

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra fyzické geografie a geoekologie



Alice Taufmannová

**MODELOVÁNÍ VLIVU MALÝCH VODNÍCH
NÁDRŽÍ NA POVODŇOVÉ UDÁLOSTI**

Modeling the impact of small water reservoirs on flood events

(diplomová práce)

Vedoucí práce: RNDr. Michal Jeníček

Praha 2009

Ráda bych na tomto místě věnovala poděkování vedoucímu diplomové práce RNDr. Michalu Jeníčkovi. Děkuji mu za uvedení do problematiky, za předané nadšení, za trpělivost nad častými dotazy, za pomoc při terénních měření, za poskytnutí mapových podkladů, cenné rady, připomínky a čas strávený nad úpravami práce. Dále děkuji RNDr. Janu Daňhelkovi, Ph.D. a Ing. Petru Šerclovi, Ph.D. z Českého hydrometeorologického ústavu za praktické rady a poskytnutí podkladových materiálů. Děkuji také RNDr. Juliu Česákovi a zúčastněným spolužákům za asistenci při terénním měření totální geodetickou stanicí. Chtěla bych též poděkovat pracovníkům Povodí Ohře, Českého hydrometeorologického ústavu a Deutscher Wetter Dienst za poskytnutí dat. Poděkování patří i mým rodičům a blízkým přátelům za všestrannou podporu a trpělivost během celého studia.

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracovala sama a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje

podpis

V Praze dne 24.8.2009

.....

Abstrakt

Práce se zabývá hodnocením vlivu systému malých vodních nádrží na povodňové události. Systém malých vodních nádrží v podobě suchých poldrů představuje účinné protipovodňové opatření, které nevyžaduje drastický zásah do krajiny. Systém integrované protipovodňové ochrany má své opodstatnění v horských území, kde je možné zachytit začátek povodňové vlny. Čtyři nádrže byly teoreticky implementovány do horní části povodí Rolavy v Krušných horách. Povodí Rolavy tvoří heterogenní povodí s plochým reliéfem v pramenné oblasti a sevřeným údolím ve střední části. Rozliv vody během povodní je možný pouze v dolní části povodí. Modelování srážko-odtokového procesu probíhalo v modelu HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System). HEC-HMS patří v současnosti k nejpoužívanějším celistvým srážko-odtokovým modelům. Jeho výhodami jsou jeho freeware dostupnost, přehlednost a propojení s prostředím GIS. Model byl nakalibrován na známé srážkové události září 2007 a verifikován na epizodě srpen 2006. Míry shody simulovaných a pozorovaných hydrogramů byly 0,86 a 0,89, což značí uspokojivou shodu. Návrhové simulace probíhaly na denních srážkových epizodách s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Kladný vliv protipovodňového opatření systému malých vodních nádrží v povodí byl prokázán. Výsledky simulací ukázaly snížení kulminačního průtoku povodňové vlny u všech návrhových scénářů.

Klíčová slova: srážko-odtokové modelování, HEC-HMS, protipovodňová ochrana, povodí Rolavy, suché poldry

Abstract

This paper deals with evaluating the impact of small reservoirs on flood events. The system of small reservoirs represents an effective part of integrated flood protection in the Czech Republic. Its realisation does not require a drastic impact on the environment. The small reservoirs could influence significantly the decrease of flood flows in the mountain catchments. Four small potential uncontrolled reservoirs were implemented to the headwater part of the Rolava river basin (126 km²) in the Ore Mountains. The relief of the Rolava river basin is heterogeneous with the upper headwater part characterised as flat plain and the middle part of the river flowing through a steep valley. The only option of the river to be flooded out during the extreme floods could appear in the lower part of the river basin. The Rainfall-runoff modeling was carried out in the model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System). The advantages of the model are its freeware availability, good arrangement and connection with GIS. The basin model of Rolava was calibrated using the known flood event in September 2007. The verification of the basin model ran on flood event in August 2006. The value of the efficiency criterion between the simulated and measured hydrograph was 0,86 and 0,89, which means successful agreement. Four designed scenarios (10, 20, 50 and 100-year return period of 1-day precipitation) were taken to show the impact of the system of small reservoirs on the hydrological regime. The positive assessment of the role of the system of small reservoirs was proved. The results of the simulations results showed the drop of the peak discharge during all scenarios.

Key words: Rainfall-runoff modeling, HEC-HMS, flood protection, Rolava river basin, uncontrolled small reservoirs

OBSAH

Seznam obrázků	6
Seznam tabulek.....	8
Seznam příloh	9
1 Úvod.....	10
1.1 Cíle práce.....	11
1.2 Stanovení hypotézy	11
2 Teoretická východiska	12
2.1 Stav výzkumu	12
2.2 Srážko - odtokový proces	13
2.2.1 Tvorba odtoku ze srážek.....	14
2.2.2 Faktory ovlivňující srážko-odtokový proces	16
2.3 Malé vodní nádrže	17
2.3.1 Kriteria návrhu MVN	17
2.3.2 Retenční nádrže	18
2.4 Hydrologické modelování	19
2.4.1 Klasifikace hydrologických modelů.....	21
2.4.2 Příklady modelů používaných v ČR.....	27
2.5 Hydrologický model HEC-HMS 3.3.....	28
2.5.1 Obecná charakteristika	28
2.5.2 Struktura modelu	29
2.5.3 Model přímého odtoku	31
2.5.4 Model výpočtu objemu odtoku.....	34
2.5.5 Model podzemního odtoku.....	36
2.5.6 Korytový model.....	38
2.5.7 Meteorologický model.....	39
3 Fyzickogeografická charakteristika povodí Rolavy.....	42
3.1 Vymezení území	42
3.2 Geologické poměry.....	43
3.3 Geomorfologické poměry.....	45
3.4 Pedologické poměry	49
3.5 Hydrografické poměry.....	50
3.6 Klimatické poměry	52
3.6.1 Srážky	53
3.6.2 Teplota vzduchu a ostatní klimatické charakteristiky	55
3.7 Odtokové poměry	56
3.7.1 Historický a současný režim povodní.....	57
3.8 Biogeografické poměry a ochrana krajiny.....	59
3.9 Využití území a antropogenní úpravy	60

4	Materiál a metody	61
4.1	Zdroje dat.....	61
4.2	Zpracování dat a použitý software.....	62
4.3	Vytvoření elementárních ploch	62
4.4	Digitální model terénu	63
4.5	Transformace přímého odtoku	65
4.6	Stanovení odtokové ztráty	67
4.7	Odhad parametrů podzemního odtoku	71
4.8	Odhad parametrů korytového modelu	73
4.9	Časové řady	76
4.9.1	Postup tvorby hodinových časových řad	77
4.9.2	Kalibrační událost.....	79
4.9.3	Verifikační událost	83
4.9.4	N-leté denní srážkové úhrny.....	86
4.10	Charakteristiky nádrží.....	90
5	Výsledky	95
5.1	Kalibrace.....	95
5.2	Verifikace	99
5.3	Modelování odtoku - epizoda září 2007	100
5.4	Modelování odtoku - epizoda srpen 2006	101
5.5	Variantní simulace	102
6	Diskuze.....	109
6.1	Výběr vhodného modelu	109
6.2	Kvalita vstupních dat	110
6.3	Volba vhodného měřítka	112
6.4	Výběr vhodných metod pro odhad počátečních podmínek s-o procesu	113
6.5	Kalibrace modelu.....	114
7	Závěr.....	116
8	Seznam použitých zdrojů a literatury	117
8.1	Seznam mapových a datových podkladů	124
	Přílohy	125

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Schéma odtokového procesu	14
Obrázek 2.2: Vznik povrchového odtoku	15
Obrázek 2.3: Zjednodušené schéma odlišné reprezentace prostorových dat	25
Obrázek 2.4: Schéma základního dělení hydrologických modelů	26
Obrázek 2.5: Schéma modelu povodí s dílčími elementy v modelu HEC-HMS	30
Obrázek 3.1: Vymezení povodí Rolavy a ukázka stanovení rozvodnice orograficky a podle DIBAVOD	43
Obrázek 3.2: Geologické poměry v povodí Rolavy	44
Obrázek 3.3: Výškové poměry v povodí Rolavy a morfometrické charakteristiky subpovodí	47
Obrázek 3.4: Procentuelní zastoupení orientace svahů v povodí Rolavy	47
Obrázek 3.5: Sklonitost reliéfu povodí Rolavy a průměrný sklon subpovodí v %	48
Obrázek 3.6: Rozložení půdních druhů v povodí Rolavy	49
Obrázek 3.7: Soutok Slatinného potoka a Rolavy a horní tok Rolavy	50
Obrázek 3.8: Hydrografie povodí Rolavy	51
Obrázek 3.9: Plošné rozložení srážek v povodí Rolavy 1995 – 2008	53
Obrázek 3.10: Rozdělení srážek v průběhu roku, průměrné hodnoty 1995 -2008	54
Obrázek 3.11: Srážkové úhrny na stanicích v blízkosti povodí Rolavy 1995 – 2008	54
Obrázek 3.12: Rozložení ročních průtoků ve Staré Roli v hydrologických letech 1969 - 2008	56
Obrázek 3.13: Průměrné rozložení měsíčních průtoků v roce za sledované období 1969-2008	57
Obrázek 3.14: Sezonalita povodňových událostí naměřených ve Staré Roli 1969-2008 ..	58
Obrázek 3.15: Krajinný pokryv v povodí Rolavy v roce 2000	60
Obrázek 4.1: Schéma rozdělení povodí Rolavy na subpovodí s přiřazeným Hydro ID	63
Obrázek 4.2: Princip tvorby rastrů akumulace vody a směru odtoku	64
Obrázek 4.3: Znázornění nejdelších drah odtoku vody a vytyčení sklonitosti 10 – 85 % v subpovodí	65
Obrázek 4.4: Okno s parametry výpočtu objemu odtoku v HEC-HMS	67
Obrázek 4.5: Ukázky HSP v povodí Rolavy podle infiltrační schopnosti půd a podle RVK	70
Obrázek 4.6: Výsledné hodnoty CN pro povodí Rolavy	71
Obrázek 4.7: Schéma metody exponenciálního poklesu	72
Obrázek 4.8: Schéma osmibodového tvaru koryta	74
Obrázek 4.9: Rolava v pramenné oblasti a příslušný příčný	75

Obrázek 4.10: Rolava pod profilem Chaloupky a příslušný příčný profil.....	76
Obrázek 4.11: Příslušnost subpovodí ke srážkoměrné stanici	78
Obrázek 4.12: Srážkové úhrny podle radarových snímků 26.-29.9.2007	80
Obrázek 4.13: Hodinové rozložení srážkových úhrnů 28 .9. 2006 ve čtyřech stanicích...	81
Obrázek 4.14: Plošné rozložení srážek na povodí 26.-28.9.2007	82
Obrázek 4.15: Srážkové úhrny podle radarových snímků 5.- 8.8..2006	83
Obrázek 4.16: Hodinové rozložení srážkových úhrnů 6.8.2006 ve čtyřech stanicích.....	84
Obrázek 4.17: Plošné rozložení srážek na povodí 4.-6.8.2006	85
Obrázek 4.18: 100-letá 1-denní srážka z období 1895 - 2002	87
Obrázek 4.19: Schéma příslušnosti subpovodí k meteorologické stanici	87
Obrázek 4.20: Příklady návrhových hyetogramů pro povodí v různých klimatických podmínkách	89
Obrázek 4.21: Návrhové rozložení 100-letého denního srážkového úhrnu.....	89
Obrázek 4.22: Lokalizace čtyř potenciálních poldrů	91
Obrázek 4.23: Batymetrické křivky poldrů	92
Obrázek 4.24: Potencionální batymetrické znázornění zatopeného poldru Rolava_horní	93
Obrázek 4.25: Lokalizace uvažovaného poldru Rolava_dolní v krajině	93
Obrázek 4.26: Příklad rozmístění propustků na hrázi sedimentační nádrže na Chomutovce	94
Obrázek 5.1: Schéma procesu kalibrace	96
Obrázek 5.2: Hydrogramy pro epizodu září 2007	98
Obrázek 5.3: Výsledný hydrogram ze srpna 2006 zobrazený v HEC-HMS	99
Obrázek 5.4: Vliv systémů nádrží na odtok vody v září 2007.....	101
Obrázek 5.5: Vliv systémů nádrží na odtok vody v srpnu 2006.....	102
Obrázek 5.6: Hydrogramy průtoků s za různých N-letých srážkových úhrnů	103
Obrázek 5.7: Podíl jednotlivých nádrží na transformovaném odtoku během 10 a 100-letého srážkového úhrnu	105
Obrázek 5.8: Kulminační průtoky za N-leté srážkové denní úhrny v případě, že by do povodí byla implementována jen daná nádrž	107

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Typy hydrologických systémů.....	22
Tabulka 2.2: Hydrologické procesy a parametry použité při klasifikaci	22
Tabulka 2.3: Přehled metod výpočtů parametrů v s-o modelu HEC-HMS 3.3	31
Tabulka 2.4: Přehled nejpoužívanějších metod MAP.....	40
Tabulka 3.1: Vybrané stanice v blízkosti povodí Rolavy	52
Tabulka 3.2: Vybrané charakteristiky klimatických oblastí podle Quitta	53
Tabulka 4.1: Charakteristika hydrologických skupin půd	69
Tabulka 4.2: Denní srážkové úhrny v mm 24.- 30.9. 2007 podle stanic	80
Tabulka 4.3: Denní srážkové úhrny v mm 4. - 9. 8. 2006 na jednotlivých stanicích	84
Tabulka 4.4: Kvantitativní charakteristiky poldrů	91
Tabulka 5.1: Seznam kalibrovaných parametrů.....	100
Tabulka 5.2: Přehled základních charakteristik hydrogramů ze září 2007	101
Tabulka 5.3 : Přehled základních charakteristik hydrogramů ze srpna 2006	102
Tabulka 5.4: Přehled výsledných charakteristik kulminací během N-letých srážkových situací.....	105
Tabulka 5.5: Přehled dosažených nadm. výšek a objemů během N-letých srážkových událostí podle nádrží.....	106
Tabulka 5.6: Procentuální snížení kulminace v případě pouze jedné nádrže v povodí oproti stavu bez nádrže	108
Tabulka 5.7: Maximální dosažené hodnoty během všech scénářů v případě jedné nádrže v povodí.....	108

Seznam příloh

Příloha 1: Expozice svahů v povodí Rolavy a průměrná orientace svahů v subpovodích

Příloha 2: Krajinový pokryv CORINE Land cover 2000

Příloha 3: Hodnoty CN pro jednotlivé kategorie využívání území a HSP

Příloha 4: Hodnoty CN odvozené na základě HSP dle infiltrace

Příloha 5: Přehled základních fyzickogeografických charakteristik a parametry výpočtu objemu odtoku podle subpovodí

Příloha 6: Přehled parametrů vstupujících do výpočtu Clarkova UH podle subpovodí

Příloha 7: Uvažované umístění suchého poldru na Slatinném potoce

Příloha 8: Uvažované umístění suchého poldru na Jelením potoce

Příloha 9: Uvažované umístění suchého poldru Rolava_horní

Příloha 10: Uvažované umístění suchého poldru Rolava_dolní

1 Úvod

Složitost srážko-odtokového (s-o) procesu je v posledních letech umocněna očekávanými a částečně se již projevujícími vlivy změn klimatu, které jsou v našich zeměpisných šířkách spojeny především se změnami vydatnosti a časového rozložení srážek. Negativními projevy pak mohou být katastrofální povodně nebo dlouhotrvající sucha. Na území České republiky se průměrně v každém místě vyskytne 1x za rok pět až šest krátkodobých přívalových dešťů se srážkovými úhrny nad 10 mm (Janeček, 2002). Během takových dešťů dochází k různě intenzivní tvorbě povrchového odtoku a může dojít až k extrémnějším projevům povodní.

Poslední dvě velké letní povodně na území České republiky v letech 1997 a 2002 důrazně prokázaly, že je zapotřebí se s povodněmi naučit žít. Záplavy v roce 2006 i nejaktuálnější letní povodeň 2009 tuto skutečnost potvrdily. V konkrétní rovině jde o správnou aplikaci protipovodňových opatření tak, aby došlo k ochraně nejdůležitějších prvků oblasti. Plány pro zvládání povodňových rizik by měly být zaměřeny na prevenci, ochranu a připravenost (MŽP, 2007). Absolutní ochrana před povodněmi však není možná, a proto je potřeba vycházet ze specifických poměrů jednotlivých krajín. V povodňové ochraně je nutné počítat s rizikem výskytu takového ohrožení, které bude překračovat ochranný účinek dostupných protipovodňových opatření. O to více je potřeba vedle integrovaného managementu povodňové ochrany a strukturální ochrany typu různých technických opatření porozumět lépe zákonitostem, které řídí vznik povodňových událostí. Konkrétně jde o zdokonalení meteorologických a hydrologických předpovědí s ohledem na regionalizaci povodní. Zpřesnění včasného varování, ale i odhadu průběhu povodňové vlny, patří v současné době k nadějným cílům tématu ochrany před povodněmi. Klíčovým cílem by mělo být zkvalitnění dat, jejich úplnost, zpřesnění a dostupnost, což podle Langhammera (2007) v dnešní době představuje významný limitující faktor pro správnou analýzu povodňového rizika.

Moderní přístup k řešení protipovodňové ochrany je v současnosti pojímán komplexně. Aplikace odlišně koncepčně náročných opatření může přispět k pozitivnímu vlivu ochrany území před záplavami. Kombinací několika opatření lze dosáhnout zmírnění povodňových průtoků a následně i škod. Jedním z efektivních návrhů řešení ochrany před povodněmi jsou suché nádrže a soustavy menších retenčních nádrží. Jde o relativně účinné řešení, které lokálně zvyšuje retenční schopnosti údolní nivy akumulací vody v suchých nádržích. Obecně se menší nádrže začleňují dobře do krajiny (Langhammer et al., 2008).

Malá horská povodí jsou velice citlivá na krátké a intenzivní srážkové události, které dokáží generovat často extrémní průtoky v úzkém časovém období a nečekaně způsobují rozsáhlé škody. Odtok v horních částech povodí je ovlivňován mnoha faktory, které mají vliv na časové rozložení povodňové vlny. V horských a podhorských oblastech nelze aplikovat drastická protipovodňová opatření, která by změnila ráz krajiny. Měla by být aplikována pouze taková opatření proti záplavám, která neohrozí a nenaruší ráz krajiny a zároveň efektivně sníží průběh povodňových vln. Takovým příkladem může být systém čtyř malých vodních nádrží v povodí, který je v předkládané práci představen na příkladu povodí Rolavy v Krušných horách.

1.1 Cíle práce

- analýza chování krušnohorského povodí Rolavy během zvolených srážkových událostí pomocí softwaru HEC-HMS
- zhodnocení vhodnosti aplikovaných metod na zvolené území
- vytvoření kvalitního modelu povodí, který co nejpřesněji odpovídá charakteru studovaného území
- konkrétní zjištění potenciální role malých vodních nádrží v protipovodňové ochraně na daném území

1.2 Stanovení hypotézy

Základní hypotézou stanovuji tvrzení, že implementace systému malých vodních nádrží do povodí jakožto příklad přírodě blízkého protipovodňového opatření má při určitých srážkových událostech pozitivní vliv na průběh povodně, neboť zadržení určitého objemu vody přispěje ke zploštění povodňové vlny a celkovému zmírnění intenzity povodňové události. Lze však předpokládat, že znatelně pozitivní vliv během extrémnějších srážkových událostí může mít jen soustava s větším množstvím nádrží, což představuje nákladnou investici. Systém čtyř nádrží průběh povodňové vlny může ovlivnit.

2 Teoretická východiska

2.1 Stav výzkumu

Výzkumem problematiky hydrologického modelování se v České republice zabývají jak vysokoškolská pracoviště, tak i výzkumné ústavy spadající pod ministerstva, která z různých úhlů řeší problematiku krajiny a procesů v ní. Příkladem Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka (VÚV), Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) či Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd (VÚMOP). Problematika protipovodňové ochrany je řešena jak z teoretického, tak i z praktického hlediska pomocí řady nástrojů.

Významnou organizací v českém prostředí, která se zabývá problematikou matematického modelování v hydrologii a hydraulice je výzkumné centrum CIDEAS (Centrum integrovaného navrhování stavebních konstrukcí) při ČVUT. Hlavní význam mají ty aktivity, které směřují k přímému přenosu a uplatnění poznatků v praxi. Mnohé výsledky byly součástí grantového úkolu GAČR 103/04/1328 – „Nejistoty hydraulických výpočtů na vodních tocích pro extrémní hydraulické jevy“ (Sklenář, 2007).

Stěžejním grantovým projektem v programu Ministerstva zemědělství byl projekt „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“ (QD1368), řešený v letech 2001 – 2004, který úzce navazuje na projekt VaV „Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní“, realizovaný 1997 – 2000 pod garancí MŽP. V projektu byla provedena detailní rešerše stávajících srážko-odtokových modelů. Model HEC-1 se ukázal jako nejvhodnější model pro zavedení do hydrologické praxe v ČR (Šercl, 2005).

Zásadním nástrojem řešení protipovodňové ochrany a analýz srážko-odtokových vztahů na různorodých územích je hydrologické modelování. Hydrologické modelování prošlo dlouhodobým vývojem a v dnešní době představuje poměrně přesný moderní nástroj řešení řady projektů nejen v oblasti hydrologie. V předkládané práci je věnována pozornost HEC-HMS, který byl použit k simulaci srážko-odtokových vztahů na Rolavě. Hydrologický model HEC-HMS je vhodný pro řadu geografických analýz. V současné praxi se hojně řeší pomocí HEC-HMS vliv změn land use a land cover na změny v odtoku vody z krajiny. Modelováním odtokových procesů v závislosti na změnách ve struktuře krajiny se zabýval např. Jeníček (2007) či kolektiv Unucky (2006, 2007), ze zahraničních např. Ashagrie (2006), Brath et al. (2005) či McColl (2007). Vedle modelování odtoku vody z krajiny ve snaze o predikci povodní je v zahraniční literatuře HEC-HMS využíván i

pro výzkum v aridních oblastech (Al-Abed et al., 2004). Simulacemi srážko-odtokového procesu pomocí HEC-HMS věnovali např. Roub (2008) či Šercl (2007).

Pozornost tzv. decentrálním protipovodňovým opatřením byla věnována v letech 2006 – 2008 v česko-německém INTERREG III A projektu DINGHO (Dezentraler, integrierter und grenzübergreifender Hochwasserschutz in den deutsch-tschechischen Einzugsgebieten der Kammlagen des Mittleren Erzgebirges). Vhodnost použití decentrálních opatření v praxi byla ilustrována hydrologickými modelovacími systémy, mj. HEC-HMS. Výsledky projektu jednoznačně potvrzují nezbytnost aplikace matematických modelů do výzkumu (Schulte et al., 2008).

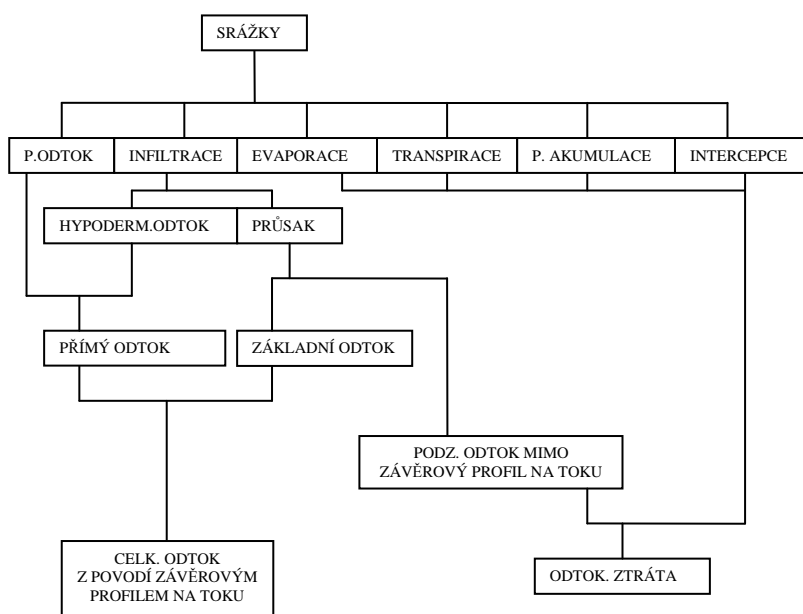
Návrhy řešení protipovodňové ochrany pomocí systému malých retenčních nádrží našly v České republice uplatnění. Příkladem vzorem v budování systému poldrů je Německo, kde se tento způsob zmírnění povodňových průtoků osvědčil i na velkých řekách jako je Rýn a Labe (Friedrich, 2006). Velmi propracovaný je plán protipovodňové ochrany pomocí řízených poldrů v Bavorsku v povodí Dunaje (MZE, 2006). Konkrétním příkladem systému kombinované a komplexně řešené protipovodňové ochrany je povodí Opavy. Na příkladu povodí vznikla řada studií, která zohledňovala vedle plošného odvodnění krajiny, zkapacitnění koryt v sídlech i výstavbu systému suchých nádrží a vodní nádrže Nové Heřminovy. Projekt detailně popisuje vliv opatření na průběh povodně v krajině použitím modelovacích nástrojů. Jedná se o kombinaci technických opatření a opatření v krajině, jejichž realizace však naráží na politické, ekonomické a sociální aspekty (Langhammer et al., 2008).

2.2 Srážko - odtokový proces

Potřeba kvalitních předpovědí chování odtoku vody z krajiny vedla k zpřesňování popisu celého s-o procesu. Jednotlivé fáze s-o procesu jsou ve všech fyzickogeografických podmínkách podobné, význam dílčích faktorů je však rozdílný. Rozdílnosti podstatně ovlivňují výběr, počet a pořadí důležitosti parametrů volitelných pro sestavení vztahu mezi srážkou a odtokem.

2.2.1 Tvorba odtoku ze srážek

Část spadlých srážek je nejprve zachycena intercepční. Srážky jsou akumulovány na povrchu vegetace, kde zůstávají a nedopadají na povrch. Srážky, která dosáhnou povrchu půdy se nazývají tzv. efektivní srážky. Na vlastním povrchovém odtoku se však nepodílí všechny spadlé srážky. Kromě intercepce hraje významnou roli akumulace v mikrodepresích zemského povrchu (tzv. detence) či evaporace a transpirace, které též nepřispívají k odtoku (viz obr. 2.1) (Just et al., 2005). Efektivní srážky jsou tedy skutečné srážky, od kterých lze odečíst vliv intercepce, evapotranspirace a povrchové retence (Jeníček, 2007a).

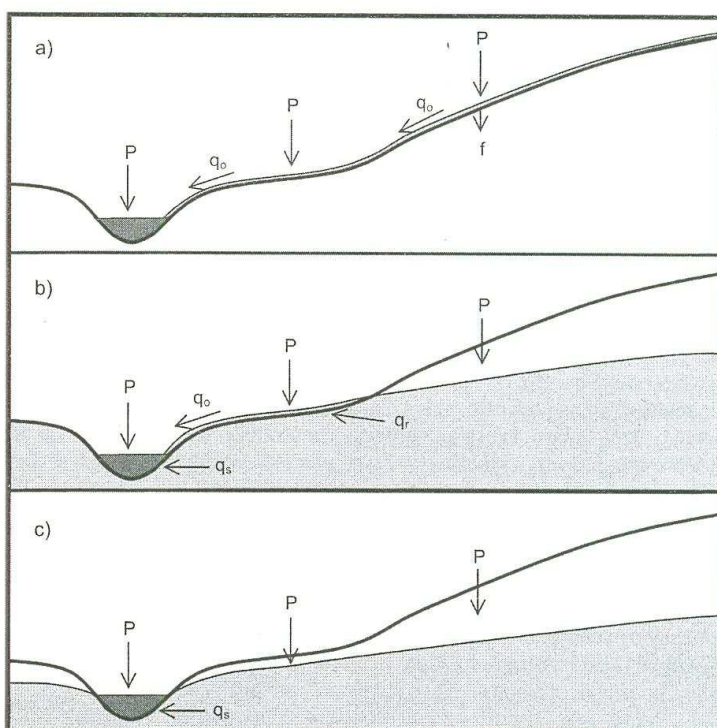


Obrázek 2.1: Schéma odtokového procesu (Just et al., 2005)

Většina efektivních srážek je infiltrována do půdy. Srážky nejprve infiltrují do půdy tzv. preferenčními cestami, což jsou drobné struktury narušení půdní kompaktnosti, které umožňují snadnější a rychlejší proudění vody do půdy. Při větší intenzitě deště dochází zároveň k plošné infiltraci do půdy. V půdě se voda gravitačně pohybuje do hlubších horizontů až k hladině podzemní vody (Daňhelka, 2007).

V okamžiku, kdy intenzita deště překročí infiltrační či retenční kapacitu půdy, přebývající dešť se začne hromadit a vyplňuje deprese na povrchu terénu. Po překročení infiltrační kapacity, rychlosti nebo v případě, že srážka dopadá na nepropustný povrch je generován povrchový odtok (*surface runoff*). Vznik povrchového odtoku podléhá třem základním teoriím. Překročením infiltrační rychlosti (*infiltration excess*) vzniká

nejznámější koncepce povrchového odtoku tzv. hortonovský odtok. Překročením retenční kapacity (*saturation excess*) vzniká tzv. dunneho odtok. Základní rozdíl mezi hortonovským a dunneho odtokem je, že při hortonovském odtoku se půda nasycuje srážkami shora, zatímco při „*saturation excess*“ podpovrchovou vodou zdola. Třetí teorie uvažuje opětovnou „exfiltraci“ vody (*return flow*) v nižších částech svahu, kdy se již jednou infiltrovaná voda vrací zpět na povrch a dále odtéká povrchově (Beven, 2001). Všechny tři situace názorně ilustruje obr. 2.2.



Obrázek 2.2: Vznik povrchového odtoku, a) infiltration excess, b) saturation excess, c) return flow; P – srážky, q_0 – povrchový odtok, q_r – vratný odtok, q_s – podpovrchový odtok (Beven, 2001)

Odtok vody z povodí lze dělit na povrchový a podpovrchový. Povrchový odtok je přímý odtok a tvoří tzv. rychlou část odtoku. Podpovrchový odtok je dělen na hypodermický a podzemní. Hypodermický odtok zahrnuje složku rychlou a zpožděnou podle rychlosti nasycení půdního profilu způsobené intenzitou srážek. Podzemní odtok spolu se zpožděnou složkou hypodermického odtoku tvoří základní odtok.

V podpovrchové nenasyčené půdní zóně aerace dochází k hypodermickému odtoku (*interflow*), který vzniká prouděním v mikro a makropórech. V zóně aerace dochází k perkolaci a na svazích k laterálnímu proudění infiltrované vody. Hypodermický odtok nastane v situaci, kdy do půdy infiltrovaná voda stéká po mělce uložené a málo propustné vrstvě a vyvěrá opět na povrch (Janeček et al., 2002). Spolu s povrchovým odtokem tvoří

rychlá část interflow přímý odtok (*direct runoff*), který se formuje zpočátku deště (Beven, 2001). Podle Daňhelky (2007) představuje hypodermický odtok největší složku odtoku při intenzivních srážkových událostech.

Během trvajících deště postupně dochází vlivem retenčního účinku terénu ke zvyšování akumulace vody na povrchu povodí. Retence v korytech stoupá až do okamžiku maxima odtoku. Po dosažení kulminace pokračuje odtok z povrchové i korytové říční retence až do vyčerpání zásob, přičemž dochází ke kulminaci podpovrchového odtoku (Beven, 2001). Součástí podpovrchového odtoku je podzemní odtok v nasycené zóně saturace (*groundwater flow*). Tento odtok je realizován z podzemních vod, kdy infiltrace doplňuje zásobu podzemních vod, a může probíhat i v suchém období. Základní odtok (*base flow*) je tvořen opožděným hypodermickým odtokem a podzemním odtokem. Základní odtok není konstantní v čase, mění se s intenzitou deště a jeho průběh je spojen s procesem infiltrace (Beven, 2001).

2.2.2 Faktory ovlivňující srážko-odtokový proces

Obecně můžeme činitele, které ovlivňují odtokový proces, rozdělit na předběžné a příčinné. Předběžné charakterizují stav podmínek před výskytem příčinného deště jako např. nasycenost půdy, teplota vzduchu, vlhkost ovzduší atd. Příčinnými parametry jsou srážky, resp. jejich velikost, doba trvání a intenzita (Hladný, 2008).

Dalším faktorům fyzickogeografického i antropogenního charakteru, které ovlivňují odtokový proces, se detailně věnovala bakalářská práce Taufmannové (2007). Souhrnně mezi nejvýznamnější faktory patří podle Hrádka (1990):

- Faktory klimatické (srážky, evapotranspirace)
- Orografické poměry povodí (výškové a sklonové poměry)
- Geologické a půdní poměry povodí
- Vegetační kryt a způsob využívání krajiny v povodí
- Akumulace vody v povrchových depresích, nádržích, bažinách
- Antropogenní činnost v povodí

2.3 Malé vodní nádrže

Pojem malé vodní nádrže (MVN) je vymezen ČSN 75 2410. Malé vodní nádrže představují vodní nádrže, u nichž jsou dle ČSN 75 2410 splněny tyto předpoklady (Herynek, Tlapák, 2002):

- objem nádrže po hladinu ovladatelného prostoru není větší než 2 mil. m³
- maximální hloubka nádrže nepřesahuje 9 m

V minulosti byly budovány především nádrže zásobní, často situované do zemědělské krajiny. V současné době jsou přednostně rekonstruovány a navrhovány nádrže, jejichž hlavním účelem je zadržení vody v krajině, zpomalení odtoku vody ze srážek, vyrovnaní průtoků v průběhu roku, tj. pozitivní ovlivnění vodohospodářské bilance povodí. Každá malá nádrž představuje v dnešní době polyfunkční objekt v krajině, přičemž bývá specifikován prioritní účel nádrže (Herynek, Tlapák, 2002).

Malé vodní nádrže tvoří velice významnou složku krajiny a ovlivňují pozitivně její ekologickou stabilitu. Aktuální problematika malých vodních nádrží tvoří komplex navzájem se ovlivňujících hledisek, která se setkávají s řadou problémů charakteru vodohospodářského, technického, ekologického, ale i majetkoprávních vztahů apod. Konkrétními negativními příklady jsou nevyhovující technický stav, jakost vody, zanášení nádrží sedimenty či stále se měnící legislativní předpisy (Herynek, Tlapák, 2002).

2.3.1 Kriteria návrhu MVN

Výběr místa pro situování malé vodní nádrže není jednoduchý a záleží především na tvaru nádržní pánve, účelu a požadované funkci nádrže, vodním zdroji a jeho vydatnosti, na hydropedologických a hydrogeologických podmínkách, na vlastnických poměrech dotčeného území a řadě dalších místních vlivech. Prostorové uspořádání objemu nádrže vyplývá z tvaru nádržní pánve, ze sklonu a uspořádání dna. Vhodný sklon údolí je do 1 %, při nižším sklonu je dosah vzduť i při nízké hrázi velký, naopak při větších sklonech než 1 % se dosah vzduť zmenšuje. Hráz bývá situována do nejužšího místa údolí ve snaze o dosažení co největšího poměru akumulované vody k objemu hráze (Herynek, Tlapák, 2002).

Pro návrh jakékoliv nádrže a přehradní hráze platí, že by měly být navrženy co nejefektivněji. Měl by být zkoumán poměr zatopené plochy a využitelného objemu a poměr mezi velikostí nádrže a objemem hráze. Malé vodní nádrže

mají efekt v problematice retence vody v krajině. Efekt je ale spíš ve smyslu obecného zadržetí vody a ne pro transformaci větších povodní (Pail, 2009). Pokud má mít MVN nějaký protipovodňový význam, měla by být zajištěna ovladatelnost odtoku a musí být vhodně zvoleno umístění nádrže vzhledem k ovladatelnému úseku toku, resp. povodí. Malé vodní nádrže by měly být posuzovány jako soustava, izolovaná nádrž má mizivý ochranný efekt, míra účinku se zvyšuje součinností nádrží a dalších protipovodňových opatření (Pail, 2009).

2.3.2 Retenční nádrže

Hlavní funkcí ochranných nádrží je zabezpečení ochrany níže ležícího území před účinky velkých vod. V ochranné nádrži je zachycena část povodňového průtoku, která by mohla způsobit škodu pod nádrží. Pro návrh je nutná znalost maximálních povodňových průtoků. Základem je nalezení vztahu mezi povodňovým průtokem a objemem retenčního prostoru nádrže se sníženým průtokem. Základními typy retenčních nádrží jsou podle Herynka a Tlapáka (2002):

- suché ochranné nádrže určené k zachycení povodňových odtoků, jejich krátkodobé akumulaci a postupnému vypouštění při nižších vodních stavech, tzv. suché poldry.
- ochranné nádrže s přesně vymezeným velkým ochranným prostorem určeným k zachycení povodňových průtoků, resp. ke snížení kulminace povodňových průtoků
- nádrže rybníčního typu s vymezeným dalším automaticky vyprazdňovaným retenčním prostorem a neovladatelným retenčním prostorem

Pro potřeby modelování vlivu malých vodních nádrží na povodňové události v předkládané magisterské práci byly řešeny MVN typu suchý poldr.

Poldry

Poldry dočasně akumulují vodu při zvýšených odtocích. Jedná se o ohrázené prostory schopné zadržet část povodňového průtoku. Po průchodu povodňové vlny se retenční prostor postupně vyprázdní. Lze je po většinu roku zemědělsky využívat, pokud se nacházejí v zemědělské krajině. Mohou být navrhovány jako samostatné nádrže, v kaskádě na svahu nebo při toku jako boční nádrže (Hrádek, Soukup, 1999).

Podle Justa et al. (2005) lze rozlišovat průtočné, postranní či suché a polosuché poldry. Průtočný poldr je vybaven větším retenčním prostorem, na kterém zadržováním

vody dochází ke zmenšení kulminační hodnoty povodňové vlny a jejímu zpomalení. Postranní poldr je ohrázený prostor v nivě neprotékaný tokem, do něhož se po dosažení určité hladiny přelévá z vodního toku část povodňového průtoku. Suché poldry nemají žádné stálé zadržení vody a celý jejich objem je určen pro zachycení vody z povodní. Polosuché poldry s trvalým částečným zadržením nabývají dnes většího významu než suché poldry, neboť jsou klasifikovány jako bezpečnější stavby (Just et al., 2005).

Budování poldrů je žádoucí nejen z hlediska zvýšení retence vody v krajině, ale i z hlediska protierozní ochrany půd (Hrádek, Soukup, 1999) a rozhojnění přírodních prvků v území (Just et al., 2005). Budování poldrů patří v české krajině k nadějně protipovodňové ochraně, která je podporována EU formou dotací ze strukturálních fondů. Příkladem úspěšně vybudovaných poldrů v české krajině jsou Čihadla na řece Rokytce, poldr Staré město v Uherském Hradišti nebo dále poldry na Tiché Orlici, Moravské Sázavě (Žichlínek), Mrlině apod.

2.4 Hydrologické modelování

Srážko-odtokové (S-O) modelování představuje velmi účinný nástroj simulace chování vody v krajině za různých podmínek, díky kterému se predikce průběhu a následků ničivých povodní stává kvalitnější.

Historie hydrologického modelování spadá do 20. let 20. století. V prvních letech došlo k podrobným popisům komponent hydrologického cyklu, což vyvrcholilo Shermanovou teorií jednotkového hydrogramu v roce 1932 a Hortonovým popisem infiltračního procesu v roce 1939 (Boughton, Droop, 2002). Následný rozvoj informační technologie přivedl hydrologii do nové dimenze. Hydrologické modelování umožnilo hodnoti území komplexněji a ve větším měřítku v průběhu odlišných časových intervalů. Tehdejší i současné praktické nároky na charakter hydrologických modelů spočívají v jejich uživatelské jednoduchosti, implementaci dostupných dat a zajištění vysoké míry přesnosti výstupních dat (Dawdy et al., 1972). Předními výzkumnými pracovišti, kde probíhal vývoj simulací chování povodí pomocí výpočetní techniky, byly Harvard University, Stanford University a U.S. Army Corps of Engineers. Zlomem bylo vytvoření prvního dostupného hydrologického simulačního programu The Stanford Watershed Model, který položil základ dnešním matematickým simulačním modelům hydrologických jevů (Bedient, Huber, 1989).

V posledním desetiletí zaznamenalo nasazení metod umělé inteligence v hydrologii a vodním hospodářství značný nárůst, přesto by mohlo být stále vyšší a zasluhuje větší publicitu. Podle Starého (2005) přesnost popsaných algoritmů použitých pro simulaci odtoku vody z povodí za povodňových situací neklesá pod 10 až 15 %. Přesnost předpovědi průtoků neklesá pod 30 % a je úměrná přesnosti použitých předpovědí srážek nad povodím. Rozvoj použití srážko-odtokových modelů v České republice zaznamenal od 90. let značný nárůst, neboť rostla po velkých záplavách potřeba nacházet stále nové technologie, které by napomohly lepší predikci, analýze i hodnocení větších srážkových epizod.

Matematický model hydrologického procesu vyjadřuje kvantitativní vztah mezi vstupními a výstupními veličinami. Konkrétně jde o transformaci příčinných srážek do výsledného odtoku v daném čase (Maidment, Djokic, 2000). Provoz modelu v podmínkách reálných aplikací je možný za použití výpočetní procedury. Procedura představuje soustavu vzájemně souvisejících postupů, které neřeší jen hydrologické procesy. Zároveň je nezbytná pro provoz modelu v různých podmínkách a určuje využitelnost modelu. Hydrologický model oproti výpočetní proceduře popisuje definovaný proces. Matematický model numericky reprezentuje odtokový proces a tvoří nejdůležitější komponentu procedury (Daňhelka et al., 2003). Vedle matematických modelů existují i modely analogové (elektrické, hydraulické) a fyzikální, kterým však v předkládané práci není věnována pozornost.

Použití s-o modelů má široký rozsah působnosti. Převážně jsou modely uplatňovány v operativní hydrologii, ve výzkumu, ale i při řešení různých návrhů a plánování ve vodním hospodářství. V konkrétné rovině jde o aplikace např. při navrhování objektů ochrany v protipovodňové problematice, stanovení hydrologické bilance, modelování šíření znečištění ve vodních systémech, simulace průchodu povodňových průtoků v libovolné časové epizodě v různých typech krajín nebo modelování dlouhodobých předpovědí na základě klimatické změny.

Procedura hydrologického modelování se skládá z několika kroků. Obecně lze konstatovat, že předpovědní proces u hydrologických modelů sestává z tří postupů. První část zahrnuje přípravu a zpracování dat, která mají být do modelu vložena. Druhou částí hydrologického modelování je vlastní zpracování hydrologické předpovědi pro dané

časové období. Poslední stěžejní částí je interpretace výstupů pro potřeby dalších zpracování a aplikací (Daňhelka, 2007). Tento postup je dodržován např. pro řízení vodohospodářských systémů, protipovodňovou ochranu, ale i pro posouzení rizika bleskových povodní na menších území apod.

2.4.1 Klasifikace hydrologických modelů

S-o modely zahrnují širokou oblast využití a do dnešní doby byla vyvinuta řada modelů, které využívají různé postupy řešení. Potřeba nalezení přesných modelů ke konkrétním vodohospodářským situacím si vyžádala přehlednou klasifikaci s-o modelů. Výběr modelů uživateli závisí na řadě faktorů, především jde o schopnost simulovat odtok v prostorovém i časovém kroku odpovídající velikosti povodí, dostupnost vstupních dat, vazbu na jiné softwary typu GIS, ale i technické skutečnosti jako je komerční dostupnost programu a systémová podpora.

Klasifikace je založena na rozdělení do několika kategorií a zpřehledňuje orientaci v modelech. Klasifikací s-o modelů se zabývala řada autorů, např. Daňhelka (2003, 2007), Buchtele (2002), Hrádek (1990), ze zahraničních např. Beven (2001), Maidment (1993) či Feldman (2000). Stěžejní publikací je klasifikace podle WMO (*World Meteorological Organization*) od Beckera a Serbana (1990), uvedená metodika je používána dodnes.

Klasifikace uvedená v publikaci Daňhelky et al. (2003) zcela vychází z klasifikace WMO uvedené v Becker a Serban (1990) a rozděluje modely do kategorií dle:

- Účelu aplikace (*purpose of model application*)
- Typu simulovaného systému (*type of system to be modeled*)
- Typu a míry komplexnosti hydrologického procesu (*hydrological process or related variable to be considered*)
- Stupně kauzality simulovaného procesu (*degree of causality of the process*)
- Požadovaného rozsahu časové a prostorové diskretizace (*required time and space discretization*)

Klasifikace dle účelu aplikace

Podle tohoto hlediska se s-o modely dělí na modely pro potřebu operativní hydrologie, kde model slouží k předpovědi odtoku vody z povodí, pro potřebu plánování ve vodním hospodářství a pro výzkum.

Klasifikace dle typu simulovaného systému

Toto kritérium je určující pro vodohospodářskou praxi. Podle typu systému jsou modely děleny na elementární a komplexní. Použití modelu znázorňuje tabulka 2.1 podle WMO.

Tabulka 2.1: Typy hydrologických systémů (podle Becker, Serban v Daňhelka et al., 2003)

číslo	typ simulovaného systému	ID (dle WMO)
1.	Elementární prvky modelovaných systémů	
1.1	Hydrotopy	HU
1.2	Méně až středně velké odtokové plochy	SA
1.3	Zvodnělé vrstvy	AQ
1.4	Říční sítě	RR
1.5	Nádrže nebo jezera	RL
2	Komplexní systémy	
2.1	Komplexní systém říčních sítí, kanálů a nádrží	CS
2.2	Povodí nebo velké odtokové plochy	CB

Klasifikace dle typu a míry komplexnosti hydrologického procesu

Rozdělení podle hydrologických procesů a parametrů uvedených v Becker a Serban (1990) uvádí tabulka 2.2.

Tabulka 2.2: Hydrologické procesy a parametry použité při klasifikaci (podle Becker, Serban v Daňhelka et al., 2003)

číslo	hydrologické procesy a parametry	ID (dle WMO)
1.	Půdní vlhkost a evapotranspirace	ES
2.	Objemy podzemní vody, hladina, průtok	SG
3.	Průtoky a vodní stavy v říční síti	
3.1	s časovým krokem < 1 den	QF
3.2	s časovým krokem > 1 den	QM
4.	Teplota, ledový režim	TW
5.	Splaveniny a související parametry	QS
6.	Parametry kvality vody	WQ

Klasifikace dle stupně kauzality simulovaného procesu

Kauzalita je vyjádřena ve vztahu příčina – důsledek (*cause – effect*). V rámci této kategorie jsou dále základně děleny modely na deterministické a stochastické (viz obr. 2.4)

Hydrologické procesy vždy obsahují deterministické i stochastické prvky, přesto jsou většinou modely založeny jen na jednom principu. Výstupy modelů jsou pak obvykle zatíženy chybami, které by byly vyjádřitelné stochastickými prostředky, jde-li o deterministický model a naopak. Většina hydrologických modelů jsou deterministické se stochastickými prvky (Daňhelka et al., 2003).

