnění dle infiltrace a sklonu	0,0222 %/ha
poldr	objem odtoku nesnížen

Tabulka 5-13: Srovnání procentuálního snížení objemu soustředěného odtoku na 1 ha upravené plochy

- d) očekávané finanční náklady na realizaci protipovodňových návrhů se také liší, v případě víceúčelového poldru však předpokládaná částka několikanásobně překračuje všechny ostatní (tabulka 5-15).

Opatření	Předpokládané náklady
poldr + zatravnění dle infiltrace a sklonu	21 962 345 Kč
poldr	20 624 320 Kč ³
zatravnění dle infiltrace a sklonu	1 338 025 Kč ⁴
zatravnění dle infiltrace	1 199 575 Kč ⁴
zatravnění dle sklonu	402 220 Kč ⁴

Tabulka 5-14: Srovnání předpokládaných nákladů na realizaci

Účinnost zatravnění na snížení kulminačních průtoků není významná. Je zde ale nutno připomenout, že zatravnění má primární vliv na snížení možné eroze, využití živin infiltrujících půdním profilem a na zvýšení půdní retence, evapotranspirace a intercepce. Nezanedbatelná je také jeho estetická funkce. Oproti dalším opatřením je zajímavá i cena realizace, která se pohybuje na relativně přijatelných hodnotách.

Víceúčelový poldr v krajině představuje účinný nástroj, jehož retenční prostor zajišťuje snížení kulminačních průtoků povodní téměř s jakoukoliv periodou opakování. Jeho stálé zadržení může také sloužit jako životní prostor či zdroj vody

³ Náklady na akci dle podané a schválené žádosti na dotaci v rámci Operačního programu Životní prostředí v roce 2010.

⁴ Odhad nákladů při průměrné ceně 6 500 Kč na nově zatravněný ha půdy (*MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ, 2005*).

pro rostliny i živočichy. V tomto případě se předpokládá i s výstavbou komunikace na koruně hráze, která minimalizuje průjezd zemědělské techniky přes obec Velký Rybník. Finanční náklady na výstavbu poldru jsou vysoké, dle kladně vyřízené žádosti by však měly být z 90% pokryty dotací z Operačního programu Životní prostředí.

Optimální návrh protipovodňového opatření pro povodí (odstavec 5.2.3) vycházející z dosažených výsledků by během skutečných situací měl využít všechny pozitivní účinky zatravnění i poldru.

6. Závěr

Cílem práce bylo objasnění vlivu a posouzení účinnosti různých protipovodňových opatření v povodí při extrémních srážko-odtokových situacích.

V rámci dosažení tohoto cíle bylo vybráno povodí Kopaninského potoka nacházející se v kraji Vysočina. Toto povodí složí instituci VÚMOP, v.v.i. pro experimentální účely. Z tohoto povodí byla získávána data o povodí z hydrologických let 2006, 2007, která byla posléze upravována do vhodné podoby pro hydrologický model Mike SHE. V této aplikaci byl na základě získaných dat vytvořen model povodí, který byl posléze nastaven tak, aby co nejlépe simuloval reálný pohyb vody. Tento proces nastavení se nazývá kalibrace. Pro ověření úspěšné kalibrace proběhla validace modelu, která potvrdila velmi dobré nastavení celého modelu Mike SHE.

Pro hodnocení účinnosti byla vybrána opatření, která jsou vhodná pro dané povodí a lze je realizovat. Byl vybrán víceúčelový polder a zatravnění. Zatravnění se dále členilo podle principu, na základě kterého bylo provedeno - zatravnění dle infiltrační kapacity půdy, dle svažitosti území a dle jejich kombinace.

Vstupy do modelu Mike SHE byly upraveny tak, aby odpovídaly navrhovaným opatřením, a byly spuštěny simulace scénářů jednotlivých opatření. Ty proběhly na srážko-odtokové situaci z 6. 8. až 12. 8. 2006. Situace byla svými naměřenými průtoky nejvýznamnější v kalibrovaném období, nebyla ovlivněna táním sněhu a vykazovala nejlepší reakci na provedená opatření. Po provedených simulacích byla získaná data popsána a vyhodnocena. Tímto byl splněn cíl diplomové práce.

Na základě výsledků byl také vyhotoven optimální návrh protipovodňového opatření pro povodí Kopaninského potoka, který se skládá z víceúčelového poldru na okraji obce Velký Rybník, ze zatravnění ploch s vysokou infiltrační kapacitou, ze zatravnění ploch se sklonem vyšší než 30 % a ze zatravnění 30 metrových pásů okolo vodních toků. Návrh by měl z hodnocených scénářů nejlépe předcházet případným škodám na majetku, zmírňovat erozi a lépe ochránit vodu před znečištěním živinami a kontaminanty.

