

Ministerstvo životního prostředí

VYHODNOCENÍ POVODNÍ V ČERVNU 2013



*ATROPOGENNÍ OVLIVNĚNÍ
POVODŇOVÉHO REŽIMU*

Dílčí zpráva



ČESKÝ
HYDROMETEOROLOGICKÝ
ÚSTAV

Zadavatel: Ministerstvo životního prostředí
odbor ochrany vod
Vršovická 65
100 00 Praha 10

Projekt: **VYHODNOCENÍ POVODNÍ V ČERVNU 2013**

Nositel projektu: Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 17
143 06 Praha 4

Koordinátor projektu: Ing. Jan Kubát, RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D.

Doba řešení projektu: 9/2013 – 6/2014

Část: **ANTROPOGENNÍ OVLIVNĚNÍ POVODŇOVÉHO
REŽIMU**

Nositel části: Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 17
143 06 Praha 4

Odpovědný řešitel: Ing. Jan Kubát

Řešitelé: Ing. Jan Kubát
Ing. Jakub Krejčí, MSc. Ph.D.
Ing. Pavel Tachecí, Ph.D.
Ing. Michal Korytář
Mgr. Jana Kaiglová

Místo uložení zprávy: MŽP, odbor ochrany vod
ČHMÚ, Středisko informačních služeb

OBSAH

1. ÚVOD	strana 4
2. VLIV VODNÍCH NÁDRŽÍ NA POVODŇOVÝ REŽIM	... 5
2.1 Shrnutí výsledků předchozích prací o vlivu nádrží na průběh povodní	... 6
2.2 Ověření vlivu údolních nádrží na průběh povodní dolů po toku	... 9
2.2.1 Simulace vlivu nádrží na povodně v období 2003 – 2013	... 9
2.2.2 Simulace průběhu povodně v červnu 2013 s vlivem nádrží na Vltavě a Ohři	12
2.2.3 Simulace průběhu povodně v červnu 2013 s vlivem nádrží na horním Labi..	14
3. VLIV ZMĚN UŽÍVÁNÍ KRAJINY NA ODTOK V POVODÍ BOTIČE	... 15
3.1 Výsledky simulací pro podmínky užití území v roce 2013 a 1988	... 17
3.2 Výsledky simulací pro suché počáteční podmínky	... 18
4. SHRNUÍ	... 20

PŘÍLOHY:

Příloha 1 – **Ověření vlivu údolních nádrží na průběh povodní dolů po toku**
(AquaLogic Consulting, s.r.o.)

Příloha 2 – **Ověření vlivu změn užívání krajiny na odtok v modelovém povodí Botiče nad VD Hostivař**
(DHI a.s.)

1. ÚVOD

Přirozený povodňový režim vodních toků je zásahy lidské činnosti stále více ovlivňován. Jsou to jednak zásahy v krajině, zejména postupující urbanizace, která zpravidla omezuje retenční schopnosti krajiny a urychluje odtok vody. Výstavba liniových protipovodňových opatření, tj. zkapacitnění koryt toků a podélné hráze obvykle chrání přilehlé území, avšak zmenšením přirozených inundací mohou nepříznivě ovlivnit průběh povodně dolů po toku. Významný je vliv nádrží, rybníků a suchých polderů, které zachytí část povodňové vlny a omezují více či méně negativní účinky povodní na toku pod nádrží.

Tyto vlivy se projevovaly postupně již dávno v historii, takže nelze jednoznačně stanovit počátek ovlivnění. Pro účely zpracování hydrologických řad pokládáme stav před zahájením systematických hydrologických pozorování za „přirozený režim“, i když se zde jistě již projevoval vliv rozsáhlých rybníčních soustav vybudovaných v 16. století. Zásahy člověka do krajiny a sítě vodních toků ovšem pokračovaly a pokračují až do současnosti a jejich vliv se bezesporu projevuje v pozorovaných hydrologických řadách. Zejména v 50. až 70. letech minulého století byly v ČR vybudovány velké vodní nádrže, které významně ovlivňují vodní režim na toku pod nádrží.

Hydrologický režim našich vodních toků tedy nelze, až na výjimky, pokládat za stacionární a časové řady hydrologických řad za homogenní. Na druhé straně stacionarita a homogenita řad je předpokladem pro jejich statistické zpracování, na kterém je založeno odvození hydrologických charakteristik, například N-letých průtoků. Český hydrometeorologický ústav vydává, v souladu s normou ČSN 75 1400 *Hydrologické údaje povrchových vod*, standardní hydrologické údaje odpovídající režimu toků v období, ze kterého byly odvozeny. Pro odvození charakteristik malých průtoků je obvykle použito období posledních 30 let. Protože však výskyt velkých povodní je časově velmi nepravidelný, je pro odvození hydrologických dat charakterizujících povodňový režim využíváno co nejdelší období, zpravidla od začátku systematického pozorování na daném toku. Z podkladové řady je pokud možno eliminováno výrazné a prokazatelné ovlivnění provozem vodních děl, což je zpravidla možné pouze bezprostředně pod vodním dílem. Dále dolů po toku, kde se zapojují další přítoky a větší mezipovodí, se odovlivnění běžně neprovádí.

V průběhu druhé poloviny 20. století, kdy se již projevoval vliv většiny rozhodujících vodních nádrží a dalších staveb a aktivit na průběh povodní, byl výskyt větších povodní sporadický. Antropogenně ovlivněné byly tedy spíše menší povodně, které však zásadně neovlivňovaly charakteristiky návrhových povodní s malou pravděpodobností výskytu, např. 100-letých povodní. Ovšem s výskytem velkých povodní, které vstupují do hodnocení v posledních 15 letech, se problém nehomogenity řad stal zásadním a jeho řešení aktuální potřebou.

Vyvinutí a aplikace vhodných metodických postupů pro zohlednění antropogenních vlivů při odvozování návrhových hydrologických dat je otázkou dlouhodobého hydrologického výzkumu mimo možnosti tohoto projektu. V tomto dílčím úkolu bylo analyzováno ovlivnění průběhu povodní v červnu 2013 ve zvolených lokalitách (povodích) a to

- vliv vodních nádrží na průběh povodní na dolní Vltavě a Labi
- vliv vodních nádrží na průběh povodně na horním Labi
- vliv změn užívání krajiny na odtok v modelovém povodí Botiče

Dalším významným vlivem na průběh povodní je omezení rozsáhlých přirozených inundací výstavbou liniových protipovodňových opatření (hrází). Dosavadní výsledky naznačují možný významný vliv protipovodňových opatření (PPO) vybudovaných na Mělnicku v soutokové oblasti Labe a Vltavy. Analýza tohoto problému již v tomto projektu provedena nebyla. Povodí Vltavy, s.p. připravuje projekt *Dolní Vltava - podklady pro optimalizaci zvládání povodňových rizik a ochrany před povodněmi*, kde bude analýza změn hladin, rozsahu rozlivů a objemů vyvolaných výstavbou PPO řešena.

2. VLIV VODNÍCH NÁDRŽÍ NA POVODŇOVÝ REŽIM

Vliv vodních nádrží na povodňový režim byl již zkoumán v několika studiích. Pozornost byla zaměřena na nádrže Vltavské kaskády a jejich možný vliv na kulminaci povodní na Vltavě v Praze, popřípadě na Labi v Ústí nad Labem nebo v Děčíně. Protože každá povodeň má jinou genezi a ve vějířovitém povodí Vltavy se různě skládá z povodňových vln na přítocích, z nichž některé jsou nádržemi ovlivněné, je nutno řešit ovlivnění každé povodně samostatně. U mladších povodní ovlivněných nádržemi se odhaduje, jaký by byl jejich průběh bez vlivu nádrží (odovlivnění). V případě starších povodní zaznamenaných před výstavbou nádrží se odhaduje, jak by byl jejich průběh ovlivněn dnešními nádržemi. Cílem je získat v příslušných profilech dvě homogenní hydrologické řady kulminačních průtoků, jednu pro „přirozené“ povodně neovlivněné nádržemi a jednu pro povodně ovlivněné provozem nádrží. Statistickým zpracováním těchto řad lze pak v posuzovaných profilech odvodit N-leté průtoky ovlivněné a neovlivněné provozem nádrží.

Obě úlohy jsou zatíženy značnými nejistotami, se kterými se i dnešní moderní modelovací nástroje stěží vypořádávají. Při odovlivnění novějších povodní je nutno simulovat průběh povodňové vlny původním korytem toku, který byl před výstavbou nádrží, což je zvláště v případě dlouhého úseku dnešní Vltavské kaskády problémové. Při simulaci ovlivnění starých povodní dnešními nádržemi je nutno zvolit počáteční naplnění nádrží a způsob manipulace, který by odpovídal současným podmínkám. Dalším problémem je, že pro starší povodně je k dispozici menší rozsah srážkových a průtokových dat. Provedené analýzy pro Vltavu proto většinou začínají až povodní v září 1890, třebaže v záznamech jsou i významné povodně starší (například v roce 1845).

V povodí českého Labe je v současné době celkem téměř 120 údolních nádrží (s objemem nad 0,3 mil. m³) jejichž celkový ovladatelný objem přesahuje 2,5 mld. m³. Většina těchto nádrží je víceúčelových. Pro ochranu před povodněmi mají největší význam nádrže, které mají vymezen ovladatelný ochranný prostor a ovládají dostatečně velké povodí, aby se jejich vliv mohl projevit dolů po toku (Tab. 2.1). Tyto nádrže ovládají 41 % plochy povodí Labe po státní hranici. Retenční výška je množství srážek (mm) na povodí nádrže, které pojme vymezený ovladatelný ochranný prostor nádrže, vyjadřuje tedy velikost jejího lokálního retenčního účinku. Ten dolů po toku s narůstající plochou podpovodí klesá. Zkoumáním dosahu ochranného účinku nádrží dolů po toku se zabývalo několik prací.

Tab. 2.1 – Vodní nádrže v povodí Labe s významným ochranným účinkem

Nádrž	Tok	Uvedení do provozu	Plocha povodí (km ²)	Procentní část povodí Labe	Celkový ovlad. objem (mil. m ³)	Ochranný ovlad. objem (mil. m ³)		Retenční výška zimní (mm)
						zimní	letní	
Labská	Labe	1916	61.0	0.12	2.66	1.31	1.31	21.5
Les Království	Labe	1922	531.8	1.03	6.08	4.78	4.45	9.0
Rozkoš	Úpa	1973	415.4	0.81	76.33	26.84	19.80	64.6
Pastviny	Divoká Orlice	1938	180.8	0.35	8.77	1.96	1.25	10.8
Hamry	Chrudimka	1912	56.8	0.11	2.50	1.16	1.16	20.3
Seč	Chrudimka	1934	216.2	0.42	18.49	3.17	3.17	14.7
Pařížov	Doubrava	1913	202.4	0.39	1.52	1.21	1.21	6.0
Lipno I	Vltava	1960	948.2	1.84	309.50	33.17	33.17	35.0
Orlík	Vltava	1963	12106.0	23.55	716.50	62.07	62.07	5.1
Slapy	Vltava	1957	12956.8	25.20	269.30	0.00	0.00	0.0
Římov	Malše	1978	488.5	0.95	33.64	1.55	1.55	3.2

Nádrž	Tok	Uvedení do provozu	Plocha povodí (km ²)	Procentní část povodí Labe	Celkový ovlad. objem (mil. m ³)	Ochranný ovlad. objem (mil. m ³)		Retenční výška zimní (mm)
						zimní	letní	
Rožmberk	Lužnice	1590	1376.0	2.68	13.58	7.40	7.40	5.4
Husinec	Blanice	1939	212.5	0.41	5.64	2.82	2.82	13.2
Nýrsko	Úhlava	1969	80.9	0.16	18.94	2.01	2.01	24.8
Hracholusky	Mže	1964	1609.4	3.13	41.71	4.58	4.58	2.8
Žlutice	Střela	1968	213.8	0.42	12.80	1.30	1.30	6.1
Švihov	Želivka	1975	1178.5	2.29	266.56	0.00	0.00	0.0
Skalka	Ohře	1976	671.9	1.31	15.92	12.55	1.35	18.7
Jesenice	Odrava	1961	411.0	0.80	52.75	13.15	3.49	32.0
Březová	Teplá	1937	294.2	0.57	4.70	3.13	3.13	10.7
Stanovice	Lomnický p.	1978	92.1	0.18	24.22	4.19	2.41	45.5
Nechranice	Ohře	1968	3590.3	6.98	272.43	36.56	36.56	10.2
Újezd	Bílina	1981	93.0	0.18	6.73	3.23	2.09	34.7
Celkem			21269.2	41.37	2 181.27	228.13	196.25	10.7

2.1 Shrnutí výsledků předchozích prací o vlivu nádrží na průběh povodní

První známá studie, zabývající se u nás tímto problémem, byla zřejmě **studie Bratránka *Hydrologický výzkum vltavské kaskády a jiných vodních děl (1957)***, která posuzovala možnosti zlepšení ochrany velké Prahy před povodněmi. V té době byly ve funkci pouze Slapy a starší stupně kaskády. Autor tedy pro odhad vlivu novějších vodních děl (Lipno, Orlík) musel vycházet pouze z jejich projektové dokumentace, včetně informací o rozdělení nádržního prostoru a způsobu manipulace. Byly publikovány výsledky řešení pro 9 povodní (1890, 1896, 1897, 1900, 1915, 1920, 1940, 1947, 1954) přičemž snížení kulminačního průtoku v Praze bylo od 0 do 680 m³.s⁻¹ (nulové snížení pro největší řešenou povodeň 1890).

Vlivem Vltavské kaskády na povodňový režim v Praze se dále zabýval Kašpárek (Vodní hospodářství 7/1990), který posuzoval řadu pozorovaných kulminačních průtoků v Praze za období 1827 – 1988 a variantně řadu ovlivněných a neovlivněných kulminačních průtoků za období 1955 – 1988. Hodnoty zmenšení kulminačního průtoku jednotlivých povodní na výtoku z kaskády byly převzaty z vodohospodářského dispečinku podniku Povodí Vltavy (od roku 1966), pro starší povodně byly odhadnuty z vodoměrných stanic na Vltavě a jejích přítocích. Takto odhadnutá snížení povodní byla posunuta do Prahy bez uvažování další transformace. Snížení kulminačního průtoku bylo od 0 do 800 m³.s⁻¹. Je však nutno vzít v úvahu, že v daném období se nevyskytovaly velké povodně a kulminace největší pozorované povodně v Praze v roce 1981 byla na úrovni 5letého průtoku. Pravděpodobné snížení 100letého kulminačního průtoku autor odhadl na 600 – 700 m³.s⁻¹.

Hydrologická studie Českého hydrometeorologického ústavu ***Zpracování N-letých průtoků v profilech Ústí nad Labem a Děčín se zohledněním vlivu obvyklého provozu nádrží Vltavské kaskády a nádrže Nechranice na Ohři (Boháč 1995)*** byla prvním pokusem o odhad vlivu nádrží na N-leté průtoky dolů po Labi. Pro odhad snížení kulminačních průtoků na Labi vlivem nádrží byl použit jednoduchý algoritmus, vycházející ze studie Blažka *Ovlivnění povodní na Labi řízením nádrží* (1995), který odvozoval vliv nádrží pouze z velikosti pozorovaného průtoku. Tento algoritmus byl použit pro řadu povodní v období 1877 – 1953, která byla doplněna pozorovanou řadou do roku 1993 a statisticky zpracována. Snížení 100letého průtoku v Ústí nad Labem vyšlo 270 m³.s⁻¹, v Děčíně 280 m³.s⁻¹.

V rámci **projektu *Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002*** byl posuzován vliv nádrží Vltavské kaskády na průběh této povodně v Praze. Povodeň na Vltavě v srpnu 2002

měla dvě vlny, které následovaly po sobě s třídní přestávkou. První povodňovou vlnu dokázaly nádrže kaskády snížit pod úroveň 3. SPA v Praze. Při druhé větší vlně došlo k přeplnění všech nádrží kaskády. Na Orlíku byla maximální hladina překročena o 1,54 m (čímž se nechtěně vytvořil další neovladatelný ochranný prostor o velikosti cca 40 mil. m³) a ve vrcholové fázi povodně došlo k havarijnímu výpadku hydroelektrárny s kapacitou 600 m³.s⁻¹. Za těchto podmínek byl v profilu hráze kulminační přítok 3900 m³.s⁻¹ snížen o 800 m³.s⁻¹.

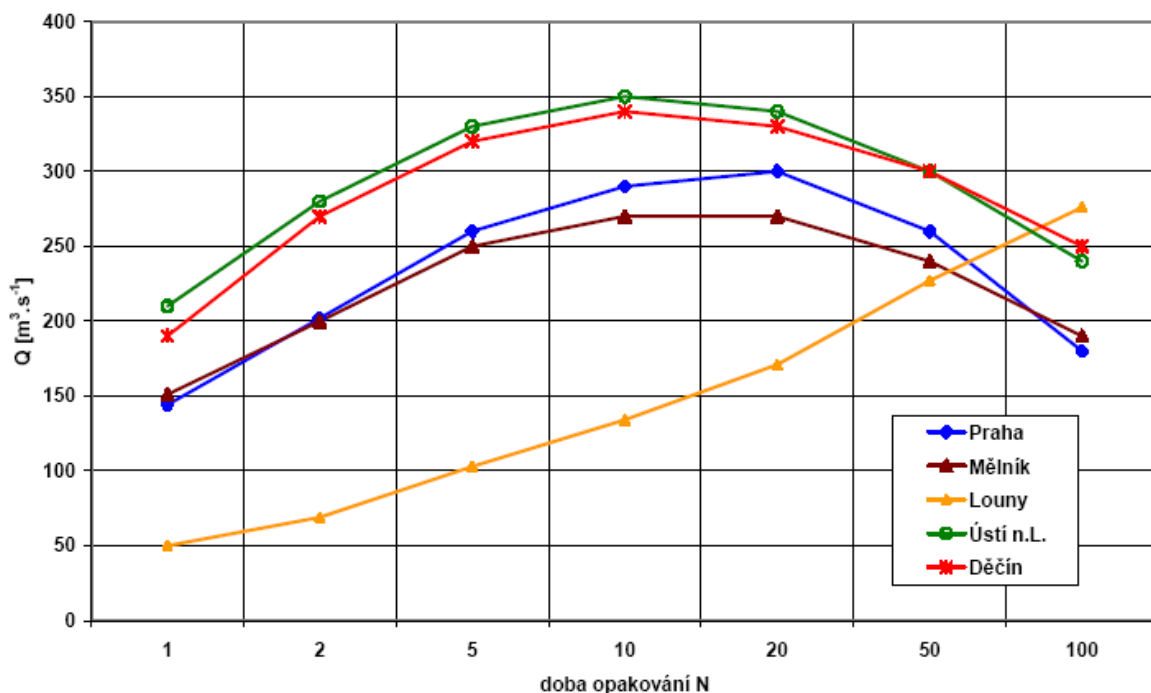
Vliv nádrží Vltavské kaskády (Orlík – Vrané) byl zjišťován v samostatné studii **Vyhodnocení povodně v srpnu 2002 z pohledu průchodu povodňové vlny Vltavskou kaskádou (Krejčí, Zezulák, 2003)**. Byl sestaven model předmětného úseku kaskády s využitím modelovacího systému AquaLog, na kterém byla simulována řada variant počátečního naplnění nádrže Orlík a různých variant manipulací a jejich důsledků na velikost kulminačního průtoku v Praze. Další simulace byly provedeny pro porovnání průběhu povodně neovlivněné nádržemi a průběhu povodně s vlivem nádrží. Pro tyto simulace byl použit hydrodynamický model HEC-RAS a vliv nádrží byl zaveden zjednodušeným způsobem (neřízený odtok přes volné přelivy). Porovnání simulovaného neovlivněného průtoku a pozorovaného kulminačního průtoku v Praze vykazovalo snížení o 674 m³.s⁻¹, ovšem zároveň ten samý model s uvažovaným (zjednodušeným) účinkem nádrží vykazoval oproti pozorovanému průtoku výrazné nadhodnocení (o 580 m³.s⁻¹). V závěrech projektu byla konstatována neprůkaznost výsledků, které byly pod hranicí reálné přesnosti simulace. ČHMÚ ve svých analýzách uvažuje velikost kulminačního průtoku na Vltavě v Praze při povodni srpnu 2002 hodnotou 5160 m³.s⁻¹ stejně pro ovlivněný i neovlivněný stav.

V rámci souboru opatření přijatých po povodni 2002 byl v letech 2003 – 2005 řešen tříletý grantový projekt **VaV/650/6/03 Vliv, analýza a možnosti využití ochranné funkce údolních nádrží pro ochranu před povodněmi v povodí Labe**, který byl doposud nejobsáhlejší prací v této oblasti. V tomto grantovém projektu byly provedeny simulace průběhu povodní pro ovlivněný a neovlivněný stav pro období let 1890-2002. Neovlivněný stav představuje odtokové podmínky, tak jak byly před výstavbou vodních nádrží. Ovlivněný stav zahrnuje vliv nádrží na odtok z povodí. Simulační model byl opět postaven na bázi modelovacího systému AquaLog, tentokrát včetně Ohře až po Děčín. Do modelu byly zahrnuty nádrže Lipno, Orlík a Slapy na Vltavě a vodní nádrž Nechranice na Ohři. Manipulační algoritmus na jednotlivých nádržích vycházel z platných manipulačních řádů, počáteční naplnění nádrží odpovídalo průměrnému naplnění v daném měsíci. Byl simulován průběh cca 250 povodní, z nichž největší byla povodeň v srpnu 2002. Porovnání ovlivněných a neovlivněných kulminací této povodně v hlavních profilech na Vltavě a Labi je v Tab. 2.2.

Tab. 2.2 – Simulace povodně v srpnu 2002 v projektu VaV/650/6/03

Tok - profil	Vltava - Praha	Labe - Ústí n. L.	Labe - Děčín
	kulminační průtok v m ³ .s ⁻¹		
pozorovaný průtok	5160	4700	4770
simulovaný ovlivněný	4964	5153	5110
simulovaný neovlivněný	5194	5361	5303
snížení vlivem nádrží	230	208	193

Simulované ovlivněné a neovlivněné řady ročních kulminací byly dále statisticky zpracovány do formy N-letých průtoků. Snížení 100letých průtoků odvozených ze simulovaných řad činilo v Praze 180 m³.s⁻¹, v Mělníku 190 m³.s⁻¹, v Lounech 276 m³.s⁻¹, v Ústí n. Labem 240 m³.s⁻¹ a v Děčíně 250 m³.s⁻¹. Největšího snížení v profilech na Vltavě a Labi bylo však dosaženo u 10letého průtoku, pouze na Ohři vliv nádrže Nechranice se stoupající N-letostí stále rostl (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 – Průběh rozdílů mezi neovlivněnými a ovlivněnými N-letými průtoky

V rámci projektu LABEL byla ve spolupráci Spolkového německého hydrologického ústavu (BfG) a Výzkumného ústavu vodohospodářského TGM a AquaLogic Consulting zpracována studie **Posouzení českých a durynských přehrad při povodních na Vltavě a Labi v České republice a Německu matematickým říčním modelem (2012)**. V tomto projektu byly simulovány průběhy vybraných významných povodní po Labi až po stanici Neu Darchau. Na české části povodí byl pro simulace použit hydraulický model HEC-RAS, pro ovlivněný stav propojený s modelem nádrží (Orlík, Slapy a Nechranice). Simulován byl průběh reálných povodní v srpnu 2003, jarní povodně 2006 a lednové povodně 2011, která však byla významná pouze v Německu. Simulované ovlivněné a neovlivněné kulminační průtoky při těchto povodních a jejich porovnání je v Tab. 2.3. V případě povodně 2002 je patrné, nakolik se vypočítané snížení kulminace liší od výsledku jiných prací, což snižuje jeho věrohodnost.

Tab. 2.3 – Simulace povodní v srpnu 2002 a jarní povodně 2006 v projektu LABEL

Povodňová epizoda	Povodeň v srpnu 2002		Jarní povodeň 2006	
	Vltava - Praha	Labe – Ústí n.L.	Vltava - Praha	Labe – Ústí n.L.
	kulminační průtok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		kulminační průtok v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
pozorovaný průtok	5160	4700	1430	2540
simulovaný ovlivněný	5160	4651	1430	2639
simulovaný neovlivněný	6141	5504	2401	3303
snížení vlivem nádrží	981	853	971	664

V projektu LABEL byly ještě simulovány průběhy ovlivněných a neovlivněných „modelových“ povodní letního a zimního typu, které byly odvozeny přepočtem průběhu povodní 2002 a 2006 tak, aby jejich kulminace dosahovaly v příslušných profilech zvolených N-letostí (10 až 500). Toto řešení pokládá ČHMÚ za nepřijatelné zjednodušení, které vedlo v českých profilech ke zjevně nereálným hodnotám snížení.

V roce 2013 zahájil německý BfG další projekt *Homogenizace časových řad Qmax pro německé vodoměrné stanice na Labi*, na němž spolupracuje VUV TGM a AquaLogic Consulting studií **Odtokové simulace v českém povodí Labe pro historické povodně a pro scénáře ke zjišťování vlivu přehrad na průběh povodní a kulminace**. Na projektu se podílí také ČHMÚ, jednak přípravou dat z české části povodí, jednak jako expertní pracoviště a partner německé hydrologické služby. Zvolený postup řešení spočívá v simulaci průběhu 30 vybraných povodní z období z období 1970 – 2013, na jejichž základě by měly být odvozeny regresní vztahy mezi ovlivněnými a neovlivněnými kulminacemi a ty pak aplikovány na ostatní povodně v období 1890 – 2013.

2.2 Ověření vlivu údolních nádrží na průběh povodní dolů po toku

V rámci projektu *Vyhodnocení povodní v červnu 2013* byly provedeny další simulace, které na grantový projekt VaV/650/6/03 navazují. Simulace provedla v subdodávce firma AquaLogic Consulting s.r.o. a úplná zpráva subřešitele je v Příloze 1 této dílčí zprávy. Provedené práce zahrnují tyto části:

- prodloužení simulací provedených v grantovém projektu VaV/650/6/03 o období 2003 – 2013 a vyhodnocení celé řady 1890 – 2013
- simulace povodní v období 2003 – 2013 v alternativním výpočetním kroku
- simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží na Vltavě a Ohři
- simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží na horním Labi

2.2.1 Simulace vlivu nádrží na povodně v období 2003 – 2013

Vzhledem k tomu, že účelem bylo prodloužit období simulované v grantovém projektu VaV/650/6/03 a získat homogenní simulované řady za celé období 1890 – 2013, byla při řešení této části dodržena metodika použitá v grantovém projektu. Jako simulační nástroj byl použit modelovací systém AquaLog, jehož současná verze je používána v hydrologické předpovědní službě ČHMÚ. Systém AquaLog se skládá z řady komponent, které jsou podrobně popsány ve zprávě subřešitele.

Model byl sestaven pro povodí Vltavy, Labe od Brandýse n. Labem po Děčín a Ohři od Karlových Varů. Hlavní přítoky Vltavy (Lužnice, Otava, Sázava, Berounka), přítok z horního Labe (Brandýs), Bílina a Ploučnice představovaly okrajové podmínky, tzn. do modelu vstupovaly naměřené průtoky v jejich závěrových profilech. Ostatní přítoky a mezipovodí byly simulovány srážkoodtokovým modelem. V modelu pro ovlivněný stav byly zahrnuty nádrže Vltavské kaskády a Nechranice na Ohři, ostatní nádrže byly zanedbány.

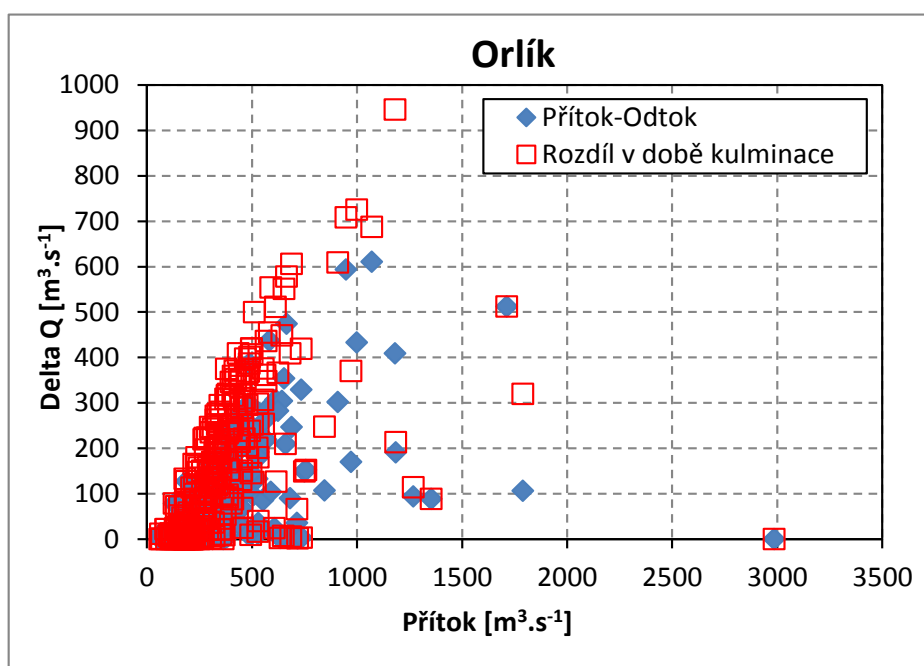
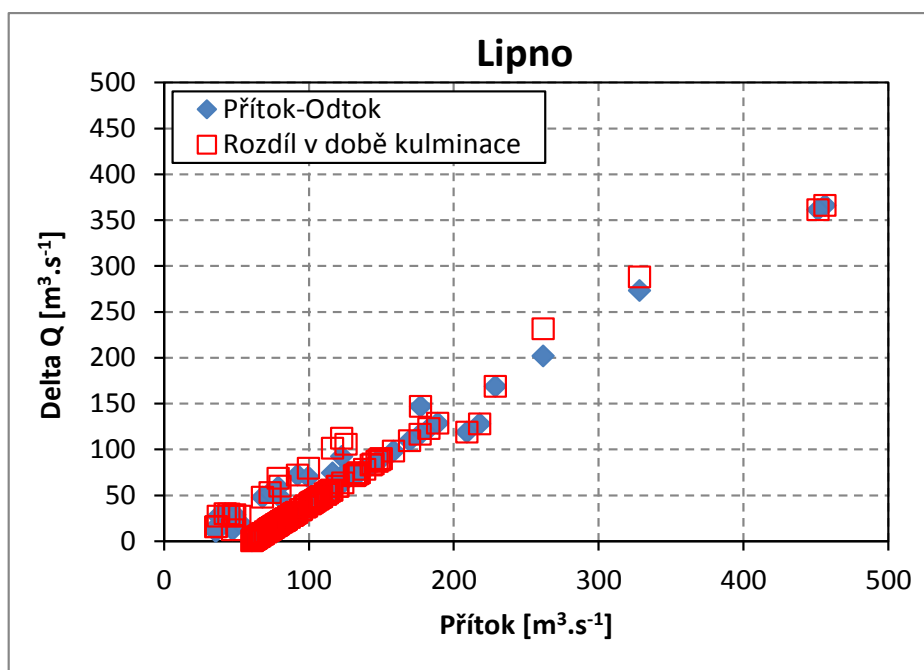
Byl simulován průběh jedné letní a jedné zimní povodně v každém roce. Krok simulace byl 6 hodin. Simulace pro neovlivněný stav byla kontinuální, simulace pro ovlivněný stav byla událostní, tzn. každá povodeň byla simulována samostatně. Algoritmus pro řízení manipulací na nádržích vycházel z platných manipulačních řádů. V případě Nechranic byl řídicím prvkem odtok z nádrže, v případě nádrží Vltavské kaskády se odtok řídil podle průtoku v Praze. Pro řešené období 2003 – 2013 jsou sice známy skutečné počáteční hladiny vody v nádržích, avšak pro zachování jednotného postupu s grantovým projektem vycházely prováděné simulace vždy z dlouhodobé průměrné měsíční hladiny vody v každé nádrži.

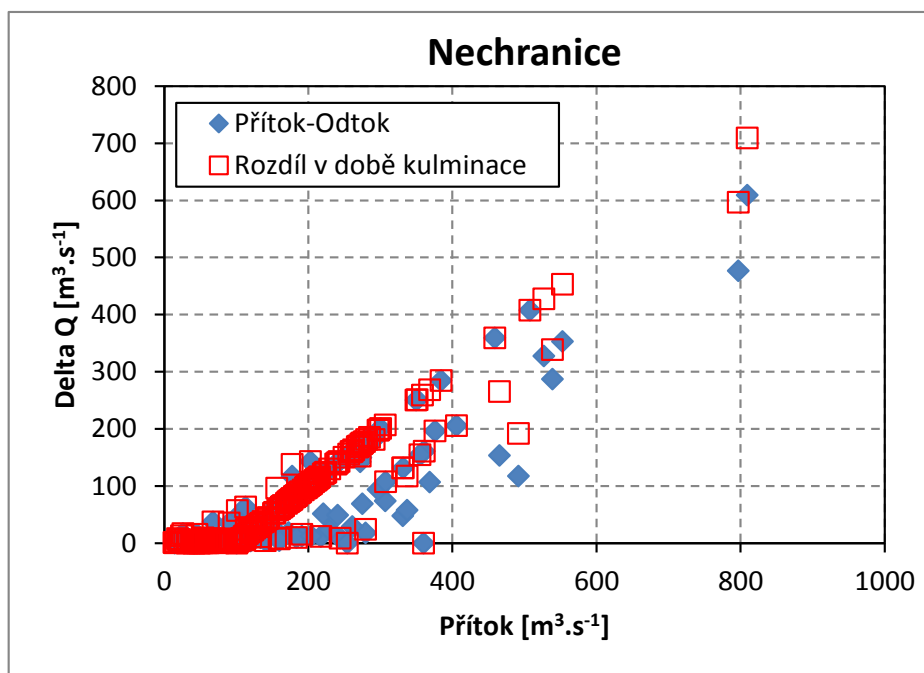
Simulované hodnoty průtoků v období 2002 – 2013 pro výstupní profily Praha a Ústí nad Labem jsou uvedeny v tabulce v Příloze 1. Spolu s výsledky grantového projektu tak byly získány simulované časové řady kulminací a objemů povodňových vln pro období 1980 – 2013 a to ve dvou variantách (pro neovlivněný a ovlivněný stav).

Kromě toho jsou pro tyto profily k dispozici měřené průtoky, které jsou od počátku pozorování neovlivněné, pak postupně s výstavbou přehrad částečně ovlivněné a od roku 1968 plně ovlivněné provozem nádrží. Porovnání měřených kulminačních průtoků se simulovanými průtoky odpovídající varianty však vykazuje značné rozdíly, které ukazují na

nejistoty simulací přírodních procesů v takto zjednodušeném modelu (VaV/650/6/03). Zejména simulace povodně v červnu 2013 v Praze je oproti naměřenému průtoku silně podhodnocená (cca o $800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), neboť model nedokázal zohlednit mimořádnou extremitu menších přítoků do nádrže Orlík. Výsledkem je nereálně nadhodnocený vliv nádrží na tuto povodeň v Praze a níže po toku. Simulace povodně v červnu 2013 provedené v další části tohoto dílčího úkolu již dávají věrohodnější výsledky.

Výsledky simulací tedy není dobré posuzovat jednotlivě v absolutních hodnotách, ale analýza jejich časových řad umožňuje usuzovat na retenční účinek nádrží v dlouhodobém pohledu, jednak přímo v profilech hrází, jednak v profilech níže po toku. Účinek nádrže ve vlastním profilu se obvykle vyjadřuje jako rozdíl mezi kulminačním přítokem a kulminačním odtokem, případně jako rozdíl mezi kulminačním přítokem a odtokem v době kulminace přítoku. Pro hlavní nádrže jsou oba případy uvedeny v grafu na Obr. 2.2.

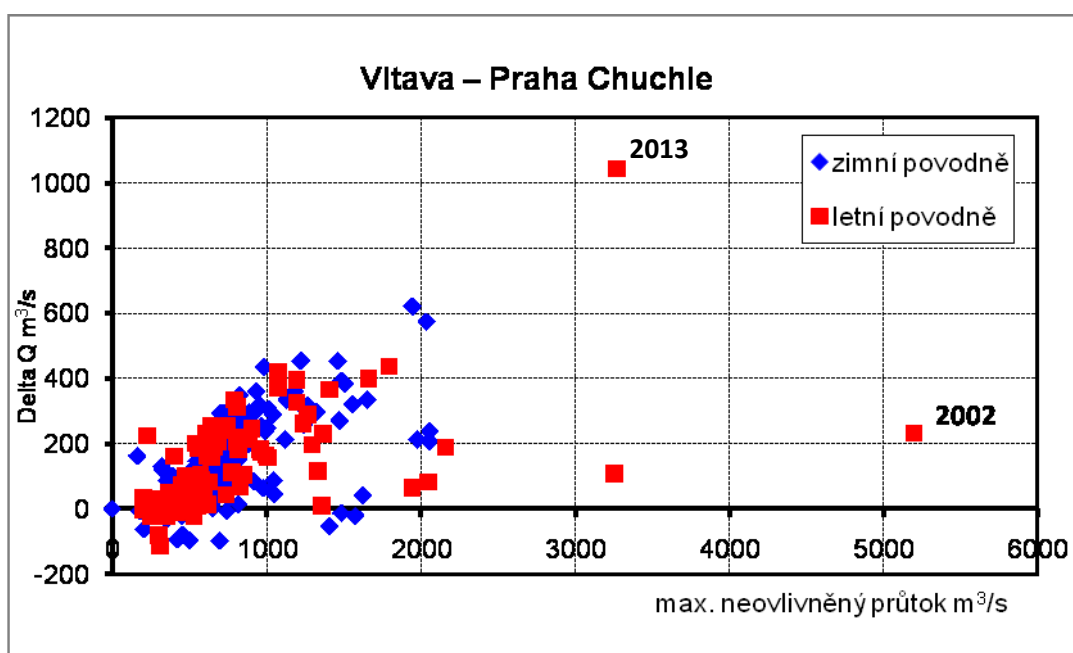


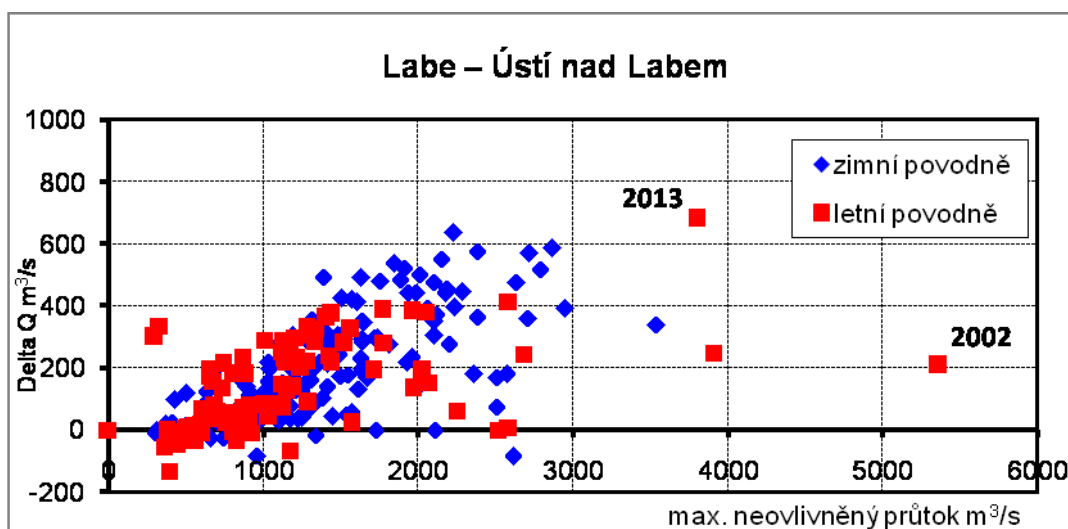


Obr. 2.2 – Závislost snížení odtoku z nádrže na velikosti simulovaného přítoku

Pro nádrže Lipno a Nechranice, které mají vzhledem ke své ploše povodí dostatečně velký retenční prostor je závislost snížení odtoku na velikosti přítoku téměř lineární. To vychází ze zjednodušené manipulace, kdy pro většinu přítoků byl nastaven obdobný (neškodný) odtok. Jiná situace je na nádrži Orlík, kde manipulace byla nastavena tak, aby pokud možno nebyl překročen neškodný průtok v Praze, a největšího snížení bylo dosahováno pro kulminační přítok okolo $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Q_{5-10}).

Simulace propagace vlivu nádrže dolů po toku je poměrně složitá a je zatížena značnými nejistotami. Velmi záleží na časovém posunu povodňových vln a jejich střetávání s vlnami na přítocích. Simulace snížení kulminace simulovaných povodňových vln na Vltavě v Praze a na Labi v Ústí nad Labem je na Obr. 2.3.





Obr. 2.3 – Snížení kulminačních průtoků vlivem nádrží v profilech dolů po toku

V grafech je uvedeno snížení kulminací všech simulovaných povodní v zimním (XI – IV) a letním (V – X) pololetí, a to v závislosti na velikosti neovlivněné kulminace. Největšího snížení je dosahováno u povodní s kulminací okolo $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v Praze, resp. $2000\text{--}3000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v Ústí nad Labem, tedy na úrovni zhruba 10leté povodně. Pro větší povodně se pak vliv nádrží postupně zmenšuje. Z tohoto schématu vybočují dvě letní povodně. Jedna je v srpnu 2002, kdy na Orlíku došlo k výpadku hydroelektrárny a přeplnění nádrže, což by se po provedených opatřeních již nemělo opakovat. Druhá je povodeň v červnu 2013, kde byla zpochybněna spolehlivost simulovaného ovlivněného průtoku.

Simulace průběhu povodní v období 2003 – 2013 byla ještě opakována upraveným modelem ve výpočetním kroku 1 hodina. Teoreticky tento model dává lepší předpoklady pro simulace povodňových událostí. Kulminační průtoky v profilech Praha a Ústí nad Labem simulované v 1hodinovém kroku jsou rovněž v tabulce v Příloze 1. Jejich porovnání s modelem využívajícím 6hodinový krok nevyznělo zcela jednoznačně. Pro největší povodňové události však alternativní model poskytoval lepší shodu s pozorovanými hydrogramy.

2.2.2 Simulace průběhu povodně v červnu 2013 s vlivem nádrží na Vltavě a Ohři

Simulace průběhu povodně v červnu 2013 byla v rámci vyhodnocení této povodně opakována s použitím rozšířeného modelu a aktuálních podkladů o provozu nádrží. Struktura modelu byla sice obdobná jako v grantovém projektu VaV/650/6/03 avšak s tím rozdílem, že pro základní kostru modelu na dolní Vltavě, dolní Ohři a na Labi od Brandýse n. Labem byl použit 1D hydraulický model (HEC-RAS). Hydraulický model umožňuje přesnější simulaci průběhu povodňové vlny především v oblastech soutoků a v oblastech rozsáhlých rozlivů. Část hydraulického modelu mezi Českými Budějovicemi a Prahou byla založena na geometrických datech původního koryta Vltavy z let 1902-1911. Tento geometrický podklad, který již nelze ověřit, může být zdrojem nejistot při simulaci neovlivněného průběhu povodně. Podrobnější popis modelu a jeho ověření na historických povodních je ve zprávě subřešitele (Příloha 1).

Další významný rozdíl spočíval v zahrnutí dalších vodních nádrží, které rozšířily původní sestavu tvořenou Vltavskou kaskádou a VD Nechanice. Do simulace ovlivněného stavu vstupovaly ještě vodní nádrže Římov na Malši, Hracholusky na Mži, Švihov na Sázavě a nádrže v povodí horního Labe (Les Království, Rozkoš, Seč). Simulace respektovaly skutečný provoz nádrží během povodně v červnu 2013. Lokální retenční účinek jednotlivých nádrží (rozdíl mezi maximálním přítokem a odtokem) byl stanoven v dílčím úkolu *Vyhodnocení funkce a bezpečnosti vodních děl za povodní*. Volné prostory v jednotlivých uvažovaných nádržích před nástupem povodňové vlny a jejich individuální retenční účinek je uveden v Tab. 2.4..

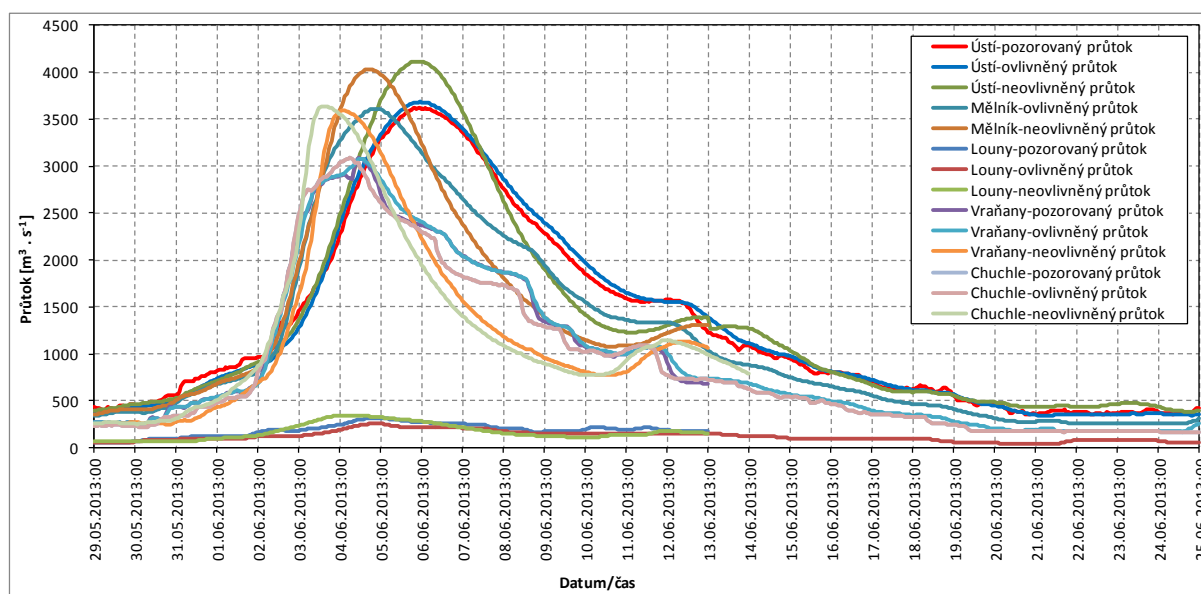
Tab. 2.4 – Počáteční stav a lokální retenční účinek uvažovaných nádrží

Vodní dílo (Tok)	Volný prostor v nádrži [mil. m ³]	Maximální přítok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální odtok [m ³ .s ⁻¹]	Přítok - Odtok [m ³ .s ⁻¹]
Římov (Malše)	7	180	140	40
Švihov (Nežárka)	46	104	50	54
Hracholusky (Mže)	23	110	57	53
Lipno (Vltava)	48	340	123	217
Orlík (Vltava)	119	2160	1950	210
Slapy (Vltava)	7	2020	2010	10
Nechranice (Ohře)	51	356	260	96

Variantně byl simulován průběh povodně v červnu 2013 pro neovlivněný stav (bez nádrží) a ovlivněný stav nádržemi v jednotlivých povodích. Průběh simulované neovlivněné a ovlivněné povodňové vlny ve významných profilech na dolní Vltavě, Labi a Ohři je na Obr. 2.4, porovnání maximálních průtoků a odpovídajících hladin je v Tab. 2.5.

Tab. 2.5 – Výsledky simulace průběhu neovlivněné a ovlivněné povodně v červnu 2013 ve významných profilech na dolní Vltavě, Labi a Ohři

Profil	Tok	Neovlivněný průtok		Ovlivněný průtok		Rozdíl průtoků [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl hladin [m]
		Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální hladina [m]	Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální hladina [m]		
Chuchle	Vltava	3640	-	3084	-	556	-
Vraňany	Vltava	3590	167.10	3082	166.68	508	0.42
Mělník	Vltava	4030	162.66	3611	162.19	419	0.47
Louny	Ohře	347	177.36	257	176.99	90	0.37
Ústí	Labe	4116	142.20	3682	141.65	434	0.55



Obr. 2.4 – Průběh simulované povodňové vlny na dolní Vltavě, Labi a Ohři

Snížení kulminace simulované povodňové vlny na Vltavě v Praze dosáhlo $556 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, na Labi v Mělníku kleslo na $419 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, avšak v Ústí nad Labem se vlivem nádrže Nechanice na Ohři opět zvětšilo na $434 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Kromě této základní simulace neovlivněného a ovlivněného stavu byly provedeny variantně další simulace s proměnnými okrajovými podmínkami, při kterých byl zjišťován teoreticky izolovaný vliv jednotlivých nádrží nebo jejich skupin. Výsledky jsou uvedeny v Příloze 1.