Deterministické modely pracují na principu příčina – důsledek, tzn. vstup určuje jednoznačný výstup, např. vstupní srážka způsobí odtokovou odezvu. Veškeré komponenty v modelu HEC-HMS zahrnují deterministický přístup. Podle obtížnosti vnitřních vazeb jsou děleny na tzv. *white-box*, *grey-box* a *black-box* modely (Becker, Serban, 1990):

- *White-box* – hydrodynamické modely, založené na základních fyzikálních zákonech
- *Grey-box* – konceptuální, reflektují základní fyzikální zákony, ale ve zjednodušené podobě a jsou obohaceny o určitý stupeň empirizmu
- *Black-box* – nezahrnují explicitně fyzikální zákony, zohledňují vztahy, které empiricky popisují příčiny a důsledky, procesy probíhající uvnitř zůstávají skryty

Stochastické modely neuvažují vztah příčiny a důsledku. Jsou založeny na pravděpodobnostním prvku, který ovlivňuje výstup. Je-li model spuštěn několikrát za sebou a vstupní data nejsou pozměněna, výsledek se vždy bude mírně lišit právě díky měnícímu se pravděpodobnostnímu prvku. Modely lze dělit na modely pravděpodobnostní a modely pro generování časových řad (Becker, Serban, 1990):

- *Stochastic Probabilistic Models* – modely jsou charakterizovány hydrologickými funkcemi s daným pravděpodobnostním rozdělením, což ovlivňuje výstupní hodnoty
- *Stochastic Time series generation* – modely využívají extrapolaci časových řad nebo jiných hydrologických parametrů, přičemž dochází k zachování základních statistických charakteristik

Klasifikace dle požadovaného rozsahu časové a prostorové diskretizace

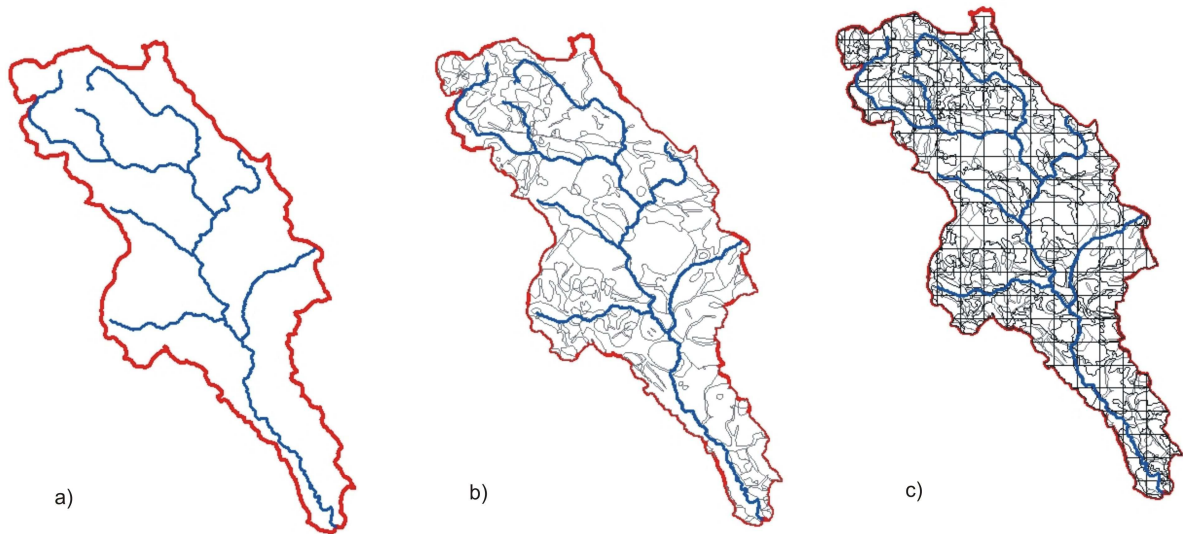
Míra časové diskretizace je používána podle způsobu použití modelu. Volba časového kroku jedna hodina až jeden den je vhodná pro situace operativního charakteru, studie protipovodňové ochrany, erozních jevů, modelování šíření znečištění či posouzení jakosti povrchových vod. Časový krok jeden týden až měsíc vyhovuje bilančním simulacím.

Z hlediska délky časového intervalu rozlišujeme modely na kontinuální a epizodní (událostní). Kontinuální modely jsou častěji využívány k simulacím na větších plochách, které bývají postiženy regionálními dešti. Kontinuální modely simulují i víceletá období. Naproti tomu událostní modely jsou aplikovatelnější na menší území, která jsou náchylná k tvorbě bleskových povodní. Událostní (*event models*) mohou zanedbávat podzemní složku odtoku (Daňhelka et al., 2003). Epizodní modely lépe vystihují přívalové srážky. Událostní model je např. model HEC-HMS používaný v této práci.

Míra prostorové diskretizace představuje technicky složitější klasifikaci, neboť dochází k dělení podle schematizace hodnoceného území (obr. 2.3). Na základě prostorové diskretizace rozlišujeme celistvé, semi-distribované a distribuované modely (Becker, Serban, 1990):

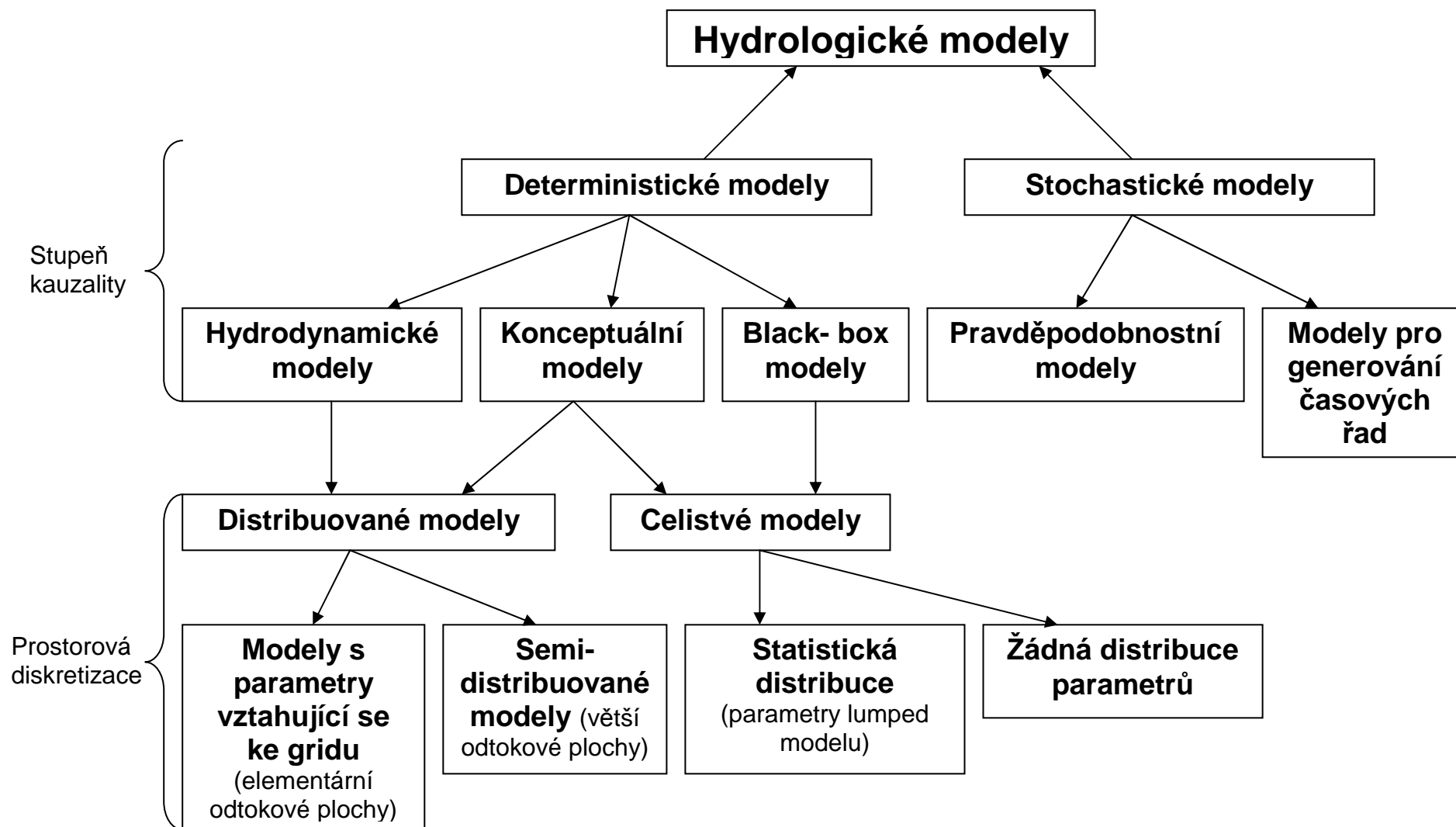
- *Celistvé (lumped)* – někdy označované za modely soustředěných parametrů. Zvolenému prostoru odpovídají celistvé vlastnosti pro celé povodí, není zohledněna prostorová distribuce určitých charakteristik. Modely jsou více využívány díky své jednoduchosti. Struktura je založena na fyzikální koncepci podpořené experimentálními výsledky. Může se jednat o *black-box* či konceptuální modely. Do této kategorie patří HEC-HMS, který již však ve své nové verzi podporuje i distribuované přístupy formou gridů (např. funkce *ModClark*)
- *Semi-distribované* – princip modelu je založen na rozdělení území na menší celky na základě zvolených kritérií. Model představuje ideální kombinaci různých deterministických modelů, který lépe vystihuje parametry hydrologického systému a fyzickogeografických charakteristik, které znatelně ovlivňují odtok

- *Distribuované* – modely člení území na síť pravidelných segmentů, především do čtvercové sítě (grid), popř. trojúhelníkové. Modelované procesy jsou pak řešeny pro každý grid samostatně. Gridy tvoří elementární odtokové plochy a jejich velikost závisí na mnoha faktorech tak, aby byla zaručena platnost řídicích rovnic. Příkladem je model AquaLog v předpovědní službě ČHMÚ



Obrázek 2.3: Zjednodušené schéma odlišné reprezentace prostorových dat, a) celistvý model, b) semi-distribučný model, c) distribuovaný model (DIBAVOD, CORINE - Land cover 2000, <http://geoportal.cenia.cz>)

Koncepční celistvé modely mají delší historii než distribuované. Často se v praxi naráží na problém neúplnosti dat pro větší území. V takových případech jsou upřednostňovány lumped modely, jelikož při přípravě vstupních dat dochází ke generalizaci. Výsledky jsou uspokojivé a použitelné. Distribuované modely přesněji vystihují chování systému, pokud mají dostatečně homogenní data, proto se využívají zejména v operativních předpovědích. Intenzita výzkumu i aplikací distribuovaných modelů vzrostla za posledních 20 let (Daňhelka et al., 2003). Rostoucí význam získávají semi-distribučné modely, které umožňují zohlednit různé fyzickogeografické vlivy na odtok z povodí.



Obrázek 2.4: Schéma základního dělení hydrologických modelů (upraveno podle Becker, Serban, 1990)

2.4.2 Příklady modelů používaných v ČR

Rozvoj hydrologických modelů v posledních dvou letech je patrný podle řady publikací, které byly dané problematice věnovány. Existuje mnoho teoretických přístupů, důležitější je však hodnocení praktické. V publikaci ČHMÚ (Daňhelka et al., 2003) se autoři zaměřili na posuzování v praxi nejužívanějších s-o modelů. Kritérii hodnocení byla spolehlivost předpovědi, procentní objemová chyba, relativní chyba kulminace, náročnost na vstupní data a jejich kvalitní zpracování atd. Procentní objemová chyba a relativní chyba kulminace jsou obzvláště důležité pro operativní předpovědi. Poměrně kvalitně byly hodnoceny modely SAC-SMA i API (komponenta Hydrologického Předpovědního Systému AquaLog), avšak numerické testy koeficientů korelace mezi pozorovanými a vypočtenými hodnotami vykazovaly nižší hodnoty.

V současné době se v České republice provozují následující modely: AquaLog, HBV, HYDROG, SAC-SMA, MIKE-SHE, WMS, HEC-HMS (HEC-1), SAC-SMA.

AquaLog je hydrologický předpovědní systém provozovaný na Labi v ČR. Systém integruje s-o model SACRAMENTO (SAC-SMA) včetně jeho sněhové komponenty SNOW17, dále model proudění vody korytem TDR a model simulující průtok nádrží MAN (ČHMÚ, 2004). HBV je konceptuální hydrologický model vyvinutý ve Švédsku, který zahrnuje jak krátkodobé, tak dlouhodobé předpovědi (SMHI, 2003). Model HYDROG je s-o distribuovaný model určený k simulaci povodňových situací v povodí, operativnímu řízení vodohospodářských děl a vydávání operativních předpovědí průtoků ve vodních tocích. Byl vytvořen prof. Starým v Brně a je používán pro regionální předpovědi na povodích Odry a Moravy (ČHMÚ, 2006c). Model MIKE-SHE je konceptuální distribuovaný systém vyvinutý v Dánsku, jenž umí simulovat epizodně i kontinuálně (CRWR, 2007). SAC-SMA je v ČR součástí systému AquaLog, je založen na parametrizaci půdní vlhkosti, kdy model využívá soustavu zón se stanovitelnými kapacitami, které jsou spojeny procesy umožňující hodnotit průběh nasycení půdy (Daňhelka et al., 2003).

2.5 Hydrologický model HEC-HMS 3.3

2.5.1 Obecná charakteristika

HEC-HMS byl vytvořen pro simulaci srážko-odtokového procesu v povodí. S-o model byl vyvinut v roce 1964 ve výzkumném centru U.S. Army Corps of Engineers (USACE) Hydrologic Engineering Center (HEC USACE, 2009). Prvními softwarovými balíčky byl HEC-1, který se zabýval problematikou odtoku vody v povodí, HEC-2 řešící říční hydrauliku, HEC-3, který již umožňoval analýzy chování vody v nádržích či HEC-4. Během let docházelo k neustálému zdokonalování programů, rozšiřování jejich působnosti a komunikace s jinými softwary. Předním úspěchem byla podpora s GIS programy (Correia et al., 1998). Model patří v současné době mezi nejrozšířenější programy svého druhu. Jeho přednostmi jsou volná dostupnost na internetu, přehlednost, nenáročné požadavky na vstupní data a možnost propojení s prostředím GIS. Nejnovější dostupnou verzí je HEC-HMS 3.3.

HEC-HMS byl vytvořen tak, aby dokázal simulovat s-o procesy v rozvětvených vodních systémech. Model je použitelný v širokém spektru geografických procesů. Konkrétně umí řešit problematiku povodňové hydrologie, zásoby vody z velkých povodí, ale i odtok vody z malých či městských území. Výstupem z HEC-HMS jsou hydrogramy znázorňující průběh odtoku vody v čase v závislosti na srážkách a dalších charakteristikách povodí. Výsledné hydrogramy jsou použitelné ihned k hydrologickým analýzám nebo spolu s dalšími softwary přispívají k řešení hydrologických předpovědí, povodňových škod, regulace vody v nivě, operativních předpovědí, dostupnosti vodních zdrojů, odvodnění měst atd. (HEC USACE, 2009).

Program HEC-HMS je generalizovaný modelovací systém, který je schopný hodnotit odlišná povodí a území. Každý matematický model v softwaru je schopný pracovat v rozdílných prostředí za jiných podmínek (HEC USACE, 2009). HEC-HMS je flexibilní program, který dovoluje uživateli zvolit mezi různými přístupy výpočtu odtokové ztráty, modely základního odtoku, proudění vody v jednotlivých úsecích toků apod. tak, aby došlo k co nejpřesnějším výsledkům (Maidment, Djokic, 2000).

Podle klasifikace se model řadí mezi deterministické a konceptuální modely, neboť části hydrologického procesu jsou v programu počítány matematickými vztahy. Jde především o celistvý model, některé komponenty mohou být řešeny distribuovaně jako např. metoda *Green and Ampt* při stanovení přímého odtoku či *ModClark* u problematiky přímého odtoku. Většinou je HEC-HMS používán jako událostní model, jelikož umí dobře

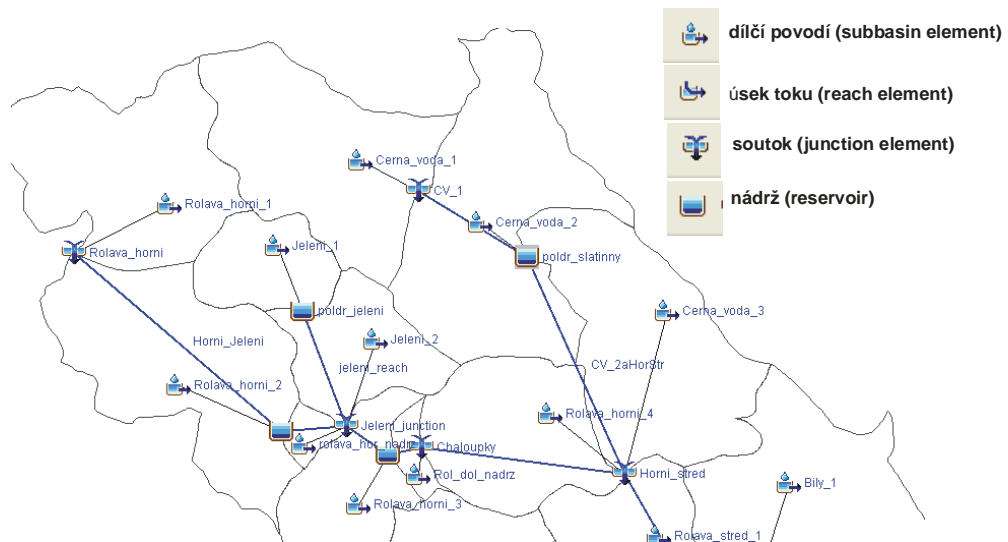
simulovat přívalové srážky, má-li k dispozici vhodná data. Kontinuální přístup může být aplikován na metody stanovení objemu odtoku jako SMA (*Soil moisture accounting*), *Gridded SMA* či metoda *Deficit and constant rate* (Feldman, 2000).

Zpracování prostorových dat jako vstupních podkladů pro modelování v HEC-HMS probíhá v geografických informačních systémech, které dovolují export dat z GIS do HEC-HMS a následný import výsledků zpět do GIS. Software, který dobře splňuje tento požadavek je ArcGIS (resp. jeho extenze ArcHydro Tools). Pro potřeby HEC-HMS byly vyvinuty extenze HEC-GeoHMs a HEC-GeoRas (pro hydraulické modelování) (Jedlička, Štych, 2006). Tyto nadstavby i ArcHydro Tools dovolují provádět výpočty z digitálního modelu terénu a umožňují určovat některé hydrologické charakteristiky. ArcHydro Tools však nepodporuje jednoduchý import dat do HEC-HMS. Pro správu časových dat a výsledků simulací využívá HEC-HMS databázový program HEC-DSSvue.

2.5.2 Struktura modelu

Pro srážko-odtokové modelování v HEC-HMS jsou modelem vyžadovány tři základní vstupní komponenty – parametry povodí (*basin component*), komponenta srážek (*precipitation component*) a kontrolní komponenta (*control component*). První dvě uvedené komponenty jsou silně závislé na prostorových faktorech, vstupní data jsou generována pomocí geografických informačních systémů (Maidment, Oliver, 1999).

První je model povodí (*basin model*), ve kterém se jedná o popis povodí a jeho vlastností. Tento model představuje fyzickou reprezentaci povodí. Basin component zahrnuje popis elementů hydrologického systému (subpovodí, charakteristiky koryt, nádrže, pramenných oblastí atd.). Model povodí je vytvořen pomocí vzájemně propojených hydrologických elementů, k nimž se vztahují metody, které určují jednotlivé složky s-o procesu. Pouze správné propojení jednotlivých elementů v povodí umožňuje modelovat odtokové události. Model zahrnuje metody stanovení objemu odtoku, přímého odtoku, základního odtoku, proudění vody v korytě a charakteristiky nádrží. V modelu je nejprve potřeba správně prostorově vytvořit stromové schéma povodí. Postupně jsou propojovány nástroje *Subbasin* (dílčí povodí), *Reach* (úsek toku) a *Junction* (soutok) všechna subpovodí, čímž je odtok směřován do závěrového profilu. Zároveň jsou do povodí implementovány nádrže. Výřez z tzv. *basin model map*, resp. propojení dílčích subpovodí znázorňuje následující obr. 2.5 vyjmutý z programu HEC-HMS (horní povodí Rolavy).



Obrázek 2.5: Schéma modelu povodí s dílčími elementy v modelu HEC-HMS

Druhou částí je meteorologický model, v němž je potřeba dobře definovat vstupní data podle dílčích povodí (Maidment, Djokic, 2000). Meteorologický model kromě analýzy srážek nabízí metody určení evapotranspirace či hodnocení tání sněhové pokrývky (obě metody nejsou v předkládané práci zohledňovány). Vlastní simulace je kombinací dat z meteorologického modelu a modelu povodí ve specifikovaném časovém intervalu a určeném časovém období.

Třetí částí je model kontroly (*Control Specifications Manager*) a kromě tří hlavních modelů uváděných dle Maidmenta a Djokice (2000) obsahuje HEC-HMS další složky jako např. *Time-series Data* či *Paired Data*. V modelu kontroly neboli kontrolní specifikaci se definuje počátek, konec a časový krok simulace.

Basin component zahrnuje popis elementů hydrologického systému (subpovodí, charakteristiky koryt, nádrže, pramenných oblastí atd.). Pouze správné propojení jednotlivých elementů v povodí umožňuje modelovat odtokové události.

Program HEC-HMS používá v modelu povodí k vyjádření jednotlivých složek s-o procesu čtyři základní modely (Feldman, 2000):

- model přímého odtoku
- model výpočtu objemu odtoku
- model podzemního odtoku
- korytový model

Tabulka 2.3 uvádí přehled metod výpočtu čtyř základních parametrů nabízených v modelu HEC-HMS. Zeleně jsou označeny použité metody v této práci, kterým je detailní zřetel věnován v kapitole Materiál a metody. V české literatuře nejsou všechny metody příliš překládány, proto byly některé ponechány v originálním znění. Na několika následujících stranách je podán přehled nejpoužívanějších metod výpočtu jednotlivých parametrů.

Tabulka 2.3: Přehled metod výpočtů parametrů v s-o modelu HEC-HMS 3.3 (Feldman, 2000)

	parametr			
	transformace přímého odtoku	výpočet objemu odtoku	odvození základního odtoku	korytový model
metoda	Clark Unit Hydrograph	Deficit and Constant	Bounded Recession	Kinematic Wave
	Kinematic Wave	Exponential Loss	Constant Monthly	Lag
	ModClark	Green and Ampt	Linear Reservoir	Modified Puls
	Snyder Unit Hydrograph	Gridded Deficit Constant	Nonlinear Boussinesq	Muskingum
	SCS Unit Hydrograph	Gridded SCS Curve Number	Recession	Muskingum-Cunge
	User-Specified S-Graph	Gridded Soil Moisture Accounting		Straddle-Stagger
	User-Specified UH	Initial and Constant		
		SCS Curve Number		
		Smith Parlange		
		Soil Moisture Accounting (SMA)		

2.5.3 Model přímého odtoku

K transformaci srážek na přímý odtok využívá model HEC-HMS 3.3 sedm možných způsobů. Volba metody transformace přímého odtoku je klíčovou součástí metodického postupu, neboť určuje tvar vlny, a tím i velikost kulminačního průtoku (Šercl, 2007).

Transformaci srážky odtokem řeší teorie jednotkového hydrogramu zavedená do praxe v roce 1932 Shermanem (Bedient, Huber, 1989). Teorie jednotkového hydrogramu vyjadřuje časové rozložení odtoku z jednotky příčné srážky (Daňhelka, 2007). Jednotkový hydrogram (UH – *Unit Hydrograph*) je unikátní pro každé povodí.

Teorie jednotkového hydrogramu je v různých modifikacích a ve spojení s dalšími hydrologickými postupy jednou z nejužívanějších metod pro určení povodňového odtoku. Metoda jednotkového hydrogramu patří mezi metody, ve kterých se povodí schematizuje na systém popsaný transformační funkcí. Ta zprostředkuje transformaci vstupu (časového průběhu srážek) na výstup (časový průběh odtoku). Jednotkový hydrogram je odezvou

povodí na efektivní déšť jednotkového objemu. Jedná se o průtokovou vlnu přímého odtoku v závěrovém profilu, která je způsobená jednotkovou srážkou s jednotkovým objemem (Blažková, 1993).

Teorie UH podléhá několika kritériím (Feldman, 2000):

- **Princip linearity** (*assumption of linearity*) – přímý odtok v určitém časovém intervalu je přímo úměrný odpovídající vstupní příčinné srážce
- **Princip časové invariance** (*assumption of time-invariance*) – velikost přímého odtoku není závislá na době výskytu srážky, která způsobila odtok
- Příčinná srážka je s konstantní intenzitou uniformně prostorově distribuována během daného časového intervalu
- Příčinná srážka určitého trvání způsobí vždy stejně dlouhou odtokovou odezvu neohledně na intenzitu srážky
- **Princip superpozice** – průtoky způsobené po sobě následujícími dešti mohou být vypočteny sečtením průtoků vyvolaných jednotlivými dešti, s uvážením časů jejich výskytu (Blažková, 1993)

Model HEC-HMS nabízí dvě varianty transformačních metod. Konceptuální modely odtoku nabízí metodu kinematické vlny, která disponuje všemi základními fyzikálními mechanismy. Empirické modely zahrnují tradiční jednotkové hydrogramy. Tyto modely v sobě neobsahují detailní informaci o procesech probíhajících uvnitř modelu, rovnice a parametry mají limitující fyzikální charakter (Daňhelka et al., 2003).

Teorii UH v přírodě neodpovídají téměř žádné situace, není zachována homogenita jednotkové srážky v prostoru ani její intenzita v čase. Z tohoto důvodu byly odvozeny syntetické jednotkové hydrogramy (Beven, 2001).

Clarkův jednotkový hydrogram (Clark UH)

Clarkův UH představuje syntetický jednotkový hydrogram, který byl použit v této práci a podrobnějšímu vyjádření této metody je věnována pozornost v kapitole Materiál a metody. Clarkův UH je odvozen tak, aby jasně reprezentoval dva hlavní procesy v transformaci příčinné srážky na odtok. Prvním procesem je převod nebo pohyb z místa původu do závěrového profilu, druhým je útlum či snížení velikosti průtoků při rozložení efektivní srážky přes povodí (Váňová, 2008). UH počítá s translací přímého odtoku a následně s jeho transformací, což znamená snížení maxima v důsledku krátkodobého

zadržení vody v povodí (Feldman, 2000). Parametry vstupující do modelu HEC-HMS a určující průběh funkce jsou :

T_c – doba koncentrace (*time of concentration*) [h]

R_c – retenční konstanta (*storage coefficient*) [h]

Model kinematické vlny (Kinematic Wave)

Model kinematické vlny je alternativou metod jednotkového hydrogramu. Model kinematické vlny, který býval původně často používán pro reprezentaci městských území, zohledňuje zároveň fyzikální procesy (např. infiltrace, proudění v korytě), proto má v současnosti široké uplatnění. Patří mezi konceptuální modely (Feldman, 2000).

Tato metoda je poměrně složitá a náročná na vstupní data. Vstupní parametry k této metodě jsou délky, sklony a drsnostní charakteristiky svahů, procentní zastoupení propustných a nepropustných ploch povodí. K popisu hlavního toku je zapotřebí délka hlavního toku, popis tvaru koryta, sklon hlavního toku, reprezentativní drsnostní Manningův součinitel a pro charakteristiku sběrného koryta je nutné zadat odvodňovanou plochu sběrným korytem, jeho délku, tvar a drsnostní součinitel. Tento model je reprezentován povodím ve zjednodušené podobě velmi širokého otevřeného koryta (Roub, 2008). HEC-HMS nabízí dále speciální okno s vlastnostmi koryta vodního toku, kde jsou zadávány podobně jako předchozí parametry obohacené o údaj o šířce a tvaru koryta. Základem této metody jsou rovnice kontinuity a aproximace věty o hybnosti. Oproti Clarkovu UH reprezentuje nelineární odezvu systému.

Snyderův jednotkový hydrogram (Snyder UH)

Snyderův jednotkový hydrogram byl prvním syntetickým hydrogramem použitelným na plochy od 10 km² do 10 000 km². Jeho tvar se určuje pomocí doby prodlení, kulminace a celkového trvání hydrogramu. Výpočet vychází z měřitelných charakteristik povodí (Bedient, Huber, 1990)

$$t_p = C_t (LL_c)^{0,3}, \text{ kde}$$

t_p - doba prodlení

C_t – koeficient povodí, který se zpravidla pohybuje od 1,8 do 2,2 (v horském prostředí může být jen 0,4, podél Mexického zálivu byl stanoven až na 8,0)

L – délka nejdelšího toku od pramene po závěrový profil v mílích

L_c – délka hlavního toku do bodu na toku nejbližší těžišti povodí

Metoda netvoří kompletní jednotkový hydrogram, Clarkovy parametry jsou odhadnuty ze zadaných Snyderových parametrů t_p a C_p . Implementace Clarkových postupů je podporována Snyderovými empirickými vztahy. Do modelu HEC-HMS je zadávána standardní doba prodlení v hodinách a koeficient kulminace (Fleming, Scharffenberg, 2006).

SCS jednotkový hydrogram (SCS UH)

Představuje syntetický bezrozměrný UH, který je proporcionálně vztažen k velikosti kulminačního průtoku a době mezi počátkem příčné srážky a kulminací odtoku z povodí (Daňhelka, 2007). Byl vyvinut v 50. letech Soil Conservation Service původně pro malá zemědělská povodí. V hydrogramu lze vyčíst zajímavou skutečnost, 37, 5 % objemu odtoku se objevuje před kulminací. Do modelu HEC-HMS je zadávána pouze doba prodlení v minutách (Fleming, Scharffenberg, 2006) .

2.5.4 Model výpočtu objemu odtoku

Základní předpoklad u většiny modelů je, že impulzem, který vyvolá odezvu v podobě přímého odtoku jsou efektivní srážky. Pro správné popsání vztahu mezi srážkovým úhrnem a odtokem vody je potřeba efektivní srážky definovat oddělením ztrát z celkových srážek, a tím stanovíme přímý odtok.

Objem odtoku (*Runoff –Volume Model*) zahrnuje celkový objem vody, který pochází ze spadlých srážek, je zadržen intercepce, infiltrován, akumulován v mikrodepresích, evaporován, transpirován ze srážek či přímo vytvořil povrchový odtok. Intercepce, infiltrace, evaporace, transpirace a povrchová retence tvoří v modelu jednu jednotku charakterizovanou jako ztrátu (*loss*).

Model HEC-HMS nabízí několik možností zohlednění ztrát v simulaci odtoku, resp. stanovení přímého odtoku.

Metoda CN – křivka

Metoda CN-křivek je používána pro stanovení objemu přímého odtoku na základě spadlých srážek. Postihnout složitý srážko-odtokový proces se v USA snažila Služba na ochranu půd (SCS), která zavedla tzv. „metodu čísel odtokových křivek CN“ (*Curve Number*). Jedná se o jednoduchý model se snadno dosažitelnými vstupními daty, použitelný pro výpočet charakteristik povrchového, resp. přímého odtoku vody z povodí. Prakticky lze metodu využít k simulaci stanovení efektivních srážek z objemu odtoku vody

z povodí. Základním vstupem metody CN křivek je srážkový úhrn za předpokladu rovnoměrného rozložení na ploše povodí. Objem srážek je transformován na objem odtoku pomocí čísel odtokových křivek CN. Hodnoty CN jsou závislé na hydrologických vlastnostech půdy - infiltraci, obsahu vody v půdě, vegetačnímu pokryvu, velikosti nepropustných ploch, retenčních vlastnostech, ale i intercepci a povrchových depresích (Janeček et al., 2002).

Průměrná čísla křivek odtoku CN odpovídají průměrným hospodářským podmínkám během vegetačního období. V období vrcholného růstu mohou nabývat až dvojnásobku, což platí zejména pro zemědělské krajiny. Podrobnější tabelaci hodnot v kultivované krajině provedl Janeček et al. (2002)

Metoda CN křivek nese s sebou řadu problémů - nerespektuje různé intenzity deště, tzn. při stejném celkovém úhrnu metoda spočítá stejnou odtokovou ztrátu bez ohledu na časové trvání a rozložení intenzity deště. Dále pokud je překročena maximální retence, je další infiltrace rovna 0. Zároveň hledané parametry nerepresentují rovnice pro popis proudění v zóně aerace.

Do modelu HEC-HMS vstupují parametry počáteční ztráty (I_a), číslo CN křivky a podíl nepropustných ploch v subpovodí v procentech. Podrobnějšímu matematickému popisu včetně konkrétní aplikace na povodí Rolavy se věnuje samostatná kapitola v metodice práce (viz Materiál a metody).

Metoda Green-Ampt

Tento přístup vychází z obecného zákona o hydraulické vodivosti a rychlosti proudění kapalin v nenasyceném propustném prostředí. Metodu vystihuje Richardsova rovnice pro nenasycený podpovrchový odtok (Bedient, Huber, 1989). Do modelu HEC-HMS jsou zadávány parametry počáteční ztráty, vláhový deficit, čelo zvlhčení, hydraulická vodivost a podíl nepropustných ploch. Počáteční ztráta je funkcí počátečního nasycení. Vláhový deficit vyjadřuje vztah mezi pórovitostí a vlhkostí v půdě (Fleming, Scharffenberg, 2006).

Green-Ampt je spolu s metodou CN křivek nejpoužívanějším postupem řešení stanovení přímého odtoku v ČR, neboť umí zohlednit vliv různých typů povrchů na odtok vody z krajiny. V této metodice ale není rozlišován detailní typ krajiny, např. lesa oproti metodě SCS CN, kde se typ uvažuje (smrkový, listnatý, smíšený), je zohledňován pouze typ povrchu (Unucka et al., 2008).

Exponential Loss

Metoda exponenciální ztráty je empirickým přístupem, který se neobejde bez procesu kalibrace. Zahrnuje možnost zvýšení počáteční infiltrace, jestliže je půda částečně suchá. Nemůže být použita pro kontinuální simulace, neboť se jedná o funkci kumulativní infiltrace a v úvahu není bráno vysušení půdy. Součtem skutečných ztrát vypočtených pro každý časový interval zjistíme nahromaděnou ztrátu. Do HEC-HMS vstupuje počáteční koeficient, který indikuje míru exponenciálního poklesu infiltrace a ten závisí na povrchu a jeho schopnosti absorbovat srážky. Dalším parametrem je srážkový koeficient, jenž reflektuje vliv deště na charakteristiky počátečních ztrát. Do modelu též vstupuje podíl nepropustných ploch v povodí a počáteční koeficient, který zohledňuje kombinaci vlivů půdního typu, land use, vegetačního pokryvu apod. (Fleming, Scharffenberg, 2006).

The initial and constant rate

Tato metoda bere v úvahu samostatnou vrstvu půdy k výpočtu probíhajících změn vlhkosti v půdě. Měla by být použita v kombinaci s meteorologickým modelem zohledňujícím evapotranspiraci. Infiltrace se projeví, jestliže je vrstva půdy nasycena. Do editoru pro výpočet metody v HEC-HMS je potřeba zadat počáteční ztrátu, maximum zadržení, podíl nepropustných ploch a stálou rychlost infiltrace, která je definována nasycením půdní vrstvy. Maximum zadržení vyjadřuje množství vody, která může být půdou zadržena. Počáteční ztráta tvoří výchozí podmínku pro metodu a označuje množství vody, které je potřeba k maximálnímu nasycení půdní vrstvy (Fleming, Scharffenberg, 2006).

2.5.5 Model podzemního odtoku

Pro účely správného hydrologického modelování je zapotřebí v modelech oddělovat složku základního odtoku od složky povrchového a hypodermického odtoku, neboť se řídí jinými zákonitostmi. Je potřeba odlišit kolik odtéká vody z dané složky v daný okamžik. Základní odtok tvoří důležitou složku odtoku vody z krajiny, protože zásobuje koryta vodních toků vodou v suchých obdobích. Základní odtok je funkcí předchozího nasycení, proudění vody v zóně saturace a je řízen Darcyho zákonem. K odlišení obou složek odtoku slouží separace hydrogramu. Nejznámějšími metodami separace jsou metoda exponenciálního poklesu, metoda lineárních nádrží a metoda konstantního základního odtoku.

Recession

Metoda recese nazývaná v české literatuře metoda exponenciální recese je založena na typickém chování vodních toků v přírodě, kdy odtok v korytě postupně exponenciálně klesá po větší srážkové epizodě. Patří mezi nepoužívanější metody odhadu základního odtoku při modelování. Její výhodou je možnost kontinuálních simulací. Pro potřeby simulací v této práci byla zvolena právě tato metoda (více kapitola Materiál a metody).

Kolísání podzemního odtoku v závislosti na srážkově bohatých i chudších periodách lze vyjádřit tzv. *Base Flow Recession Curve* (poklesová křivka podzemního odtoku). Vyjadřuje míru odvodnění ze zásob podzemní vody v povodí. V případě vysoce propustných zvodní, bývá podzemní odtok zastoupen i během déletrvajících such, naopak u málopropustných zvodní dochází k rapidnímu poklesu (Todd, 1980).

Pro analýzy základního odtoku z hydrogramu metodou poklesové křivky se vychází ze vztahu

$$Q = Q_0 K^t \quad , \text{ kde}$$

Q_0 je počáteční základní odtok

K^t je poklesová konstanta

Poklesová konstanta je řízena hydrogeologickými charakteristikami povodí (Todd, 1980). Podle analytických studií Todda (1980) závisí poklesová křivka na stupni upevnění koryta ve zvodni. Zatímco u plně propustných vrstev je tvar křivky konkávní, u hlubokých částečně propustných zvodní je křivka jen mírně skloněná. Hodnota K v rovnici závisí přímo na stupni zaříznutí koryta a jeho blízkosti k zóně základního odtoku.

Metoda lineárních nádrží

Jedná se o model, kde je retence a proudění vody simulována přes kaskádu lineárních nádrží. Předpoklad lineárních nádrží znamená, že odtok vody v každém časovém kroku simulace je lineární funkcí průměrné retence v průběhu daného časového kroku. Simulace infiltrace je v této metodě rovnoměrně rozdělena mezi dvě vrstvy podzemního odtoku *Groundwater 1* a *2*. Výtok z jedné vrstvy se rovná vtoku do jedné nádrže, výtok z druhé vrstvy (*Groundwater 2*) se rovná vtoku do další nádrže. Výtok z obou nádrží je kombinován za účelem výpočtu celkového bazálního odtoku pro povodí. Do modelu HEC-HMS jsou zadávány počáteční průtoky pro obě vrstvy (Feldman, 2000). Tento model je využíván spolu s modelem *Soil Moisture Accounting (SMA)* pro výpočet objemu odtoku.

Metoda konstantního základního odtoku

Tento model je uživatelsky velmi jednoduchý, neboť je zadávána pouze počáteční hodnota základního odtoku, která se nemění během simulované epizody. Vykazuje dobré výsledky při simulacích delších období. Hodnoty mohou být stanoveny měsíčně (*Constant Monthly-varying Baseflow*). V takovém případě je potřeba do HEC-HMS zadat hodnoty základního odtoku pro každý měsíc.

2.5.6 Korytový model

Pro úplné sestavení modelu nesmí být zanedbáno modelování pohybu vody v korytě, které nelze pro celé povodí modelovat jako celek, jedná-li se o povodí větší plochy. V závislosti na potřebách a složitosti říčních úseků jsou používány metody transformace v celém úseku (hydrologické) nebo detailní řešení úseků (hydraulické) (Daňhelka, 2007).

Muskingum-Cunge

Jedná se o fyzikální model, který zohledňuje parametry koryta. Je založen na aproximaci kombinace rovnice kontinuity a difuzní formy momentové rovnice. Do modelu HEC-HMS vstupují informace o délce a sklonu úseku, drsnosti koryta a příbřežní zóny a tvaru příčných profilů v úsecích. Vzhledem k dostupnosti dat a na základě studia české literatury a příkladů z praxe byla tato metoda aplikována při řešení této práce (podrobněji viz kapitola Materiál a metody).

Výhodami metody jsou fyzikální základ metodiky a nezávislost na zadaném výpočetním intervalu. Nevýhodami modelu jsou neuvažování zpětného vzduť či špatná konvergence metody při malém sklonu úseku toku (Šercl, 2007).

Lag model

Metoda řeší transformaci povodňové vlny mezi dvěma body jako jednoho celku. Transformace v modelu HEC-HMS je popisována pouze jedním parametrem, a to zpožděním vlny v minutách (*Lag*) při průchodu daným úsekem. Nejlépe je použitelná na kratší úseky toku s nízkou variabilitou v hloubce koryta (Fleming, Scharffenberg, 2006). Zpoždění je odvozené na základě historických průběhů vln a je ilustrováno křivkou postupových dob v závislosti na velikosti průtoku. Výhodou této metody je možnost jejího odvození pro určitý úsek na základě historických řad průtoků (Daňhelka, 2007).

Model kinematické vlny

Uvedený model vychází z aproximace věty o hybnosti a neuvažuje vliv tlakových sil a změn rychlosti proudění v úseku. Zároveň je založen na zákonu zachování hmoty, který je vyjádřen rovnicí kontinuity. V rámci úseků je proudění považováno za ustálené a může být řešeno pomocí Manningovy rovnice. Metoda je velmi dobře aplikovatelná na území s většími sklony úseků i na antropogenně upravených tocích. Vstupními údaji do HEC-HMS jsou délka a sklon úseku, Manningův součinitel drsnosti, šířka dna, tvar koryta a sklon břehu (Fleming, Scharffenberg, 2006).

2.5.7 Meteorologický model

Analýza srážkových dat se odehrává v meteorologickém modelu HEC-HMS. Srážky jsou primárním vstupem do s-o modelu. Důležitými údaji je nejen množství srážek, ale i jejich rozložení v čase a prostoru. Údaj o srážkovém úhrnu je vztahován k dílčímu povodí, kdy je pomocí metod plošné interpolace srážek (*Mean Areal Precipitation - MAP*) zjištěna průměrná hodnota srážkového úhrnu pro subpovodí.

Plošná interpolace srážek

Pro výpočet plošného úhrnu srážek spadlých na uvažované povodí se pro určitý časový interval používají různé metody plošné interpolace srážek. Metody se od sebe navzájem odlišují způsobem jejich výpočtu, použitím v praxi a zohledněním konkrétních ovlivňujících faktorů. Během výpočtu plošného úhrnu srážek by měly být uvažovány následující faktory: nadmořská výška, sklon svahů, expozice svahů vůči světovým stranám, převládající směry a rychlosti větrů. Horské soustavy ovlivňují atmosférickou cirkulaci, což může mít potenciální vliv na výskyt extrémních přívalových srážek. Správné stanovení plošného úhrnu srážek často naráží na nedostatek pozorování srážkových úhrnů a nedostačující síť meteorologických stanic (Daňhelka et al., 2003).

V praxi je k dispozici několik základních metod výpočtu plošného úhrnu srážek (tab.2.4). Vhodná aplikovatelnost jednotlivé metody se liší na základě rozdílných charakteristik povodí a na dostupnosti dat. Podrobně se popisem MAP zabývala např. Janková (2006) či Daňhelka (2007).

Tabulka 2.4: Přehled nejpoužívanějších metod MAP (Daňhelka, 2007)

metoda	popis metody
Aritmetická metoda	Nezákladnější nejjednodušší metoda určující průměr plošných srážek ze všech stanic na povodí. Tato metoda je dostačující, pokud jsou srážkoměrné stanice v oblasti rozloženy rovnoměrně, nemají mezi sebou výrazná převýšení a jednotlivé naměřené hodnoty se příliš neodchylují od průměru. Metoda je v praxi používána pro menší povodí.
Metoda Thiessenových polygonů	Zohledňována vzdálenost dopadu srážky od stanice a její dlouhodobý úhrn. Každé stanici je přiřazena určitá plocha v závislosti na tom, jakou váhu má tato stanice v měřené oblasti. Metoda předpokládá, že v jakémkoli místě povodí jsou srážky stejné jako v místě nejbližší stanice. Zaznamenané úhrny srážek daných stanic se vztahují na plochy – polygony. Thiessenovy polygony vytvoříme z průsečíků kolmic, které mají počátek ve středu pomyslné spojnice mezi dvěma stanicemi. Metoda je přesnější než metoda aritmetického průměru a je výhodná především v případech nerovnoměrného rozložení stanic. Výsledkem zpracování je získání vah jednotlivých stanic, přičemž váhu tvoří plocha polygonu. Nevýhodou metody je nerespektování orografických poměrů, resp. nadmožské výšky, srážkových stínů apod., které ovlivňují v praxi znatelně úhrn srážek.
Metoda izohyet	Metoda spočívá ve vytvoření spojnic míst na mapě se stejnými hodnotami srážkových úhrnů. Pro sestavení mapy izohyet se využívá klasické kartografické interpolace. Plocha mezi izohyetami je pak vynásobena srážkovým průměrem dvou sousedních izohyet, kterými je plocha vytyčena.
Metoda Inverse Distance Weighted (IDW)	Srážky stanic jsou váženy převrácením jejich vzdáleností od interpolovaného bodu. Vzdálenost každé stanice od interpolovaného bodu musí být známá, neboť se s ní dále operuje ve výpočtu. Metoda upřednostňuje bližší stanice přes stanicemi vzdálenějšími, což představuje její důležitou výhodu. Díky převrácení vzdáleností získávají bližší naměřené hodnoty větší význam, což v praxi může potenciálně lépe zohlednit orografii. Pro modely typu lumped se stanovuje těžiště povodí, které představuje interpolovaný bod, ke kterému je spočítán průměrný úhrn srážek vztažený k celému hydrologickému modelu.
Metoda Kriging	Metoda je postavena na teorii metody ID, používá se však u hydrologických modelů distribuovaně. Každému gridu v modelu je přiřazen úhrn srážek pomocí metody ID, čímž vznikne čtvercová síť úhrnů srážek. S hodnotami v síti lze pracovat jednotlivě a získat následně průměrný úhrn srážek pro celý hydrologický model. Průměrná hodnota je pak získána výpočtem váženého průměru za všech gridů. Kriging patří ke složitějším a tím přesnějším metodám stanovení plošného úhrnu srážek. Výhodou metody je výpočet srážky pro jednotlivé gridy a následného získání průměrné hodnoty úhrnu srážek na povodí. Nejvíce zohledňuje vzdálenost stanic od interpolovaných bodů, respektuje vliv plochy, pro kterou je srážka počítána. Lze vyvodit, že nejlépe vystihne reálnou distribuci srážek na povodí.
Orografická interpolace	Nejlépe zohledňující orografické poměry je metoda orografické interpolace. Vyjadřuje závislost nadmožské výšky stanice na srážkových úhrnech na ní naměřených. Pomocí lineární regrese lze vyvodit srážkový úhrn v určité nadmožské výšce. Metoda je přesněji uplatňována pro průměrné srážkové úhrny delší časových úseků (např. roční průměry), neboť oproti událostním úhrnům srážek vykazuje menší proměnlivost. Tento způsob výpočtu je často používám doplňkově k ostatním metodám. Korelace nadmožské výšky stanic a výšky srážek nemusí být vždy signifikantní, neboť úhrn srážek může být ovlivňován jinými faktory jako jsou návětrné svahy či častý styk atmosférických front.