7. Seznam použité literatury a zdrojů

7.1 Literatura

1. ALLEN, Richard G., et al. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements : FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300 s. ISSN 0254-5284.
2. American Society of Civil Engineers. *Hydrology handbook*. [s.l.] : ASCE Publications, 1996. 784 s. ISBN 0-7844-0138-1.
3. *Atlas podnebí Česka*. Praha : Český hydrometeorologický ústav, 2007. 255. ISBN 978-80-86690-26-1.
4. BEDIENT, Philip B.; HUBER, Wayne C. *Hydrology and Floodplain Analysis*. Third Edition. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 763 s. ISBN 0-13-032222-9.
5. BUCHTELE, Josef. Úvod k metodám a modelům hydrologických předpovědí. In PATERA, Adolf, et al. *Povodně : prognózy, vodní toky a krajina*. Praha : ČVUT, 2002A. s. 33-35. ISBN 80-01-02561-6.
6. BUCHTELE, Josef. Okolnosti ovlivňující využití modelů a tendence v uplatňování různých přístupů. In PATERA, Adolf, et al. *Povodně : prognózy, vodní toky a krajina*. Praha : ČVUT, 2002B. s. 51-56. ISBN 80-01-02561-6.
7. BROOKS, Kenneth N., et al. *Hydrology and the management of watersheds*. Ames : Wiley-Blackwell, 2003. 574 s. ISBN 0-8138-2985-2.
8. BRUTSAERT, Wilfried. *Hydrology: an introduction*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 605 s. ISBN 13978-0-82479-8.

9. CANADELL, J, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at global scale. In *Oecologia* 108. [s.l.] : Springer - Verlag, 1996. s. 583-595. ISSN 0029-8549.
10. CUDLÍN, Pavel, et al. Příčiny snížení vodohospodářské funkce lesa v krajině. In Ústav ekologie krajiny AV ČR. *Závěrečná zpráva úkolu VaV 610/2/98 : DÚ 01/07*. České Budějovice : Ústav ekologie krajiny AV ČR, 1999. s. 84.
11. ČAMROVÁ, Lenka, JÍLKOVÁ, Jiřina, et al. *Povodňové škody a nástroje k jejich snížení*. Praha : JDS tiskárna Praha spol. s r.o., 2006. 420 s. ISBN 80–86684–35–0.
12. ČSN 75 0101. *Vodní hospodářství : Základní terminologie*. Praha : Český normalizační institut, 2003. 28 s.
13. DAŇHELKA, Jan. *Operativní hydrologie : hydrologické modely a nejistota předpovědí*. Praha : Český hydrometeorologický ústav, 2007. 104 s. ISBN 978-80-86690-48-3.
14. DEODHAR, M. J. *Elementary Engineering Hydrology*. Delhi : Pearson Education, 2009. 408 s. ISBN 978-81-317-0805-7.
15. DHI. *MIKE SHE User Manual : Volume 1: User Guide*. [s.l.] : DHI, 2009. 230 s.
16. DOLEŽAL, František, et al. Hydrologický výzkum v malých zemědělských povodích. In NOVÁK, Viliam; MYŠKA, Jiří. *Journal of Hydrology and Hydromechanics : Vol. 54, No. 2*. Varšava : Versita, 2006. s. 217–229.
17. EHRLICH, Petr, ONDR, Pavel, ZÁMIŠOVÁ, Karolína. Revitalizační úpravy a protipovodňová ochrana nového díla. In *Protipovodňová prevence a krajinné plánování : Sborník z mezinárodní konference 18. a 19. března 2003 Pardubice*. Pardubice : Česká společnost krajinných inženýrů, 2003. s. 248-255. ISBN 80-903258-1-5..

18. ELLEN, J. Growth, yield and composition of four winter cereals. I Biomass, grain yield and yield formation. In Netherlands Journal of Agricultural science 41. [s.l.] : [s.n.], 1993. s. 153-165.
19. GOBRON, Nadine; VERSTRAETE, Michel M. *GTOS 66 : Leaf Area Index (LAI)*. Rome : GTOS, 2008. 24 s.
20. HADAČ, Emil. *Krajina a lidé : Úvod do krajinné ekologie*. Praha : Academia, 1982. 156 s. ISBN 21-009-82.
21. HAVLÍČEK, Vojtěch. Optimalizace parametrů učení a architektury neuronových sítí pomocí evolučních algoritmů. In BAUDIŠOVÁ, Dana, et al. *VTEI - Vodohospodářské technicko-ekonomické informace : Mimořádné číslo I/2010*. ročník 52. Praha : VÚV T.G.M., v.v.i., 2010. s. 2-6. ISSN 0322-8916.
22. HAVRLANT, Miroslav, BUZEK, Ladislav. *Nauka o krajině a péče o životní prostředí*. Praha : Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1985. 132 s. ISBN 14-400-85.
23. HAY, Robert K., PORTER, John R. *The physiology of crop yield*. [s.l.] : Blackwell Publishing, 2006. 314 s. ISBN 1-4051-0859-2.
24. HORNBERGER, George M., et al. *Elements of physical hydrology*. Baltimore (Maryland) : JHU Press, 1998. 312 s. ISBN 0-8018-5857-7.
25. HRÁDEK, František; KUŘÍK, Petr Protipovodňová opatření v povodích drobných vodních toků. In *Protipovodňová prevence a krajinné plánování : Sborník z mezinárodní konference 18. a 19. března 2003 Pardubice*. Pardubice : Česká společnost krajinných inženýrů, 2003. s. 226-233. ISBN 80-903258-1-5.