2.2.3 Simulace průběhu povodně v červnu 2013 s vlivem nádrží na horním Labi

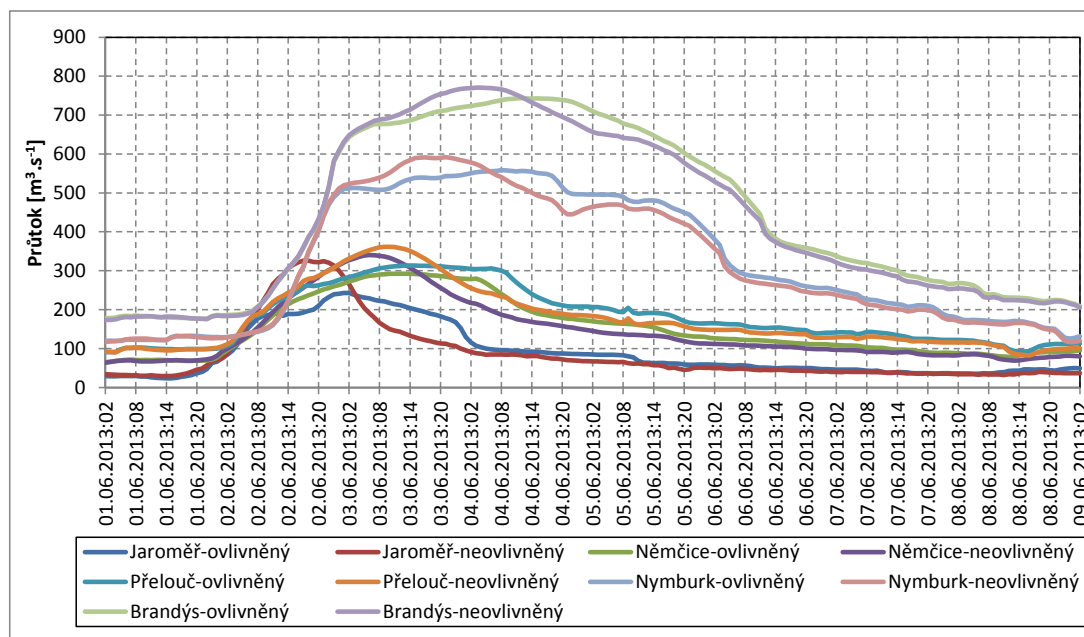
Pro simulaci vlivu nádrží na průběh povodně v červnu 2013 na horním Labi byl použit opět modelovací systém AquaLog, ke kterému byl pro simulaci říčních úseků připojen kinematický model Muskingum-Cunge, takže nebylo třeba geometrické zaměření. Pro kalibraci modelu byla využita data z povodně v březnu 2000.

Z nádrží v povodí horního Labe byly do modelu zahrnuty nádrž Les Království na Labi, Rozkoš (resp. odlehčení z Úpy do nádrže Rozkoš) a Seč na Chrudimce. Nádrž Labská ovládá malé povodí a má spíše lokální účinek. Vliv ostatních nádrží v povodí, které nemají vymezen podstatnější ochranný prostor nebo ovládají pouze malé povodí, byl zanedbán.

Tab. 2.6 – Lokální retenční účinek uvažovaných nádrží v povodí horního Labe

Vodní dílo (Tok)	Zachycený objem v nádrži [mil. m^3]	Maximální přítok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Maximální odtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Snížení průtoku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Labská (Labe)	0.46	72	47	25
Les Království (Labe)	4.73	308	156	152
Rozkoš (Úpa)	4.59	60	-	-
Seč (Chrudimka)	3.33	60	28	32

Průběh povodně v červnu 2013 byl opět simulován jako neovlivněný (bez nádrží) a s vlivem uvedených nádrží. Při řešení byl uvažován skutečný provoz nádrží. Průběh simulované povodňové vlny ve vybraných profilech na horním Labi je na Obr. 2.5, porovnání simulovaných neovlivněných a ovlivněných kulminací je v Tab. 2.7.



Obr. 2.5 – Průběh simulované povodňové vlny v hlavních profilech horního Labe

Tab. 2.7 – Průběh simulovaných hladin a průtoků ve vybraných stanicích na horním Labi

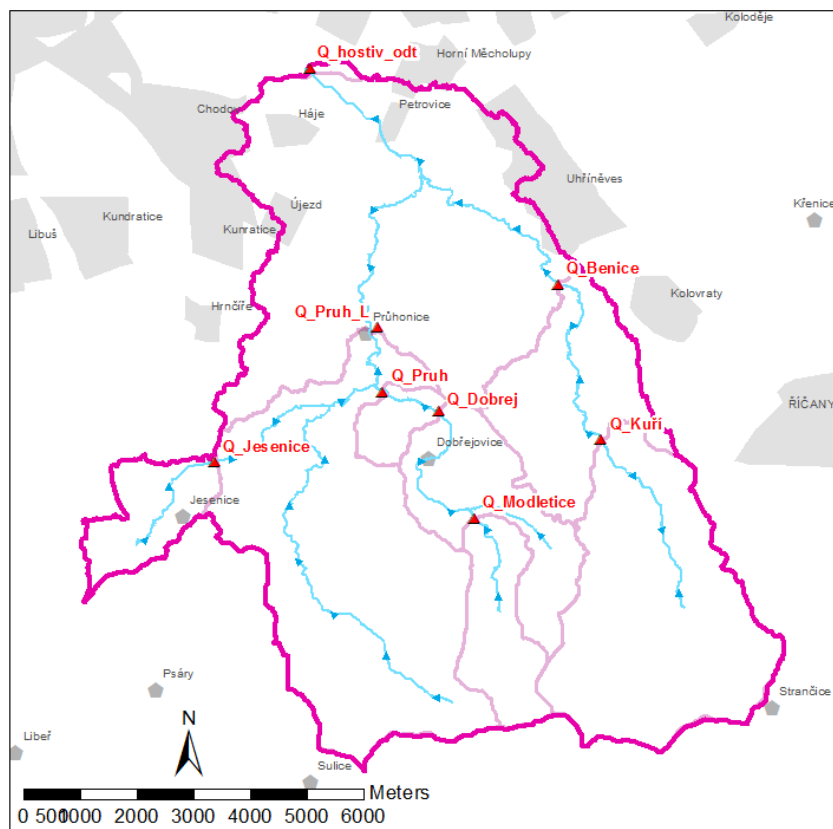
Profil	Neovlivněný průtok		Ovlivněný průtok		Rozdíl průtoků [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl stavů [cm]
	Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální vodní stav [cm]	Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální vodní stav [cm]		
Jaroměř	325	453	242	377	83	76
Němčice	340	447	292	409	47	38
Přelouč	361	314	313	288	38	26
Nymburk	592	385	558	371	33	14
Brandýs	770	447	743	440	27	7

Vliv nádrží se dolů po toku Labe postupně snižuje a v Brandýsu nad Labem již činí pouze 27 m³.s⁻¹, což je asi 3,6 % pozorovaného průtoků. Na dolním Labi pod Mělníkem je již tento vliv zanedbatelný.

3. VLIV ZMĚN UŽÍVÁNÍ KRAJINY NA ODTOK V POVODÍ BOTIČE

Simulace vlivu změn užívání krajiny na odtok při povodni v červnu 2013 provedla v subdodávce firma DHI a.s. s využitím modelovacího systému MIKE SHE a MIKE 11. Dodatečně byla provedena obdobná situace při suchých počátečních podmínkách (nenasycené povodí). Úplná zpráva DHI a.s. je v Příloze 2 této dílčí zprávy.

Pro analýzy bylo zvoleno povodí Botiče na vodním díle Hostivař. Jde o příměstské území na okraji Prahy, rekreačně využívané (Průhonický park), kde v posledních letech došlo k poměrně značným změnám v užití území v důsledku intenzivní rezidentní zástavby.



Obr. 3.1 – Povodí Botiče na vodním díle Hostivař

Schéma povodí je na Obr. 3.1. Plocha povodí k profilu hráze nádrže Hostivař je asi 95 km². V povodí je několik limnigrafických stanic na Botiči i jeho přítocích, které většinou patří provozovateli VD Hostivař, kterým jsou Lesy hl. města Prahy, pouze stanici Průhonice na Dobřejovickém potoce provozuje ČHMÚ. Přítok do nádrže Hostivař není měřen. Celé povodí je jednotlivými stanicemi rozděleno na 8 dílčích povodí (mezipovodí), pro které byl zjišťována změna užití území a její vliv na odtok za povodní.

Pro zjištění vlivu antropogenních zásahů v ploše povodí bylo porovnáno současné užití území (stav 2013) a užití území před cca 25 lety, kdy v některých částech povodí nebyla současná rezidentní zástavba (stav 1988). Pro klasifikaci užití území byly využity letecké snímky dostupné na Geoportálu hl. města Prahy (<http://www.geoportalpraha.cz/>). Pro potřeby modelování bylo stanoveno 7 kategorií využití území, kterým byly přiřazeny parametry vegetace, propustnosti a hydraulické drsnosti povrchu. Změny procentního podílu zastoupení jednotlivých kategorií užití území na ploše dílčího povodí jsou v Tab. 3.1. Změna ve využití území spočívala především v přeměně zemědělské půdy a luk na urbanizované území a/nebo zpevněné plochy.

Tab. 3.1 – Procenta plochy povodí pro jednotlivé kategorie využití území, rozdíl 1988 – 2013

Profil	Vodní tok	Plocha km ²	1+5	2	3	4	6	7
			pole, tráva	neprop.	zástavba	stromy	Voda	ostatní
Kuří	Pitkovický	17.0	-8	3	1	4	0	0
Benice	Pitkovický	8.4	- 11	8	3	0	0	0
Modletice	Chomutovický	4.5	- 8	3	3	- 1	0	3
Dobřejovice	Dobřejovický	6.8	- 20	16	4	- 2	0	2
Průhonice	Dobřejovický	1.7	- 7	0	5	1	0	0
Jesenice	Jesenický	3.7	- 15	3	14	0	0	-1
Průhonice	Botič	23.5	- 14	2	12	0	0	0
hráz Hostivař	Botič	29.9	- 7	3	5	0	0	-1
celé povodí		95.4	- 10	4	6	0	0	0

Je zřejmé, že největší změny proběhly na dílčích povodích Dobřejovického potoka (profil Dobřejovice) a Jesenického potoka (profil Jesenice) a na vlastním povodí Botiče nad Průhonicemi. Ve všech třech případech se 14 až 20% plochy povodí změnilo z pole na zástavbu a nepropustné plochy. V ostatních povodích se změna týká obvykle do 10% území (k profilu Benice 11%). Průměr za celé území je 10% redukce plochy orné půdy a travního porostu ve prospěch nepropustných ploch, domů a zahrad.

Simulace průběhu povodně na přelomu května a června 2013 byly provedeny distribuovaným srážkoodtokovým modelem MIKE SHE, který byl kalibrován pomocí pozorovaných hydrogramů v profilech Modletického potoka, Jesenického potoka, Dobřejovického potoka (limnigraf ČHMÚ) a dílčí povodí Botiče (Průhonice, limnigraf Lesů hl. města Prahy.) a validován vůči pozorovanému hydrogramu v profilech Benice a Kuří. Pro simulaci proudění v korytech toků byl použit hydrodynamický model MIKE 11.

Jako vstup do srážkoodtokového modelu byly použity srážková pole (gridové radarové produkty v kroku 15 minut), které byly ověřovány podle pozemních srážkoměrných stanic. Pro odhad počátečních podmínek byly použity hodinové úhrny srážek v květnu 2013 ve stanicích ČHMÚ, ze kterých byl počítán ukazatel nasycení pomocí metody CN křivek. Podrobnosti o zpracování vstupních dat a kalibraci modelu jsou uvedeny v Příloze 2 této dílčí zprávy.

3.1 Výsledky simulací pro podmínky užití území v roce 2013 a 1988

Průběh povodně byl variantně simulován pro užití území v roce 1988 a v roce 2013, kdy mezi tím proběhla v povodí významná rezidentní zástavba.

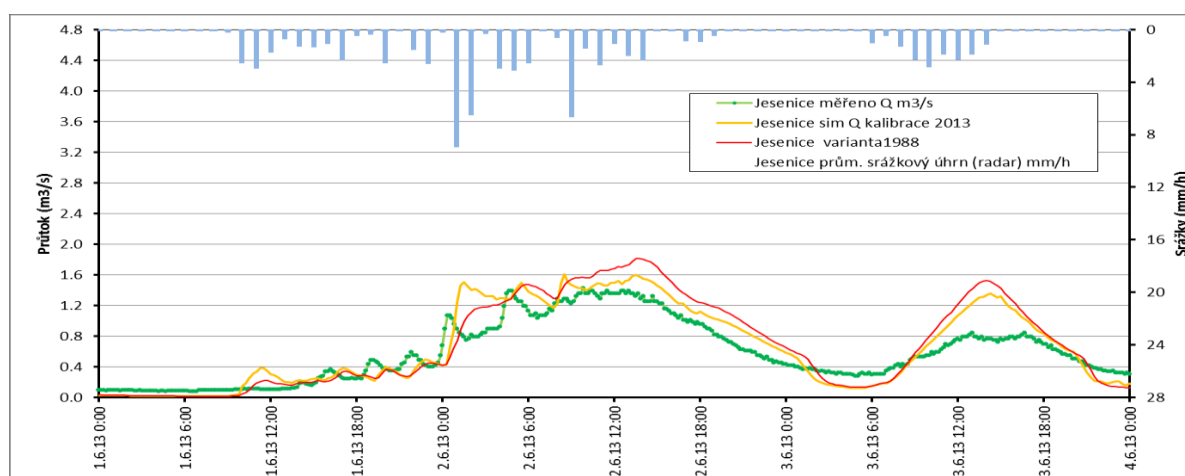
Výsledky provedených simulací dávají relativně malou změnu v simulovaném kulminačním průtoku i v celkovém odtokovém množství (Tab. 3.2). Největší rozdíl $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je v profilu Dobřejovice, v jehož povodí byla zjištěna i relativně největší změna v užití území (Tab. 3.1). Rozdíly v celkovém odtoku za povodňovou epizodu jsou většinou 2 - 3%, což lze s ohledem na očekávané nejistoty v datech a simulacích pokládat za nevýznamné.

Za zmínku stojí výsledek simulace přítoku do nádrže Hostivař, který není měřen. Kulminační přítok do nádrže byly v rámci dílčího úkolu *Vyhodnocení funkce a bezpečnosti vodních děl* expertním odhadem určen na $75 \text{ až } 80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

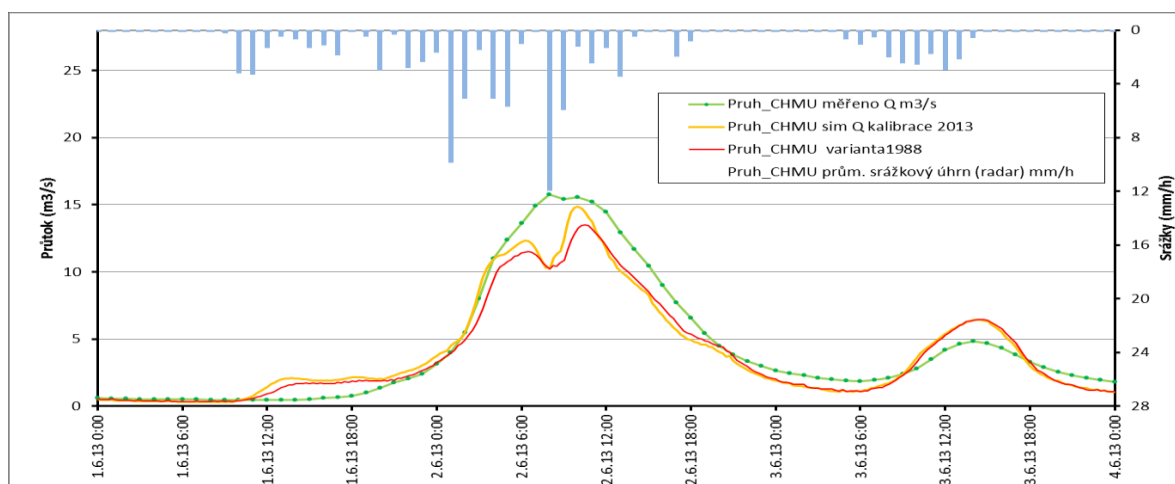
Tab. 3.2 – Porovnání simulovaných průběhů povodně v červnu 2013 (skutečné počáteční podmínky)

Vodoměrný profil	Kulminační průtok (m^3/s)		Odtoková výška z mezipovodí (mm)	
	stav 2013	stav 1988	stav 2013	stav 1988
Modletice	8.2	7.7	97	91
Dobřejovice	14	12		
Průhonice (ČHMÚ)	15	14	85	82
Jesenice	1.6	1.8	50	51
Průhonice (Botič)	34	34	76	78
Kuří	22	22	97	98
Benice	29	29	84	82
přítok do VD Hostivař	73	73		

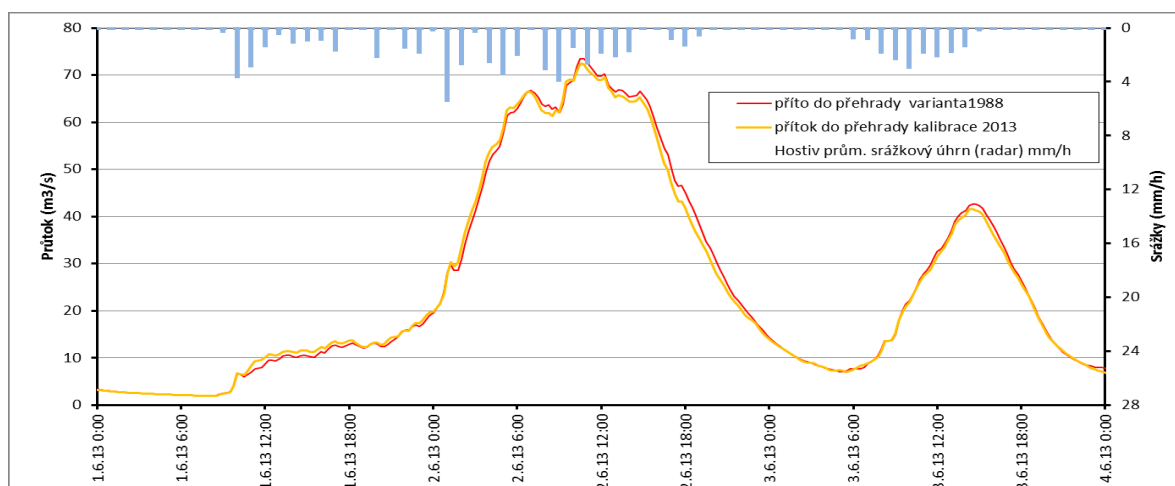
Průběh měřeného a simulovaného průtoku povodně v červnu 2013 (pro skutečné počáteční podmínky – tj. nasycenost povodí na konci května 2013) je v některých vybraných profilech uveden v Obr. 3.2 až 3.4. V grafech je modře znázorněno množství vypadlých srážek na povodí a zeleně skutečný měřený průtok. Z porovnání simulovaného průtoku (stav 2013) s měřeným průtokem lze získat představu o možných nejistotách simulace a významnosti zjištěných odchylek.



Obr. 3.2 – Simulovaný průběh povodně ve stanici Jesenice na Jesenickém potoce pro stav území v roce 2013 a 1988 (skutečné počáteční podmínky).



Obr. 3.3 – Simulovaný průběh povodně ve stanici Průhonice (ČHMÚ) na Dobřejovickém potoce pro stav území v roce 2013 a 1988 (skutečné počáteční podmínky).



Obr. 3.4 – Simulovaný přítok do nádrže Hostivař pro stav území v roce 2013 a 1988 (skutečné počáteční podmínky).

Zjištění lze interpretovat tak, že ve zkoumaném případě byla důsledkem velmi deštivého května 2013 retenční schopnost půdy do značné míry vyčerpána na počátku srážky a tudíž se rozdíly mezi jednotlivými kategoriemi využití území prakticky neprojeví.

3.2 Výsledky simulací pro suché počáteční podmínky

Simulace epizody v červnu 2013 byla dodatečně opakována, ale pro nízké nasycení povodí na počátku povodňové epizody, tedy za jiných počátečních podmínek. K tomu bylo nejdříve třeba ověřit, zda srážkoodtokový model kalibrovaný na datech epizody 6/2013 je schopen adekvátně simulovat průtoky i pro méně významné srážkoodtokové epizody a běžné až suché počáteční podmínky a to bez nutnosti měnit kalibrační parametry. Pro validaci modelu byla vybrána epizoda z července 2011, která sice nebyla srážkově tak významná, ale stav užití území již přibližně odpovídal roku 2013. Jako srážkový vstup bylo opět použito radarových produktů a pro stanovení počátečních vlhkostních podmínek časové řady srážek pozemních stanic.

Po ověření schopnosti modelu simulovat povodně navazující na běžné až suché počáteční podmínky byla znovu simulována povodňová epizoda na počátku června 2013, ale tentokrát pro „suché počáteční podmínky“ v květnu 2013. Ty byly zvoleny tak, že skutečné denní srážky v květnu 2013 byly sníženy v poměru měsíčních úhrnů srážek na povodí v květnu

2011 a v květnu 2013. Tím byl úhrn srážek za měsíc předcházející povodni snížen ze 109 na 44 mm a odpovídajícím způsobem snížena nasycenost povodí.

Vlastní simulace proběhu povodně v červnu 2013 (tentokrát ze suchých počátečních podmínek) byla opět provedena pro užití území v roce 1988 a v roce 2013. Podle očekávání jsou hodnoty simulovaných kulminačních průtoků i celkového odtoku významně menší, ale rozdíly mezi stavem užití území 2013 a 1998 jsou větší (Tab. 3.3). Rozdíly v kulminacích jsou oproti skutečným (mokrým) počátečním podmínkám zhruba dvojnásobné a dosahují v některých profilech až $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, významné jsou i rozdíly v celkovém odtoku.

Tab. 3.3 – Porovnání simulovaných průběhů povodně v červnu 2013 (suché počáteční podmínky)

Vodoměrný profil	Kulminační průtok (m^3/s)		Odtoková výška z mezipovodí (mm)	
	stav 2013	stav 1988	stav 2013	stav 1988
Modletice	5.7	4.7	59	51
Dobřejovice	8	6		
Průhonice (ČHMÚ)	8	6	51	45
Jesenice	1.4	0.8	19	14
Průhonice (Botič)	19	15	40	34
Kuří	12	10	56	53
Benice	15	12	43	35
přítok do VD Hostivař	35	31		

Výsledky dodatečných simulací potvrzují, že počáteční nasycení povodí má výrazný vliv na jeho odtokovou reakci. Ze srovnání tabulek 3.2 a 3.3 vyplývá, že rozdíly mezi simulovaným objemem odtoku při „suchých“ počátečních podmínkách a skutečných podmínkách v roce 2013 jsou i více než dvojnásobné (pro odpovídající si stav využití území). Obdobně vychází porovnání kulminačních průtoků, např. přítok do nádrže Hostivař by při předcházejícím suchém květnu (jako byl v roce 2011) dosáhl pouze cca $35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a rovněž objem povodňové vlny by byl významně menší (cca 60 %).

Přehledné porovnání rozdílů ve výsledku simulací pro stav užití území 2013 a stav užití území 1988 je uvedeno v následující souhrnné tabulce (Tab. 3.4). Jde o procentní vyjádření rozdílu hodnot kulminačního průtoků a celkového odtoku (jako základ jsou vzaty hodnoty pro variantu 1988) z vybraných dílčích povodí s větší změnou využití území. Uvedena je simulace povodně v 6/2013 při skutečných počátečních podmínkách (mokrý var.), stejná povodeň při suchých počátečních podmínkách (suchý var.) a simulace povodně v 7/2011, která byla použita pro validaci modelu při běžných odtokových epizodách.

Tab. 3.4 – Rozdíl hodnot kulminačního průtoků a celkové odtokové výšky pro stav území 2013 oproti stavu území 1988 (vyjádřeno v %; základ = 1988), pro vybraná dílčí povodí

Rozdíl mezi stavem území 2013 a 1988 v procentech	Kulminační průtok			Odtoková výška z mezipovodí		
	epizoda 6/2013		epizoda 7/2011	epizoda 6/2013		epizoda 7/2011
	mokrý var.	suchý var.		mokrý var.	suchý var.	
Benice	0	22	33	2	24	67
Dobřejovice	17	33	154			
Jesenice		83	117		40	50
Průhonice (Botič)	0	24	101	-3	16	25

4. SHRnutí

Antropogenní ovlivnění hydrologického režimu v oblasti malých i velkých průtoků je jedním z hlavních problémů současné hydrologie. Hydrologická data jsou vstupními údaji do řady dalších aplikací, studií a projektů a je třeba rozlišovat, jestli vyjadřují původní přirozený stav nebo stav současný či budoucí ovlivněný. Při zpracování měřených dat je nutno identifikovat a kvantifikovat různé typy ovlivnění a připravit postupy, jak s ním při odvozování hydrologických charakteristik zacházet.

Ovlivnění hydrologického režimu lidskou činností má různé formy. Projekt *Vyhodnocení povodní v červnu 2013* se problematikou ovlivnění zabýval pouze okrajově. Pozornost byla věnována ovlivnění průběhu této povodně provozem nádrží a změnou užívání krajiny na zvoleném modelovém povodí. Dalším významným zdrojem ovlivnění je omezení rozsáhlých přirozených inundací výstavbou liniových protipovodňových opatření (hrází), kterým se zabývají jiné studie mimo tento projekt.

Vliv vodních nádrží na průběh povodní na toku pod nádrží je obecně pozitivní. Nádrže zachycují část povodňové vlny a snižují kulminační průtok. Míra tohoto ovlivnění závisí na velikosti volného prostoru v nádrži, objemu a tvaru povodňové vlny a způsobu manipulace. Většina velkých vodních nádrží je víceúčelových, kde ochrana před povodněmi je pouze jedním z účelů nádrže, a rozdělení nádržního prostoru i manipulační pravidla jsou stanovena také s ohledem na další požadované účinky.

Retenční účinek nádrží se nejvíce projevuje na toku těsně pod nádrží, dále po toku s narůstající plochou mezipovodí a dalšími přítoky postupně klesá. V rámci projektu byl zkoumán vliv významných nádrží v povodí Vltavy, Labe a Ohře na průběh povodně v červnu 2013. Pomocí modelovacího systému byl simulován průběh této povodně na Vltavě pod Vltavskou kaskádou, Ohři pod nádrží Nechranice a na horním i dolním Labi, a to jednak pro neovlivněný stav (bez nádrží), jednak pro stav ovlivněný významnými nádržemi. Porovnání obou stavů dává pro Vltavu v Praze snížení kulminačního průtoku v červnu 2013 vlivem nádrží o $556 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a pro Labe v Ústí nad Labem snížení o $434 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vliv nádrží v povodí horního Labe je na dolním Labi pod Mělníkem již zanedbatelný. Výsledky jsou značně citlivé na střetávání kulminací povodňových vln na soutocích toků a mohou být zatíženy značnými nejistotami zejména v simulaci původního „neovlivněného“ stavu.

Vliv nádrží Vltavské kaskády a nádrže Nechranice na povodňový režim Vltavy a Labe byl již řešen v předcházejícím grantovém projektu, ve kterém byl simulován průběh povodní v období 1890 až 2002. V rámci projektu *Vyhodnocení povodní v červnu 2013* bylo toto období s použitím stejné metody prodlouženo do roku 2013, takže je k dispozici souvislá a jednotným postupem simulovaná řada neovlivněných i ovlivněných povodní 1890 – 2013. Simulace povodně v červnu 2013, samostatně vyčleněná z této řady simulací, však ve srovnání s naměřeným stavem nedává reálné výsledky. Analýza simulované časové řady 1890-2013 je přesto vhodným podkladem pro další navazující práce.

Pro zkoumání vlivu změn ve využití území na průběh povodní je vhodným nástrojem distribuovaný matematický modelovací nástroj MIKE SHE. Umožňuje zavádět do modelu změny v plošném rozložení parametrů vegetace, hydraulické drsnosti povrchu, infiltrační schopnosti půd a mělkého podpovrchového odtoku. V tomto případě byl simulován průběh povodňové vlny na počátku června 2013 v povodí Botiče nad VD Hostivař, a to pro stav území v roce 2013 a v roce 1988, kdy ještě v některých částech povodí nebyla rezidentní zástavba. Výsledky simulací mohou být zatíženy významnými nejistotami, zejména v důsledku spolehlivosti odhadu množství a rozložení srážek vysokých intenzit na poměrně malá dílčí povodí.

Pro studovanou epizodu 6/2013 a reálné počáteční podmínky vyvolává změna ve využití území (v rozsahu 4 až 20% plochy dílčích povodí) relativně malou změnu v simulovaném kulminačním průtoku i v celkovém odtoklém množství. Zjištění lze interpretovat tak, že ve zkoumaném případě byla retenční schopnost půdy do značné míry vyčerpána již na počátku

srážky a tudíž se rozdíly mezi jednotlivými kategoriemi využití území prakticky neprojevily. Vysoké počáteční nasycení povodí se projevilo i extrémně vysokými koeficienty odtoku (73 - 85%).

Pro opakované simulace epizody 6/2013 za suchých počátečních podmínek (jaké byly při validační epizodě v 7/2011) jsou již rozdíly v odtoku mezi oběma stavy užití území zřetelné. Obecně lze konstatovat, že rozdíly v celkovém odtoku i kulminačním průtoku narůstají se zvyšujícím se podílem urbanizované plochy povodí a to více pro sušší počáteční podmínky a méně významnou srážkovou epizodu.

Zásadní vliv na odtokovou odezvu však mají počáteční podmínky při nástupu příčinné srážky. Z porovnání výsledků modelu pro skutečné podmínky epizody 6/2013 a hypotetické simulace s běžnými až suchými podmínkami na počátku srážky plyne, že při nasyceném povodí dosahuje kulminační průtok až dvojnásobných hodnot. Vlhkostním podmínkám na počátku příčinné srážky je proto třeba věnovat mimořádnou pozornost jak při hodnocení proběhlých povodňových událostí, tak při předpovídání povodní.

Příloha: **OVĚŘENÍ VLIVU ÚDOLNÍCH NÁDRŽÍ NA PRŮBĚH
POVODNÍ DOLŮ PO TOKU**

Nositel projektu: AquaLogic Consulting, s.r.o
Horní 224
252 44 Psáry

Odpovědný řešitel: Ing. Jakub Krejčí, MSc. Ph.D

Doba řešení projektu: 09/2013–4/2014



Obsah

Úvod	4
Data	5
Srážková a teplotní data	5
Průtoky	6
Vodní hodnoty	7
Manipulace na nádržích	7
Základní simulace 2002 – 2013	8
Úvod	8
Výběr povodňových událostí	8
Použitý program – popis AquaLogu	9
Model RSNWELEV	11
Popis modelu SNOW-17	11
SAC-SMA	11
Sestavení modelu	11
Popis modelu pro simulaci neovlivněného stavu	12
Popis modelu pro simulaci ovlivněného stavu	14
Simulace neovlivněného a ovlivněného stavu	15
Výsledky simulací 1890 – 2013 a jejich vyhodnocení	17
Postup zpracování časových řad	18
Závislost zásoby vody ve sněhu (vodní hodnota) a počáteční hladina v nádrži	19
Závislost skutečné a modelové počáteční hladiny v nádrži	20
Závislost snížení odtoku v závislosti na kulminačním přítoku a objemu vlny	20
Klasifikace povodní	23
Závěr	23
Simulace povodní 2003 - 2013 v alternativním výpočetním kroku	25
Úvod	25
Sestavení modelu	26
Výstupy	27
Závěr	28
Simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží, hydrogramy na dolní Vltavě, Labi a Ohři	30
Použité modelovací systémy	30
Program HEC-RAS	30
Program AquaLog	30
Konfigurace modelu	31
Výběr nádrží	34

Ověření modelu na historických povodních	35
Kalibrace modelu pro ovlivněný stav (přítok do VD Orlík)	37
Simulace povodně 2013.....	39
Závěr	43
Simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží, hydrogramy na horním Labi	44
Závěr	49
Celkový závěr.....	50
Literatura	51
Seznam obrázků	52
Seznam tabulek	53

Úvod

Studie byla zpracována v rámci projektu“ Vyhodnocení povodní v červnu roku 2013“na základě usnesení vlády ČR č. 533 ze dne 3. července 2013 a je součástí dílčího úkolu 3.1 „Analýza antropogenního ovlivnění povodňového režimu“.

Studie navazuje na tříletý grantový projekt VaV/650/6/03 „Vliv, analýza a možnosti využití ochranné funkce údolních nádrží pro ochranu před povodněmi v povodí Labe a dále ho rozšiřuje. V rámci uvedeného projektu byly provedeny simulace pro ovlivněný a neovlivněný stav pro období let 1890-2002. Neovlivněný stav představuje odtokové podmínky, tak jak byly před výstavbou vodních nádrží. Ovlivněný stav zahrnuje vliv nádrží na odtok z povodí. Do modelu byly zahrnuty nádrže Lipno, Orlik a Slapy na Vltavě a vodní nádrž Nechranice na Ohři.

V předkládané studii bylo období 1890 -2002 rozšířeno o období let 2003-2013, pro které byla provedena simulace obdobným způsobem jako v předchozím projektu. Simulace byla koncipována jako kontinuální pro celé období, manipulace na nádržích byla provedena pro vybrané povodňové epizody a to v každém roce pro nejvýznamnější (nejvyšší kulminační průtok v profilu Děčín) letní a zimní epizodu. Výstupy všech simulací, jak z předchozího, tak současného projektu za období let 1890 – 2002, byly sestaveny do přehledu, který umožňuje členění povodní do různých kategorií v závislosti na jejich výskytu v různých obdobích, typu geneze odtoku a zasaženém povodí.

Předkládaná finální zpráva je za období projektu 2013 až 2014, kde hlavními výstupy plnění jsou:

1. Výsledky simulací VaV/650/6/03 a doplňkových simulací 1890-2013 ve struktuře
 - i. nádrže – volný ovladatelný objem na počátku povodně, kulminace přítoku a odtoku, objem vlny nad zvoleným průtokem, odtok v okamžiku maximálního přítoku
 - ii. vstupní profily (Beroun, Nespeky, Brandýs) – kulminační průtok, objem vlny nad zvoleným průtokem
 - iii. pro období, kdy jsou k dispozici zásoby vody ve sněhu posoudit, zda použité počáteční hladiny v nádržích byly v relaci k těmto zásobám a reálným manipulacím
 - iv. ovlivněné profily (Praha, Mělník, Louny, Ústí, Děčín) – ovlivněné a neovlivněné kulminace, objem vlny nad zvoleným průtokem.
2. Simulace povodní za období 2003 – 2013 provedené ve výpočetním kroku 6 hodin (výpočetní krok použitý ve VaV/650/6/03 a ve zprávě označován jako základní výpočet) a kontrolně pro vybrané povodně tento výpočet provést v hodinovém kroku (alternativní výpočet).
3. Simulované hydrogramy (ovlivněné a neovlivněné) povodně v červnu 2013 ve stanicích na dolní Vltavě, Ohři a Labi.
4. Simulované hydrogramy (ovlivněné a neovlivněné) povodně v červnu 2013 ve stanicích na horním Labi.

Zpráva je členěna na základě uvedených hlavních výstupů, kromě toho zahrnuje společnou kapitolu, která se týká vstupních dat.

Data

Zpracovávaná datová základna vstupních časových řad pro vlastní simulace zahrnovala období 2000-2013. Prodloužení do roku 2000 slouží pro přípravu počátečních podmínek pro srážko-odtokové modely a model tvorby tání sněhové pokrývky. Datová základna byla zpracována ve dvou variantách. V první variantě proběhlo zpracování dat postupem, který je kompatibilní s metodikou vyvinutou pro projekt VaV/650/6/03. Druhá varianta vychází z hodinových průběhů časových řad, které jsou již pro toto období k dispozici v dostatečném pokrytí a kvalitě. Pro vyhodnocení jednotlivých charakteristik simulovaných časových řad byla časová základna rozšířena na období 1890-2013. Mezi hlavní stavové proměnné hydrologického simulovaného systému patří srážky, teploty a vodní stavy převedené na průtoky. Kromě toho byly použity pozorované vodní hodnoty.

Srážková a teplotní data

Postup zpracování dat pro tvorbu plošných srážek (MAP) a plošných teplot (MAT) lze rozdělit do dvou fází: (i) zpracování staniční datové základny a (ii) interpolace bodových měření. Zpracování datové základny představovalo analýzu základních statistických charakteristik jednotlivých řad a jejich vzájemných závislostí.

Základem testu konzistence časových srážkových řad je metoda podvojných součtových čar (DMA - Double Mass Analysis). DMA metoda umožňuje zkontrolovat jednotlivé stanice mezi sebou na výskyt nehomogenních dat. Snížit vliv nehomogenit lze zprůměrováním několika stanic a tento průměr poté porovnat metodou DMA se stanicí, která není v souboru obsažena. Nehomogenity lze někdy těžko odlišit od přirozených změn, které nastaly. Jejich hlavním zdrojem bývá změna lokality nebo změna expozice stanice.

Zpracování dat probíhalo po dvou základních liniích. Pro základní výpočet byla připravována denní srážková data, pro alternativní výpočet byla připravována data pro výpočet v hodinovém kroku. Pro alternativní výpočet byla stanovena perioda výpočtu od roku 2000 do roku 2013, tak aby byly zahrnuty poslední nejvýznamnější povodně. Vzhledem k malému pokrytí území hodinovými daty pro období 2000 až 2005 bylo rozhodnuto pro toto období rozšířit databázi stanic s hodinovými srážkami o hodinová data vzniklá redistribucí denních srážek na základě hodinových radarových srážek. Tento postup poskytl podrobné plošné pokrytí území zahrnutého v modelu.

Příprava dat pro tvorbu denního MAP spočívala ve výběru stanic, které byly zahrnuty v původním modelu, doplnění chybějících dat v případě výpadku měření nebo v případě ukončení provozu stanice. MAP pro základní výpočet vstupuje do modelu přes Thiessenovy polygony, kdy každá stanice má přiřazenu váhu.

Alternativní model využívá pro vstup hodinového MAP gridové pole 1x1 km. Základním postupem kontroly hodinových srážkových dat je kontrola na 24 hodinové úhrny. Další metodou, kterou lze použít pro kontrolu hodinových dat jsou radarové srážky, které mohou indikovat stavy existence nebo existence srážky, případně mohou indikovat interval hodnoty.

Vzhledem k rozložení modelu po téměř celém povodí Labe, bylo vytvořeno jedno MAP a MAT pro celou oblast. Testování MAP a MAT na velikosti chyb poskytuje lepší celkový obrázek pro větší oblast, než v případě posuzovaného malého povodí (různé meteorologické situace). Tvorbou jednotného MAP odpadají rovněž složité výběry stanic v okolí kalibrovaného povodí.

Interpolace byly prováděny v programu AquaBase, která umožňuje zpracování plošných informací a provedení statistických analýz. Výběr byl tedy ovlivněn dostupností

interpolačních metod v tomto programu, který byl použit pro zpracování většiny vstupních dat. Kromě metody IDW AquaBase umožňuje interpolaci metodami krigingu a co-krigingu, které využívají upravené funkce Geostatistické softwarové knihovny (GSLIB) vyvinuté a vyvíjené na Stanfordské universitě v předchozích 20 letech (Deutch a Journel, 1998).

V rámci tohoto projektu byla pro interpolaci bodových měření použita izotropní varianta metody IDW. Rozhodnutí použít metody IDW bylo motivováno její jednoduchostí, robustností a rychlostí výpočtu a také zkušeností z období vývoje programu AquaBase, kdy testování jednotlivých procedur neprokázalo superioritu nějaké z dostupných metod. Výhoda IDW metody spočívá také ve využití pro malé vzorky dat a určení míry nejistoty přímo pro odhadované hodnoty. Vlastní použití IDW metody spočívá ve stanovení několika parametrů v závislosti od způsobu implementace metody. V programu AquaBase je možné specifikovat následující základní parametry pro kalibraci: (i) exponent, (ii) maximální vzdálenost stanic a (iii) počet stanic. V tomto případě byla použita varianta používaná v US NWSRFS (Larson, 1996), kde je stanoven počet stanic na doplnění na maximálně čtyři. Toho je dosaženo tím, že oblast v okolí interpolovaného bodu je rozdělena na čtyři kvadranty pomocí os směřujících od severu k jihu a od východu k západu. V každém kvadrantu je použita pouze jedna nejbližší stanice.

Výstupem zpracování srážkových dat jsou opravené časové řady hodinových a denních srážek a teplot pro období 2000-2013 a jejich plošné vyjádření pro povodí Vltavy, Ohře a Labe pod Brandýsem.

Průtoky

Pro simulační výpočty pro období 1890–2013 bylo použito několik typů časových řad průtoků. Pro převážnou většinu období jsou k dispozici především denní průměrné průtoky (QD). Kromě denních průtoků jsou pro vybrané profily k dispozici časové řady kulminačních průtoků (QK) v neekvidistantním kroku. Pro simulaci srážko-odtokových modelů byly připraveny šestihodinové časové řady. Příprava probíhala ve dvou krocích. V prvním kroku byly připraveny šestihodinové řady pomocí modifikované funkce EX40, jež je součástí předpovědního systému předpovědní služby NWS-USA. Funkce vyhodnocuje strmosti nárůstu a poklesu hydrogramu a interpoluje denní průtoky tak, aby byla zachována bilance. V druhém kroku byly šestihodinové časové řady adjustovány na základě kulminačních průtoků, pokud byly k dispozici.

Z hlediska přesnosti tohoto postupu mohou nastat následující varianty:

- **Není známa kulminace** – program se pokusí interpolovat vlnu takovým způsobem, aby byla zachována objemová bilance a tomu přizpůsobena kulminace. Konečný tvar vlny je velmi ovlivněn nastavením parametrů této procedury.
- **Je známa kulminace, ale není doprovázena časovým údajem.** Program se v první iteraci pokusí umístit časově tuto kulminaci, pokud toto řešení není jednoznačné, nastaví se kulminace na čas 12:00.
- **Je známa kulminace s údajem o čase.** Program umístí kulminaci do nejbližšího intervalu, pro který jsou specifikovány hodnoty, a provede adjustaci šestihodinové časové řady na tuto kulminaci.

V případech, kdy byla k dispozici v Hydrofondu povodňová událost, byla využita pro porovnání s vlnami odvozenými na základě QD a QK, nebo přímo upraven hodinový průtok na šestihodinový interval.

Pro simulace pro období 2000-2013 jsou již k dispozici pro některé profily kontinuální hodinová data. Kromě toho jsou pro toto období k dispozici pro většinu profilů lomové body

vodních stavů, které lze převést pomocí v té době platné křivky na průtoky. Obdobným způsobem jako v předchozím projektu byly pro zachování konzistence výpočtu připraveny i řady pro období 2000-2013 pro základní výpočet. Šestihodinové průtoky byly získány průměrováním hodinových průtoků s tím, že byla zachována kulminace a vodní bilance. V některých případech, kdy došlo k výrazné deformaci hydrogramu, bylo upuštěno od zachování kulminačního průtoku.

Pro alternativní výpočet byly přednostně použity hodinové průtoky. Pokud nebyly k dispozici, byly použity průtoky získané z lomových bodů vodních stavů, které byly interpolovány na hodinový krok a následně podle měrných křivek převedeny na průtoky. Aplikace toho postupu byla v závislosti na jednotlivých stanicích použita především pro období 2000-2004.

Výstupem zpracování průtoků byly šestihodinové a hodinové časové řady pro období 2000-2013.

Vodní hodnoty

V rámci vyhodnocování vodní zásoby ve sněhové pokrývce v rámci ČHMÚ byly zpětně vytvořeny gridové soubory s vodními hodnotami od roku 1970. Tyto soubory byly poskytnuty a v rámci programu AquaBase rozpočítány na jednotlivá povodí. Byl proveden odhad vodních zásob pro ty gridové soubory, které spadají do časového intervalu počátku povodní v zimním a jarním období. Takto spočítané vodní zásoby byly použity pro analýzu odhadu počáteční hladiny v nádržích.

Manipulace na nádržích

V rámci všech dílčích úkolů se aplikují data charakterizující vodní nádrže. Tato data byla získána od podniků povodí včetně časových řad přítoků, průběhů hladin a odtoků. Kromě těchto dat byly poskytnuty podnikem Povodí Ohře, státní podnik ovlivněné a neovlivněné průtoky pro profil Stranná (Nechranice) pro povodeň 2013.

Základní simulace 2002 – 2013

Úvod

V rámci projektu VaV/650/6/03 „Vliv a možnosti využití ochranné funkce údolních nádrží pro ochranu před povodněmi v povodí Labe“ byl zkoumán vliv nádrží na hlavní profily na Vltavě (Praha, Vraňany), Ohři (Louny) a Labi (Mělník, Ústí a Děčín). Projekt vznikl na základě Akčního plánu povodňové ochrany v povodí Labe, schváleného členskými zeměmi Mezinárodní komise pro ochranu Labe (MKOL).

V návaznosti na tento projekt, který zahrnoval období let 1890-2002, bylo rozhodnuto toto časové období rozšířit až do roku 2013 s použitím stejné metodiky jako v rámci původního projektu.

Pro období 2003–2013 byla provedena simulace povodní ve výpočetním kroku 6 hodin v souladu s metodikou použitou v projektu VaV/650/6/03. V první fázi byla pro každý rok vybrána největší zimní a letní povodňová epizoda. Vlastní simulace byla koncipována jako kontinuální, což řeší problém s počátečními podmínkami stavových proměnných modelu na rozdíl od událostních simulací. Událostní koncept simulace je aplikován pouze pro manipulace na nádržích pro vybrané povodňové epizody. Pro simulaci byl použit zrevidovaný model použitý v projektu VaV/650/6/03 a popsáný v dílčích zprávách projektu za rok 2004 a 2005.

Výběr povodňových událostí

Simulace manipulací na vodních dílech je událostní, nikoliv kontinuální. Z tohoto důvodu je nezbytným předpokladem pro manipulace provést výběr vlny a příslušnou časovou periodu výskytu. Řešení problematiky výběru vln spočívá v analýze pozorovaných a simulovaných neovlivněných průtoků v profilu Mělník, Ústí nebo Děčín. Tyto profily byly vybrány jako určující pro výběr vln. Toto kritérium je doplněno podmínkou zvoleného průtoku Vltavy a Ohře. Když bude v daném roce povodeň na Labi pod soutokem s Vltavou způsobena horním Labem a v jiné povodni překročí průtok Vltavy zvolenou mez, budou zpracovány obě povodně. To odráží skutečnost, že převážná většina povodňových vln v těchto profilech je původem vzniku z povodí Vltavy, kde se vyskytují nejvýznamnější vodní nádrže. V každém roce období 2003-2013 byla po splnění základních i doplňkových kritérií vybrána pouze jedna povodňová událost s nejvyšší kulminací pro zimní a jedna pro letní období.

Vzhledem k posuzovanému období, které celé spadá do období po výstavbě vodních děl, jsou pozorované průtoky ovlivněné manipulacemi na těchto nádržích a z tohoto pohledu homogenní. Vzhledem k nelineární transformační funkci nádrží nelze automaticky použít nejvyšší kulminační průtoky, ale je třeba je posoudit i z pohledu neovlivněných průtoků. Simulované neovlivněné průtoky nejsou obecně tak přesné jako pozorovaná data a rovněž chyba u jednotlivých povodňových vln nemá lineární závislost na velikosti průtoku a pro roky s porovnatelnými kulminacemi v letním nebo zimním období je nezbytné použít pro výběr jak pozorovaný, tak simulovaný průtok.

Výběr povodňových epizod je uveden v Tab. 1s uvedením počátku a konce vlny. Časové vymezení vlny je založeno na analýze této povodně v profilech Vyšší Brod, Orlík, Brandýs a Nechanice, tak aby případné nástupy a poklesy vln byly zcela v tomto intervalu. Zohledněna je také doba postupu povodně pro neovlivněný stav.

Tab. 1 Výběr povodňových situací za období 2003-2013.

Identifikátor	Počátek vlny	Konec vlny
12_2002	29.12.2002:06	11.01.2003:12
05_2003	08.05.2003:00	18.05.2003:06
03_2004	24.03.2004:06	02.04.2004:12
06_2004	01.06.2004:18	10.06.2004:18
03_2005	15.03.2005:12	26.03.2005:00
08_2005	20.08.2005:18	31.08.2005:00
03_2006	25.03.2006:00	08.04.2006:18
05_2006	25.05.2006:12	06.06.2006:12
02_2007	12.02.2007:06	22.02.2007:12
09_2007	04.09.2007:00	11.09.2007:06
12_2007	02.12.2007:12	13.12.2007:18
05_2008	16.05.2008:06	26.05.2008:12
03_2009	02.03.2009:18	13.03.2009:00
06_2009	22.06.2009:00	05.07.2009:00
03_2010	18.03.2010:18	01.04.2010:06
08_2010	04.08.2010:12	14.08.2010:12
01_2011	07.01.2011:18	22.01.2011:06
07_2011	19.07.2011:00	29.07.2011:06
02_2012	24.02.2012:12	11.03.2012:12
04_2012	25.04.2012:12	06.05.2012:12
01_2013	27.01.2013:06	07.02.2013:06
05_2013	30.05.2013:06	09.06.2013:18

Tab. 2 zahrnuje jako předchozí tabulka seznam vybraných povodňových událostí s kulminačními průtoky ve vybraných profilech s uvedením času kulminace a N-letosti. Kulminační průtoky byly převzaty z operativních dat a nejsou tedy vždy poslední oficiální verzi průtoky. Z uvedeného seznamu pokrývajících 11 let vyplývá, že ani jednou nebyla na uvedených významných hlavních profilech překročena 50letá voda, pouze při dvou epizodách se průtok této době opakování blížil (2006 Brandýs, 2013 Chuchle, Děčín, Beroun). Ve třinácti případech (2 vlny ročně) nebyl překročen u všech uvedených profilů ani 1letý průtok. Výběr řídicího profilu pro výběr povodňových vln předurčuje generalizaci vlivu nádrží pouze na hlavní profily na dolním toku, což byl a je záměrem těchto analýz.

Použitý program – popis AquaLogu

Pro původní projekt byl použit pro hlavní simulace vodohospodářský modelovací program AquaLog (AquaLog, 2011), jehož současná verze je v současnosti používána v operativní předpovědi v rámci ČHMÚ. Kopie původní použité verze je stále k dispozici, ale není kompatibilní se současným systémem ukládání dat. Původní datové struktury byly převedeny do současné verze.

Hydrologická a hydrodynamická část modelu založeného na kostře předpovědního systému ČHMÚ využívá následující modelovací techniky (AquaLog, 2011):

- Model RSNWELEV určený k výpočtu nadmořské výšky, ve které dochází k separaci na dešťovou a sněhovou srážku.
- Model SNOW-17 určený pro simulaci akumulace a tání sněhu.
- Model Sacramento (SAC-SMA) je založen na parametrizaci charakteristik půdní vlhkosti.
- Model IUH-HG je určen pro transformaci odtoku pomocí jednotkového hydrogramu.
- Model TDR a Muskingum Cunge jsou určeny pro simulaci odtoku říčním korytem.