Plošná interpolace srážek je metoda zpracování srážkových dat podle dílčích povodí a vytvoření časových řad, které jsou pak dodány do modelu. Výsledky simulací v HEC-HMS závisí na zvolení správné metody. Výběr vhodné metody se promítne na modelem vyprodukovaném hydrogramu průtoků v daném časovém úseku. HEC-HMS nabízí sedm metod pro analýzu srážkových úhrnů, přičemž pro účely této práce byla zvolena metoda Specified Hyetograph. Dále jsou stručně představeny tři metody.

Specified Hyetograph

Návrhový hyetogram umožňuje uživateli přesně specifikovat rozložení srážkového úhrnu v čase pro jednotlivá subpovodí. Tato metoda je vhodná v případě, že byla srážková data předem upravena pro každé subpovodí zvlášť a nemuselo dojít ke změnám během procesu simulace. Tato metoda nemá jednotné parametry pro subpovodí, každé subpovodí je v HEC-HMS reprezentováno vlastním editorem (Fleming, Scharffenberg, 2006).

Gridded Precipitation

Tato metoda umí počítat s distribuovaným rozložením srážek, což se používá nejčastěji na radarové odhady srážek. Parametry dat jsou stejné pro všechna dílčí povodí. Srážkový grid musí být správně definován.

Frequency Storm

Metoda využívající statistická data k vytvoření hypotetické srážkové události. Používá stejné parametry dat pro všechna subpovodí. Každá událost má určitou pravděpodobnost překročení, kterou uživatel volí mezi 0,2 až 50 %. Metoda je schopná simulovat jak krátkodobé, tak i delší epizody. Do HEC-HMS se zadávají mj. údaje o ploše, která byla deštěm zasažena nebo trvání a intenzita bouřky (Fleming, Scharffenberg, 2006).

3 Fyzickogeografická charakteristika povodí Rolavy

Tato kapitola byla zpracována stručným způsobem, jelikož na dané téma byly již zpracovány práce Ledvinky (2006, 2008), Mostecké (2005) a Lelut (2007), částečně i Čekala (2005), kteří problematice věnovali detailní pozornost. Práce zmíněných autorů obsahují aktuální výsledky, se kterými lze stále relevantně nakládat. Předkládaná kapitola si klade za cíl popsat nejdůležitější přírodní charakteristiky povodí Rolavy, které mohou co nejpřesněji přispět ke správné interpretaci průběhu srážko-odtokového procesu na daném území. Pozornost byla věnována především charakteristikám, které ve zmíněných pracích chyběly.

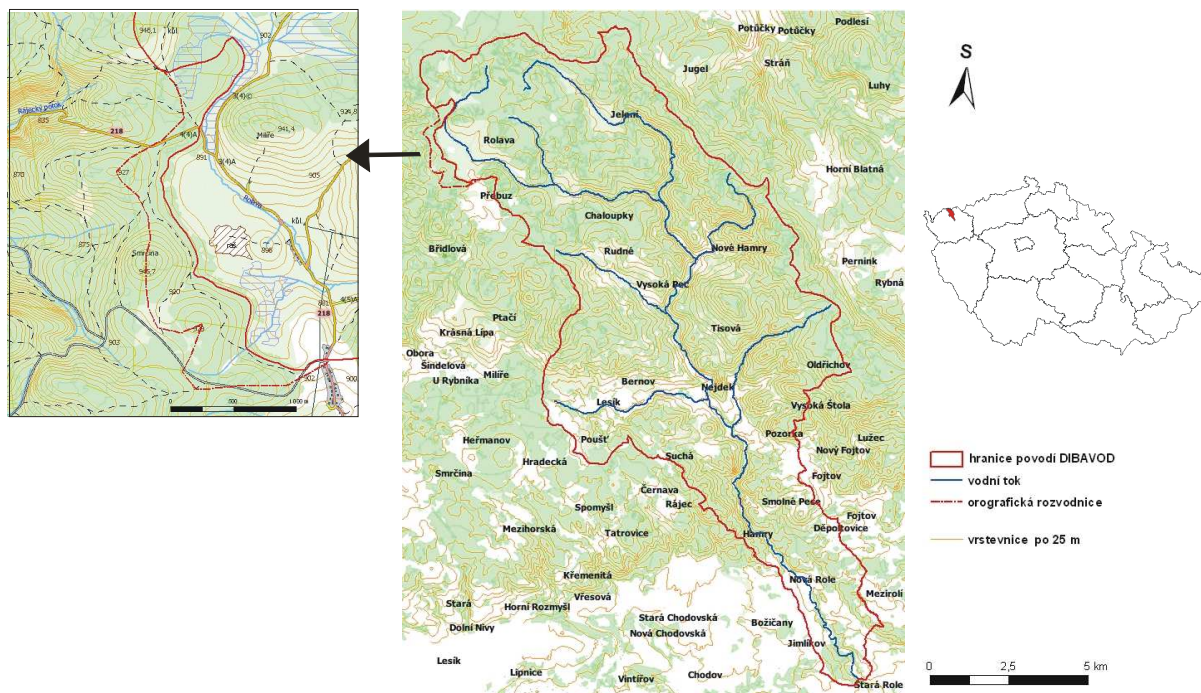
Praktická část diplomové práce je zaměřena na sestavování modelu povodí Rolavy po profil Stará Role a jeho následnou kalibraci. Kompletní fyzickogeografická charakteristika bude proto zohledňovat pouze povodí nad Starou Rolí, nikoli celou Rolavu k ústí do Ohře. Zvolené charakteristiky mají především pomoci objasnit výsledky modelování průběhu povodňových vln v HEC-HMS. Do modelu vstupují jednotlivé průměrné charakteristiky dílčích povodí Rolavy. Některé fyzickogeografické reprezentace jsou tedy popsány pro subpovodí tak, aby byly zohledněny lokální rozdíly reliéfu.

3.1 Vymezení území

Povodí Rolavy se nachází v západní části Krušných hor v Karlovarském kraji na pomezí bývalých okresů Karlovy Vary a Sokolov. Rozkládá se mezi Karlovými Vary na JV, německým Johannegeorgenstadt na S, Božím Darem na SV a Přebuzí západním směrem. Hlavní tok protéká Nejdkem, což je socioekonomické těžiště povodí.

Rozloha povodí po závěrový profil Stará Role činí 125,3 km², ke Karlovým Varům 136,8 km². Délka Rolavy po stejný profil je 32,5 km, celý tok měří 36,6 km. Rolava pramení na náhorní rovině nedaleko česko-německých hranic v rašeliništní oblasti v nadmořské výšce 920 m n. m. Západní část rozvodnice probíhá dle DIBAVOD po vrcholech např. Smrčina (945,7 m n. m.), Vlčí hora (928,6 m n. m.) nebo Rudenský Špičák (926,3 m n. m.). Úsek rozvodnice v okolí obce Přebuz je stanoven sporně a geograficky dle DIBAVOD nesprávně (obr. 3.1). Nebyl však zjištěn pravý důvod. Na základě terénního monitoringu a úvah o historickém využití území lze předpokládat, že v území oddělující správný průběh rozvodnice a rozvodnice DIBAVOD probíhal odvodňovací kanál. Odvodňovací kanál pravděpodobně odváděl vody ze zamokřeného rašeliniště, kde

v minulosti probíhala těžba cínu a vytvořil vlastní povodí. V reálu jde o zanedbatelnou plochu pro potřeby simulací. Veškeré analýzy terénu vycházely z rozvodnice stanovené v DIBAVOD. Východní část rozvodnice vede od severu po vrcholech např. Hraniční hora (959,6 m n. m.), Zaječí hora (1008,5 m n. m.) nebo Vlčí hora (945,8 m n. m.) a dále JV směrem ke Karlovým Varům.



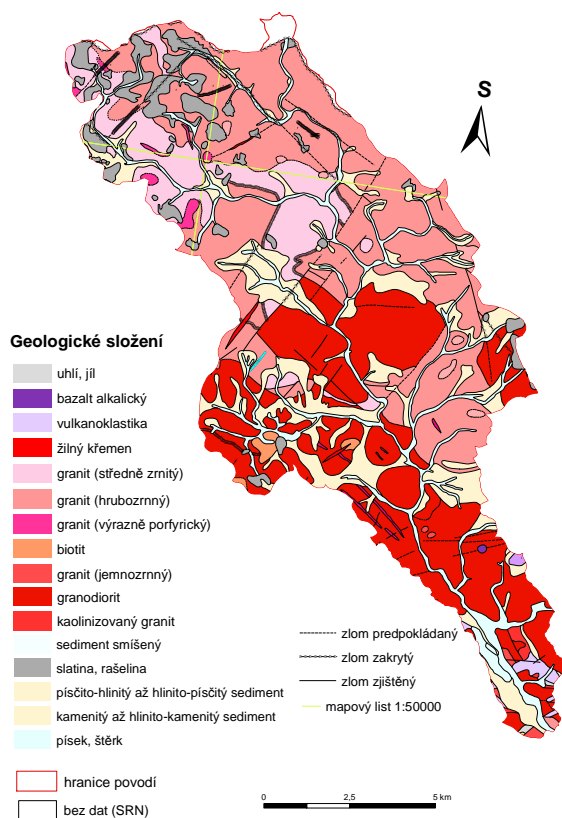
Obrázek 3.1: Vymezení povodí Rolavy a ukázka stanovení rozvodnice orograficky a podle DIBAVOD (<http://.geoportal.cenia.cz>, DIBAVOD)

3.2 Geologické poměry

Česká část Krušných hor představuje heterogenní geologickou jednotku. Osa krušnohorského antiklinoria se mírně sklání k ZJZ. Z geologického hlediska patří Krušné hory včetně povodí Rolavy do regionu krušnohorského plutonu, soustavy Českého masívu – krystalinika a prevariského paleozoika, oblasti sasko-durynské. Krušné hory tvoří parovinně zarovnanou kuestu, která je mírně skloněna k severozápadu, vyčnívají z ní čedičové kupy, hřbety i tabulové vrchy. Na českou stranu se svažují stupňovitě zlomovými svahy nad příkopové propadliny podkrušnohorské. Geologicky jsou Krušné hory tvořeny převážně krystalickými břidlicemi a žulami. Krušnohorské jádro je pluton, z něho na povrch pronikají žulová tělesa. Oblast Krušných hor byla v minulosti zasažena

mladoassyntským a variským vrásněním. Parovinné zarovnání vzniklo koncem druhohor v oligocénu. (Kunský, 1974).

Geologickou stavbu podrobně demonstruje níže uvedený obrázek 3.2. Převažující horninou je granit různé zrnitosti, jelikož povodí Rolavy spadá do karlovarského žulového masívu. Rozlišují se dva odlišné typy žuly – horská a krušnohorská. Horská žula je středně zrnitá, příkladem výskytu jsou břehy Rolavy severně od Nejdku. Krušnohorská žula je naopak hrubozrná a porfyrická (Král, 1968). Lokality výskytu jsou v mapě znázorněny růžovými odstíny. Horní část povodí Rolavy a Jeleního potoka zaujímají rašeliniště postglaciálního stáří (Kunský, 1974). Samotné toky a přilehlé nivy jsou tvořeny písky, jíly a štěrky. V povodí Rolavy jsou stejně jako v povodí sousední Bystřice výrazné zlomové svahy směrem k západu. Zlomový svah je doložen na JZ úpatí Tisovského vrchu (976,4 m n.m.) u Nejdku (Král, 1968). Mezi Novými Hamry a Nejdkem tvoří biotitická žula zdůrazněnou kru, tektonicky omezenou na SZ i JV. V okolí Nových Hamrů lze mocnost kry odhadnout na 250 – 300 m. Oblast okolí Tisovského vrchu i dolní části povodí Rolavy je tvořena granodiority až křemennými diority. Buď jde podle Škvora (1975) o nejstarší akumulace magmatických hornin při stěnách žulové intruze nebo zcela o granitizované části původního pláště.



Obrázek 3.2: Geologické poměry v povodí Rolavy (Geologická mapa ČR, ČGS)

Z hlediska hydrogeologie patří povodí Rolavy patří do tzv. krušnohorské zřídelní oblasti (Zoubek et al., 1963). Oběh podzemní vody souvisí s oběhem v pánvích, což jsou drenážní báze. Karlovarské vody jsou známé svým vysokým obsahem oxidu uhličitého, který podporuje vzestup podzemních vod z větších hloubek. V povodí Rolavy jsou rozlišovány dvě oblasti pohybu podzemních vod - karlovarský žulový masív a sokolovská pánev.

První oblast vyniká puklinovým oběhem a zaujímá horní a střední tok. Voda se pohybuje pouze ve svrchní navětralé zóně a tím kopíruje terén. Pohyb vody je ve směru pádu k okrajovým zlomům a do pánví (Mostecká, 2005).

V sokolovské pánvi je zastoupen průlinový i puklinový pohyb. Pánev zasahuje jen zčásti do jižní části povodí. Podzemní voda se v žulovém podloží pohybuje hlubokými puklinami, což má vliv na její složení a teplotu. Příkladem jsou horké vývěry v Karlových Varech. V povodí Rolavy je snížena propustnost žulovým masívem, neboť je kaolinicky zvětralý (Mostecká, 2005).

3.3 Geomorfologické poměry

Z geomorfologického hlediska spadá povodí Rolavy do Krušnohorské provincie, kde tvoří dva celky – Krušné hory a Sokolovskou pánev. Jižní část povodí patří do okrsku Chodovské pánve, která je z morfografického hlediska vzhledem ke svému výškovému rozpětí 125 m řazena do pahorkatin s větším výškovým rozpětím. Střední a horní úseky toků povodí Rolavy spadají pod podcelek Klínovecké hornatiny, okrsků Přebuzské hornatiny v horní části povodí (podokrsky Rolavská, Hamerská a Zejčická vrchovina, Kraslická hornatina) a Jindřichovické vrchoviny v okolí Nejdku (podokrsek Nejdecká vrchovina) (Balatka, Kalvoda, 2006).

Krušné hory jsou svým celkovým utvářením reliéfu typickým kerným pohořím. Dnešní konfigurace reliéfu pohoří je spjata s neotektonickými pohyby, kdy hlavní zdvih nastal v pliocénu. Základní rysy reliéfu Krušných hor, které jako celek tvoří výrazně ukloněnou kru k SZ, jsou dány plochými rozvodnými částmi terénu, různou měrou zahloubení toků a přítomností výrazných svahů (Demek, 1965).

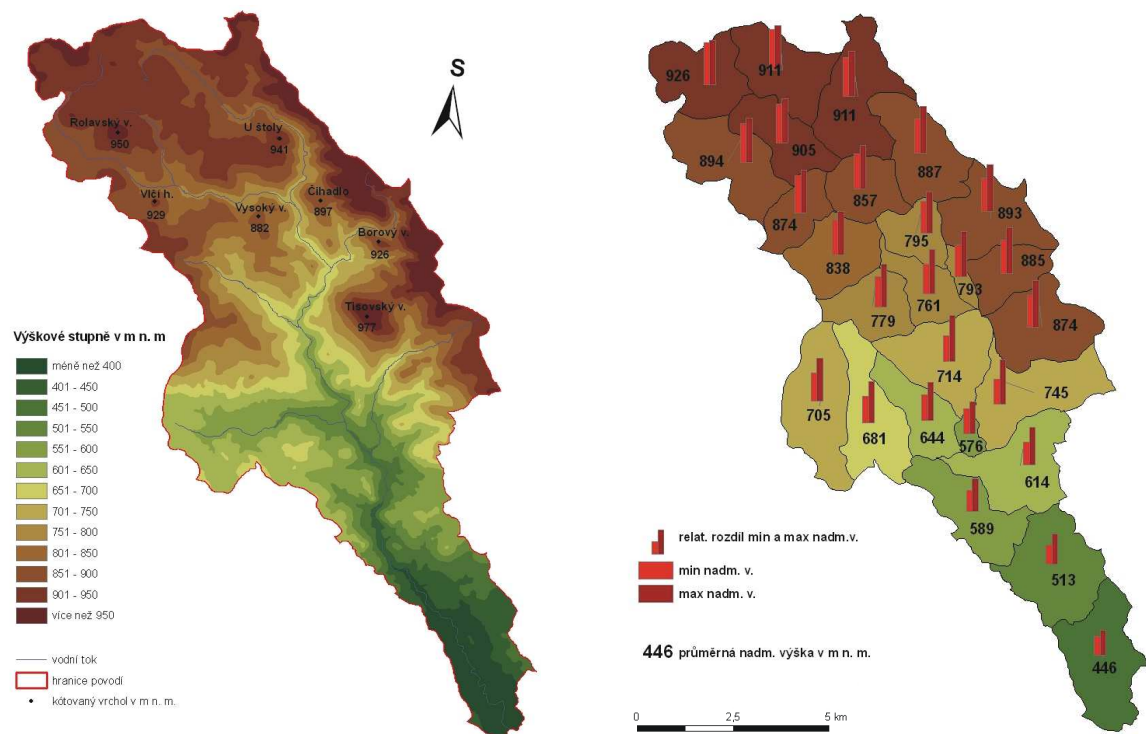
Jihozápadní část Krušných hor, kam spadá i povodí Rolavy, můžeme rozdělit na Klínoveckou oblast a Jindřichovickou plošinu. Klínovecká oblast je nejvýše položeným územím Krušných hor zasahujícím horní povodí Rolavy. Jindřichovická plošina představuje JZ ukončení Krušných hor. Obě jednotky jsou od sebe odděleny svatovsko-

rolavským svahem, který prochází v úrovni Nejdku. Povrch území mezi zmíněným svahem a výrazným, až okolo 100 m vysokým okrajovým zlomovým svahem, se pozvolna sklání k SZ. Vodní toky, rozřezávající okrajový svah včetně Rolavy, pak tečou proti celkovému povrchu reliéfu (Demek, 1965).

Ve vrcholové části Krušných hor jsou na rozvodí vodních toků výrazné sečné plošiny, které zarovnávají různě odolné horniny. Plošiny jsou tvořeny terciárními i kvartérními zvětralinami. V případě Rolavy jde o horní pramennou oblast pokrytou rašeliništi, horní povodí Slatinného (Černé vody) a Jeleního potoka. Předpokládá se, že zarovnaný ráz získala vrcholová část Rolavy až v pliocénu (Demek, 1965).

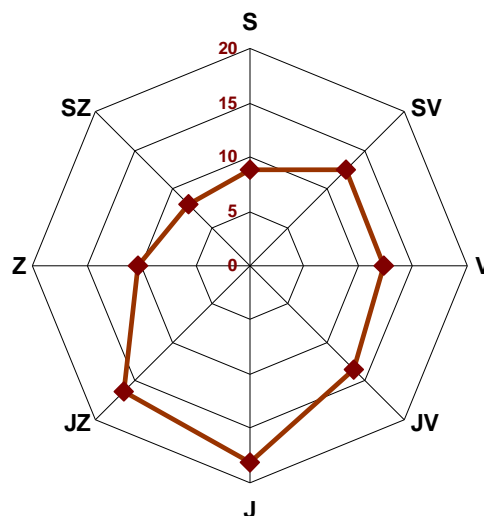
Reliéf povodí Rolavy lze dle Krále (1968) rozčlenit na podoblast vrcholovou a podoblast jižního svahu. Vrcholová oblast je územím s malými výškovými rozdíly, převládajícím tvarem reliéfu jsou erozně denudační svahy, které krajinně přiřazují parovinný ráz. Oblast jižních svahů je územím s velkým výškovým rozpětím. Dominantním tvarem reliéfu jsou příkré svahy erozně denudačního i tektonického původu. Příkladem je Nejdecký okrsek, kde zpětná eroze pramenných toků Rolavy nejvíce rozčlenila vrcholovou oblast. Podnětem k tomu byly mladé tektonické pohyby podél zlomových linií. Mezi údolím Rolavy a Bystřice se nachází několik vrcholů klenbovitého tvaru s příkrými zaoblenými svahy (např. Tisovský či Borový vrch).

Horní část povodí Rolavy po profil Chaloupky vykazuje průměrnou hodnotu nadmořské výšky 898 m. Průměrná poloha pro dolní část povodí po profil Stará Role je 703 m n. m. Průměrná nadmořská výška celého povodí je 763 m n. m. Výškové poměry povodí Rolavy po profil Stará Role dobře znázorňuje obr. 3.3. Nejvyšší bod v povodí měří 1008,5 m n. m. (Zaječí hora) a nachází na SSV na rozvodnici se sousedním povodím Bystřice. Nejnižší polohu tvoří Rolava u Staré Role 395 m n. m. Nejvyšší průměrné výšky jsou dosaženy v horních subpovodích, kde rozdíly mezi minimální a maximální nadmořskou výškou jsou nevýrazné. Tato skutečnost svědčí o zarovnanosti horních dílčích povodí. Větší morfomericnou rozmanitost terénu vyjadřují subpovodí na SV a ve střední části hodnoceného území, kde jsou vodní toky lemovány strmými svahy. Na členitějších územích hraje při tvorbě přímého odtoku větší roli retenční kapacita, nižší míra infiltrace zapříčiňuje růst velikosti přímého odtoku.



Obrázek 3.3: Výškové poměry v povodí Rolavy (vlevo), morfometrické charakteristiky subpovodí (vpravo) (DIBAVOD, ZABAGED)

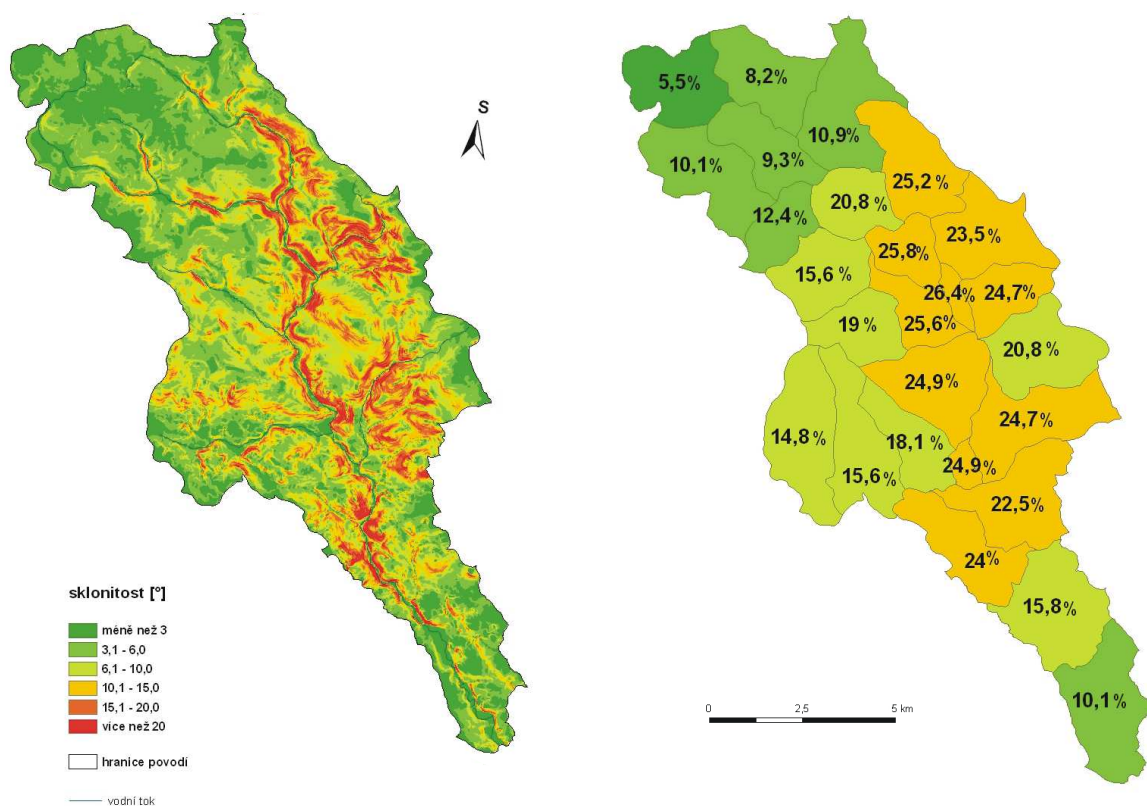
Svahy v povodí Rolavy jsou nejčastěji exponovány směrem na J (18 %), JZ (16 %) a JV (13 %), což může mít významný vliv např. při jarním tání nebo při srážkových událostech způsobených západním prouděním. Nejméně svahů je orientováno na SZ (7,9 %). Převažující expozici svahů v jednotlivých subpovodí i situaci na celém povodí prezentuje příloha 1 a obr. 3.4.



Obrázek 3.4: Procentuelní zastoupení orientace svahů v povodí Rolavy (DIBAVOD)

U orientace svahů vůči světovým stranám je předpokládán vztah s intenzitou insolace daného území. Zvýšená insolace jižně orientovaných svahů se projevuje zvýšením výparu a snížením množství infiltrované vody, což může mít za následek snížení minimální odtokové výšky v povodí.

Povodí Rolavy je z hlediska sklonitostních poměrů velmi rozmanité (obr. 3.5). Průměrný sklon povodí činí $7,9^\circ$, přičemž nejmenších sklonitostí je dosaženo v horní zarovnané plošině. Nejstrmější svahy se vyskytují ve střední části podél toku Rolavy, Bílého potoka a Limnice (24 %). To potvrzuje i Čekal (2005), který uvádí, že povodí levostranných přítoků Ohře v její horní části představují největší sklonitosti. Hypsografická křivka dle Ledvinky (2008) rovněž znázorňuje rozdílnost reliéfu horních a nižších subpovodí. Rolava i její přítoky jsou poměrně hluboce zařiznuty do krajiny s malým potenciálem rozlivu povodňových vod do okolní krajiny. Nivy jsou na mnoha místech jen nepatrně vyvinuté. Podrobněji situaci ilustruje obr. 3.5, kde levé schéma prezentuje průměrnou sklonitost subpovodí v %, jelikož procentuelní vyjádření sklonitosti je jedním z parametrů, který je vyžadován modelem HEC-HMS.

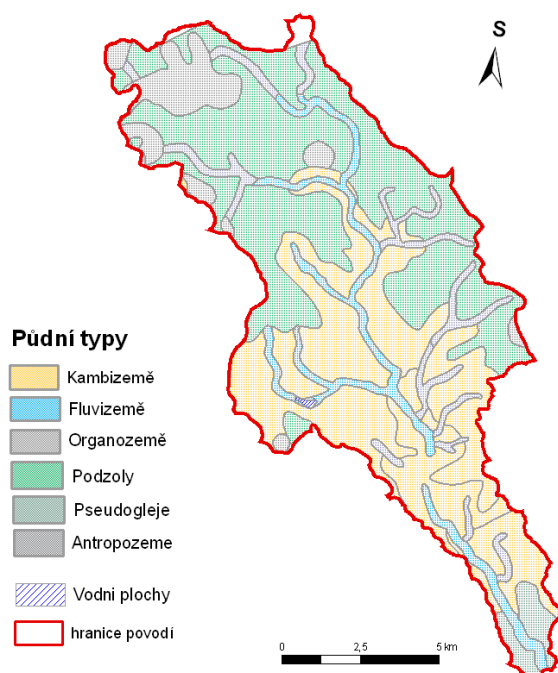


Obrázek 3.5: Sklonitost reliéfu povodí Rolavy (vlevo), průměrný sklon subpovodí v % (vpravo) (DIBAVOD, ZABAGED)

3.4 Pedologické poměry

Nejvíce zastoupenými půdními typy v povodí jsou kambizemě, podzoly, fluvizemě, organozemě, antropozemě a pseudogleje (obr. 3.6) (Tomášek, 2003).

Podzoly dominují vyšším partiím povodí většinou pod jehličnatými lesy, půda má kyselou reakci. V pramenné oblasti se podzoly mísí s organozeměmi. Organozemě vznikají na zamokřených půdách akumulací rozložených rostlinných zbytků. V horské části povodí se na rozsáhlých plochách nacházejí rašeliniště. Organozemě jsou velmi kyselý půdní typ. Pro střední úsek toku jsou typické kambizemě. Jak v podzolech, tak i v kambizemích se setkáváme se slabým oglejením, kde dochází k nepravidelnému podmáčení půdy v menších terénních depresích. V nejnižší části povodí se nacházejí pseudogleje, které představují periodicky podmáčené půdy. V bezprostřední blízkosti horní části Rolavy a Slatinného potoka se lze setkat s podmáčenými gleji. Podél středních a dolních úseků Rolavy a přítoků (zejména Nejdecký potok) se vytvořily fluvizemě. Fluvizemě vznikly z kvartérních aluviálních nevápnitých sedimentů toků (Tomášek, 2003). Ve vrcholových partiích jsou podle Portálu veřejné správy Cenia klasifikovány antropozemě. Tento půdní druh vznikl v souvislosti s lidským zásahem do krajiny. V minulosti ve vrcholových partiích povodí Rolavy docházelo k těžbě cínu, kdy byla půda částečně devastována. Dnešní podoba dřívější těžební oblasti má však velmi přírodní ráz.

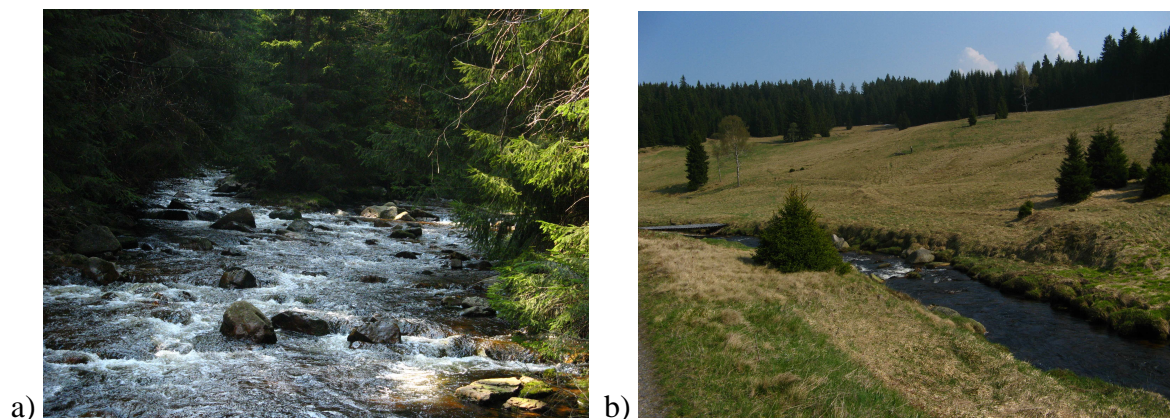


Obrázek 3.6: Rozložení půdních druhů v povodí Rolavy (<http://geoportál.cenia.cz>)

Podle základních charakteristik BPEJ jsou půdy ve střední části povodí středně hluboké, ve vrcholových partiích mělké. Podél středního toku jsou půdy slabě až středně skeletovité (VÚMOP, 2008).

3.5 Hydrografické poměry

Páteřním tokem povodí je téměř 33 km dlouhá řeka Rolava po závěrový profil Stará Role. Plocha povodí činí 125,3 km². Rolava je podle pravidel absolutní řádovosti tokem III. řádu. Řeka pramení ve vrcholové partii Krušných hor ve výšce 920 m n. m. na náhorní planině a vlévá se do Ohře v Karlových Varech jako její levostranný přítok. Průběh toku Rolavy je různorodý. V pramenné části protéká travnatými podmáčenými planinami, před limnigrafem Chaloupky vtéká do lesa a mění se v tok bystřinného charakteru se širším mělčím korytem s mnoha balvany (obr. 3.7). Do Nových Hamrů teče stejným způsobem, dále je na několika místech zaznamenán antropogenní zásah ve formě jezů. Rolava od Nových Hamrů až po Novou Roli vytváří poměrně široké koryto s nevýraznou nivou, neboť údolí řeky je výrazně zahloubeno mezi okolními svahy. Po Starou Roli má průběh toku nižší spád, na mnoha místech je upraveno koryto a niva má viditelný charakter.

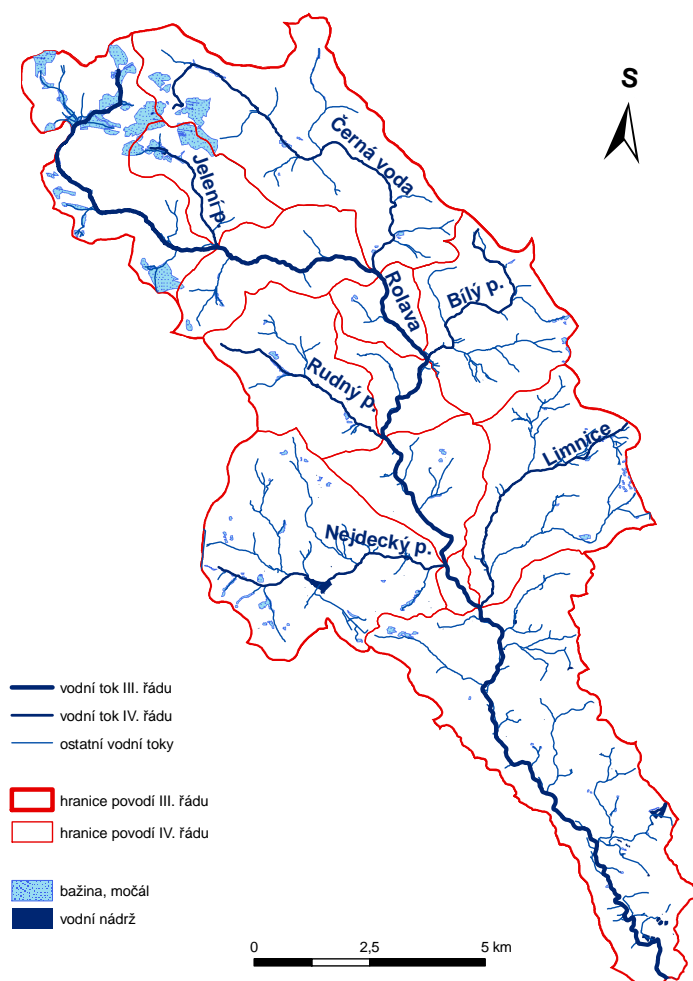


Obrázek 3.7: Soutok Slatinného potoka a Rolavy (a), horní tok Rolavy (b) (Foto: Autor)

Povodí Rolavy má stromovitý tvar, který je protáhlý ve směru SZ - JV a je mírně asymetrické ve prospěch levostranných přítoků (62 %) (obr. 3.8). Největšími levostrannými přítoky jsou postupně od pramene Jelení potok, Slatinný potok (Černá voda), který protéká vrcholovými slatinnými pasážemi, dále Bílý potok a Limnice. Nejvodnatější pravostranné přítoky tvoří Rudný a Nejdecký potok.

V povodí se nachází 154 vodních ploch, přičemž největší je akumulční nádrž Lesík (9,3 ha) na Nejdeckém potoce (VÚV, 2006). Důležitou součástí povodí je množství rašelinišť v pramenných oblastech Slatinného potoka a Rolavy (viz kap. 3.8).

Podrobnými výpočty hydrografických charakteristik celého povodí se zabýval Ledvinka (2008). Vybranými charakteristikami po závěrový profil Stará Role je hustota říční sítě, která je $1,64 \text{ km/km}^2$, přičemž nejhustější říční síť vykazuje povodí Limnice. Charakteristika povodí definuje povodí Rolavy jako přechodný typ ($\alpha = 0,20$). Šířka povodí je 3,77 km, délka všech vodních toků je 205,08 km, vzdálenost od Staré Role po nejvzdálenější bod v povodí je 24,30 km. Délky jednotlivých úseků toků, které bylo nutné zjistit pro potřeby modelování udává příloha 5 a 6.



Obrázek 3.8: Hydrografie povodí Rolavy (DIBAVOD)

3.6 Klimatické poměry

Klimatické poměry v povodí Rolavy odpovídají zákonitostem klimatu pro celý region Krušných hor. Krušné hory představují srážkovou bariéru. Podle Brádky (1963) se však orografický vliv citelněji projevuje zesilováním srážek na návětrné straně než jejich zmenšením v závětrí. Důležitými předpoklady výskytu vyšších srážkových úhrnů ve vrcholových partiích povodí Rolavy jsou převládající západní a severozápadní proudění s výraznou cyklonální činností. Na režim srážek a teplotu vzduchu má hlavní vliv nadmořská výška a členitost reliéfu. Podnebí vykazuje poměrně strmý gradient od chladného a vlhkého klimatu náhorní plošiny po sušší a teplejší oblasti u Karlových Varů. Studené a vlhké západní větry zapříčiňují v oblasti častý výskyt mlh.

V povodí Rolavy a jejím okolí se nachází několik stanic, z kterých jsou k dispozici údaje o srážkových úhrnech, teplotě i sněhových charakteristikách (tab. 3.1).

Tabulka 3.1: Vybrané stanice v blízkosti povodí Rolavy (ČHMÚ, POH, DWD)

stanice	srážkový úhrn [mm] 1995-2008	nadm. v [m n.m.]	typ stanice	začátek měření	správa
Abertamy	949	892	srážkoměrná	1.8.1963	ČHMÚ
Nejdek	982	590	srážkoměrná	1.1.1961	ČHMÚ
Oloví	794	510	srážkoměrná	1.2.1988	ČHMÚ
Citice	430	425	srážkoměrná	-	POH
Luby	699	538	srážkoměrná	1.1.1961	ČHMÚ
Fichtelberg	1187	1213	klimatologická	1.1.1947	DWD
Karlovy Vary - lázně	593	377	klimatologická	17.4.1961	ČHMÚ
Šindelová	1130	587	klimatologická	1.7.1988	ČHMÚ
Přebuz	1051	889	srážkoměrná	1.1.1988	ČHMÚ

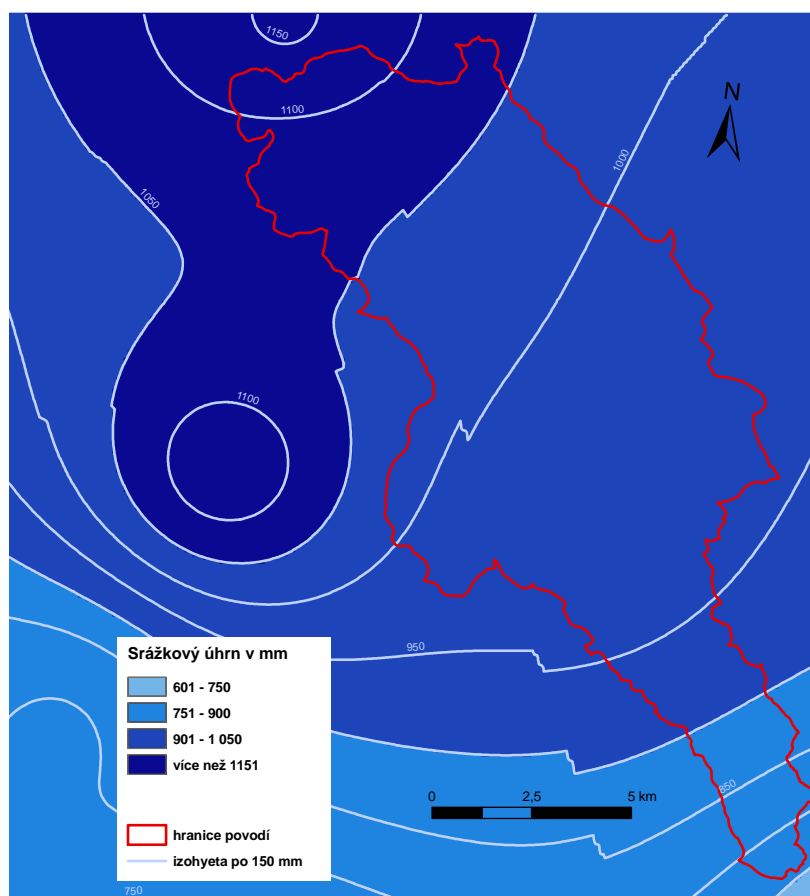
Podle Köppenovy klasifikace se povodí Rolavy nachází v klimatické oblasti Cfb (podtyp podnebí listnatých lesů mírného pásma) a jeho horní části Dfb a Dfc (boreální klima). Ve všech pásmech převyšuje průměrná teplota nejteplejšího měsíce v roce 10 °C. Ve vrcholových partiích povodí Rolavy klesá teplota nejchladnějšího měsíce pod – 3 °C. Podle klasifikace Quitta zasahují do povodí Rolavy čtyři jednotky – MW7, MW3, C5 a C4, jejichž vybrané parametry jsou znázorněny v tabulce 3.2. C4 je nejchladnější oblastí vrcholových partií povodí, kde pramení Rolava a Slatinný potok. C5 zasahuje pod C4 po obec Nové Hamry. Největší plochu zaujímá MW7, která je rozložena ve střední i dolní části povodí. MW3 se nachází v nejnižším cípu povodí (Tolasz et al., 2007).

Tabulka 3.2: Vybrané charakteristiky klimatických oblastí podle Quitta (Tolasz et al., 2007)

parametr	klimatické charakteristiky oblastí			
	MW7	MW3	C5	C4
Počet letních dní	30-40	20-30	10-30	0-20
Počet dní s mrazem	110-130	130-160	140-160	160-180
Průměrná lednová teplota [°C]	-2 až -3	-3 až -4	-5 až -6	-7 až -6
Průměrná červencová teplota [°C]	16-17	16-17	14-15	12-14
Suma srážek ve vegetačním období [mm]	400-450	350-450	500-600	600-700
Suma srážek v zimním období [mm]	250-300	250-300	350-400	400-500
Počet dní se sněhovou pokrývkou	60-80	60-100	120-140	140-160

3.6.1 Srážky

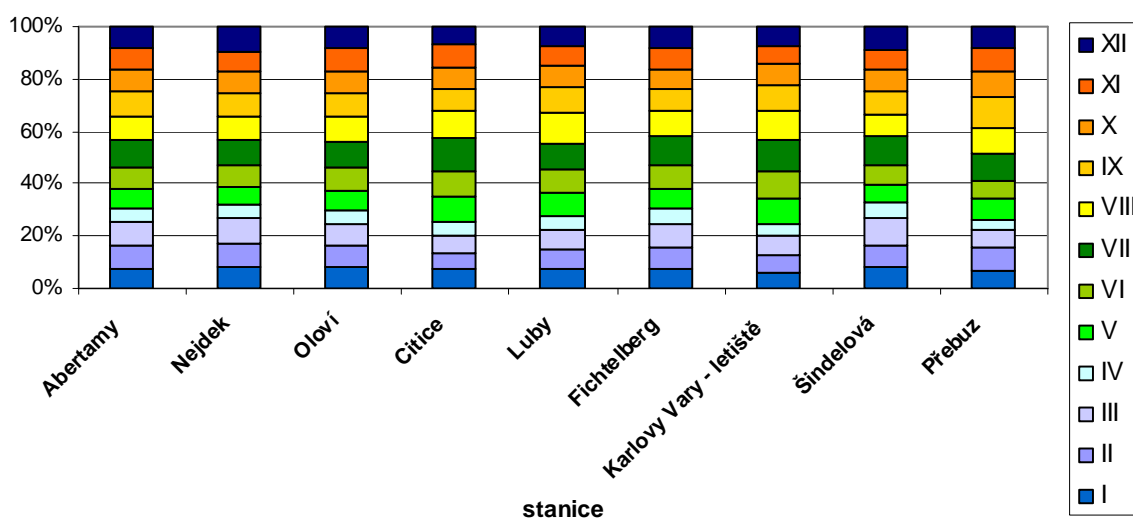
Časoprostorové rozložení srážek závisí především na všeobecné cirkulaci atmosférických front a na nadmořské výšce. Pearsonův korelační koeficient závislosti nadmořské výšky a úhrnu srážek vychází pro dané území 0,69, což je poměrně signifikantní závislost. Průměrný srážkový úhrn za posledních deset let činil v oblasti povodí Rolavy 870 mm (obr. 3.9).



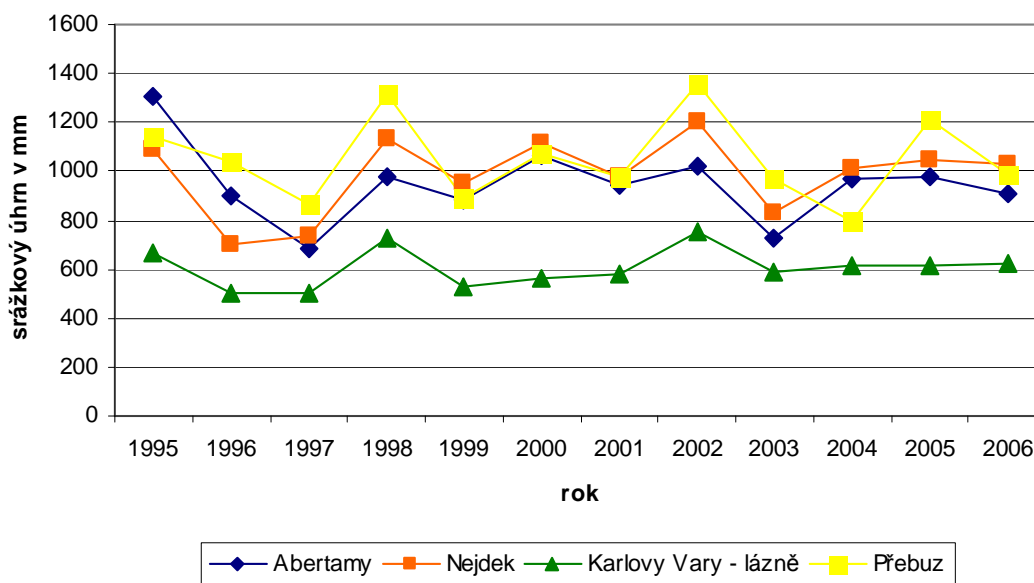
Obrázek 3.9: Plošné rozložení srážek v povodí Rolavy 1995 – 2008 (ČHMÚ, POH, DIBAVOD)

Nejvyšší úhrny srážek byly zaznamenány ve vrcholových partiích v blízkosti česko-německých hranic. Naopak nejnižší hodnoty vykazuje okolí Karlových Varů. Největší plochu povodí zasahují srážkové úhrny v intervalu 900 – 1050 mm. Vliv orografické bariéry není výrazně patrný vzhledem k poměrně postupnému ubývání množství srážek na povodí směrem do nižších poloh.