26. HROMÁDKA, Vít; KORYTÁROVÁ, Jana Protipovodňová ochrana osídlených území a její efektivnost. In *Nehnutelnosti a bývanie* : č. 2009/2. Bratislava : Slovenska technická univerzita v Bratislavě, 2009. s. 27-36. ISSN 1336-944X.
27. JANDORA, Jan; STARA, Vlastimil; STARÝ, Miloš. *Hydraulika a hydrologie*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. 186 s. ISBN 80-214-2204-1
28. JANGLOVÁ, Renata; KVÍTEK, Tomáš; NOVÁK, Pavel. Kategorizace infiltrační kapacity půd na základě geoinformatického zpracování dat půdních průzkumů. In LHOTSKÝ, Jiří; KRÁLOVCOVÁ, Květa. *Soil and Water 2/2003 : Scientific studies*. Praha : VÚMOP Praha, 2003. s. 61-81. ISSN 1213-8673.
29. JENÍČEK, Michal. Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In LANGHAMMER, Jakub. *Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko*. Praha : Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2005. s. 112-126.
30. JENÍČEK, Michal. Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážko-odtokové procesy metodou CN křivek. In LANGHAMMER, Jakub. *Změny v krajině a povodňové riziko : sborník příspěvků ze semináře Povodně a změny v krajině 5.6.2007*. Praha : Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, 2007. s. 41-50. ISBN 978-80-86561-87-5.
31. JENKINS, Alan ; PETERS, Norman E.; RODHE, Allan. Hydrology. In MOLDAN, Bedřich; ČERNÝ, Jiří. *SCOPE 51 : Biogeochemistry of Small Catchments - A Tool for Environmental Research*. Chichester : John Wiley & Sons, 1994. s. 31-55. ISBN 0-471-93723-1
32. JÚVA, Karel, et al. *Tvorba krajiny ČSSR*. Praha : Academia, 1981. 592 s. ISBN 21-098-81.

33. KOHUT, Mojmír. Vybrané metody výpočtu evaporace a evapotranspirace. In ROŽNOVSKÝ, Jaroslav., LITSCHMANN, Tomáš. *Mikroklima porostu : Sborník ze semináře*. 1. vyd. Brno : Česká bioklimatologická společnost , 2003. s. 172-186. ISBN 80-86690-05-9.
34. KOSTREJ, Anton. Ekofyziológia produkčného procesu porastu a plodín. 1998. vyd. Nitra : Vydavateľské a edičné stredisko SPU v Nitre, 1998. 187 s. ISBN 80-7137-528-4.
35. KOVÁŘ, Pavel. *Využití hydrologických modelů pro určování*. Praha : Vysoká škola zemědělská, 1990. 140 s. ISBN 80-213-0088-4.
36. KULHAVÝ, Zbyněk; KOVÁŘ, Pavel. *Využití modelů hydrologické bilance pro malá povodí*. Praha : Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha, 2000. 123 s. ISSN 1211-3972
37. KRAUSE, P., et al. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In *Advances in Geosciences. Advances in Geosciences 5 : 89-97*. [s.l.] : European Geosciences Union, 2005. s. 89-97.
38. KRAVKA, Miroslav. *Základy lesnické a krajinářské hydrologie a hydrauliky*. Brno : Mendelova univerzita v Brně, 2009. 114 s. ISBN 978-80-7375-338-2.
39. KVÍTEK, Tomáš, et al. *Zatravnňování orné půdy s vysokým rizikem infiltrace – opatření pro cílené snižování koncentrací dusičnanů ve vodách : Metodika*. Praha : VÚMOP, v.v.i., 2007. 112 s. ISBN 978-80-254-0972-5.
40. LETT, Petr; DAŇHELKA, Jan. Požadavky na meteorologické a hydrologické vstupy do hydrologických modelů. In PATERA, Adolf, et al. *Povodně : prognózy, vodní toky a krajina*. Praha : ČVUT, 2002. s. 41-46. ISBN 80-01-02561-6.
41. MARKOVÁ, Irena, JANUŠ, Dalibor. Radiační bilance mladého horského smrkového porostu. In ROŽNOVSKÝ, J., LITSCHMANN, T. XIV. Česko-slovenská bioklimatologická konference : Lednice na Moravě 2.-4. září 2002., 2002. s. 290-296. ISBN 80-85813-99-8.