Tab. 2 Základní charakteristiky vybraných povodňových vln.

Identifikační	Brandýs (Labe)			Praha-Chuchle (Vltava)			Děčín (Labe)			Louny (Ohře)			Beroun (Berounka)		
	Datum kulminace	Kulminační průtok [m ³ .s ⁻¹]	N-letost	Datum kulminace	Kulminační průtok [m ³ .s ⁻¹]	N-letost	Datum kulminace	Kulminační průtok [m ³ .s ⁻¹]	N-letost	Datum kulminace	Kulminační průtok [m ³ .s ⁻¹]	N-letost	Datum kulminace	Kulminační průtok [m ³ .s ⁻¹]	N-letost
12_2002	04.01.2003:09	660	1-5	06.01.2003:01	952	>1	06.01.2003:21	2090	<5	05.01.2003:15	244	<1	04.01.2003:08	519	1-5
05_2003	14.05.2003:10	195	<1	16.05.2003:01	96	<1	15.05.2003:01	411	<1	09.05.2003:23	22	<1	10.05.2003:15	22	<1
03_2004	25.03.2004:05	264	<1	26.03.2004:23	502	<1	27.03.2004:14	895	<1	25.03.2004:20	38	<1	26.03.2004:20	129	<1
06_2004	10.06.2004:18	65	<1	07.06.2004:15	364	<1	08.06.2004:12	480	<1	10.06.2004:18	24	<1	05.06.2004:01	99	<1
03_2005	19.03.2005:11	570	1-5	19.03.2005:19	733	<1	20.03.2005:12	1565	>1	19.03.2005:23	187	<1	19.03.2005:20	368	1-5
08_2005	24.08.2005:09	144	<1	24.08.2005:13	445	<1	26.08.2005:01	677	<1	21.08.2005:21	37	<1	24.08.2005:22	65	<1
03_2006	04.04.2006:04	1030	10-50	02.04.2006:01	1430	1-5	04.04.2006:06	2730	<10	02.04.2006:13	250	<1	30.03.2006:00	337	1-5
05_2006	01.06.2006:13	107	<1	31.05.2006:09	805	<1	01.06.2006:17	1100	<1	01.06.2006:08	138	<1	29.05.2006:12	550	1-5
02_2007	17.02.2007:01	296	<1	17.02.2007:12	217	<1	17.02.2007:13	728	<1	17.02.2007:17	132	<1	15.02.2007:10	80	<1
09_2007	07.09.2007:23	232	<1	09.09.2007:10	84	<1	07.09.2007:21	407	<1	08.09.2007:06	43	<1	09.09.2007:05	24	<1
12_2007	09.12.2007:00	515	>1	06.12.2007:00	359	<1	09.12.2007:19	1060	<1	08.12.2007:05	179	<1	05.12.2007:23	139	<1
05_2008	23.05.2008:02	161	<1	24.05.2008:18	135	<1	21.05.2008:12	369	<1	18.05.2008:00	38	<1	21.05.2008:08	39	<1
03_2009	07.03.2009:03	455	<1	07.03.2009:19	583	<1	07.03.2009:23	1160	<1	07.03.2009:00	99	<1	07.03.2009:13	153	<1
06_2009	04.07.2009:02	195	<1	30.06.2009:17	797	<1	01.07.2009:20	961	<1	25.06.2009:14	20	<1	30.06.2009:23	85	<1
03_2010	23.03.2010:08	379	<1	23.03.2010:16	412	<1	24.03.2010:00	943	<1	28.03.2010:06	128	<1	23.03.2010:23	118	<1
08_2010	08.08.2010:21	447	<1	08.08.2010:22	761	<1	09.08.2010:16	1320	>1	08.08.2010:06	43	<1	09.08.2010:04	152	<1
01_2011	16.01.2011:21	645	1-5	15.01.2011:10	993	>1	17.01.2011:07	2020	<5	16.01.2011:15	320	1-5	15.01.2011:12	487	1-5
07_2011	23.07.2011:18	448	<1	22.07.2011:12	288	<1	24.07.2011:04	746	<1	23.07.2011:00	30	<1	22.07.2011:12	217	<1
02_2012	02.03.2012:02	561	>1	01.03.2012:23	357	<1	02.03.2012:05	1070	<1	01.03.2012:08	82	<1	01.03.2012:20	72	<1
04_2012	30.04.2012:12	193	<1	27.04.2012:06	123	<1	01.05.2012:16	387	<1	25.04.2012:14	34	<1	26.04.2012:03	36	<1
01_2013	01.02.2013:03	393	<1	01.02.2013:22	686	<1	02.02.2013:16	1210	<1	03.02.2013:02	97	<1	01.02.2013:21	212	<1
05_2013	04.06.2013:13	663	1-5	04.06.2013:07	3040	10-50	06.06.2013:04	3740	<50	05.06.2013:01	331	1-5	04.06.2013:08	960	10-50

Model RSNWELEV

Model RSNWELEV je určen k výpočtu nadmořské výšky, ve které dochází k separaci na dešťovou a sněhovou srážku. Vstupními proměnnými je teplota. Vstupní parametry zahrnují údaj o teplotě rozhraní (teplota, která rozděluje sněhovou a dešťovou srážku), teplotním gradientu během období srážky a nadmořská výška teplotní stanice.

Popis modelu SNOW-17

Model SNOW-17 je určen pro simulaci akumulace a tání sněhu. Model je určen pro simulaci odtoku způsobených táním sněhové pokrývky, v našich podmínkách často v kombinaci s dešťovými srážkami. Byl vyvinut v Hydrologic Research Laboratory severoamerické předpovědní služby. Jedná se o indexový koncepční model, tzn., že všechny významné fyzikální procesy ovlivňující akumulaci a tání sněhu jsou v tomto modelu reprezentovány matematickými vztahy. Tento model byl vyvinut ze dvou předchozích modelů sněhu (Anderson, 1973).

SAC-SMA

Model Sacramento (SAC-SMA, Sacramento Soil Moisture Accounting) je založen na parametrizaci charakteristik půdní vlhkosti (Burnash, 1995). Schematizuje povodí jako soustavu vertikálně a horizontálně uspořádaných nádrží se stanovitelnými kapacitami, které jsou spojeny procesy, jež umožňují systému aproximovat průběh nasycení půdy, které ovlivňuje produkci odtoku. Nádrže se plní následkem spadlých srážek a dochází k jejich naplnění v případě dostatečně velké srážky. K prázdnění nádrží dochází vertikální perkolací vody do hlubších zón, odčerpávání vegetací evapotranspirací, a laterálním odvodněním. Celkový odtok se skládá z pěti základních komponent: (i) odtok z nepropustných ploch, (ii) odtok z ploch, jež jsou dočasně nepropustné po dosažení nasycenosti půdní zóny, (iii) podpovrchový odtok, tj. odtok vytvořený přebytkem vody v zónách spojených s vegetačním krytem, (iv) suplementární podzemní odtok, tj. sezónní složka celkového podzemního odtoku, relativně proměnlivý, vytvářený z mělkých kolektorů podzemních vod (zóna mělkého proudění a (v) primární podzemní odtok, vytvářený ze zásob s dlouhou dobou zdržení v povodí, tj. odtok především z hlouběji uložených kolektorů (zóna hlubokého proudění).

Sestavení modelu

Pro základní simulaci byl v modulu Builder sestaven nový model, který je téměř identický s původním modelem. Aby byla zcela zachována kompatibilita, byly v simulačním hydrologickém systému provedeny úpravy, které umožňují vypínání některého rozšíření modelů. Především se jedná o možnost vypnutí vertikálního členění modelu sněhu, modelu zmrzlé půdy a některých dalších prvků na úrovni řízení výpočtu. Převedený model již používá víceznakové identifikátory, což umožnilo překonat původní omezení a využít pro označení povodí databázová čísla profilů používaná v rámci ČHMÚ. Tato změna vyvolala další úpravy softwaru pro převod původních datových struktur souborů DTR a F04. Převod umožnil načítání těchto dat současným AquaLogem a rovněž na základě převodní tabulky s původními a novými identifikátory změnil označení časových řad. V případech, kdy neexistuje databázový identifikátor pro srážkové nebo teplotní stanice, byl zachován původní.

Pro alternativní výpočet byl za základ modelu použit současný předpovědní systém. Účelem alternativního výpočtu je ověřit vliv hodinového a šestihodinového kroku na přesnost kulminace. Z tohoto pohledu by alternativní model měl mít podobnou konfiguraci jako model základní. Významné změny ve schematizaci povodí, které proběhly od doby ukončení původního projektu, byly vráceny zpět a vytvořený model měl podobnou základní strukturu jako původní model. Hlavní rozdíl spočívá především v:

1. podrobnějším členění současného modelu na zóny. Původní model měl striktně jednu výpočetní zónu na jedno povodí. Současný model je v závislosti na povodí distribuovaný nebo pseudo-distribuovaný.
2. MAP nevstupuje do modelu přes Thiessenovy polygony jako v původním modelu, ale přes grid v rozlišení 1x1 km. Metoda interpolace do gridu využívá IDW metodu.
3. Parametry tohoto modelu jsou určeny pro výpočetní krok 1 hodina

Popis modelu pro simulaci neovlivněného stavu

V původním projektu vzhledem k proměnným okrajovým podmínkám i interním změnám zkoumaného systému bylo sestaveno pět základních výpočtových modelů. Jednotlivé modely, číslované 1 až 5, jsou uvedeny v Tab. 3. První tři jsou určeny pro výpočet neovlivněného odtoku a poslední dvě pro výpočet odtoku ovlivněného. Při tvorbě schémat bylo postupováno následujícím způsobem:

1. Pokud existuje pozorovaný průtok v profilu tvořícím okrajové podmínky, má přednost před odtokem ze simulace srážko-odtokovým modelem
2. Pokud existuje pozorovaný průtok v profilu v blízkosti profilu tvořícího okrajové podmínky, má přednost tento profil přednost odtokem ze simulace srážko-odtokovým modelem. Posunem profilu proti toku vznikne povodí, které se přiřadí k dolnímu povodí, nebo dojde k jeho kalibraci, pokud je to možné
3. Pro celou časovou periodu simulace existuje pouze omezené množství variant. Tím se zachová co největší konzistence simulace. Vzhledem k menší přesnosti průtoků generovaných srážko-odtokovými modely v porovnání s pozorováním určuje podíl ploch povodí simulovaných přesnost výpočtu. Zastoupení ploch se simulovaným odtokem s rostoucí dostupností dat klesá.

Tab. 3 *Varianty výpočtů zkoumané soustavy.*

Označení	Typ výpočtu	Období výpočtu
Schéma 1	neovlivněný odtok	1969-2002
Schéma 2	neovlivněný odtok	1954-1969
Schéma 3	neovlivněný odtok	1890-1954
Schéma 4	ovlivněný odtok	1954-2002
Schéma 5	ovlivněný odtok	1890-1954

V návaznosti na tato pravidla byl sestaven model pro neustálý stav, jehož schéma je na Obr. 1. Model je identický s modelem, který byl použit pro simulace pro období 1969-2002. Tento model maximálně využíval pozorované průtoky a pouze mezipovodí podél simulovaných toků se dopočítávají srážko-odtokovými modely. Mezi těmito modely mezipovodí je velký podíl nepozorovaných povodí, jejichž kalibrace je problematická. Okrajové podmínky říčních modelů jsou uvedeny v Tab. 4 a simulované okrajové podmínky v Tab. 5.

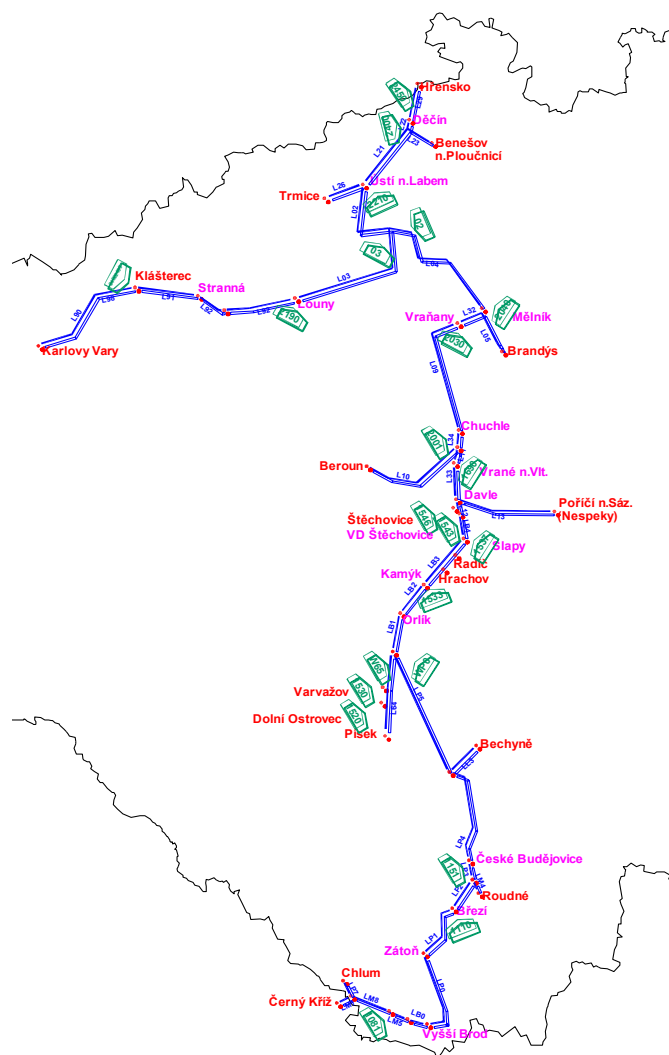
V této verzi modelu simulované vstupy srážko-odtokovými modely reprezentují plochu téměř 10147 km². Při hodnocení simulací lze z tohoto údaje odvodit, že při např. 20 % podcenění odtoku srážko-odtokovými modely se tato chyba projeví podceněním průtoků v Děčíně o čtyři procenta. Kromě toho se velká část těchto povodí nachází v dolních částech toku a tedy jejich vliv na kulminaci povodně, vytvářející se především ve výše položených částí povodí, není významný.

Tab. 4 Pozorované okrajové podmínky modelu.

Povodí	DBČ	Povodí	Tok	Plocha [km ²]
Ohře nad K. Vary	2140	Karlovy Vary	Ohře	2861.2
Vltava Orlík do Prahy	VLOR	Orlík	Vltava	12105.9
	1538	Hrachov	Brzina	133.1
	1539	Radíč	Mastník	268.1
	1546	Štěchovice	Kocába	308.0
	1980	Beroun	Berounka	1200.9
	1672	Nespeky	Sázava	852.0
Vltava Vyšší Brod do Orlíka	1330	Bechyně	Lužnice	4055.1
	1150	Roudné	Malše	962.7
	1520	Písek	Otava	2913.9
	1530	Varvažov	Skalice	368.3
	1520	Dolní Ostrovec	Lomnice	390.5
Vltava nad Lipnem	1080	Černý Kříž	Studená Vltava	103.2
	1070	Chlum	Vltava	347.0
Střední Labe	1040	Brandýs	Labe	13111.4
Dolní Labe	2260	Trmice	Bílina	923.3
Dolní Labe	2390	Benešov nad Ploučnicí	Ploučnice	1156.8

Tab. 5 Simulované okrajové podmínky modelu.

Lokalita	DBČ	Povodí	Tok	Plocha [km ²]
Karlovy Vary do Nehranic	24022409	Kláštevec	Ohře	509.6
	240222	Stranná	Ohře	224.7
Ohře Nehranice po Louny	2160	Žatec	Ohře	390.3
	2190	Louny	Ohře	956.9
Nad Lipnem				503.0
Vltava Lipno po Orlík	1534	Orlík	Vltava	1538.3
	1151	Č. Budějovice	Vltava	62.0
	1095	Zátoň	Vltava	304.0
	1110	Březi	Vltava	304.0
Vltava Orlík do Slap	1533	VD Kamýk	Vltava	111.4
	1537	VD Slapy	Vltava	337.2
Vltava Slapy po soutok s Labem	1543 (1544)	VD Štěchovice	Vltava	32.8
	1690	Zbraslav	Vltava	518.0
	2001	Chuchle	Vltava	618.0
	2030	Vraňany	Vltava	1326.5
	2040	Mělník	Vltava	671.4
Labe Brandýs do Ústí nad Labem	2210	Ústí nad Labem	Labe	264.1
	02	Litoměřice	Labe	861.3
	03	Terezín	Labe	613.5
Celkem				10147.0



Obr. 1 Schéma modelu pro neovlivněný stav.

Popis modelu pro simulaci ovlivněného stavu

Hlavní rozdíl mezi modelem pro neovlivněný stav a ovlivněný stav spočívá především v zahrnutí vodních nádrží do modelu. V souladu s původním projektem byly implementovány nádrže Vltavské kaskády a nádrž Nechranice na Ohři. Schéma modelu je na Obr. 2. Manipulace na nádržích využívá skripty, které určují základní manipulační pravidla během průběhu povodně v nádrži. V případě Nechranic je řídicím prvkem odtok z nádrže, v případě Vltavské kaskády se řízení podřizuje průtoku v Praze. Na ten má vliv nejenom manipulace na hlavních nádržích Vltavské kaskády, ale také přítoky Sázava a především Berounka. Pro manipulaci na kaskádě je využit optimalizační modul pro automatizovanou manipulaci s více nádržemi v sérii, který umožňuje:

- Kontinuální výpočet odtoku na základě stanovených měsíčních hladin v nádrži, kdy dochází k plnění a prázdnění nádrže a rovněž k prázdnění nádrže po manipulacích spojených s převáděním povodňových vln přes nádrže.
- Optimalizovat odtok z nádrže, tak aby nebyl překročen neškodný průtok ve specifikovaném profilu.

- Udržet průtok ve výpočetním uzlu systému pod soustavou nádrží na maximálním neškodném průtoku, tzn. zohlednit transformace odtoku od předmětné nádrže do tohoto uzlu včetně všech přítoků.
- Manipulaci s časově proměnnou velikostí maximálního neškodného průtoku.
- Pravidla řízení jsou časově závislá a lze je aktivovat nebo deaktivovat. Aktivace a deaktivace závisí na hlavním a doplňkovém signálu řízení.
- V oblasti maximální hladiny optimalizovat odtok tak, aby nedošlo k jejímu překročení. Po dosažení maximální hladiny je udržován odtok rovný přítoku, pokud to technické podmínky umožňují.
- Prázdnit nádrž po dosažení kulminace dle stanovených pravidel manipulačního řádu s ohledem na neškodný průtok a rychlost prázdnění.

V Tab. 6 jsou uvedeny základní charakteristiky nádrží zahrnutých v sestaveném modelu. Jejich výběr koresponduje s hlavním cílem původního projektu, kterým bylo ověření vlivu nádrží především na průtok na dolním Labi. V modelu jsou zahrnuty všechny nádrže Vltavské kaskády, přestože pouze Lipno, Orlík a za určitých podmínek Slapy mohou významněji ovlivnit průchod povodně. Ostatní nádrže jsou zahrnuty protože model dolní části Vltavské kaskády má horní okrajovou podmínku přítok do VD Orlík a dolní okrajovou podmínku průtok v profilu v Chuchle.

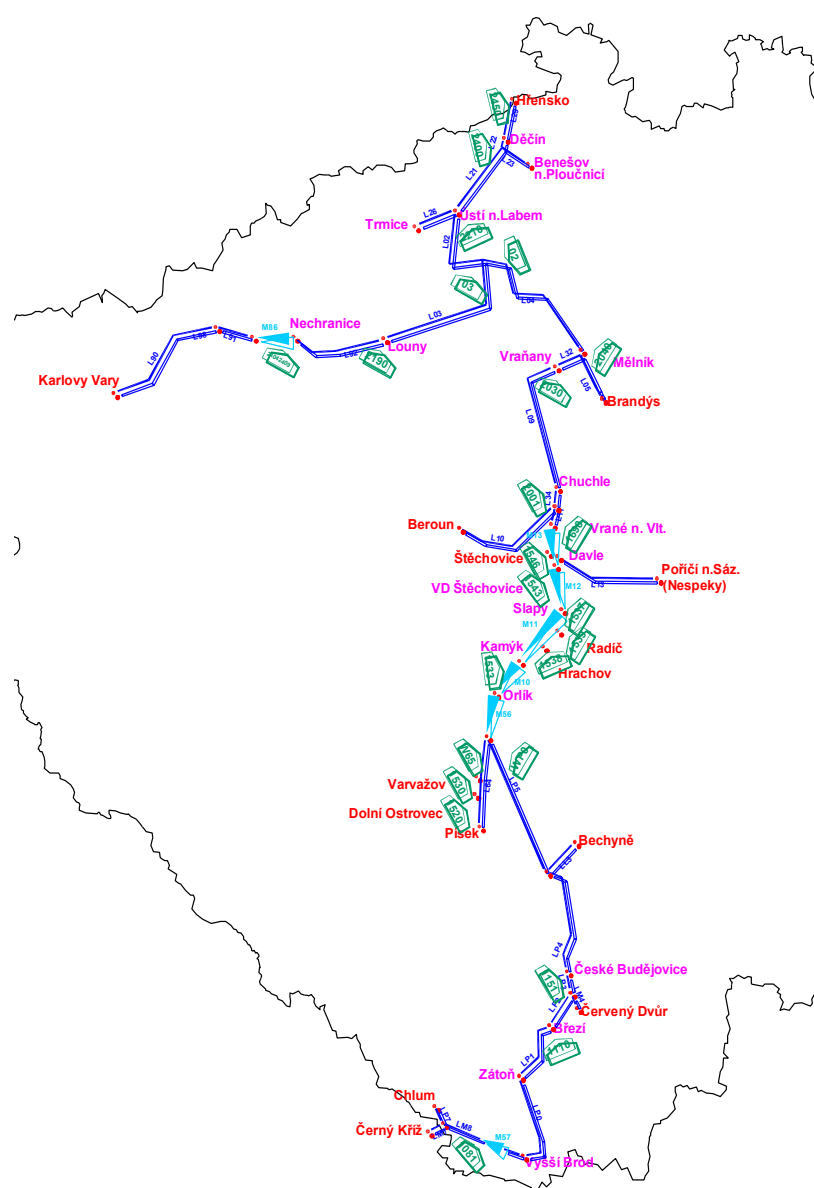
Tab. 6 Seznam hlavních nádrží a jejich základních charakteristik zahrnutých v modelu simulované soustavy.

Vodní dílo (Tok)	Lipno I (Vltava)	Orlík (Vltava)	Kamýk (Vltava)	Slapy (Vltava)	Štěchovice (Vltava)	Vrané (Vltava)	Nechranice (Ohře)
Říční km	329.54	144.65	134.73	91.69	84.32	71.33	103.44
Plocha povodí [km ²]	948	12106	12218	12957	13298	17785	3590
Rok uvedení do provozu	1959	1962	1966	1955	1945	1935	1968
Zatopená plocha [ha]	4870	2733	195	1163	96	263	1338
Maximální retenční hladina [m n. m.]	725.6	353.6	284.6	270.6	219.4	200.1	273.05
Hladina ovladatelného prostoru [m n. m.]	725.6	353.6	284.6	270.6	219.4	200.1	271.9
Hladina zásobního prostoru [m n. m.]	724.9	351.2	284.6	270.6	219.4	200.1	269.0
Hladina stálého nadržení [m n. m.]	716.1	329.6	282.1	246.6	215.8	199.1	235.4
Celkový objem [mil. m ³]	309.5	716.5	13.0	269.3	10.4	11.1	287.6
Celkový ovladatelný objem [mil. m ³]	309.5	716.5	13.0	269.3	10.4	11.1	272.4
Ovladatelný ochranný prostor [mil. m ³]	33.2	62.1	0.0	0.0	0.0	0.0	36.6

Simulace neovlivněného a ovlivněného stavu

Simulace neovlivněného stavu probíhá pro celou simulační soustavu v jednom běhu. Naproti tomu výpočet modelem pro ovlivněný stav se po každé simulaci manipulace odtoku v nádrži (Lipno, Orlík a Nechanice) přeruší a výstup automatizované manipulace je zkontrolován a v případě zjištění problematických zásahů modelu je provedena manuální oprava. Tyto zásahy se týkají především menších povodňových vln. Počáteční podmínky výpočtu jednotlivých vln se uvažují pouze u hladin v nádrži. Každá povodňová vlna má určený počátek, čas kulminace

a konec. Stanovení počáteční hladiny vychází z dlouhodobé analýzy průběhů hladin v nádrži. Použity byly průměrné hodnoty, které jsou uvedeny Tab. 7. Počáteční hladina v nádrži určuje množství volného prostoru k zachycení povodně a tím ovlivňuje výrazně velikost snížení kulminačního průtoku. Zatímco v letním období lze použití průměrných hodnot odůvodnit jako velmi spolehlivé, protože nedochází k předpouštění jako je tomu v zimním období. Jisté odchylky lze pouze pozorovat na konci léta, kdy dochází v případě srážkově chudých období k poklesu hladiny v nádrži a tím i náhodné odchylce od dlouhodobého průměru. V zimním období, v závislosti na množství sněhu v povodí nad vodním dílem, dochází k většímu nebo menšímu předpouštění a dlouhodobá průměrná hodnota hladiny v nádrži není reprezentativní. V návaznosti na původní projekt byl dodržen tento postup. Simulace neustáleného stavu probíhá ve stromové struktuře, kdy jsou počítány postupně na sebe navazující srážko-odtokové modely a modely pro výpočet proudění v otevřeném korytu říční sítě. Srážko-odtokový model je provázán s modelem tvorby a tání sněhové pokrývky.



Obr. 2 Schéma modelu pro ovlivněný stav.

Tab. 7 Roční průběh počátečních podmínek – hladiny v nádržích.

Měsíc	Lipno - hladina [m n. m.]	Orlík - hladina [m n. m.]	Nechranice – hladina [m n. m.]
01	723.88	348.20	266.83
02	723.89	347.67	267.22
03	724.13	347.61	267.90
04	724.64	348.67	268.66
05	724.79	349.75	268.04
06	724.71	349.58	267.37
07	724.61	349.55	266.91
08	724.49	348.62	266.37
09	724.31	347.10	265.99
10	724.23	347.78	265.68
11	724.12	348.51	265.63
12	723.92	348.03	266.16

Výsledky simulací 1890 – 2013 a jejich vyhodnocení

Výstupy simulací tohoto projektu pro období 2003-2013 byly spojeny s předchozími výstupy za období 1890-2002. Tím vznikla řada pro období od roku 1890 do současnosti, která obsahuje:

1. Výstupy kontinuální simulace pro období 1890 -2013 v šestihodinovém výpočetním kroku pro profily zahrnuté v modelu.
2. Výstupy událostní simulace pro období 1890-2013, která obsahuje vliv nádrží pro každou největší zimní a letní událost v každém roce pro profily zahrnuté v modelu.

Simulované a pozorované časové řady byly analyzovány z pohledu následujících charakteristik:

1. nádrže
 - a) volný ovladatelný objem na počátku povodně
 - b) kulminace přítoku a odtoku
 - c) objem vlny nad zvoleným průtokem
 - d) odtok v okamžiku maximálního přítoku
2. vstupní profily (Beroun, Nespeky, Brandýs)
 - a) kulminační průtok
 - b) objem vlny nad zvoleným průtokem
3. pro období, kdy jsou k dispozici zásoby vody ve sněhu posoudit, zda použité počáteční hladiny v nádržích byly v relaci k těmto zásobám a reálným manipulacím
4. ovlivněné profily (Praha, Mělník, Louny, Ústí, Děčín)
 - a) ovlivněné
 - b) neovlivněné
 - c) objem vlny nad zvoleným průtokem

Výsledky simulací a analýz jsou vzhledem k rozsahu uloženy v souborech MS EXCEL na CD, jež je součástí této zprávy.

Postup zpracování časových řad

Výběr povodňových vln byl založen na základních východiscích původního projektu VAV. Pro každou vybranou povodňovou událost byl ve zmíněném projektu stanoven počátek a konec manipulace na nádržích Lipno I, Orlík a Nechanice. Počátek byl stanoven s ohledem na možnosti předpovědi průběhu povodně. Většinou se jednalo o blížící se nástup povodňové vlny. Toto vymezení bylo vzato jako první iterace pro odvození intervalů pro zpracování povodňových vln. Takto vymezené časové období je dostačující pro určení kulminačního průtoku nebo v případě nádrží pro stanovení velikosti celkového snížení průtoku nebo snížení průtoku v okamžiku kulminace přítoku. Pro potřeby charakterizace povodňových objemů vyvstává problém rozdílných průběhů povodní a s tím spojené standardizace postupů pro definici předmětného období pro analýzu. Problematiku rozdílnosti tvaru vln, délky jejich trvání lze charakterizovat následovně:

1. Povodňová vlna se skládá z několika navazujících vlnek s podobnou kulminací. Někdy taková povodňová vlna trvá desítky dnů a vlastní manipulace začíná na začátku zvyšujících se přítoků do nádrže.
2. Povodňová vlna se skládá ze dvou navazujících vln, kdy první menší plynule přechází v hlavní vlnu. Z hlediska manipulace je počátek vlny stanoven na počátek první menší vlny.
3. Povodňová vlna se skládá ze dvou vln, kdy po první dochází k výraznému poklesu a manipulace následné hlavní vlny může/nemusí být ovlivněna první vlnou. Zde záviselo na velikosti první vlny a ve většině případů její vliv nebyl uvažován.
4. Průtoky v jednotlivých profilech mají různou délku trvání průtoku nad referenčním průtokem.

Jedním z kritérií, které lze využít pro charakterizaci velikosti povodně, je její objem. Bylo rozhodnuto, že pro každou povodňovou vlnu budou stanoveny objemy vlny nad určitým referenčním průtokem. Základem je tedy správné stanovení referenčního průtoku. Tento průtok může teoreticky nabývat hodnot od nuly, kdy je vyhodnocován celkový objem až do velikosti odtoku na úrovni N-letých vod. Analýza průtoků ukázala, že maximální referenční průtok by neměl přesahovat $Q_{N=1}$. Za základní referenční průtok byl zvolen průměrný průtok Q_a a v případě vodních děl průtok označovaný Q_{vd} uvedený v Tab. 8. Kromě toho jsou v tabulce uvedeny charakteristické průtoky pro jednotlivé analyzované profily.

Tab. 8 N-leté průtoky, průměrné průtoky a průtoky pro základní povodňové stavy.

	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}	Q_a	Q_{vd}	SPA1	SPA2	SPA3
VD Orlík	461	954	1200	1860	2180	83.4	600	610	950	1500
Stranná	200	373	455	622	756	30.7	170	139	184	216
VD Lipno	59	130	172	294	359	13,1	90			
Vyšší Brod	61	134	177	305	374	13.4		59.6	79.4	129
Brandýs	441	754	895	1230	1390	99.3		335	550	785
Beroun	270	615	799	1310	1560	35.6		260	320	400
Nespeky	159	319	398	604	702	23.4		100	154	230
Louny	251	466	568	767	942	36.3		157	190	235
Mělník	1080	2060	2520	3640	4150	252		814	1200	1440
Praha Chuchle	855	1770	2230	3440	4020	148		450	1000	1500
Děčín	1300	2300	2760	3900	4410	309		786	1080	1320
Ústí	1240	2220	2670	3780	4290	293		819	1080	1310

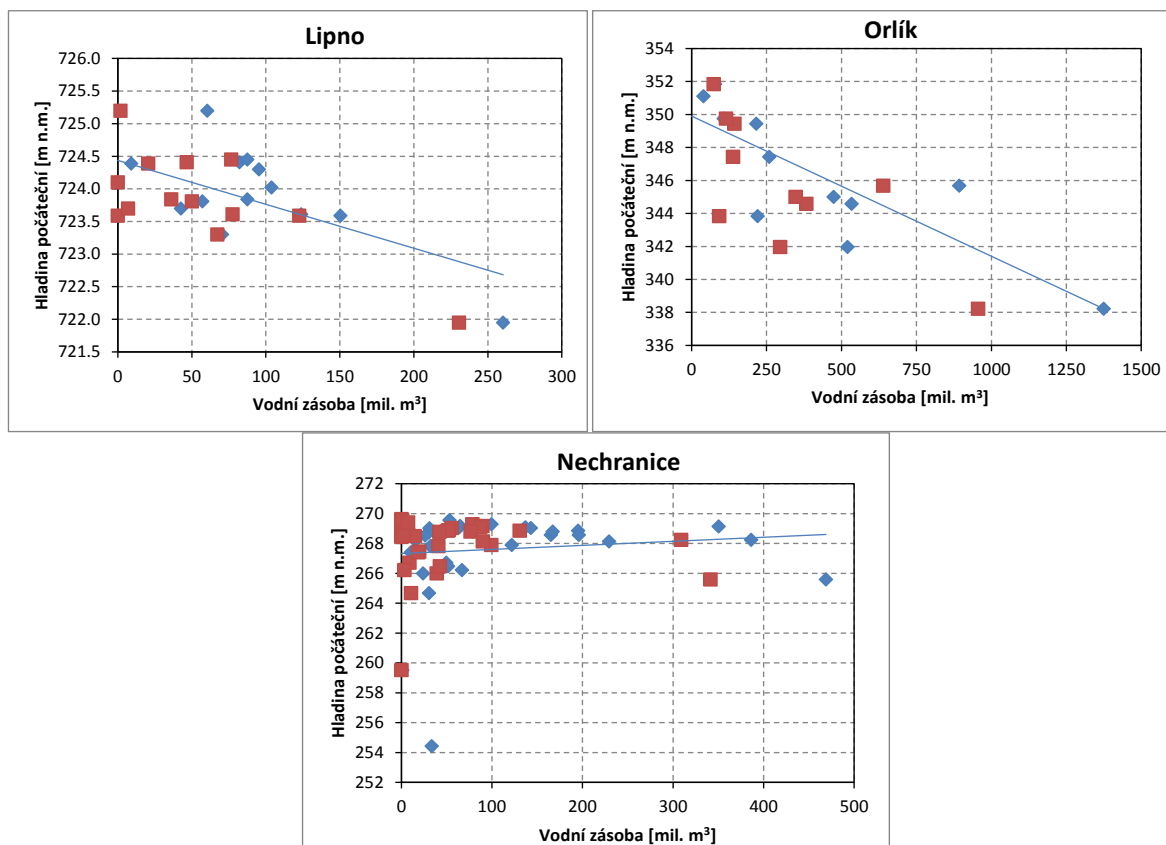
Jak již bylo zmíněno, základní význam pro analýzy mají především objemy nad průměrnými a referenčními průtoky. Do analýzy lze zahrnout i jednoleté průtoky, které v některých

případech určují přesněji povodňový průtok především u komplikovaných povodňových vln. Stanovení objemu nad definovaným průtokem bylo prováděno následujícím způsobem.

1. V prvním kroku byla stanovena hodnota kulminačního průtoku a nalezena jeho pozice v časové řadě.
2. Na obě strany od kulminačního průtoku byl testován vztah simulovaného povodňového a referenčního průtoku. Pokud byl povodňový průtok vyšší, byl zahrnut do povodňové vlny.
3. Povodňové vlny získané v 2. kroku byly vizuálně analyzovány a následně byly manuálně upravovány časové intervaly, tak aby objemy co nejpřesněji charakterizovaly danou povodňovou vlnu:
 - a. Vlna byla ideálně ohraničena postupem v bodě 2.
 - b. Vlna zasahovala časově rozsáhlé období, kdy povodňové průtoky byly nad referenčními. V takovém případě byla ověřována možnost použít hodnoty průtoků SPA1 na ohraničení vlny.

Závislost zásoby vody ve sněhu (vodní hodnota) a počáteční hladina v nádrži

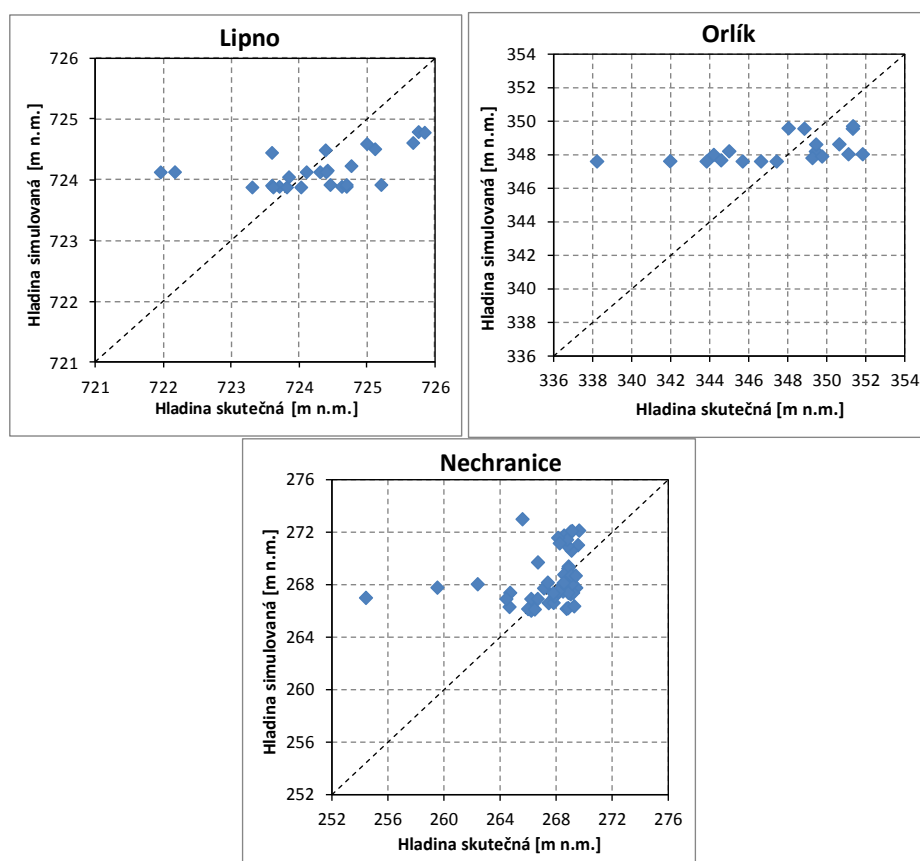
Pro období od roku 1970 do roku 2013 byla analyzována závislost počáteční hladiny v nádrži na množství zadržené vody ve sněhové pokrývce v povodí odvodněném do nádrže. U obou nádrží Vltavské kaskády je zřetelný trend poklesu počáteční hladiny s nárůstem vodní hodnoty v povodí. Nejnižšího snížení počáteční hladiny bylo u obou nádrží dosaženo v březnu 2006. U nádrže Nechanice závislost počáteční hladiny na množství sněhu v povodí není zřejmá.



Obr. 3 Závislost skutečné počáteční hladiny na velikosti vodní hodnoty sněhu. Červený symbol - obsah vody z měření před uvažovanou pozorovanou počáteční hladinou, modrý symbol - z měření po uvažované počáteční hladině.

Závislost skutečné a modelové počáteční hladiny v nádrži

Během simulací ovlivněného stavu se vycházelo z dlouhodobé průměrné měsíční hladiny. Porovnání takto generovaných počátečních hladin se skutečným průběhem počátečních hladin je uvedeno na Obr. 4. Z těchto analýz, které jsou omezeny pouze na období od výstavby VD, vyplývá, že v oblasti výrazných snížení hladiny dochází k nadhodnocování počátečních hladin a naopak při vyšších počátečních hladinách dochází k podceňování reálných hodnot. V případě VD Orlík se nejvýznamnější odchylky vyskytují pro povodně z dubna 1987 a března 2006. Jedná se o povodně, kdy lze realizovat předpouštění nádrže s ohledem na množství zásob vody ve sněhové pokrývce. U nádrže Lipno je výraznější snížení hladiny dosaženo rovněž u březnové povodně 2006 a u březnové povodně 1962. Použití průměrné hladiny v těchto případech není pro velký rozdíl mezi simulovanou a pozorovanou hladinou vhodné.



Obr. 4 Vztah počáteční hladiny modelované a skutečné.

Závislost snížení odtoku v závislosti na kulminačním přítoku a objemu vlny

Základní charakteristikou udávající účinnost nádrže při snižování kulminačních průtoků a povodňových objemů je závislost snížení odtoku na kulminačním přítoku nebo objemu vlny přítoku do nádrže. V následujících grafech na Obr. 5 a Obr. 6 je zobrazen vztah mezi celkovým a kulminačním snížením odtoku. Ke kulminačnímu snížení odtoku dochází v době kulminace přítoku, celkové snížení je rozdíl kulminačního přítoku a kulminačního odtoku. Kromě toho je snížení odtoku vztaženo i k objemu vlny nad referenčním průtokem.

V případě VD Nechranice a VD Lipno je závislost snížení odtoku na přítoku téměř lineární. To vychází ze zjednodušené manipulace, kdy byl nastaven obdobný odtok z nádrže pro většinu přítoků. Pouze v případě možnosti dosažení maximální hladiny byl zvýšen odtok, tak aby nedošlo k jejímu překročení.

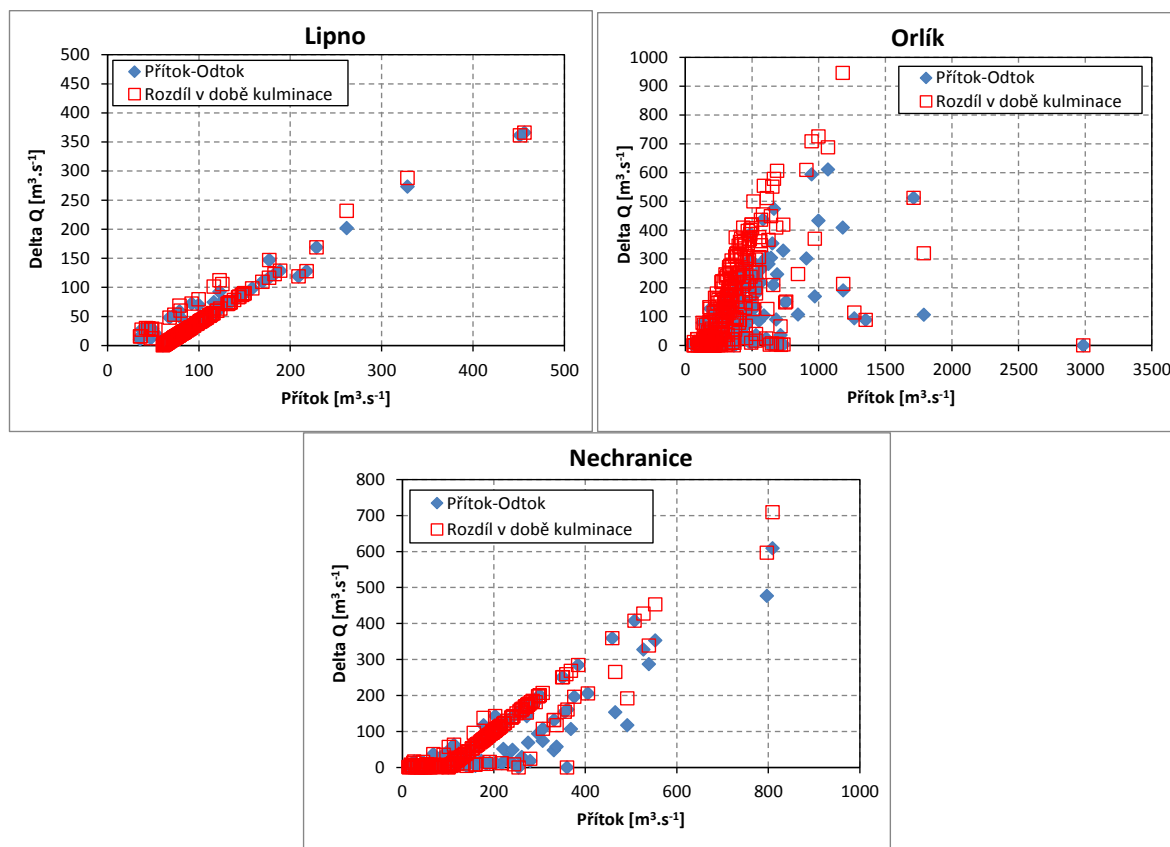
Pro nádrž Orlík je nejvyššího snížení dosahováno pro kulminační přítok do nádrže okolo $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vlastní manipulace byla nastavena tak, aby nebyl především překročen neškodný průtok v Praze. Manipulace vychází ze znalosti přítoku do nádrže pro předpovědní období 48 hodin. Obdobně je manipulováno i při reálné povodni. Celkové využití nádrže nebylo optimalizováno, protože nebyl během simulace znám přítok a průtoky v určujících profilech pro celý průběh povodňové vlny.

Je složité porovnat vztah simulovaného snížení průtoku v profilu Chuchle vlivem Vltavské kaskády se skutečným snížením, protože ho nelze přesně určit. Vždy se jedná o porovnání výstupů, které v sobě zahrnují simulaci s pozorováním průtoků. Přesnost simulace přirozeného odtoku lze určit pro období do roku 1954 nebo ovlivněného průtoku po období po výstavbě přehrad. Z těchto analýz ale nelze usuzovat na vztah simulovaného a reálného snížení. Pro některé povodňové vlny lze porovnat simulované snížení s výstupy z detailních vyhodnocení prováděných pro povodně 2002, 2006, 2011 a 2013 v rámci projektu LABEL a vyhodnocení povodně 2013 (Bush et al, 2012, Bush et al, 2013). V těchto detailních simulacích byly zahrnuty i další vodní nádrže v povodí Malše, Berounky a Sázavy. Tomu odpovídají i výstupy, kdy při detailních analýzách bylo snížení vyšší vlivem i dalších nádrží. Porovnání je pouze orientační, protože byly použity různé metodiky výpočtu.

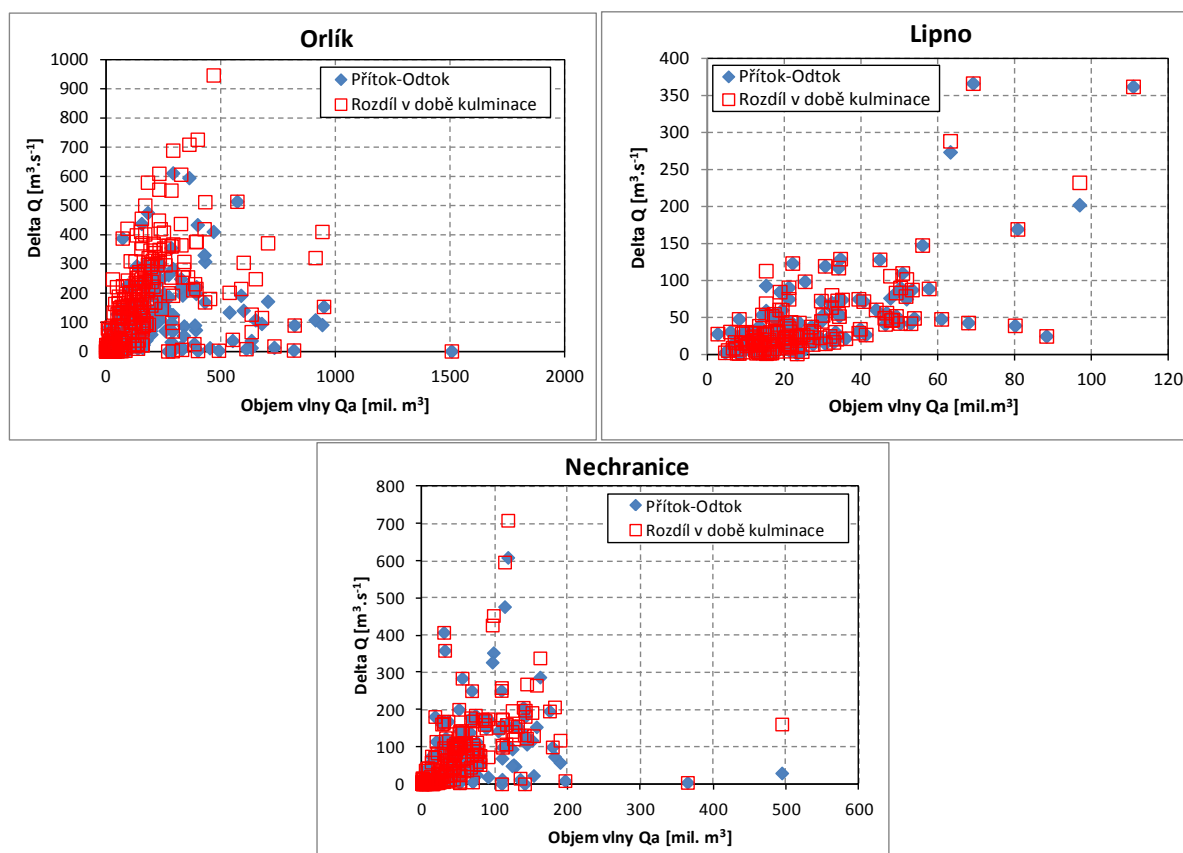
Pokud vztáhneme snížení průtoku na Orlíku ke snížení průtoku v Praze, vychází nám závislost, kde vyšší snížení na Orlíku způsobí vyšší snížení v Chuchli. V obecné rovině lze tedy ve většině případů usuzovat na vyšší simulované snížení průtoků v Praze Chuchli, než tomu mohlo být v realitě. Obecně je to dáno nižším simulovaným přítokem do nádrže Orlík v porovnání se skutečností a tím dosažení vyššího snížení na odtoku. Simulované přítoky do VD Orlík jsou podceňovány ve velkém počtu simulovaných vln. V ostatních případech kromě povodně v roce 2002, kdy je dosažen simulovaný přítok do nádrže $2985 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nebyl přesažen průtok $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jedná se o systematickou chybu, která částečně může být způsobena nedostatečnou přesností srážko-odtokových modelů z nepozorovaného povodí. Porovnáním plochy, která je reprezentována těmito modely, k celkové ploše povodí nad VD Orlík je zřejmé, že nižší simulované přítoky mají i jiný důvod. Přítok do VD Orlík je ovlivněn především následujícími hlavními faktory:

1. přesností srážko-odtokových modelů. Úspěšnost závisí na odhadu plošných srážek, počátečních podmínkách modelu, parametrech modelu,
2. přesností pozorovaných průtocích na říčních profilech,
3. fázovém posunu vln na přítocích ovlivněných mírou vzduť nádrží Orlík a Hněvkovice,
4. přesností odvozeného bilančního přítoku, jež závisí na batygrafických křivkách, průběhu hladiny a odtoku z nádrže.