Srážky jsou během roku rozděleny relativně rovnoměrně ve všech sledovaných stanicích (obr. 3.10). Nejvíce srážek průměrně spadne v červenci (95,3 mm), srpnu (83,3 mm) a září (83,1 mm). Naopak srážkově chudšími měsíci jsou březen (75,1 mm), duben (45,5 mm) a květen (74,2 mm) (ČHMÚ).



Obrázek 3.10: Rozdělení srážek v průběhu roku, průměrné hodnoty 1995 -2008 (ČHMÚ)



Obrázek 3.11: Srážkové úhrny na stanicích v bezprostřední blízkosti povodí Rolavy 1995 – 2008 (ČHMÚ)

Obrázek 3.11 ilustruje množství srážek spadlých ve stanicích v povodí Rolavy nebo v její blízkosti. Nejvyšší úhrny srážek byly za posledních 13 let naměřeny v Přebuzi, která se nachází nedaleko pramene Rolavy. Naopak nejméně srážek spadne v nejnižnější stanici vzhledem k povodí v Karlových Varech – lázních.

Podrobnou analýzu deštivých a suchých období provedl Ledvinka (2008). Nejdeštivějšími hydrologickými roky byly 1981, 1995, a 2002. Nejsuššími obdobími byly 1964, 1971 a 1985, paradoxně byl relativně suchý i povodňový rok 1997 (Ledvinka, 2008).

3.6.2 Teplota vzduchu a ostatní klimatické charakteristiky

Předmětem práce není podrobná charakteristika dat o teplotě vzduchu na povodí Rolavy. Z finančních i praktických důvodů nebyla data o teplotě vzduchu k dispozici. Detailními analýzami teplotních poměrů se zabýval Ledvinka (2008). Údaje o teplotě vzduchu nejsou modelem HEC-HMS pro zadané potřeby simulací vyžadovány.

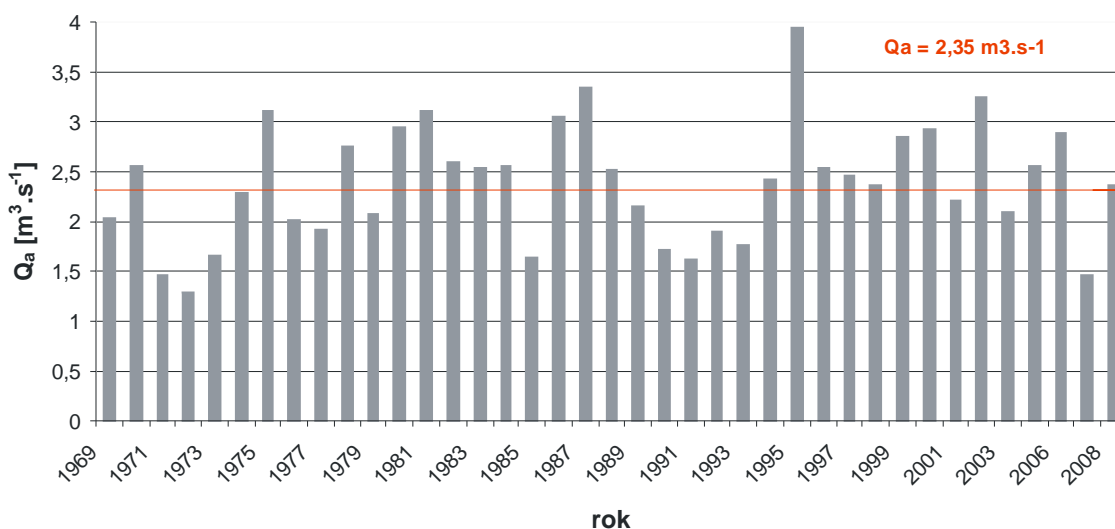
Maximálních hodnot dosahuje území Rolavy v červenci a minimálních zpravidla v lednu. Teploty ve vrcholových partiích náhorní plošiny jsou v průměru během roku asi o 0,1 – 0,3 °C nižší než v okolí Staré Role. Průměrná teplota vzduchu na povodí je 5,2 °C. Absolutního maxima bylo v letech 1969 – 2003 dosaženo v červenci 2006 necelými 18 °C, naopak minimum spadá do ledna 1963 (-10 °C). Typickým znakem oblasti je výskyt inverzí, kdy pramenná oblast Rolavy vykazuje vyšší teploty než okolí Staré Role. Průměrná roční amplituda teplot vzduchu je 18 °C (Ledvinka, 2008).

Sněhová pokrývka hraje důležitou roli v souvislosti s relativně častými zimními povodněmi. Údaje o výši sněhové pokrývky na povodí jsou špatně k dispozici. O problematiku akumulace a tání sněhové pokrývky se na několika experimentálních povodích v Krušných horách začala zajímat katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, která se zaměřila na sběr dat přímo v terénu. Ledvinka (2008) hodnotil výšku sněhové pokrývky kombinací českých a německých dat. Nejmocnější sněhová pokrývka se ve vyšších polohách vyskytuje v únoru a lednu. Sněhové přehánky přicházejí zpravidla již v listopadu a sníh se v uzavřenějších lokalitách drží až do května (např. údolí Slatinného potoka). Ledvinka (2008) dále vyzníval, že dochází k dlouhodobému poklesu dnů s reliéfem pokrytým sněhem. Sníh podle stejného autora koreluje velice nevýrazně se zvyšujícím se odtokem v horní oblasti Rolavy po Chaloupky.

3.7 Odtokové poměry

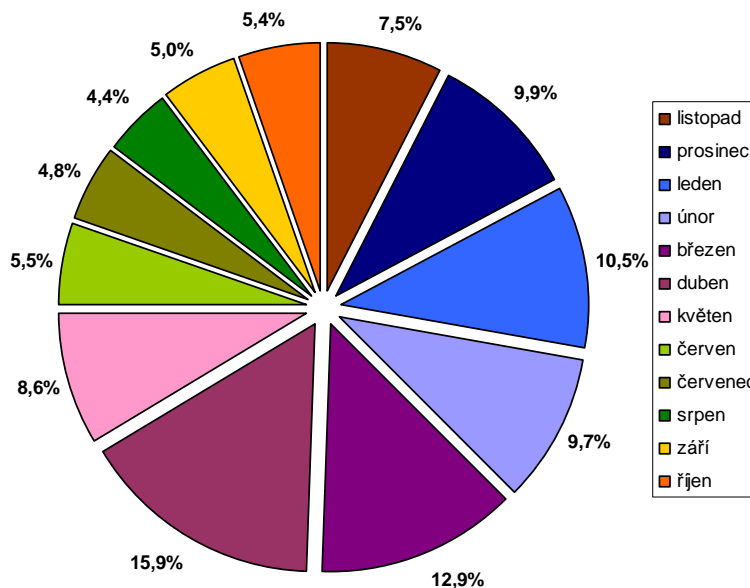
V povodí Rolavy se nacházejí dva limnigrafy ČHMÚ – profil Chaloupky před soutokem Rolavy a Slatinného potoka a Stará Role u Karlových Varů. Pro potřeby simulování vlivu poldrů na odtok vody z povodí bylo zapotřebí uzavřít celé povodí jedním závěrovým profilem – Starou Rolí. Veškeré následující charakteristiky budou proto postaveny na datech ze Staré Role. Profil Chaloupky nebyl vhodný z mnoha důvodů. Přehledné statistické zpracování dat z Chaloupek provedl Ledvinka (2008), který mj. vyzdvihl nepřítomnost kauzality mezi srážkovými úhrny a průtoky. Roční koeficienty odtoku pro profil Chaloupky vykazovaly často nereálné hodnoty.

Dlouhodobý průměrný roční průtok v profilu Stará Role činí $2,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 3.12), což odpovídá vodnímu stavu 30 cm (ČHMÚ). Povodí vykazuje poměrně vysokou hodnotu odtokové výšky 585 mm, která je typičtější pro horská povodí. V období 1968 - 2008 byly nejvodnatějšími hydrologickými roky 1976, 1988 nebo 1996, naopak suššími roky 1973, 1984 nebo 2007.



Obrázek 3.12: Rozložení ročních průtoků ve Staré Rolí v hydrologických letech 1969 - 2008 (ČHMÚ)

Roční rozložení odtoku vody z povodí je mírně nevyrovnané (obr. 3.13). 37 % odtoku připadá na jaro, nejméně vody odečte v létě (14 %). Největší podíl mezi dlouhodobými průměrnými měsíčními průtoky na celkovém ročním odtoku z období 1968 - 2008 se týká měsíce dubna (16 %) a března (13 %). Nejsuššími měsíci jsou v průměru červenec (4,8 %) a srpen (4 %). Rozkolísanost průtoků během roku souvisí s obdobím, kdy na povodí leží sněhová pokrývka. Její tání ovlivňuje vodní stavy nejvýrazněji.



Obrázek 3.13: Průměrné rozložení měsíčních průtoků v roce za sledované období 1969-2008 (ČHMÚ)

Rozkolísanost denních průtoků ve Staré Roli je během roku poměrně nízká, což dokazuje hodnota decilové odchylky 0,294. Variabilita denních průtoků má srovnatelný průběh s dlouhodobou rozkolísaností průtoků během roku. Nejnižší dlouhodobé denní průtoky jsou v červenci ($1,38 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a srpnu ($1,27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a nejvyšší v dubnu ($4,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a březnu ($3,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

3.7.1 Historický a současný režim povodní

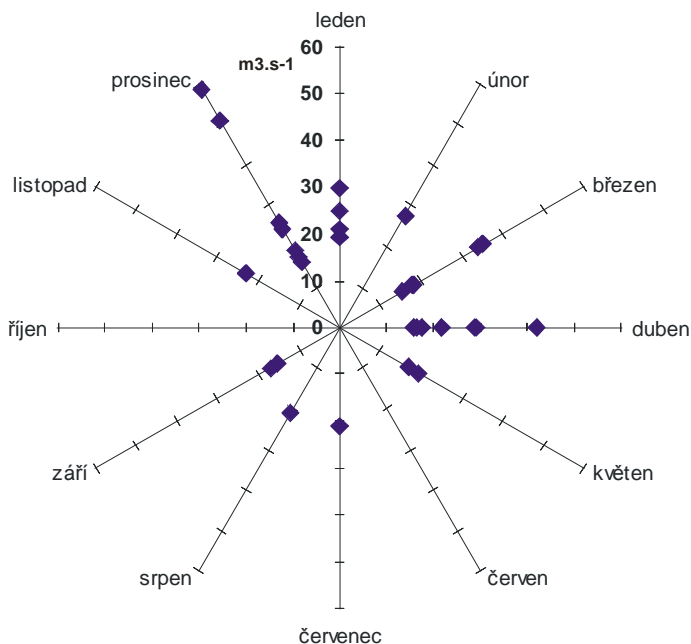
Téma historických povodní na Ohři, ale i extrémních průtokových událostí do roku 2002 zmiňuje v disertační práci Čekal (2005). Převaha proudění ze západního směru, která je dominantní v zimním období, zapříčiňuje větší výskyt povodní v zimě. Kategorizace zimních záplav spadá do období od listopadu do dubna. Menší výskyt letních povodní svědčí o stálém vlivu, který vytváří z jižního směru horský systém Alp. Za letní jsou považovány ty průtokové vlny, které se vyskytují v měsících květnu až říjnu, v tzv. vegetačním půlroce.

Z hlediska prostorové lokalizace spadu srážkových jader byla Čekalem (2005) zjištěna největší pravděpodobnost výskytu letních povodní na Rolavě (22%) a Svatavě (18%), bral-li v úvahu povodí horní Ohře. Analýzou zimních povodňových situací na horní Ohři bylo Čekalem (2005) zjištěno, že vyvolané průtokové vlny odpovídají srážkám, které se vyskytují zhruba u dvou třetin případů s jednodenním a dvoudenním předstihem. V pokulminační fázi spadne ještě v průměru 10 % srážek z uvažované srážkové epizody.

Tvar povodňové vlny v zimním období je oproti letnímu zploštělejší, což je způsobeno retenční schopností a nerovnoměrností tání sněhové pokrývky a tím i větším rozpětím variability doby doběhu odtoku z jednotlivých částí povodí do závěrového profilu. Více než polovina výskytů srážkových jader ze všech povodňových případů v zimním půlroce je situována v rámci horní Ohře v povodí Rolavy. U vyšetřovaných 41 zimních povodní Čekalem (2005) činila procentuálně vyjádřená odchylka od průměrné výšky srážek v povodí Rolavy + 52,7 %. Povodí Rolavy lze tedy v rámci regionu horní Ohře po Karlovy Vary považovat za srážkově velice vydatné povodí.

Nejvýraznějšími zimními povodněmi na Rolavě byla záplava v prosinci 1974, kdy byl ve Staré Roli zaznamenán maximální sledovaný průtok v období 1968-2008, který činil $58,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Výraznou kulminaci $51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vykazoval také 3. prosinec 1981. V dubnu 1987 byl ve Staré Roli naměřen průtok $41,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Z důležitých letních povodňových událostí lze jmenovat samozřejmě srpen 2002, 13.8.2002 protékalo Starou Rolí $21,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Zajímavou epizodou byl květen v roce 1970, kdy se kulminace vyšplhala k $19,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Sezonalita nejvýznamnějších povodní nad $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což je Q_1 podle ČHMÚ, jasně dokumentuje ztelnější výskyt zvýšených vodních stavů v zimním období (obr. 3.14).



Obrázek 3.14: Sezonalita povodňových událostí naměřených ve Staré Roli 1969-2008 (ČHMÚ)

Nejčastěji se zimní povodně objevovaly kolem Vánoc a začátkem ledna, kdy docházelo k prvním větším oblevám v hydrologickém roce. Poměrně častý výskyt zvýšených vodních stavů vykazuje duben, což odpovídá typickému jarnímu tání sněhu podmíněnému zvýšenými úhrny srážek. Povodně se vyhýbají říjnu a červnu, minimálně

výskyt nastane v červenci a srpnu. Roční režim povodní na Rolavě představuje v České republice typický příklad horského povodí. Odhad množství vody, které odteče ze sněhu, je velice obtížný. Kvantitativní i kvalitativní řešení problematiky akumulace a tání sněhové pokrývky by mohl být nadějný cíl v protipovodňové ochraně podhorských oblastí.

Pro potřeby hydrologického modelování v praktické části byl proveden rozbor dvou menších povodní letního typu v září 2007 a srpnu 2006 v hodinovém kroku pro jednotlivá subpovodí. Jelikož model HEC-HMS by pro simulaci zimního typu povodní potřeboval údaj o teplotě vzduchu a sněhové pokrývce, byly zvoleny letní typy, ač nejsou pro danou oblast natolik reprezentativní, více kapitola Materiál a metody.

3.8 Biogeografické poměry a ochrana krajiny

Na území zasahují dvě odlišné fyto geografické oblasti – oreofytikum a mezofytikum. Oreofytikum zaujímá vrcholové oblasti s chladnomilnými druhy rostlin (Culek et al., 1996).. Původní vegetace se však uchovaly jen zčásti, dnes se zde setkáváme se smrkovými formacemi. V nižších polohách je rozšířena vegetace mezofytika. Jedná se o nejnižnější oblast povodí v blízkosti Sokolovské pánve, kde v provlhčených zónách se místy dodnes zachovala druhově bohatá polopřirozená společenstva. V lesní vrcholové oblasti má největší podíl jedlobukový, smrkobukový a bukosmrkový vegetační stupeň. (Mostecká, 2005).

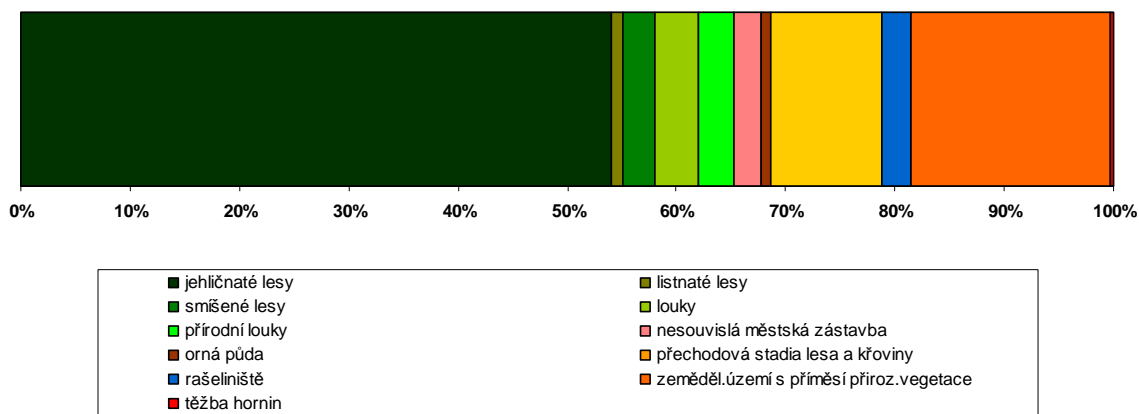
Krušnohorská rašeliniště představující ložiska rostlinného substrátu dosahují mocnosti až 8 m, v průměru 3 – 4 m. Mezi krušnohorskými rašeliništi lze vyčlenit lokalitu rolavského celku, kde se nachází několik rašelinišť. Zejména okolo Přebuze jsou rašeliniště zdevastována dřívější těžbou rašeliny a cínu (Dohnal, 1965).

Nejnámějšími rašeliništními lokalitami v povodí je Velké jeřábí jezero a Volárna. Velké jeřábí jezero leží přímo na státní hranici, zaujímá plochu cca 27 ha. Rašeliniště Volárna se nachází ve výšce 920 m n. m. mezi osadami Jelení a Rolava. Vytéká z něj největší přítok Rolavy Slatinný potok, přibližná plocha je 41 ha. Obě ložiska vznikla na vývěrech podzemní vody a mělkým režimem za vydatného přispění klimatu, průměrné roční srážky zde přesahují 1000 mm (Dohnal, 1965).

V zájmovém území se nachází několik chráněných oblastí, kterými jsou přírodní park (PřP) Jelení vrch, PřP Přebuz, přírodní památka Přebuzské vřesoviště, národní přírodní rezervace (NPR) Velký močál, NPR Velké jeřábí jezero, přírodní rezervace (PR) Malé jeřábí jezero a PR Oceán.

3.9 Využití území a antropogenní úpravy

Využití území v povodí Rolavy je zejména přírodního nebo přírodě blízkého charakteru. Téměř 70 % krajiny zaujímají jehličnaté lesy, které jsou zastoupeny rovnoměrně po celé ploše povodí. Zemědělské oblasti s přirozenou vegetací představují druhou nejčetnější kategorii CORINE Land Cover 2000 a vyskytují se v povodí Nejdeckého potoka a jižní části v zázemí Karlových Varů. Přechodová stadia lesů a křovin vyplňují plochy mezi loukami a lesy všech kategorií. Nesouvislá městská zástavba se týká okolí Nejdku, Nové Role a Karlových Varů. Podrobněji prostorové rozložení jednotlivých kategorií vyjadřuje příloha 2.



Obrázek 3.15: Krajinový pokryv v povodí Rolavy v roce 2000 (CORINE Land cover 2000, <http://geoportal.cenia.cz>)

Antropogenními úpravami říční sítě i blízkého okolí se podrobně zabývala Lelut (2007). Podle autorky se na řadě míst nacházejí zcela upravené úseky, které se střídají s přirozenými. Vrcholové partie byly od 14. století postiženy rýžováním cínu. Dodnes se v okolí Přebuzského vřesoviště nacházejí bažinatá koryta, která jsou pozůstatkem umělých. Ta vedla vodu z Rolavy do hornických zařízení. V současnosti jsou tyto kanály nefunkční. Podle analýzy historických a současných map bylo zjištěno, že došlo v minimálnímu překládání průběhu toků. Největší míru antropogenní upravenosti registrujeme v intravilánech Nejdku nebo Nové a Staré Roli. V povodí existuje asi 2 % odvodněných ploch, které vznikly v letech 1975 až 1990.

4 Materiál a metody

4.1 Zdroje dat

Předkládaná magisterská práce zahrnuje několik procedur nakládání s daty. Vytváření a sestavení modelu povodí Rolavy v programu HEC-HMS prochází řadou kroků, které jsou na sobě závislé. Práce sestává z množství přípravných prací, které na sebe navazují. Každý krok musí být zpracován co nejpřesněji, aby v následujících krocích nedocházelo k chybám, které by bylo pracné a složité zpětně eliminovat.

Pro účely zpracování bylo zapotřebí získat data nejen v digitální podobě, ale i terénním měřením. K analýze srážko-odtokových vztahů byla využita data poskytnutá Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ), Povodím Ohře (POH) a Deutscher Wetter Dienst (DWD). Pro základní fyzickogeografické charakteristiky vystačila data z ČHMÚ a POH v denních krocích. Pro analýzu chování povodí Rolavy na konkrétní srážkovou událost v modelu HEC-HMS probíhala práce s daty srážkových úhrnů i průtoků v hodinových krocích. Data o průtocích v hodinovém kroku v profilu Stará Role byla dodána ČHMÚ. Data o srážkových úhrnech v hodinových krocích byla získána od DWD (stanice Carlsfeld a Fichtelberg), ČHMÚ (Karlovy Vary - letiště) a POH (Citice a Přebuz). Bohužel hodinové kroky nejsou na stanicích k dispozici dlouhodobě, rovněž tak hodinové údaje o průtocích ve Staré Roli, proto bylo možno vybrat jen omezeně události, kdy došlo ke zvýšení vodních stavů. Jednalo se o události v září 2007 a srpnu 2006 (viz kap. 4.9).

Mapové výstupy byly vypracovány na základě Základní báze geografických dat v měřítku 1:10 000 (ZABAGED) a Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD). Veškeré vhodné vrstvy byly dodány školitelem. Některé fyzickogeografické tématické mapy (pedologie, CORINE Land Cover) byly vypracovány s pomocí internetových stran Portálu veřejné správy <http://geoportal.cenia.cz>. Podklady pro geologickou mapu povodí byly získány v digitalizované podobě od České geologické služby. Hodnoty CN křivek byly spočteny na základě analýz v ArcGIS, data v digitální podobě byla poskytnuta Ing. Petrem Šerclem, Ph.D z ČHMÚ. Veškeré mapové výstupy byly v souřadnicovém systému S-JTSK.

Klíčovou datovou základnou byla data získaná terénním měřením. V terénu bylo zapotřebí změřit 21 příčných profilů koryt a příbřežní zóny pomocí přístroje Laser Ace, které byly vyžadovány modelem HEC-HMS. Charakteristiky poldrů byly vyměřeny na čtyřech místech v horním povodí Rolavy a Slatinného potoka pomocí totální geodetické stanice Leica.

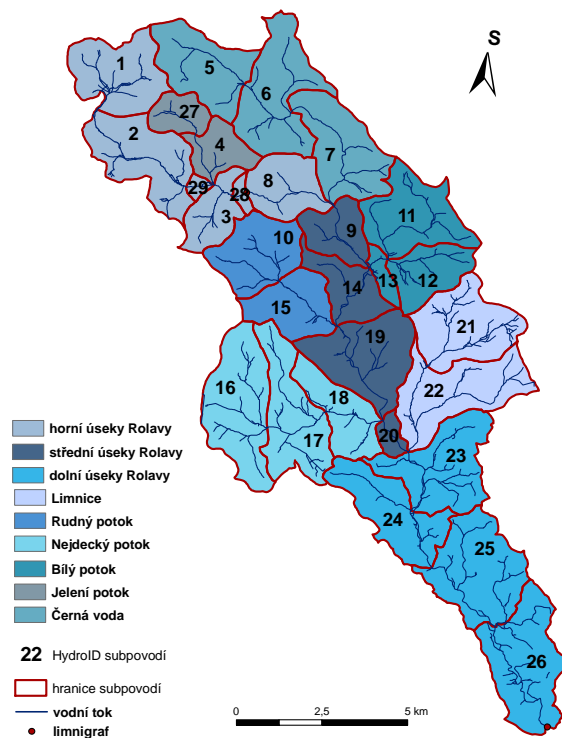
4.2 Zpracování dat a použitý software

Statistické zpracování podkladů pro základní fyzickogeografické charakteristiky probíhalo v MS Excel 2003, výstupem byla řada tabulek a grafů. Mapové podklady byly upravovány v ArcGIS 9.2 s nadstavbou ArcHydro Tools. Časté grafické úpravy obrázků probíhaly v Corel Draw 11. Zásadní práce probíhala v hydrologickém modelu HEC-HMS. Vstupy do modelu byla množství dat, která bylo nutno předpřipravit ve výše zmíněných softwarech. V samotném modelu pak probíhaly simulace srážko-odtokových vztahů a jejich kalibrace a optimalizace.

4.3 Vytvoření elementárních ploch

Před analýzami DMT bylo potřeba rozdělit povodí Rolavy na dílčí subpovodí srovnatelných ploch, jelikož povodí Rolavy netvoří pravidelné povodí co do tvaru a velikosti jednotlivých povodí IV.řádu. Zkoumaná subpovodí lze zařadit do kategorie malých povodí, která tvoří specifickou skupinu povodí, jejichž velikost bývá v literatuře (Hrádek, 1990) zpravidla hodnocena do 5 km². Svým charakterem se blíží elementárním odtokovým plochám s homogenními charakteristikami. Proces povrchového odtoku na malých povodích je ovlivňován velkým počtem působících faktorů, jejichž podíl na formování tohoto procesu je obtížně vyjádřitelný vzhledem k nedostatku přímých pozorování, a proto je zapotřebí správného použití interpolačních metod (Daňhelka et al., 2003).

Vytvoření dílčích subpovodí patřilo k primární editační práci v ArcGISu. Hlavní důvodem vytvoření dílčích povodí byla potřeba zachování heterogenity povodí. Tímto způsobem byla ponechána prostorová odlišnost parametrů jako např. hydrografických, půdních, využití území apod. Každá komponenta pak reprezentuje jedno subpovodí, čímž dojde k přesnějšímu vyjádření jednotlivých parametrů odtoku naproti zadávání průměrných parametrů pro celé povodí. Vytvořená dílčí povodí měla velikost okolo 5 km². V celém povodí bylo vyčleněno 29 subpovodí s vlastním Hydro ID – identifikačním číslem (obr. 4.1).



Obrázek 4.1: Schéma rozdělení povodí Rolavy na subpovodí s přiřazeným Hydro ID (DIBAVOD)

4.4 Digitální model terénu

Zásadním výchozím mapovým podkladem byl digitální model terénu, ze kterého vycházelo několik prostorových analýz, jejichž výsledky vstupovaly do modelu HEC-HMS. Jako digitální model terénu byl použit vektorový vrstevnicový podklad ZABAGED s výškovým intervalem vrstevnic 2 m. Nejdříve byla vytvořena z linií vrstevnic triangulační síť *TIN*. Následně byl z *TINu* vykreslen raster pomocí funkce *TIN to Raster* v *3D Analyst*. DMT byl využit ke stanovení sklonitosti a expozice svahů, dále k tvorbě gridů směřů a akumulace odtoku v extenzi Arc Hydro Tools.

Arc Hydro je nadstavba pracující na bázi ArcGIS, které slouží k hydrologickým analýzám. Program vznikl ve spolupráci firmy ESRI a Center for Research of Water Ressource v Texasu. ArcHydro byl navržen tak, aby jeho základní funkce byly schopné elementárních hydrologických výpočtů (Jedlička, Štych, 2006). ArcHydro je model prostorových a časových dat. ArcHydro obsahuje nástroje umožňující propojení v rámci datového modelu, správu atributů jednotlivých prvků a podporu hydrologických analýz (Maidment, Djokic, 2000). Zároveň program podporuje hydrologické simulace, ale sám je

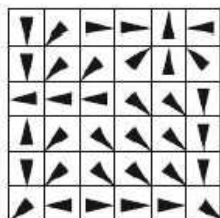
není schopný vytvářet. Pro hydrologické simulace je zapotřebí zajistit výměnu dat s jinými externími softwary. Tomuto předpokladu vyhovuje HEC-HMS, pro jehož snadnější spolupráci s GIS byly vyvinuty extenze HEC-GeoHMs a HEC-GeoRAS pro hydrodynamické úlohy) (Jedlička, Štych, 2006).

Konkrétními pracemi v ArcHydro Tools bylo vytvoření hydrologicky korektního území, ze kterého bylo následně vyčteno několik parametrů, jež vstupovaly do rovnic transformace přímého odtoku. Veškeré prostorové analýzy pro získání parametrů Clarkova UH vycházely z rastru vytvořeného z digitálního modelu terénu (DMT) povodí Rolavy za pomoci nástrojů ArcHydro Tools. Nejprve bylo zapotřebí přiřadit identifikační kódy Hydro ID jednotlivým dílčím povodím pomocí příkazu *Assign HydroID*. Následně došlo k vyplnění terénních depresí nástrojem *Fill Sinks* tak, aby byl vytvořen hydrologicky korektní DMT. Dalším krokem bylo vytvoření rastru odtoku vody funkcí *Flow Direction*, který znázorňuje směry odtoku vody z povodí. Výpočet směru odtoku se děje na principu posuvného okna 3 x 3 buňky (obr. 4.2).. V okně se určí nejnižší nadmořská výška, a tím je postupně všem buňkám přiřazen směr odtoku (Maidment, Djokic, 2000). Poté došlo k rastrové reprezentaci akumulace odtoku nástrojem *Flow Accumulation*, kdy je každé buňce rastru přiřazen počet buněk, z kterých voda odtéká do dané buňky.

Princip tvorby rastru akumulace



počet buněk, do které buňky vtékají

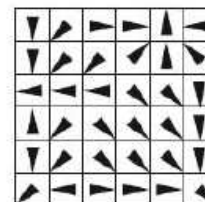


směr odtoku vody z buňky

Princip tvorby rastru odtoku z buňky



nadmořská výška



směr odtoku vody z buňky

Obrázek 4.2: Princip tvorby rastrů akumulace vody a směru odtoku (upraveno dle Jedlička, 2002)

Na základě rastrů akumulace vody a směru odtoku byla nástrojem *Longest Flow Path* generována nejdelší dráha odtoku v subpovodí (obr. 4.3). Funkcemi *Construct 3D Line* a *Longest Flow Path Parameters* byly vytyčeny charakteristiky S_{1085} a nejdelší údolnice v dílčích povodí. Výpočet potenciální retence je představen v následující kapitole.



Obrázek 4.3: Znáznornění nejdelších drah odtoku vody a vytyčení sklonitosti 10 – 85 % v subpovodí (ZABAGED, DIBAVOD)

4.5 Transformace přímého odtoku

Volba vhodné metody stanovení transformace přímého odtoku je zásadní částí metodického postupu, neboť určuje tvar povodňové vlny, tím i velikost kulminačního průtoku. Výpočet hydrogramu vychází podle Šercla (2007) z:

- Výška příčných srážek je rovnoměrně rozložena po ploše povodí a je konstantní během časového intervalu
- Hydrogram odtoku má stejný objem jako odpovídající výška efektivních srážek
- Hydrogram přímého odtoku odpovídající dané výšce efektivních srážek je nezávislý na čase výskytu příčných srážek a na předchozích srážkách
- Hydrogramy přímého odtoku mají vždy stejnou délku časové základny bez ohledu na intenzitu srážek

Pro potřeby modelování v HEC-HMS byl zvolen Clarkův jednotkový hydrogram (*Clark Unit Hydrograph*). Jednotkový hydrogram dle Clarka disponuje v prostředí HEC-HMS parametry:

T_c [h] – doba koncentrace (*Time of Concentration*)

R [h] – retenční koeficient (*Storage Coefficient*)

Pro odhad T_c existuje mnoho vzorců, které zmiňuje např. Jeníček (2009b), Daňhelka et al. (2003) nebo Šercl (2007). V této práci byla použita metodika SCS (*Soil Conservation Service*), která k výpočtu využívá vzorce pro stanovení doby prodlení (*lag time*):

$$T_{lag} = \frac{L^{0,8} (S + 1)^{0,7}}{1900\sqrt{Y}},$$

kde

T_{lag} - doba prodlení [h]

L – maximální délka odtoku v povodí [ft]

S – potenciální maximální retence půdy [in]

Y – sklon povodí [%]

doba koncentrace se pak vypočítá ze vztahu:

$$T_c = \frac{T_{lag}}{0,6}$$

Doba koncentrace je čas potřebný pro odtok vody z hydraulicky nejvzdálenějšího bodu v povodí do závěrového profilu a počítá se jako součet všech dob doběhu. (Mishra, Singh, 2003). Doba koncentrace ovlivňuje tvar a vrchol hydrogramu odtoku. Intenzifikace zemědělského využití krajiny obvykle zkracuje T_c , čímž se zvyšuje kulminační průtok (Spitz, Prudký, 2001). Retenční koeficient představuje transformační faktor, který simuluje dobu zadržení vody v povodí (Šercl, 2007). Doba prodlení je časový posun v hodinách mezi výskytem maxima příčinné srážky a výskytem kulminačního průtoku v závěrovém profilu povodí. Maximální délka odtoku vody v povodí je v jiném vyjádření délka údolnice k rozvodnici. Potenciální retence povodí je vyjádřena pomocí čísel odtokových křivek CN (viz následující kapitola).

Pro výpočet retenčního koeficientu byl podle dostupné literatury (Šercl, 2007), (Daňhelka et al., 2003), (Roub, 2008) vybrán následující vzorec:

$$R_c = AL^B S_{1085}^C, \text{ kde}$$

L – maximální délka hlavního toku v povodí [mi]

S_{1085} – průměrný sklon povodí podél linie hlavního toku v úseku 10 – 85 % délky [ft/mi]

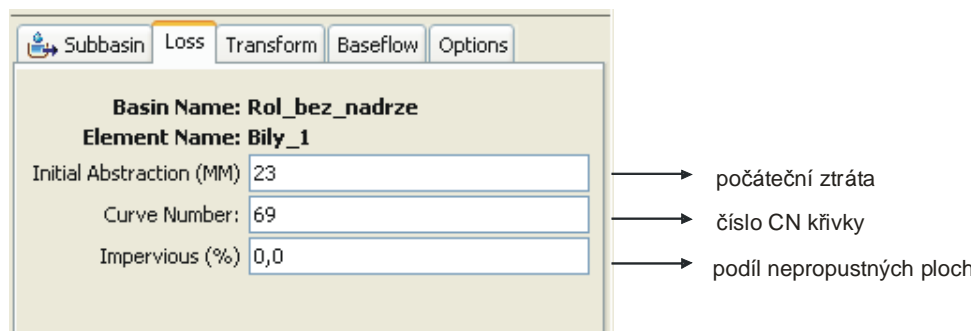
A , B , C – koeficienty odvozené pro stát Illinois v USA, které pro podmínky ČR byly na základě zkušeností ze simulačních výpočtů povodňových událostí upraveny na hodnoty (Šercl, 2007):

$$A = 80, B = 0,342, C = -0,79 \text{ (Šercl, 2007)}$$

K výpočtu doby koncentrace i retenčního koeficientu bylo potřeba zjistit několik parametrů. Příprava dat byla prováděna v ArcGIS 9.2. a v jeho extenzi ArcHydro Tools. Většina prostorových analýz vycházela z DMT. Pomocí ArcHydro Tools byla zjišťována maximální délka odtoku ve stopách, maximální délka hlavního toku v mílech a průměrný sklon povodí mezi 10 a 85 % délky toku. Kvantitativně vyjádřené doby koncentrace, retenční konstanty a dalších parametrů pro jednotlivá dílčí povodí Rolavy, které vstupují do výpočtu Clarkova UH, jsou znázorněny v příloze 5 a 6.

4.6 Stanovení odtokové ztráty

Přímý odtok zahrnuje odtok povrchový a část odtoku hypodermického. Pro stanovení odhadu přímého odtoku byla zvolena metoda CN křivek. Podíl přímého odtoku na celkovém odtoku se stanovuje pomocí čísel odtokových křivek CN. Čím větší hodnota CN, tím je větší pravděpodobnost, že jde o povrchový odtok. Do modelu HEC-HMS se zadávají následující parametry:



Obrázek 4.4: Okno s parametry výpočtu objemu odtoku v HEC-HMS

Metoda CN křivek je založena na vztahu:

$$\frac{H_s - H_o}{S} = \frac{H_o}{H_s}, \text{ kde}$$

H_s - úhrn srážek [mm]

H_o - objem odtoku [mm]

S - potenciální retence půdy [mm]

Potenciální retenci pak určujeme ze vztahu:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \text{ [mm]} \quad \text{nebo} \quad S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ [in]}, \text{ kde}$$

CN – číslo CN křivky

Součástí metody CN-křivek je odhad počáteční ztráty I_a (*Initial Abstraction*), která je především součtem ztrát intercepce a akumulace v mikrodepresích do okamžiku, než dojde k vytvoření přímého odtoku. Hodnoty I_a se odhadují na základě hodnot potenciální retence S , implicitně

$$I_a = 0,2S$$

Úpravou prvního vzorce a dosazením vztahu pro výpočet počáteční ztráty vychází výsledný vztah pro odhad velikosti přímého odtoku (Šercl, 2006):

$$H_o = \frac{(H_s - 0,2 \cdot S)^2}{H_s + 0,8 \cdot S}, \text{ kde} \quad H_s \geq 0,2S$$

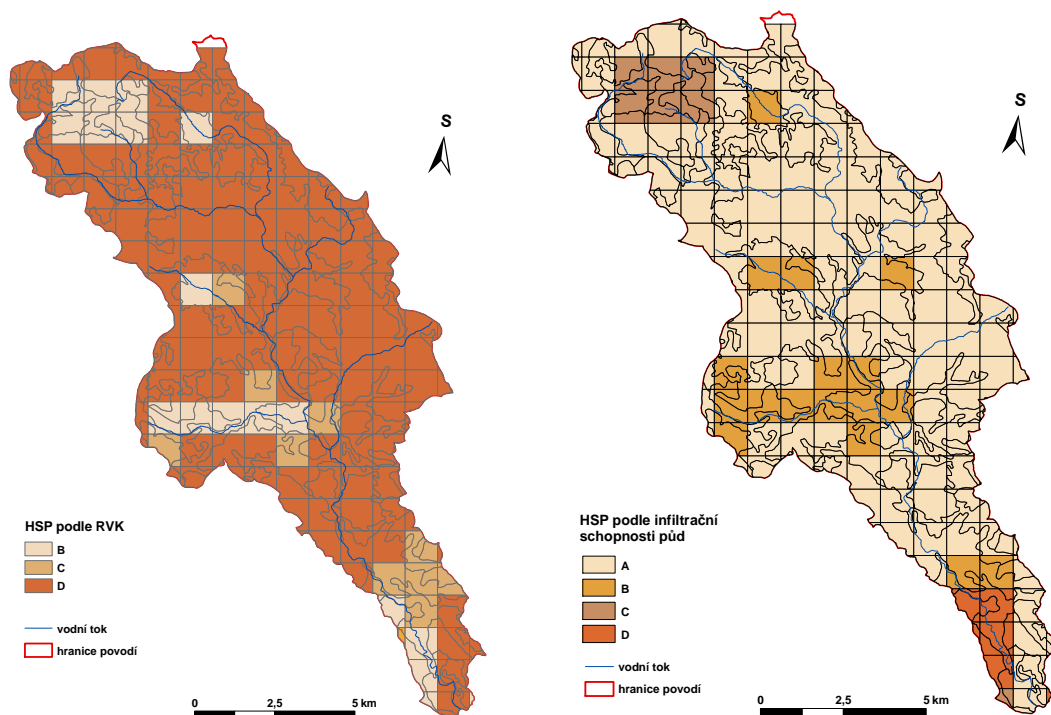
Metodika stanovení hodnot CN vychází z kategorizace krajinného pokryvu (land cover) a rozčlenění půd v jednotlivých kategoriích do tzv. hydrologických skupin půd (HSP). Pro každou kategorii krajinného pokryvu se určují celkem čtyři hodnoty CN dle čtyř HSP, označených jako A, B, C, D (tab. 4.1).

Tabulka 4.1: Charakteristika hydrologických skupin půd (Janeček et al., 2002)

Hydrologická skupina půdy	Obecná charakteristika
A	<i>půdy s vysokou rychlostí infiltrace (větší než 0,12 mm/min) i při úplném nasycení, zahrnují převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo štěrky</i>
B	<i>půdy se střední rychlostí infiltrace (0,06 – 0,12 mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité</i>
C	<i>půdy s nízkou rychlostí infiltrace (0,02 – 0,06 mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité</i>
D	<i>půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace (0,02 mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím</i>

Kategorizace půd do HSP do nedávné doby vycházela zpravidla z infiltračních schopností půdy, která hrají přední roli v rovinnatém a mírně sklonitém terénu. Ve sklonitějším terénu se však vlivem gravitace uplatňuje více než infiltrační schopnost půdy retenční kapacita půdy (RVK), kdy voda stéká tzv. preferenčními cestami buď po povrchu nebo v případě propustných půd ve formě rychlého hypodermického odtoku těsně pod povrchem. Často se jedná o kombinaci těchto jevů, proto je možné předpokládat, že velikost přímého odtoku bude za stejných možností infiltrace větší ve sklonitém území.

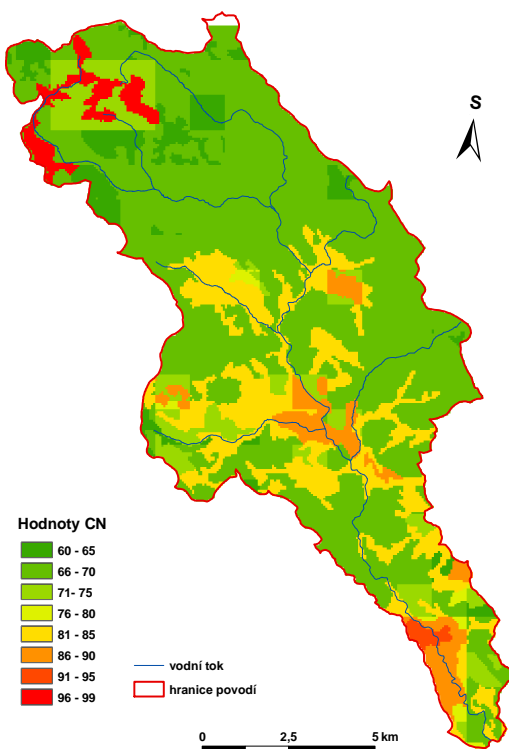
Ve snaze o co nejpresnější a nejvýstižnější získání hodnoty CN pro jednotlivá subpovodí Rolavy byla použita nová metodika stanovení hodnot CN pro ČR uvedená např. Šerclem (2006). Metoda bere v úvahu vedle infiltračních schopností půd i retenční vodní kapacitu (RVK) a průměrnou sklonitost hodnoceného území odvozenou z digitálního modelu terénu. Veškeré datové podklady byly dodány Ing. Petrem Šerclem, PhD z ČHMÚ v digitalizované podobě s rozlišením pixelu 1 km². Rozčlenění půd do HSP dle velikosti infiltrace i RVK bylo převzato podle návrhu VÚMOP (obr. 4.5). Hodnoty CN jsou tabelovány podle kategorií Corine Land Cover a typu HSP (tabulka viz příloha 3).



Obrázek 4.5: Ukázky HSP v povodí Rolavy podle infiltrační schopnosti půd (vlevo) a podle RVK (vpravo) (DIBAVOD, ČHMÚ)

Základem metodiky nalezení co nejpřesnějšího čísla CN pro dílčí povodí je postupné zjišťování CN hodnot podle hledisek sklonitosti, RVK a infiltrační schopnosti půd. Nejdříve je podle kategorií Corine Land Cover a HSP odečtena hodnota CN z tabulky pro všechna tři hlediska. Následně dojde ke zprůměrování tří hodnot CN podle daných hledisek. Výsledné číslo CN pro subpovodí je průměrná hodnota z tří hodnot CN. Pokud je však nižší než hodnota CN dle infiltrace pro stejné subpovodí, rozhoduje větší hodnota. Ta pak reprezentuje dané dílčí povodí v modelu HEC-HMS. Je to z důvodu, že infiltraci lze považovat za nejdůležitější vlastnost půd z hlediska vytváření přímého odtoku.

Technicky byly výpočty prováděny v programu ArcGIS 9.2 postupným slučováním vrstev Corine Land Cover a HSP dle výše uvedených tří hledisek. Závěrem byl rastr s výslednými hodnotami CN (viz obr. 4.6) pro každý pixel, ale i rastry hodnot CN podle jednotlivých hledisek (viz příloha 4). Číselné vyjádření výsledných CN hodnot a počáteční ztráty (I_a) pro jednotlivá subpovodí jsou k nahlédnutí v příloze 5.



Obrázek 4.6: Výsledné hodnoty CN pro povodí Rolavy (DIBAVOD, ČHMÚ)

Hodnoty CN sestavené dle výše uvedené metodiky odpovídají „průměrným“ vlhkostním podmínkám, což odpovídá situaci nasycení půdy vodou kolem retenční vodní kapacity. Tato hodnota se v literatuře označuje jako CN_{II} a používá se při stanovení odtoku při teoretických návrhových povodňových vln (Šercl, 2007). Předpoklad, že jsou předchozí vláhové podmínky suché (CN_I) či je naopak půda značně nasycena (CN_{III}), nebyl při simulaci modelem HEC-HMS uvažován. Dá se však očekávat, že by pro oba extrémní případy byla hodnota CN významně odlišná, tudíž by simulace vykazovala též výkyvy od „průměrného“ stavu.

4.7 Odhad parametrů podzemního odtoku

Proces podzemního odtoku musí být v hydrologickém modelu řešen odděleně od rychlé složky odtoku (obr. 4.7).