42. MAŠÍN, Oldřich; KULHAVÝ, Zbyněk Hydrologické modelování malých zemědělských povodí. In *GEOinfo : 5/98*. Ostrava : Computer Press, 1998. s. 34-35.
43. MEZERA, Alois, et al. *Tvorba a ochrana krajiny*. Praha : Státní zemědělské nakladatelství , 1979. 476 s. ISBN 07-104-79.
44. Ministerstvo zemědělství. *Katalog opatření - katalogové listy - vodní hospodářství : Zatravnění a zalesnění*. Praha : Ministerstvo zemědělství, 2005. 6 s.
45. MOLDAN, Bedřich; ČERNÝ, Jiří. Small Catchment Research. In *. Biogeochemistry of Small Cachments : A Tool for Environmental Research*. New York : John Wiley & Sons, 1994. s. 1-30. ISBN 0-471-93723-1
46. OLŠOVSKÁ, Katarína, et al. Rozdiely v raste a vodných pomeroch súčasných a východiskových odrôd ozimnej pšenice v reakcii na rýchlu dehydratáciu. In BLÁHA, Ladislav. Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2007. 1. vyd. Praha : Výzkumný ústav rostlinné výroby v.v.i. Praha - Ruzyně, 2007. s. 479-482. ISBN 978-80-87011-00-3.
47. PATERA, Adolf, et al. Úvod. In PATERA, Adolf, et al. *Povodně : prognózy, vodní toky a krajina*. Praha : ČVUT, 2002. s. 18-22. ISBN 80-01-02561-6.
48. PATERA, Adolf; KAŠPÁREK, Ladislav. Klasifikace povodní. In PATERA, Adolf, et al. *Povodně : prognózy, vodní toky a krajina*. Praha : ČVUT, 2002. s. 23-24. ISBN 80-01-02561-6.
49. PETR, Jiří, ČERNÝ, Vladimír. Tvorba výnosu hlavních polních plodin. Praha : Státní zemědělské nakladatelství, 1980. 448 s.
50. PODHRÁZSKÁ, Jana; UHLÍŘOVÁ, Jana. *Možnosti stanovení účinnosti ochrana před povodněmi retencí krajiny : Výstup etapy 06 výzkumného záměru VÚMOP Praha*. Praha : VÚMOP, 2005. 29 s.

51. PRUDKÝ, Jan; SPITZ, Pavel. Poznatky získané analýzou faktorů ovlivňujících přirozenou retenci povodí. In *Protipovodňová prevence a krajinné plánování : Sborník z mezinárodní konference 18. a 19. března 2003 Pardubice*. Pardubice : Česká společnost krajinných inženýrů, 2003. s. 136-142. ISBN 80-903258-1-5.
52. QUITT, Evžen. *Klimatické oblasti Československa*. Brno : Geografický ústav ČSAV, 1971. 73 s.
53. REDDY, P. Jaya Rami. *A Textbook of Hydrology*. New Delhi : Firewall Media, 2005. 530 s. ISBN 81-7008-099-1.
54. RUNŠTUKOVÁ, Věra. Vliv vodního hospodářství na krajinu. In *Sborník příspěvků z mezinárodní konference Protipovodňová prevence a krajinné plánování*. Pardubice : Česká společnost krajinných inženýrů - ČSSI, 1993. Vliv vodního hospodářství na krajinu. s. 256-260. ISBN 80-903258-1-5.
55. SCURLOCK, J. M. O., et al. *Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932–2000*. Oak Ridge, Tennessee : Oak Ridge National Laboratory, 2001. 34 s.
56. SERRANO, Sergio E. *Hydrology for engineers, geologists, and environmental professionals : an integrated treatment of surface, subsurface, and contaminant hydrology*. Lexington, Kentucky : HydroScience, 1997. 466 s. ISBN 0-9655643-9-8.
57. SHAW, Elizabeth M. *Hydrology in Practice*. Third Edition. Abingdon : Taylor & Francis, 1994. 592 s. ISBN 0-7487-4448-7.
58. SINGH, Pratap; SINGH, Vijah P. *Snow and glacier hydrology*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001. 742 s. ISBN 0-7923-6767-7.
59. SINGH, Vijay P.; FREVERT, Donald K. *Mathematical models of small watershed hydrology and applications*. Highlands Ranch : Water Resources Publication, 2002. 950 s. ISBN 978-1887201-35-3.