V grafu závislosti snížení průtoku na objemu vlny pro nádrž Orlík vybočuje z řady povodň 2002. Jedná se o historicky největší povodeň a jsou uvažovány obě vlny. V případě nádrže Nechanice je nejvyššího objemu dosaženo pro povodeň z listopadu 1941. Podrobněji se problematikou přítoku do nádrže Orlík zabývá následující dílčí úkol „Simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží, hydrogramy na dolní Vltavě, Labi a Ohři“.



Obr. 5 Závislost snížení průtoku do nádrže na celkovém průtoku.



Obr. 6 Závislost snížení průtoku do nádrže na objemu vlny nad referenčním průtokem $= Q_a$.

Klasifikace povodní

Správné rozdělení povodní do definovaných tříd je důležitým předpokladem pro následné odvození závislostí manipulací na těchto definovaných třídách. Rozdělení povodní může být založeno na mnoha východiscích. Z hlediska rozdílných manipulací v letním a zimním režimu nádrží je základní členění na zimní a letní epizody nezpochybnitelné. Další postup by měl vycházet ze seznamu nádrží, které budou zahrnuty v posuzování vlivu manipulací. Toto dělení by mělo také vycházet z rozdělení na zimní a letní období. Nádrž, která nemá velký význam v letním režimu snižování povodňových průtoků vzhledem k malému vymezenému retenčnímu objemu, může hrát určitou roli v zimním režimu, kdy je umožněno dlouhodobé předpouštění v závislosti na vývoji sněhové pokrývky. Kromě členění na zimní a letní povodně z hlediska nádrží lze z obecného hlediska zimní povodně členit na povodně z tání sněhu a srážek a povodně pouze ze srážek v případě minimální sněhové pokrývky.

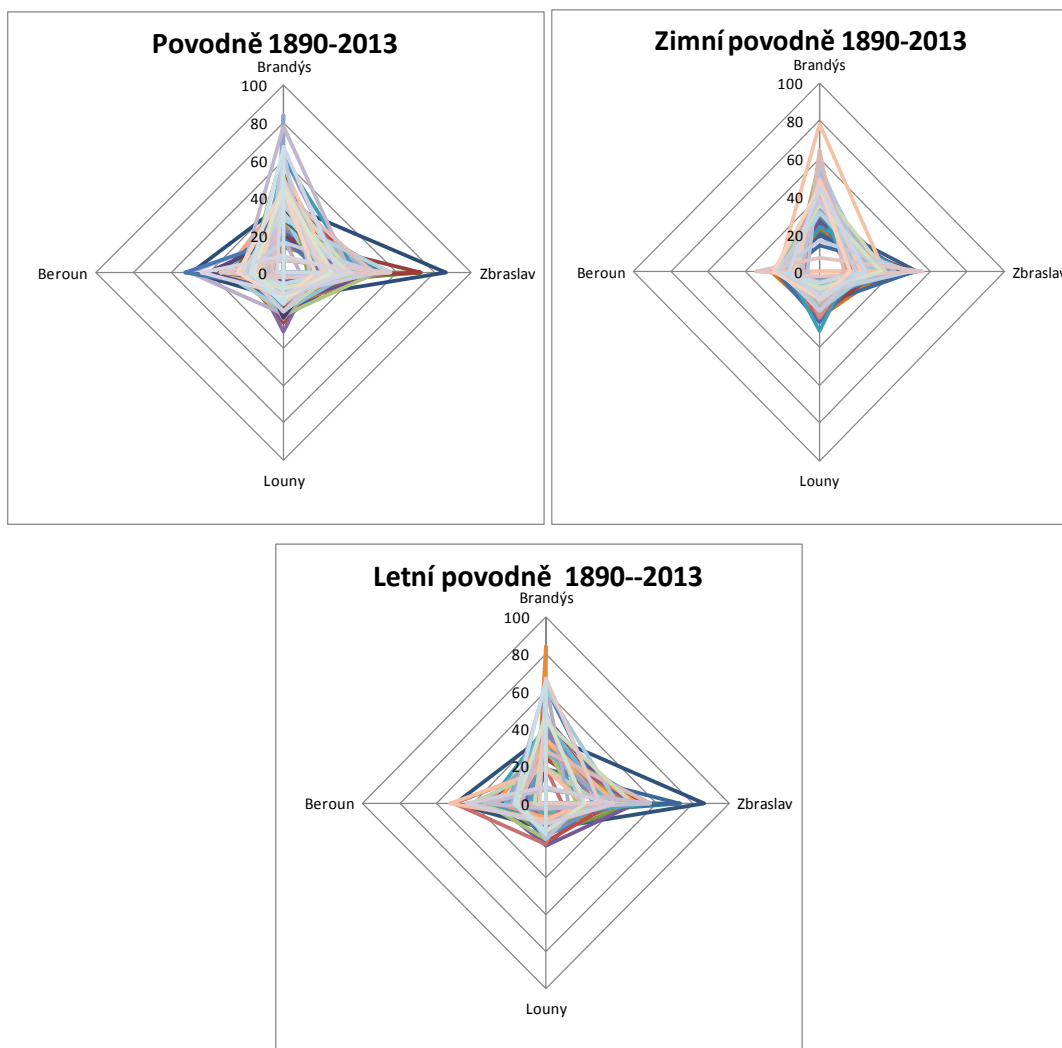
Z hlediska synoptických situací lze v měřítku povodí Vltavy a Labe členit povodně na základě těchto dvou toků podle toho, který byl převážně zasažen povodňovým průtokem. Výhody tohoto členění lze spatřovat ve zjednodušení závislosti snížení průtoků manipulacemi na nádržích. Pokud se jedná o typickou letní povodeň na Labi, lze na dolním toku Labe pozorovat minimální snížení průtoků. V zimním období tento efekt již není jednoznačný. Na druhou stranu členění v případě některých povodní naráží na problém se správným zařazením, kdy dochází k porovnávání průtoků z povodí Vltavy o ploše 26 730 km² a Labe o ploše 13 109 km². Výrazný je rovněž rozdíl mezi stoletými průtoky ve Vraňanech 4080 m³/s a 1390 m³/s v Brandýse, jinými slovy dvouletá povodeň na Vltavě má podobný průtok jako stoletá povodeň na Labi. Pokud kombinujeme letní a zimní povodně s povodněmi na Labi a na Vltavě, získáme čtyři základní třídy povodní. Vzhledem k velkému počtu událostí by bylo možné použít i detailnější klasifikaci.

Následující návrh klasifikace povodní je založen především na předpokladu, že nejvyšších snížení povodňových vln je dosahováno na Vltavské kaskádě, především na nádrži Orlík, do které je odvodněno povodí o ploše 12106 km². To představuje méně než jednu polovinu povodí Vltavy. Největším přítokem Vltavy pod VD Orlík je Berounka cca 8850 km². Pokud by hlavním cílem mělo být odvození vztahu mezi třídou povodně a vlivem nádrže na kulminační průtok nebo objem vlny, je k uvažování členění na povodně, které zahrnují povodně převážně z Berounky, kde nelze očekávat výrazný vliv nádrží. Klasifikace by mohla být založena na porovnání průtoků v profilu Zbraslav, Beroun a Brandýs. Pokud by byly použity pouze tyto tři profily a stanoveny procentuální intervaly pro podíl jednotlivých profilů na výsledné povodni, bylo by možné odvodit reálné množství tříd, které by mohly mít dostatečné zastoupení jednotlivých povodní.

Příklad procentuálního podílu vlivu jednotlivých profilů je na níže uvedených grafech (Obr. 7), které jsou odvozeny pro všechny povodně, zimní i letní. V grafech je zahrnut profil Louny. V těchto grafech jsou uvedeny povodňové vlny zpracovávané v tomto projektu, jedná se tedy o celou škálu průtoků od mírně zvýšených po extrémní.

Závěr

Byly provedeny simulace pro ovlivněný a neovlivněný průtok pro povodí Labe pro období 2003-2013. Bylo navázáno na projekt VaV/650/6/03, kde byly provedeny simulace pro ovlivněný a neovlivněný stav pro období let 1890-2002. Byly zpracovány časové řady ovlivněných a neovlivněných průtoků ve formě tabulek v prostředí MS Excel.



Obr. 7 Vliv jednotlivých profilů na výslednou povodeň na Labi.

Simulace povodní 2003 - 2013 v alternativním výpočetním kroku

Úvod

V minulosti bylo několik studií změřeno na výzkum vlivu srážek s různým časovým i prostorovým měřítkem na model SAC-SMA (Finnerty et. al., 1995; Smith et. al., 1995). Tyto studie prokázaly, že některé parametry SAC-SMA jsou poměrně citlivé na změnu časoprostorového rozlišení. Způsobují neuspokojivé rozdíly mezi pozorovaným a simulovaným průtokem pro malé povodí s využitím parametrů získaných kalibrací pro větší časoprostorové měřítko. US NWS prováděl simulace se semi-distribuovanými modely pro vybraná povodí, která byla rozdělena na 5 - 8 mezipovodí s cílem zachytit prostorovou proměnlivost srážky a prostorovou proměnlivost vlastností půdy a typu vegetace (Smith et al., 1999). Simulace s modelem celistvých parametrů a semi-distributivním modelem s použitím měřených průtoků byly provedeny pro pět povodí, jejichž plocha byla od 820 do 4200 km². Simulace probíhaly pro období 4 – 6 let. Analýzy ukázaly, že prostorové průměrné srážky odvozené z NEXRADu mohou zlepšit předpověď průtoků ve srovnání se vstupy pouze na základě srážkoměrů. Zatímco semi-distributivní přístup ukazuje potenciál pro zlepšení simulace, problémy s parametrizací a šumy v datech mohou eliminovat výhody, pokud se jedná o povodí s významným tlumícím efektem (např. způsobený hlubokými, dobře odvodněnými půdami). Většího efektu ze semi-distributivního přístupu je dosaženo pro povodí s rychlou odezvou odtoku (Smith et al., 2000). Optimální parametry z modelu celistvých parametrů se mohou výrazně lišit od optimálních parametrů pro semi-distribuovaný model.

Původní hydrologický předpovědní model v rámci AquaLogu vycházel z kalibrace využívajících denní srážky a parametry byly doladovány na několik historických epizod, které byly k dispozici v kratším kroku. Postupně s rozvojem sítě s hodinovým krokem sběru dat byly modely rekalibrovány. Tento krok měl významný přínos ve zpřesnění simulace průtoků, především byla snižována fázová chyba a chyba nízkých kulminačních průtoků. Projekt VaV/650/6/03 představoval kompromis mezi ideálním stavem, kdy jsou využívána hodinová data, a stavem simulací s denními hodnotami, které jsou historicky nejdostupnější data. Výsledkem byl šestihodinový výpočetní krok, který využíval při redistribuci denních průtoků průtoky kulminační. V návaznosti na původní projekt došlo k prodloužení výpočetní základny o období 2003-2013, byla provedena simulace tohoto období v hodinovém kroku v poslední době nakalibrovaným modelem. Cílem bylo zjistit, zda existuje závislost mezi výstupy modelů provozovaných v šestihodinovém a hodinovém kroku. Simulace modely využívající hodinový krok, pokud jsou dobře nakalibrovány poskytují nejpřesnější výsledky, pokud uvažujeme shodu kulminací s realitou. Naproti tomu modely s krokem výpočtu 6 hodin jsou méně citlivé na fázovou chybu, což může hrát významnou roli u členitých říčních systémů s množstvím soutoků, kde dochází k setkávání povodňových vln.

Simulace za období 1890-2013, které jsou určeny jako jeden zdrojů N-letých průtoků, poskytují řady ovlivněných a neovlivněných průtoků, které lze považovat za homogenní vzhledem k jednotnému postupu, kterým byly získány. Vzhledem k rozsahu datové základny a jejímu historickému charakteru projekt VaV/650/6/03 přistoupil k řešení tématice jediným reálným postupem, který mohl produkovat využitelné výsledky. Z pohledu N-letých průtoků a jejich využití v problematice ochrany před povodněmi se využívají především vyšší N-letosti. Otázkou tedy je, zda vybrané povodně s vyšší dobou opakování nelze zpřesnit výpočtem, který by využíval kratší časový krok výpočtu, manipulace na nádržích by neprobíhaly automatizovaně, ale manuálně a jako možná varianta by bylo využití hydraulického modelu

pro dolní partie toků. Obdobně je koncipován projekt Homogenizace časových řad průtoků na Německé části Labe za spolupráce BfG, VÚV T.G. Masaryka a ČHMÚ.

Sestavení modelu

Sestavení modelu pro výpočet v hodinovém kroku spočíval ve vytvoření analogické stromové struktury k základnímu modelu a naplnění této struktury parametry. Tento model je v závislosti na povodí distribuovaný nebo semi-distribuovaný. Kromě dělení na zóny má model sněhu vertikální dělení, což umožňuje přesnější rozpočet teplot. Vstup srážek a teplot je přes gridy 1x1 km. MAP a MAT se počítá metodou IDW. Model vychází z konceptu, který byl použit v projektu s univerzitou Karlsruhe (Kron et al, 2010). Tato verze byla vyvíjena a používána v období projektu v letech 2005-2010. Tento projekt do určité míry vycházel z původního projektu VaV/650/6/03, ale rozšířil výpočet na celé povodí Labe. Pro sestavení modelu byla stanovena určitá pravidla, která vycházela z předchozího výzkumu a získaných zkušeností a jsou obecným východiskem i pro model s výpočtním krokem 1 hodina.

1. Velikost výpočtové plochy (VP) se blíží ke 40 km, což přibližně odpovídá sloučení 4 povodí 5tého řádu. Seskupení povodí 5tého řádu bude kompromisem mezi respektováním přirozených vodotečí a nadmořské výšky.
2. Každá výpočtní plocha povodí má odvozené vlastní parametry. Jedná se tedy o distribuovaný systém nebo quasi-distribuovaný systém.
3. Pro odtok z každé výpočtní plochy je použit vlastní jednotkový hydrogram (IUH).
4. Pro výpočet požadované evapotranspirace se měsíční hodnoty nahradily výpočtem pro potenciální evapotranspiraci s korekcí na aktuální podmínky.
5. Výpočet tvorby a tání sněhové pokrývky modelem sněhu probíhá ve v několika výškových páslech pro každou VP.

Vlastní výpočet proběhl pro časovou základnu 2000-2013. Období 2000 - 2002 bylo určeno pro inicializaci počátečních podmínek. Kontinuální výpočet pro neovlivněný stav probíhá ve dvou bězích s přenosem stavových proměnných přes počáteční podmínky. Výpočet neovlivněného stavu je rozdělen do následujících kroků:

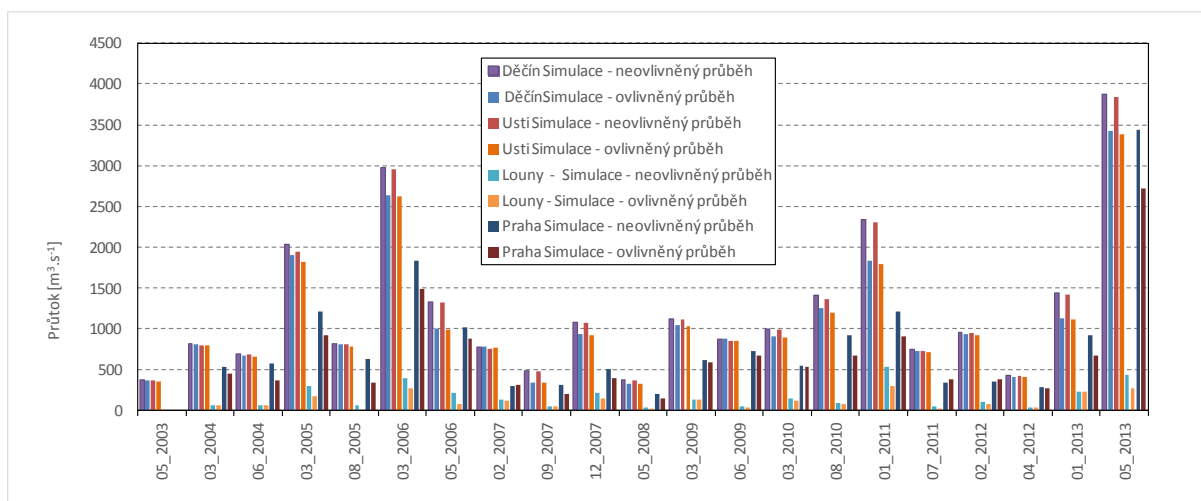
1. Je spočítána manipulace na VD Lipno na základě přítoku ze simulace neovlivněného stavu. Manipulace je provedena manuálně, protože automatizovaná procedura je funkční v současné verzi AquaLogu pro 6hodinový krok.
2. Je provedena simulace hydrologickým modelem pro úsek Lipno-Orlík. Výstupem je přítok do VD Orlík.
3. Je spočítána manipulace na VD Orlík.
4. Je spočítána manipulace na VD Nechanice.
5. Je dopočítána zbývající část hydrologického modelu.

Hlavní důvod pro dělení modelu pro ovlivněný odtok vychází z existence nádrží. Nejdříve je nutné spočítat okrajové podmínky pro nádrže. Ty jsou reprezentovány srážko-odtokovými modely. Je zásadní rozdíl mezi srážko-odtokovými modely a modely nádrží. Srážko-odtokové modely, stejně tak jako modely říční sítě, fungují tak, že jsou počítány sekvenčně za sebou ve výpočtovém stromu pro všechny výpočtové hladiny najednou (pro celý časový interval). Modely nádrží jsou počítány s použitím manuální manipulace a v každém kroku jsou počítány vstupy z mezipovodí nebo z okrajových podmínek průtoků. V případě Vltavské kaskády tedy musíme nejdříve spočítat přítok do Orlíku, Berounku a Sázavu a přítoky ze zbývajících mezipovodí. Na rozdíl od srážko-odtokových modelů, které simulují kontinuálně celé období simulace, jsou modely nádrží použity pouze pro vybrané epizody.

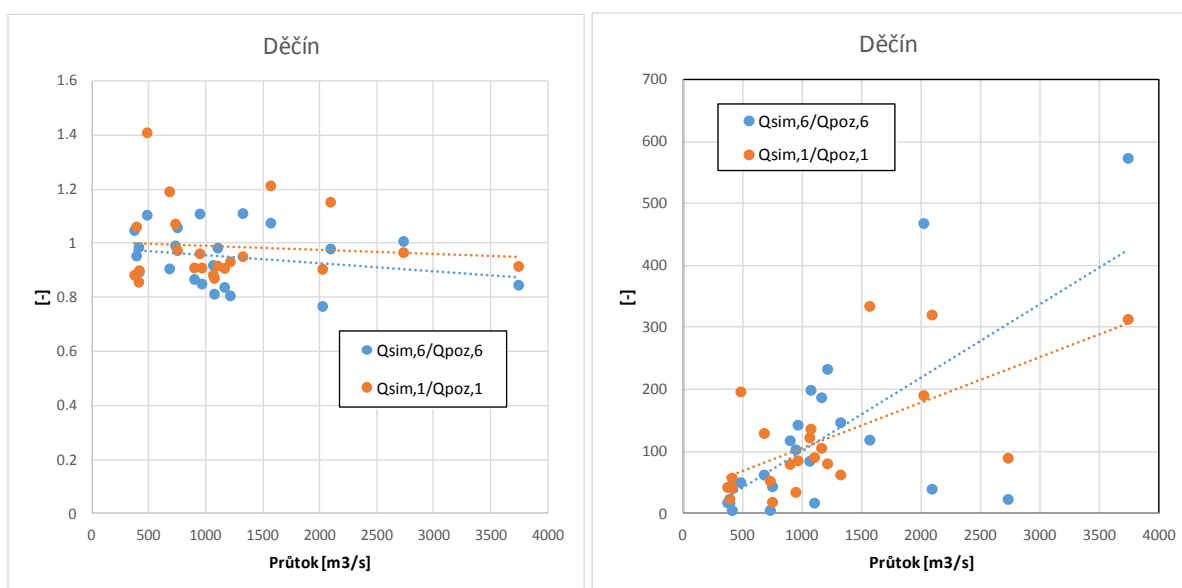
Výstupy

Výstupy ze simulací byly zpracovány obdobným způsobem jako v prvním dílčím úkolu. Byly stanoveny kulminační průtoky, objemy nad referenčním průtokem, doby trvání povodně a difference mezi ovlivněným a neovlivněným průtokem. Porovnání simulací s rozdílnými výpočtovými kroky bylo založeno na posouzení shody kulminačních průtoků s pozorovanými a rovněž byly porovnávány kulminační průtoky mezi oběma simulacemi. Obdobně byly porovnávány objemy nad referenčním průtokem. Kromě těchto analýz byla vyhodnocována fázová chyba a rozdíly mezi ovlivněným a neovlivněným průtokem pro obě varianty simulací. Při výpočtu ovlivněného a neovlivněného stavu je nejdůležitějším výstupem rozdíl kulminačních průtoků. Porovnání s pozorovanými průtoky poskytuje určitou představu o úspěšnosti modelu, ale je třeba si uvědomit, že srážko-odtokové modely neposkytují výsledky srovnatelné s přesností pozorování.

Porovnání ovlivněných neovlivněných průtoků v nejvýznamnějších profilech zahrnutých do simulace je na Obr. 8.



Obr. 8 Ovlivněné a neovlivněné kulminační průtoky v hlavních profilech modelu.



Obr. 9 Procentuální chyba kulminace vztážená k pozorovanému průtoku (vlevo), absolutní odchylka v závislosti na rostoucím průtoku (vpravo).

V profilu Děčín je průměrná relativní chyba u šestihodinové simulace 5% a pro hodinovou je menší než 1%. Na Obr. 9 pro profil Děčín vychází porovnání obou simulací nejednoznačně. Dvě nejvyšší absolutní chyby v porovnání kulminačních průtoků jsou u simulací s 6hodinovým časovým krokem. Velikost chyby u menších průtoků (40 % u hodinové simulace) je způsobena i rozdílnou simulací manipulace na nádržích, která se může výrazněji projevit v průtocích v Děčíně. V reálné situaci může být manipulace na Vltavské kaskádě prováděna i ve vztahu ke snížení průtoků na Labi a snížení odtoku může být oproti simulaci vyšší. Na základě provedených statistických analýz (Tab. 9) vychází, jak byl předpoklad, lépe simulace v hodinovém kroku. Především se zlepšení projevuje u větších povodňových vln. Při povodni v červnu 2013 byla chyba kulminace v Děčíně 8%. Nejnížší shody mezi kulminačními průtoky bylo dosahováno v profilu Louny. Hlavním důvodem jsou vysoké rozdíly především u nízkých průtoků, které jsou způsobeny manipulací. Za nízkých průtoků, kdy se nejedná o povodňové řízení a manipulace může být ovlivněna více stavem zásobního prostoru, dochází k největším rozdílům.

Při simulaci v hodinovém výpočetním kroku docházelo k nižšímu průměrnému rozdílu mezi ovlivněným a neovlivněným stavem. Pokud porovnáme průměrné snížení odtoku na VD Orlík, tak je vyššího dosaženo naopak pro hodinovou simulaci.

Tab. 9 Statistické ukazatele pro porovnání simulací s různým krokem výpočtu.

Profil	Časový krok	Střední kvadratická odchylka	Relativní chyba [-]	Procentní odchylka [-]	Průměrná absolutní chyba [-]	Koeficient korelace [-]	Průměrné snížení kulminace [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Maximální snížení [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Děčín	6	188	5	-6.90	123	0.980	215	639 (01_2011)
	1	132	1	0.90	93	0.987	129	514 (01_2011)
Praha	6	209	14	-1.74	130	0.958	206	1052 (05_2013)
	1	113	12	1.89	90	0.987	159	715 (05_2013)
Louny	6	48	16	-8.60	39	0.870	83	211 (01_2011)
	1	117	43	52.00	49	0.895	65	244 (01_2011)

Hlavní vliv na celkovou přesnost simulace ovlivněného stavu spočívá v manipulaci na nádržích. Nejvýznamnější vliv má přítok do nádrže. Pokud je nižší, je možné dosáhnout vyšší snížení odtoku a naopak. Manipulace nejsou prováděny tak, aby došlo k optimalizaci využití nádrže, tak jak tomu může být při různých studiích při znalosti všech přítoků na celý časový interval povodňové události.

Závěr

Byla provedena simulace alternativním modelem využívajícím výpočtový krok 1hodina. Teoreticky tento model dává lepší předpoklady pro simulace povodňových událostí. Vlastní porovnání s modelem využívajícím 6hodinový krok nevyznělo zcela jednoznačně. Pro největší povodňové události alternativní model poskytoval lepší shodu s pozorovanými hydrogramy. Ze statistických parametrů vyplývá, že ve všech profilech, s výjimkou Loun, bylo dosahováno lepších výsledků.

Tab – Výsledky simulace povodní 2002 – 2013 v alternativním výpočetním kroku pro Vltavu v Praze a Labe v Ústí nad Labem

Vltava – Praha							Labe - Ústí nad Labem								
Povodeň	simulovaný max. průtok krok - 6 hod			simulovaný max. průtok krok - 1 hod			měřený	Povodeň	simulovaný max. průtok krok - 6 hod			simulovaný max. průtok krok - 1 hod			měřený
měsíc_rok	neovliv.	ovliv.	dQ	neovliv.	ovliv.	dQ	průtok	měsíc_rok	neovliv.	ovliv.	dQ	neovliv.	ovliv.	dQ	průtok
08_2002	5194	4964	230	5838	4953	885	5160	08_2002	5362	5153	208	4926	4420	506	4700
01_2003	1504	1120	383	1422	1060	362	1030	01_2003	1884	1400	484	2326	2139	187	1945
05_2003	195	161	34	0	0	0	96	05_2003	0	0	0	364	356	8	396
03_2004	586	497	89	536	459	77	502	03_2004	643	548	95	800	793	7	864
06_2004	608	403	205	571	372	199	364	06_2004	652	460	192	682	664	18	493
03_2005	1262	947	315	1207	926	281	733	03_2005	1508	1084	425	1949	1747	202	1510
08_2005	607	447	160	630	343	287	445	08_2005	665	493	173	806	788	18	666
04_2006	2032	1460	572	1834	1496	338	1430	04_2006	2382	1808	574	2953	2622	331	2540
05_2006	1263	975	288	1019	883	136	805	06_2006	1341	1014	327	1323	996	327	1070
02_2007	293	278	15	306	309	-3	217	02_2007	506	389	118	759	769	-10	696
09_2007	397	236	160	320	208	112	84	09_2007	334	0	334	485	348	137	387
12_2007	546	399	147	513	404	109	359	12_2007	718	508	210	1074	925	149	1020
05_2008	250	222	28	206	149	57	135	05_2008	299	0	299	377	324	53	346
03_2009	675	520	155	623	596	27	583	03_2009	861	662	199	1115	1040	75	1110
06_2009	807	603	205	733	677	56	797	07_2009	815	636	179	860	853	7	920
03_2010	588	477	111	548	533	15	412	03_2010	848	681	167	988	895	93	900
08_2010	954	773	181	918	676	242	761	08_2010	1128	981	148	1363	1205	158	1180
01_2011	1117	905	212	1216	906	310	1020	01_2011	1632	1143	490	2308	1789	519	1910
07_2011	524	550	-26	338	390	-52	288	07_2011	605	616	-11	733	713	20	705
03_2012	273	256	17	363	382	-19	357	03_2012	433	336	97	947	923	24	997
05_2012	0	0	0	288	269	19	123	04_2012	0	0	0	424	405	19	370
02_2013	773	522	250	928	679	249	686	02_2013	1318	962	356	1419	1112	307	1160
06_2013	3269	2227	1042	3436	2724	712	3040	06_2013	3798	3116	682	3843	3388	455	3630

Simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží, hydrogramy na dolní Vltavě, Labi a Ohři

Předmětem tohoto dílčího úkolu je provedení simulace průběhu povodně v červnu 2013 v podélném profilu Vltavy a Labe po Ústí nad Labem pro ovlivněný a neovlivněný stav. Neovlivněný stav představuje stav modelovaného systému před výstavbou nádrží. Cílem jsou rovněž analýzy možných nejistot spojených s použitým modelem (zejména při simulaci postupu povodňové vlny původním korytem Vltavy a při simulaci pravostranných přítoků z povodí postižených intenzivní srážkou). Analýza je provedena na povodni z roku 1890 a na dalších vybraných povodních z období před výstavbou vodních děl na Vltavě. Pozornost byla věnována také efektivnímu dosahu vlivu nádrží na snížení průtoku po toku. Rozdíl od simulací základním, nebo alternativním modelem v předchozích dílčích úkolech spočívá v použití jedno rozměrného hydraulického modelu (1HD) pro úseky výpočtu od profilu Zvíkov (České Budějovice), Nechanice a Brandýs do závěrového profilu v Ústí nad Labem. Hydraulický model by měl přesněji simulovat průběh vlny především v oblastech soutoků a v oblastech rozsáhlých rozlivů. Druhý, ne méně významný, rozdíl spočíval v zahrnutí dalších vodních nádrží, které rozšíří původní sestavu tvořenou Vltavskou kaskádou a VD Nechanice.

Použité modelovací systémy

Simulační matematický model, který byl použit k provedení této části studie, se skládá ze dvou samostatných modelů, které jsou propojeny přes databázi časových řad. Hydrodynamický, jednorozměrný model Labe, Ohře a Vltavy, včetně modelu pro výpočet neovlivněného stavu v původním korytu mezi Českými Budějovicemi a Prahou, využívá software *HEC-RAS*. Model nádrží je založen na modulu programu *AquaLog sMAN*, který simuluje operace na nádržích na řece Vltavě v rámci modelu kaskády (ovlivněný stav). Software *AquaLog* je kromě manipulace na nádržích použit pro výpočet okrajových podmínek hydraulického modelu, a to jak ovlivněných, tak neovlivněných.

Program HEC-RAS

River Analysis System (HEC-RAS) je určen pro simulaci stacionárního a nestacionárního proudění v otevřených korytech. Systém byl vyvinut armádním sborem amerických inženýrů (USACE) v Hydrological Engineering Centre (HEC) a je k dispozici na internetu (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/index.html>).

HEC-RAS systém obsahuje čtyři základní komponenty pro analýzu jednorozměrného proudění: (1) stacionární výpočty profilů průtoků, (2) simulace nestacionárního proudění, (3) simulace pohyblivé hranice transportu splavenin a (4) analýza kvality vody. Pro nestacionární proudění řeší HEC-RAS kompletní Saint-Venantovy rovnice pomocí implicitní metody konečných diferencí. Klíčovým prvkem je, že všechny čtyři komponenty používají společnou geometrickou reprezentaci dat a společné geometrické a hydraulické výpočetní funkce. Kromě čtyř složek říční analýzy obsahuje systém několik hydraulických návrhových procedur, které mohou být vyvolány pro spočítané základní profily vodních hladin (US Army Corps of Engineers, 2011).

Program AquaLog

AquaLog je víceúčelový modelovací systém, v současné době používaný ČHMÚ pro předpověď průtoku v povodí Labe. *AquaLog* poskytuje nástroj pro integrované modelování komplexních hydrologických systémů ve vodním hospodářství. Různé modelovací techniky používané v hydrologii povodí, říčních systémech, jezerech a vodních nádržích jsou automaticky sestaveny do jednoho subjektu vytvářejícího případový model systému.

AquaLog tak poskytuje ucelený rámec pro všechny hlavní fáze zpracování dat. Hlavní jednotka AquaLogu zastřešuje čtyři skupiny modelování založené buď na konceptu soustředěných parametrů, nebo na distribuovaném přístupu: (i) akumulace a tání sněhu, (ii) srážko-odtoková transformace, (iii) hydrologické a hydrodynamické proudění v říčním korytu a (iv) provoz nádrží (sMAN).

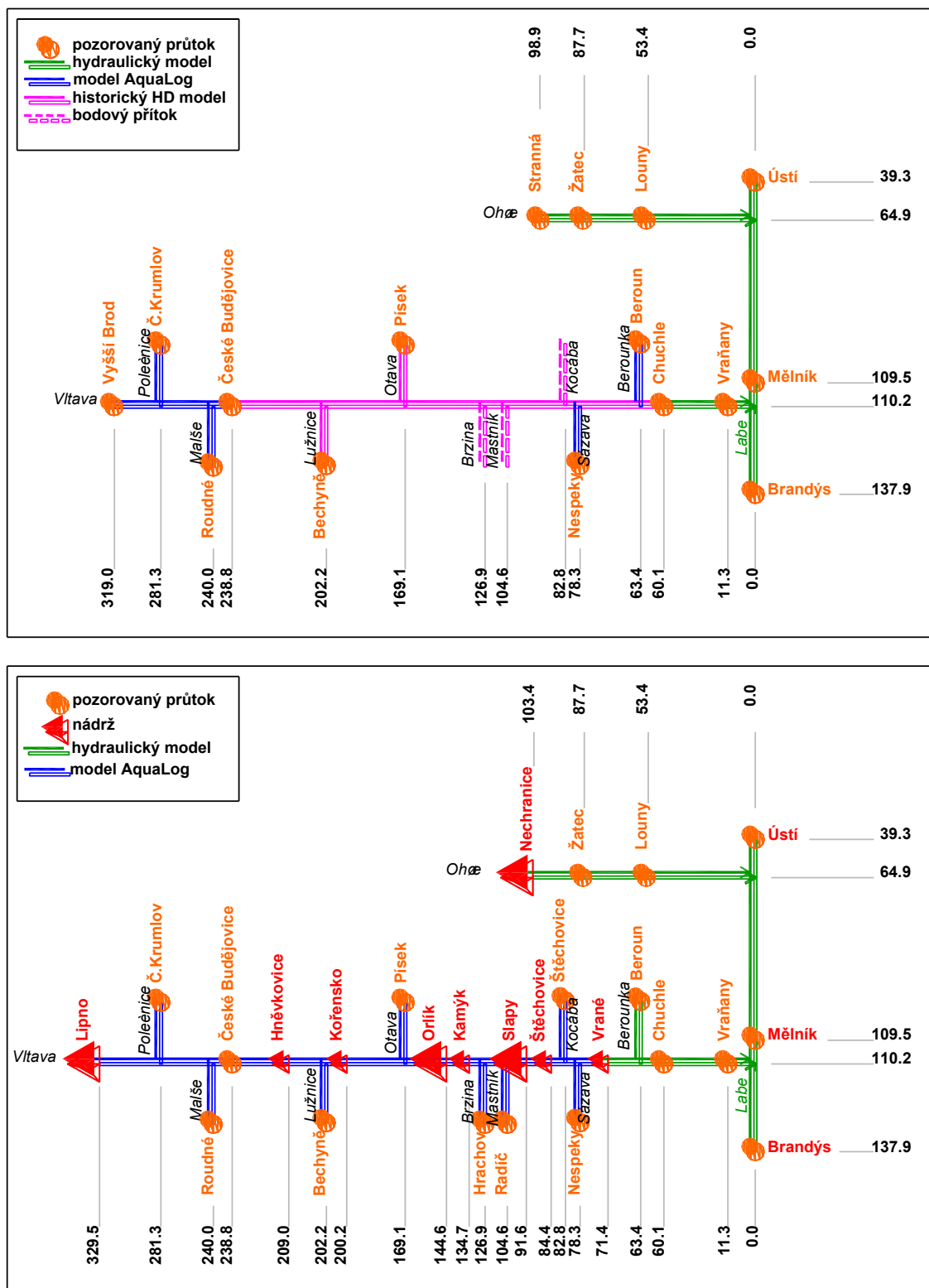
sMAN je interaktivní model vodní nádrže používající nestacionární topologické kódování individuálních jednotek systému vodních zdrojů založených na algoritmu Petriho sítí. Poskytuje dekompozici nádrže nebo řízení systému nádrží do jednotek řízení toku a vodní rovnice bilance při synchronizaci jejich výpočtu. Model sMAN navíc umožňuje interaktivní výpočet celého systému nádrží v interaktivním režimu pro každou výpočtovou úroveň. sMAN zahrnuje následující seznam (sub) modelů: (i) RES - model bilance nádrže (typický diferenciální forma, zahrnující 4 stavové proměnné: hladina nádrže, příliv, odtok a batygrafické křivky), (ii) MS3 - přeliv, (iii) MB3 - spodní výpusti, (iv) ELN – vodní elektrárna, (v) DMY- pomocný model pro převod vody, (vi) QVH – měrná křivka odtokových objektů a (vii) říční model TDR nebo Muskingum - Cunge. Hlavní technika RES může být napsána v běžném diferenciálním tvaru (neuvažuje klínovou retenci), který zahrnuje čtyři stavové proměnné: hladina v nádrži H1, I přítok nádrže, O odtok nádrže a zatopená plocha S pro alternativní výpočetní struktury techniky modelování RES. Na základě dostupnosti vstupů je automaticky vybrána varianta výpočtu pro výpočet chybějících údajů. Propojení mezi sMAN a HEC-RAS se provádí pomocí databáze formátu DSS, která je implementována jako podpora databázového systému HEC-DSSVue. Z hlediska vodních nádrží je možné použít dvě úrovně schematizace. Zjednodušení používá jediný odtok z nádrže, která je součtem všech odtoků a pouze maximální fyzikálně možný odtok je kontrolován. Při komplexní schematizaci průtoků jsou uvažovány jednotlivé odtoky na základě otevření objektů nebo jejich nastavení (AquaLogic Consulting, 2011).

Konfigurace modelu

Jak bylo zmíněno, pro simulaci ovlivněného a neovlivněného stavu byly použity dva rozdílné modely, které se liší v okrajových podmínkách a také využívají různý modelovací software.

1. Model pro simulaci neovlivněného stavu na Obr. 10 (nahore) byl založen pouze na hydraulickém modelu vytvořeném v rámci HEC-RASu a jeho základní kostra je vymezena okrajovými podmínkami v profilech Chuchle (Vltava), Brandýs (Labe) a Stranná (Ohře). Okrajové podmínky pro profil Chuchle se počítají modelem původního koryta Vltavy před výstavbou Vltavské kaskády. Okrajové podmínky pro profil Brandýs byly vypočteny modelem Muskingum-Cunge (AquaLog), pro profil Stranná byl neovlivněný průtok poskytnut státním podnikem Povodí Ohře. Model starého koryta Vltavy je vytvořen v HEC-RASu a mezi jeho významné laterální okrajové podmínky náleží Berounka a Sázava, které jsou rovněž počítány modelem Muskingum - Cunge (AquaLog). Obdobně tento model slouží pro výpočet přítoku do VD Orlický pro neovlivněný stav. Alternativně lze použít jednorozměrný hydraulický model původního koryta pro říční úsek České Budějovice – Zvíkov s přítoky Lužnicí a Otavou s okrajovými podmínkami v profilech Bechyně a Písek.
2. Model pro výpočet ovlivněného stavu, který je na Obr. 10 (dole), se skládá z hydraulického modelu propojeného s modelem nádrží. Na obrázku je zobrazena základní kostra modelu, kde jsou zahrnuty pouze významné nádrže (Vltavská kaskáda a Nechanice (Ohře)). V tomto dílčím úkolu nebyl model kaskády použit pro výpočet manipulace odtoku na nádržích, ale z pozorovaných dat byly na základě bilance

nádrže odvozeny mezipřítoky do kaskády pro nepozorovaná povodí. Pro simulaci povodně roku 2013 jsou zahrnuty další nádrže. Seznam je uveden v Tab. 11.



Obr. 10 Základní schéma modelu pro ovlivněný a neovlivněný stav. Ve schématu nejsou uvedeny samostatné modely pro Sázavu, Berounku a Labe nad Brandýsem

Hydraulické modely Labe, Ohře a Vltavy zahrnují záplavová území vymezená největší povodní ve 20. století, povodní z roku 2002. Model je určen hlavně pro simulace povodňových průtoků, kdy je uzavřena vodní cesta, a jsou vyhrazeny jezy. Model byl postaven z digitálního modelu terénu z let po povodni roku 2002 a zaměřených příčných profilů a nakalibrován s daty z povodní 2002, 2006 a 2011. Standardní vzdálenost mezi příčnými profily je 50 až 350 metrů. Pro kalibraci byly k dispozici pozorované průtoky, vodní stavy v limnigrafických stanicích a povodňové značky. Původně byl vyvinut model pouze pro Labe a Vltavu (MŽP, 2005). Pro účely projektu LABEL byl tento model rozšířen o řeku Ohři v úseku od nádrže Nechanice k soutoku s Labem. Záplavové území je součástí příčných profilů.

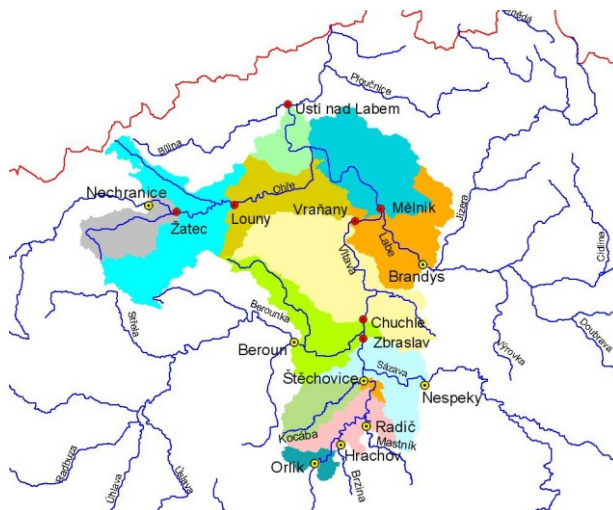
Část hydraulického modelu pro původní koryto Vltavy, před výstavbou vodních nádrží Vltavské kaskády, mezi horní okrajovou podmínkou tvořenou přítokem v profilu České Budějovice a dolní okrajovou podmínkou v profilu nad Prahou je založena na geometrických datech z let 1902-1911. Tento geometrický podklad, který byl použit pro upřesnění postupové doby a byl základem pro implementaci morfologického stavu před realizací Vltavské kaskády, byl dokumentován a analyzován v předchozích projektech (Studie vltavské vodní cesty, 1911; Krejčí et al., 2003). Model Otavy mezi profilem Písek a soutokem s původní Vltavou je modelován na základě zaměření z roku 1926, jehož součástí je podélný profil hladiny pro povodeň z roku 1890 (Vorel a Souček, 1926).

V modelu jsou uvažovány dva typy okrajových podmínek: (i) hlavní přítoky toku a (ii) laterální přítok ze sousedících povodí. Plocha povodí hlavních přítoků modelu představuje cca 41839 km². Hlavní pozorované přítoky v okrajových podmínkách (Tab. 10) jsou: (i) Brandýs nad Labem, (ii) přítok do Vltavské kaskády, (iii) Beroun na Berounce, (iv) Nespeky na řece Sázavě a (v) přítok do Nechanické nádrže na řece Ohři. Systém HEC-RAS umožňuje jako dolní okrajovou podmínku použít kritickou nebo normální hloubku, která může být kombinována s posunutím dolní hranice modelu.

Tab. 10 Okrajové podmínky – bodové přítoky do modelu (modely pro ovlivněný a neovlivněný stav).

Povodí	Přítok / Mezipovodí	Okrajová podmínka	Plocha povodí [km ²]
Vltava	Vltava	Orlík	12105.9
	Brzina	Hrachov	133.1
	Mastník	Radíč	268.1
	Kocába	Štěchovice	308.0
	Nespeky	Sázava	4038.3
	Berounka	Beroun	8284.7
Ohře	Ohře	Nechanice	3590.0
Labe	Labe	Brandýs	13111.4

Zahrnut je také přítok z přilehlých povodí modelovaných řek. Plocha laterálního přítoku, který je rovnoměrně rozložen v hydrodynamickém modelu, je 16970 km². Většinou tyto laterální přítoky v dolní části modelu (Labe) nemají vzhledem k časovému posunu kulminace velmi významný vliv na povodňové kulminační průtoky. Byly zahrnuty, protože představují téměř 34% simulované plochy odtoku (viz Obr. 11). Boční přítoky byly vypočteny na základě srážek srážko-odtokovým modelem Sacramento a přizpůsobeny na základě vodní bilance v profilu s pozorovaným průtokem.



Obr. 11 Uniformně distribuované boční přítoky.

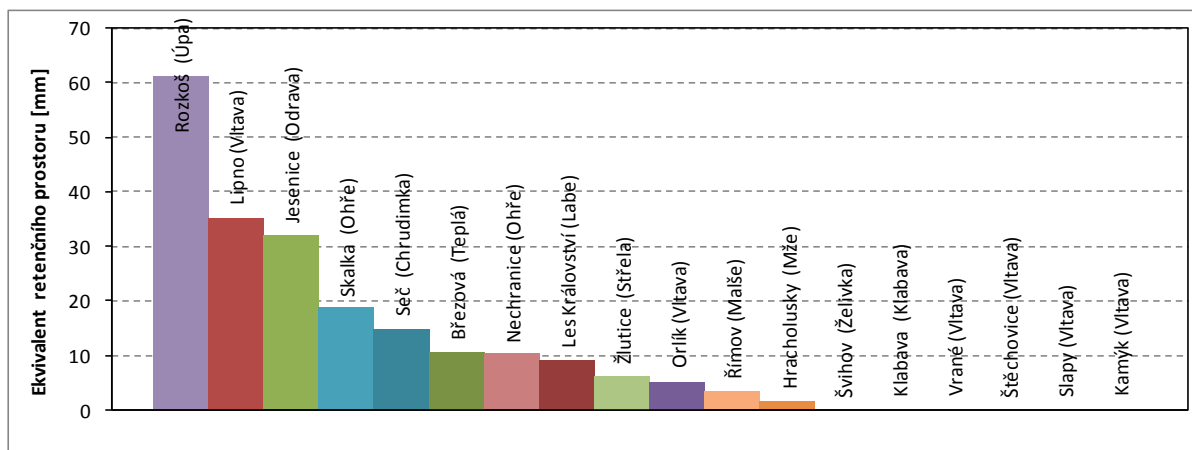
Tab. 11 Seznam nádrží uvažovaných ve výpočtu neovlivněných průtoků.

	Volný prostor v nádrži [mil. m ³]	Maximální přítok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální odtok [m ³ .s ⁻¹]	Přítok - Odtok [m ³ .s ⁻¹]
Římov (Malše)	7	180	140	40
Švihov (Nežárka)	46	104	50	54
Hracholusky (Mže)	23	110	57	53
Les Království (Labe)	4.9	308	156	152
Rozkoš (Úpa)	18	-	-	-
Seč (Chrudimka)	8	60	28	32
Lipno (Vltava)	48	340	123	217
Orlik (Vltava)	119	2160	1950	210
Slapy (Vltava)	7	2092	2052	40
Nechranice (Ohře)	51	356	260	96

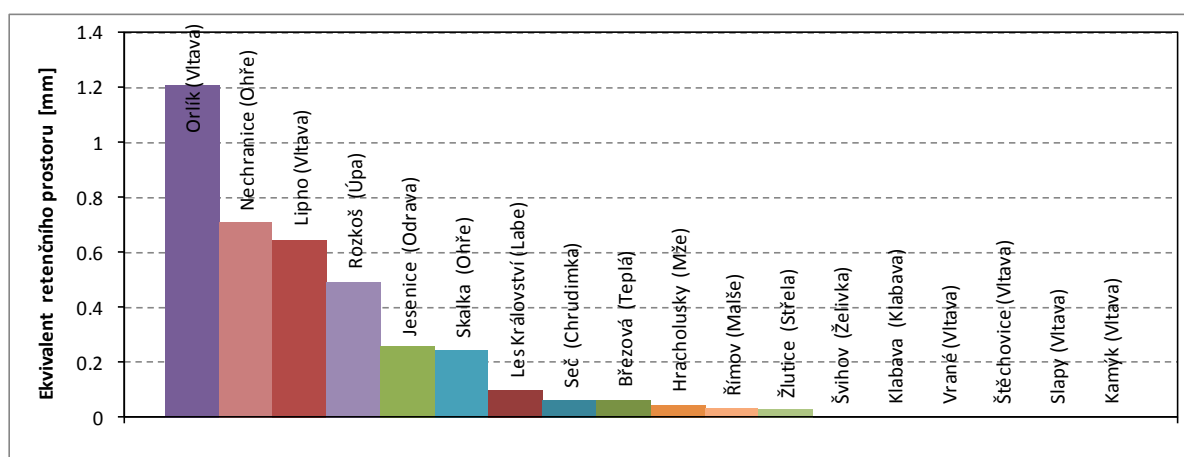
Výběr nádrží

Vodní nádrže zahrnuté do modelů pro simulaci ovlivněného a neovlivněného stavu jsou uvedeny v Tab. 11. Vlastní výběr nádrží byl založen na analýze možného účinku nádrže a to jak z hlediska snížení kulminačního průtoku, zadrženého objemu a také z pohledu velikosti povodí nad nádrží. Na Obr. 12 a Obr. 13 jsou vyhrazené retenční prostory vyjádřeny jako mm srážek na ploše povodí nad nádrží, respektive celém povodí Labe po hraniční profil. Uvažován je pouze retenční objem, v případě zimní povodně by bylo vhodnější uvažovat i část zásobního prostoru nádrže vzhledem k možnému předpouštění v závislosti na vývoji zásob vody ve sněhu. První graf vyjadřuje možnost snížení průtoku pod nádrží a charakterizuje především možnosti snížení průtoku na toku, na kterém se vodní nádrž nachází. Druhý obrázek poskytuje představu o vlivu jednotlivých nádrží z pohledu případných snížení průtoku na dolním toku Labe. Uvažujeme-li pouze retenční prostor a zohledníme plochu povodí nad nádrží, má většina středně velkých nádrží při povodni obdobného rozsahu, jako byla povodeň 2013, pouze lokální účinek.