Model HEC-HMS nabízí několik alternativních modelů výpočtu *baseflow* modelu, přičemž pro potřeby práce byla využita metoda exponenciálního poklesu (*Exponential Recession Model*). Kalkulace je řešena pro každé dílčí povodí zvlášť. Metoda

exponenciálního poklesu definuje velikost podzemního odtoku v daném čase pomocí počátečního podzemního odtoku. Pro analýzy základního odtoku z hydrogramu metodou poklesové křivky se vychází ze vztahu (Feldman, 2000):

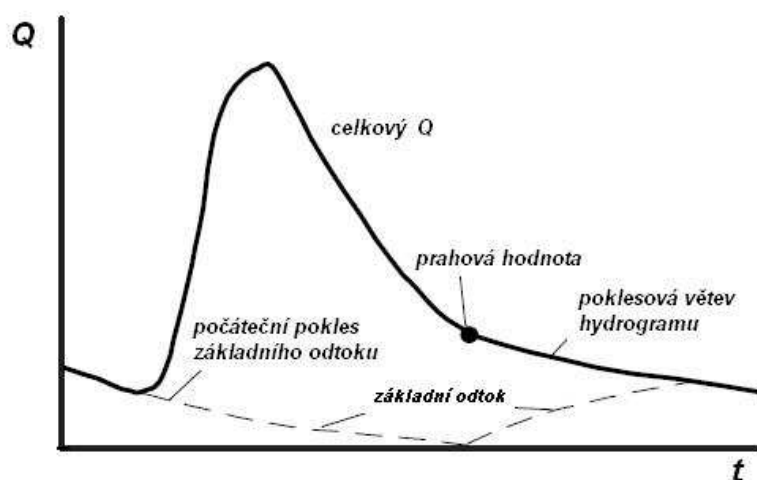
$$Q_t = Q_0 K^t \quad , \text{ kde}$$

Q_0 je počáteční základní odtok a

K^t je poklesová konstanta

v čase t

Poklesová konstanta vyjadřuje podíl mezi počátečním a koncovým odtokem v určitém časovém intervalu a ilustruje tak rychlost poklesu. Do modelu HEC-HMS se zadávají následující parametry: počáteční minimální průtok (*Initial Discharge*), poklesová konstanta (*Recession Constant*), prahová hodnota (*Threshold type*). Prahová hodnota je vyjádřená buď jako hodnota průtoku nebo jako podíl tohoto průtoku ku velikosti kulminace, kdy dochází ke zvýšení podzemního odtoku na poklesové větvi hydrogramu. Základní odtok se projevuje nejvíce na poklesové větvi hydrogramu oproti přímému odtoku.



Obrázek 4.7: Schéma metody exponenciálního poklesu (upraveno dle Feldman, 2000)

Poklesová konstanta je kalibrovatelný parametr, neboť nelze přesně stanovit její hodnotu. Počáteční hodnota pro všechna subpovodí byla zvolena 0,85, což doporučuje manuál programu. Posledním parametrem, který je modelem vyžadován je stanovení poměru, který bude mezi kulminačním průtokem a prahovou hodnotou průtoku v inflexním bodě. Model nabízí číslo 0,1 který byl ponechán a otevřen případné kalibraci. Jestliže je míra stanovena na 0,1 a kulminační průtok je $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, pak průtok v bodě prahové hodnoty je desetinový.

Počáteční průtok (*Initial Discharge*) byl jediný vstupní parametr, který bylo potřeba kvantifikovat výpočtem. Odvození počátečního průtoku vycházelo z předpokladu, že počáteční průtok v hodinové řadě simulované epizody je tvořen pouze složkou podzemního odtoku. Jinými slovy, hodnota průtoku byla hodnota podzemního odtoku, tudíž nebyla uvažována žádná předchozí srážková událost, kdy by mohlo být povodí nasyceno. Povodí procházelo sušší epizodou, kdy byla koryta toků zásobována pouze ze složky podzemního odtoku. V tento moment začala srážková epizoda, která začala měnit podíl odtoku vody z jednotlivých složek odtoku a docházelo k separaci přímého odtoku a ostatních složek.

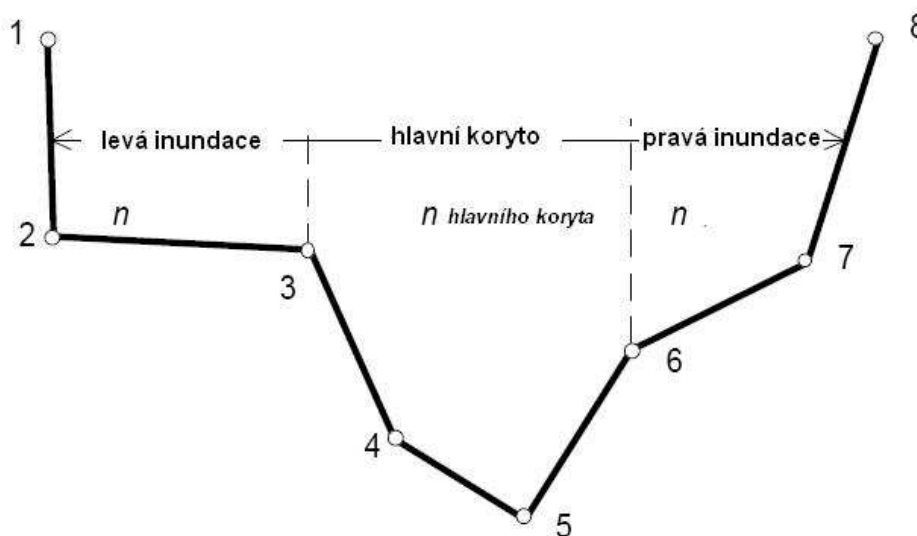
Odhad počátečního průtoku bylo potřeba stanovit pro všechna dílčí povodí. Jelikož neexistují průtokové řady pro všechna subpovodí, bylo nutné pracovat pouze s jedním číslem průtoku z profilu Stará Role, a to s prvním hodinovým údajem v obou sledovaných událostech. Pro kalibrační období šlo o údaj z 24.9. 2007 v 7:00, kdy průtok činil ve Staré Roli $1,84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Počáteční podzemní průtok pro verifikační událost z 4.8. 2006 v 7:00 byl pouze $1,12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnota počátečního podzemního průtoku netvoří klíčovou součást simulace, proto byly hodnoty *Initial Discharge* pro subpovodí jednoduše rozpočteny na základě lineární závislosti minimálního průtoku na ploše dílčích povodí. Každé dílčí povodí ovlivňuje celkový minimální průtok. Zde se nabízí diskuze nad vhodnějšími výpočty pro subpovodí, je-li k dispozici pouze jedna hodnota pro celé povodí. Tato problematika však není hlavním cílem práce, navíc přesný odhad parametrů není pro simulace klíčový a může být během procesu kalibrace optimalizován. Výše minimálního průtoku je ovlivňována lokálními vlivy povodí. Hlavními ovlivňujícími faktory mohou být propustnost podloží, jeho geologická stavba, půdní charakteristiky, krajinný pokryv, sklonové poměry či hustota říční sítě.

4.8 Odhad parametrů korytového modelu

K odhadům parametrů korytového modelu byla zvolena funkce *Muskingum-Cunge*. Tato metoda se v modelu vztahuje pro úseky toku, které spojují jednotlivá subpovodí (*Reach*). HEC-HMS vyžaduje informace o délce úseku a jeho sklonu v m/m, Manningovy součinitele drsnosti pro levý i pravý břeh včetně koryta, tvar příčného profilu a jeho přesné vymezení. Celkem bylo hodnoceno 21 úseků na Rolavě i jejích přítocích. Délka úseku byla vypočtena v ArcGIS základními statistickými funkcemi z hodnot v atributové tabulce a

sklon úseku z DMT jako podíl vertikální a horizontální vzdálenosti počátečního a koncového bodu úseku.

Tvar příčného profilu byl vybrán z nabídky v HEC-HMS jako *Eight Point* (obr. 4.8). Kromě osmibodového schématu koryta nabízí model ještě tvar obdélníkový, lichoběžníkový a trojúhelníkový. Osmibodový tvar nejlépe vystihuje přírodní konfiguraci koryta v terénu. Ostatní nabídky jsou vhodné spíše pro antropogenně upravené úseky toků bez inundace. Zaměření tvaru koryta v terénu bylo prováděno laserovým sklonoměrem Laser Ace. Počáteční místo měření bylo stanoveno jako krajní bod inundace (bod 1 nebo bod 8) s nulovými souřadnicemi. Z tohoto bodu byly postupně zaměřovány body směrem přes koryto k protilehlému bodu druhé inundace. Naměřené hodnoty bodů vždy vyjadřovaly vzdálenost a rozdíl v nadmořské výšce v metrech od počátečního bodu. Výsledný osmibodový tvar příčného profilu byl vykreslen v MS Excel a zanesen do HEC-HMS. Pro každý příčný profil byl vytvořen tzv. *Cross Section* v *Paired Data Manager* v HEC-HMS. Každý *Cross Section* obsahoval tabulku s údaji o tvaru příčného koryta včetně grafu. Následně musel být říčný profil správně přiřazen úseku toku (*Reach*).

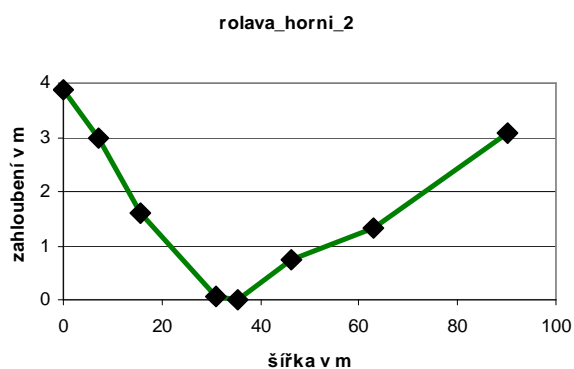


Obrázek 4.8: Schéma osmibodového tvaru koryta (upraveno dle Feldman, 2000)

Hodnoty Manningových součinitelů drsnosti n byly přidělovány přímo v terénu podle tabulky hodnot n podle Justa et al. (2005). Manuál programu HEC-HMS nabízí taktéž tabulku součinitelů drsností podle Manninga, často však popisky kategorií nebylo jednoduché přizpůsobit podmínkám na Rolavě a nebylo zcela jasné, kam která koryta přiřadit. Just et al. (2005) přehledně popisuje i s použitím vizualizací konkrétní příklady koryta a jejich drsnosti v podmínkách České republiky.

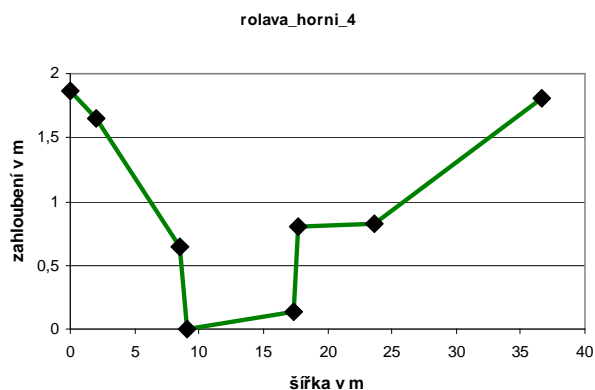
V horní části povodí byla drsnost koryta hodnocena nižšími čísly, zpravidla 0,030 – 0,045, neboť se jednalo o koryta s písčitém až stěrkopískovým dnem. Ve vrcholových lokalitách náhorní plošiny protéká Rolava i Slatinný potok pastvinami bez křovin, tudíž se součinitelé drsnosti měnily 0,030 – 0,050 v závislosti na vzrostlé trávě, která drsnost zvyšuje. Od profilu Chaloupky teče Rolava zalesněným územím s poměrně strmými svahy, součinitel drsnosti byl proto navýšen na 0,080 – 0,100 pro koryto a 0,060 - 0,110 pro inundaci levého i pravého břehu. Drsnost koryta se měnila s přibývajícemi balvany v korytě až k obci Nová Role. V úseku mezi Novou a Starou Rolí má koryto Rolavy pravidelný tvar a drsnost byla vyčíslena okolo 0,070. Větší variabilitu součinitele drsnosti v celém hodnoceném území vykazovaly obě inundace. Převažujícími povrchy byly pastviny v pramenné oblasti, lesy od Chaloupek po Nejdek a rozptýlené křoviny ve střední a dolní části povodí. Lesy směrem po toku ztrácely na hustotě a postupně přecházely v nižších polohách na příležitostné galeriové porosty. Na Nejdeckém potoce převažovaly řídké křoviny se stromy či hustým podrostem, jejichž součinitelé drsnosti se pohybovaly v rozmezí 0,045 – 0,070. V úseku mezi Novou a Starou Rolí byla znatelná travnatá niva s občasnými stromy nebo křovinami, zde byly součinitelé drsnosti hodnoceny nízkými čísly 0,040. Hodnocení drsnosti vychází čistě ze subjektivního dojmu, proto je žádoucí, aby parametry drsnosti byly podrobeny optimalizaci.

Obrázek 4.9 ilustruje charakter pramenné oblasti Rolavy, kde je koryto nepatrně zahloubené a stanovení okrajů inundací je poměrně složité, neboť jsou široce rozprostřeny. Manningův součinitel drsnosti byl stanoven pro koryto 0,033 a pro okolní zóny 0,035.



Obrázek 4.9: Rolava v pramenné oblasti (foto) a příslušný příčný (graf) (Autor, terénní měření)

Příčný profil koryta pod Chaloupkami (obr. 4.10) v lese představuje výraznější zahloubení a strmý průběh levého břehu. Koryto je vyplněné kameny, proto byl Manningův součinitel drsnosti hodnocen číslem 0,100, okolní inundace byly ohodnoceny rovněž 0,100.



Obrázek 4.10: Rolava pod profilem Chaloupek (foto) a příslušný příčný profil (graf) (Autor, terénní měření)

4.9 Časové řady

Výsledky všech srážko-odtokových modelů jsou limitovány vstupními daty, jejich kvalitou, reprezentativností a aktuálností. Během měření u srážkoměrů dochází ke ztrátám, naměřená množství srážek jsou často menší než skutečně spadlá (Lett, Daňhelka, 2002).

Do hydrologických modelů vstupují údaje o srážkových úhrnech z pozemních stanic ČHMÚ, POH a DWD. Údaj získaný ze srážkoměru reprezentuje jen bod v krajině, proto převedení hodnot z bodů na plochu nemůže být nikdy dokonale přesné. Snahou hydrologického modelování je co nejdokonalejší vystižení odezvy odtoku vody v krajině na srážkovou epizodu. Volba vhodné plošné interpolace srážek může výsledek modelování do určité míry zpřesnit.

Hledání nejkvalitnější metody plošné interpolace srážek nebylo předmětem práce. Této problematice se věnovala např. Janková (2008). Bylo zapotřebí najít takovou metodu MAP, která dobře vystihne charakter povodí. Důležitým aspektem bylo i nalezení způsobu rozdělení hodinových srážkových úhrnů během dne efektivní metodou pro každé dílčí povodí. Podle doporučení RNDr. Jana Daňhelky, Ph.D z ČHMÚ, který se problematikou stanovení vhodné MAP jako vstupů do hydrologických modelů dlouhodobě zabývá, byla vybrána metoda IDW s váhou $\beta = 3$.

Základním předpokladem metody IDW (*Inverse Distance Weighted*) je, že srážky stanic jsou váženy převrácením jejich vzdálenosti od interpolovaného bodu. Vzdálenost každé stanice od interpolovaného bodu musí být známá, protože se s ní dále operuje ve výpočtu. Metoda upřednostňuje bližší stanice přes stanicemi vzdálenějšími, což představuje její důležitou výhodu. Díky převrácení vzdálenosti získávají bližší naměřené hodnoty větší význam, což v praxi může potenciálně lépe zohlednit orografii. Tento vliv se dá ještě prohloubit zadáním mocniny β . Čím bude toto číslo větší, tím budou mít bližší stanice větší váhu. Doporučená hodnota 3 lépe vystihuje orografické zesílení z Německa a zdůrazňuje návětrí, což má vliv na prostorové rozložení srážkových úhrnů na povodí.

4.9.1 Postup tvorby hodinových časových řad

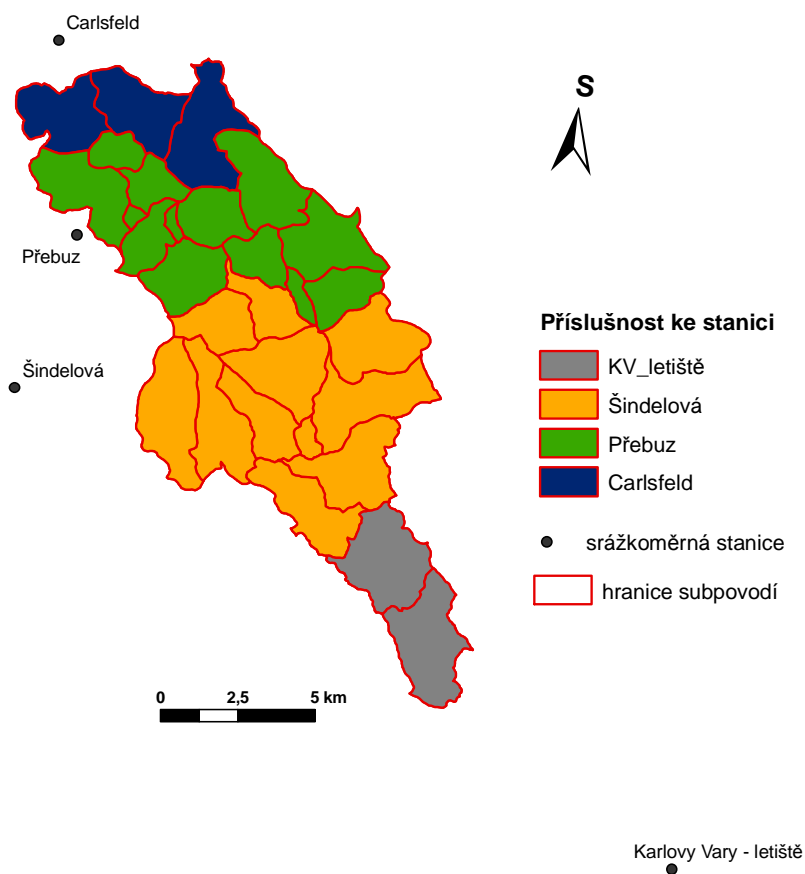
Zpracovávány byly dvě srážkové epizody - od 7:00 24. 9. 2007 do 7:00 1. 10. 2007 jako kalibrační událost a od 7:00 4. 8. 2006 do 7:00 10. 8. 2006 jako verifikační událost. Rozmezí obou událostí bylo vybíráno podle několika hledisek. Nejprve byly nalezeny takové události na Rolavě, kde došlo k výraznějšímu vzestupu vodní hladiny. Výběr byl limitován dostupností hodinových dat, která jsou ve Staré Roli kontinuálně k dispozici od roku 2006. Událost byla ohraničena začátkem deště a poklesovým trendem na hydrogramu blízcímu se dlouhodobému průměru. Rovněž údaje o hodinových srážkových úhrnech byly limitujícími faktory u mnoha meteorologických stanic v povodí. Průnikem všech nutných požadavků byly zmíněné epizody v srpnu 2006 a září 2007. Obě epizody jsou si z meteorologického hlediska navíc velmi podobné. Vznikly srovnatelným zapříčiněním a obě trvaly týden.

Do modelu se zadávají hodinové časové řady, které musí korespondovat s hodinovými řadami průtoků obou událostí. Model HEC-HMS vyžaduje zadání srážkové epizody v hodinových krocích pro každé subpovodí zvlášť tak, aby simulace srážko-odtokového vztahu byla co nejpřesnější a zohlednila lokální rozdíly.

Nejdříve byl zjištěn plošný denní srážkový úhrn pro každý den události pomocí metody IDW s váhou 3 pro každé dílčí povodí. Vycházelo se z denních srážkových úhrnů spočítaných od 7 h do 7 h ze stanic Přebuz a Citice (POH), Carlsfeld a Fichtelberg (DWD), Klínovec, Šindelová, Karlovy Vary-letišť, Abertamy a Nejdeč (ČHMÚ). Hodinové kroky srážkových úhrnů byly k dispozici pouze ze stanic Carlsfeld, Fichtelberg, Přebuz, Citice, Šindelová a Karlovy Vary - letiště. Z hodinových kroků byl vytvořen hyetogram od 7 h do 7 h pro každý den u každé stanice.

Následně bylo potřeba rozdělit denní srážkové úhrny do hyetogramů pro každé dílčí povodí zvlášť, čímž vznikla řada hodinových srážkových úhrnů za celou epizodu, které odpovídaly hodinové řadě průtoků ve Staré Roli. Pro stanice, které disponovaly hodinovými úhrny se v MS Excel vykreslily pro každý den od 7 h do 7 h hyetogramy hodinových srážkových úhrnů. Z denních úhrnů a známých hodinových úhrnů byl pak zjištěn podíl každé hodiny na celkovém denním úhrnu. Tento postup byl proveden pro všechny stanice a všechny dny epizod.

Z metody IDW byl zjištěn denní úhrn srážek pro každé subpovodí. Rozdělení denních úhrnů v subpovodí bylo provedeno podle nejbližší stanice (obr. 4.11), která disponovala hodinovým rozložením srážkových úhrnů během dne. Hyetogram byl vytvořen na základě známých podílů jednotlivých úhrnů na celkovém denním úhrnu srážek ze stanice, kde byl známý hyetogram. V praxi šlo o zachování hodinového rozdělení v subpovodí podle známého hodinového rozdělení nejbližší stanice, celkové úhrny se však lišily podle výsledků interpolace.



Obrázek 4.11: Příslušnost subpovodí ke srážkoměrné stanici (DIBAVOD, ČHMÚ, DWD, POH)

Nejbližšími stanicemi povodí Rolavy byla Přebuz, Šindelová, Carlsfeld a Karlovy Vary – letiště. Ačkoli u Citice i Fichtelbergu byly známé denní hyetogramy, jejich vzdálenost od povodí již byla větší. Navíc Citice vykazovaly srovnatelná hodinová rozložení srážkových úhrnů ve dnech epizod jako Karlovy Vary – letiště, stejná situace platila pro srovnání Carlsfeld a Fichtelberg. Pokud byla vzdálenost od dvou stanic podobná, vycházelo se z podobnosti denních srážkových úhrnů okolních subpovodí a jejich příslušnosti ke stanici. Hyetogramy těchto stanic posloužily k výpočtu hodinových intervalů srážek na jednotlivých subpovodí.

Podle výše uvedeného postupu byly řady srážkových úhrnů v hodinovém kroku pro každé dílčí povodí zpracovány v MS Excel. V modelu HEC-HMS v *Time-Series Data Manageru* bylo vytvořeno 29 samostatných řad hodinových úhrnů srážek po celou dobu trvání epizody. V *Meteorologic Model Manager* byla každému dílčímu povodí přiřazena správná řada srážkových úhrnů.

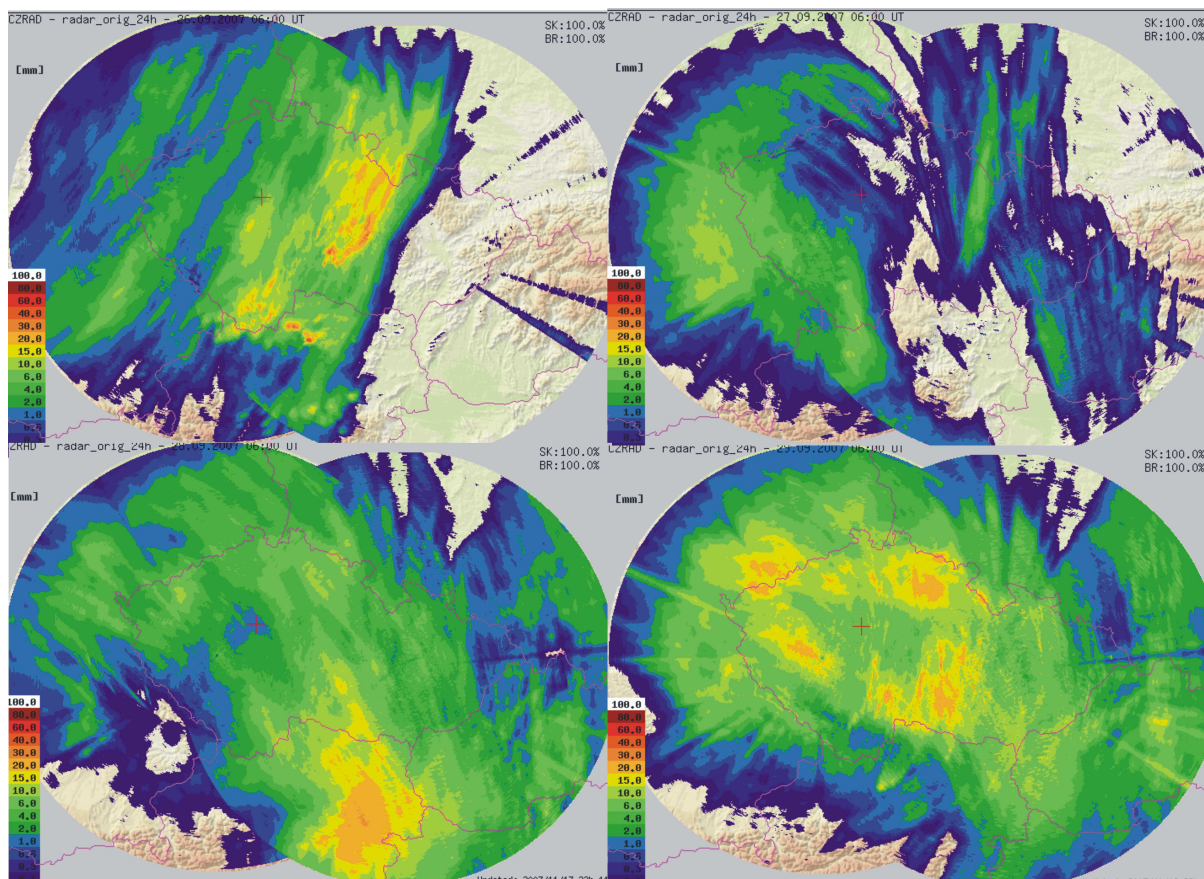
4.9.2 Kalibrační událost

Kalibrační a verifikační události se podobaly jednak příchodem srážkového jádra od jihu a délkou trvání celé epizody. Obě události představují letní typ povodně.

Kalibrační událostí se rozumí taková událost, na které jsou optimalizovány některé parametry tak, aby došlo k co nejpřesnějšímu vyobrazení skutečného srážko-odtokového vztahu. Zvoleno bylo časové rozmezí 24. 9. 2007 až 1.10. 2007.

Z meteorologického hlediska šlo o postup tlakové níže směrem od jihu, což zapříčinilo zvýšené srážkové úhrny. V pondělí 24.9. převažoval teplý vzduch, jeho příliv však od jihu ukončila během úterý studená fronta, která postoupila ze západní do střední Evropy. Na ní se vytvořila v oblasti Alp tlaková níže, která postupovala velmi zvolna z Alp přes naše území dále k severozápadu. Během sobotního odpoledne se začal do střední Evropy rozšiřovat výběžek tlakové výše od severovýchodu a srážky ustávaly (obr. 4.12). Podle ČHMÚ (2007) byl na Bílině a Ohři v noci z pátku na sobotu zaznamenán 1. SPA.

Na základě dostupných dat od POH, DWD a ČHMÚ byly zjištěny denní úhrny srážek pro nejbližší stanice povodí Rolavy. V tabulce 4.2 jsou šedě vyznačeny stanice, které disponovaly hodinovými kroky srážkových úhrnů.



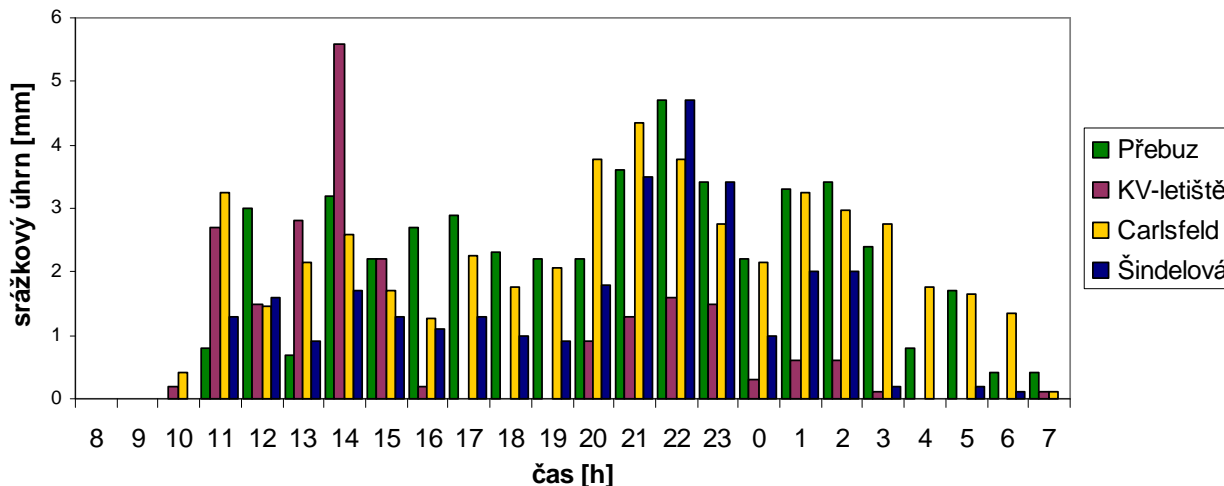
Obrázek 4.12: Srážkové úhrny podle radarových snímků 26.-29.9.2007 (horní obr.: 26., 27., spodní obr.: 28., 29., řazeno vždy zleva) (ČHMÚ, 2007b)

Nejvíce srážek spadlo během sledované epizody na Fichtelbergu, Carlsfeldu a Přebuzi, což potvrzuje předpoklad závislosti nadmořské výšky na výši srážkových úhrnů. Překvapivý byl nízký úhrn srážek v Šindelové, která obvykle vykazuje srovnatelné hodnoty s Přebuzí. Nejdeštivějším dnem byl 28. 9. 2007.

Tabulka 4.2: Denní srážkové úhrny v mm 24.-30.9.2007 podle stanic (POH, DWD, ČHMÚ)

stanice	srážkový úhrn [mm]							celkem
	24.9	25.9	26.9	27.9	28.9	29.9	30.9	
Cítice	0,3	2,1	9,9	11,3	22,1	0,2	0,0	45,9
Přebuz	0,4	6,5	4,8	18,5	48,5	2,6	0,0	81,3
Karlovy Vary - letiště	0,0	5,2	5,5	17,2	22,2	0,0	0,0	50,1
Šindelová	0,2	3,2	4,7	11,3	30,0	0,1	0,0	49,5
Fichtelberg	0,0	4,9	4,0	39,5	34,7	2,1	0,0	85,2
Carlsfeld	0,9	5,3	6,0	25,2	49,6	1,8	0,0	88,8
Abertamy	0,0	3,8	5,7	13,6	53,9	4,0	0,0	81,0
Nejdek	0,0	2,8	4,1	18,9	41,0	1,0	0,0	67,8
Klínovec	0,0	3,7	2,9	45,8	35,9	4,0	0,0	92,3

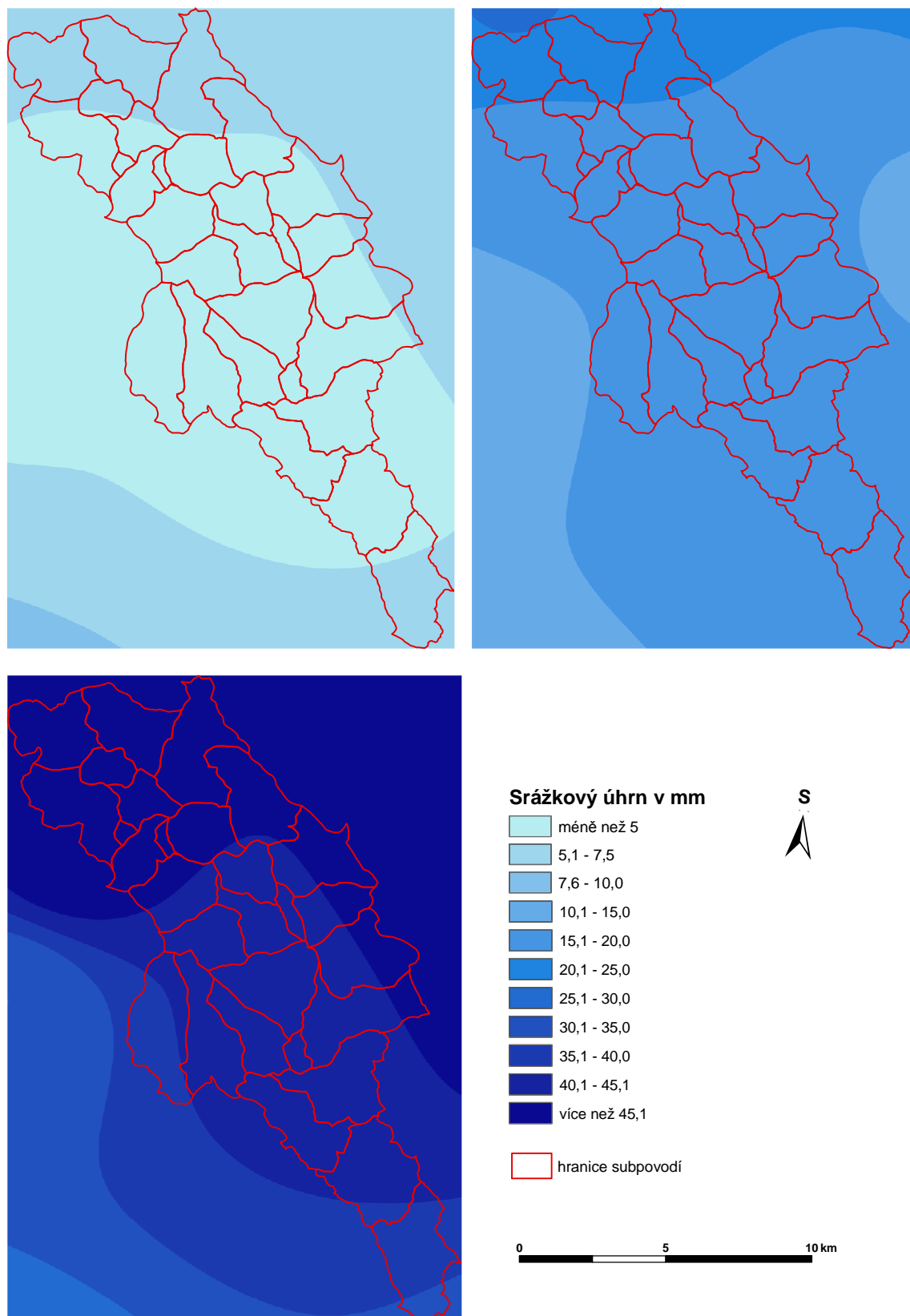
Hyetogramy nejbližších stanic (obr. 4.13) Přebuze, Carlsfeldu, Šindelové a Karlových Varů – letiště vykazovaly mírné rozdíly v denním rozložení srážkových úhrnů pro 28. 9. 2007. U Přebuze, Šindelové a Carlsfeldu byl pozorován srovnatelný průběh. Nejvíce srážek spadlo ve večerních a nočních hodinách.



Obrázek 4.13: Hodinové rozložení srážkových úhrnů 28. 9. 2006 ve čtyřech stanicích (ČHMÚ, DWD, POH)

Postupně byly v ArcGIS 9.2 pomocí funkce IDW v *Geostatistical Analyst*, resp. *Geostatistical Wizard* zjištěny denní srážkové úhrny pro každý den epizody. Údaje o denních úhrnech byly vypočteny pomocí funkce *Zonal Statistics* v *Spatial Analyst*. Postup srážkového jádra během kalibrační události ilustruje obrázek 4.14.

Pro každé subpovodí bylo následně zapotřebí vytvořit řadu hodinových srážkových úhrnů pro celou událost. Vycházelo se z hodinového rozložení nejbližších stanic. Nebylo hodnoceno všech 29 subpovodí zvlášť, ale subpovodí byla sdružena do několika oblastí. Tímto způsobem vzniklo osm rozdílných řad srážkových úhrnů. Datové řady byly umístěny do *Time-Series Data* v modelu HEC-HMS. Každému z 29 subpovodí byla přiřazena právě jedna odpovídající řada.

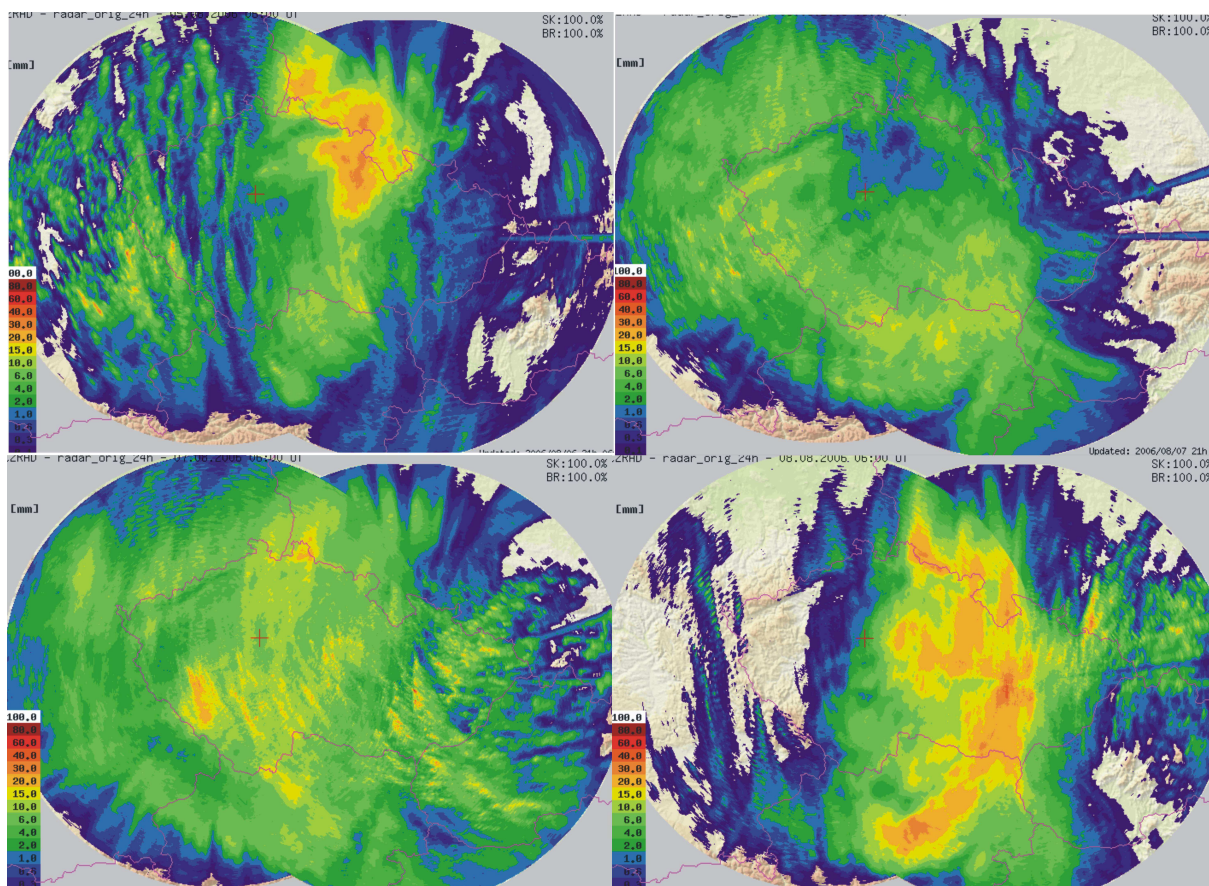


Obrázek 4.14: Plošné rozložení srážek na povodí 26.-28.9.2007 (zleva horní obr. 26. a 27., spodní obr. 28.9.) (DIVAVOD, ČHMÚ, DWD, POH)

4.9.3 Verifikační událost

Verifikační událostí je myšlena událost, na které se ověřuje správnost kalibrace. Z kalibračního procesu jsou převzaty pro stejné povodí nové optimalizované parametry a spuštěna simulace srážko-odtokového vztahu pro jinou srážkovou událost. V ideálním případě by mělo dojít ke shodě. Model pak lze prohlásit za připravený pro simulaci podobných letních srážkových epizod na daném území. Pro tyto účely byl zvolen časový interval 4. 8. 2006 až 10. 8. 2006.

Meteorologická situace, která způsobila příliv vyšších srážkových úhrnů, probíhala podobným způsobem jako událost kalibrační. Před začátkem události začala postupovat z jižní Evropy přes střední nad Polsko tlaková níže spojená s frontálním systémem. V tomto období se nad střední Evropou udržovala také výšková tlaková níže. V týlu tlakové níže nad východní Evropou k nám proudil chladný a vlhký vzduch od severu až severozápadu. Nejvyšší srážkové úhrny zasáhly Krušné hory 4.- 7. 8. 2006 (ČHMÚ, 2006a).



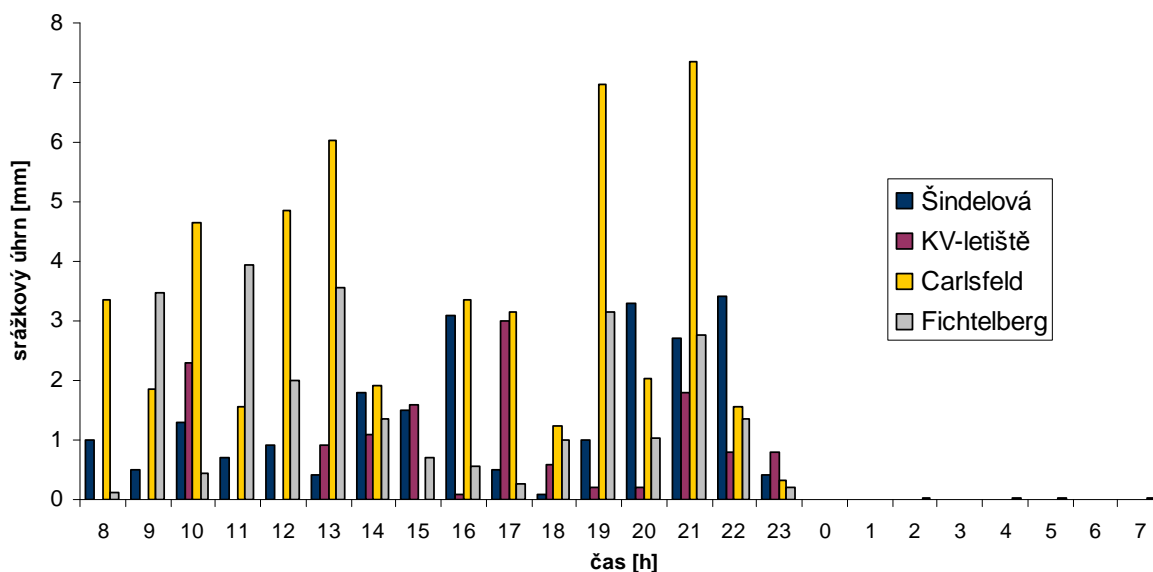
Obrázek 4.15: Srážkové úhrny podle radarových snímků 5.- 8.8..2006 (horní obr.: 5., 6., spodní obr.: 7., 8., řazeno vždy zleva) (ČHMÚ, 2006b)

Srážkově nejbohatšími dny z celé epizody byly 5. 8. a 6. 8. 2006 (tab. 4.3). Nejvyšší srážkový úhrn vykazovala po celou událost stanice Carlsfeld. Zde se projevil výrazný návětrný efekt, jelikož do ČR proudil vlhký vzduch od severu až severozápadu. Zajímavé je, že stejná situace nebyla pozorována u Fichtelbergu. Zajímavý je shodný srážkový úhrn za celou epizodu u Přebuze a Citice, což jsou stanice od sebe poměrně vzdálené a lišící se výrazně nadmořskou výškou.