60. SMITH, et al. *Corn : Origin, History, Technology, and Production* . Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons, 2004. 949 s. ISBN 0-471-41184-1.
61. SUBRAMANYA, K. *Engineering Hydrology*. New Delhi : Tata McGraw-Hill, 2008. 434 s. ISBN 978-0-07-064855-5.
62. ŠILAR, Jan. *Hydrologie v životním prostředí*. Ostrava : Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 1996. 136 s. ISBN 80-7078-361-3.
63. TALLAKSEN, Lena M.; VAN LANEN, Henny A. J. *Hydrological drought : processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Amsterdam : Elsevier, 2004. 579 s. ISBN 978-0-444-51767-8.
64. UHLÍŘOVÁ, Jana; MAZÍN, Václav, et al. *Metodika studie širších územních vazeb ochrany půdy a vody v komplexních pozemkových úpravách*. Praha : Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy Praha, 2005. 32 s. ISBN 80-239-4845-8.
65. VÁŇA, Milan, et al. *Quality of the natural environment in the Czech Republic at the regional level : Results of the Košetice Observatory*. Praha : ČHMÚ, 2001. 74 s. ISBN 80-85813-88-2.
66. VAŠÁK, Jan, et al. *Řepka*. Praha : Agrospoj, 2000. 321 s
67. VEVERKA, Michal; ŘIČICOVÁ, Pavla. Měření, přenos a zpracování dat pro potřeby předpovědních modelů. In PATERA, Adolf, et al. *Povodně : prognózy, vodní toky a krajina*. Praha : ČVUT, 2002. s. 46-51. ISBN 80-01-02561-6.
68. WEAVER, John E. *Root Development of Field Crops* . New York : McGraw Hill Book Company, 1926. 291 s
69. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *WMO-No. 168 : Guide to hydrological practices. Data acquisition and processing analysis, forecasting and other applications.*. Fifth edition. Geneva : WMO, 1994.

70. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *WMO-No. 168 : Guide to Hydrological Practices : Volume II - Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices*. Sixth edition. Geneva : WMO, 2009. 301 s. ISBN 978-92-63-10168-6.
71. ŽALUD, Zdeněk. Stanovení LAI na základě transmitance u kukuřice. In LITSCHMANN, T., ROŽNOVSKÝ, J. Agrometeorologická konference 93. Sborník referátů. Brno

7.2 Ostatní zdroje

1. *DHI* [online]. 2011 [cit. 2011-02-12]. Dostupné z WWW: <http://www.dhi.com/>.
2. *DHI* [online]. 2011 [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <http://www.dhi.cz/>.
3. GREGOR, Radek. *Ing. Radek Gregor : Žďár nad Sázavou* [online]. 2009 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z WWW: <http://www.irgzt.cz/>.
4. *Hydromeliorace* [online]. 2011 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW: <http://www.hydromeliorace.cz/>.

8. Seznam obrázků, tabulek a příloh

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Hydrologický cyklus	12
Obrázek 2-2: Hydrologická bilance povodí	16
Obrázek 2-3: Srovnání vlivu stromovité a vějířovité říční sítě na průběh odtoku	19
Obrázek 2-4: Hydrogram povodňové vlny	22
Obrázek 2-5: Klasifikace protipovodňových opatření	23
Obrázek 2-6: Klasifikace hydrologických modelů	29
Obrázek 2-7: Prostorového rozčlenění vstupních a stavových veličin jednotlivých modelů.....	31
Obrázek 3-1: Geografické umístění povodí v rámci ČR.....	36
Obrázek 3-2: Mapa povodí Kopaninského potoka	37
Obrázek 3-4: Povodí Kopaninského potoka	38
Obrázek 3-4: Zájmová část povodí	38
Obrázek 3-5: Půdní mapa.....	40
Obrázek 3-6: Observatoř Košetice - průměrné měsíční teploty vzduchu (za období 1961 - 1990).....	42
Obrázek 3-7: Automatická stanice - průměrné denní rychlosti větru (za období 2001 - 2007).....	43
Obrázek 3-8: Observatoř Košetice - relativní četnost větru (za období 1983 - 2002).....	43
Obrázek 3-9: Využití půdy - stav v roce 2007	44
Obrázek 3-10: Simulované hydrologické procesy modelem Mike SHE	46
Obrázek 4-1: DMT povodí Kopaninského potoka s vyznačením dílčích povodí a říční sítě	48
Obrázek 4-2: Rozdělení povodí Thiessenovými polygony	49
Obrázek 4-3: Časová řada naměřených hodinových hodnot teploty vzduchu pro hydrologické roky 2006 a 2007.....	50
Obrázek 4-4: Časová řada modelových hodnot LAI a hloubky zakoření pro pšenici ozimou a kukuřici.....	53
Obrázek 4-5: Časová řada měřených průtoků v uzavěrovém profilu T7U	54
Obrázek 4-6: Ukázka projektové dokumentace víceúčelového poldru v obci Velký Rybník.....	57
Obrázek 4-7: Umístění poldru v zájmové části povodí.....	58