Vliv nádrží na horním povodí Labe (nad profilem Brandýs) byl vyhodnocován samostatně v následujícím dílčím úkolu “Simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží, hydrogramy na horním Labi“. Průběhy přítoků do nádrží, odtoků a hladiny byly získány od odpovědných podniků Povodí. Obdobným postupem jako v uvedeném bodě byly odvozeny okrajové podmínky pro toky s uvažovanými nádržemi.



Obr. 12 Retenční prostor vyjádřený v mm srážek vztažených na celé povodí nad nádrží.



Obr. 13 Retenční prostor vyjádřený v mm srážek vztažených na celé povodí Labe (Hřensko).

Ověření modelu na historických povodních

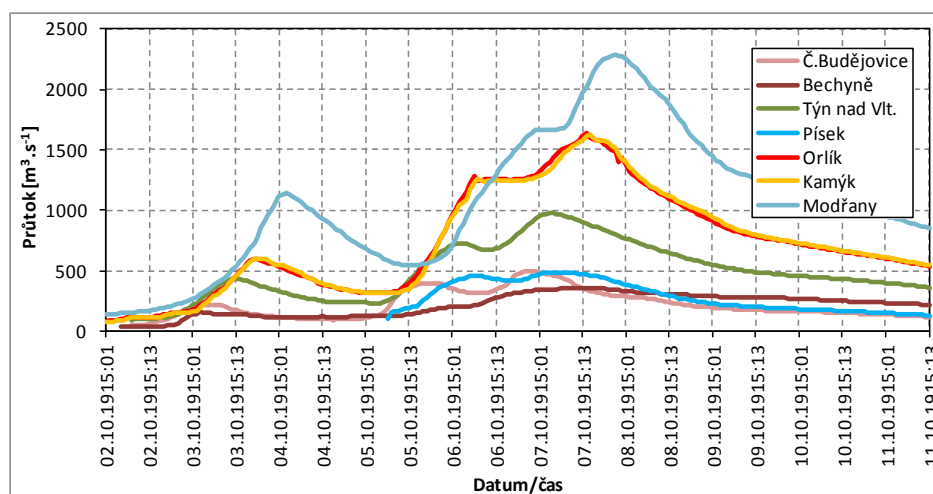
Sestavení modelu říční trasy České Budějovice – Praha pro období před výstavbou vodních nádrží Vltavské kaskády vychází z historického zaměření zmíněného v předchozí stručné charakteristice celého modelovacího systému. Hlavním důvodem pro existenci tohoto modelu je výpočet neovlivněného stavu. Problematika výpočtu neustáleného odtoku v návaznosti na simulaci reálného stavu ve většině případů znamená nahradit vodní nádrž říčním modelem, který víceméně zahrnuje oblast od hráze nádrže po profil přítoku, který je definován dosahem vzdutí nádrže. Pokud se řeší soustava na sebe navazujících nádrží, je řešením nahrazení celého úseku toku s nádržemi říčním modelem. To v případě Vltavské kaskády představuje modelovat úsek z Českých Budějovic až do Prahy pod poslední nádrž Vltavské kaskády. Verifikace takového modelu vyžaduje poměrně značné množství vstupních údajů, které nejsou k dispozici v dostatečném množství, a kvalitu těchto dat je obtížné posoudit, protože vznikala ne vždy za zřejmých podmínek. K nalezeným průtokům, které vznikají převodem z vodních stavů, nelze dohledat původní měrné křivky a pro archivované vodní stavy se často musí odvodit měrná křivka, která nebyla dochována. Byly identifikovány povodňové vlny, které lze využít pro kalibraci. Jsou uvedeny v Tab. 12 s označením profilů s dostupnými průtoky vhodnými pro kalibraci. V tabulce jsou uvedeny vlny dostupné ve výpočetním kroku 1-3 hodiny. Kromě toho byly k dispozici kulminační průtoky a denní průtoky pro některé vlny pro určité profily. Kulminační průtoky nejsou ve většině případů vztaženy k určité hodině, ale pouze ke dnu kulminace. Využity byly i výstupy ze simulací popsané v dílčí části „Základní simulace 2002 – 2013“. Kromě historických průtoků byly využity i povodňové značky pro

povodeň 1890, které byly součástí zaměřeného podélného profilu. Při kalibraci byly upřednostňovány historické povodňové vlny, které mají ve vztahu k ostatním malý přítok z mezipovodí. Jedná se tedy o povodně s koncentrací odtoku nad profily, které vytváří horní okrajové pro kalibrovaný úsek.

Tab. 12 Hydrogramy dostupné pro kalibraci.

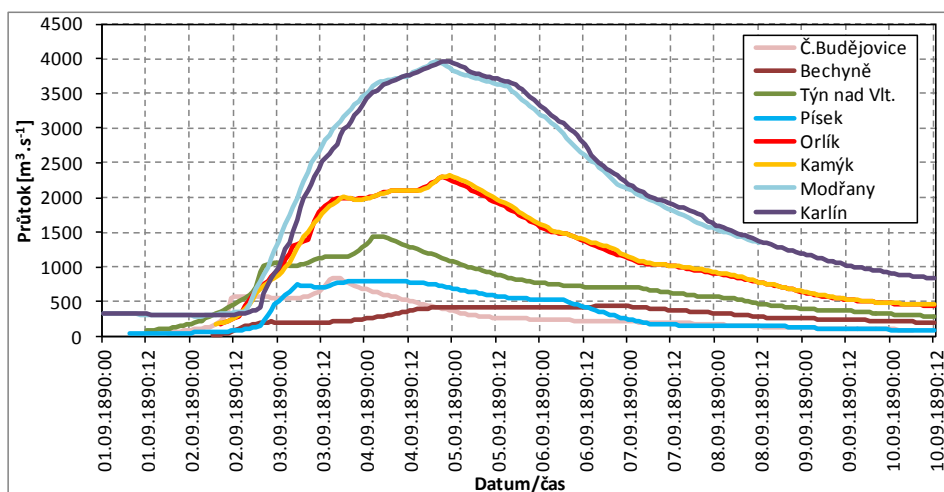
	České Budějovice	Bechyně	Týn nad Vltavou	Písek	Zvítov	Orlík/Kamýk	Slapy	Poříčí	Beroun	Zbraslav	Modřany	Chuchle	Karlín
1888 09	+	+		+									
1890 09	+	+	+	+		+		+	+		+		+
1894 10	+	+		+		+							
1896 05	+	+		+		+							
1897 08	+	+		+		+							
1899 09	+	+		+		+							
1915 10	+	+	+			+					+		
1920 01	+	+				+					+		
1940 03	+					+					+		
1954 07			+		+	+	+			+	+		

Ukázky dostupných dat jsou na Obr. 14 a Obr. 16, kde jsou uvedeny průběhy pro povodeň z roku 1915 a roku 1890.

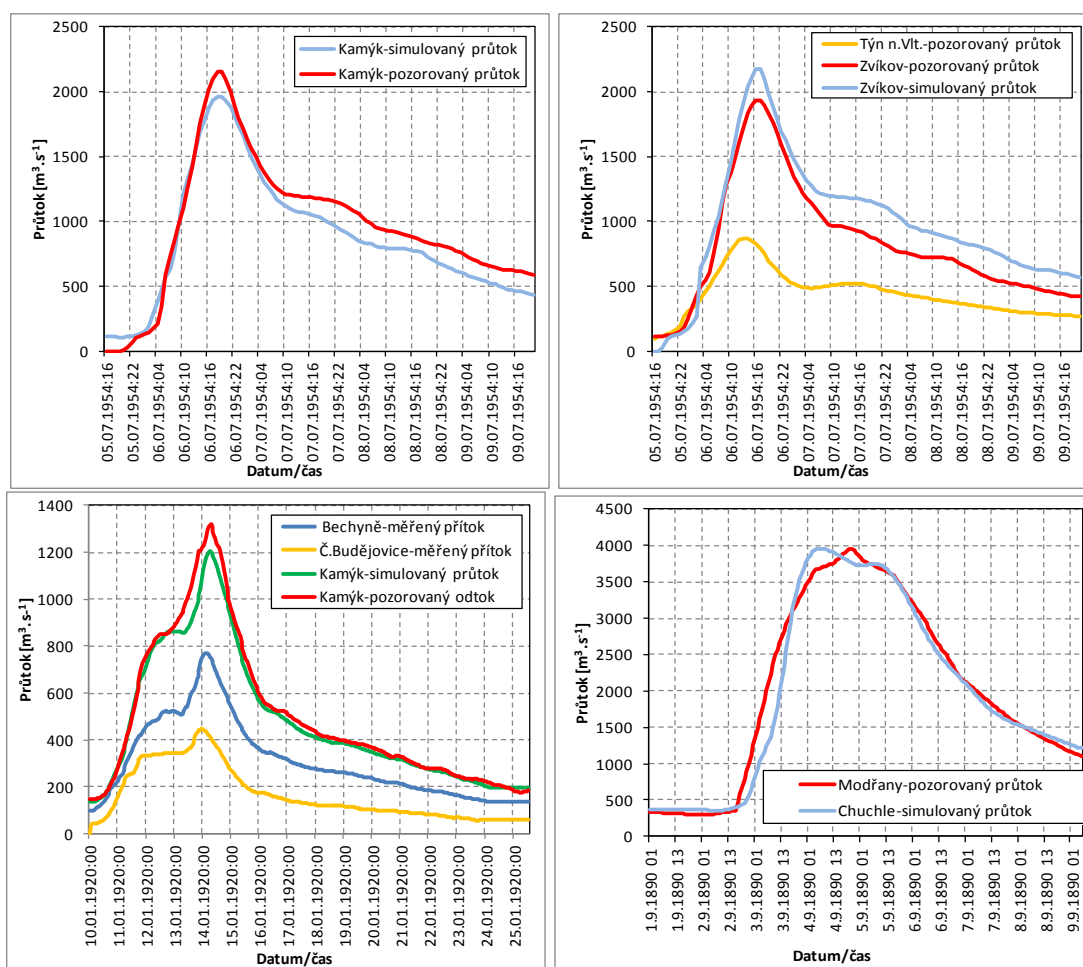


Obr. 14 Průběh hydrogramů červnové povodně z roku 1915.

Výstupy z kalibrace jsou na Obr. 16. Uvedeny jsou simulované a pozorované hydrogramy povodně 1890, 1920 a 1954 pro Kamýk (kalibrace úseku Zvíkov-Kamýk), Zvíkov (kalibrace úseku Týn-Zvíkov) a Kamýk (kalibrace modelu mezi Českými Budějovicemi, Bechyní a Kamýkem). Tyto výstupy jsou pro simulaci pouze na základě pozorovaných hydrogramů, bez mezipřítoku z mezipovodí. Na Obr. 16 je výstup ze simulace modelu mezi profilem Zvíkov a Prahou pro profil Modřany/Chuchle, kde jsou uvažovány i přítoky z nepozorovaných mezipovodí.



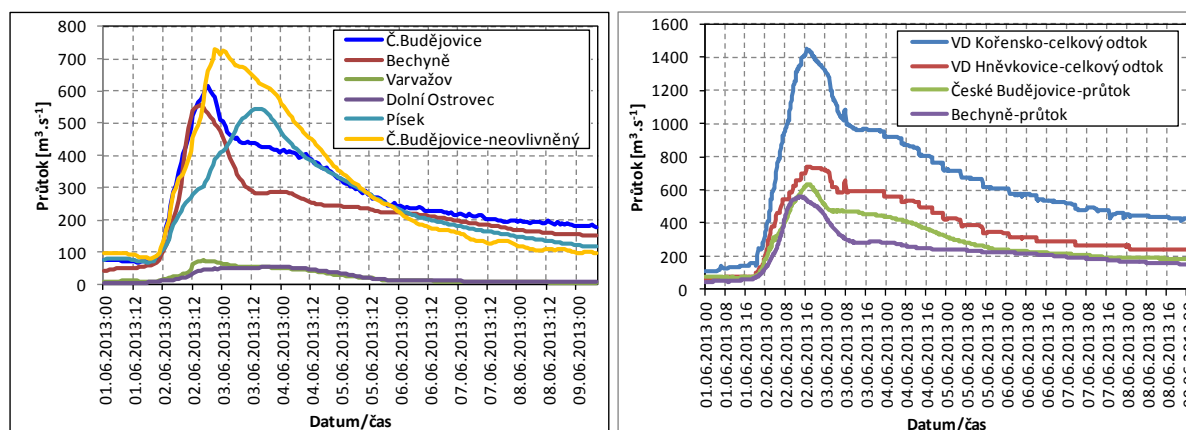
Obr. 15 Průběh hydrogramů zářijové povodně z roku 1890.



Obr. 16 Výsledky kalibrace modelu starého koryta Vltavy.

Kalibrace modelu pro ovlivněný stav (přítok do VD Orlík)

Pro simulaci ovlivněného stavu je použit model AquaLog. Kalibrace modelu pro simulaci ovlivněného stavu pro úsek Lipno-přítok Orlík vycházela z analýzy postupových dob pod Českými Budějovicemi, kde soustava nádrží Hněvkovice- Kořensko (říční jez) významně urychluje postup povodňové vlny (Obr. 17 a Tab. 13).



Obr. 17 Průběh průtoků na Vltavě a přítocích nad VD Orlík.

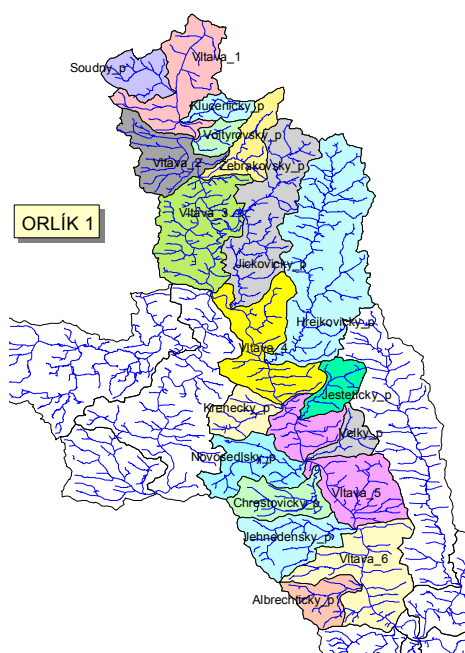
V Tab. 13 jsou uvedeny časy kulminačních průtoků v profilech na toku Vltavy mezi Českými Budějovicemi a hrází Orlík pro povodeň 2013. Pro profil hráze Orlík je uvažován kulminační bilanční přítok do nádrže. Jedná se o bilanční přítok, který je odvozen ze statického průběhu hladiny. Doba postupu povodňové vlny je velmi krátká a přítok do nádrže kulminuje pouhých pět hodin po kulminaci v Českých Budějovicích. Dříve udávaný čas postupu vlny mezi Českými Budějovicemi a Týnem nad Vltavou byl v rozmezí 4 až 9 hodin. Postup vlny je velmi urychlován vodními díly Hněvkovice a částečně i Kořensko.

Tab. 13 Kulminační průtoky a doby kulminace.

Profil	Staničení[km]	Doba kulminace	Kulminační průtok[m ³ ·s ⁻¹]
České Budějovice	238.80	02.06.2013 17	628
Hněvkovice	210.39	02.06.2013 16	753
Kořensko	200.40	02.06.2013 16	1460
Bechyně	10.55	02.06.2013 13	561
Orlík (bilanční přítok)	144.65	02.06.2013 22	2160

Pro simulace scénářů neovlivněného a ovlivněného stavu, kdy dochází k manipulaci neovlivněného přítoku na VD Orlík (bez vlivu nádrží Lipno I a Římov), je důležité zvolit vhodné profily na tocích, ve kterých se „sečtou“ jednotlivé hydrogramy průtoků. Jedná se především o Otavu a její dolní přítoky pod profilem Písek a Vltavu, kdy při vyšší hladině v nádrži Orlík dosahuje vzduší ke hrází Hněvkovice. Takto odvozený přítok do nádrže

Analýza historických povodní ukázala velký vliv nepozorovaného povodí na velikost přítoku do VD Orlík. Toto povodí je ohraničeno profily České Budějovice, Bechyně, Písek a Kamýk, pokud uvažujeme ryze historické povodně. Pro některé historické vlny lze využít i interní profily Zvíkov a Týn nad Vltavou. Při povodni 2013 toto mezipovodí hrálo významnou roli a bylo i jednou z příčin rychlého nárůstu přítoku do nádrže. Pro model simulace ovlivněného stavu nevytváří, i díky urychlenému průtoku nádržemi, časování laterálních přítoků do Vltavy významný zdroj nejistot. Jinak je tomu při výpočtu neovlivněného průtoku, kdy dotokové doby jsou delší a časování může výrazně ovlivnit konečný přítok do nádrže. Z tohoto důvodu bylo nepozorované povodí detailně rozčleněno na přítoky využívající rozvodnice ohraničující jednotlivé potoky (povodí 5tého řádu, viz. Obr. 18). Odtok pro povodeň 2013 z těchto rozvodnicemi vymezených ploch je počítán modelem SAC-SMA a jednotkovým hydrogramem. Odvozené plošné srážky ze srážkové sítě vstupující do modelu byly ve dnech s příčinnými srážkami nahrazeny plošnými srážkami, které vznikly kombinací výstupu srážkových radarů a srážkoměrů.



Obr. 18 Členění mezipřítoků do modelu pro část povodí pod Českými Budějovicemi.

Simulace povodně 2013

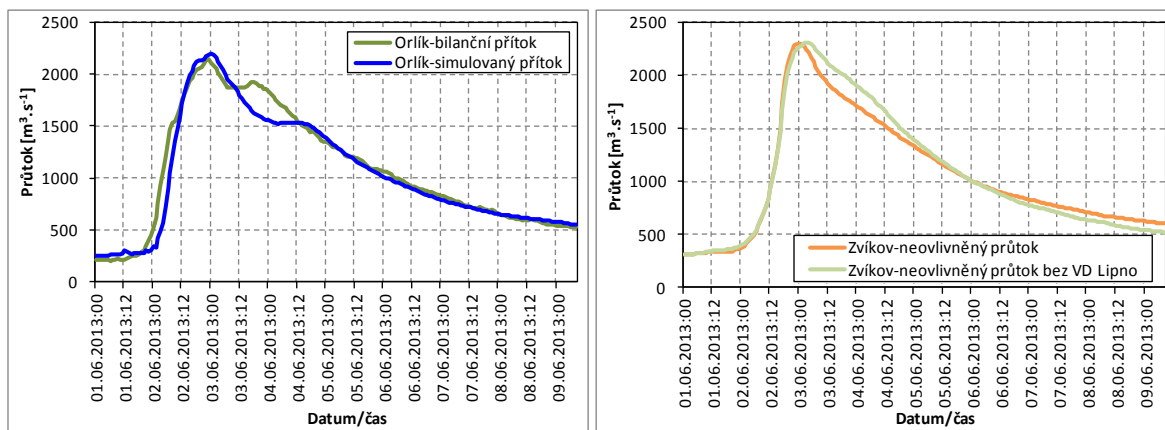
Vlastní postup při výpočtu probíhal v několika standardních krocích. Na základě průběhu manipulací na vodních dílech byly spočítány okrajové podmínky pro základní numerický model. Do výpočtu byly zahrnuty nádrže uvedené v Tab. 11. Kulminační průtoky vygenerovaných okrajových podmínek jsou uvedeny v Tab. 14. V případě Berouna a Nespek se jedná se o transformované průtoky do místa soutoků s Vltavou.

Tab. 14 Průběh simulace a neovlivněného a ovlivněného stavu v okrajových podmínkách modelu.

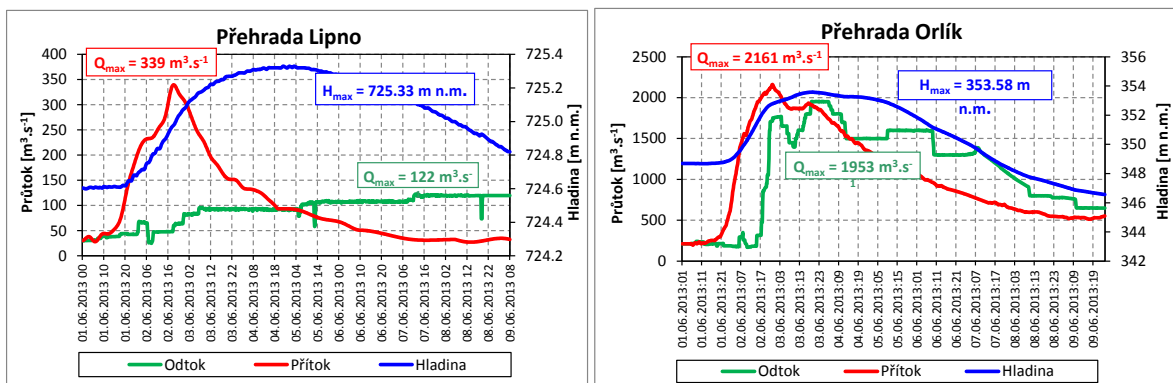
	Maximální ovlivněný průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Maximální neovlivněný průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Rozdíl [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Stranná (Skalka, Jesenice Horka, Stanovice, Březová, Nechranice)	266	349	84
Beroun (Hracholusky, Žlutice, Klabava)	881	935	54
Nespeky (Švihov)	514	548	33
Orlík-přítok (vliv Lipno a Římov)	2197	2307	110
Brandýs (Království, Seč a Rozkoš)	770	743	27

Na Obr. 19 je zobrazen nakalibrovaný model pro přítok do nádrže Orlík pro ovlivněný stav. Přítok z mezipovodí byl spočítán modelem SAC-SMA a následně odtok z jednotlivých povodí byl adjustován, tak aby přítok bilančně odpovídal. Vpravo je zobrazen neovlivněný průtok profilem Zvíkov ve dvou variantách s VD Lipno a VD Římov a bez těchto nádrží. Rozdíl v kulminaci je $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Počáteční nárůst simulovaného přítoku do nádrže Orlík pro ovlivněný stav je fázově zpožděn, má vyšší kulminaci a nesimuluje věrohodně druhou část přítokové vlny vzniklé druhou srážkovou periodou. Přítok do nádrže byl odvozen pro statickou hladinu a v případě uvažování klínové retence by k vyššímu přítoku docházelo. Druhý vrchol přítokové vlny vznikl na základě zvýšení odtoku z povodí vyvolaného příčinnými srážkami 3. června, přítok kulminoval ten samý den v 17 hodin. Srážko-odtokové modely, i přes nasycené zóny reprezentující rozložení vlhkosti, nebyly schopny toto navýšení

simulovat. Na rozdíl od první srážkové periody byly tyto plošné příčinné srážky odvozeny pouze z operativních srážkoměrů. Pokud porovnáváme kulminační přtoky, tak vliv této druhé epizody nemá na výsledek vliv. Ke zpřesnění průběhu přítoku do nádrže by bylo nutné použít dynamickou simulaci nádrže hydraulickým modelem. Adjustované srážko-odtokové modely pro simulaci ovlivněného stavu nelze použít přímo v modelu pro neustálený stav. Pro simulaci neustáleného stavu neexistuje možná kontrola na pozorovaná data a ani nelze vzhledem k použití jiné srážkoměrné sítě beze zbytku využít analogie s podobnou historickou povodní a její shody simulace a pozorování. Přesnost neovlivněného přítoku by měl být tedy posuzován z pohledu přesnosti srážko-odtokových modelů a jedinou charakteristikou, kterou lze korigovat, je objem povodňové vlny.



Obr. 19 Vlevo: kalibrace modelu pro ovlivněný přítok do nádrže, vpravo: neovlivněný přítok v profilu Zvíkov.



Obr. 20 Průběh přítoku, odtoku a hladiny na nádržích VD Lipno a VD Orlík.

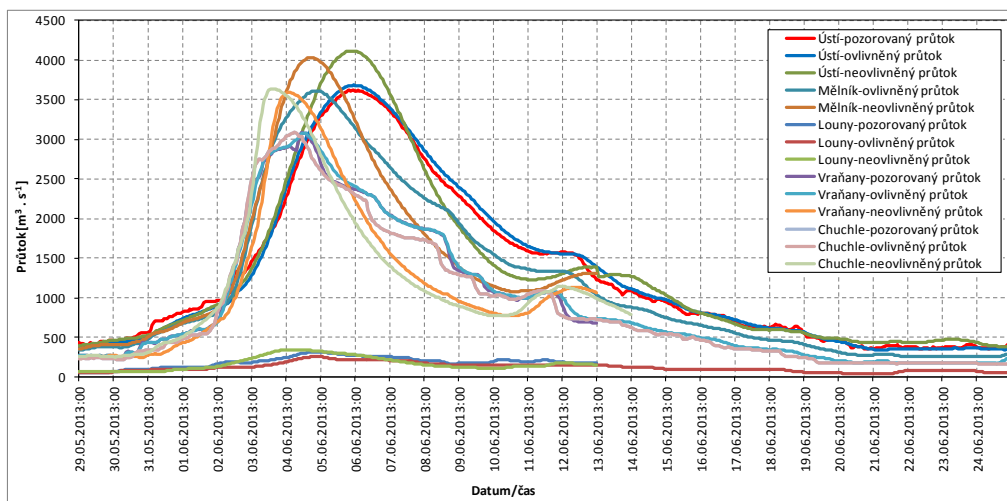
Přítok z mezipovodí odvodněného do Slapské přehrady je podrobně popsán ve zprávě „Vyhodnocení bilančních přtoků do vodních nádrží“, která byla jedním z podkladů projektu vyhodnocení povodně 2013, a byl použit jako vstup do modelu. Kulminační přtok z nepozorované části povodí, tedy bez přítoku Brziny a Mastníku, byl $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Přítok z mezipovodí do nádrže Štěchovice není významný, protože se jedná o odtok z malé plochy. Do nádrže Vrané vstupují dva pozorované přtoky Kocáby a Sázavy. Zbývající mezipovodí lze modelovat na základě bilance nádrže, ale přesnost je nedostatečná. Mezipřítok byl spočítán na základě bilance mezi horními okrajovými podmínkami v profilech Štěchovice (odtok z nádrže a Kocába) a Nespeky (Sázava). Dolní okrajová podmínka byla vytvořena profilem Zbraslav. Takto spočítaný přtok byl uniformně rozdělen v modelu mezi profily Štěchovice a Zbraslav. Sázava vstupuje do modelu jako bodový přtok a hydrogram vzniká transformací průtoku z Nespek k soutoku s Vltavou a jeho navýšení o přtok z mezipovodí odvozeného v předchozím

kroku na základě bilance. Přítok do modelu v části od profilu Zbraslav do profilu Chuchle je počítán na základě transformovaného průtoku Berounky z Berouna k soutoku a následnou simulací uzlu Berounka, Zbraslav a Chuchle. Kulminace takto odvozeného přítoku dosahovala $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Výstupy ze simulace neovlivněného průtoku na profilech na dolním toku Vltavy, Labe a Ústí jsou uvedeny v Tab. 15 a na Obr. 21. Mimo vlastní výpočet byly provedeny variantní simulace s proměnnými okrajovými podmínkami, kdy byly z modelu vyčleňovány nádrže pro různé kombinace jejich vlivu (viz. Tab. 17 a Tab. 18).

Snížení průtoku v Praze Chuchli dosáhlo $557 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a v profilu Ústí nad Labem $434 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V Praze je to způsobeno především nádržemi na Vltavě, Berounce a Sázavě. Pokud bychom chtěli teoreticky oddělit vliv jednotlivých nádrží, je možné je vyčlenit z modelu a následně analyzovat změnu průtoku. Tato analýza ale nezahrnuje např. synergický vliv zpoždění kulminačního průtoku na přítocích. Pokud simulujeme povodeň pouze s vlivem nádrží Švihov a Hracholusky, dojde ke snížení průtoků o $67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pokud simulujeme povodeň s vlivem samotné nádrže Švihov nebo samotné nádrže Hracholusky, získáme snížení o 42, resp. 25 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Tab. 17).

Analýza dílčího vlivu nádrží na Vltavě nad Prahou a nádrže Nechanice ukázala, že při simulaci povodně s vlivem samotné nádrže Nechanice se snížil rozdíl ovlivněného a neovlivněného průtoku v Ústí nad Labem na $107 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. V opačném případě, kdy je simulován pouze vliv Vltavské kaskády, se rozdíl průtoků snížil na $325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Snížení průtoku v Lounech o $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a následné snížení průtoku v Ústí o $107 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ indikuje, že na soutoku byl snížen výsledný průtok i díky posunu kulminace na přítoku z Ohře.



Obr. 21 Průběh povodňové vlny v profilu Ústí nad Labem.

V Tab. 16 jsou uvedeny kulminační průtoky a doby kulminace a odvozené postupové doby pro historické povodně před výstavbou vodních nádrží. Historické údaje jsou uvedeny pro profil Kamýk a Modřany (délka úseku je 73 km) a v případě simulované povodně 2013 pro profily Zvíkov a Chuchle (profil Zvíkov leží 37 km nad profilem Kamýk). Postupová doba mezi profilem Zvíkov a Kamýk vychází např. pro povodeň 1954 na 2 hodiny ($1931.01 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ v 8.7.1954:17 a $1963.32 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ v 8.7.1954:19). U povodně 1940, která v profilu Kamýk má dva vrcholy, jsou uvedeny oba kulminační průtoky, protože nelze jednoznačně určit, který z nich ovlivnil kulminační průtok v Modřanech. Pro povodeň v roce 1890 došlo ke kulminaci dříve v Praze než v profilu Kamýk.

Tab. 15 Průběh simulace neovlivněného a ovlivněného stavu ve významných profilech na dolní Vltavě, Labi a Ohři.

Profil	Tok	Neovlivněný průtok		Ovlivněný průtok		Rozdíl průtoků	Rozdíl hladin
		Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální hladina [m]	Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]	Maximální hladina [m]	[m ³ .s ⁻¹]	[m]
Chuchle	Vltava	3640	-	3084	-	556	-
Vraňany	Vltava	3590	167.10	3082	166.68	508	0.42
Mělník	Vltava	4030	162.66	3611	162.19	419	0.47
Louny	Ohře	347	177.36	257	176.99	90	0.37
Ústí	Labe	4116	142.20	3682	141.65	434	0.55

Tab. 16 Postupové doby pro historické povodně před výstavbou vodních nádrží na Vltavě a simulovaný průběh povodně 2013.

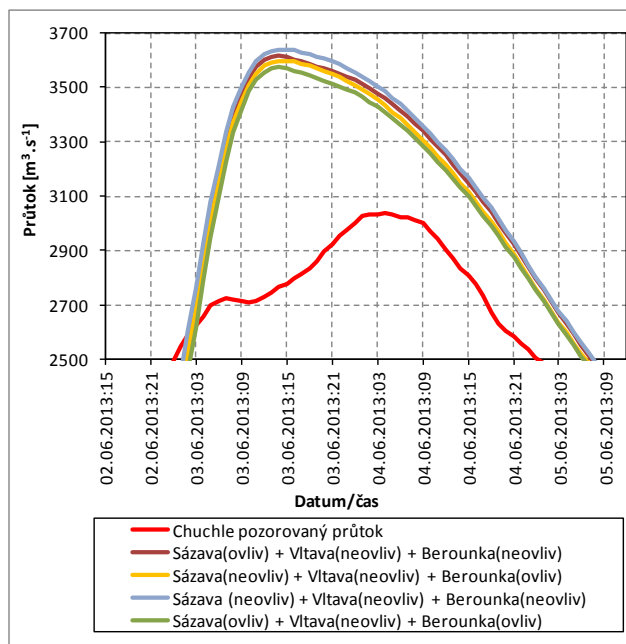
	Kamýk/Zvítov*	m3/s	Modřany/Chuchle*	m3/s	hod.
1890	04.09.1890:23	2312	04.09.1890:19	3955	-4
1920	14.01.1920:07	1318	14.01.1920:13	2502	5
1915	07.10.1915:15	1625	07.10.1915:22	2285	7
1940	13.03.1940:23 14.03.1940:06	1370 1298	14.03.1940:15	3223	16 9
2013	03.06.2013.03*	2307	03.06.2013.14*	3574	11

Tab. 17 Výstupy variantní simulace v profilu Chuchle.

Scénář	Vltava	Sázava	Berounka	Kulminace-Praha neovlivněný [m ³ .s ⁻¹]	Kulminace-Praha ovlivněný [m ³ .s ⁻¹]	Q _{neovlivněný} - Q _{ovlivněný} [m ³ .s ⁻¹]
1	neovliv	ovliv	neovliv		3615	25
2	neovliv	neovliv	ovliv		3598	42
3	neovliv	ovliv	ovliv		3573	67
4	neovliv	neovliv	neovliv	3640		-
5	ovliv	ovliv	ovliv		3084	556

Tab. 18 Výstupy variantní simulace v profilu Ústí nad Labem.

Ústí	Neovlivněný průtok [m ³ .s ⁻¹]	Ovlivněný průtok [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoků [m ³ .s ⁻¹]
Simulovaný průtok (ovlivněný všemi nádržemi)		3682	434
Simulovaný průtok neovlivněný	4116		
Simulovaný průtok (ovlivněný nádržemi na Vltavě nad Prahou)		3791	325
Simulovaný průtok (ovlivněný nádrží Nechanice)		4009	107



Obr. 22 Vliv alternativních okrajových podmínek na průběh průtoku v Praze – Chuchli.

Závěr

Byla provedena simulace ovlivněného a neovlivněného stavu se zaměřením na průběh hydrogramů povodně na Vltavě, Ohři a Labi. Byl proveden výběr nádrží, které byly zahrnuty do výpočtu. Nejvyšší míra nejistoty je spojena s použitím historického modelu pro původní koryto Vltavy od Českých Budějovic do Prahy Chuchle. Tento model pro simulaci historických povodní vychází z uvedených zjednodušení:

1. Nejsou uvažovány změny morfologie koryta v čase, např. úpravy vedoucí ke změně délky říčních úseků.
2. Soutoky s Berouňkou a Sázavou nejsou řešeny říčními úseky, ale jako boční bodový přítok. Především v případě Berouňky toto řešení může zvyšovat velikost průtoku pod soutokem, protože nejsou zohledněny rozlivové oblasti na soutoku.

V rámci řešení byly spočítány rovněž alternativy, které se lišili zahrnutím různých nádrží do simulace.

Simulace ovlivnění povodně v červnu 2013 vlivem nádrží, hydrogramy na horním Labi

Na horním Labi (od soutoku s Vltavou výše) se nachází několik významných vodních děl, které ovlivňují průtok na dolním toku. Míra ovlivnění obecně závisí na velikosti povodňové vlny a velikosti volného prostoru v nádrži. Pokud uvažujeme snížení kulminace vlny, vliv má rovněž i tvar a objem vlny. Obecně zimní povodně mají větší objem a tvar vln je zploštělý a snížení kulminačního průtoku nemusí být tak výrazné ve srovnání s letní povodní obdobného kulminačního průtoku. K výraznému snížení kulminačních průtoků zimních povodní přispívá především předpouštění nádrží.

Rozsah vlivu nádrží na průtok na dolním toku lze uvažovat z několika hledisek a víceméně vyplývá z principu chování nádrží. Nádrže snižují kulminační odtok, objem povodňové vlny. Významný je i parametr udávající odtok v okamžiku maximálního odtoku, který poskytuje informaci o posunu kulminace na odtoku. Posun kulminace povodňové vlny v čase může významně ovlivnit kulminační průtoky pod nádrží při kolizích vln na soutocích, kdy se fázový posun může projevit snížením, ale i zvýšením kulminačního průtoku.

Za základ modelu byl použit hydrologický předpovědní systém ČHMÚ, který byl pro tyto výpočty upraven. Z komplexního předpovědního systému byly vyčleněny pouze říční modely a modely pro plošný laterální přítok. Důležitá modifikace spočívala i v nahrazení říčního modelu TDR modelem Muskingum-Cunge (dále MC) v některých říčních úsecích. Základní schéma modelu je uvedeno na Obr. 24. V předpovědní verzi modelu je preferován model TDR (AquaLog, 2011) pro svoji stabilitu i za nepříznivých simulačních podmínek. MC umožňuje sestavení modelu i bez znalosti pozorovaných průtoků (Cunge, 1969), ale při aplikaci nelineárního řešení s proměnnými parametry může docházet k bilanční chybě a k problémům divergence od plně dynamického řešení v případě rychle narůstajících hydrogramů v plochých korytech se sklonem menším než 0.0002 (Garbrecht, 1991). Možnost kalibrace bez znalosti pozorovaných průtoků se uplatňuje mimo oblast pozorovaných průtoků, s kterými je model konfrontován především při studiích zaměřených pro simulaci neovlivněných průtoků. Vlivem snížení průtoků manipulací na nádržích se neovlivněné průtoky mohou pohybovat v rozsahu mimo historicky pozorované průtoky pro velké povodňové vlny.

Základním krokem v tomto dílčím úkolu bylo vymezení nádrží, které budou zahrnuty do analýzy. Souhrnná charakteristika nádrží na horním Labi je uvedena v Tab. 19, která sumarizuje celkové kapacity všech nádrží. Charakteristiky jednotlivých významnějších nádrží jsou uvedeny v Tab. 20. V obecných úvahách při výběru nádrží se kombinuje vliv volného prostoru v nádrži, velikost povodí nad nádrží a v případě konkrétní povodňové události i úroveň zasažení povodí nad nádrží povodňovým průtokem. VD Labská má retenční prostor (ovladatelný a neovladatelný) roven 2.915 mil. m³, který se blíží k velikosti ochranného prostoru VD Seč, ale povodí nad nádrží má plochu pouze 60.54 km².

Tab. 19 Nádrže na horním toku Labe (MKOL, stav: 2011).

Část povodí	Počet nádrží	Ovladatelný objem [mil. m ³]	Ovladatelný ochranný objem	
			Zimní [mil. m ³]	Letní [mil. m ³]
Labe nad ústím Vltavy (nádrže)	22	167.95	49.74	40.92

Z porovnání těchto dvou tabulek (Tab. 19 a Tab. 20) je zřejmé, že celkový ochranný prostor uvedených tří nádrží navýšený o VD Labská reprezentuje 70% celkového ochranného prostoru na Labi nad ústím Vltavy.

Tab. 20 Charakteristiky významnějších nádrží na horním Labi.

Vodní dílo (Tok)	Seč (Chrudimka)	Rozkoš (Úpa)	Les Království (Labe)
Říční km	50.72	3.59	1041.4
Plocha povodí [km ²]	216	415	532
Rok uvedení do provozu	1947	1972	1923
Zatopená plocha [ha]	220	1001	85
Maximální retenční hladina [m n. m.]	490.11	283.00	324.85
Hladina ovladatelného prostoru [m n. m.]	488.61	282.60	323.40
Hladina zásobního prostoru [m n. m.]	486.81	280.50	314.6 Z/ 315.6 L
Hladina stálého nadržení [m n. m.]	469.61	272.00	307.60
Celkový objem [mil. m ³]	21.8	76.2	9.2
Celkový ovladatelný objem [mil. m ³]	18.5	76.2	8.0
Ovladatelný ochranný prostor [mil. m ³]	3.2	25.4 Z/ 18.2 L	4.92 Z/ 4.515 L

Jak vyplývá z Tab. 22 všechny tři nádrže jsou schopné ovlivnit odtok z přibližně 10% plochy povodí vztažené k profilu Brandýs/Kostelec. Pokud obdobně vyjádříme mm srážek jako ekvivalent volného prostoru v nádržích, lze pro profil Kostelec zadržet v nádržích 2 mm. Jedná se již o snížení odtoku o 2 mm, nikoliv snížení spadlých srážek o 2 mm. Analýzou průběhu povodně v jednotlivých nádržích během povodně 2013 (viz. Tab. 21 a Obr. 25) byly primárně zahrnuty do simulace přehrady Les Království a Rozkoš. Zahrnutí VD Seč bylo především vzhledem k zadrženému objemu v nádrži. Snížení průtoku $32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v nádrži VD Seč přitom nemělo velký vliv na průtoky v Labi, protože povodeň na Chrudimce byla až při třetí vlně povodní 25.-26. června a maximální dosažený průtok v Nemošicích (Chrudimka) $121 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ byl především výsledkem navýšení v dolní části povodí pod soutokem s Novohradkou.

Tab. 21 Průběh povodňových průtoků v nádržích.

	Zachycený objem v nádrži [mil. m ³]	Maximální přítok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Maximální odtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Snížení přítoku [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
Labská (Labe)	0.46	72	47	25
Les Království (Labe)	4.73	308	156	152
Rozkoš (Úpa)	4.59	60	-	-
Seč (Chrudimka)	3.33	60	28	32

Během povodně 2013 na odtoku z VD Les Království bylo povoleno navýšení neškodného odtoku z $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Toto řešení bylo vyvoláno prudkým vzestupem průtoku v profilu Vestřev (56 % povodí nádrže), kde bylo dosaženo kulminačního průtoku $272 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při vodnosti Q_{50-100} . Pro částečné snížení extrémního přítoku do VD Les Království byl zároveň omezen odtok z přehrady Labská ze 47 na $12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Povoláním navýšení neškodného průtoku pod VD Les Království z 90 na $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ tak došlo ke snížení průtoku Q_{50} na přítoku do přehrady na průtok Q_{5-10} na odtoku z přehrady (PLA, 2013).

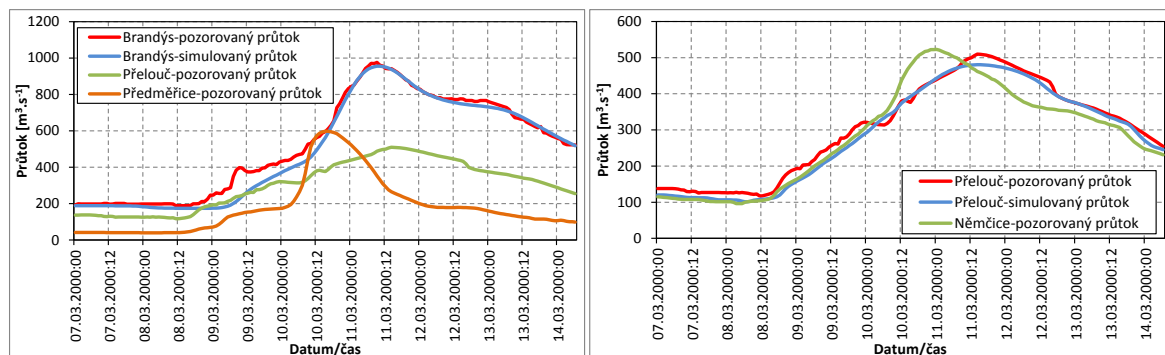
Nádrž Les Království byla před nástupem povodně částečně předvypuštěna, a to 1.6 m pod úroveň letního zásobního prostoru, tj. o cca 500 tis. m³ a bylo zachyceno 4.73 mil. m³ vody (Obr. 25). V nádrži Rozkoš bylo zachyceno 4.59 mil. m³. Uváděné snížení průtoku na Úpě v profilu Zlích je na úrovni $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tento údaj odpovídá prostému odečtení maximálních průtoků v limnigrafech Slatina a Zlích (PLA, 2013). V tomto odhadu je zanedbán vliv mezipovodí, které dosahuje cca 57 km², což je více než 10 % plochy povodí vztaženého k profilu Zlích.

Objem povodňové vlny v profilu Brandýs mezi 2. 6. 2013 až 9. 6. 2013 činil téměř 300 mil. m³, zadržený objem v nádrži Les Království a Rozkoš téměř 13 mil. m³, tj. 4.3 % objemu vlny v profilu Brandýs. Na základě těchto úvah je zřejmé, že vliv uvažovaných nádrží na Labi za povodeň 2013 na vzdálené profily pod nádrží nemůže být významný.

Tab. 22 Vliv nádrží z pohledu velikosti povodí nad nádrží a mm zachycených srážek vztažených k profilům na Labi.

Profil		Les Království		Rozkoš		Seč	
Název	Plocha k profilu [km ²]	Podíl plochy [-]	Zadržené srážky [mm]	Podíl plochy [-]	Zadržené srážky [mm]	Podíl plochy [-]	Zadržené srážky [mm]
Jaroměř	1225	0.43	3.7	0.34	14.9	-	-
Němčice	4300	0.12	1.1	0.10	4.2	-	-
Přelouč	6435	0.08	0.7	0.06	2.8	0.03	0.5
Nymburk	9720	0.05	0.5	0.04	1.9	0.02	0.3
Kostelec	13186	0.04	0.3	0.03	1.4	0.02	0.2

Kulminační průtok do VD Les Království, který dosahoval 308 m³.s⁻¹ ($Q_{50} = 301 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), se nacházel mimo kalibrovaný rozsah modelu. Verifikace modelu pro ovlivněný stav využila pozorovaná data z této povodně. Problém nastal s kalibrací a verifikací pro neovlivněný stav, kdy bylo v některých úsecích dosahováno téměř dvojnásobného průtoku. Tento průtok patří mezi historicky nejvyšší v historii VD Les Království, kdy zatím nejvyšší průtok 385 m³.s⁻¹ byl vyhodnocen (odtok 375 m³.s⁻¹) v roce 2000 v březnu. Povodeň z roku 2000 byla použita pro kalibraci modelu mimo rozsah pozorovaných průtoků povodně 2013. Výstupy z kalibrace jsou zobrazeny na Obr. 23. Obvykle se kalibrace a verifikace provádí na více epizodách vzhledem k rozdílným průběhům geneze povodňové vlny. Ty ale v tomto případě nejsou k dispozici. Výstupy z modelu je nutné posuzovat i z tohoto aspektu.



Obr. 23 Výsledky kalibrace modelu pro březnovou povodeň 2000, vlevo: úsek Přelouč-Brandýs, vpravo: úsek Němčice – Přelouč.

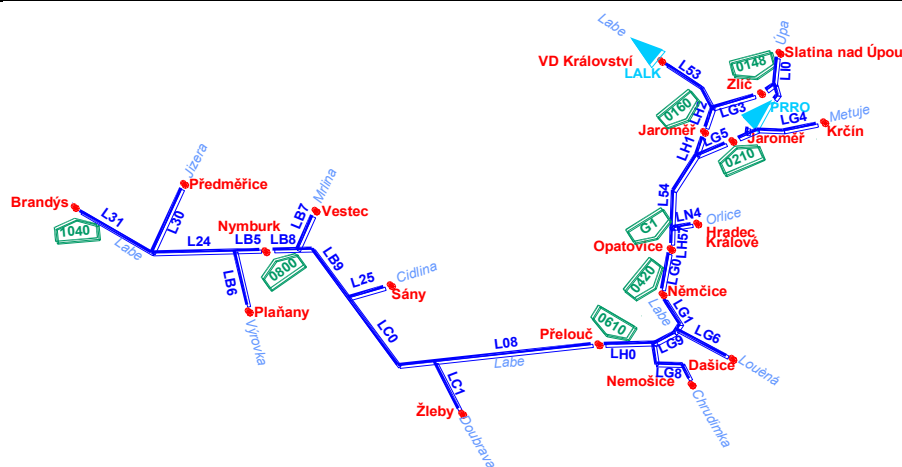
Vlastní postup simulace ovlivněného a neovlivněného odtoku lze charakterizovat následujícími kroky:

1. Odvození průtoků z mezipovodí na základě srážko-odtokových modelů a adjustace jejich průběhů a velikosti pro dosažení shody v dolním pozorovaném profilu. Úseky modelu jsou popsány v Tab. 23 a schéma je na Obr. 24. Kulminační průtoky okrajových a interních podmínek jsou uvedeny v Tab. 24.
2. Výpočet ovlivněného stavu, kde horní okrajové podmínky jsou tvořeny odtokem z nádrže Les Království. V případě nádrže Rozkoš jsou pro ovlivněný stav použity jako horní okrajová podmínka pozorované průtoky v profilech Zlích (DBČ 0148) a Jaroměř (DBČ 0210).

3. Výpočet neovlivněného stavu s odvozenými přítoky z mezipovodí (viz bod. 1), kde horní okrajová podmínka je tvořena přítokem do nádrže Les Království. Pro odovlivnění Rozkoše je v profilu Zlích použit transformovaný pozorovaný průtok ze Slatiny nad Úpou (DBČ 0141), který je navýšen o odtok z mezipovodí mezi profily Zlích a Slatina. Zároveň je odečten odtok z nádrže Rozkoš (RPRO_Q01).

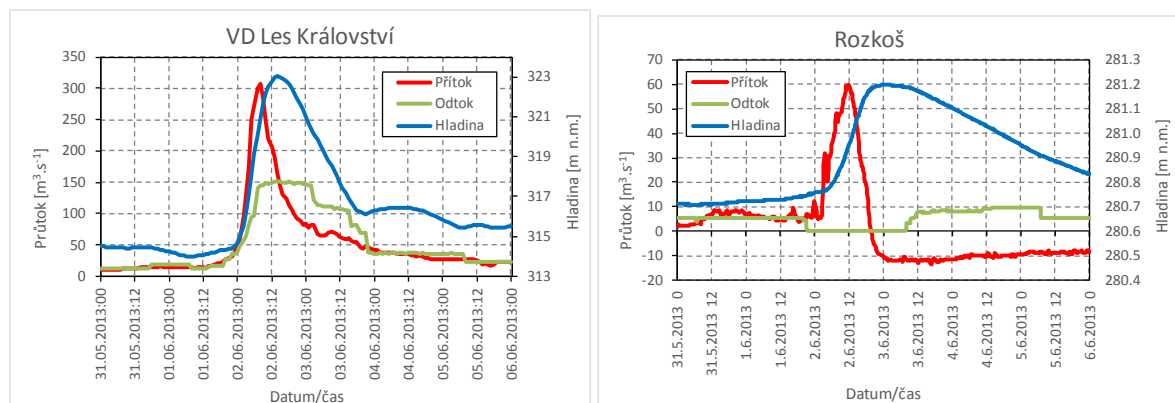
Tab. 23 Říční úseky modelu pro simulaci vlivu nádrží na horním Labi.