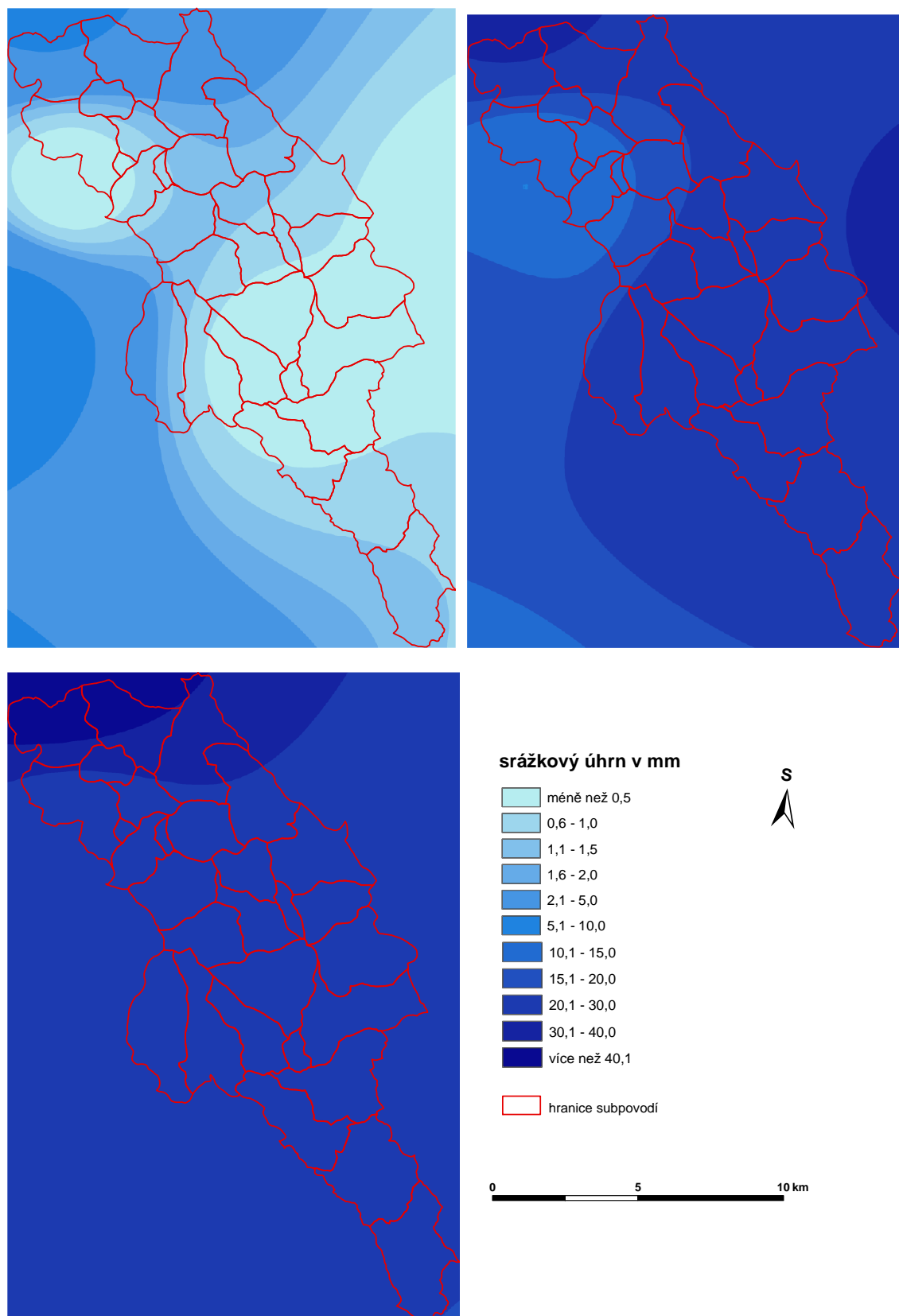
Tabulka 4.3: Denní srážkové úhrny v mm 4. - 9. 8. 2006 na jednotlivých stanicích (POH, DWD, ČHMÚ)

stanice	srážkový úhrn [mm]						celkem
	4.8	5.8	6.8	7.8	8.8	9.8	
Citice	5,9	8,8	22,2	0,2	0,2	0,1	37,4
Přebuz	0,1	10,0	24,8	2,0	0,5	0,0	37,4
Karlovy Vary - letiště	0,0	15,9	13,4	0,0	0,2	0,0	29,5
Šindelová	6,4	18,6	22,6	0,0	0,0	0,2	47,8
Fichtelberg	0,3	31,2	26,0	0,1	1,4	0,0	59,0
Carlsfeld	5,5	33,0	50,2	0,0	2,6	0,0	91,3
Abertamy	0,0	31,5	24,0	0,0	0,0	0,0	55,5
Nejdek	0,2	26,1	24,3	0,0	0,0	0,1	50,7
Klínovec	0,3	26,9	21,6	0,0	0,3	0,0	49,1

. Hyetogramy u nejbližších stanic vykazovaly stejně jako u kalibrační události mírné výkyvy v hodinovém rozložení během dne (7 h – 7 h) (obr. 4.16). Tato skutečnost vyplývá z různé konfigurace terénu a průběhu meteorologické události. Největší rozkolísanost nejdeštivějšího dne (6. 8.) ilustruje Carlsfeld, poměrně rovnoměrné rozložení srážek je u stejného dne na Šindelové.



Obrázek 4.16: Hodinové rozložení srážkových úhrnů 6.8.2006 ve čtyřech stanicích (ČHMÚ, DWD)



Obrázek 4.17: Plošné rozložení srážek na povodí 4.-6.8.2006 (zleva horní obr. 4. a 5., spodní obr. 6.8.) (DIVAVOD, ČHMÚ, DWD, POH)

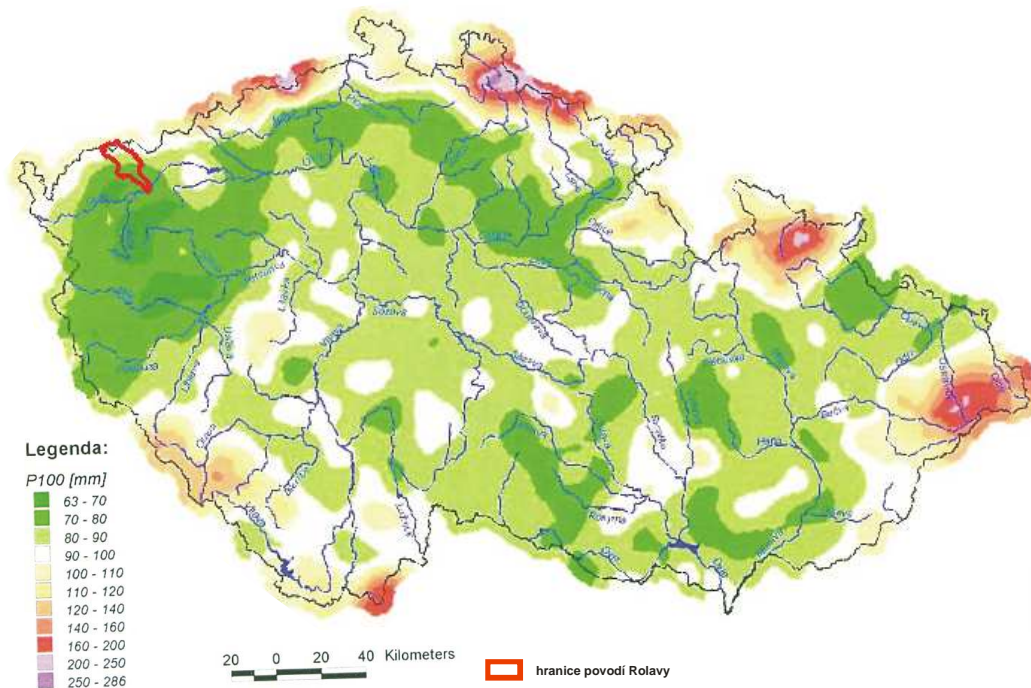
Počáteční vývoj srážkové epizody znázorňuje obrázek 4.17, kde je patrné zvýšení intenzity srážkových úhrnů během prvních tří dnů epizody (4. - 6. 8. 2006). Tímto způsobem byly vytvořeny mapy i pro zbývající dny zvolené epizody a pomocí zonální statistiky byly zjištěny denní úhrny srážek pro jednotlivá subpovodí. Podle nejbližší stanice proběhlo rozdělení denních úhrnů po hodinách a následně byly tyto údaje implementovány do modelu HEC-HMS jako řady dat pro verifikaci modelu, na jejímž základě byla zhodnocena úspěšnost kalibrace.

4.9.4 N-leté denní srážkové úhrny

Klíčovou součástí předkládané práce jsou variantní simulace chování povodí s nádržemi za určitého úhrnu srážek s dobou opakování. Cílem je zjištění, při jakých srážkových úhrnech má systém nádrží kladný vliv a zda vůbec nějaký vliv představuje. Hodnoty N-letých denních srážkových úhrnů byly dodány ČHMÚ, bohužel však jen pro okolní tři stanice: Karlovy Vary – lázně, Měděnec a Nejdeč. Ostatní blízké stanice mají krátké pozorovací řady na stanovení N-letých denních úhrnů srážek.

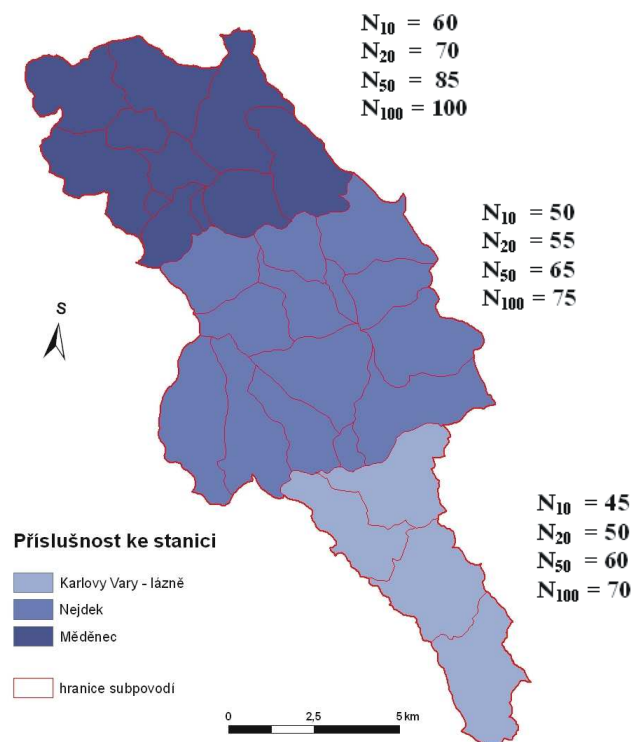
Pouze tři hodnoty neumožňují zjistit plošný úhrn srážek na celé povodí Rolavy, jelikož chybí hodnoty ze stanic v severní a západní části. Metoda IDW proto není pro celé povodí použitelná. Z důvodů nedostatečné datové základny bylo přistoupeno ke generalizaci hodnot. Podle dostupné literatury např. Kulasová et al. (2004), která se zabývá stanovením N-letých srážkových úhrnů pro podmínky České republiky, došlo ke zjištění, že lokální rozdíly ve stejných N-letých denních úhrnech srážek na území velikosti jako je povodí Rolavy nejsou výrazné. Kulasová et al. (2004) se zabývala stanovením 100-letého denního úhrnu srážek pro celou Českou republiku. Studie je velmi podrobně propracována, naráží však též na nekompletnost datové základny u stanic ČR.

Hledání N-letých hodnot pro jednotlivá subpovodí Rolavy vycházelo z rozložení 100-letého denního srážkového úhrnu podle Kulasové et al. (2004). Z obrázku 4.18 je patrné, jakým způsobem je 100-letý denní srážkový úhrn na území Rolavy rozložen. U ostatních N-letých hodnot se vycházelo ze stejného rozdělení. Tímto způsobem nemohlo dojít k velkému pochybení, neboť potenciální skutečné hodnoty by nebyly v jednotlivých místech na povodí příliš vzdáleny od hodnot Nejděku, Karlových Varů a Měděnce. Tyto tři stanice v podstatě reprezentují tři oblasti na povodí, jaké ilustruje i obrázek 4.18. Nejvyšší partie povodí bílé barvy nabývají podle obrázku intervalu, do kterého spadají i hodnoty Měděnce. Okolí Nejděku tvoří na obrázku oblast světle zelené barvy a zbývající oblast povodí spadá do intervalu hodnot, kde se nachází i stanice Karlovy Vary - lázně.



Obrázek 4.18: 100-letá 1-denní srážka z období 1895 - 2002 (Kulasová et. al, 2004, upraveno)

Číselné vyjádření konkrétních hodnot $N = 10, 20, 50$ a 100 a spádovost jednotlivých subpovodí k jedné ze tří meteorologických stanic vyjadřuje následující obrázek 4.19.



Obrázek 4.19: Schéma příslušnosti subpovodí k meteorologické stanicí (ČHMÚ, DIBAVOD)

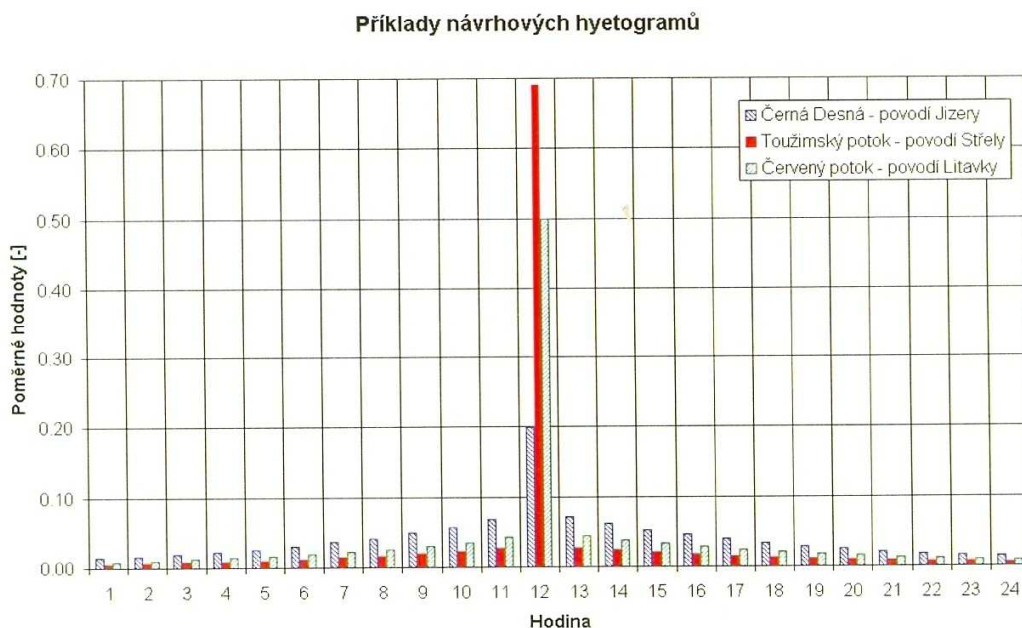
Zajímavé je, jak se s rostoucí extremitou N zmenšují rozdíly mezi Nejdkem a Karlovými Vary. V západních Čechách převažují regionální deště delšího trvání často orograficky zesílené. Nevyskytují se zde časté extrémní přívalové deště lokálního charakteru, proto jsou rozdíly při vyšších hodnotách N nižší oproti nížinným oblastem. Vrcholové partie vykazují zřetelně vyšší N-leté denní srážkové úhrny, což však odpovídá i normálnímu režimu srážek během roku, kdy dochází k výraznému orografickému zesílení.

Rozložení srážkových úhrnů do denního hyetogramu po hodinách proběhlo na jiném principu než u kalibrační a verifikační události. Jelikož se jedná o teoreticky vypočtený srážkový úhrn, je potřeba vycházet i teoreticky stanoveného rozložení N-letého denního úhrnu. Není známo žádné hodinové rozložení takových N-letých hodnot pro danou oblast. Zpracování návrhových hyetogramů bylo v České republice věnováno dosti pozornosti. Opět je na místě zmínit Kulasovou et al. (2004) z ČHMÚ nebo Řezáčovou (1999) z Ústavu fyziky atmosféry (ÚFA). Konstrukce zatěžovacího hyetogramu je obtížný metodický problém. Klíčové je zejména určení délky trvání a hodinových intenzit rozhodující extrémní fáze hyetogramu, která má největší vliv na formování povodně a velikost kulminačního průtoku. Podle Kulasové et al. (2004) lze předpokládat, že v horských oblastech s převahou orograficky zesílených srážek bude doba trvání návrhového deště delší a rozložení srážek méně extrémní než v nížinách, kde převažují přívalové srážky s kratším trváním.

Nejčastěji jsou v řešených projektech v ČR používány tři typy hyetogramů. První typ byl odvozen ČHMÚ založený na zpracování 100-letých hodinových srážkových úhrnů vyhodnocených Truplem. Byl odvozen poměr 100-letých hodinových srážkových úhrnů ku jednodenním. Na základě těchto poměrů byla určena maximální pořadnice hyetogramu (Kulasová et al., 2004). Druhý typ byl odvozen ÚFA AV ČR. Na základě hodnot denních 100-letých srážkových úhrnů bylo území ČR rozděleno do čtyř rozdílných oblastí s vazbou na orografii. Hyetogram je rozdělen do osmi hodin. Třetí typ představuje tzv. „0“ variantu a předpokládá konstantní rozdělení intenzit dešťových oddílů během celého deště (Vološ, 2007).

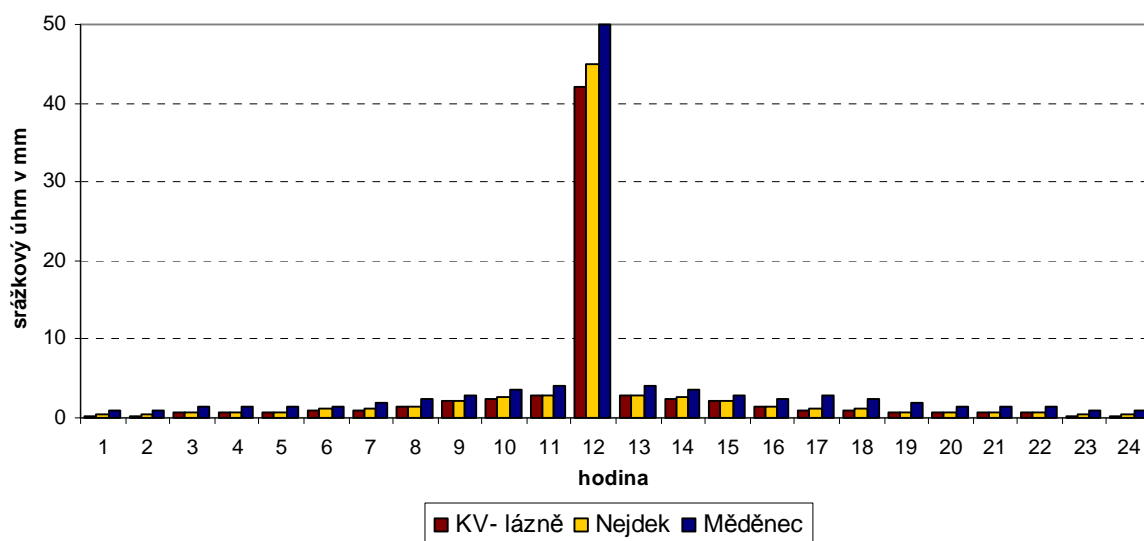
Obrázek 4.20 znázorňuje poměrové rozložení srážkových úhrnů podle ČHMÚ ve třech rozdílných klimatických oblastech. N-leté extrémní denní srážkové úhrny na Červeném potoce v povodí Litavky (viz obrázek 4.18) a vrcholové partie povodí Rolavy patří do stejného intervalu. Rozdělení N-letých denních úhrnů srážek subpovodí spadající ke stanici Měděnec do hyetogramu bylo provedeno podle rozdělení pro Červený potok. Zbývající subpovodí byla rozdělena do návrhového hyetogramu podle Toužimského

potoka, jelikož má srovnatelné N-leté úhrny srážek (Kulasová et al., 2004). Výsledný návrhový hyetogram pro 100-letý denní srážkový úhrn podle stanic zobrazuje obrázek 4.21.



Obrázek 4.20: Příklady návrhových hyetogramů pro povodí v různých klimatických podmínkách (Kulasová et al., 2004)

Stejným způsobem jako u kalibrační a verifikační události byly vytvořeny hodinové řady tentokrát s trváním 24 hodin pro všechna subpovodí a byly vloženy do modelu HEC-HMS v *Time-series Manager*. Pro každou N-letost byl vytvořen samostatný meteorologický model.



Obrázek 4.21: Návrhové rozložení 100-letého denního srážkového úhrnu (ČHMÚ)

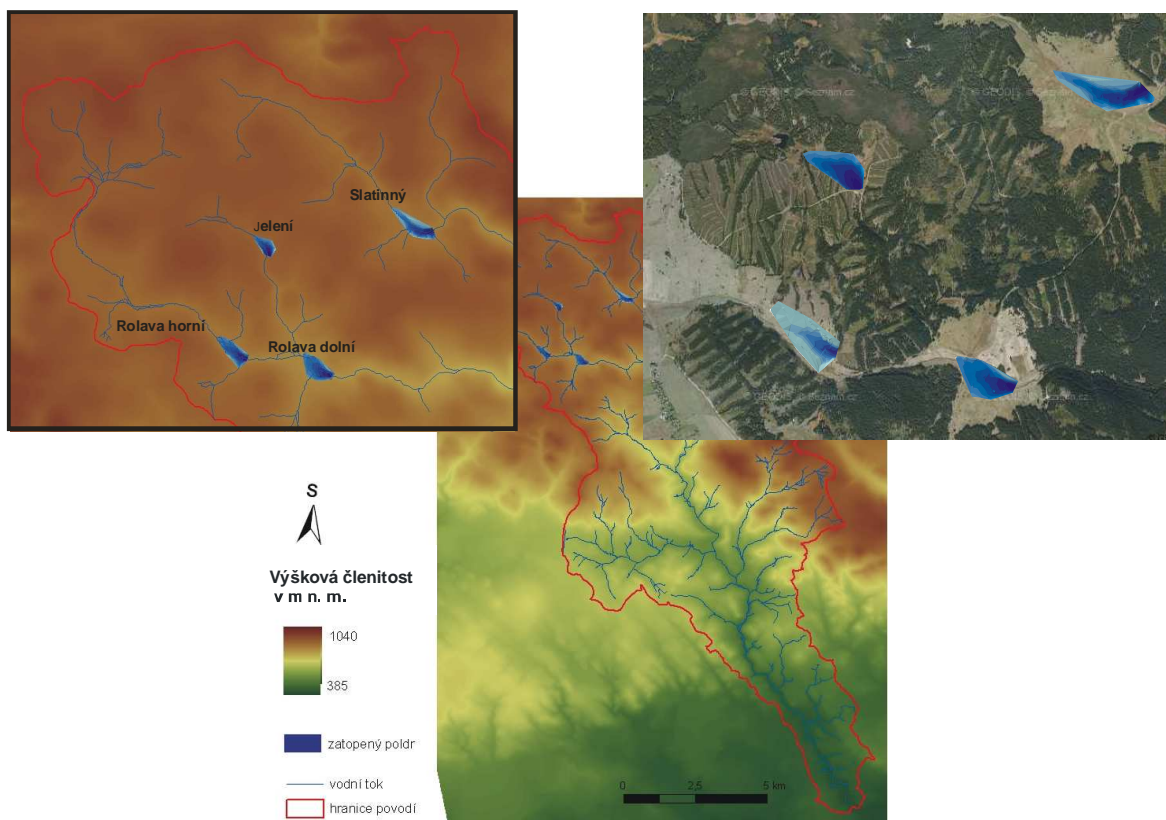
4.10 Charakteristiky nádrží

Charakteristiky nádrží, které byly implementovány do modelu bylo potřeba změřit v terénu. Základní prací byla analýza DMT, ze kterého byly vytipovány čtyři lokality, kde by mohly být nádrže umístěny. Hlavním kritériem lokalizace poldru byl plošší terén bez zástavby. Této podmínce odpovídalo území jen v pramenné oblasti Rolavy a Slatinného potoka. V horních částech povodí v horských oblastech má navíc systém protipovodňové ochrany formou retenčních nádrží značný význam. V Krušných horách toto platí obzvláště vzhledem k rozdílné distribuci srážkových úhrnů v zarovnaných partiích vyšších poloh oproti nížinnému reliéfu.

Důležitou podmínkou zarovnanějšího terénu byla i existence sevření okolními svahy. Tak, aby mohl být uvažován průtočný poldr. Je potřeba uzavřít hráz mezi svahy, a tím dojde k vytvoření potenciální plochy zatopení ohraničené hrází a terénem. Klíčové je dále nalézt takové místo, kde by bylo možné uvažovat hráz o 5 – 8 m. V jiném případě by objem poldru nenabýval vysokých hodnot a na příkladu povodí Rolavy by se transformace povodňové vlny v systému nádrží projevila minimálně.

Zmíněným požadavkům odpovídaly čtyři lokality (obr. 4.22). Dvě nádrže byly uvažovány na Rolavě, jedna na Jelením potoce a poslední na Slatinném potoce. Rolavské nádrže (Rolava_horní a Rolava_dolní) byly vyměřeny nedaleko profilu Chaloupky před vtokem Rolavy do zalesněného a strmějšího terénu. Nádrž na Jelením potoce se nachází v pramenné louce potoka v blízkosti NPR Velkého močálu a Rolavského rybníka. Poldr na Slatinném potoce bylo možné kvůli rozptýlené zástavbě v osadě Jelení zasadit pouze před začátek lesa, kde Slatinný potok vtéká do sevřeného zalesněného údolí a kopíruje jedinou místní silniční komunikaci.

Na každém stanovišti byla naměřena síť bodů s vlastními souřadnicemi. Měření se provádělo totální geodetickou stanicí Leica TCRP 1202 za odborné asistence RNDr. Julia Česáka. Data z totální stanice ve formě bodů byla převedena do bodového *shapefile*. Z každé sítě bodů byl následně vymodelován DMT poldru. Každá síť obsahovala cca 190 bodů. Vizualizace DMT v ArcGIS nebyla vždy dokonalá, proto muselo dojít k několika korekcím a zahlazení. Pomocí funkce *Area and Volume* v *3D Analyst* byl odečten objem nádrže podle jednotlivých hladin nadmořských výšek a sestavena batymetrická křivka nádrže. Celkový objem a další přibližné kvantitativní charakteristiky zjištěné z DMT vyjadřuje tabulka 4.4.



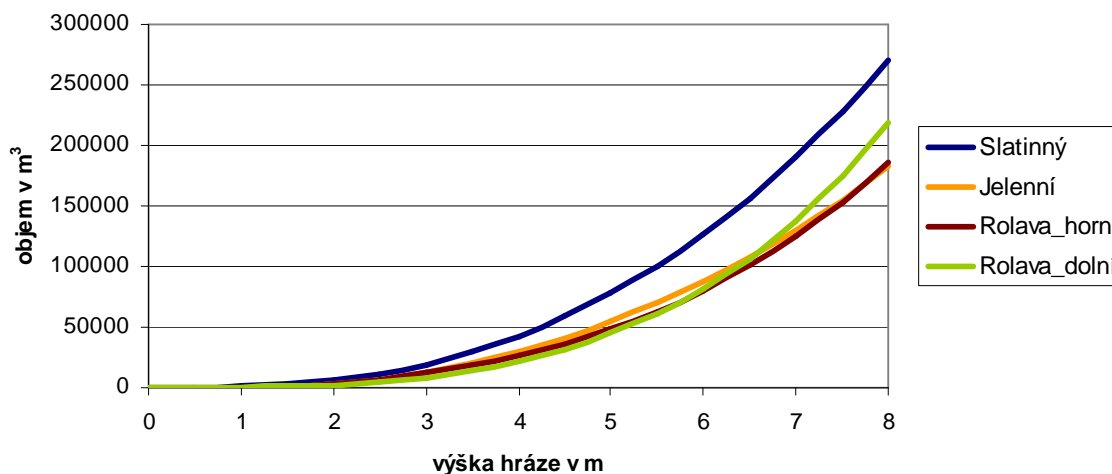
Obrázek 4.22: Lokalizace čtyř potenciálních poldrů (DIBAVOD, zpracování naměřených dat v terénu, <http://www.mapy.cz>, 6.8.2009)

Každá nádrž odvodňovala jinak veliké území, což se samozřejmě promítlo na výsledných simulacích. Do Rolavy_horní přitékala voda z 11,1 km², do Rolavy_dolní z 18,3 km², do nádrže na Jelením potoce pouze z 1,8 km² a do nádrže na Slatinném potoce z 11,9 km².

Tabulka 4.4: Kvantitativní charakteristiky poldrů (zpracování dat naměřených v terénu)

nádrž	objem [m ³]	plocha [m ²]	pata hráze [m n.m.]	vrchol hráze [m n.m.]	délka hráze [m]	max šířka [m]	max délka [m]
Slatinný	271 002	89 832	850	858	130	200	700
Jelenní	182 236	56 731	885	893	100	200	390
Rolava_horní	185 434	67 869	841	849	120	250	545
Rolava_dolní	217 971	93 530	814	822	100	330	587

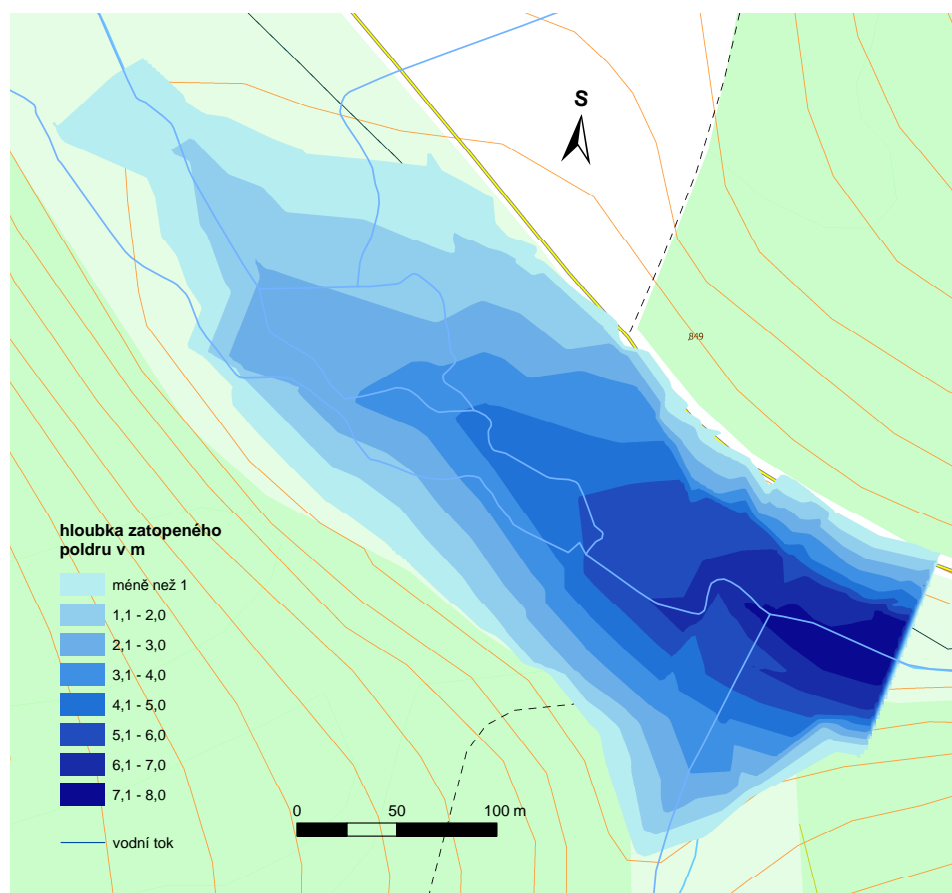
Výška hráze byla u všech poldrů stanovena na 8 m, protože to konfigurace terénu dovolila. Nádrž Jelení a obě rolavské mají srovnatelný průběh batymetrické křivky (obr. 4.23), jelikož mají podobný tvar. Rolava_dolní zaujímá sice větší plochu, ale velký podíl plochy tvoří hladina stejné nadmořské výšky. Poldr na Slatinném potoce je nejvíce zaříznut v údolí, proto je i relativně dlouhý ve snaze dodržet osmimetrovou hráz.



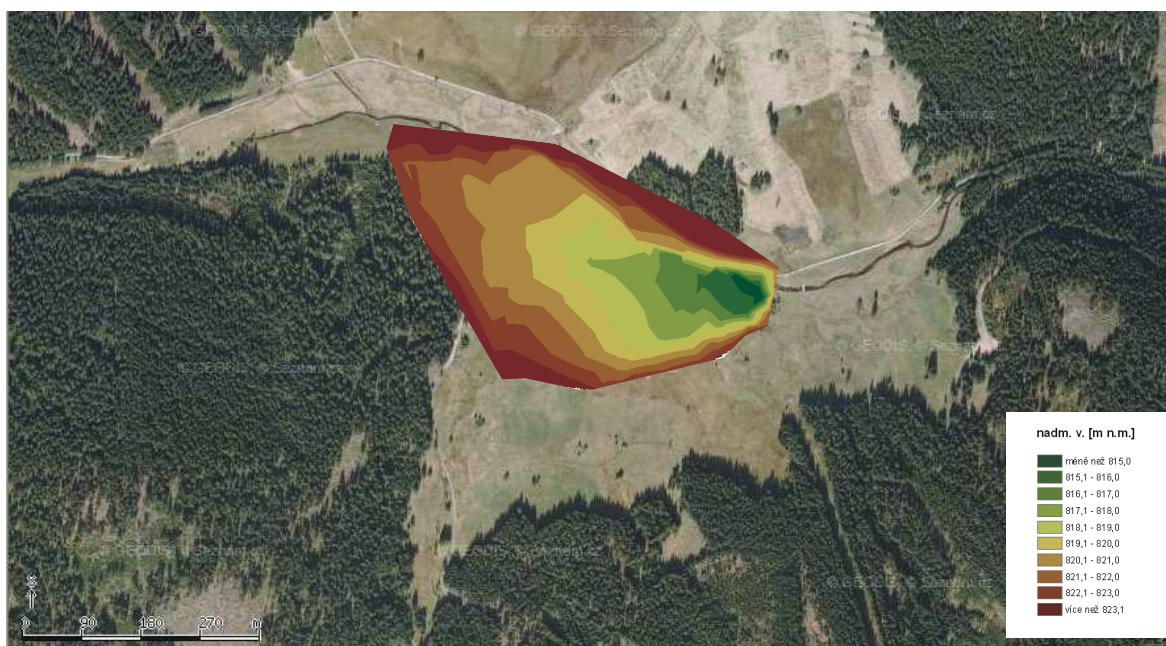
Obrázek 4.23: Batymetrické křivky poldrů (zpracování dat naměřených v terénu)

V modelu HEC-HMS v *Paired Data Manager* byly zadány batymetrické křivky nádrží pomocí *Elevation – Storage Functions*. Nádrže musely být přidány též do *basin modelu*. Pro modelování vlivu nádrží byl vytvořen nový *basin model* s nádržemi. Tento model byl kopií optimalizovaného a ověřeného modelu, do kterého byly pouze implementovány čtyři nádrže. Vložené nádrže musely v *basin modelu* respektovat stromovou strukturu povodí, tak aby byla zachována správná konektivita jednotlivých elementů povodí (viz obr. 2.5).

Každá uvažovaná nádrž vyžadovala zadání parametrů nádrže. Nejdříve byly zadány počáteční podmínky, předpoklad stálého zadržetí a funkce výpočtu průchodu vody nádrží. Zvolená metoda byla *Elevation-Storage*, které předcházela volba metody *Outflow Structures*. *Outflow Structures* nevyžaduje zadání parametrů průtoku vody nádrží, která k dispozici nebyla. *Elevation-Storage* předpokládá známou závislost nadmořské výšky na objemu, která musí být doplněna do *Paired Data* v podobě batymetrické křivky. Počáteční podmínky byly zvoleny jako $Inflow = Outflow$ z praktického hlediska, neboť nepotřebují znát přídatná data o průtoku vody nádrží (Fleming, Scharffenberg, 2006)

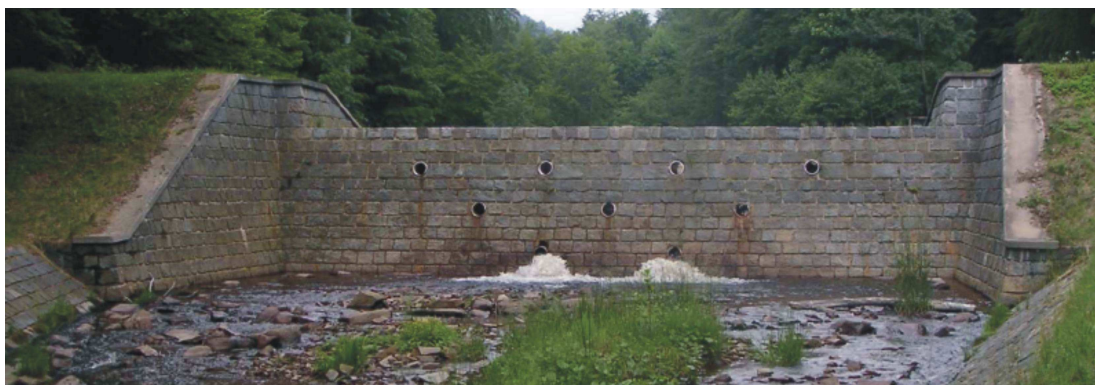


Obrázek 4.24: Potencionální batymetrické znázornění zatopeného poldru Rolava_horní (zpracování naměřených dat v terénu, podklad <http://geoportal.cenia.cz>)



Obrázek 4.25: Lokalizace uvažovaného poldru Rolava_dolní v krajině (zpracování dat naměřených v terénu, <http://www.mapy.cz>, 6.8.2009)

Nezbytnými parametry hráze v HEC-HMS byly počty propustků (*outlets*), přelivů (*spillways*) a výška a šířka koruny hráze. Podle tvaru údolí a účelu nádrže je hráz poldru klasifikována jako čelní (Herynek, Tlapák, 2002). Stanovení parametrů hráze je ze stavebního hlediska nejnáročnějším prvkem malé vodní nádrže. Pro potřeby této práce však přesné vymezení hráze nemá na simulaci odtoku vody žádný vliv. Práce si klade za cíl zjistit vliv nádrží na odtok vody ve Staré Roli, k čemuž je zapotřebí především známý objem nádrže a výška hráze. Bližší technické přístupy k výstavbě hrází uvádí např. Herynek a Tlapák (2002) nebo Vrána a Beran (1998). Některé parametry přesto respektovaly normy. Hráze byly uvažovány ideálně jako betonová zeď se šířkou koruny 4 m a výškou hráze 8 m. Nejmenší průměr výpusti je obecně stanoven na 30 cm. Průměry výpustí byly tedy stanoveny na 30 cm. Tvary propustků byly kruhové. Důležité bylo rozmístění výpustků v hrázi, které bylo zvoleno obdobně jako u obr. 4.26. Rozmístění výpustků se měnilo v závislosti na výsledcích simulace 100-letého denního úhrnu srážek. Nejdříve bylo rozmístění u všech nádrží stejné. Simulace však prokázaly odlišný vliv jednotlivých nádrží. U obou rolavských nádrží dosáhla hladina při nejextrémnějším úhrnu srážek při původním rozmístění propustků až k hladině přelivu. Naopak u nádrže na Slatinném a Jelením potoce měla k hladině přelivu maximální dosažená hladina značnou rezervu. Za účelem získání co nejmenší hodnoty kulminačního průtoku, bylo rozmístění propustků v konečné fázi u každé nádrže odlišné. Propustky byly lokalizovány ve čtyřech hladinách po 1 m, přičemž v každé hladině byl jiný počet propustků. U Rolavy_horní byl u paty hráze jeden propustek, v dalších dvou hladinách vždy dva propustky a ve 4 m tři propustky (1,2,2,3). U Rolavy_dolní byla stejná situace 1,2,2,3 a u nádrže Jelení a Slatinný 1,1,1,1. Nádrž Jelení odvodňuje menší území než rolavské nádrže a nádrž Slatinný představuje největší nádrž, a proto se mohou déle plnit. Výsledné simulace prokázaly s tímto rozmístěním výpustí nejvýraznější pokles kulminace.



Obrázek 4.26: Příklad rozmístění propustků na hrázi sedimentační nádrže na Chomutovce (Foto: M. Jeníček)

5 Výsledky

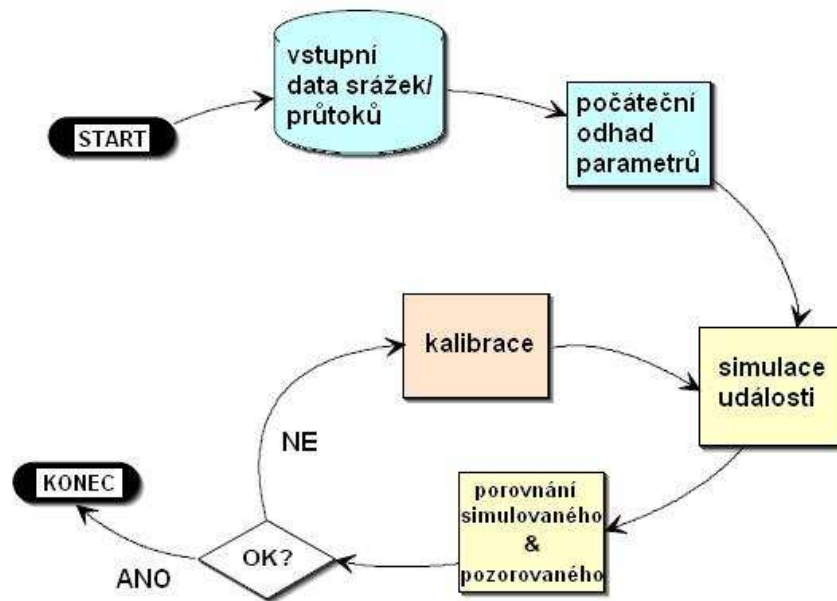
Samotnému simulačnímu procesu předcházelo v HEC-HMS několik kroků. Nejdříve bylo nutné vytvořit novou specifikaci simulace v *Control Specifications* pro každou simulovanou událost – kalibrační, verifikační i scénáře srážkových úhrnů. V této komponentě byl zadán začátek a konec simulované události včetně časového kroku, ve kterém byla simulace prováděna.

Simulační běh byl zadán pomocí *Create a Simulation Run* v menu Compute, kde musel být specifikován použitý model povodí, meteorologický model a kontrolní specifikace. Výsledky bylo možné prohlédnout na kartě *Results* či v prohlížeči HEC – DSSvue. Pro přehlednost byly výsledky z HEC-HMS i HEC-DSSvue importovány do MS Excel, kde byly vizualizovány do přehledných grafů a tabulek.

Před použitím simulačního modelu pro zkoumané území bylo nezbytné provést nejprve kalibraci modelu a poté jeho validaci. Výsledné simulace se zcela lišily od pozorovaného průtoku ve Staré Roli a musely být podrobeny kalibraci.

5.1 Kalibrace

Každý model v HEC-HMS má své parametry. Některé parametry jsou pomocí různých postupů odhadnutelné. V předchozích kapitolách bylo nastíněno, jakým způsobem docházelo k jejich stanovení. Kalibrační parametry určují chování modelu (Daňhelka et al., 2003). V případě, že simulovaný odtok je odlišný od pozorovaného, dochází ke kalibraci těchto parametrů (obr. 5.1). Kalibrace neboli optimalizace je proces, kterým se snaží řešitel přiblížit simulovaný průběh události co nejpřesněji pozorované události. Optimalizace je proces, který je zapotřebí neustále obnovovat (Feldman, 2000). Kalibrační procedura představuje složitý proces, kdy dochází často i k několika kalibračním stejných parametrů. Jde o komplexní proces, kdy jsou kombinovány kalibrace parametrů jednotlivých komponent. V podstatě jde o iterační postup, kdy při známých cílových hodnotách jsou měněny hodnoty vstupních parametrů tak, aby se výstupy blížily naměřeným hodnotám (Daňhelka et al., 2003). Často je úspěšnost optimalizace závislá na zkušenostech řešitele, který tím do procesu vnáší subjektivní prvek.



Obrázek 5.1: Schéma procesu kalibrace (upraveno podle Feldman, 2000)

Před procesem kalibrace je třeba stanovit, jaké kritérium přesnosti hledáme. Kritériem získáme objektivní měření shody. Výběr vhodného kritéria by se měl řídit účelem simulovaného výsledku. Pro simulaci kapacity vodního toku či objektu na něm by měl být uvažován celkový objem. Pro předpověď povodní je důležitější tvar povodňové vlny, hodnota kulminačního průtoku i jeho čas (Daňheka et al., 2003)..

Porovnání simulovaného a pozorovaného hydrogramu nelze hodnotit pouze vizuálně, i když podobnost nebo odlišnost dvou křivek je mnohdy zřejmá. K číselnému vyjádření míry shody napomáhá výpočet objektivního kritéria (*Efficiency Criterion*). Objektivní kritérium stanovuje blízkost simulovaného a pozorovaného průběhu nějaké události. Objektivní kritéria jsou definovaná matematickým vyjádřením, jak přesně odpovídají simulace skutečnosti (Beven, 2001). V praxi se nejčastěji používá objektivní kritérium Nash-Sutcliffe, koeficient determinace a index shody. Výběr a použití konkrétního objektivního kritéria k interpretaci výsledků může být obtížné, neboť každé může klást odlišný důraz na vztah pozorované a simulované události. Podle Krause et al. (2005) není žádné kritérium ideální a všestranně použitelné, přesto uznává optimálnost hydrology nejčastěji používaného objektivního kritéria Nash-Sutcliffe (N-S). Bližšími analýzami tohoto kritéria se zabývali např. McCuen et al. (2006) nebo Nash a Sutcliffe (1970).

Kritérium shody simulovaného a skutečného hydrogramu N-S pracuje s hodnotami simulovaných a pozorovaných průtoků v dané epizodě (Krause et al., 2005).

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2}, \text{ kde}$$

Q_o je pozorovaný průtok v čase t

Q_m je modelovaný průtok v čase t

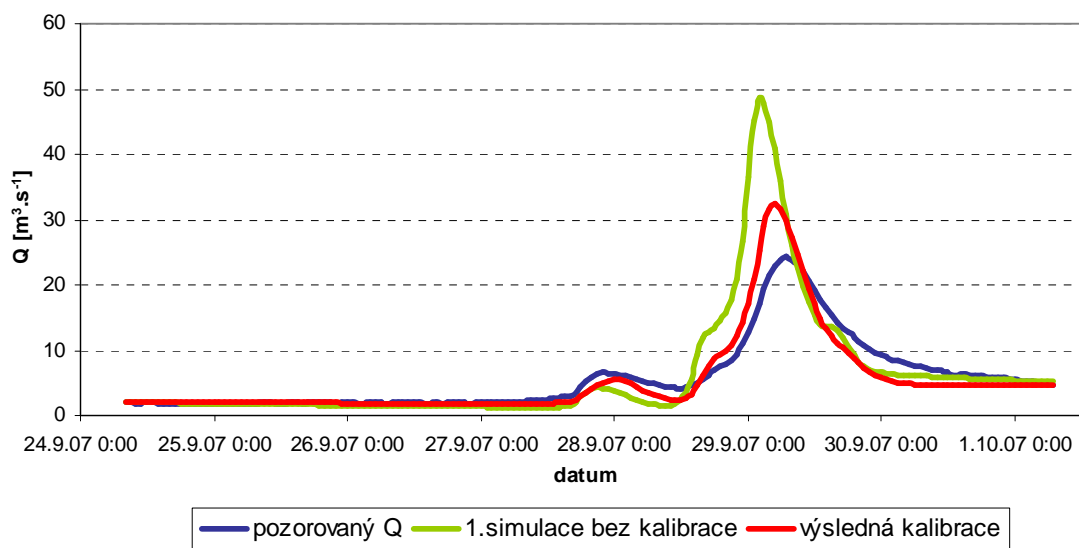
Hodnota E nabývá - ∞ do 1. Pakliže je koeficient roven 1, jde o absolutní shodu modelovaného průtoku a skutečného. Jestliže je hodnota kritéria nulová, pak jsou předpovědi modelu podobné průměru pozorovaných průtoků. Klesá-li shoda pod nulu, jde o nekvalitní předpověď. Obecně jsou považovány za uspokojivou shodu hodnoty nad 0,5, neboť vyšších hodnot je dosahováno obtížně.