Obrázek 4-8: Infiltrační kapacita půdy na základě syntézy materiálů BPEJ	60
Obrázek 4-9: Návrh zatravnění na základě infiltrační kapacity půd.....	60
Obrázek 4-10: Výškové poměry	61
Obrázek 4-11: Rozsah zatravnění na základě sklonu území.....	62
Obrázek 4-12: Návrh zatravnění na základě sklonu území.....	62
Obrázek 4-13: Návrh zatravnění dle infiltrační kapacity a sklonu terénu	63
Obrázek 5-1: Průběh měřených a simulovaných průtoků v profilu T7U a výsledné statistické charakteristiky kalibrace	66
Obrázek 5-2: Průběh měřených a simulovaných průtoků v profilu T7U a výsledné statistické charakteristiky validace.....	67
Obrázek 5-3: S-O situace z období od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006	67
Obrázek 5-4: S-O situace z období od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006 kalibrovaná nástrojem AUTOCAL.....	69
Obrázek 5-5: Simulace zatravnění dle infiltrace půdy bez vylepšení retenční schopnosti půd.....	70
Obrázek 5-6: Simulace zatravnění dle infiltrace půdy s vylepšením retenční schopnosti půd.....	70
Obrázek 5-7: Porovnání scénářů zatravnění dle infiltrace půd s a bez zlepšení retenční schopnosti půd.....	71
Obrázek 5-8: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu bez vylepšení retenční schopnosti půd.....	72
Obrázek 5-9: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu s vylepšenou retenční schopností půd.....	72
Obrázek 5-10: Porovnání návrhů zatravnění dle svažitosti terénu s a bez zlepšení retenční schopnosti půd.....	73
Obrázek 5-11: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd .	74
Obrázek 5-12: Simulace zatravnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd se zlepšením retence půd	74
Obrázek 5-13: Porovnání návrhů zatravnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd s a bez zlepšení retence půd.....	75
Obrázek 5-14: Simulace vlivu poldru na průběh S-O události	76
Obrázek 5-15: Simulace poldru v kombinaci se zatravněním dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd	77

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 3-1: Poloha a příslušnost povodí Kopaninského potoka.....	37
Tabulka 3-2: Geomorfologické zařazení povodí Kopaninského potoka	39
Tabulka 3-3: Základní charakteristiky HPJ v území.....	40
Tabulka 3-4: Klimatická klasifikace dle Quitta	41
Tabulka 4-1: Hloubky horizontů pro všechny HPJ.....	53
Tabulka 4-2: Vybrané technické charakteristiky návrhu víceúčelového poldru v obci Velký Rybník	58
Tabulka 4-3: Charakteristiky zájmové části povodí před a po návrhu zatravnění dle infiltrace v roce 2006	61
Tabulka 4-4: Charakteristiky zájmové části povodí před a po návrhu zatravnění dle sklonu	63
Tabulka 4-5: Charakteristiky zájmové části povodí před a po návrhu zatravnění dle infiltrační kap. a sklonu.....	64
Tabulka 5-1: Nasycená půdní vodivost v nenasycené zóně.....	65
Tabulka 5-2: Horizontální a vertikální vodivost v nasycené zóně.....	65
Tabulka 5-3: Horizontální a vertikální vodivost v nasycené zóně dle nástroje AUTOCAL.....	68
Tabulka 5-4: Charakteristika S-O události z období od 6. 8. 2006 do 12. 8. 2006....	69
Tabulka 5-5: Charakteristiky výsledného efektu zatravnění dle infiltrační kapacity půd.....	71
Tabulka 5-6: Charakteristiky výsledného efektu zatravnění dle svažitosti terénu.....	73
Tabulka 5-7: Charakteristiky výsledného efektu zatravnění dle svažitosti terénu a infiltrační kapacity půd	75
Tabulka 5-8: Charakteristiky výsledného efektu poldru.....	76
Tabulka 5-9: Charakteristiky výsledného efektu poldru v kombinaci se zatravněním dle infiltrace a sklonu	77
Tabulka 5-10: Srovnání návrhů opatření podle procentuální účinnosti na snížení kulminačního průtoku	78
Tabulka 5-11: Srovnání návrhů opatření podle vlivu na objem soustředěného odtoku	78
Tabulka 5-12: Srovnání procentuálního snížení kulminačního průtoku na 1 ha upravené plochy	78

Tabulka 5-13: Srovnání procentuálního snížení objemu soustředěného odtoku na 1 ha upravené plochy	79
Tabulka 5-14: Srovnání předpokládaných nákladů na realizaci	79