Tok	Označení Úseku	Dolní profil	Horní profil	Staničení dolní profil [řkm]	Staničení horní profil [řkm]	Délka úseku [km]
Labe	L31	Brandýs	sout.s Jizerou	137.9	141.1	3.2
	L24	sout.s Jizerou	sout.s Výrovkou	141.1	163.3	22.2
	LB5	sout.s Výrovkou	Nymburk	163.3	168.4	5.1
	LB8	Nymburk	sout.s Mrlinou	168.4	168.5	0.1
	LB9	sout.s Mrlinou	sout.s Cidlinou	168.5	180.0	11.5
	LC0	sout.s Cidlinou	sout.s Doubravou	180.0	203.5	23.5
	L08	sout.s Doubravou	Přelouč	203.5	224.2	20.7
	LH0	Přelouč	sout.s Chrudimkou	224.2	240.4	16.2
	LG9	sout.s Chrudimkou	sout.s Loučnou	240.4	244.5	4.1
	LG1	sout.s Loučnou	Němčice	244.5	253.3	8.8
	LG0	Němčice	Opatovice	253.3	262.1	8.8
	LH57	Opatovice	sout.s Orlicí	262.1	267.4	5.3
	L54	sout.s Orlicí	sout.s Metují	267.4	287.3	19.9
	LH1	sout.s Metují	Jaroměř	287.3	287.4	0.1
	LH2	Jaroměř	sout.s Úpou	287.4	289.2	1.8
	L53	sout.s Úpou	VD Království	289.2	316.4	27.2
Jizera	L30	sout.s Labem	Předměřice	0	11.5	11.5
Výrovka	LB6	sout.s Labem	Plaňany	0	21.5	21.5
Mrlina	LB7	sout.s Labem	Vestec	0	10.7	10.7
Cidlina	L25	sout.s Labem	Sány	0	6.8	6.8
Doubrava	LC1	sout.s Labem	Žleby	0	23.8	23.8
Chrudimka	LG8	sout.s Labem	Nemošice	0	3.7	3.7
Loučná	LG6	sout.s Labem	Dašice	0	7.2	7.2
Orlice	LN4	sout.s Labem	Hradec Králové	0	1.6	1.6
Metuje	LG5	sout.s Labem	Jaroměř	0	0.7	0.7
	LG4	Jaroměř	Krčín	0.7	17.3	16.6
Úpa	LG3	sout.s Labem	Zlích	0	14.6	14.6
	LI0	Zlích	Slatina nad Úpou	14.6	22.5	7.9



Obr. 24 Základní schéma modelu pro simulaci vlivu nádrží na horním Labi.

Výstupy ze simulace jsou souhrnně uvedeny Tab. 25, kde jsou uvedeny kulminační průtoky s časem kulminace a vodní stavy pro ovlivněný a neovlivněný stav. Součástí je rovněž rozdíl hladin, které jsou odvozeny na základě platných měrných křivek, a časový posun kulminací ovlivněného a neovlivněného stavu. Průběh hydrogramů pro ovlivněný a neovlivněný stav uvádí Obr. 26.

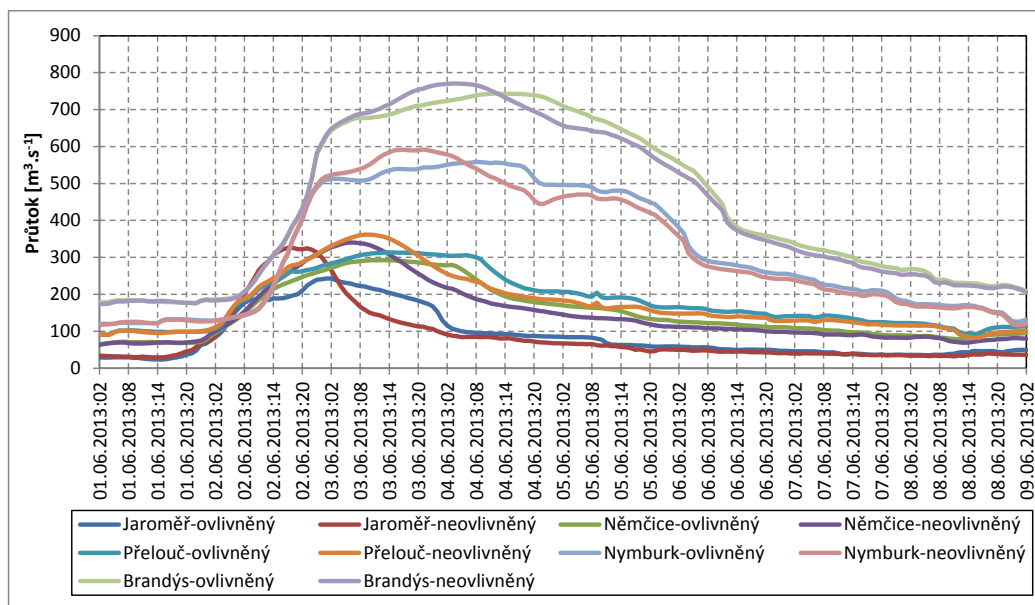


Obr. 25 Průběh manipulace na VD Les Království a VD Rozkoš. Průtok odvozen na základě rozdílu průtoků v profilu Slatina nad Úpou a Zlích.

Tab. 24 Pozorované kulminační průtoky na profilech modelu pro horní Labe.

Profil/tok	DBC	Datum/Čas kulminace	Kulminační průtok [m ³ .s ⁻¹]	Objem vlny [mil. m ³]
VD Království – odtok (Labe)	0060	02.06.2013:14	152	31.7
VD Království – přítok (Labe)	0060	02.06.2013:08	308	30.8
Slatina (Úpa)	0141	02.06.2013:12	136	24.5
Zlích (Úpa)	0148	02.06.2013:21	78	25.2
Rozkoš-odtok	RPRO_Q01	04.06.2013:22	10	3.5
Jaroměř (Labe)	0160	03.06.2013:02	242	62.0
Jaroměř (Metuje)	0210	10.06.2013:23	42	16.3
Hradec Králové (Orlice)	ORHK_Q01	04.06.2013:08	53	28.8
Opatovice (Labe)	LAOP_Q01	03.06.2013:05	325	112.4
Němčice (Labe)	0420	03.06.2013:12	292	105.0
Dašice (Loučná)	0470	04.06.2013:14	7	3.9
VD Seč (Chrudimka)	0491	02.06.2013:12	10	5.2
Úhřetice (Novohradka)	0580	04.06.2013:02	15	5.3
Nemošice (Chrudimka)	0590	04.06.2013:05	28	12.7
Přelouč (Labe)	0610	03.06.2013:13	304	123.1
Žleby (Doubrava)	0660	02.06.2013:17	28	9.1
Sány (Cidlina)	0750	05.06.2013:07	140	43.6
Vestec (Mrlina)	0770	04.06.2013:01	111	24.3
Nymburk (Labe)	0800	04.06.2013:08	560	223.6
Předměřice (Jizera)	1018	03.06.2013:11	166	57.2
Brandýs (Labe)	1040	04.06.2013:12	744	305.8

Vliv nádrží na horním Labi se na dolním toku postupně snižuje a v Brandýse dosahuje pouhých 27 m³.s⁻¹, což činí 3.6 % pozorovaného průtoku. Doba postupu kulminace neovlivněné vlny od VD Království (02.06.2013:08) do profilu Brandýs činila 44 hodin a simulované zrychlení neovlivněného průtoku bylo 7 hodin od simulace ovlivněného stavu.



Obr. 26 Průběh ovlivněných a neovlivněných průtoků v hlavních profilech Labe nad Brandýsem.

Tab. 25 Průběh průtoků a vodních hladin ve vybraných profilech na Labi.

Profil	Staničení [ř.km]	Kulminace neovlivněná			Kulminace ovlivněná			Rozdíl průtoků [m³·s⁻¹]	Rozdíl času [hod]	Rozdíl hladin [cm]
		Datum/Čas	Průtok [m³·s⁻¹]	Hladina [cm]	Datum/Čas	Průtok [m³·s⁻¹]	Hladina [cm]			
Jaroměř	287.4	02.06.2013 18:00	325	453	03.06.2013 02:00	242	377	83	8	76
Němčice	253.3	03.06.2013 6:00	340	447	03.06.2013 12:00	292	409	47	6	38
Přelouč	224.2	03.06.2013 0:00	361	314	03.06.2013 14:00	313	288	38	4	26
Nymburk	168.4	03.06.2013 1:00	592	385	04.06.2013 08:00	558	371	33	11	14
Brandýs	137.9	04.06.2013 4:00	770	447	04.06.2013 12:00	743	440	27	8	7

Závěr

Byly provedeny simulace ovlivněného a neovlivněného stavu pro vybrané nádrže v povodí Labe nad profilem Brandýs. Výpočet byl proveden upraveným předpovědním modelem, který byl dokalibrován na základě povodně z března 2000, kdy průtoky dosahovaly podobných maxim, jako neovlivněné průtoky v roce 2013. Hlavním výstupem je velikost snížení průtoku vlivem nádrží na Labi v úseku Jaroměř – Brandýs nad Labem. Pro Labe pod zaústěním Vltavy je vliv nádrží v povodí nad Mělníkem zanedbatelný.

Celkový závěr

Studie byla zpracována v rámci projektu “ Vyhodnocení povodní v červnu roku 2013“ na základě usnesení vlády ČR č. 533 ze dne 3. července 2013 a je součástí dílčího úkolu 3.1 „Analýza antropogenního ovlivnění povodňového režimu“.

Studie navazuje na tříletý grantový projekt VaV/650/6/03 „Vliv, analýza a možnosti využití ochranné funkce údolních nádrží pro ochranu před povodněmi v povodí Labe a dále ho rozšiřuje.

Během roku 2013-2014 byly provedeny na studii „Ověření vlivu údolních nádrží na průběh povodní dolů po toku“ následující práce:

1. Byly provedeny simulace pro ovlivněný a neovlivněný průtok pro povodí Labe pro období 2003-2013. Těmito simulacemi bylo navázáno na projekt VaV/650/6/03, kde byly provedeny simulace pro ovlivněný a neovlivněný stav pro období let 1890-2002. Simulace proběhla identickým způsobem jako v původním projektu. Tímto postupem byly získány homogenní časové řady ovlivněných a neovlivněných průtoků, které byly zpracovány na základě dohodnutých kritérií ve formě tabulek v prostředí MS Excel.
2. Pro posouzení vlivu výpočtového kroku na výstupy modelu byla provedena simulace alternativním modelem využívajícím kratší výpočtový krok 1hodina. Teoreticky tento model dává lepší předpoklady pro simulace povodňových událostí, což bylo prokázáno mnoha studiemi. Vlastní porovnání s modelem využívajícím 6hodinový krok nevyznělo zcela jednoznačně. Pro největší povodňové události alternativní model poskytoval lepší shodu s pozorovanými hydrogramy. Ze statistických parametrů vyplývá, že ve všech profilech, s výjimkou Loun, bylo alternativním modelem dosahováno lepších výsledků.
3. Byla provedena simulace ovlivněného a neovlivněného stavu se zaměřením na průběh hydrogramů povodně v červnu 2013 na Vltavě, Ohři a Labi. Byl proveden výběr nádrží, které byly zahrnuty do výpočtu. Nejvyšší míra nejistoty je spojena s použitím historického modelu pro původní koryto Vltavy od Českých Budějovic do Prahy Chuchle. Tento model pro simulaci historických povodní vychází z uvedených zjednodušení:
 - a. Nejsou uvažovány změny morfologie koryta v čase, např. úpravy vedoucí ke změně délky říčních úseků.
 - b. Soutoky s Berouňkou a Sázavou nejsou řešeny říčními úseky, ale jako boční bodový přítok. Především v případě Berouňky toto řešení může zvyšovat velikost průtoků pod soutokem, protože nejsou zohledněny rozlivové oblasti na soutoku.

V rámci řešení byly spočítány rovněž alternativy, které se lišili zahrnutím nádrží do simulace.

4. Byly provedeny simulace ovlivněného a neovlivněného stavu povodně 2013 pro vybrané nádrže v povodí Labe nad profilem Brandýs. Výpočet byl proveden upraveným předpovědním modelem, který byl dokalibrován na základě povodně z března 2000, kdy průtoky dosahovaly podobných maxim, jako neovlivněné průtoky v roce 2013. Výstupem je změna průtoků mezi ovlivněným a neovlivněným průtokem.

Literatura

Anderson, E. A.	National Weather Service River Forecast System – Snow Accumulation and Ablation Model. NOAA Technical memorandum NWS HYDRO-17.	1973	National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD, 1973, 150 s.
	Studie Vltavské vodní cesty v Praze.	1911	Expozitura c. k. ředitelství pro stavbu vodních cest v Praze
Kron, A. et al.	Operational flood management under large-scale extreme conditions, using the example of the Middle Elbe.	2010	Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 1171-1181, 2010
AquaLogic	Uživatelské příručky modelovacího systému AquaLog.	2011	Praha
Bryce D. Finnerty, Michael B. Smith, Dong-Jun Seo, Victor Koren, Glenn Moglen	Sensitivity of the Sacramento Soil Moisture Accounting Model to Space-Time Scale Precipitation Inputs from NEXRAD.	1995	Office of Hydrology, NOAA/National Weather Service 1325 East-West Hwy, Silver Spring, Maryland 20910 SMITH
Burnash, R. J. C. Singh, V. P.	The NWS River Forecasting System-Catchment modelling. Computer Models of Watershed Hydrology.	1995	Water Resources Publications, 1995, s. 311-366
Cunge, J., A.	On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method).	1969	Journal of Hydraulic Research, 1969, vol. 7, iss.2, s. 205–230
ČHMÚ	Hydrologická ročenka České republiky	1995-1996	ČHMÚ, Praha
Deutch, C. V., Journel, A. G.,	GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide.	1998	Applied Geostatistics Series, 1998, Oxford University Press, New York, second edition
Garbrecht, J.	A Muskingum-Cunge Channel Flow Routing Method for Drainage Network.	1991	Technical Paper No. 135, 1991, US Army Corps of Engineers
Krejčí, J., Zezulák, J., Buchtele, J.	Vyhodnocení povodně v srpnu 2002 z pohledu průchodu povodňové vlny Vltavskou kaskádou.	2003	ČZU, ISBN 80-213-1110-X
Bush, N., Balvín, P., Hatz, M., Krejčí, J.	Posouzení českých a durynských přehrad při povodních na Vltavě a Labi v České republice a Německu matematickým říčním modelem	2012	BfG-1725, Koblenz
Bush, N., Balvín, P., Hatz, M., Krejčí, J. MKOL	Simulation of affected and unaffected flow at Prague and Ústí nad Labem. Die Elbe und ihr Einzugs gebiet.	2013	BfG, Koblenz
Povodí Labe, státní podnik, Hradec Králové	PŘEDBĚŽNÁ ZPRÁVA o povodních v červnu 2013 v oblasti povodí Horního a středního Labe a na vlastním toku Labe v oblasti povodí Ohře a Dolního Labe (1.6.–13.6. a 25.6–28.6.).	2013	Ein geografisch, hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. Magdeburg: IKSE http://www.pla.cz/planet/public/dokumenty/zpravy_vhd/Zprava%20o%20povodni%202013_06.pdf
Smith, M. B., Koren, V. I., Zhang, Z., Wang, D., Reed, S.	Semi-distributed vs Lumped Model Simulations: Comparisons Using Observed Data for RFC Scale Basins	2000	Transactions of the American Geophysical Union, Spring Meeting, 2000, vol. 81, iss. 19
Vorel, Č., Souček, B.	Podélný profil Otavy v měřítku 1:10 000 od soutoku Vydry a Křemelné až k ústí (km 111,143 - km 0,000).	1926	Státní ústav hydrologický, Praha

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma modelu pro neovlivněný stav.	14
Obr. 2 Schéma modelu pro ovlivněný stav.	16
Obr. 3 Závislost skutečné počáteční hladiny na velikosti vodní hodnoty sněhu. Červený symbol - obsah vody z měření před uvažovanou pozorovanou počáteční hladinou, modrý symbol - z měření po uvažované počáteční hladině.	19
Obr. 4 Vztah počáteční hladiny modelované a skutečné.	20
Obr. 5 Závislost snížení přítoku do nádrže na celkovém přítoku.	22
Obr. 6 Závislost snížení přítoku do nádrže na objemu vlny nad referenčním průtokem= Q_a	22
Obr. 7 Vliv jednotlivých profilů na výslednou povodeň na Labi.	24
Obr. 8 Ovlivněné a neovlivněné kulminační průtoky v hlavních profilech modelu.	27
Obr. 9 Procentuální chyba kulminace vztažená k pozorovanému průtoku (vlevo), absolutní odchylka v závislosti na rostoucím průtoku (vpravo).	27
Obr. 10 Základní schéma modelu pro ovlivněný a neovlivněný stav. Ve schématu nejsou uvedeny samostatné modely pro Sázavu, Berounku a Labe nad Brandýsem.	32
Obr. 11 Uniformně distribuované boční přítoky.	34
Obr. 12 Retenční prostor vyjádřený v mm srážek vztažených na celé povodí nad nádrží.	35
Obr. 13 Retenční prostor vyjádřený v mm srážek vztažených na celé povodí Labe (Hřensko).	35
Obr. 14 Průběh hydrogramů červnové povodně z roku 1915.	36
Obr. 15 Průběh hydrogramů zářijové povodně z roku 1890.	37
Obr. 16 Výsledky kalibrace modelu starého koryta Vltavy.	37
Obr. 17 Průběh průtoků na Vltavě a přítocích nad VD Orlík.	38
Obr. 18 Členění mezipřítoků do modelu pro část povodí pod Českými Budějovicemi.	39
Obr. 19 Vlevo: kalibrace modelu pro ovlivněný přítok do nádrže, vpravo: neovlivněný průtok v profilu Zvíkov.	40
Obr. 20 Průběh přítoku, odtoku a hladiny na nádržích VD Lipno a VD Orlík.	40
Obr. 21 Průběh povodňové vlny v profilu Ústí nad Labem.	41
Obr. 22 Vliv alternativních okrajových podmínek na průběh průtoků v Praze – Chuchli.	43
Obr. 23 Výsledky kalibrace modelu pro březnovou povodeň 2000, vlevo: úsek Přelouč-Brandýs, vpravo: úsek Némčice – Přelouč.	46
Obr. 24 Základní schéma modelu pro simulaci vlivu nádrží na horním Labi.	47
Obr. 25 Průběh manipulace na VD Les Království a VD Rozkoš. Přítok odvozen na základě rozdílu průtoků v profilu Slatina nad Úpou a Zlích.	48
Obr. 26 Průběh ovlivněných a neovlivněných průtoků v hlavních profilech Labe nad Brandýsem.	49

Seznam tabulek

Tab. 1 Výběr povodňových situací za období 2003-2013.....	9
Tab. 2 Základní charakteristiky vybraných povodňových vln.....	10
Tab. 3 Varianty výpočtů zkoumané soustavy.....	12
Tab. 4 Pozorované okrajové podmínky modelu.....	13
Tab. 5 Simulované okrajové podmínky modelu.....	13
Tab. 6 Seznam hlavních nádrží a jejich základních charakteristik zahrnutých v modelu simulované soustavy.....	15
Tab. 7 Roční průběh počátečních podmínek – hladiny v nádržích.....	17
Tab. 8 N-leté průtoky, průměrné průtoky a průtoky pro základní povodňové stavy.....	18
Tab. 9 Statistické ukazatele pro porovnání simulací s různým krokem výpočtu.....	28
Tab. 10 Okrajové podmínky – bodové přítoky do modelu (modely pro ovlivněný a neovlivněný stav).....	33
Tab. 11 Seznam nádrží uvažovaných ve výpočtu neovlivněných průtoků.....	34
Tab. 12 Hydrogramy dostupné pro kalibraci.....	36
Tab. 13 Kulminační průtoky a doby kulminace.....	38
Tab. 14 Průběh simulace a neovlivněného a ovlivněného stavu v okrajových podmínkách modelu.....	39
Tab. 15 Průběh simulace neovlivněného a ovlivněného stavu ve významných profilech na dolní Vltavě, Labi a Ohři.....	42
Tab. 16 Postupové doby pro historické povodně před výstavbou vodních nádrží na Vltavě a simulovaný průběh povodně 2013.....	42
Tab. 17 Výstupy variantní simulace v profilu Chuchle.....	42
Tab. 18 Výstupy variantní simulace v profilu Ústí nad Labem.....	42
Tab. 19 Nádrže na horním toku Labe (MKOL, stav: 2011).....	44
Tab. 20 Charakteristiky významnějších nádrží na horním Labi.....	45
Tab. 21 Průběh povodňových průtoků v nádržích.....	45
Tab. 22 Vliv nádrží z pohledu velikosti povodí nad nádrží a mm zachycených srážek vztažených k profilům na Labi.....	46
Tab. 23 Říční úseky modelu pro simulaci vlivu nádrží na horním Labi.....	47
Tab. 24 Pozorované kulminační průtoky na profilech modelu pro horní Labe.....	48
Tab. 25 Průběh průtoků a vodních hladin ve vybraných profilech na Labi.....	49



Ověření vlivu změn užívání krajiny na odtok v modelovém povodí Botiče nad VD Hostivař

Část dílčího úkolu

DÚ 1.3 Analýza antropogenního ovlivnění povodňového režimu

projektu

Vyhodnocení povodní v červnu 2013

(koordinátor: MŽP ČR)

Objednatel: ČHMÚ Praha
Zhotovitel: DHI a.s.

Praha, prosinec 2013 (doplněno: červen 2014)

© DHI a.s., Na Vrších 5, 100 00 Praha 10,
prosinec 2013

Zpracovali: Ing. Pavel Tachecí, Ph.D. (p.tacheci@dhi.cz)
Ing. Michal Korytář
Mgr. Jana Kaiglová

mezi procesy. V rámci modelování na povodí Botiče byly pro popis pohybu vody využity následující aproximace řešení obecných parciálních diferenciálních rovnic pohybu vody:

- Proudění po povrchu: 2D difusní vlna (metoda konečných rozdílů).
- Proudění koryty: 1D plně dynamická vlna (metoda konečných rozdílů).
- Proudění v nenasyčené zóně: 1D vertikální aproximace Richardsovy rovnice, bez zahrnutí vlivu makropórů.
- Proudění v nasycené zóně: 3D pohybová rovnice aproximovaná metodou konečných rozdílů.

a dále pro výpočet evapotranspirace přepočten ze vstupních časových řad referenční evapotranspirace na aktuální hodnoty pomocí metody Kristensen a Jensen (1975).

3 Základní charakteristika povodí Botiče

Botič pramení severně od Křížkového Újezdce v lese Okrouhlíku na území Čenětic. Protéká přes Čenětic (zleva se vlévá Oleška), Olešky (zleva bezejmenný přítok od Hlubočinky), přes Kocandu (zprava přítok z Osnice), protéká Průhonickou oborou (přes rybníky Bořín a Labeška, mezi nimi se zleva vlévá Jesenický potok, za nimi zprava Dobřejovický potok) a Průhonickým parkem (mine Podzámecký rybník) a místy zalesněným údolím Průhonic meandruje přes Křeslice do Prahy.

Horní tok až do vzdálenosti 17,447 km od ústí je ve správě státního podniku Povodí Vltavy.

Na území Prahy vtéká potok v přírodním parku Botič-Milíčov. Přijímá zprava Pitkovický potok a o kus dál u Fantova mlýna v místě zvaném Dobrá Voda rovněž zprava potok Dobrá voda od Uhříněvsi. Protéká opraveným Petrovickým jezem a před Petrovicemi se zleva vlévá Milíčovský potok od Milíčovských rybníků a v Petrovicích začíná vzdutí Hostivařské přehrady.

Povodí Botiče je postiženo povodněmi relativně často (např. 1958, 2002, 2004, 2007 a 2013).

Zájmovým územím této práce je část povodí nad vtokem do nádrže Hostivař (tj. asi 91 km²), z praktických důvodů je do modelu zahrnuta i část území až k hrázi vodního díla (tj. asi 95 km² celkem).

4 Vstupy do modelu

4.1 Srážky

Správné vyhodnocení příčinné srážky, jejího průběhu i plošné variability je naprosto nezbytným předpokladem pro úspěšnou kalibraci i validaci srážkoodtokového modelu.

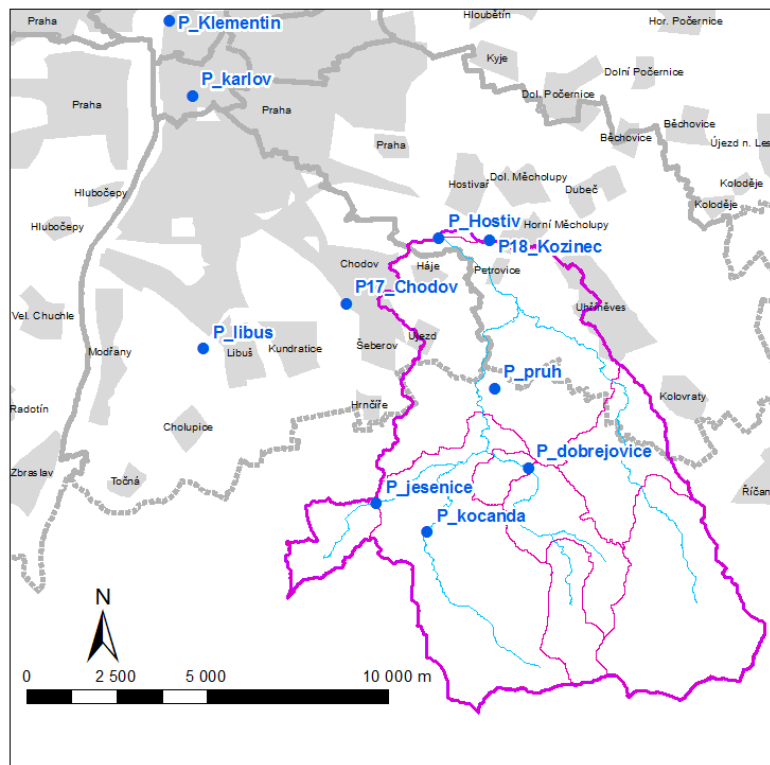
K dispozici byly časové řady srážkových úhrnů v jedenácti stanicích tří institucí. Přehled je v následující tabulce. Dále byly k dispozici produkty radarového snímkování ČHMÚ (sum_cappi_020_adj), tedy odhad srážkového pole ve čtvercích 1x1 km v časovém kroku 15min.

Tab. 1 Přehled srážkoměrných stanic. Srážkový úhrn mezi 29.5.2013 0:00 a 4.6.2013 0:00.

Umístění stanice	označení	provozovatel	časový krok	chybějící data	srážkový úhrn (mm)
Libuš	P1PLIB01	ČHMÚ	1 hod		147.7
Průhonice	P1PRUH01	ČHMÚ	1 hod		106.2
Klementinum	P1PKLE01	ČHMÚ	1 hod		96.5
Kbely	P1PKBE01	ČHMÚ	1 hod		102.1
Karlovy	P1PKAR01	ČHMÚ	1 hod		107.4
Dobřejovice		Lesy hl. m. Prahy	10 min		151.8
Host. přehrada		Lesy hl. m. Prahy	10 min		337.8 *
Jesenice		Lesy hl. m. Prahy	10 min		160.2

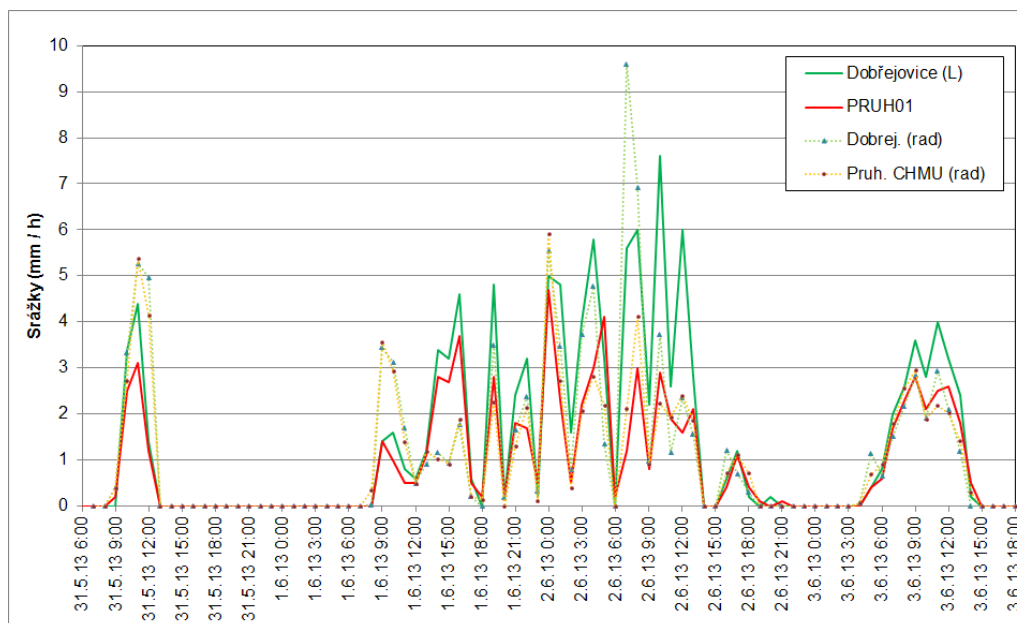
Kocanda		Lesy hl. m. Prahy	10 min	od 1.6.2013 9:00	
Chodov	P17		15 min		90.7 *
Kozinec	P18		15 min		83.7 *

* = Hodnoty přepočtené, zatížené nejistotou



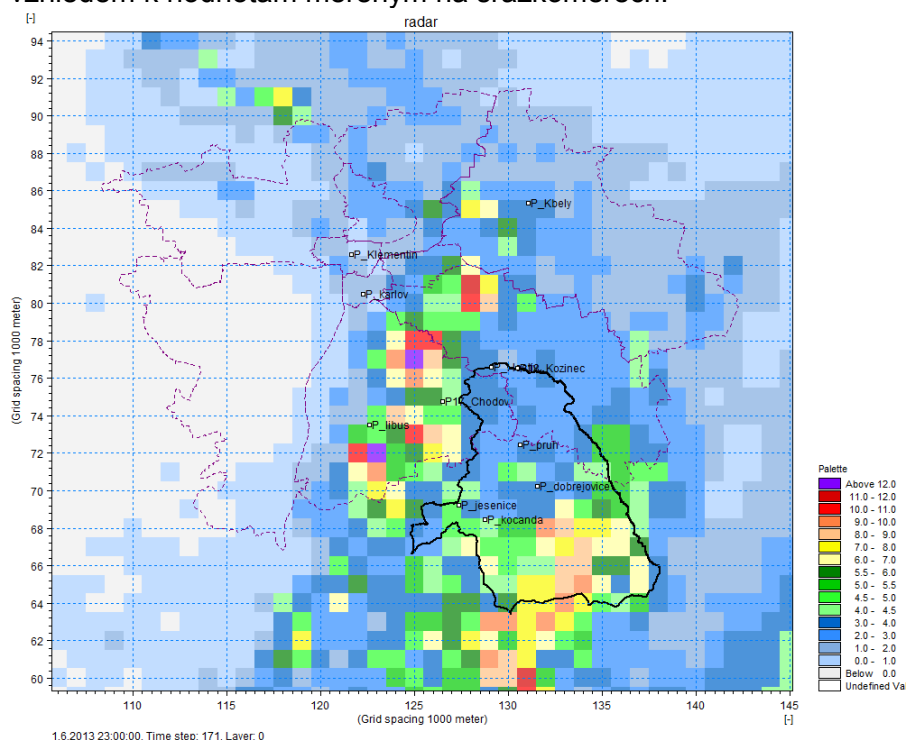
Obr. 2 Poloha srážkoměrných stanic

Časové řady úhrnů srážek ze 7 srážkoměrů (Dobřejovice, Jesenice, Průhonice, Libuš, Kbely, Klementinum a Karlov) byly využity pro porovnání s rozložením srážkového pole z meteorologického radaru. Na následujícím obrázku je porovnání průběhu příčinné srážky (hodinové úhrny) v místech dvou stanic: Průhonice (ČHMÚ) a Dobřejovice (Lesy hl. m. Prahy), umístěných ve střední části povodí. Úhrny měřené pozemními srážkoměry jsou vykresleny plnou čarou. Hodnoty odvozené lineární interpolací z gridu 1x1 km radarových produktů jsou vyznačeny značkami spojenými tečkovanou čarou.



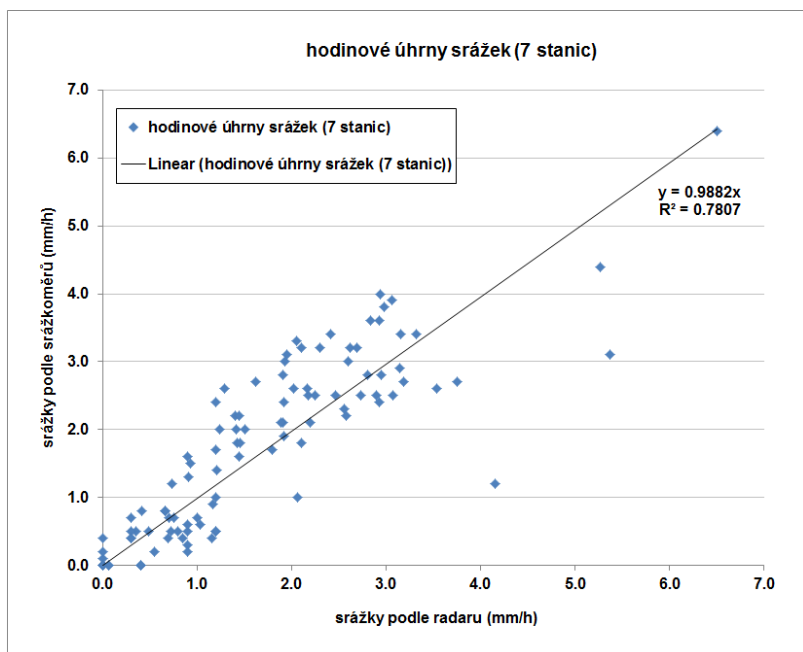
Obr. 3 Porovnání hodinových úhrnů srážek ve srážkoměrech (plná čára) a interpolovaných z radarových produktů (body, tečkovaná čára) – stanice Dobřejovice (Lesy hl.m.P) a Průhonice (ČHMÚ).

Je zřejmé, že mezi 1.6.2013 8:00 a 2.6.2013 14:00 jsou hodnoty v horší shodě než ve zbytku zachyceného období. Příčinu možno spatřovat v dynamickém a velmi variabilním charakteru srážek, kdy interpolace z hodnot ve čtvercích 1x1 km je již zdrojem značných rozdílů vzhledem k hodnotám měřeným na srážkoměrech.



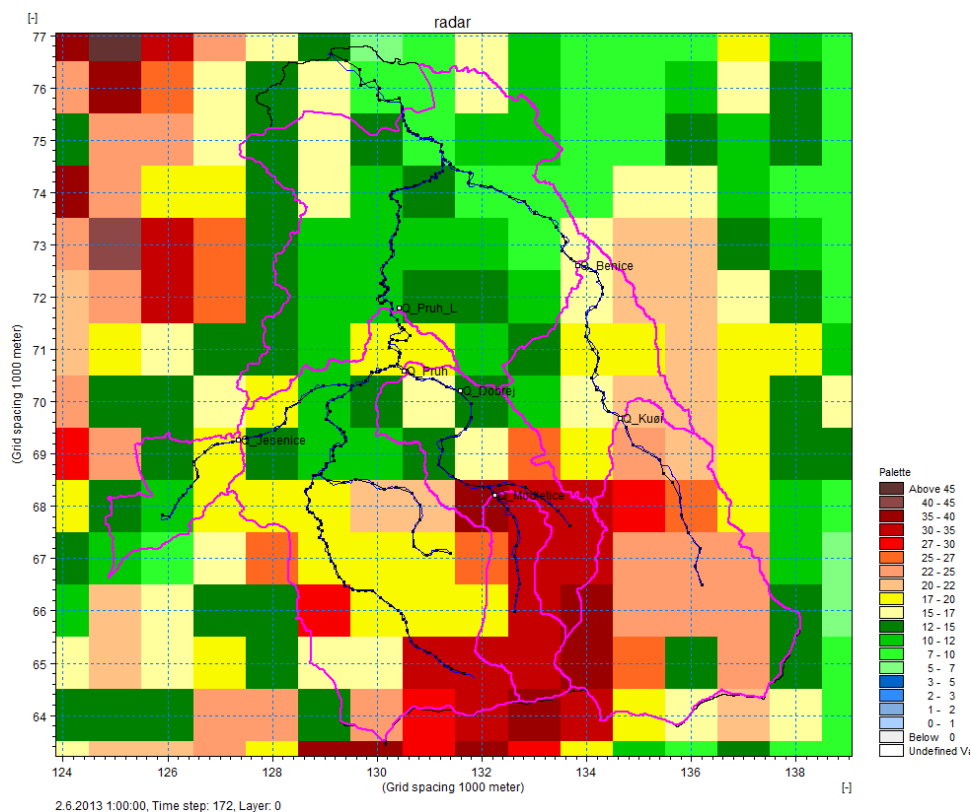
Obr. 4 Neinterpolované pole radarového produktu (úhrny srážek za 15 min) pro 1.6.2013 23:00. Černou čarou povodí Botiče nad nádrží Hostivař, kroužky značí polohu srážkoměrných stanic.

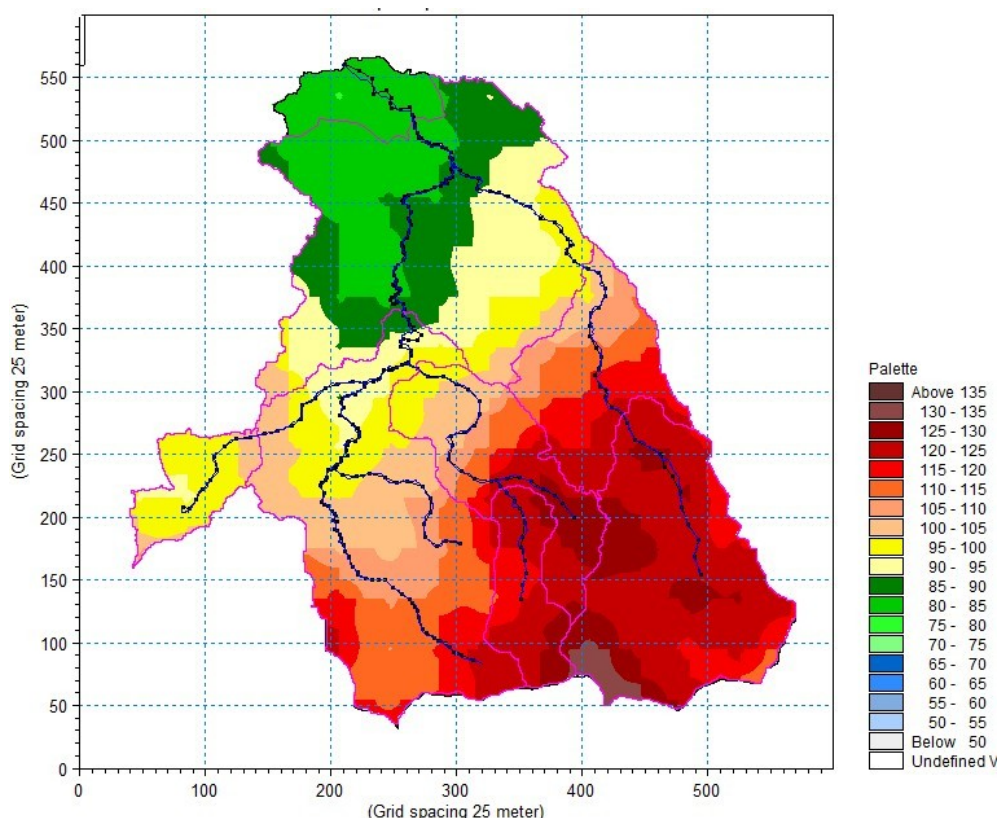
Vzhledem k charakteru příčinné srážky tedy byly pro analýzu vybrány úseky 31.5.2013 8:00 – 31.5.13 14:00 a 3.6.2013 1:00 – 4.6.2013 6:00 na sedmi zmíněných srážkoměrech.



Obr. 5 Korelace hodinových srážek ze 7 srážkoměrů a radarových produktů (31.5.2013 8:00 – 31.5.13 14:00 a 3.6.2013 1:00 – 4.6.2013 6:00)

Z korelace je zřejmé, že hodinové srážkové úhrny z radarů i srážkoměrů jsou velmi blízké (směrnice regresní přímky 0.99), jako vstup do modelu pro srážkoodtokovou epizodu jsou tedy použity přímo distribuované úhrny srážek (gridové radarové produkty 1 x 1 km v 15 min kroku). Pro odhad počátečních podmínek jsou využity hodinové úhrny v období 1.5.2013 – 1.6.2013 ve stanicích ČHMÚ.





Obr. 6 Nahoře: Příklad rozložení srážkového úhrnu podle radaru – vstup do modelu. Radarový produkt – úhrn srážek za 15 min, čtverce 1x1 km, jednotky škály: mm/h. Dole: Celkový úhrn srážek (mm) za období 31.5.2013 6:00 – 4.6.2013 6:00, interpolovaný z radarových produktů do výpočetní sítě 25 x 25 m.

4.2 Průtoky

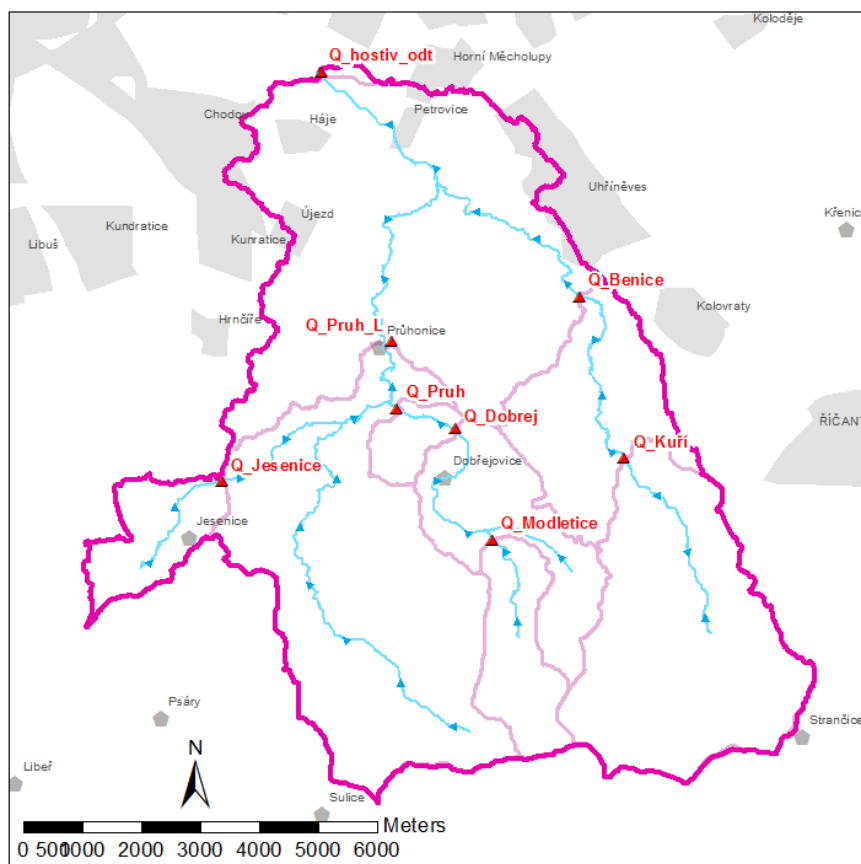
K dispozici byla průtoková data z osmi profilů na Botiči a přítocích (ze sedmi profilů provozovaných Lesy hl. m. Prahy a jednoho profilu ČHMÚ) a dále odtok z přehrady Hostivař. Pro profily Lesů hl. m. Prahy byly k dispozici průměrné desetiminutové průtoky; pro profil ČHMÚ pak hodinové průměrné průtoky.

Tab. 2 Profily, plochy povodí a odtokový koeficient epizody 6/2013 (úhrny 1.6.2013 6:00 – 3.6.2013 3:00)

Profil	potok	Provo-zovatel	Plocha dílčího povodí km ²	Celk. plocha povodí km ²	Srážková výška mm	Odtoková výška mm	Odtokový koeficient %
Kuří	Pitkovický	Lesy	17.0	17.0	95	80	84
Benice	Pitkovický	Lesy	8.4	25.4	81	44*	55
Modletice	Chomutovický	Lesy	4.5	4.5	94	68	73
Dobřejovice ⁽¹⁾	Dobřejovický	Lesy	6.8				
Průhonice ⁽¹⁾	Dobřejovický	ČHMÚ	1.7 + 6.8	12.9	82 ⁽¹⁾	70 ⁽¹⁾	85 ⁽¹⁾
Jesenice	Jesenický	Lesy	3.7	3.7	67	30	44
Pruhonice	Botič	Lesy	23.5	40.2	76	61	80

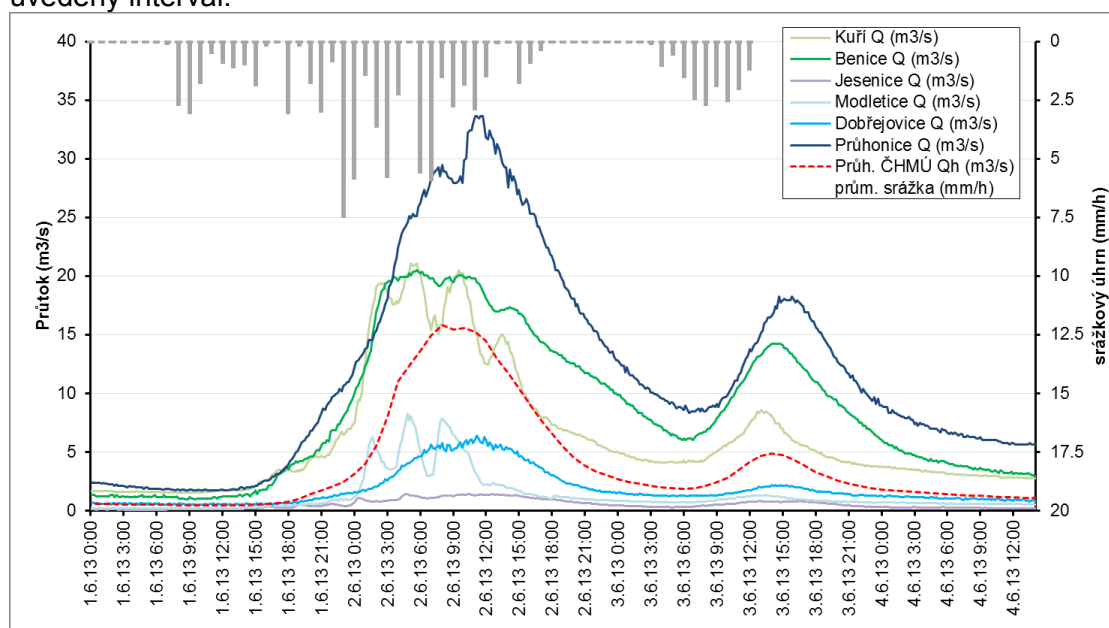
* = Hodnoty ovlivněny obtékáním, nižší než skutečné

⁽¹⁾ pro výpočet k profilu Průhonice (ČHMÚ) použito celé mezipovodí (od profilu Modletice), tedy vč. dílčího povodí Dobřejovice



Obr. 7 Delineovaná dílčí povodí a stanice s průtokovou řadou. Povodí Botiče nad přehradou Hostivař.

Srážková výška byla vypočtena z plošně distribuovaných srážkových úhrnů na základě radarových produktů (jde tedy o průměrnou srážkovou výšku na dílčích povodích) pro uvedený interval.



Obr. 8 Průměrná srážka na celé ploše povodí a měřené průtoky v jednotlivých profilech. Profil Dobřejovice byl během odtokové epizody přeléván, hodnoty jsou zkreslené

Podle informací pracovníků Lesů hl. m. Prahy byl profil Dobřejovice na Dobřejovickém potoce během epizody přetékán. Proto nebyl tento profil v dalším zpracování využit. Dále je

zřejmé, že v profilu Benice (ve srovnání s profilem Kuří) od průtoku asi 20 m³/s není zachycen celý průtok profilem. Tento profil je tedy využit pro modelování pouze částečně.

Z průběhu hydrogramů je zřejmé, že 3.6.2013 ve 3:00 (nástup dalšího oddílu srážky) ještě průtok nepoklesl na hodnoty blízké stavu před nástupem epizody. Odtokový koeficient v posledním sloupci tabulky, který představuje aproximaci pro hlavní vlnu odtokového hydrogramu, by měl být ve skutečnosti vyšší (pokud by byla korektně započtena i zbývající část sestupné větve hydrogramu, ovlivněná následnou srážkou a z výpočtu zde vynechaná). Je zřejmé, že takto vypočtené odtokové koeficienty (kromě západního okraje povodí) jsou extrémní, v rozsahu 73-85% srážkového úhrnu.

4.3 Půdy

Mapa půd byla převzata z veřejně dostupného zdroje, Geoportálu SOWAC - GIS (VÚMOP v.v.i.), adresa: <http://geoportal.vumop.cz>. Jako podklad byla využita mapa základních charakteristik BPEJ, vrstva obsahující skupiny půdních typů. Po zjednodušení, schematizaci a interpretaci bylo do modelu zahrnuto šest převažujících skupin půd rozdělených podle členění mapové vrstvy:

Tab. 3 Převažující skupiny půd na povodí Botiče nad nádrží Hostivař. Kategorizace podle 13 skupin hlavních půdních jednotek BPEJ (VÚMOP).