Hydrologické modely nabízejí dva způsoby kalibrace – automatickou a manuální. Manuální kalibrací je rozuměna subjektivní úprava parametrů řešitelem, automatická kalibrace je zajištěna softwarem. Na základě rozdílností křivek simulovaných a skutečných průtoků musí řešitel subjektivně rozhodovat, které parametry by měly být optimalizovány. Základním principem je hodnocení tvaru křivek. Pokud se hydrogramy liší objemem odtoku, nabízí se úprava počátečních podmínek. Jsou-li křivky navzájem posunuté, může být nepřesnost v modelované době koncentrace. Tvar poklesové větve může být zlepšen kalibrací poklesové konstanty apod. Toto uvažování platí zejména v procesu manuální kalibrace. Ta předchází často optimalizaci automatické, aby zmírnila největší rozdíly a ponechala automatické kalibraci doladění nepřesností.

V HEC-HMS existují dva přístupy k automatické kalibraci parametrů. Model HEC-HMS nabízí kalibraci jednoho parametru pro všechna subpovodí. Jedná se o optimalizaci hodnot CN křivek a počáteční ztráty I_a . Výsledkem je pak koeficient, kterým jsou počáteční hodnoty vynásobeny. Lze však optimalizovat hodnoty některých parametrů pro každé subpovodí zvlášť. Příkladem takových parametrů je doba koncentrace nebo poklesová konstanta. Pro každé subpovodí je automaticky vygenerována nová optimalizovaná hodnota.

Prakticky je automatická kalibrace zadávána v HEC-HMS v menu *Compute* pomocí *Create Optimization Trial*. V každém *Optimization Trial* je možné navolit parametry, které mají být upraveny buď pro všechna dílčí povodí nebo jednotlivě. Výsledky je potřeba převést do *basin modelu*. Optimalizačních běhů může být několik až k dosažení uspokojivé shody.

Obě události září i srpen jsou z meteorologického hlediska podobného charakteru, proto se předpokládalo, že kalibrace na zářijovou událost bude mít kladné ověření u události v srpnu. Počáteční simulaci bez zásahu kalibrace na epizodu září 2007 ilustruje obr. 5.2. Rozdíl křivek pozorovaných průtoků a simulovaných byl značný. Nejdříve byl zahájen proces manuální kalibrace na základě subjektivních odhadů, které parametry by měly být optimalizovány. Zásadní odlišností byl objem odtoku, který byl u simulace převyšující. Nabízela se tedy kalibrace hodnot CN křivek a počáteční ztráty I_a . Proběhlo několik manuálních oprav. Hodnoty CN křivek byly sníženy o 30 % oproti původním hodnotám. Touto opravou došlo k zřetelnému poklesu kulminačního průtoku. Manuální kalibrací prošla též doba koncentrace. Z grafu je patrné, že posun kulminačního průtoku i průběhu celé křivky musel být opraven. Konečným číslem u manuální kalibrace T_c byly hodnoty o 3h vyšší než původní hodnoty. Výsledkem manuální kalibrace byl shoda N-S 0,7. Následovala automatická optimalizace I_a a T_c . Výsledky hodnot počátečních ztrát byly blízké odhadnutým hodnotám. Nová čísla T_c se však výrazně lišila. Jelikož tvar hydrogramu na jeho poklesové větvi nekorespondoval s pozorovanou křivkou, tak proběhla automatická optimalizace i u poklesové konstanty a poměru, který je mezi kulminačním průtokem a prahovou hodnotou průtoku v inflexním bodě hydrogramu (*Ratio to peak*). Výsledná optimalizace byla blízká původním číslům. Výsledkem obou kalibrací byla shoda N-S 0,89 (obr. 5.2), což bylo hodnoceno velmi uspokojivě v porovnání s dostupnou literaturou, např. Abulohom (2001).

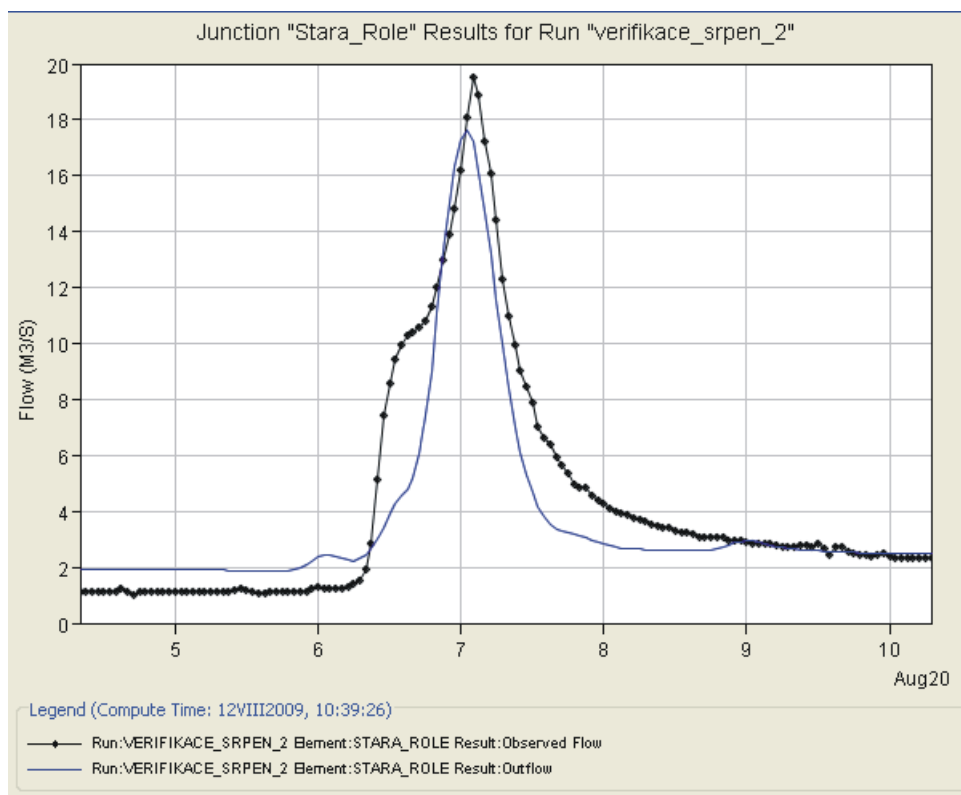


Obrázek 5.2: Hydrogramy pro epizodu září 2007

5.2 Verifikace

Důležitým krokem po kalibraci je validace modelu. Ověření neboli verifikace spočívá v prokázání, že pro nakalibrované hodnoty daných parametrů jsou výstupy blízké měřeným veličinám i pro časová období, na která nebyl model kalibrován (Daňhelka et al., 2003)..

Verifikace proběhla na událost srpen 2006. Počáteční shoda byla relativně zdařilá 0,77, přesto rozdíl křivek byl markantní u jejich objemů. Došlo k opačnému jevu než u kalibrační události, kdy objem odtoku u pozorovaného hydrogramu byl větší než u simulovaného. Jelikož se neuspokojivě lišily i hodnoty kulminačních průtoků, byla provedena nová manuální i automatická kalibrace u září 2007 a zvýšeno číslo CN křivek z 70% na 80% původních hodnot. Kalibrace září 2007 vykazovala pak shodu N-S 0,86 (výše uvedený obrázek ilustruje konečnou kalibraci se shodou 0,86) a verifikace srpen 2006 vykazovala shodu N-S 0,89. U epizody září 2007 činil kulminační průtok 29.9. v 7:00 24,3 m³.s⁻¹. U výsledné kalibrace stejné události byl maximální průtok 29.9. v 5:00 31 m³.s⁻¹. Skutečná srpnová kulminace dosahovala 7.8. v 2:00 19,5 m³.s⁻¹. Verifikace stanovila maximální průtok 7.8. v 1:00 na 17,6 m³.s⁻¹ (obr. 5.3).



Obrázek 5.3: Výsledný hydrogram ze srpna 2006 zobrazený v HEC-HMS

Obě hodnoty shod N-S u kalibrační i verifikační události byly považovány za ideální. Model povodí byl vyhodnocen jako nakalibrovaný na další simulace s nádržemi. Výsledný přehled kalibrovaných parametrů představuje následující tabulka.

Tabulka 5.1: Seznam kalibrovaných parametrů

parametr	název parametru	model	poměr
I_a	počáteční ztráta	objem odtoku	0,66
CN	hodnota CN křivky	objem odtoku	0,8
T_c	doba koncentrace	přímý odtok	1,5 - 6,5
ReC	poklesová konstanta	základní odtok	1 - 1,15
Ratio to Peak	prahová hodnota	základní odtok	1,01 - 1,50

5.3 Modelování odtoku - epizoda září 2007

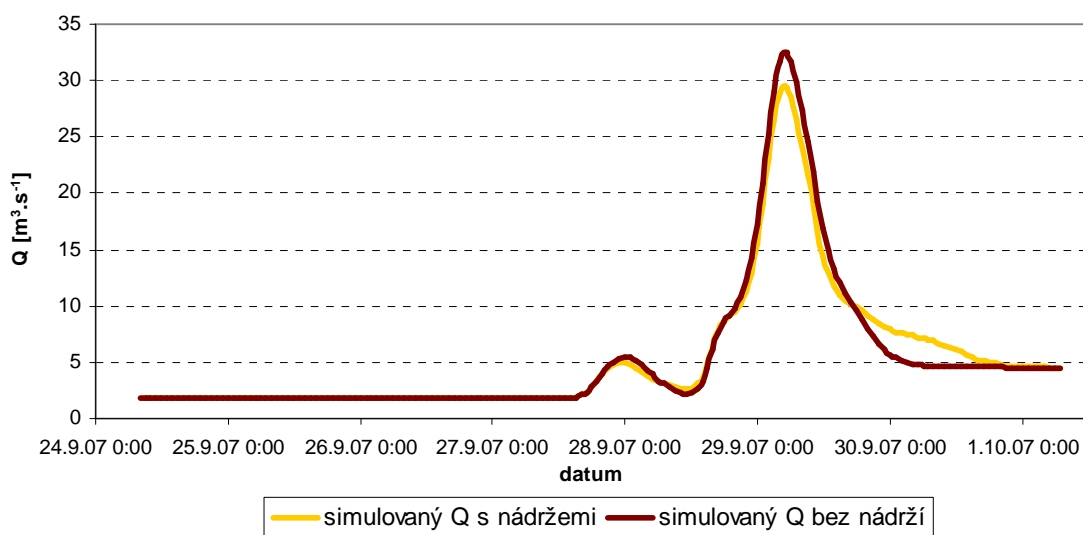
Kalibrace proběhla pro obě události relativně úspěšně, tudíž se dalo předpokládat, že výsledky dalších simulací budou mít dobrou vypovídající hodnotu. Hlavním cílem práce bylo zjištění, zda má systém malých vodních nádrží jako příklad protipovodňového opatření v krajině vliv na snížení kulminačního průtoku během návrhových N-letých denních srážkových úhrnů. Doba opakování denního srážkového úhrnu byla stanovena na 10, 20, 50 a 100 let. V modelu HEC-HMS byl k simulacím používán samostatný model povodí s implementovanými nádržemi s parametry uvedenými v metodice. U extrémních událostí se předpokládalo, že hlavní složku odtoku tvoří přímý odtok, základní odtok se projeví až na poklesové větvi hydrogramu. V simulacích nebyl uvažován vliv evapotranspirace, která představuje důležitý vliv na odtok na začátku srážko-odtokového procesu.

Simulace s vlivem systému poldrů na epizodě září 2007 byla srovnávána s výsledným simulovaným průtokem bez vlivu nádrží, který prošel úspěšnou kalibrací. Výsledek je čitelný z obr. 5.4. Vliv nádrží je parný. Maximální průtok klesl vlivem implementace poldrů do povodí o $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ke změně doby kulminace nedošlo, ta zůstala shodná se simulovanou křivkou bez vlivu nádrží. Celkově lze vyjádřit vliv systému čtyř nádrží 4,8% snížením kulminace oproti stavu bez nádrží (tab. 5.2).

Tabulka 5.2: Přehled základních charakteristik hydrogramů ze září 2007

průtok	září 2007			
	[m ³ .s ⁻¹]	změna [%]	čas kulminace	změna
simulovaný bez nádrží	31,0	0	29.9.07 5:00	0
simulovaný s nádržemi	29,5	- 4,8 %	29.9.07 5:00	0

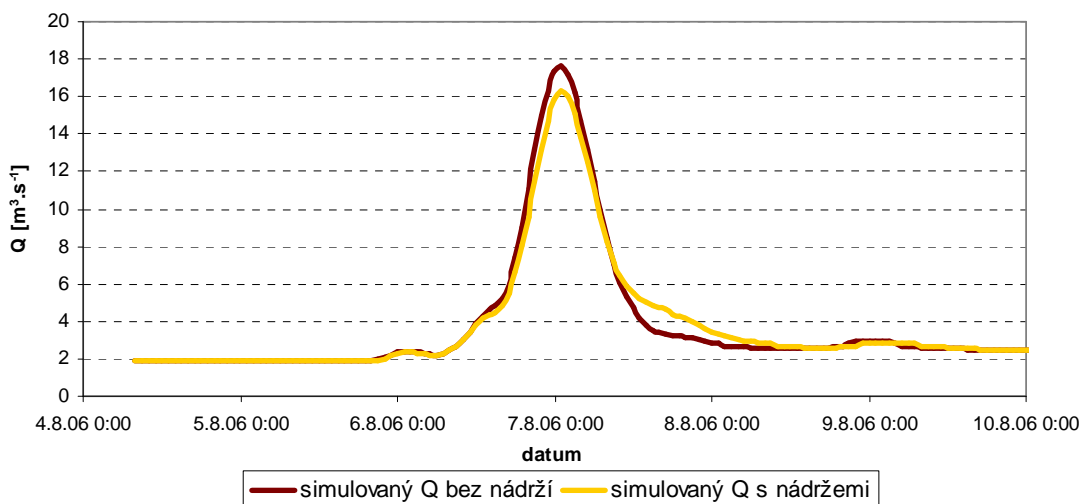
Poklesová větev simulovaného hydrogramu bez vlivu poldrů má strmější průběh než simulace s nádržemi (obr. 5.4). Voda z nádrží odtéká postupně a pomaleji než v případě, kdyby bylo povodí bez vlivu retenčních nádrží. Shoda obou křivek nastává poslední den epizody.



Obrázek 5.4: Vliv systému nádrží na odtok vody v září 2007

5.4 Modelování odtoku - epizoda srpen 2006

K viditelnému vlivu systému suchých poldrů došlo také při simulaci se srpnovými údaji o srážkových úhrnech. Shoda N-S byla u srpnové epizody vyšší než u kalibrační události, a proto se mohl očekávat i výraznější vliv systému nádrží během známé události. Systém nádrží snížil kulminační průtok oproti původnímu simulovanému průběhu hydrogramu o 7,4 %. U poklesové větve hydrogramu došlo ke stejnému efektu postupného odtoku vody z nádrží jako u zářijové události. Ke shodě křivek došlo poslední den hodnocené epizody (obr. 5.5).



Obrázek 5.5: Vliv systémů nádrží na odtok vody v srpnu 2006

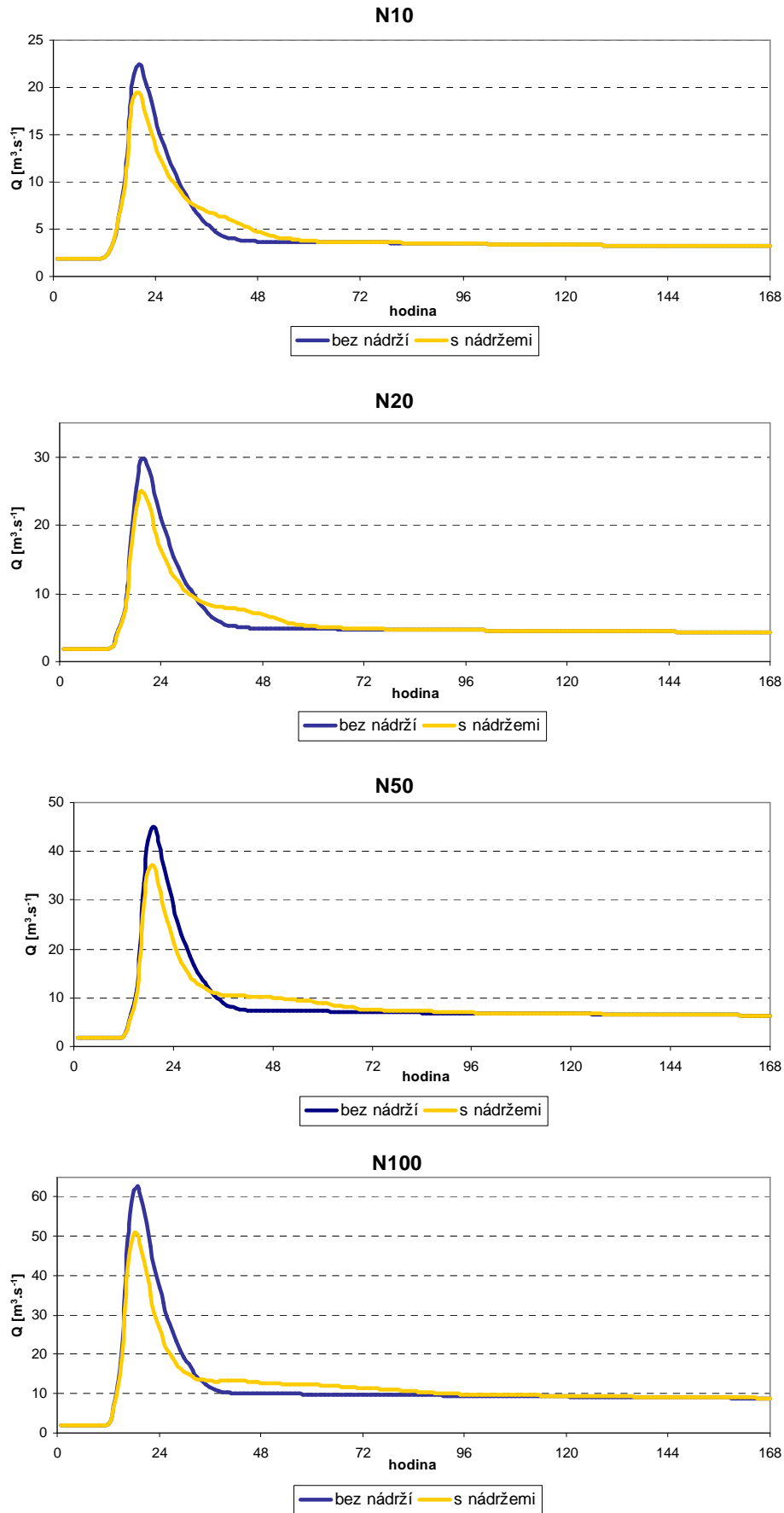
Čas kulminace u obou křivek zůstal beze změny. Celkově došlo ke snížení o $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což lze považovat za dobrý výsledek (tab. 5.3). Implementace systému čtyř nádrží ukázala jejich srovnatelný vliv na obou hodnocených epizodách srpnu 2006 i září 2007.

Tabulka 5.3 : Přehled základních charakteristik hydrogramů ze srpna 2006

průtok	srpen 2006			
	[m ³ .s ⁻¹]	změna [%]	čas kulminace	změna
simulovaný bez nádrží	17,6	0	7.8.06 1:00	0
simulovaný s nádržemi	16,3	- 7,4 %	7.8.06 1:00	0

5.5 Variantní simulace

Předchozí analýzy hodnotily skutečné události, které na Rolavě proběhly. Následující výsledky (obr. 5.6) popisují potenciální vliv systému poldrů za denních úhrnů srážek s opakováním 10, 20, 50 a 100 let (N10, N20, N50, N100). Postupně proběhly simulace s danými extrémními úhrny srážek a bylo zjišťováno, jak za takových podmínek povodí reaguje. Srovnání chování povodí s nádržemi a bez nádrží bylo klíčové během extrémních srážek. Zásadním hodnotícím parametrem byl maximální průtok a doba kulminace. Zajímavým aspektem byla i poklesová tendence odtoku směrem k průměrnému stavu ve Staré Roli. Simulace byly zadávány v různě dlouhém časovém rozpětí, přičemž čas 0 je začátek deště. K normálnímu stavu blízkému dlouhodobému průměru však došlo až po měsíci. Pro dobrou orientaci bylo zvoleno týdenní rozpětí, tzn. 168 h od začátku deště.

Obrázek 5.6: Hydrogramy průtoků s za různých N -letých srážkových úhrnů

Povodí na extrémní srážky reaguje zpočátku velmi rychle, kdy hlavní složku odtoku tvoří přímý odtok a může tvořit až 90 % celkového odtoku (Kulasová et al., 2004). Odtok vody charakterizovaný podobnými hodnotami průtoků od druhého dne je zásobován především základním odtokem. Parametry nádrží jsou popsány v metodice.

Pokud by teoreticky došlo k výskytu extrémního N-letého srážkového úhrnu, systém nádrží v horní části povodí Rolavy by svůj kladný vliv prokázal. Pozitivní vliv znamená snížení kulminačního průtoku a celkové zploštění povodňové vlny. Část povodňové vlny by byla transformována v nádržích, což by se v profilu Stará Rola projevilo poklesem maximálních hodnot průtoků. Z grafů i následující tabulky je zřetelné, jak se mění vliv systému poldrů s úhrnem srážek. Tvar simulovaného hydrogramu s nádržemi u všech scénářů kopíruje tvar hydrogramu bez vlivu nádrží. Hlavními rozdíly jsou rozpětí nejnižších a nejvyšších hodnot průtoků a plocha pod křivkou, znázorňující objem povodňové vlny. U všech simulovaných hydrogramů s vlivem nádrží je shodný nástup povodně. Čas kulminace je totožný u scénáře N10 a N50. Dřívější doba kulminace o jednu hodinu je registrována u situací N20 a N100. Zároveň platí u všech hydrogramů mírně odlišná poklesová tendence povodně. Poklesová větev všech hydrogramů s vlivem nádrží je pozvolnější a dochází k dřívějšímu výskytu inflexního bodu na hydrogramu, neboť je odtok vody z nádrží postupný. V této fázi se na odtoku vody z povodí podílí pravděpodobně maximálně základní odtok. Základní odtok se u simulace se systémem nádrží může začít projevovat dříve. K postupné infiltraci vody až k hladině podzemní vody může vlivem nádrží docházet rychleji. Část vody je transformována v nádržích, tím dojde ke snížení podílu přímého odtoku na celkovém odtoku vody z povodí. Základní odtok by se proto mohl projevit dříve. Bez vlivu nádrží dochází k rychlé genezi přímého odtoku a nižšímu podílu infiltrované vody. U všech grafů hodnoty průtoků během týdne nedosáhnou hodnoty průměrného dlouhodobého ročního průtoku ve Staré Roli ($2,35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Lze však na základě grafů vycházet z předpokladu, že vlivem nádrží dosáhne simulovaný průtok této hodnoty později než u situace bez jakéhokoli vlivu systému poldrů, neboť odtok vody z nádrží je jimi částečně regulován.

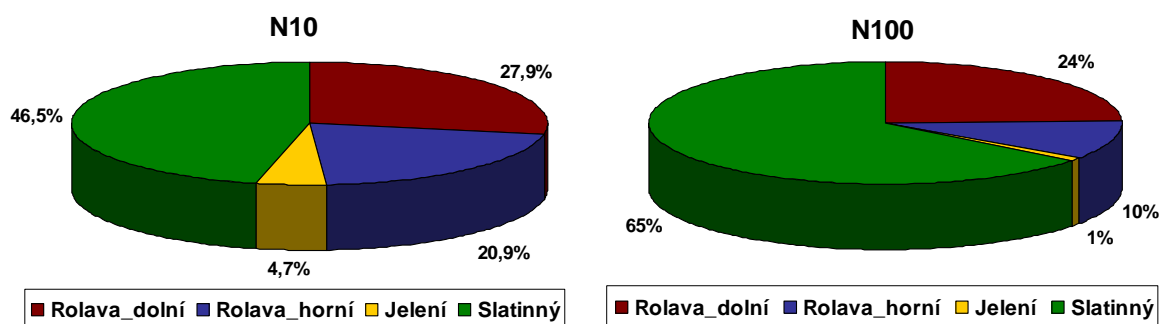
Úspěšnost simulace je hodnocená podle hodnoty maximálního průtoku a tvaru povodňové vlny. Systémy různých typů protipovodňové ochrany si kladou za cíl zmírnit nejvyšší povodňové průtoky za účelem minimalizování škod. Během všech srážkových scénářů došlo ke snížení kulminace i zploštění povodňové vlny. Největší vliv systému nádrží na snížení povodně byl zaznamenán u průběhu 100-letého úhrnu srážek. Oproti simulaci bez vlivu nádrží došlo u scénáře N100 s nádržemi k 19,1% poklesu kulminačního

průtoku. U ostatních variantních situací byly též prokázány uspokojivé výsledky. Výše rozdílů kulminačních průtoků oproti stavu bez nádrží rostla s extrémností N-letého srážkového úhrnu (tab. 5.4). Dá se předpokládat rostoucí podíl přímého odtoku na celkovém odtoku.

Tabulka 5.4: Přehled výsledných charakteristik kulminací během N-letých srážkových situací

		N10	N20	N50	N100
bez nádrží	Q_k [$m^3 \cdot s^{-1}$] bez nádrží	22,4	29,7	45,1	62,8
	kulminace od začátku deště	19h	19h	18h	18h
s nádržemi	Q_k [$m^3 \cdot s^{-1}$] s nádržemi	19,5	24,9	37,1	50,8
	kulminace od začátku deště	19h	18h	18h	17h
změna bez nádrží/s nádržemi	pokles Q_k [%]	12,9	16,2	17,7	19,1
	doby kulminace	0	- 1h	0	- 1h

Snížení charakteristik povodňových vln prokázalo kladný vliv systému čtyř nádrží. Při detailnější analýze výsledků v prohlížeči HEC-DSSvue bylo zjištěno, že vliv jednotlivých nádrží na odtok vody ve Staré Roli není srovnatelný. Nejvýraznější vliv na celkové snížení objemu odtoku má nádrž na Slatinném potoce, jejíž vliv se u všech N-letých scénářů projevuje 46 – 64% podílem (obr. 5.7). Tento výsledek logicky pramení z parametrů nádrže, které jsou popsány v metodice. Nádrž na Slatinném potoce má spolu s nádrží Jelení nejméně propustků. V prvních simulacích prokázala nádrž rezervu necelé 2 m, tudíž došlo ve snaze zadržet v nádrži více vody ke snížení počtu propustků. Tímto způsobem poklesla hodnota kulminačního průtoku v dolní části povodí. Nádrž Slatinný navíc ze všech poldrů disponuje největším objemem. Podíl nádrže na Slatinném potoce se s extrémností srážek zvyšuje, což souvisí s největší možnou akumulací vody v této nádrži. Při nižších srážkách může být voda rovnoměrněji rozložena ve všech nádržích.



Obrázek 5.7: Podíl jednotlivých nádrží na transformovaném odtoku během 10 a 100-letého srážkového úhrnu

Nejnižší podíl na transformaci odtoku z povodí vykazuje nádrž na Jelením potoce, která ovlivňuje celkový odtok 0,9 – 4,6 %. Stejně jako u poldru Slatinný roste podíl nádrže Jelení s extrémitou úhrnů srážek. Vyrovnaný vliv má během všech variantních událostí Rolava_dolní (24 – 27 %). Horní nádrž na Rolavě ovlivňuje nejvíce odtok vody při 10-letém srážkovém úhrnu (20 %). Vliv nádrže na Slatinném potoce roste s extrémností N-letého úhrnu srážek na úkor nádrží na Rolavě.

Ačkoli byla maximální dosažitelná hladina nádrže stanovena na 8 m, nebylo této výšky záměrně při žádném extrémním úhrnu srážek dosaženo. Bezpečnostní přeliv byl stanoven 0,5 m pod korunu hráze. Pouze v případě nádrže Rolava_dolní při scénáři N100 bylo hladiny bezpečnostního přelivu přesně dosaženo. U ostatních nádrží se vždy maximální dosažená hladina pohybovala pod nadmořskou výškou bezpečnostního přelivu. Největší rezerva k naplnění nádrže byla pozorována u nádrže na Jelením potoce, protože nádrž Jelení odvodňuje velmi malé území.

Největší objem byl zadržen v nádrži na Slatinném potoce, která má nejsevernější tvar oproti ostatním nádržím v plošším terénu. Vzhledem k stanoveným parametrům nádrže se největší akumulace vody mohla předpokládat. Z malé části byl zaplněn vodou poldr Jelení. Srovnatelné hodnoty u obou rolavských nádrží ilustruje následující tabulka. Všechny nádrže naznačují trend rostoucího podílu dosaženého objemu z celkového potenciálního objemu směrem k extrémnosti srážkové události.

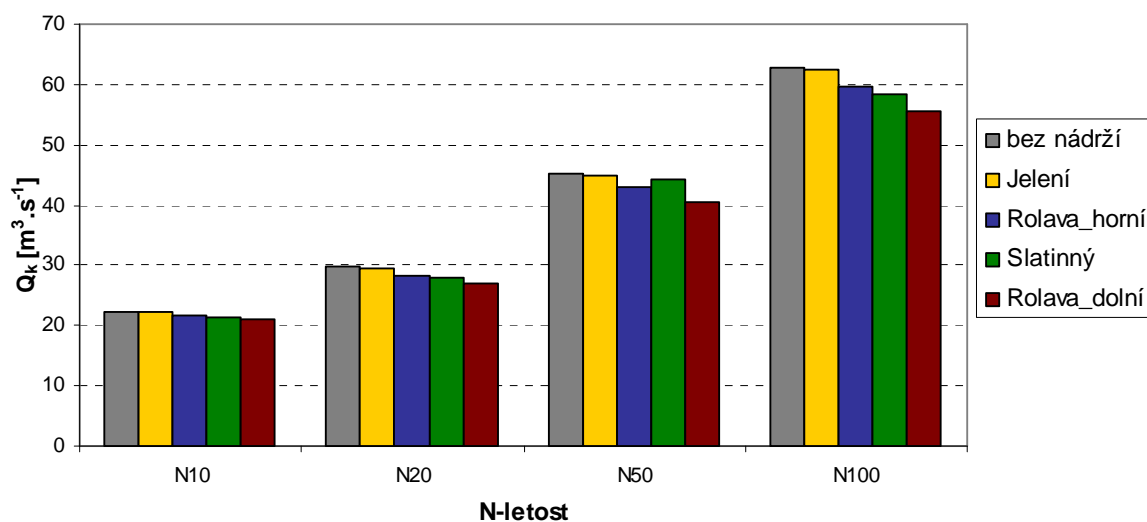
Tabulka 5.5: Přehled dosažených nadm. výšek a objemů během N-letých srážkových událostí podle nádrží

nádrž	max dosažená hladina [m n. m.]				max hladina [m n. m.]	max dosažený objem 1000 [m ³]				podíl z celk.objemu [%]			
	N10	N20	N50	N100		N10	N20	N50	N100	N10	N20	N50	N100
Rolava_dolní	818,8	819,6	820,7	821,5	822	38,6	65,4	119,2	182,3	17,7	30,0	54,7	83,6
Rolava_horní	845,0	845,8	847,0	848,2	849	25,6	42,9	82,1	135,9	13,8	23,1	44,3	73,3
Jelení	887,7	888,1	886,0	889,1	893	4,6	7,6	14,1	21,6	2,5	4,2	7,7	11,9
Slatinný	854,1	854,9	856,0	857,1	858	45,8	73,7	128,6	196,5	16,9	27,2	47,5	72,5

Dalšími hodnocenými situacemi byly návrhy pouze tří, dvou a jedné nádrže v povodí. V případě implementace tří a dvou potenciálně nejobjemnějších poldrů (Slatinný, Rolava_dolní a Rolava_horní) do povodí nedošlo k žádnému rozdílu průběhu simulovaných křivek oproti systému čtyř nádrží. Všechny hodnoty průtoků byly totožné. Jediným rozdílem byl začátek poklesu hodnot v inflexním bodě hydrogramu o 3 h, vždy dříve u situace s nižším počtem nádrží.

Zajímavější byly návrhy jedné nádrže v povodí. Cílem bylo zjistit, která nádrž by měla největší smysl v povodí, pokud by mohl být v povodí instalován pouze jeden poldr. Aby mohly být nádrže navzájem porovnávány, změnily se parametry nádrže Jelení a Slatinný. Všechny nádrže pak měly shodný počet propustků jako nádrže na Rolavě (1,2,2,3).

V HEC-HMS byly vytvořeny nové čtyři modely povodí vždy s jednou ze čtyř vyměřených nádrží. Simulace probíhaly na všechny scénáře denních srážkových úhrnů. Pokud by do povodí byla implementována pouze jedna retenční nádrž, měla by nejvýraznější vliv na snížení povodňové vlny během návrhových variant srážek nádrž Rolava_dolní (obr. 5.8).



Obrázek 5.8: Kulminační průtoky za N-leté srážkové denní úhrny v případě, že by do povodí byla implementována jen daná nádrž

U scénáře N100 by došlo k 11,6% snížení kulminačního průtoku, u N10 k 6,7% poklesu. Samostatná nádrž Jelení by ovlivnila pokles maximálního průtoku necelým 1 %. Poldr Rolava_horní by zapříčinil pokles kulminace o 3,1 – 5,1 %, s rostoucí extremitou srážek by vzrostl význam této nádrže. Druhý nejznatelnější vliv na snížení maximálních hodnot průtoků by měla nádrž na Slatinném potoce. Tam by došlo ke 4,5% poklesu u varianty N10 a 6,8% u N100. Procentuální vyjádření poklesu kulminačního průtoku během všech N-letých srážkových úhrnů oproti kulminačnímu průtoku bez žádného vlivu nádrže v povodí vyjadřuje tab. 5.6. Tabulka vyjadřuje vliv pouze jedné nádrže v povodí.

Tabulka 5.6: Procentuální snížení kulminace v případě pouze jedné nádrže v povodí oproti stavu bez nádrže

nádrž	pokles v %			
	N10	N20	N50	N100
Jelení	0,0	0,3	0,4	0,6
Rolava_horní	3,1	4,4	4,4	5,1
Slatinný	4,5	5,7	1,8	6,8
Rolava_dolní	6,7	9,1	10,2	11,6

Do nádrže Rolava_dolní vtéká nejvíce vody v porovnání s ostatními nádržemi. Tato nádrž by proto transformovala největší část odtoku. Ostatní nádrže jsou situovány v pramenných oblastech povodí (především Jelení a Rolava_horní), kde je množství přitékající vody do uvažované nádrže menší.

Pokud by byla v povodí instalována pouze jedna nádrž, došlo by k největšímu naplnění u nádrže na Rolavě_dolní (tab. 5.7). U této nádrže by dosáhla hladina nad výšku bezpečnostního přelivu a byla by 10 cm pod korunou hráze. U ostatních nádrží by hladina vody během uvažovaných srážkových scénářů nedosáhla nikdy bezpečnostního přelivu. Velmi malý vliv na celkový odtok vody z povodí by měla nádrž na Jelením potoce.

Tabulka 5.7: Maximální dosažené hodnoty během všech scénářů v případě jedné nádrže v povodí

nádrž	max dosažená hladina [m n. m.]				max hladina [m n. m.]	max dosažený objem 1000 [m ³]				podíl z celk.objemu [%]			
	N10	N20	N50	N100		N10	N20	N50	N100	N10	N20	N50	N100
Rolava_dolní	819,2	820,2	821,5	821,9	822	51,1	91,3	174,3	210,6	23,4	41,9	80,0	96,6
Rolava_horní	845,0	845,8	847,0	848,2	849	25,6	42,9	82,1	135,9	13,8	23,1	44,3	73,3
Jelení	887,4	887,7	888,2	888,6	893	2,8	5,6	8,8	14,3	1,5	3,1	4,8	7,8
Slatinný	853,1	854,1	855,2	856,2	858	29,3	46,6	86	139,6	10,8	17,2	31,7	51,5

6 Diskuze

Modelování srážko-odtokového procesu pomocí hydrologických modelů je spojeno s mnoha problémy a nejistotami. Správná interpretace výsledků souvisí se znalostí použitých parametrů a jejich nedostatky. V každé fázi tvorby modelu docházelo k výběru metod, během nichž mohlo dojít ke generalizaci skutečnosti. Klíčovou nejistotou byla kvalita všech vstupních dat. Obecně lze problémy a nejistoty rozdělit do několika kategorií, které mají souvislost s jednotlivými fázemi sestavování modelu:

- výběr vhodného modelu
- kvalita vstupních dat
- volba vhodného měřítka
- výběr vhodných metod pro odhad počátečních podmínek s-o procesu
- kalibrace modelu

6.1 Výběr vhodného modelu

Model HEC-HMS byl pro uvedené potřeby modelování srážko-odtokového procesu v povodí Rolavy použit z několika praktických důvodů. Prvním důvodem byla výborná freeware dostupnost modelu na internetu. V tomto případě neplatí časté pravidlo, že volně dostupný program nenabízí kvalitní výstupy. HEC-HMS byl vyvinut v sofistikovaném prostředí The United States Army Corps of Engineers a dochází k jeho neustálému zdokonalování. Modelování probíhalo na nejnovější verzi HEC-HMS 3.3, která nabízí možnost rozšířených analýz s-o procesu.

Model HEC-HMS je založen na celistvém přístupu k prostorové diskretizaci parametrů, což je vhodné pro analýzy menších povodí. Jelikož Rolava již nespadá podle Hrádka (1990) pod kategorii malých povodí, bylo přistoupeno k rozdělení povodí na dílčí subpovodí o velikosti cca 5 km², kde se celistvý přístup mohl promítnout kvalitněji. Stejným postupem rozdělení většího povodí na nižší celky pracoval např. Maidment et al. (2004), který však ve své studii rozdělil povodí řeky San Antonio (10 000 km²) na 12 subpovodí a potvrdil úspěšnost aplikace modelu HEC-HMS i na povodí větších ploch s relativně homogenními charakteristikami území.

Výběr modelu byl dán účelem zpracování dané problematiky a náročností na vstupní data. HEC-HMS vyžaduje zadání vstupních dat, která jsou relativně dobře

dosažitelná a nevyžadují detailní charakteristiky půdních horizontů, vegetačního pokryvu či evapotranspirace a intercepce. Zmíněné ukazatele mohou sice simulace ovlivnit kladným směrem, jejich odhad je však podkladem pro samostatné práce.

Analýzami s-o procesu se navíc zabývala řada českých autorů, kteří potvrdili jeho aplikovatelnost na prostředí českých povodí, příkladem jsou Daňhelka et al. (2003), Šercl (2006, 2007), Kulasová et al. (2004), Roub (2008), Roub a Pavlásek (2004), Jeníček (2007, 2008) a mnoho dalších.

6.2 Kvalita vstupních dat

Problematicke vstupních dat je věnováno mnoho pozornosti v kapitole Materiál a metody. Velká část vstupních dat byla generována z DMT. K sestavení DMT byly k dispozici vrstvy ZABAGED s ekvidistancí vrstevnic 2 m, což zajišťuje dostatečné analýzy terénu v daném měřítku. Popisné charakteristiky délek toků, nejdelších údolnic, sklonitosti dílčích subpovodí apod. by neměly být zatíženy chybami. Taktéž hodnoty doby koncentrace a retenční konstanty vycházely z přesných výpočtů a jejich výsledné hodnoty by neměly být chybné. Nabízí se zde však otázka zvolení vhodné metody (viz kap.6.4).

Problematická mohou být vstupní data týkající se půdních charakteristik a vegetačního pokryvu terénu. Kombinace těchto jevů se promítla v odhadu čísla CN křivky. Podkladová data byla dodána Ing. Petrem Šerclm, Ph.D., který spolu s VÚMOP vytvořil podkladové materiály týkající se infiltrační a retenční schopnosti půdy pro celou ČR pro grid 1 x 1 km. Hodnocení krajinného pokryvu vycházelo z databáze Corine Land Cover 2000. Kalibrace modelu prokázala, že odhadnutá čísla CN křivek podle použité metodiky jsou nadhodnocená, což může být způsobeno velkým prostorovým měřítkem (viz kapitola 6.3).

Nejistotou jsou zatíženy údaje o charakteristikách koryta. Pro každé subpovodí bylo nutné stanovit reprezentativní profil. Výběr místa profilu byl podmíněn praktickými důvody. Každý profil byl stanoven na místě s dobrou dostupností a viditelností na druhý břeh bez zastínění vegetace. Dalšími možnými nedostatky byly odhady Manningových součinitelů drsnosti pro koryta a příbřežní zóny nebo tvar koryta. Odhad musel opět reprezentovat celé subpovodí, tudíž mohl být zdrojem chyb, pokud byl úsek toku v subpovodí různorodý. U zvýšených vodních stavů se navíc součinitelé drsnosti mění vlivem zvýšených odporů (Just et al., 2005). Dokonalý odhad drsností však nemá

významný vliv na výsledky simulací. Obecně všechny parametry *Channel Modelu* nemají v daném měřítku vliv na simulace průtoků.

Největší problém představovalo určení hodnoty srážkového úhrnu na dílčí subpovodí. Podrobná analýza všech metod a jejich vhodnosti použití nebyla cílem práce. Této problematice se věnovala např. Janková (2009) či Růžičková (2009). Metoda IDW byla použita na základě doporučení RNDr. Jana Daňhelky, Ph.D., který má s problematikou bohaté zkušenosti a vycházel ze znalosti povodí Rolavy. Nabízela se mj. metoda Kriging, která patří mezi nejpřesnější metody stanovení plošného úhrnu srážek. Doporučená metoda IDW umožňuje manuální nastavení koeficientu β , který zvyšuje váhu bližších stanic ve výpočtu plošných srážkových úhrnů. Zvýšením hodnoty β došlo k zdůraznění orografického zesílení a návětrného efektu, což má na povodí Rolavy své opodstatnění. Potřebná data k plošné interpolaci srážek pocházela z pozemních srážkoměrů. Z hlediska časového rozložení jsou v operativní hydrologii používány hodinové úhrny srážek (Daňhelka, 2007). Některá neúplná data byla doplněna pomocí regresní analýzy, naštěstí šlo jen o pět údajů u stanice Klínovec. K plošné interpolaci srážek bylo k dispozici vždy pouze deset hodnot, přesnější rozložení srážkových úhrnů by mohlo vzejít z podrobnější sítě stanic, která nebyla dostupná.

Možné chyby mohly být způsobeny během rozložení denních úhrnů srážek do hodinových kroků podle dostupných hyetogramů u některých stanic pro události srpen 2006 a září 2007. Základní nedostatek mohl být v rozdělení příslušnosti subpovodí ke stanicím se známým hodinovým rozložením. Na základě doporučení byla stanicím přiřazena vždy nejbližší subpovodí, často mohl být však srážkový úhrn ovlivněn lokálními terénními charakteristikami, které by hrály významnější roli než blízkost stanice.

Nejproblematičtější nejistotou bylo stanovení N-letých srážkových úhrnů. K dispozici bylo minimum vstupních dat, proto muselo dojít k úpravě dat pro celé povodí podle dostupné literatury, především Kulasové et al (2004). Metod stanovení maximálních N-letých srážkových úhrnů je několik. Podle Kulasové et al. (2004) však publikované rozdělení nejlépe vystihuje situaci deště v horských a podhorských oblastech. Přesné vymezení by se mohlo teoreticky lišit jen o jednotky mm, což by se procentuálně na výsledcích simulací promítlo beze změny oproti zjištěným výsledkům. Všechny nádrže jsou lokalizované v podobné nadmořské výšce se srovnatelnými úhrny srážek.

Související možnou nejistotou s předchozí uvedenou je stanovení návrhového hyetogramu. Této problematice bylo opět věnováno mnoho pozornosti, v české praxi je však nejvíce aplikovaný přístup ČHMÚ (Vološ, 2007), proto byl použit i v této práci.

Maximální hodinový srážkový úhrn je umístěn do 12. hodiny v pořadí hyetogramu. Tímto rozdělením dochází k rychlému vzestupu povodňové vlny, což dokazují výsledky návrhových simulací s i bez nádrží. Zároveň se zde obtížněji stanovuje možný rozdíl v čase kulminace. Pokud by návrhový déšť byl rozložen rovnoměrněji, mohlo by se očekávat, že povodňová vlna bude transformována v nádržích postupně, a tím dojde k posunu doby kulminace dále než u varianty bez nádrží.

Klíčovými vstupními daty byly řady hodinových průtoků ve Staré Roli. Zde mohlo dojít k nepřesným měřením, která mohla být způsobena technickými nedostatky v profilu Stará Role. Pokud by ale byla jakákoli pochybnost o dodaných datech, nemohlo by se relevantně vycházet ze závislosti mezi průtoky a srážkami. U Staré Role byla prokázána Ledvinkou (2008) slabá korelace 0,6 mezi průtoky a srážkami.

Kvalita vstupních dat naměřených v terénu je velice vysoká. Nádrže byly v terénu vyměřeny dostatečnou sítí bodů. Vizualizace v ArcGIS prokázala nutnost zahlazení dna nádrže na několika místech. Vyměření objemu nemohlo být zatíženo význanou chybou, která by ovlivnila výsledky simulace.

6.3 Volba vhodného měřítka

S problematikou dat úzce souvisí i volba vhodného časového a prostorového měřítka. Změnou měřítka dochází ke změně parametrů a model vyžaduje novou kalibraci (Daňhelka et al., 2003). Markantní je změna měřítka u srážkových dat, kdy musí být model zcela podroben nové optimalizaci (Smith et al., 2004). V případě volby časového kroku se vychází z účelu použití modelu, velikosti povodí, dostupnosti dat uvažovaného rozlišení a jejich kvalitě (Jeníček, 2005).

V případě povodí Rolavy a jejích dílčích povodí byl zvolen časový krok 1 hodina, což je krok doporučený pro simulace v operativní hydrologii (Daňhelka, 2007). Kratší krok nemohl být zvolen vzhledem ke špatné dostupnosti dat v nižších časových krocích. Vyšší časový krok by neměl kvalitní výsledný efekt, neboť se pracovalo s denními návrhovými N-letými údaji o úhrnech srážek a krátkými epizodami srpen 2006 a září 2007. Delší časový krok by detailně nezohlednil reakci povodí na déšť u návrhových úhrnů, kde hlavní složku odtoku tvoří přímý odtok, který je generován rychle po začátku deště. Pro obě epizody by volba vyššího časového kroku znamenala větší generalizaci lokálních fyzickogeografických vlivů na odtok vody z krajiny. Zároveň by bylo méně čitelné

rozložení složky přímého a základního odtoku, neboť by nebylo přesně vyjádřené, kdy nastala převaha složky základního odtoku.