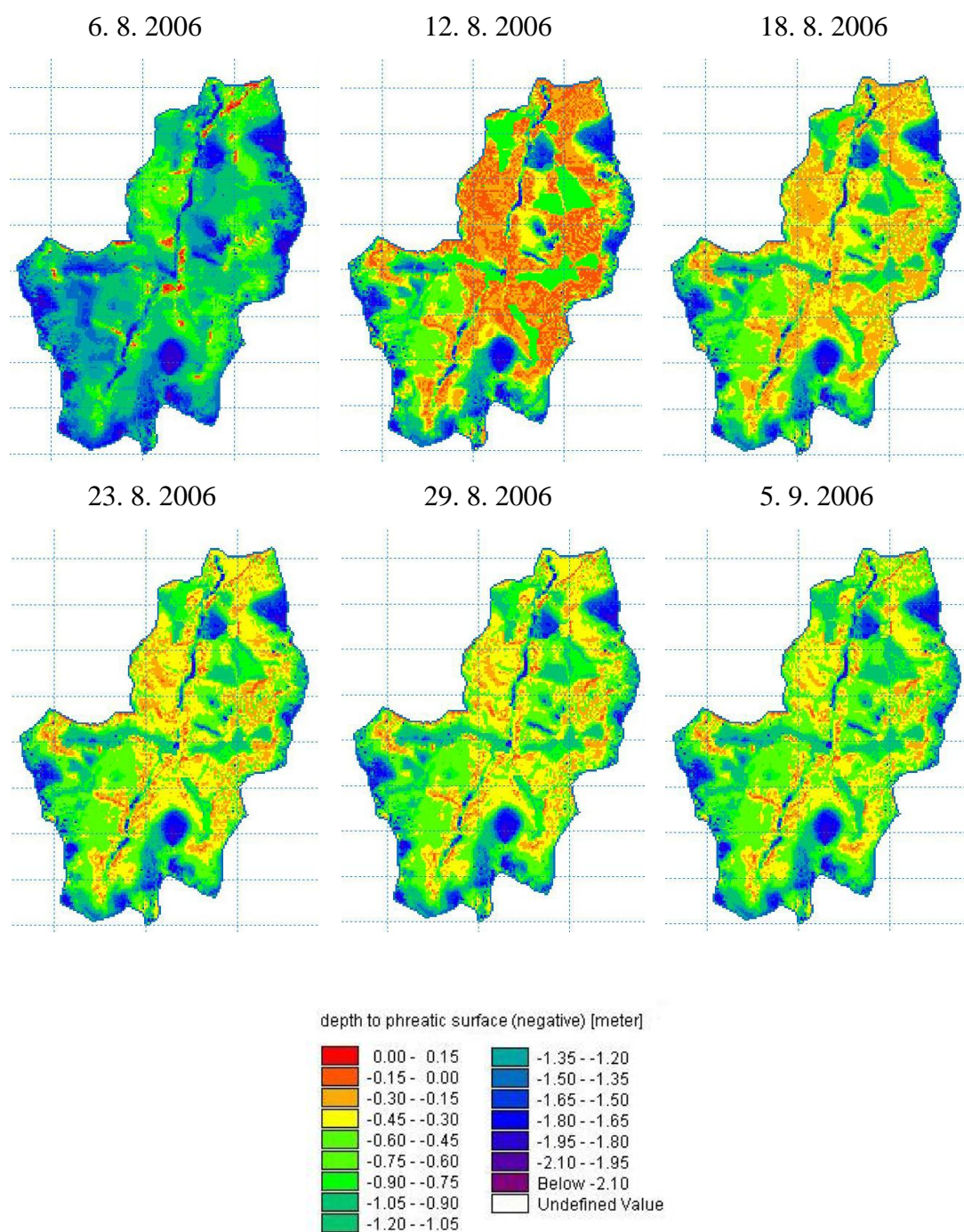
8.3 Seznam příloh

- Příloha 1: Ukázka reakce hladiny podzemní vody v povodí na dešťovou srážku na počátku srpna 2006
- Příloha 2: Projektová dokumentace víceúčelového poldru v obci Velký Rybník - podrobná situace
- Příloha 3: Projektová dokumentace víceúčelového poldru v obci Velký Rybník – výpustné zařízení
- Příloha 4: Uzávěrový profil T7U na okraji obce Velký Rybník (Thomsonův přepad)
- Příloha 5: Uzávěrový profil T7U – ultrazvukový snímač výšky hladiny vody
- Příloha 6: Svislý vodočet v uzávěrovém profilu T7U
- Příloha 7: koryto Kopaninského toku nad uzávěrovým profilem T7U
- Příloha 8: Pohled na plánované umístění víceúčelového poldru (v pozadí jsou znatelné započaté práce)
- Příloha 9: Pohled do budoucího retenčního prostoru víceúčelového poldru
- Příloha 10: Přítok P6 do Kopaninského potoka
- Příloha 11: Thomsonův přepad přítoku P6
- Příloha 12: Ústí kopaninského potoka do rybníku v obci Rybníček
- Příloha 13: Horní tok Kopaninského potoka