Č. skupiny	Název	% plochy povodí
1+2	Půdy hnědozemní (2) a černozemní (1)	27
3	Půdy illimerizované (luvizemně)	11
4	Rendziny	6
6	Hnědé půdy	39
7	Hnědé půdy kyselé	10
11+12 +13	Nivní půdy a hydromorfní	5

Zbýlá 2% plochy území připadá především na půdy mělké.

Pro šest převažujících skupin půd byly odhadnuty hlavní hydraulické půdní charakteristiky s využitím výsledků DÚ 1 „Analýza a mapování infiltračních a retenčních schopností půd České republiky“ zpracovaného kolektivem VÚMOP Praha v rámci projektu MŽP VaV 1D/1/5/05 „Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR“ (koordinátor: ČHMÚ).

Tab. 4 Odhad hydraulických charakteristik půd podle podkladů

Skupina půd	odhad RVK (mm)	odhad ustálené infiltrační rychlosti (m/s)
1+2	340	1.5E-06
3	230	2.5E-06
4	140	1.7E-06
6	150	3.5E-06
7	150	3.2E-06
11+13	200	1.7E-06

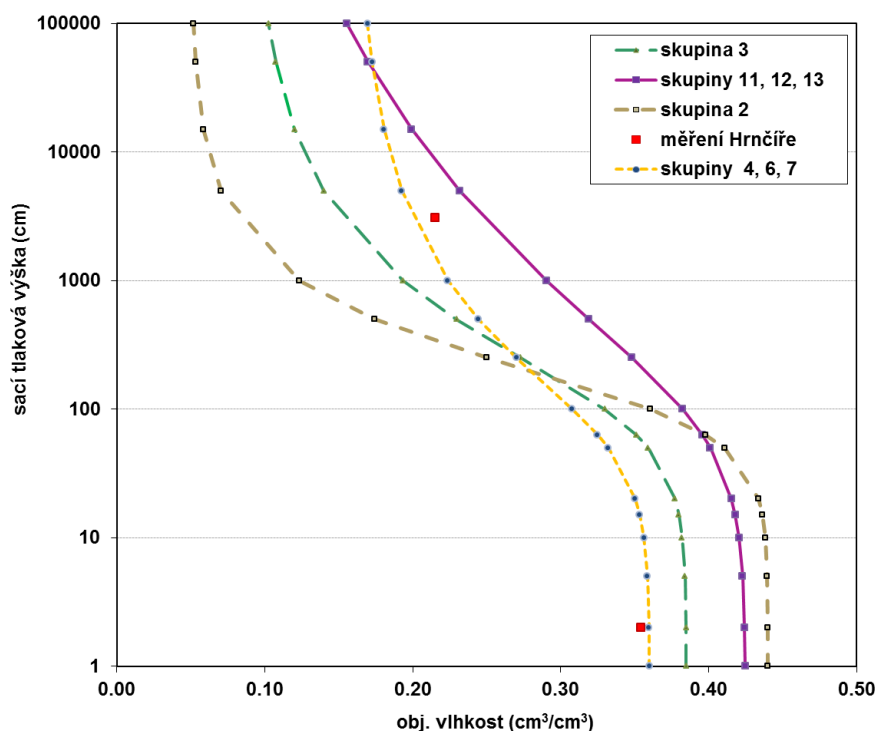
V tabulce jsou pro danou skupinu uvedeny typické hodnoty retenční vodní kapacity (RVK) v milimetrech vodního sloupce podle hodnot uvedených v závěrečné zprávě VaV 1D/1/5/05 pro jednotlivá čísla hlavních půdní jednotky (HPJ) v kódu BPEJ. Jde o přibližné vyjádření obsahu vody v kapilárních pórech půdy, s přihlédnutím k typické mocnosti vrstvy půdy. Zde je hodnota použita jako vodítko při odhadu charakteristik retenční křivky.

Dále jsou podle hodnot uvedených v tabulkách závěrečné zprávy VaV 1D/1/5/05 pro infiltraci a propustnost jednotlivých HPJ (hodnoty udávané Kurážem a Janečkem) provedeny odhady infiltrační rychlosti pro jmenovaných šest skupin půd. Tyto hodnoty jsou v modelu použity jako první aproximace nasycené hydraulické vodivosti půd pro kalibraci modelu.

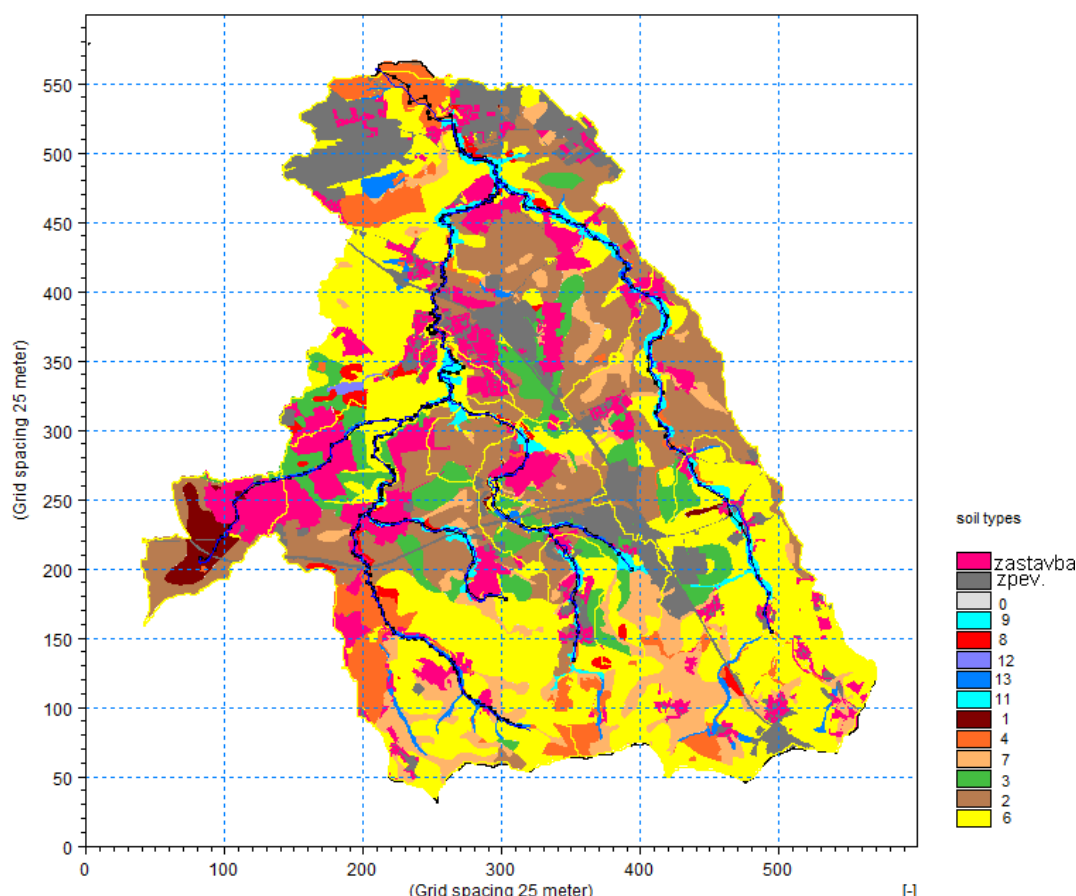
Další hydraulickou charakteristikou používanou v modelu je retenční křivka. Vzhledem k rozsahu území a časovým a finančním možnostem byly využity obecné retenční křivky (odpovídající charakteristikám výše uvedených skupin půd), jejichž zdrojem je literatura a zobecnění provedené na základě zkušeností z předchozích projektů. Parametry *alfa* a *n* van Genuchtenova výrazu proložení retenční čáry byly upraveny tak, aby hodnoty retenční vodní kapacity (mezi pF 1.8 a 4.18) se blížily hodnotám v předchozí tabulce. Jako kontrola byly využity dříve měřené body retenční čáry v lokalitě Hrnčíře (skupina hnědých půd). Dále byly do modelu přidány dvě náhradní skupiny (nepropustné plochy a zástavba – domy se zahradami), které simulují dopad změn (především zhutnění) v oblastech se zástavbou.

Tab. 5 Hydraulické charakteristiky půd pro model MIKE SHE. Parametry van Genuchtenova proložení a vypočtené body retenční křivky.

	skupina 1, 2	skupina 3	skup. 4, 6, 7	skup. 11, 12, 13	zpev.plochy	zástavba
thr	0.05	0.09	0.16	0.04	0.2	0.18
ths	0.440	0.385	0.36	0.425	0.25	0.32
alfa	0.0080	0.0095	0.0150	0.0120	0.015	0.015
n	1.8	1.461	1.42	1.17	1.42	1.42



Obr. 9 Hydraulické charakteristiky půd zadané do modelu MIKE SHE - retenční křivky.



Obr. 10 Půdní mapa (čtvercová síť 25x25m) pro model stavu k r. 2013. Čísla označují půdní skupiny

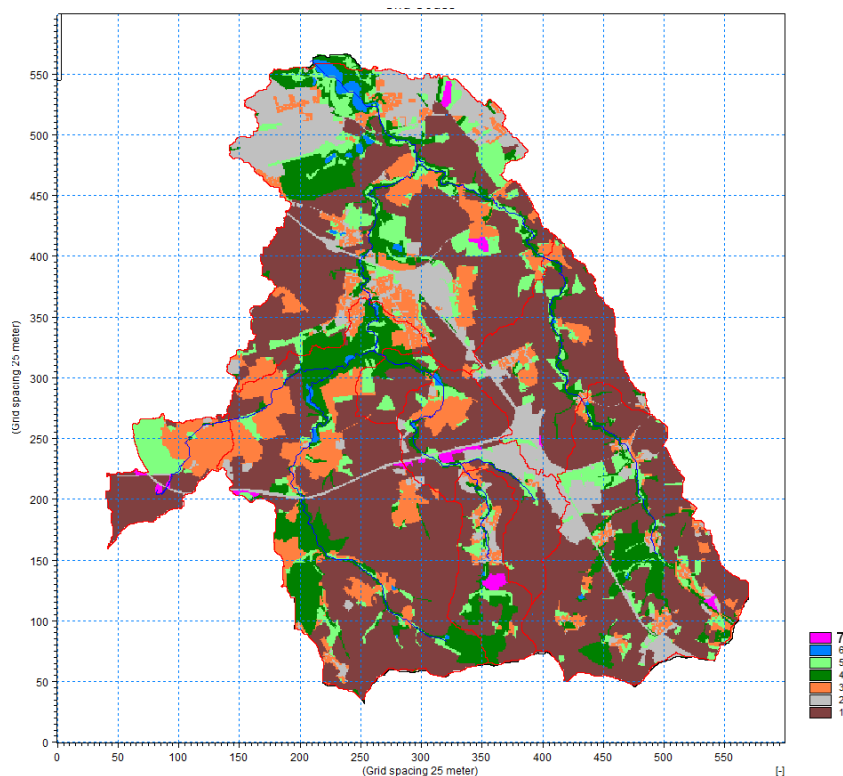
4.4 Využití území

Pro potřeby modelování bylo stanoveno sedm kategorií využití území. Těm byly přiřazeny parametry vegetace, propustnosti a hydraulické drsnosti povrchu podle Manninga.

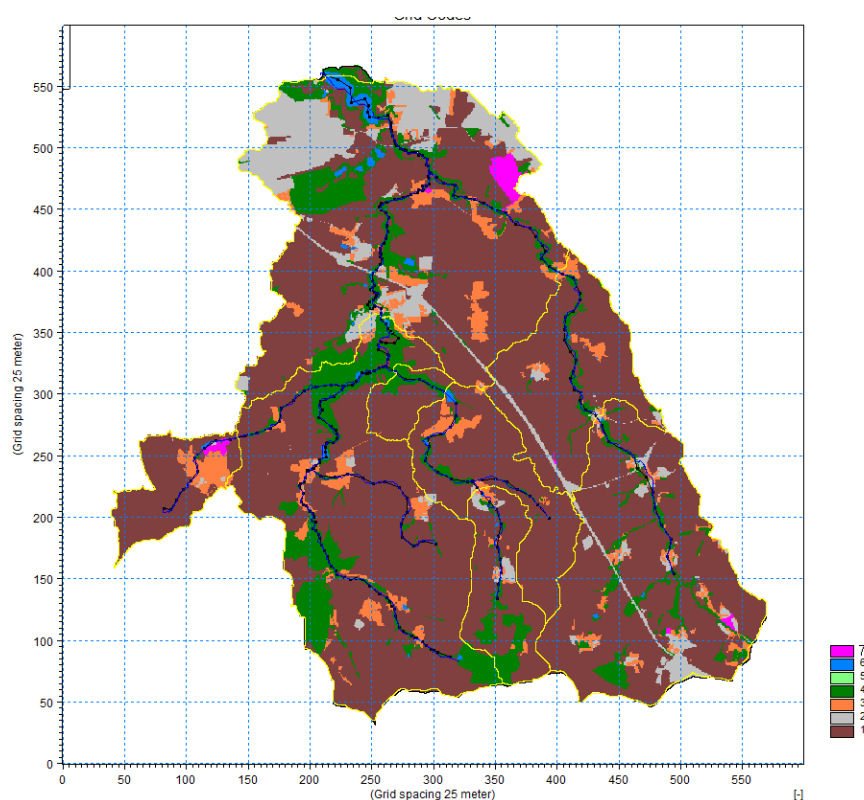
Tab. 6 Kategorie využití území použité v modelu

č.	charakteristika	LAI (m/m)	RD (mm)	Zpevněné plochy (%)	drsnost ($m^{0.33}/s$)	M
1	Pole	4	300	0	25	
2	Nepropustné plochy	1	10	95	33	
3	Domy a zahrady	2.5	50	40	18	
4	Stromy, keře, les	5	400	0	15	
5	Travní porost	4.5	220	0	20	
6	Voda, zamokřené úz.	1	10	0	17	
7	Holá půda, ostatní	1.2	30	20	27	

Parametry Leaf area index (LAI) a Root depth (RD) jsou charakteristiky území (vegetace) ovlivňující evapotranspiraci a tím bilanci vody v půdě. Procento zpevněných ploch (Paved runoff coefficient v modelu MIKE SHE) v této tabulce určuje procento vody na povrchu půdy (v každé jednotlivé výpočetní buňce), které je v modelu odvedeno přímo do koryta toku (vyjadřuje podíl nepropustných ploch v dané kategorii využití území). Manningova hydraulická drsnost (M) určuje rychlost proudění vody po povrchu při plošném odtoku. Území zájmového povodí bylo rozděleno na polygony podle těchto sedmi kategorií. Jako podklad byly využity letecké snímky dostupné na Geoportálu Hl. města Prahy (<http://www.geoportalpraha.cz/>) a to z let 2011, 2012 a 2013 (označení: současný stav, 2013) a z let 1988/89 (označení: varianta, 1988).



Obr. 11 Využití území (vstup do modelu) k roku 2013. Označení: 1+ 5 = pole a travní porosty, 2 = nepropustné plochy, 3 = domy a zahrady, 4= stromy, keře, les, 6 = voda, zamokřené území, 7 = holá půda a ostatní.



Obr. 12 Využití území (vstup do modelu) k roku 1988. Označení: 1+ 5 = pole a travní porosty, 2 = nepropustné plochy, 3 = domy a zahrady, 4= stromy, keře, les, 6 = voda, zamokřené území, 7 = holá půda a ostatní.

Pro jednotlivá dílčí povodí byly vypočteny hodnoty podílu jednotlivých kategorií využití území na celkové ploše pro stav roku 2013 a roku 1988:

Tab. 7 Procenta plochy pro jednotlivé kategorie využití území, stav 2013

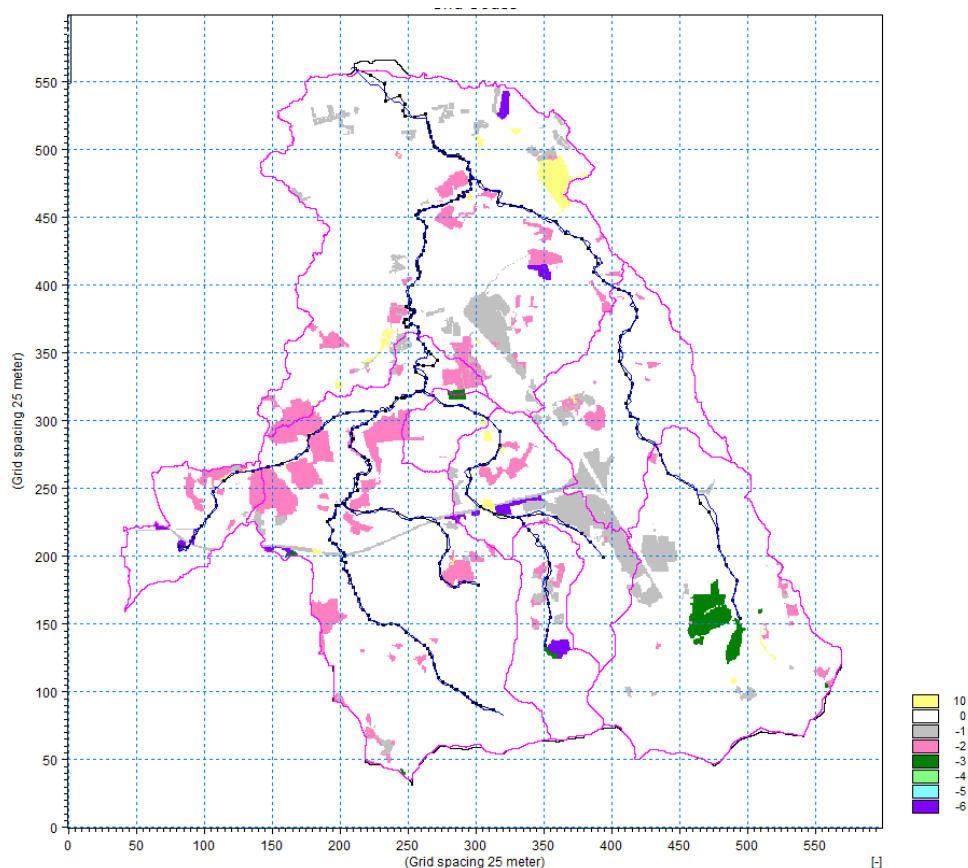
Profil	potok	plocha	1 + 5	2	3	4	6	7
		km ²	Pole, tráva	neprop.	zástavba	stromy	voda	ostatní
Kuří	Pitkovický	17.0	70	9	6	13	0	0
Benice	Pitkovický	8.4	74	13	8	5	0	0
Modletice	Chomutovický	4.5	64	7	8	18	0	3
Dobřejovice	Dobřejovický	6.8	68	16	10	3	1	2
Průhonice	Dobřejovický	1.7	72	0	6	22	0	0
Jesenice	Jesenický	3.7	64	3	30	1	0	2
Pruhonice	Botič	23.5	60	3	18	18	1	0
hráz Hostivař	Botič	29.9	52	20	13	13	2	0
celé povodí		95.4	62	11	13	13	1	1

Tab. 8 Procenta plochy pro jednotlivé kategorie využití území, k roku 1988

Profil	potok	plocha	1+5	2	3	4	6	7
		km ²	pole, tráva	neprop	zástavba	stromy	voda	ostatní
Kuří	Pitkovický	17.0	78	6	5	10	0	0
Benice	Pitkovický	8.4	86	4	4	5	0	0
Modletice	Chomutovický	4.5	72	4	5	18	0	0
Dobřejovice	Dobřejovický	6.8	87	1	7	5	1	0
Průhonice	Dobřejovický	1.7	79	0	0	21	0	0
Jesenice	Jesenický	3.7	79	1	16	1	0	3
Pruhonice	Botič	23.5	74	1	6	19	0	0
hráz Hostivař	Botič	29.9	58	17	9	13	2	1
celé povodí		95.4	72	7	7	13	1	1

Tab. 9 Procenta plochy pro jednotlivé kategorie využití území, rozdíl 1988 - 2013

Profil	potok	plocha	1 + 5	2	3	4	6	7
		km ²	pole, tráva	neprop.	zástavba	stromy	voda	ostatní
Kuří	Pitkovický	17.0	-8	3	1	4	0	0
Benice	Pitkovický	8.4	-11	8	3	0	0	0
Modletice	Chomutovický	4.5	-8	3	3	-1	0	3
Dobřejovice	Dobřejovický	6.8	-20	16	4	-2	0	2
Průhonice	Dobřejovický	1.7	-7	0	5	1	0	0
Jesenice	Jesenický	3.7	-15	3	14	0	0	-1
Průhonice	Botič	23.5	-14	2	12	0	0	0
hráz Hostivař	Botič	29.9	-7	3	5	0	0	-1
celé povodí		95.4	-10	4	6	0	0	0



Obr. 13 Rozdílová mapa využití území (1988-2013) ve výše popsáných kategoriích. Legenda kódů: 10 = ostatní kategorie změněny na ornou půdu; 0 = beze změny; -1 = kategorie 1+5 (orná půda + travní porost) přeměněna na nepropustné plochy; -2 = kat. 1+5 přeměněna na domy + zahrady; -3 = kat. 1+5 přeměněna na stromy, keře, les; -6 = kat. 1+5 přeměněna na holou půdu či ostatní

Je zřejmé, že největší změny proběhly na dílčích povodích Dobřejovického (profil Dobřejovice) a Jesenického (profil Jesenice) potoka a na vlastním povodí Botiče nad Průhonicemi. Ve všech třech případech se 14 až 20% plochy povodí změnilo z pole na zástavbu a nepropustné plochy. V ostatních povodích se změna týká obvykle do 10% území (k profilu Benice 11%). Průměr za celé území je 10% redukce plochy orné půdy a travního porostu ve prospěch nepropustných ploch, domů a zahrad.

4.5 Nasycená zóna

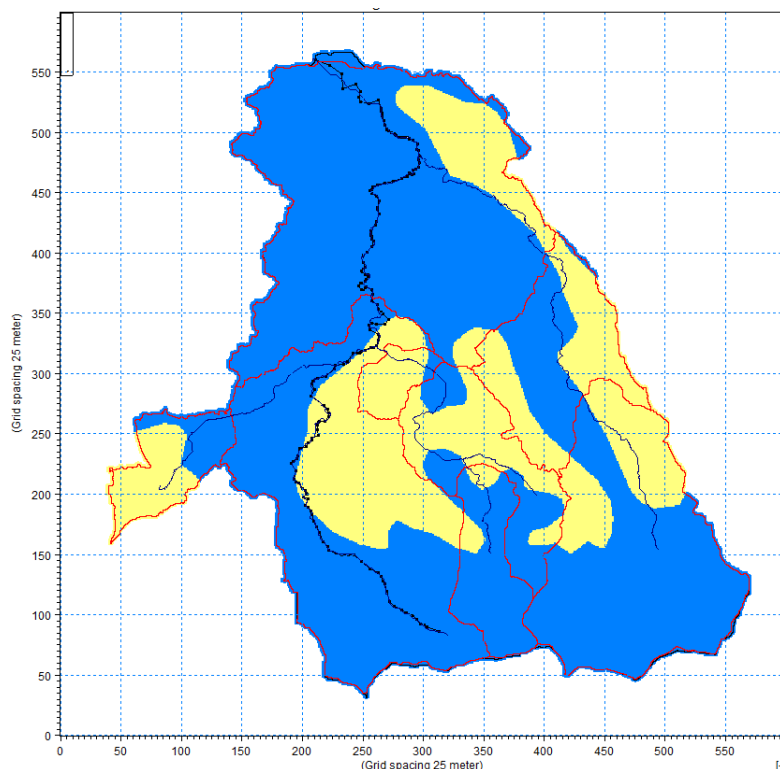
V dané úloze má proudění podzemní vody zanedbatelný význam, proto je tato část modelu zjednodušena. S využitím volně dostupné mapy geologie (<http://geoportal.gov.cz>) byly na zájmovém území rozlišeny dva typy geologie:

- kvarter (hlíny, spraše, písky, štěrky)
- málo propustné horniny (především břidlice, fylity, svory).

Mocnost vrstvy byla zadána jednotně 8 m.

Tab. 10 Hydraulické parametry nasycené zóny použité v modelu

typ	KsH (m/s)	KsV (m/s)	S.y.	S.s.
Propustné	2e-005	2e-005	0.2	0.0001
Méně propustné	1e-005	8e-006	0.2	0.0001

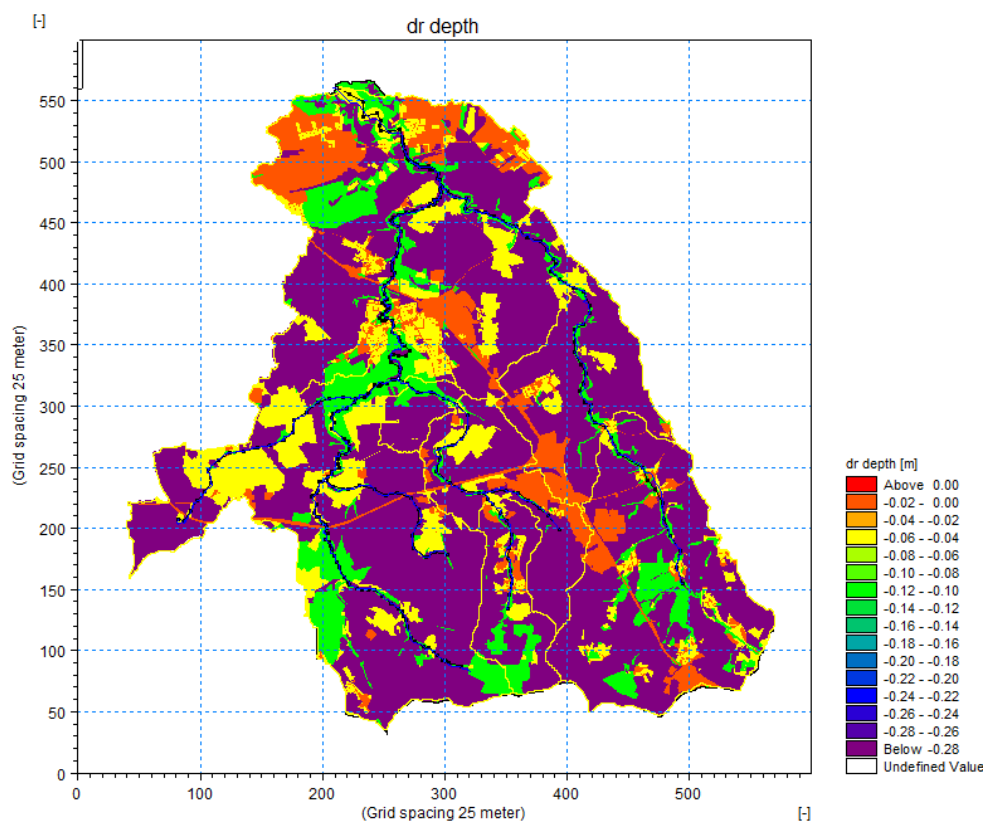


Obr. 14 Rozdělení nasycené zóny: žlutá = kvartér, modrá = málo propustné horniny

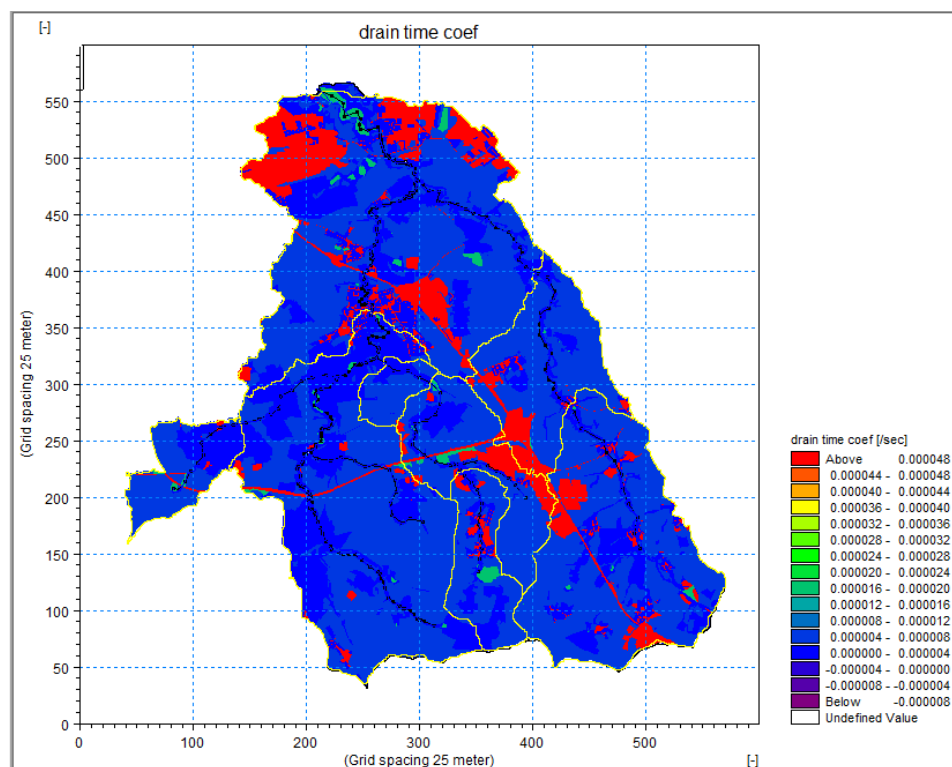
V této části modelu je také definována mělká drenáž. V modelu povodí Botiče bylo využito drenáže jako prostředku pro simulaci mělkého podpovrchového proudění, které má (alespoň potenciálně) významný podíl na odtoku v obvyklých podmínkách ČR. Tyto hodnoty byly zadány distribuovaně na základě mapy využití území:

Tab. 11 Parametry mělké drenáže použité v modelu MIKE SHE

kategorie	popis	Hloubka drenáže (m)	časový koeficient (1/s)
1	Pole, tráva	-0.3	8×10^{-6}
2	Nepropustné plochy	-0.01	5×10^{-5}
3	Domy a zahrady	-0.05	1×10^{-6}
4	Stromy, keře, les	-0.1	1×10^{-6}
5	Travní porost	-0.3	8×10^{-6}
6	Voda, zamokřené úz.	-0.05	2×10^{-5}
7	Holá půda, ostatní	-0.05	2×10^{-5}



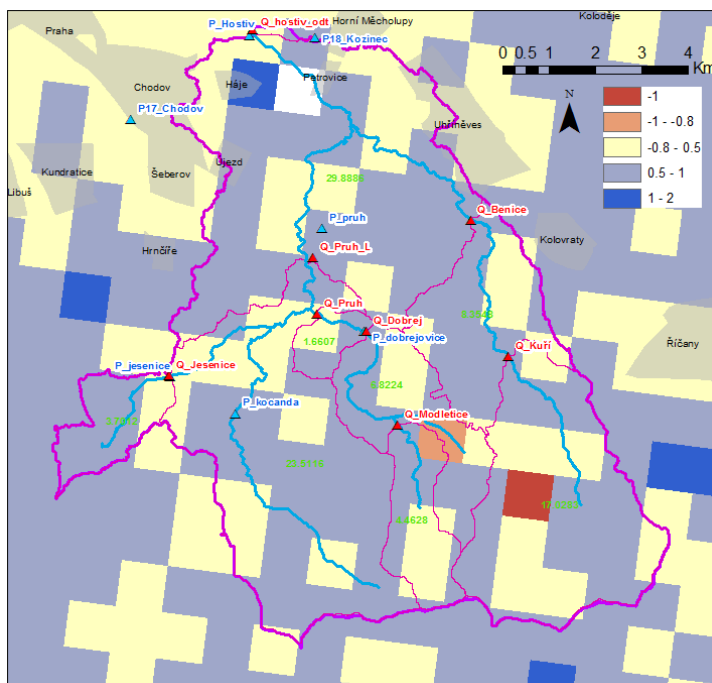
Obr. 15 Hloubka mělké drenáže v modelu (stav 2013), v metrech pod povrchem terénu



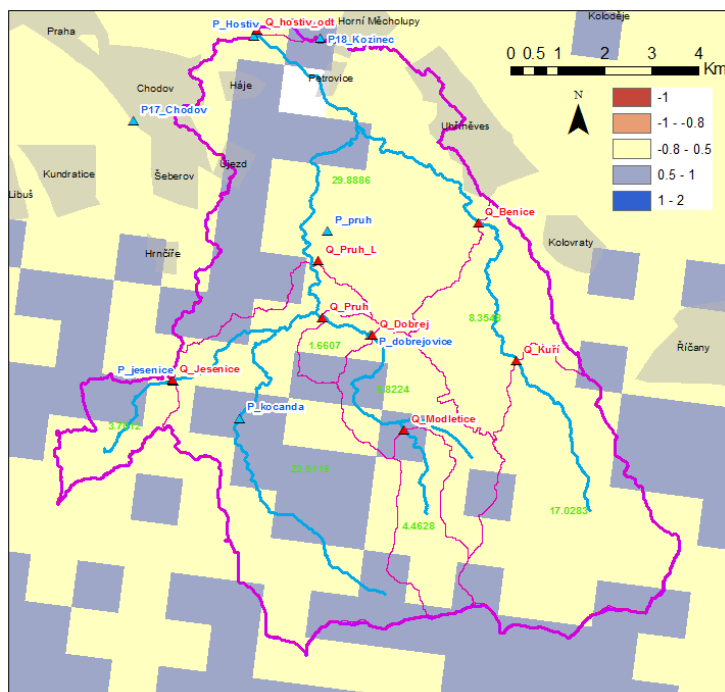
Obr. 16 Mapa časového koeficientu mělké drenáže (stav 2013), v 1/s.

4.6 Počáteční podmínky

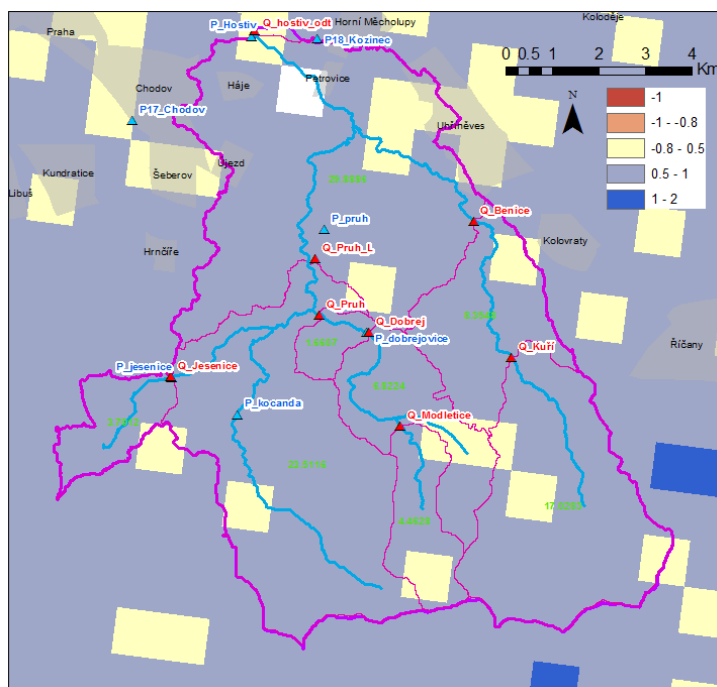
Jako vodítko pro odhad počátečních podmínek byla využita data ČHMÚ – Ukazatel nasycení, který je průběžně počítán v denním kroku za pomoci metody CN křivek v prostorovém kroku 1 x 1 km. Gridové mapy byly získány pro 1.5.2013, 29.5.2013 a 1.6.2013.



Obr. 17 Ukazatel nasycení (ČHMÚ) pro 1.5.2013



Obr. 18 Ukazatel nasycení (ČHMÚ) pro 29.5.2013

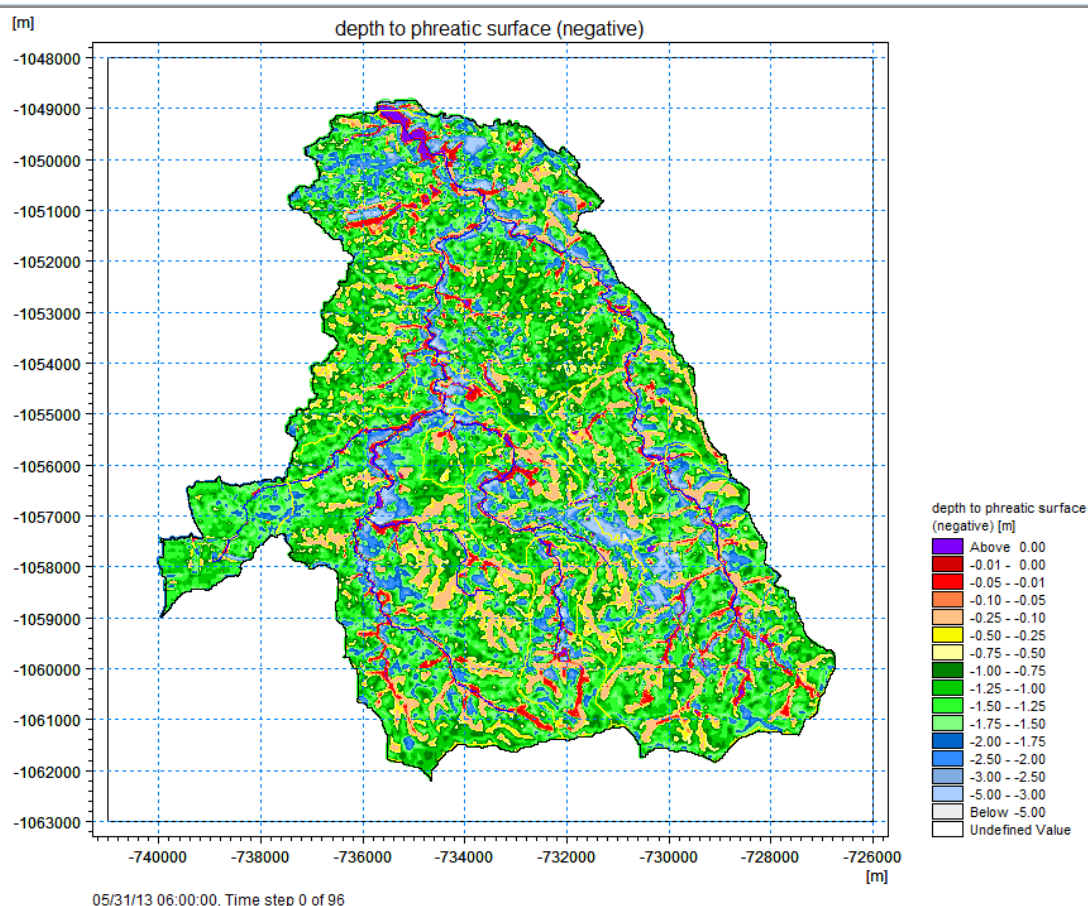


Obr. 19 Ukazatel nasycení (ČHMÚ) pro 1.6.2013

Je zřejmé, že na většině plochy povodí jsou podle ukazatele nasycení ČHMÚ před nástupem příčné srážky (29.5.2013) průměrné (žlutá) až mírně vlhké (světle modrá) podmínky, zatímco 1.6.2013 už jde o vlhké až nasycené (modrá) podmínky.

Pro epizodní simulace modelem MIKE SHE je třeba stanovit v tomto případě především dva typy počátečních podmínek: pro nenasycenou zónu (např. obsah vody podle hloubky v profilu) a pro nasycenou zónu (hloubku hladiny podzemní vody). Pro simulace příčné epizody byly počáteční podmínky určeny pomocí výsledků předchozích simulací (tzv. hotstart). Pomocný model pro stanovení počátečních podmínek simuloval na základě dodaných časových řad období 1.5.-31.5.2013 v denním kroku; pro hotstart vlastní epizody byly využity simulované hodnoty pro 31.5.2013. Pro tento pomocný model byly odhadnuty počáteční podmínky (pro 1.5.2013) hloubkou hladiny podzemní vody v rozsahu 1.35 -1.85 m pod povrchem. Pro podmínky roku 1988 byly počáteční podmínky stanoveny stejným způsobem, pouze v pomocném modelu (tj. pro simulaci období 1.5.-31.5.) byly upraveny parametry tak, aby odpovídaly mapě parametrů ve variantní simulaci (1988). Tímto způsobem je změna ve využití území zohledněna i v počátečních podmínkách.

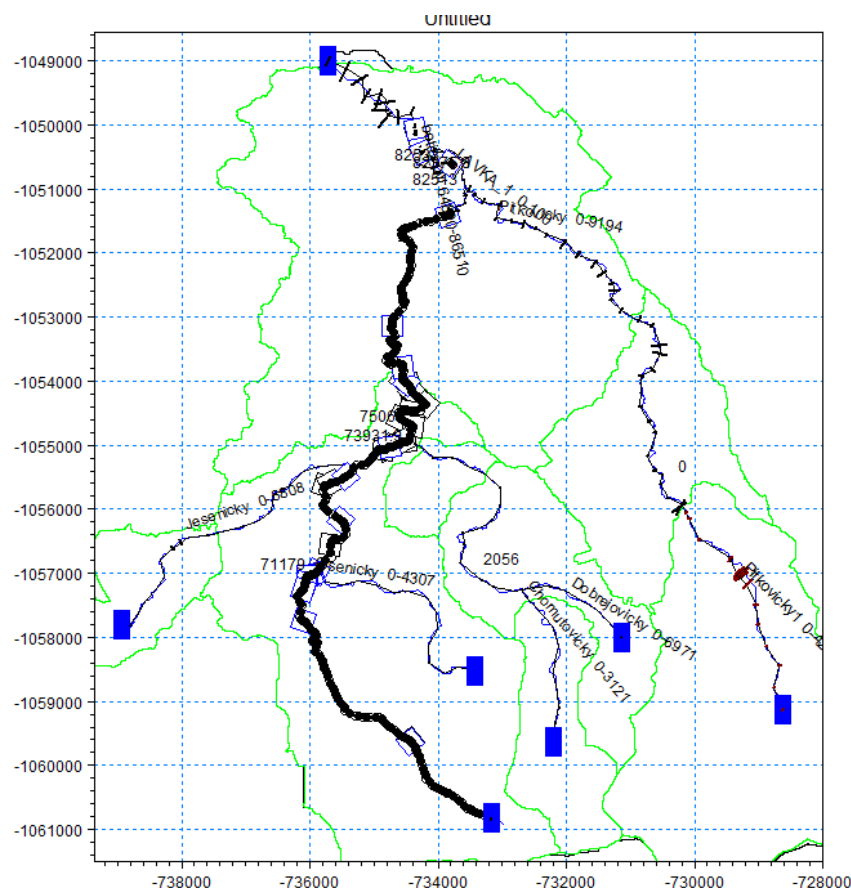
Za období května 2013 byly v zájmové m území pozorovány nadprůměrné srážkové úhrny vzhledem k normálu. Výše popsání počáteční podmínky (před vlastní příčinou srážkovou epizodou), zadané v modelu, lze hodnotit jako velmi vlhké.



Obr. 20 Simulovaná mapa hloubky hladiny podzemní vody na počátku simulace příčinné epizody (tedy 31.5.2013) pro podmínky roku 2013. Tuto mapu je nutno interpretovat jako ukazatel vysoké nasycenosti povodí před srážkou, nikoliv jako exaktní hloubky hladiny podzemní vody v jednotlivých buňkách vzhledem k velmi zjednodušené schematizaci nasycené zóny modelu.

4.7 Vodní toky

Pro simulaci proudění v korytech nejvýznamnějších vodních toků v povodí byl využit hydrodynamický model MIKE 11. Trasy toků byly vedeny pomocí delineaace nejnižšími místy digitálního modelu terénu. K určení tvaru koryt byly využity příčné profily z Generelu odvodnění Botiče (2005, 2006), ze kterého byly převzaty (a modifikovány) také objekty (především propustky a mosty) na tocích. Chybějící části toků byly schematizovány jednoduchým lichoběžníkovým korytem. Na Dobřejovickém, Pitkovickém a Jesenickém potoce se nacházejí významnější akumulární prostory; ty byly schematizovány pomocí funkce Additional storage (čára akumulovaných objemů), respektive zahrnutím širšího příčného profilu do modelu (údolní profily).



Obr. 21 Schematizované vodní toky v hydrodynamickém modelu. Modrý obdélník = okrajové podmínky, černé úsečky = příčné profily, černé čáry = trasy toků modelu M11, zeleně = hranice dílčích povodí.

Hydrodynamický korytový model je propojen s hydrologickou částí MIKE SHE třemi způsoby

- Prouděním po povrchu (povrchový odtok je odveden do koryta)
- Prouděním podzemní vody (proudění boky a dnem koryta v závislosti na poloze hladiny v toku a hladiny podzemní vody v okolních výpočetních buňkách)
- Prouděním v mělké drenáži je svedeno do koryta v určeném místě.

V tomto modelu není detailně řešeno zatápění povrchu výpočetních buněk vodou vyběženou z koryta.

5 Kalibrace a validace modelu

Kalibrace modelu pro podmínky roku 2013 byla provedena na vybraných dílčích povodích tak, aby model byl schopen simulovat měřený průtok s dostatečně malou odchylkou, především v oblasti kulminace. Pro kalibraci byla vybrána dílčí povodí: Modletického potoka, Jesenického potoka, Dobřejovického potoka (limnigraf ČHMÚ) a dílčí povodí Botiče (Průhonice, limnigraf Lesů hl. m. P.). Při kalibraci byly upraveny pro jednotlivé kategorie tyto parametry:

- Hydraulická vodivost v nasycené zóně
- Hloubka mělké drenáže
- Rychlostní koeficient mělké drenáže

Úspěšnost kalibrace byla ověřena na dvou dalších dílčích povodích: Kuří a Benice.

Kalibrovaným modelem byl dále simulován i hydrogram na vstupu do nádrže Hostivař, kde měření není k dispozici. Shoda pozorovaného a simulovaného průtoku je patrná na obrázcích v následující podkapitole (obr. 22-27).

Z porovnání je zřejmé:

- Model dostatečně vystihuje pozorovaný průtok v profilech Modletice a Průhonice (Botič).
- V profilu Průhonice (ČHMÚ) je simulován poněkud nižší průtok v kulminační části hydrogramu, celkové vystižení je však ještě dostatečné
- V profilu Jesenice je shoda horší, zde však tvar hydrogramu zřejmě ovlivňuje transformace v nádrži nad limnigrafem a odtok z intravilánu obce.
- Validace v profilu Kuří ukazuje dobrou shodu modelu s pozorovaným průtokem.
- V části hydrogramu (nástupní větev do 20 m³/s) v profilu Benice je dobrá shoda simulovaného a pozorovaného průtoku. Předpokládáme, že pro vyšší průtoky jsou pozorované hodnoty ovlivněny rozlivem a obtékáním profilu měření.
- Simulovaný hydrogram přítoku do nádrže Hostivař má kulminační průtok asi 73 m³/s dne 2.6.2013 v 10:45.

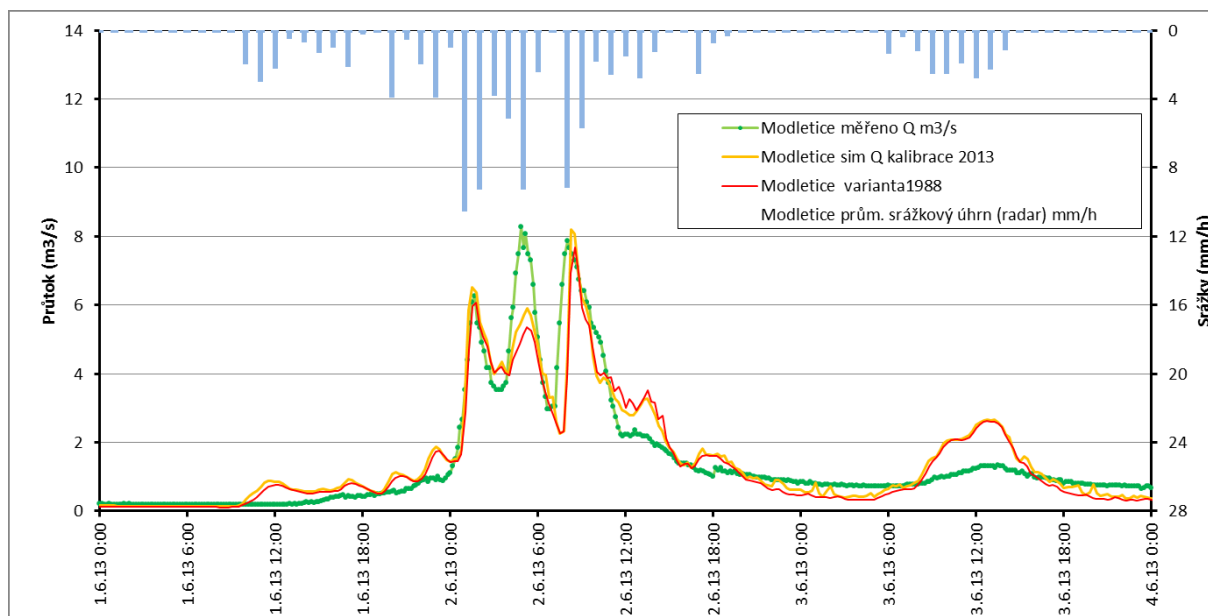
6 Výsledky simulací – srovnání pro podmínky užití území roku 2013 a roku 1988

Dále byla na kalibrovaném modelu provedena simulace variantní, kdy bylo upraveno rozdělení parametrů v modelu tak, aby odpovídalo využití území v roce 1988/89 (varianta 1988). Upraveny byly mapy těchto parametrů:

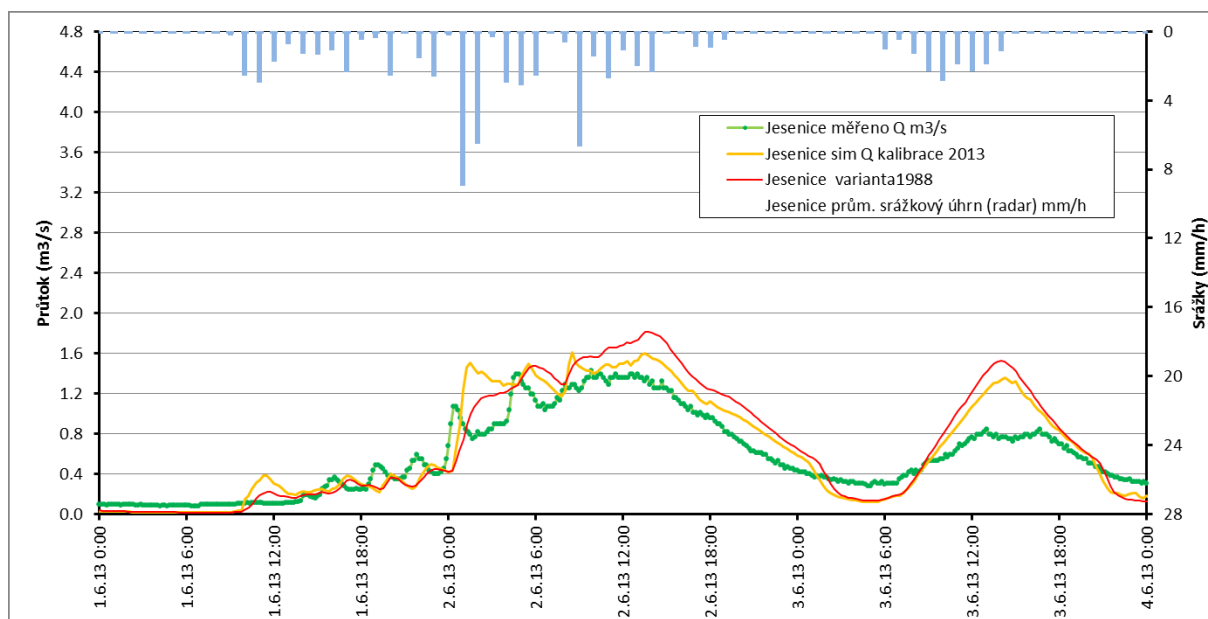
- Využití území (parametry vegetace)
- Podíly zpevněných ploch
- Manningovy drsnosti pro povrchový odtok
- Půdních hydraulických parametrů
- Parametrů mělké drenáže.