Změnou prostorových kroků se zabýval např. Koren (1999), který došel k závěru, že při použití stejných parametrů se celkový simulovaný průtok snižuje se zvyšujícím se krokem. V případě simulace s-o procesu na Rolavě bylo prostorové měřítko použito u stanovení CN křivky. Podklady byly dodány v gridu 1 x 1 km. Výpočet hodnoty CN byl z gridů převeden na reprezentativní hodnoty pro každé subpovodí. Během kalibrace se ukázalo, že hodnoty CN křivek jsou nadhodnoceny. Povodí Rolavy je ve střední části poměrně heterogenní. Parametry sklonitostí, vegetačního pokryvu i půdních charakteristik se mohou lišit na menších plochách než je 1 km². Zároveň přechod z podmáčených luk do lesů není v horních partiích povodí Rolavy postupný, ale velice náhlý. Bohužel v současné době nedisponuje VÚMOP ani ČHMÚ podrobnějšími podklady pro výpočet křivek CN než 1 km².

Veškeré odhady parametrů metod pro hodnocení s-o procesu byly vždy stanoveny průměrně pro každé subpovodí. Velikosti subpovodí byly stanoveny na počátku sestavování modelu a nebyly v průběhu změněny.

6.4 Výběr vhodných metod pro odhad počátečních podmínek s-o procesu

Výběr metod výpočtu pro dílčí složky hydrologického cyklu je dán předchozími zkušenostmi s aplikací modelu a požadavky na vstupní data (Daňhelka et al., 2003, Kulasová et al., 2004). Kombinace metod ovlivňuje výsledné simulace. Výběr metod byl řízen především studiemi podobného zaměření, příkladem Šercl (2005, 2007), Kulasová et al. (2004), Daňhelka et al. (2003), Jeníček (2007) apod. Pro stanovení plošného úhrnu srážek na povodí musí být zohledněny lokální vlivy na rozmístění srážek (stanovení metody MAP viz kapitola 6.2).

Největší možnosti jsou nabízeny při výpočtu odtokové ztráty (Kulasová et al., 2004). Pro stanovení odtokové ztráty byla zvolena empirická metoda CN křivek, která má řadu výhod i nevýhod. Odtoková ztráta představuje rozdíl mezi objemem spadlých srážek a objemem přímého odtoku. Metoda CN křivek je hojně používaná v zahraničí i v ČR, jedná se o dobře dostupnou a jednoduchou metodu, která závisí pouze na jednom parametru. Nevýhodami jsou nezohledňování intenzity srážek a problém přerušení deště. Pokud dojde k překročení maximální retence, je infiltrace rovna

nule namísto konstantní nenulové hodnotě. Hodnoty CN jsou během simulace stejné, ačkoli roste nasycení půdy (Mishra, Singh, 2003). Metoda je pro svoje slabé fyzikální založení často kritizovaná, ale i tak patří k nejčastějším metodám výpočtu odtokové ztráty v ČR. Věrohodnost určení hodnoty CN přímo ovlivňuje hodnotu potenciální retence území, a tím i velikost přímého odtoku. Řada autorů (Maidment et al., 2004, Beven, 2001, Bedient, Huber, 1989) se přiklání k výpočtu počáteční ztráty pomocí metody *Green and Ampt*. Metoda *Green and Ampt* je fyzikálně založená na verzi Darcyho zákona pro proudění v nenасыcené zóně. Podle Kulasové et al. (2004) však není tato metoda vhodná pro svažitě zalesněné půdy v horských oblastech, což je příklad povodí Rolavy.

Pro odhad parametrů Clarkova jednotkového hydrogramu pro transformaci přímého odtoku jsou k dispozici regresní vztahy s vazbou na fyzickogeografické charakteristiky povodí, které se v praxi osvědčily (Maidment et al., 2004).

Počáteční hodnota základního odtoku pro každé subpovodí byla rozpočítána z hodnoty ve Staré Roli podle plochy dílčích povodí. Předpokládalo se, že každé dílčí povodí ovlivňuje velikost základního odtoku v závěrovém profilu Stará Role lineárně podle své plochy. Zde mohlo dojít k chybnému předpokladu, neboť základní odtok může být ovlivňován řadou faktorů. Hlavními ovlivňujícími faktory mohou být propustnost podloží, jeho geologická stavba, půdní charakteristiky, krajinný pokryv, sklonové poměry či hustota říční sítě. Vzhledem malému vlivu přesného stanovení základního odtoku na výsledky simulace, byl ponechán jednoduchý přístup lineární závislosti na velikosti plochy subpovodí.

6.5 Kalibrace modelu

Kalibrace modelu je velice důležitým krokem. Správný odhad parametrů, které by měly být optimalizovány, byl proveden na základě dostupné literatury (Beven, 2001, Daňhelka et al., 2003). Odhad parametrů však často vychází ze zkušeností hydrologa. U celistvých modelů jako je HEC-HMS existuje v porovnání s jinými typy modelů poměrně malý počet parametrů, které mohou být kalibrovány. (Daňhelka et al., 2003). Během procesu kalibrace nesmí dojít k „nadparametrizování“ hodnot (Beven, 2001), proto byl raději zvolen nižší počet parametrů pro všechna subpovodí. Podle Abulohom et al. (2001) je za velmi zdařilou shodu mezi simulovaným a skutečným odtokem považováno číslo větší než 0,77. Míry shody byly v této práci ještě vyšší.

Daňhlecka et al. (2003) zmiňuje čtyři základní zdroje nejistot kalibrace vycházející ze zkušeností s českými povodími. První je časoprostorová problematika meteorologických vstupních dat, kdy může docházet k chybám měření vstupních dat (např. srážky) či k jejich špatné prostorové interpretaci. Druhým problémem jsou možné chyby ve vstupních datech průtoků, které jsou používány pro srovnání se simulovaným výstupem. Dalším zdrojem jsou chyby v důsledku hodnot nekalibrovaných parametrů. Zásadním nedostatkem může být nekompletní struktura modelu.

Procesem kalibrace byly hodnoty CN křivek optimalizovány na 0,8 původních hodnot CN křivek. Hodnoty CN byly podle metodiky Šercla (2005) vypočítány pouze jako průměrné hodnoty CN. Výsledky simulací však mohou být do jisté míry ovlivněny počátečním nasycením půdního profilu. Období sucha nebo naopak nasycení může být zohledněno ve výpočtu hodnoty CN křivky např. podle Janečka (2002). Dle autora by však měla být CN křivka opravována podle 5-denních předchozích srážek. U srpnové i zářijové epizody nebyl dva dny před začátkem události registrován žádný déšť. U některých stanic byly zaznamenány úhrny srážek tři a více dní před začátkem hodnocené epizody. Z těchto důvodů byla použita průměrná hodnota CN. Pokud by nebylo uvažováno žádné nasycení půdy před epizodou, byly by hodnoty CN křivek pro stav sucha vypočteny na 0,7 původních hodnot CN. To dokazuje shodu s kalibrací a potvrzuje neexistenci deště bezprostředně před začátkem srážkové epizody. Diskutabilní je i určení hodnoty CN křivky pro rašeliniště. Hodnota činí 99 a popírá tím jakoukoli míru infiltrace vody do půdy. Součástí metody CN-křivek je odhad počáteční ztráty I_a , která je především součtem ztrát intercepce a akumulace v mikrodepresích, a to do okamžiku, než dojde k vytváření přímého odtoku. Hodnoty I_a byly modelem optimalizovány na 0,66 původní I_a , což prokazuje nízké až žádné úhrny srážek před začátkem simulace.

Ačkoli jsou parametry Clarkova jednotkového hydrogramu určeny z fyzickogeografických charakteristik povodí, musely být optimalizovány. Doby koncentrace simulované a skutečné křivky průtoků se lišily. Dřívější hodnoty doby koncentrace souvisely s celkově rychlejším vzestupem povodně a s převažujícím přímým odtokem. Po optimalizaci parametrů, které ovlivňují velikost přímého odtoku, byly doby koncentrace pro dílčí povodí uspokojivé.

7 Závěr

Výsledky simulací srážko-odtokového procesu na povodí Rolavy v modelu HEC-HMS lze shrnout do několika závěrů.

Tvar a velikost povodňových vln v závěrovém profilu Stará Role jsou určovány fyzickogeografickými charakteristikami v povodí. Povodí Rolavy představuje heterogenní území. Pramenná část povodí je bohatě zásobována srážkami a rašelinné půdy v oblasti mají významný vliv na generování přímého odtoku. Střední oblast povodí je zaříznutá do údolí s minimální možností rozlivu vody do okolní nevyvinuté nivy. Přítoky v této části povodí stékají do Rolavy z poměrně strmých svahů. Možnost rozlivu má řeka až v dolní části povodí. Protipovodňová opatření mají potenciál v horských oblastech v místech, kde je možné zachytit vznikající povodňovou vlnu, tedy v horních částech povodí. Systém čtyř malých vodních nádrží v podobě suchých poldrů byl implementován do povodí Rolavy v její horní části jako příklad systému integrované ochrany před povodněmi.

Simulační procesy s-o chování povodí Rolavy během známých i variantních srážkových událostí probíhaly v modelu HEC-HMS. Program se osvědčil v řadě praktických studií nejen v ČR. Snadná dostupnost, přehlednost, propojení s prostředím GIS a uživatelská jednoduchost patří mezi jeho hlavní pozitiva. Model HEC-HMS jasně prokázal, že je vhodný pro analýzy s-o procesu na Rolavě a je schopný generovat kvalitní výstupy.

Před spuštěním simulací odtoku vody z povodí během N-letých srážkových scénářů, bylo potřeba model nakalibrovat na známé události a následně ověřit jeho použitelnost na jiné známé srážkové epizodě. Cílem kalibrace bylo co nejpřesnější vyobrazení charakteru povodí Rolavy. Výsledkem manuální i automatické kalibrace byla míra shody N-S 0,86 simulovaného hydrogramu se skutečným. Verifikace proběhla úspěšněji za shody N-S 0,89.

Systém čtyř teoreticky vyměřených poldrů prokázal vliv na snížení kulminačního průtoku během denních N-letých srážkových úhrnů. Pozitivní vliv suchých poldrů rostl s extremitou srážkové události. Role systému uvažovaných suchých poldrů v protipovodňové ochraně na povodí Rolavy se ukázala jako smysluplná.

Pomocí kombinace vhodných metod popisu s-o procesu byl model povodí Rolavy v prostředí HEC-HMS kvalitně nakalibrován a je použitelný pro další analýzy s-o procesu v daném území, čímž došlo k splnění hlavního cíle této práce.

8 Seznam použitých zdrojů a literatury

- ABULOHOM, M. S., SHAH, S. M. S., GHUMMAN, A. R. (2001): Development of Rainfall-Runoff model, its Calibration and Validation. *Water Resources Management*, 15, č. 3, s. 149 - 163.
- AL-ABED, N., ABDULLA, F., KHYARAH, A., A. (2004): GIS-hydrological models for managing water resources in the Zarqa River basin. *Environmental Geology*. Springer Berlin, 47, č. 3, s. 405-411
- ASHAGRIE, A., G. et al. (2006): Detecting the influence of land use changes on discharges and floods in the Meuse River Basin – the predictive power of a ninety-year rainfall-runoff relation? *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, s.691-701.
- BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): Geomorfologické členění Čech. Kartografie Praha. Praha, 80 s.
- BECKER, A, SERBAN, P. (1990): Hydrological models for water - resources system design and operation. Operational Hydrology Report No. 34, WMO, Ženeva, 80 s.
- BEDIENT, P. B., HUBER, W. C. (1989): Hydrology and Floodplain Analysis. Addison-Wesley, 650 s.
- BEVEN, K., J. (2001): Rainfall-runoff Modelling, The Primer. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, 360 s.
- BLAŽKOVÁ, Š. (1993): Srážko-odtokové Modelování založené na principu jednotkového hydrogramu. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka. Praha, 114 s.
- BOUGHTON, W., DROOP, O. (2002): Continuous simulation for design flood estimation – a review. *Environmental Modelling and Software*, 18, č.4, s. 309 - 318.
- BRATH, A., MONTANARI, A., MORETTI, G. (2005): Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty). *Journal of Hydrology*, 324, č. 1-4, s. 141 – 153
- BRÁDKA, J. (1963): O srážkovém stínu za Krušnými horami. *Meteorologické zprávy XVI*, č.2, Praha, s. 26-28.
- BUCHTELE, J. (2002): Úvod k metodám a modelům hydrologických předpovědí. In: *Povodně: prognózy, vodní toky a krajina*. ČVUT, s. 51-55.
- CORREIA, F., REGO, F. C., SARAIVA, M. G., RAMOS, I. (1998): Coupling GIS with Hydrologic and Hydraulic Flood Modelling. *Water Resources Management*. Springer, 12, č. 3, s. 229-249.
- CRWR – Center for Research in Water Resources (2007): Gis and water resource modelling at DHI, Mike-she main page [online], [cit. 2009-07-19]

<http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishyd98/dhi/mikeshe/Mshemain.htm>

CULEK, M. et al. (1996): Biogeografické členění České republiky. AOPK. Praha, 589 s.

ČEKAL, R. (2005): Hydrosynoptická analýza povodňových situací v povodí horní Ohře. Disertační práce, KFGG PřF UK, Praha, 220 s.

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav (2007a): Týdenní přehledy a denní přehledy zpracované na Oddělení meteorologických předpovědí na Centrálním předpovědním pracovišti v Praze-Komořanech. Nepublikované materiály.

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav (2007b): Radarové odhady srážek zpracované Oddělením radarových měření. Nepublikované materiály

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav (2006a): Týdenní přehledy a denní přehledy zpracované na Oddělení meteorologických předpovědí na Centrálním předpovědním pracovišti v Praze-Komořanech. Nepublikované materiály

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav (2006b): Radarové odhady srážek zpracované Oddělením radarových měření. Nepublikované materiály

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav (2006c): Vyhodnocení jarní povodně 2006 [online], c2000, poslední revize 30.10.2006 [cit. 2009-07-19]
<<http://www.chmu.cz/hydro/pov06/pdf/c52.pdf>>

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav (2004): Hydrologický předpovědní systém AquaLog [online], c2000, poslední revize 19.2.2004, [cit. 2009-07-19]
<<http://www.chmu.cz/hydro/ohv/aqualog/aqualog.html>>

DAŇHLEKA, J. (2007): Operativní hydrologie: Hydrologické modely a nejistota předpovědí. Český hydrometeorologický ústav. Praha, 104 s.

DAŇHELKA, J., KREJČÍ, J., ŠÁLEK, M., ŠERCL, P., ZEZULÁK, J. (2003): Posouzení vhodnosti aplikace srážko-odtokových modelů s ohledem na simulaci povodňových stavů pro lokality na území ČR. Český hydrometeorologický ústav. Praha, 196 s.

DAWDY, R. D., LICHTY, W. R., BERGMANN, J. M. (1972): A Rainfall-Runoff Simulation Model for Estimation of Flood Peaks for Small Drainage Basins. Geological Survey professional paper 506 – B. United States Government Printing office. Washington, 28 s.

DEMEK, J. et al. (1965): Geomorfologie českých zemí. Nakladatelství československé Akademie věd. Praha, 335 s.

DOHNAL, Z. (1965): Československá rašeliniště a slatiniště. Nakladatelství československé Akademie věd, Praha 332 s

FELDMAN, A. D. (2000): Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual. USACE, Davis, 155 s.

FLEMING, M. J., SCHARFFENBERG, W. A. (2006): Hydrological Modeling System HEC-HMS. User's manual. Us Army Corps of Engineers. Davis, 278 s.

FRIEDRICH, F. (2006): Význam poldrů při plánování opatření pro ochranu před povodněmi v Sasku- Anhaltsku. In: Vodní toky 2006. Sborník z konference. Hradec králové, s.25-28.

HEC USACE – Hydrologic Engineering Center US Army Corps of Engineers (2009): HEC -HMS [online], poslední revize 18.6. 2009 [cit. 2009-07-10]
<<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms>>

HERYNEK, J., TLAPÁK, V. (2002): Malé vodní nádrže. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Brno, 200 s.

HRÁDEK, F., SOUKUP, M. (1999): Optimální regulace povrchového odtoku z povodí. VÚMOP, Praha, 98 s.

HRÁDEK, F. (1990): Maximální odtok z velmi malých povodí. Doktorská disertační práce. AF ČZU. Praha, 39 s.

HLADNÝ, J. (2008): Aplikované hydrologie, podklady k přednášce

JANEČEK, M. et al. (2002): Ochrana zemědělské půdy před erozí. ISV nakladatelství. Praha, 201 s.

JANKOVÁ, J. (2006): Problematika určení plošných odhadů srážek na příkladu povodí Úpy. KFGG PŘF UK, bakalářská práce, Praha, 49 s.

JEDLIČKA, J., ŠTYCH, P. (2006): Hydrologické modelování v programu ArcGIS. Praha, 64 s.

JEDLIČKA, J., MENTLÍK, P. (2002): Hydrologická analýza a výpočet základních morfometrických charakteristik povodí s využitím GIS. Sborník Geoinformatika z XX. Sjezdu ČGS [online], [cit. 2009-07-12]
<http://pef.zcu.cz/pef/kgc/veda/misc/mentlik/hydr_analys.pdf>

JENÍČEK, M. (2009a): Modelování hydrologických procesů I, [online] c2007, poslední revize 28.4. 2009, [cit. 2009-07-20].
<<http://floodserv.natur.cuni.cz/jenicek/vyuka.php?akce=procesya>>

JENÍČEK, M. (2009b): Modelování hydrologických procesů II, [online] c2007, poslední revize 28.4. 2009, [cit. 2009-07-20].
<<http://floodserv.natur.cuni.cz/jenicek/vyuka.php?akce=procesyb>>

JENÍČEK, M. (2008): Modeling the effect of small reservoirs on flood regime in the Chomutovka river basin. In: XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, 2.-4. June 2008. Ljubljana [online] c2007, poslední revize 28.4. 2009, [cit. 2009-07-20].
<<http://floodserv.natur.cuni.cz/jenicek/profil.php?akce=publikace>>

JENÍČEK, M. (2007): Modelování vlivu krajinného pokryvu na srážko-odtokové procesy metodou CN křivek. In: Sborník semináře Změny v krajině a povodňové riziko, PŘF UK, Praha, s. 41 – 49.

JENÍČEK, M. (2005): Aplikace matematického modelu NASIM pro simulaci srážko-odtokových poměrů v povodí Černé vody. Diplomová práce, KFGG, Praha, 100 s.

JUST, T. (2005): Vodohospodářské revitalizace a jejich uplatnění v ochraně před povodněmi. Český svaz ochránců přírody, Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Ministerstvo životního prostředí. Praha, 359 s.

KOREN, V. I. et al.. (1999): Scale dependencies of hydrologic models to spatial variability of precipitation. *Journal of hydrology*, 217, č. 3 – 4, s. 285 – 302.

KRÁL, V. (1968): Geomorfologie vrcholové oblasti Krušných hor a problém paroviny. Academia. Praha, 65 s.

KRAUSE, P., BOYLE, D. P., BÄSE, F. (2005): Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, s. 89 – 97.

KULASOVÁ, B., ŠERCL, P., BOHÁČ, M. (2004): Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Závěrečná zpráva. ČHMÚ, Praha, 127 s.

KUNSKÝ, J. (1974): Československo fyzicky zeměpisně. Státní pedagogické nakladatelství. Praha, 251 s.

LANGHAMMER, J., ŠOBR, M., VANĚK, T. (2008): Současné přístupy k řešení protipovodňové ochrany na příkladu povodí horní Opavy. In: Langhammer, J. (2008): Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní. PŘF UK, Praha, s. 52-70.

LANGHAMMER, J. (2007): Současné přístupy k hodnocení a modelování povodňového rizika. In: Povodně a změny v krajině. PŘF UK, Praha, s. 13 – 31.

LEDVINKA, O. (2008): Trendy srážko-odtokového režimu v povodí Rolavy. Diplomová práce, KFGG PŘF UK, Praha, 122 s.

LEDVINKA, O. (2006): Srážko-odtokové poměry v povodí Rolavy. Ročníková práce, PŘF UK, Praha, 94 s.

LELUT, J. (2007): Vodohospodářské revitalizace na podkladě ekomorfologického monitoringu vodních toků. Magisterská práce. PŘF UK, Praha, 134 s.

LETT, P., DAŇHELKA, J. (2002): Požadavky na meteorologické a hydrologické vstupy do hydrologických modelů. In: Povodně: prognózy, vodní toky a krajina. FSV ČVUT. ČVTVS, Praha, s. 41-46.

MAIDMENT, D. R., KNEBL, M.R., YANG, Z. L., HUTSCHISON, K. (2004): Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75, č. 4 s. 325 - 336.

- MAIDMENT, D. R., DJOKIC, D. (2000): Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems. Esri Press. Redlands, 216 s.
- MAIDMENT, D. R., OLIVER, F. (1999): GIS Tools for HMS Modeling Support. 19th Annual ESRI International User Conference. San Diego [online], [cit. 2009-05-08] . <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap801/p801.htm>>
- MAIDMENT, D. R. (1993): Handbook of hydrology. McGraw-Hill, New York, 1424 s.
- MCCOLL, C., AGGETT, G. (2007): Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. Journal of Environmental Management. Elsevier, 84, č. 4, s. 494 – 512
- MCCUEN, R. H., KNIGHT, Z., CUTTER, A. G. (2006): Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. Journal of Hydrologic Engineering, 11, č. 6, s. 597 – 602.
- Ministerstvo životního prostředí České republiky (2007): Směrnice evropského parlamentu a rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik [online]. c2008 [cit. 2009-07-20]. <http://iris.env.cz/AIS/web-pub2.nsf//cz/smernice_2007_60_es>
- MISHRA, S. K., SINGH, V. P. (2003): Soil Conservation Service curve number (SCS-CN) methodology. Kluwer, Dordrecht, 513 s.
- MOSTECKÁ, J. (2005): Fyzickogeografická charakteristika a zhodnocení míry antropogenního ovlivnění povodí Rolavy. Ročníková práce, PřF UK, Praha, 59 s.
- MZE – Ministerstvo zemědělství České republiky (2006): Ochrana před povodněmi v Bavorsku [online], poslední revize 18.5.2007, [cit. 2009-07-17] <http://www.mze.cz/UserFiles/File/1600/16320/Ochrana_pred_povodnemi_v_Bavorsku_POLDRY.pdf>
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I – a Discussion of principles. Journal of Hydrology, 10, č. 3, s. 282 – 290.
- PAIL, T. (2009): osobní sdělení, 6. 5. 2009
- ROUB, R. (2008): Využití matematických modelů pro předpověď maximálních odtoků v povodí. In: Monitoring a vyhodnocení extrémních odtokových poměrů v povodí drobných vodních toků z hlediska prevence a zmírňování povodňových škod. Sborník workshopu. FŽP ČZU a VÚMOP, Praha, s. 85 – 90.
- ROUB, R., PAVLÁSEK, J. (2004): Comparison of models DesQ-MAX Q a HEC-HMS. In: Sustain Life Secure Survival II, Social and Environmentally Responsible Agribusiness, 22 – 25 September [CD-ROM], Praha
- RŮŽIČKOVÁ, M. (2009): Vliv prostorového rozložení srážek v povodí horní Chomutovky na výsledky simulací v modelu HEC-HMS. Diplomová práce KFGG, Praha, 131 s.

- ŘEZÁČOVÁ, D. (1999): Vývoj metod pro stanovení pravděpodobné maximální srážky. Grantový projekt VaV 510/3/97 „Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní“. Závěrečná zpráva za rok 1999. ČHMÚ, Praha, 43 s.
- SCHULTE, A. (2008): Zusammenfassung der Projektergebnisse. Závěrečná zpráva INTERREG III A Projektu DINGHO. Freie Universität Berlin. Berlin, 25 s.
- SKLENÁŘ, P. (2007): Nejistoty modelů a přístupů aplikovaných v říčním inženýrství, povrchové a podpovrchové hydrologii. FSV ČVUT, Praha, 86 s.
- SMHI - Sveriges meteorologiska och Hydrologiska Institut (2003): Homepage of the Original HBV-model [online],, poslední revize 21.3.2003, [cit. 2009-07-19] <http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html/welcome.html>
- SMITH, M. B. et al. (2004): Runoff response to spatial variability in precipitation: an analysis of observed data. Journal of hydrology, 298, č. 1- 4, s. 267 – 286.
- SPITZ, P, PRUDKÝ, J. (2001): Metodika výpočtu retence vody v povodí při povodních. VÚMOP. Praha, 41 s.
- STARÝ, M. (2005): Operativní řízení odtoku vody z povodí za povodňových situací a užití metod umělé inteligence. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 41 s.
- ŠÁLEK, J. (1996): Malé vodní nádrže v životním prostředí. Vysoká škola báňská. Ostrava, 141 s.
- ŠERCL, P. (2007): Vliv fyzickogeografických faktorů na charakteristiky teoretických návrhových povodňových vln. Disertační práce, KFGG PřF UK. Praha, 162 s.
- ŠERCL, P. (2006): Rozvoj a testování modelovacího systému pro predikci povodňových otoků v malých povodích, DÚ 3 VaV 1D/1/5/05
- ŠERCL, P. (2005): Metodický postup ČHMÚ pro odvození teoretických povodňových vln deterministickými přístupy. In: Návrhové průtoky a objemy povodňových vln na velmi malých povodích. ČZU, Praha, str. 11 – 12.
- ŠKVOR, V. (1975): Geologie české části Krušných hor. Ústřední ústav geologický. Praha, 120 s.
- TAUFMANNOVÁ, A. (2007): Vliv hospodaření v krajině na průběh a následky povodní na příkladu povodí horní Litavky. Bakalářská práce, KFGG PřF UK, Praha, 61 s.
- TODD, D. K. (1980): Groundwater Hydrology. New York, 535 s.
- TOLASZ, R. et al. (2007): Atlas podnebí Česka. ČHMÚ a UP Olomouc, Praha, 256 s.
- TOMÁŠEK, M. (2003): Půdy České republiky. Česká geologická služba. Praha, 67 s.

UNUCKA, J., ADAMEC, M., HANZALOVÁ, M., HORÁK, J. (2007): Modelování hydrologických extrémů s podporou DPZ a GIS. In: Sborník semináře Změny v krajině a povodňové riziko, PřF UK. Praha, s. 51 – 61.

UNUCKA, J., ADAMEC, M., BŘEZKOVÁ, L., HANZALOVÁ, M., HORÁK, J. (2006): Modelování vlivu land use na srážko-odtokové vztahy s podporou GIS. Příspěvek na konferenci Říční krajina 4, PřF UPOL. Olomouc, s. 335 – 350.

VOLOŠ, B. (2007): Odvození extrémních povodňových vln v malých povodích deterministickými nástroji [online], FSV ČVUT, poslední revize 12.4.2007, [cit. 2009-07-20]

<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/vyzkum/nejistoty/hydrologie/odvozeni.html>

VRÁNA, K., BERAN, J. (2008): Rybníky a účelové nádrže. České vysoké učení technické. Praha, 150 s.

VÚMOP - Výzkumný ústav meliorací a ochrany půd (2008): Základní charakteristiky BPEJ Mapová aplikace SOWAC GIS [online] c2008, [cit. 2009-07-11]

http://ms.sowac-gis.cz/mapserv/dhtml_zchbpej/index.php?project=dhtml_zchbpej&layers=kraj

VÚV (2006): Základní charakteristiky toku Rolava a jeho povodí. Poster, Praha, 2 s.

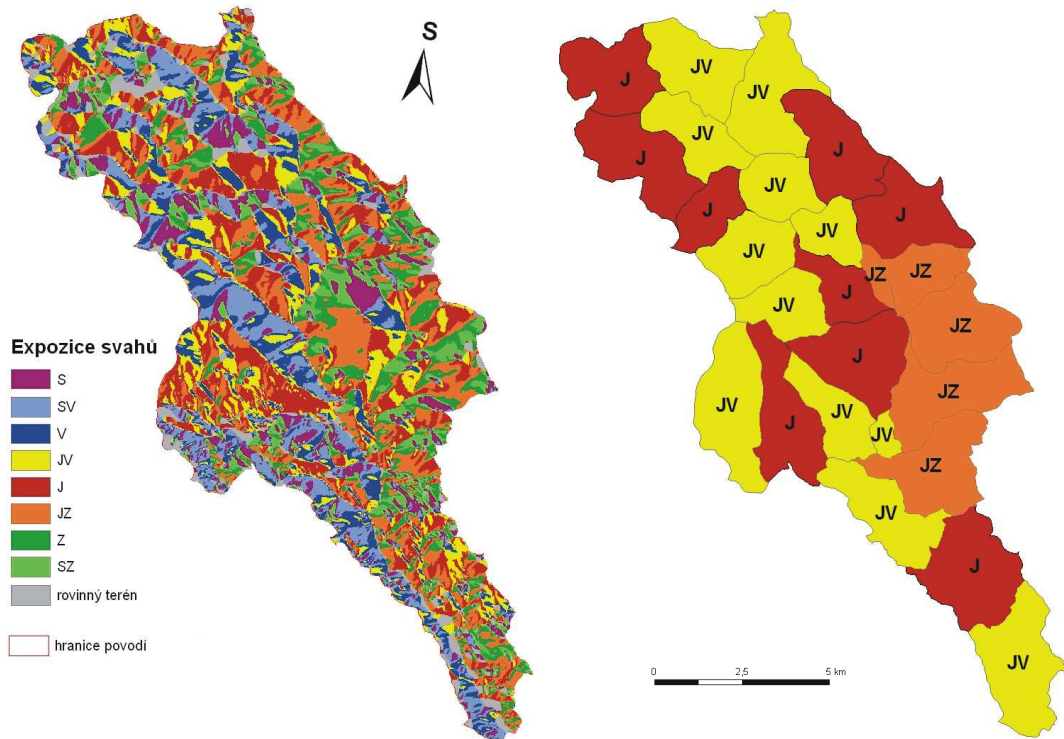
ZOUBEK, V. et al. (1963): Vysvětlivky k přehledné geologické mapě 1:200 000. List M-33-XIII Karlovy Vary. Ústřední ústav geologický, Praha, 290 s.

8.1 Seznam mapových a datových podkladů

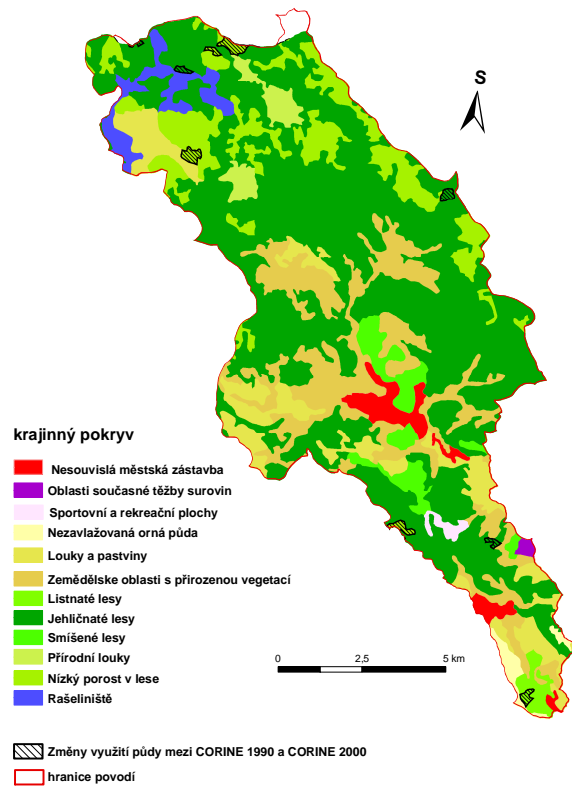
- Data vegetačního pokryvu CORINE Land Cover 1990 a 2000, MŽP ČR
- Srážková data ze stanic Nejdek, Abertamy, Klínovec, Karlovy Vary –lázně, Karlovy Vary – letiště, Šindelová, Luby, Oloví, ČHMÚ
- Srážková data ze stanic Fichtelberg a Carlsfeld, DWD
- Srážková data ze stanic Přebuz a Citice, POH
- Průtoky z limnigrafické stanice Stará Role, ČHMÚ
- Vlastní měření příčných profilů v terénu
- Vlastní měření parametrů nádrží v terénu
- Digitální báze vodohospodářských dat DIBAVOD, VÚV T.G.M
- Digitální mapový model zemí ČR ZABAGED 1:10 000 povodí Rolavy, ČZÚK
- Digitální vrstva hydrologických skupin půd pro povodí Rolavy, ČHMÚ
- Mapové služby portálu veřejné správy ČR <http://geoportal.cenia.cz>
- ČGS : Geologická mapa ČR 1:50 000, list 11-12 Kraslice, list 11-21 Karlovy Vary, list 01-43 Horní Blatná, 01-34 Rolava.
- Hydrogeologická mapa ČR 1:50 000. List 01-34 Rolava, 01-43 Horní Blatná, 11-12 Kraslice, 11-21 Karlovy Vary. Ústřední ústav geologický, Kolín.

Přílohy

Příloha 1: Expozice svahů v povodí Rolavy (vlevo), průměrná orientace svahů v subpovodích (vpravo) (DIBAVOD)



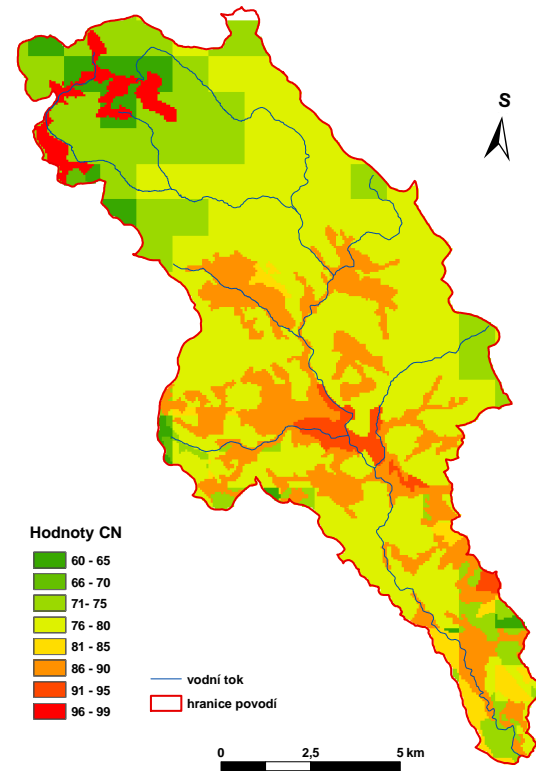
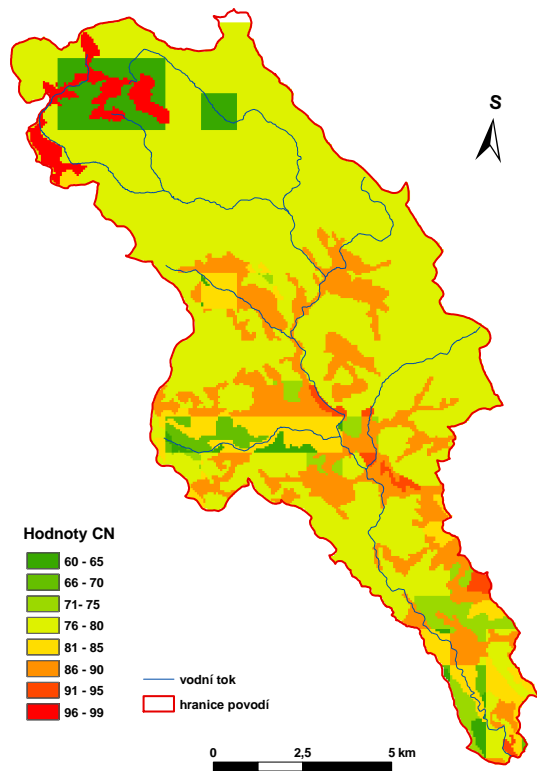
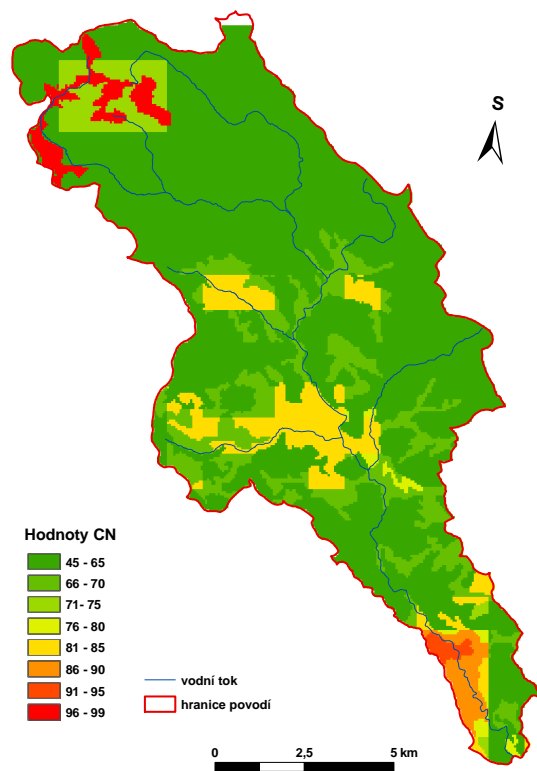
Příloha 2: Krajinový pokryv CORINE Land cover 2000 (<http://geoportal.cenia.cz>)



Příloha 3: Hodnoty CN pro jednotlivé kategorie využívání území a HSP (Šercl, 2006)

ID	Kategorie využívání území	A	B	C	D
111	Souvislá městská zástavba	81	88	91	93
112	Nesouvislá městská zástavba	77	85	90	92
121	Průmyslové a obchodní areály	85	90	93	94
122	Cestní, železniční síť a přilehlé areály	85	90	93	94
123	Přístavy	85	90	93	94
124	Letiště	85	90	93	94
131	Těžba nerostných surovin	85	90	93	94
132	Skládky	85	90	93	94
133	Výstavba	85	90	93	94
141	Městská zeleň	45	65	77	82
142	Areály sportu	45	65	77	82
211	Orná půda	64	73	83	87
221	Vinice	54	70	79	84
222	Ovocné stromy	45	66	77	83
231	Louky a pastviny	49	69	79	84
241	Jednoroční plodiny	65	75	83	86
242	Pole, louky, kultury	54	72	82	87
243	Zemědělské areály	71	82	87	90
311	Listnaté lesy	45	61	74	80
312	Jehličnaté lesy	45	61	74	80
313	Smišené lesy	45	61	74	80
321	Přirozené louky	45	60	73	79
322	Vřesoviště a slatiny	99	99	99	99
324	Leso-křoviny	45	60	72	78
331	Pláže, duny a písky	77	86	91	94
332	Skály	77	86	91	94
333	Řídká vegetace	63	77	84	89
334	Spáleniště	77	86	91	94
335	Ledovce a věčný sníh	99	99	99	99
411	Močály a rašeliniště	99	99	99	99
412	Rašeliniště	99	99	99	99
511	Vodní toky	100	100	100	100
512	Vodní plochy	100	100	100	100

Příloha 4: Hodnoty CN odvozené na základě HSP dle infiltrace (vlevo), dle RVK (uprostřed) a dle sklonitosti (vpravo) (DIBAVOD, ČHMÚ, vlastní zpracování)



Příloha 5: Přehled základních fyzickogeografických charakteristik a parametry výpočtu objemu odtoku podle subpovodí (DIBAVOD, ZABAGED)
(šedivě kalibrované hodnoty)

Hydro_ID	subpovodí	délka úseku [m]	plocha [km ²]	max nadm.v. [m n. m.]	min nadm.v. [m n. m.]	sklon úseku [m/m]	Y(sklon povodí) [%]	CN	CN kalibrace	I _a (počáteční ztráta)	I _a kalibrace
1	Rolava_horni_1	2580	5,204	930	910	0,00775	4,363	76	61	16,002	10,561
2	Rolava_horni_2	4224	5,898	910	860	0,01184	7,556	71	57	20,822	13,742
3	Rolava_horni_3	690	2,693	825	815	0,01449	8,959	66	53	25,636	16,920
4	Jeleni_2	1680	2,366	885	825	0,03571	9,042	67	53	25,406	16,768
5	Cerna_voda_1	1317	5,276	906	870	0,02733	6,471	71	57	20,361	13,438
6	Cerna_voda_2	1985	6,693	870	850	0,01008	8,589	66	53	25,810	17,035
7	Cerna_voda_3	4285	5,741	850	745	0,02450	20,333	68	54	24,367	16,082
8	Rolava_horni_4	2968	3,609	805	745	0,02022	16,665	68	54	24,063	15,881
9	Rolava_stred_1	2397	2,816	745	690	0,02295	20,859	69	55	23,064	15,222
10	Rudny_1	2160	4,650	895	745	0,06944	12,408	73	59	18,402	12,145
11	Bily_1	4556	5,543	960	720	0,05268	19,008	69	55	22,912	15,122
12	Bily_2	2511	3,283	990	720	0,10753	19,858	73	59	18,420	12,157
13	Bily_3	604	0,865	720	690	0,04967	21,151	79	64	13,180	8,699
14	Rolava_stred_2	2550	3,098	690	640	0,01961	20,628	72	57	20,028	13,218
15	Rudny_2	2382	3,821	745	640	0,04408	15,064	76	61	15,944	10,523
16	Nejdecky_1	1665	6,886	661	611	0,03003	11,795	74	59	17,965	11,857
17	Nejdecky_2	2238	5,860	611	570	0,01832	12,468	74	59	18,179	11,998
18	Nejdecky_3	1652	3,793	570	550	0,01211	14,396	82	65	11,405	7,527
19	Rolava_stred_3	3733	6,190	640	550	0,02411	20,052	76	61	16,353	10,793
20	Rolava_stred_4	1286	0,815	550	530	0,01555	20,088	78	63	14,108	9,311
21	Liminice	3342	5,861	927	697	0,06882	16,643	68	54	24,220	15,985
22	Oldrichovsky	5181	6,492	697	530	0,03223	19,907	72	58	19,584	12,926
23	Rolava_dolni_1	2235	6,200	530	496	0,01521	18,123	75	60	16,886	11,145
24	Rolava_dolni_2	4842	5,314	496	490	0,00124	19,397	71	57	20,410	13,471
25	Rolava_dolni_3	2970	6,917	490	422	0,02290	12,643	77	62	15,085	9,956
26	Rolava_dolni_4	4414	6,871	422	399	0,00521	8,036	78	62	14,673	9,684
27	Jeleni_1	1650	1,818	925	885	0,02424	5,206	79	63	13,487	8,901
28	Rolava_dol_nadrz	500	0,408	815	805	0,02000	15,615	67	54	24,927	16,452
29	Rolava_hor_nadrz	913	0,358	860	825	0,03834	15,492	68	54	24,135	15,929

Příloha 6: Přehled parametrů vstupujících do výpočtu Clarkova UH podle subpovodí (DIBAVOD, ZABAGED) (šedivě kalibrované hodnoty)

Hydro_ID	subpovodí	L (max délka odtoku) [ft]	L (max délka odtoku) [mi]	S (pot.retence) [in]	S (pot.retence) [mm]	T _{lag} [h]	Rc [h]	S ₁₀₈₅ [ft/mi]	Tc [h]	Tc [h] kalibrace
1	Rolava_horni_1	11133,629	2,109	3,150	80,011	1,178	3,816	65,030	1,964	5,011
2	Rolava_horni_2	13992,506	2,65	4,099	104,108	1,242	3,818	71,740	2,070	7,638
3	Rolava_horni_3	8484,123	1,607	5,046	128,179	0,861	1,116	273,900	1,435	4,457
4	Jeleni_2	8106,204	1,535	5,001	127,031	0,822	1,306	220,170	1,370	4,409
5	Cerna_voda_1	11678,631	2,212	4,008	101,805	1,147	3,352	78,220	1,911	3,232
6	Cerna_voda_2	12137,356	2,299	5,081	129,052	1,176	2,320	126,700	1,960	7,476
7	Cerna_voda_3	15475,249	2,931	4,797	121,835	0,898	2,642	119,400	1,496	4,540
8	Rolava_horni_4	11156,319	2,113	4,737	120,313	0,758	2,470	112,870	1,263	4,284
9	Rolava_stred_1	9725,871	1,842	4,540	115,319	0,592	1,084	301,650	0,987	4,007
10	Rudny_1	8635,023	1,636	3,622	92,010	0,615	0,845	392,750	1,025	6,038
11	Bily_1	16820,123	3,186	4,510	114,559	0,958	1,316	299,200	1,596	10,341
12	Bily_2	9537,167	1,806	3,626	92,101	0,527	0,674	545,850	0,878	3,916
13	Bily_3	3566,513	0,676	2,595	65,902	0,195	0,267	1151,450	0,324	5,010
14	Rolava_stred_2	12073,179	2,287	3,943	100,140	0,653	1,077	333,880	1,089	6,134
15	Rudny_2	12454,675	2,359	3,139	79,720	0,692	1,142	314,420	1,154	6,231
16	Nejdecky_1	12185,199	2,308	3,536	89,825	0,820	0,879	433,400	1,367	4,394
17	Nejdecky_2	14243,522	2,698	3,579	90,897	0,909	1,035	377,430	1,516	4,516
18	Nejdecky_3	10785,282	2,043	2,245	57,025	0,532	0,976	360,120	0,887	2,591
19	Rolava_stred_3	16410,337	3,108	3,219	81,764	0,758	1,421	268,550	1,264	6,396
20	Rolava_stred_4	5636,560	1,068	2,777	70,538	0,298	0,838	330,080	0,497	3,427
21	Liminice	12255,078	2,321	4,768	121,099	0,820	0,984	377,060	1,367	6,576
22	Oldrichovsky	18387,018	3,483	3,855	97,921	0,920	0,991	445,000	1,533	10,199
23	Rolava_dolni_1	14813,169	2,806	3,324	84,432	0,748	1,323	281,220	1,246	6,400
24	Rolava_dolni_2	16805,887	3,183	4,018	102,052	0,887	1,618	230,270	1,479	2,926
25	Rolava_dolni_3	14626,241	2,77	2,970	75,426	0,835	1,399	260,560	1,391	4,217
26	Rolava_dolni_4	14132,070	2,677	2,888	73,366	1,004	7,128	32,690	1,673	4,718
27	Jeleni_1	6635,515	1,257	2,655	67,433	0,652	1,598	156,470	1,087	9,196
28	Rolava_dol_nadrz	3077,703	0,583	4,907	124,634	0,285	0,472	525,330	0,475	3,509
29	Rolava_hor_nadrz	3595,332	0,681	4,751	120,675	0,318	0,750	312,510	0,530	3,564

Příloha 7: Uvažované umístění suchého poldru na Slatinném potoce (Foto: Autor)



Příloha 8: Uvažované umístění suchého poldru na Jelením potoce (Foto: Autor)



Příloha 9: Uvažované umístění suchého poldru Rolava_horní (Foto: Autor)



Příloha 10: Uvažované umístění suchého poldru Rolava_dolní (Foto: Autor)