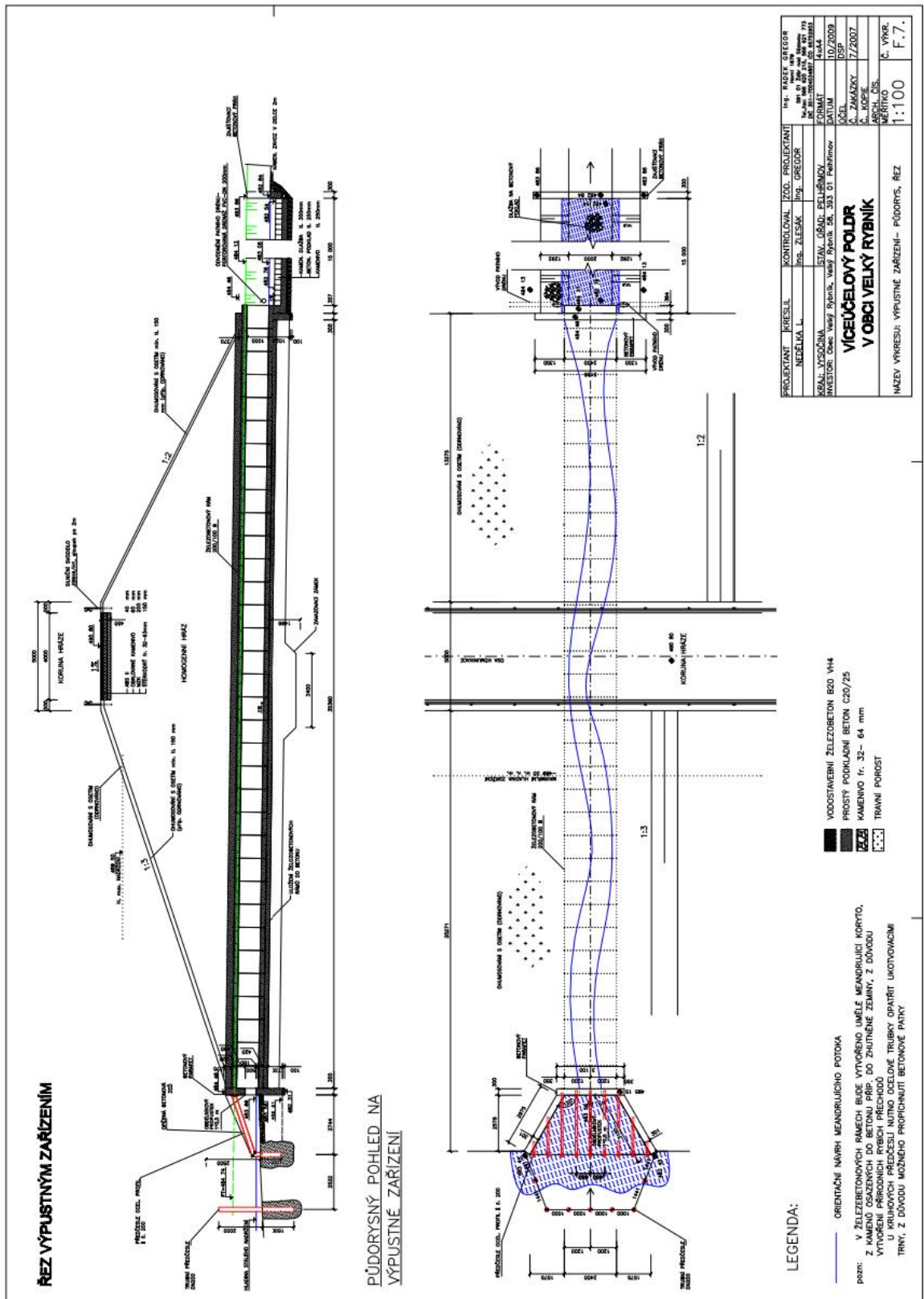
9. Přílohy

9.1 Grafické přílohy

Reakce HPV v povodí na srážkovou událost na počátku srpna 2006



Příloha 1: Ukázka reakce hladiny podzemní vody v povodí na dešťovou srážku na počátku srpna 2006



Příloha 3: Projektová dokumentace víceúčelového poldru v obci Velký Rybník – výpustné zařízení

zdroj: (GREGOR, 2009)

9.2 Fotodokumentace



Příloha 4: Uzávěrový profil T7U na okraji obce Velký Rybník (Thomsonův přepad)



Příloha 5: Uzávěrový profil T7U – ultrazvukový snímač výšky hladiny vody



Příloha 6: Svislý vodočet v uzávěrovém profilu T7U



Příloha 7: koryto Kopaninského toku nad uzávěrovým profilem T7U



Příloha 8: Pohled na plánované umístění víceúčelového poldru (v pozadí jsou znatelné započaté práce)



Příloha 9: Pohled do budoucího retenčního prostoru víceúčelového poldru



Příloha 10: Přítok P6 do Kopaninského potoka



Příloha 11: Thomsonův přepad přítoku P6



Příloha 12: Ústí kopaninského potoka do rybníku v obci Rybníček



Příloha 13: Horní tok Kopaninského potoka