Plošné rozdělení všech parametrů bylo upraveno v návaznosti na změny v plošném rozdělení kategorií využití území (k roku 1988, obr.12). Hodnoty parametrů pro jednotlivé kategorie využití území nebyly měněny. Změny v počátečních podmínkách byly zohledněny tak, že pomocný model pro období 1.5.2013-1.6.2013 v denním kroku byl spuštěn s upraveným rozdělením parametrů, odpovídajícím podmínkám roku 1988 a jako počáteční podmínky (hotstart) pro epizodní simulaci byly využity výsledky tohoto upraveného modelu (podrobně popsáno výše).

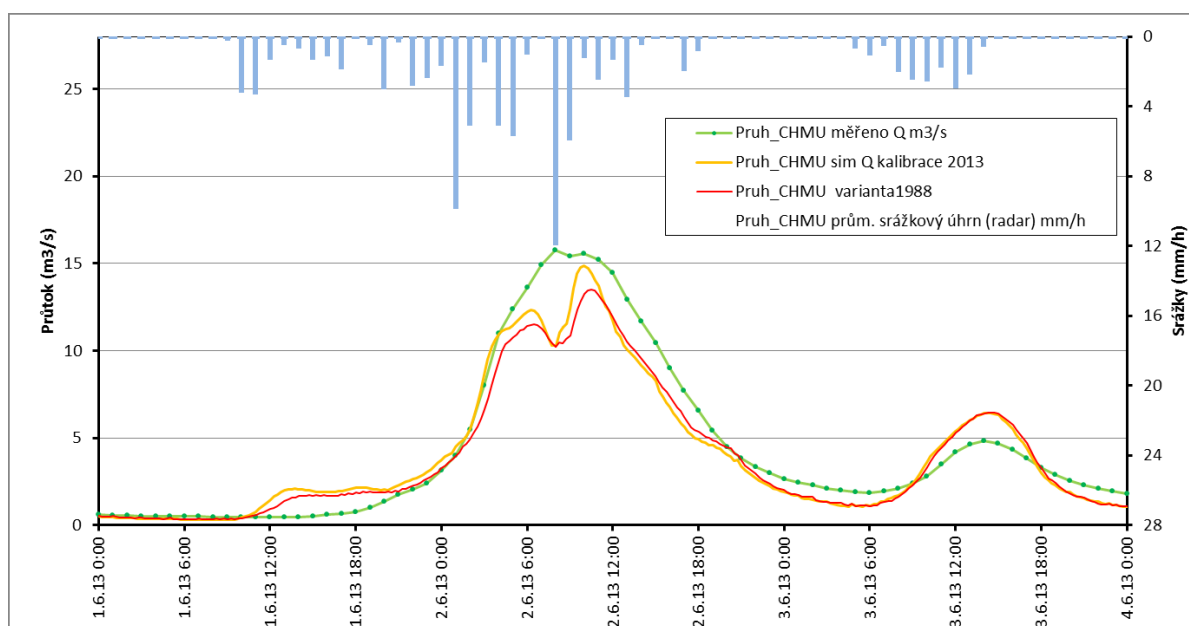
Tímto způsobem jsme se snažili zohlednit maximum předpokládaných dopadů změněného využití území na průběh odtoku ve vybrané epizodě – jak z bilančního hlediska (změna počátečních podmínek), tak přímo během epizody (změny hydraulické drsnosti povrchu a parametrů mělké drenáže). Předpokládáme, že v rámci možností, daných vybraným modelovacím prostředkem lze takto porovnat vliv změny využití území na odtokový hydrogram v daném povodí za jinak stejných podmínek. Porovnání hydrogramů simulovaných pro podmínky stavu území v roce 2013 a 1988 je na následujících obrázcích (obr. 22-28).



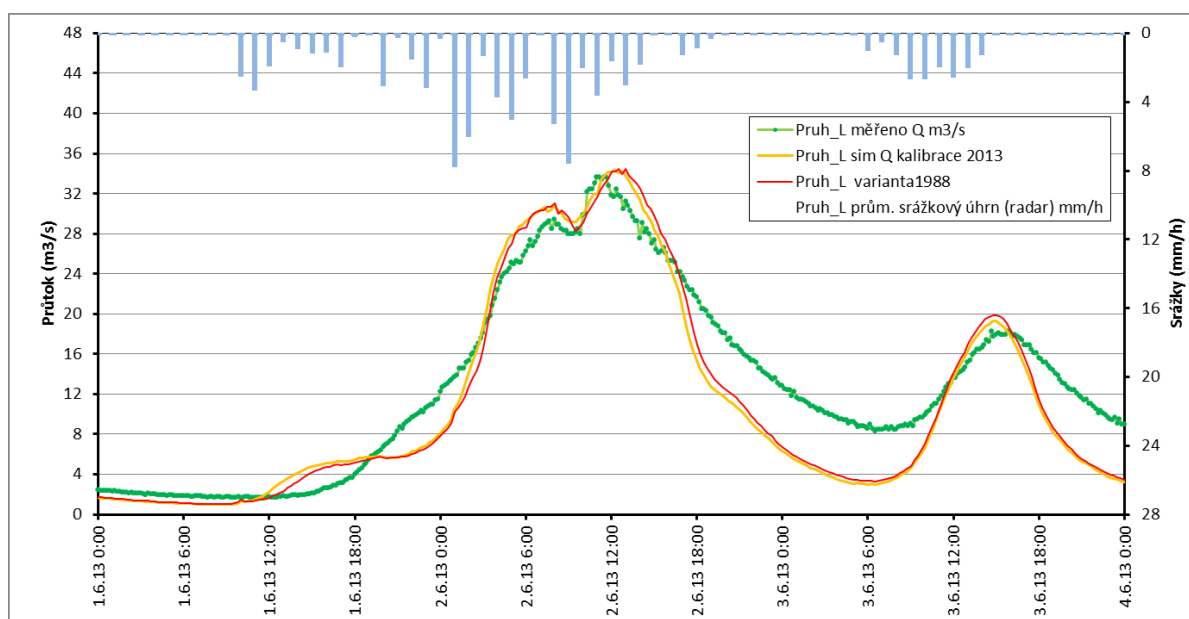
Obr. 22 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Stanice Modletice.



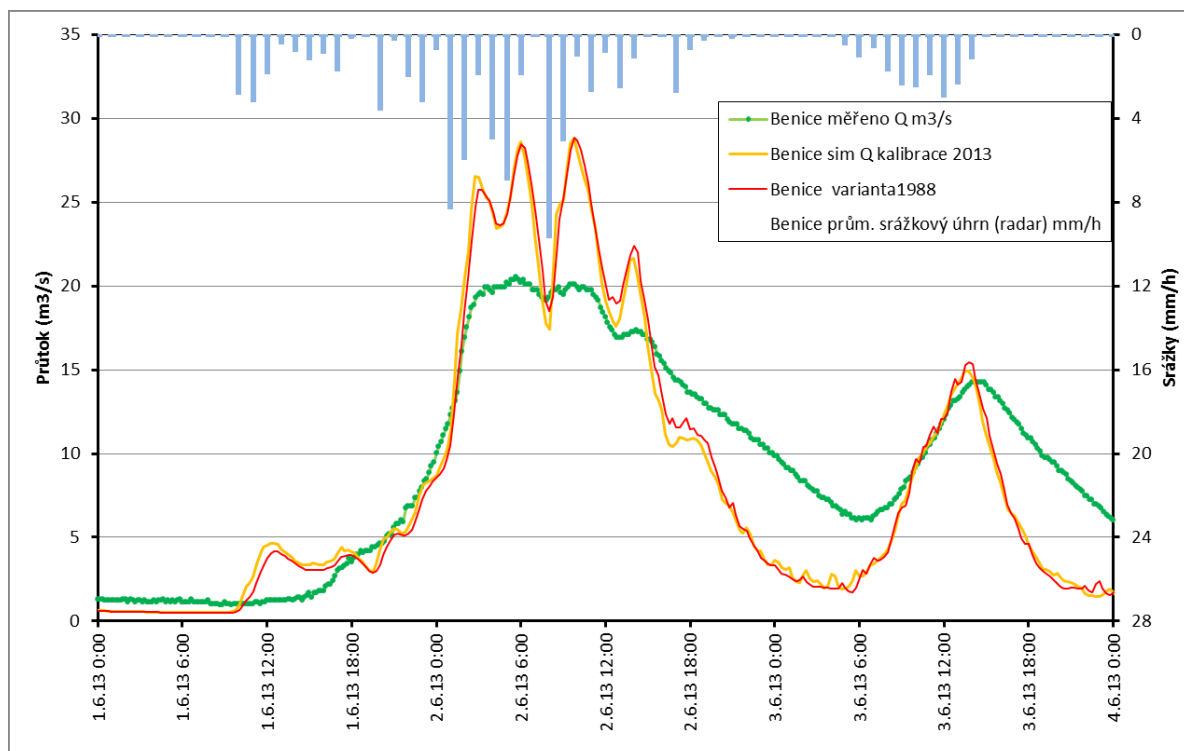
Obr. 23 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Stanice Jesenice.



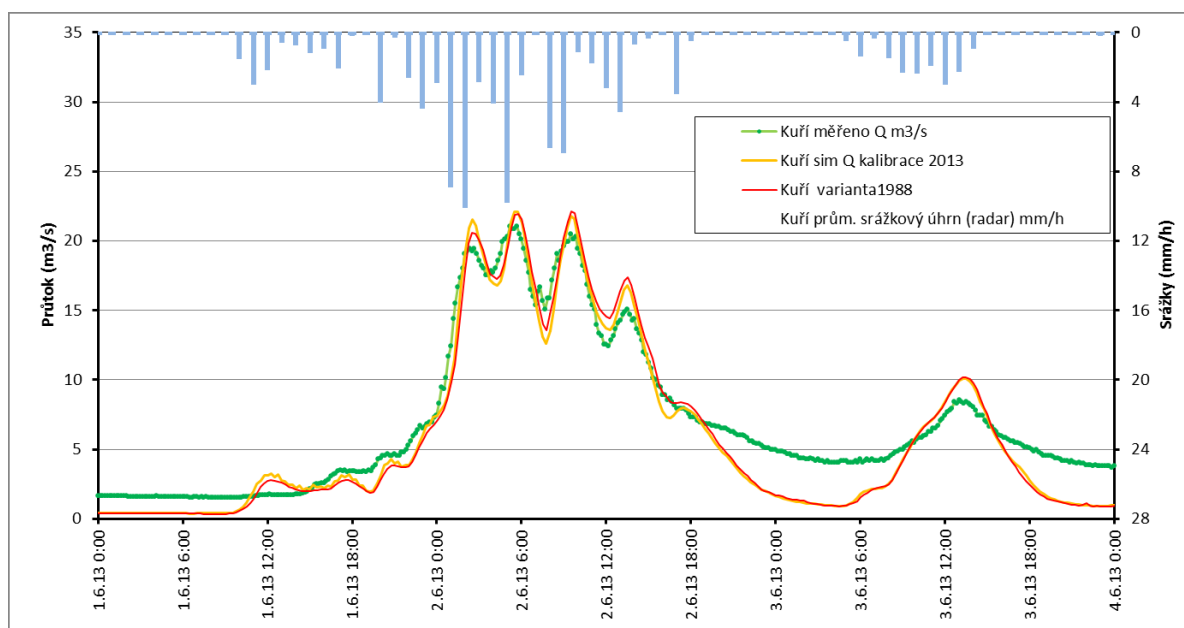
Obr. 24 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Stanice ČHMÚ Průhonice na Dobřejovickém potoce.



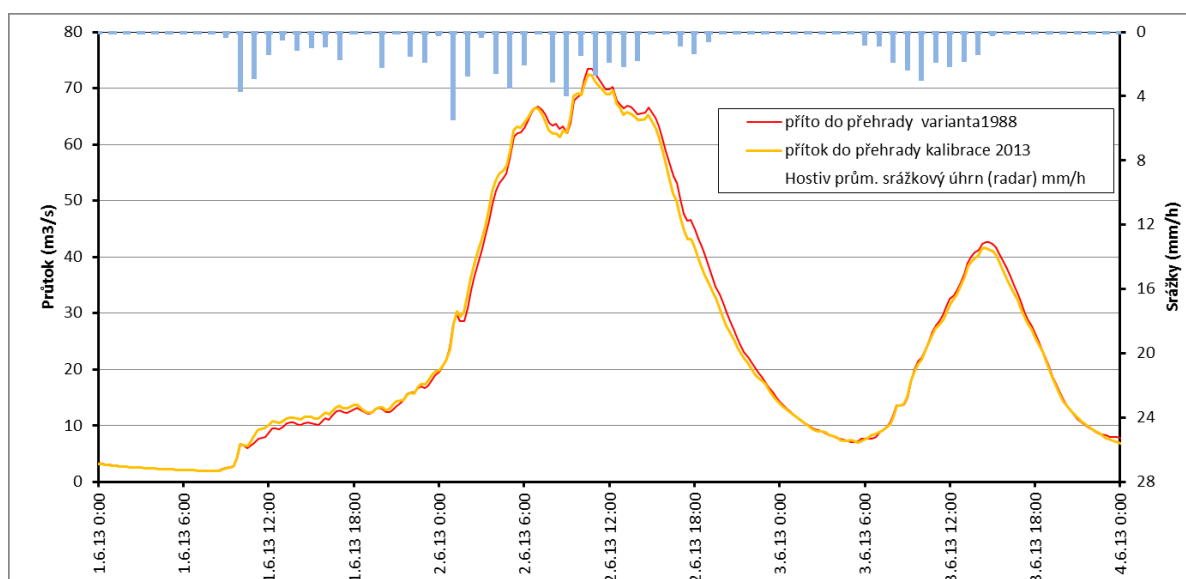
Obr. 25 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Stanice Průhonice na Botiči.



Obr. 26 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Stanice Benice.



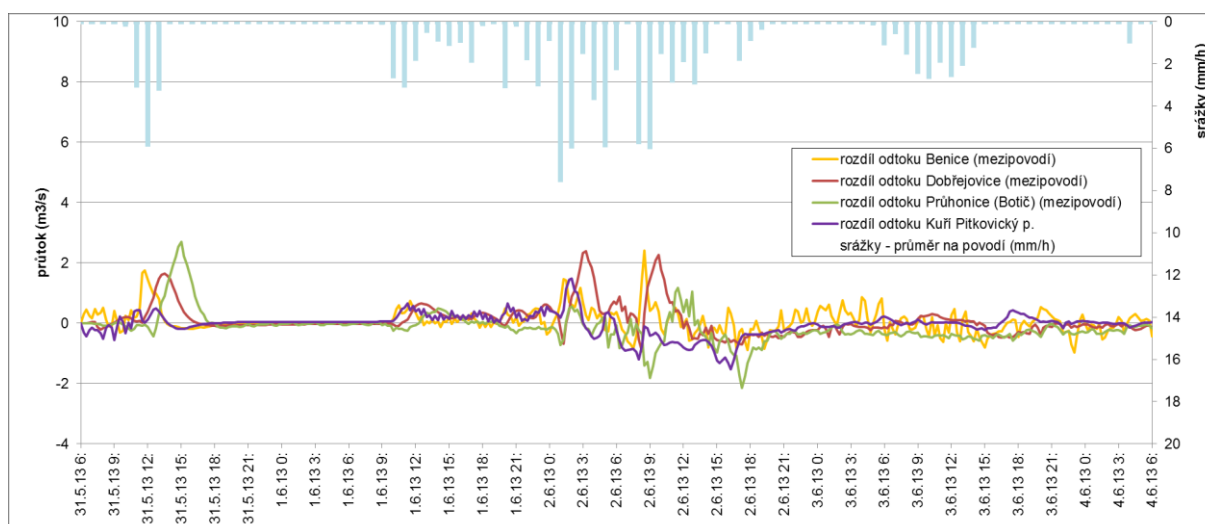
Obr. 27 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Stanice Kuří.

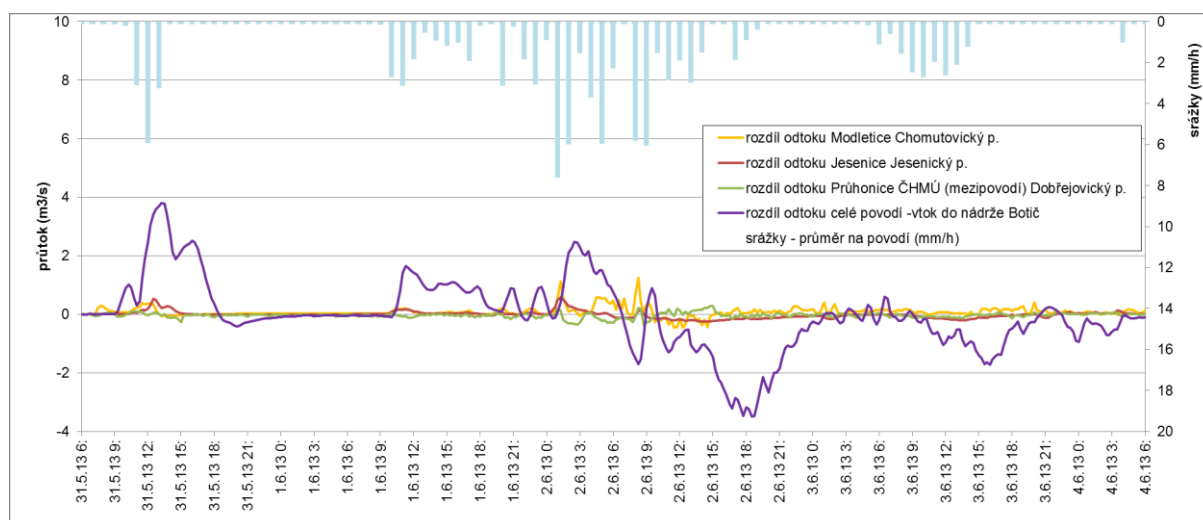


Obr. 28 Simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 15 min průměry. Přítok do přehrady Hostivař, odpovídá přibližně profilu Petrovice.

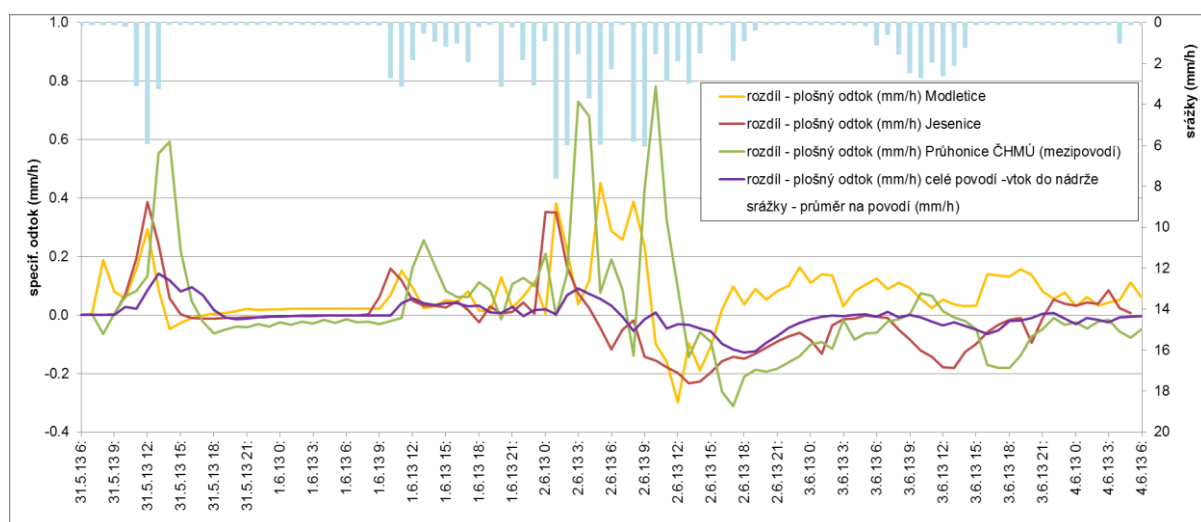
6.1 Vyhodnocení rozdílů

Z porovnání simulovaných hydrogramů pro stav roku 2013 a variantu 1988 je zřejmé, že simulované rozdíly v průtoku jsou zřetelné jen u některých dílčích povodí s výraznější změnou využití území – v profilu Dobřejovice dosahuje méně než $2 \text{ m}^3/\text{s}$, v profilech Průhonice (Botič) a Benice ve špičkách hydrogramů nepřesahují $1 \text{ m}^3/\text{s}$, u ostatních profilů jsou rozdíly ještě menší. Je také zřejmé, že ve většině případů se zvýšený průtok ve špičkách vyrovnává opačným rozdílem na sestupné větvi hydrogramu.





Obr. 29 Rozdíly v průtocích (stav 2013 - stav 1988) pro vybraná dílčí povodí, simulované 15 min průměry.



Obr. 30 Rozdíly ve specifických odtocích (stav 2013 - stav 1988) pro vybraná dílčí povodí, simulované 1hod průměry.

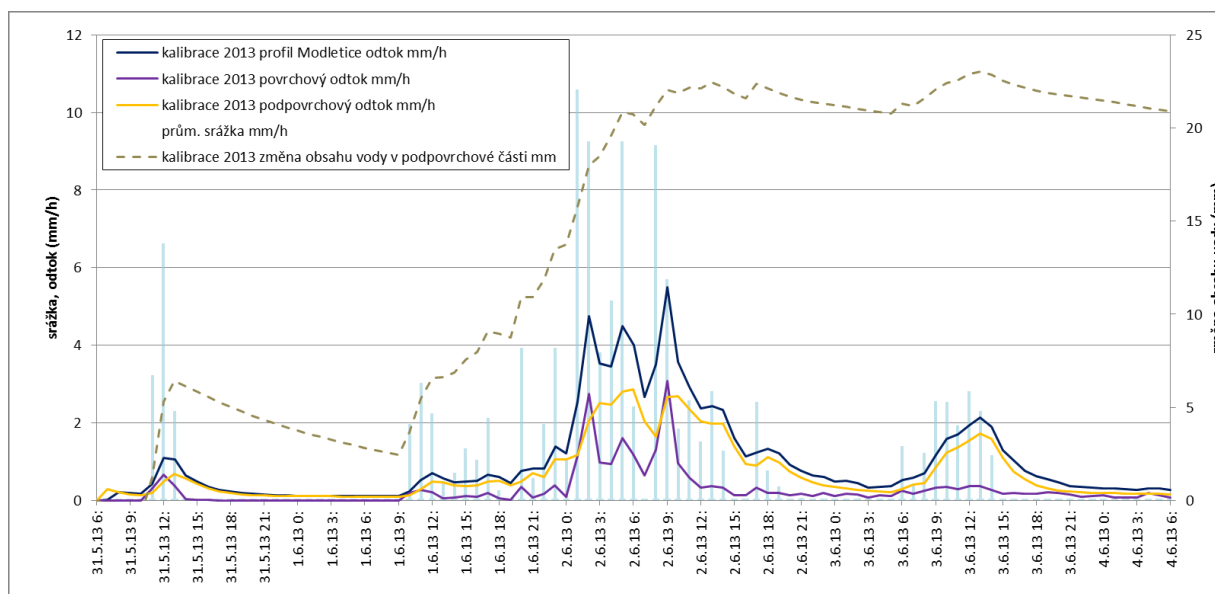
Tab. 12 Porovnání odtoku a kulminačního průtoku (31.5.2013 6:00 -4.6.2013 6:00). Výsledky simulací na kalibrovaném modelu (stav území 2013) a varianty stavu území 1988 pro vybraná podpovodí.

	Kulminační průtok (m³/s)		Odtoková výška z mezipovodí (mm)	
	stav 2013	stav 1988	stav 2013	stav 1988
Modletice	8.2	7.7	97	91
Dobřejovice	14	12		
Průhonice (ČHMÚ)	15	14	85	82
Jesenice	1.6	1.8	50	51
Průhonice (Botič)	34	34	76	78
Kuří	22	22	97	98
Benice	29	29	84	82
průtok do n. Hostivař	73	73		

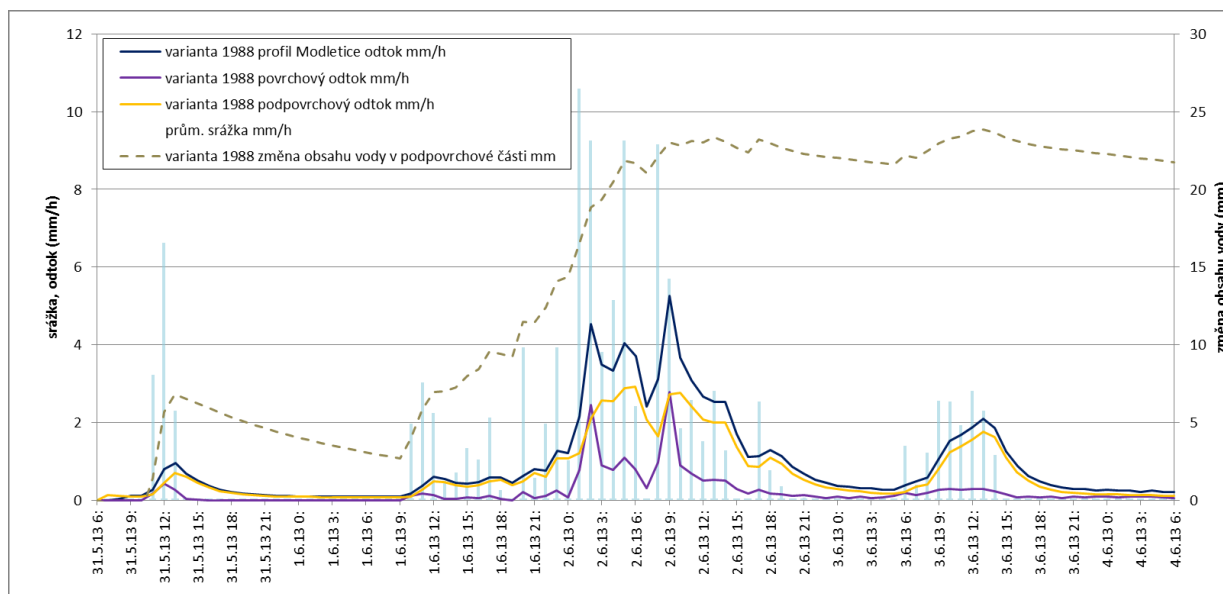
Tab. 13 Porovnání vybraných složek hydrologické bilance během epizody (31.5.2013 6:00 - 4.6.2013 6:00). Výsledky simulací na kalibrovaném modelu (stav území 2013) a varianty stavu území 1988 pro vybraná podpovodí.

		povrchový odtok (mm)	podpovrchový odtok (mm)	změna zásoby vody v povodí (mm)	odtok korytem (mm)
Jesenice	stav 2013	17	34	35	50
	stav 1988	9	43	36	52
Modletice	stav 2013	27	68	21	97
	stav 1988	22	67	22	91
Průhonice ČHMÚ	stav 2013	29	56	20	85
	stav 1988	17	65	24	83
Přítok Hostivař	stav 2013	23	55	20	78
	stav 1988	18	60	21	78

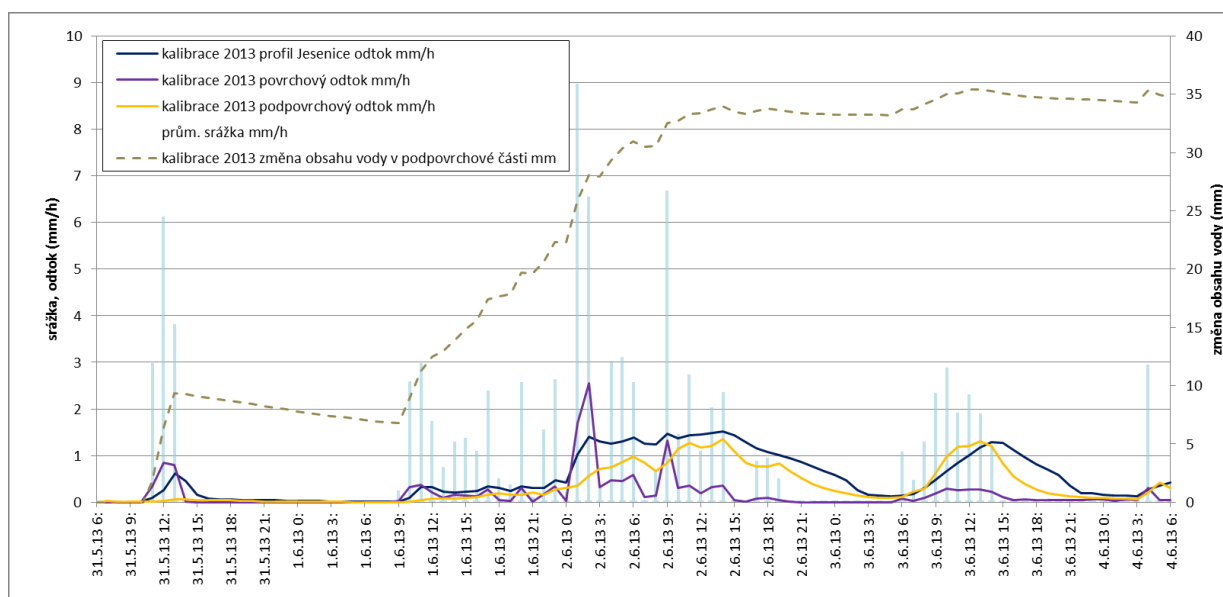
Je zřejmé, že pouze u povodí Modletice došlo k zaznamatelnému zvýšení celkového odtoku (pro stav r. 2013 vzhledem k 1988) asi o 7%, zatímco v ostatních případech jsou rozdíly v intervalu -2 až +3%, tedy velmi malé. Pro celé povodí činí relativní podíl plošného povrchového odtoku na celkovém asi 23% (1988) resp. 29% (2013); rozdíl jde na úkor rychlého podpovrchového odtoku.



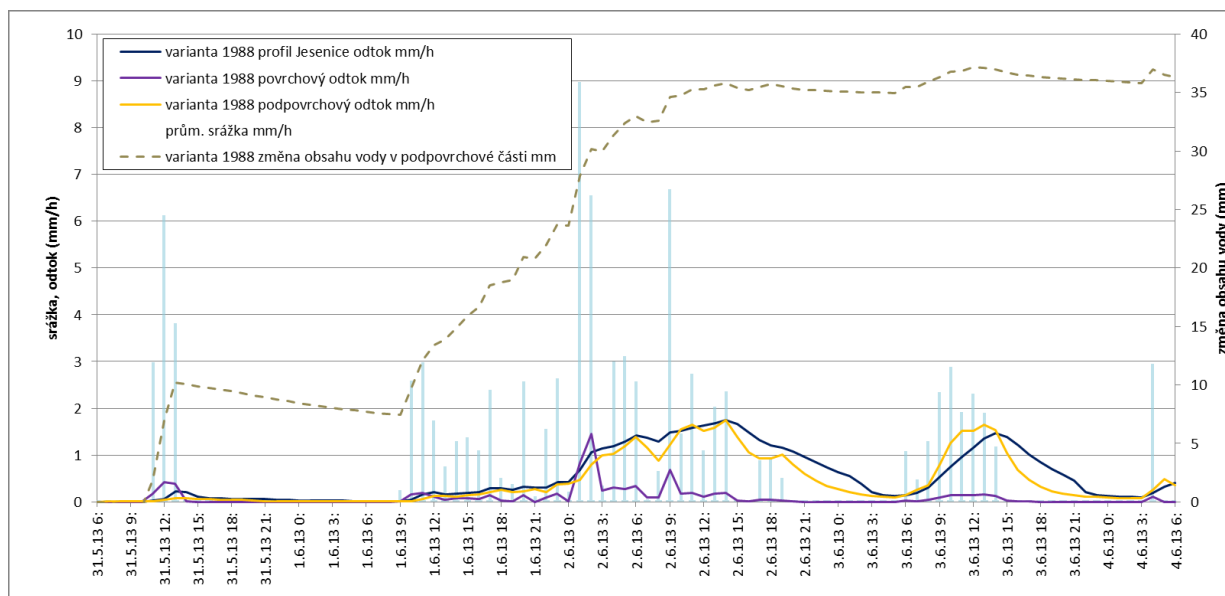
Obr. 31 Průběh specifických hodnot jednotlivých složek odtoku pro dílčí povodí k profilu Modletice, a změny obsahu vody v půdě, kalibrovaný model (stav území 2013), epizoda 6/2013.



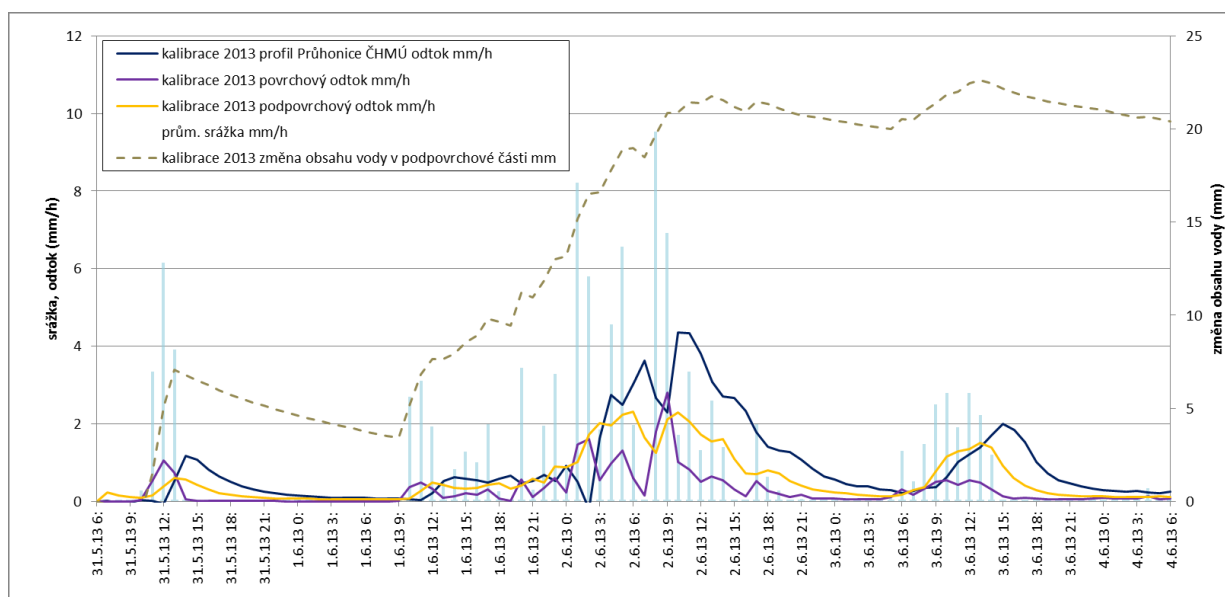
Obr. 32 Průběh specifických hodnot jednotlivých složek odtoku pro dílčí povodí k profilu Modletice, a změny obsahu vody v půdě, upravený model na stav území 1988, epizoda 6/2013.



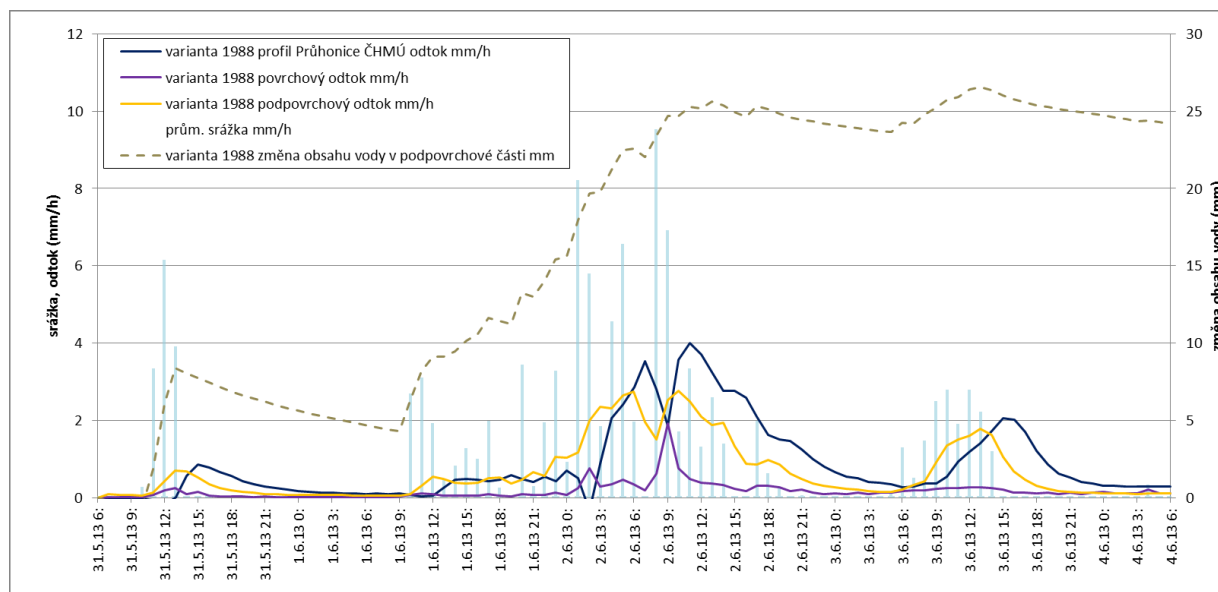
Obr. 33 Průběh specifických hodnot jednotlivých složek odtoku pro dílčí povodí k profilu Jesenice, a změny obsahu vody v půdě, kalibrováný model (stav území 2013), epizoda 6/2013.



Obr. 34 Průběh specifických hodnot jednotlivých složek odtoku pro dílčí povodí k profilu Jesenice, a změny obsahu vody v půdě, upravený model na stav území 1988, epizoda 6/2013.



Obr. 35 Průběh specifických hodnot jednotlivých složek odtoku pro dílčí povodí k profilu Průhonice (ČHMÚ) na Dobřejovickém potoce, a změny obsahu vody v půdě, kalibrovaný model (stav území 2013), epizoda 6/2013.



Obr. 36 Průběh specifických hodnot jednotlivých složek odtoku pro dílčí povodí k profilu Průhonice (ČHMÚ) na Dobřejovickém potoce, a změny obsahu vody v půdě, upravený model na stav území 1988, epizoda 6/2013.

7 Vyhodnocení dopadu využití území při méně nasycených počátečních podmínkách

Vzhledem k tomu, že pro zkoumanou epizodu 6/2013 byly zjištěny velmi vlhké podmínky (blízko nasycení) na počátku epizody, byly pro vyhodnocení dopadu změny využití území na odtok při srážkoodtokové epizodě za běžných (tj. nikoliv blízko nasycení) počátečních podmínek provedeny následující tři kroky:

- Validace modelu, kalibrovaného pro epizodu 6/2013 na další srážkoodtokové epizodě. Jako validační byla vybrána epizoda 9. - 12.7.2011 ze dvou důvodů: běžné až suché podmínky na počátku epizody, zároveň srovnatelné rozložení využití území s rokem 2013. Cílem tohoto kroku je ověřit, zda je model schopen dostatečně věrně simulovat odtok z povodí horního Botiče i pro méně nasycené podmínky.
- Porovnání odezvy modelu (tj. simulované hydrogramy průtoku ve vybraných profilech) pro podmínky roku 2013 (kalibrovaný model) a variantu využití území (stav 1988), a to s využitím dat epizody 7/2011
- Porovnání odezvy modelu pomocí upravených počátečních podmínek pro epizodu 6/2013.

Tímto způsobem se získá porovnání dopadu změny využití území při reálné epizodě a běžných počátečních podmínkách. Epizoda 7/2011 je však z hlediska povodňových průtoků na horním Botiči vcelku nevýznamná. Proto je využita i možnost simulovat dopad změny využití území při významné povodňové události 6/2013, avšak s využitím změněných počátečních podmínek v modelu.

7.1 Validace modelu s využitím srážkoodtokové epizody 7/2011

Pro ověření, zda je model schopen dostatečně věrně simulovat odtok z povodí horního Botiče i pro méně nasycené podmínky byla vybrána epizoda 9. - 12.7.2011 a získány datové vstupy v obdobném rozsahu jako pro epizodu 6/2013. Pro simulace byl využit výše popsáný model, kalibrovaný pro epizodu 6/2013, beze změn kalibračních parametrů.

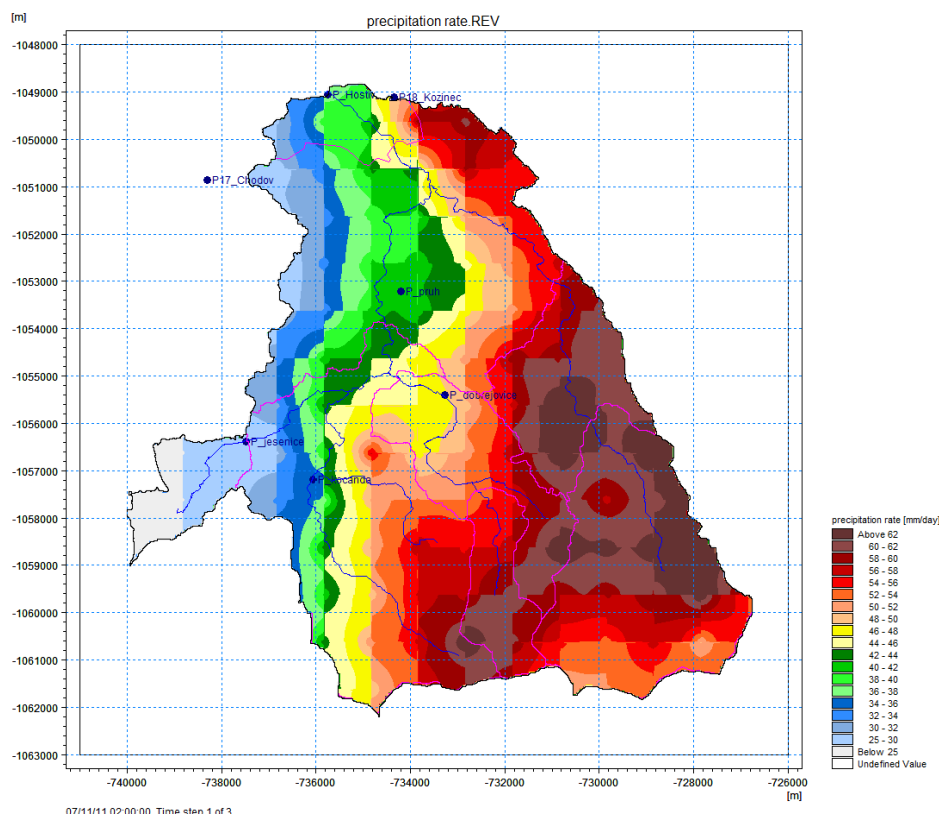
Pro ustavení vlhkostních podmínek na počátku srážkoodtokové epizody (dne 9.7.2011) byly využity časové řady srážek a průtoků dle následující tabulky:

Tab. 14 Časové řady srážek použité pro stanovení počátečních podmínek epizody 7/2011

Stanice	označení	provozovatel	časový krok	poznámka
Libuš	P1PLIB01	ČHMÚ	1 den	1.5.-9.7.11
Průhonice	P1PRUH01	ČHMÚ	1 den	1.5.-9.7.11
Kbely	P1PKBE01	ČHMÚ	1 hod	1.5.-9.7.11
Karlov	P1PKAR01	ČHMÚ	1 hod	1.5.-9.7.11
Dobřejovice		Lesy hl. m. Prahy	10 min převedeno na denní	7.5.-31.7.11
Jesenice		Lesy hl. m. Prahy	10 min převedeno na denní	7.5.-31.7.11
Kocanda		Lesy hl. m. Prahy	10 min převedeno na denní	7.5.-31.7.11

Z časových řad byla vynechána období s chybějícími či chybnými daty (stanice Dobřejovice a Kocanda v červnu 2011) a jako vstup pro model byla využita časová řada průměrných denních úhrnů (průměr z těchto stanic). Dále byla využita řada denních úhrnů potenciální evapotranspirace vypočtená ČHMÚ (průměr pro stanice Libuš, Kbely a Karlov). Pro porovnání simulovaných průtoků byly použity průměrné denní průtoky ve stanicích Lesů hl. m. Prahy a ČHMÚ. S využitím těchto datových vstupů byla provedena simulace pro období 1.6.2011-9.7.2011, jejíž výsledky slouží jako počáteční podmínky pro simulaci vlastní epizody 7/2011.

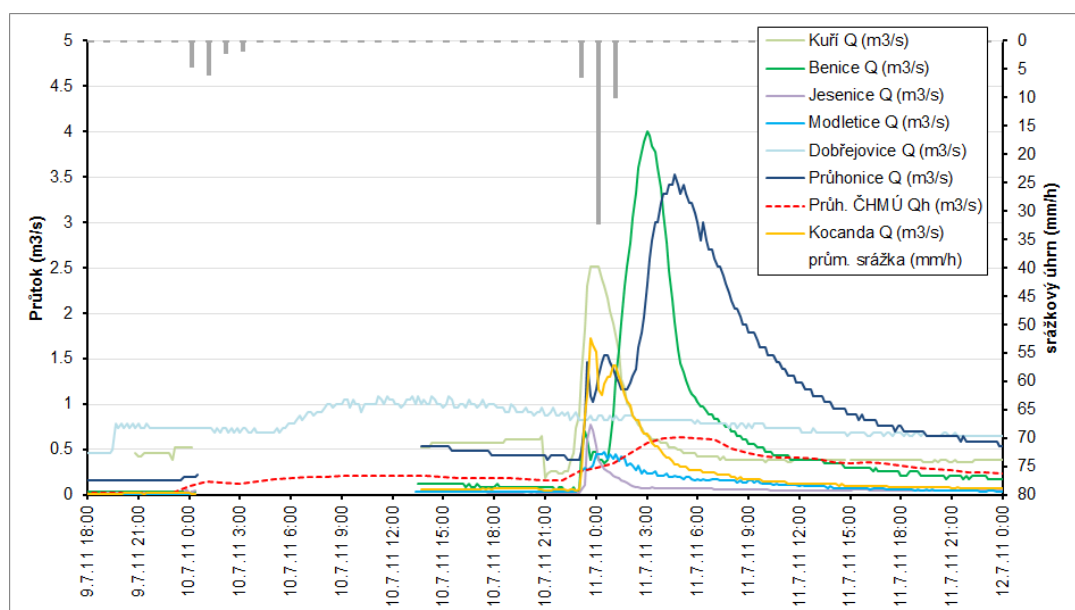
Simulace epizody 7/2011 bylo provedena pro období 9.7.2011 0:00 – 13.7.2011 0:00 s využitím vstupního pole srážek, které bylo vytvořeno kombinací radarových produktů ČHMÚ a výše zmíněných srážkoměrných stanic, obojí v kroku 10 min. Pro dobu trvání příčinné srážky bylo využito prostorové rozdělení podle radarových produktů, hodnoty desetiminutových úhrnů byly metodou nejmenších čtverců upraveny podle měřených hodnot ve srážkoměrech.



Obr. 37 Interpolované pole srážkových úhrnů do výpočetní sítě. Příčinná srážka epizody 7/2011 (úhrn za období 10.7.2011 22:00 – 11.7.2011 2:00).

Z kontrolního porovnání takto vytvořených srážkových časových řad ve srážkoměných stanicích s reálnými hodnotami zřejmé, že takto určená srážková pole desetiminutových úhrnů jsou pravděpodobně zatížena významnou chybou a vyhodnocení dynamiky rozložení srážek v průběhu této epizody by mělo být upřesněno vyspělejšími metodami s využitím více informací a pozorování.

Pro porovnání simulovaných průtoků byly využity desetiminutové průměrné hodnoty průtoků ve stanicích Lesů hl. m. Prahy a hodinových průměrných hodnot průtoků stanice ČHMÚ Průhonice (Dobřejovický potok).



Obr. 38 Hodinové průměrné úhrny srážek (49 mm průměr na ploše povodí) a desetiminutové průměrné průtoky, epizoda 7/2011.

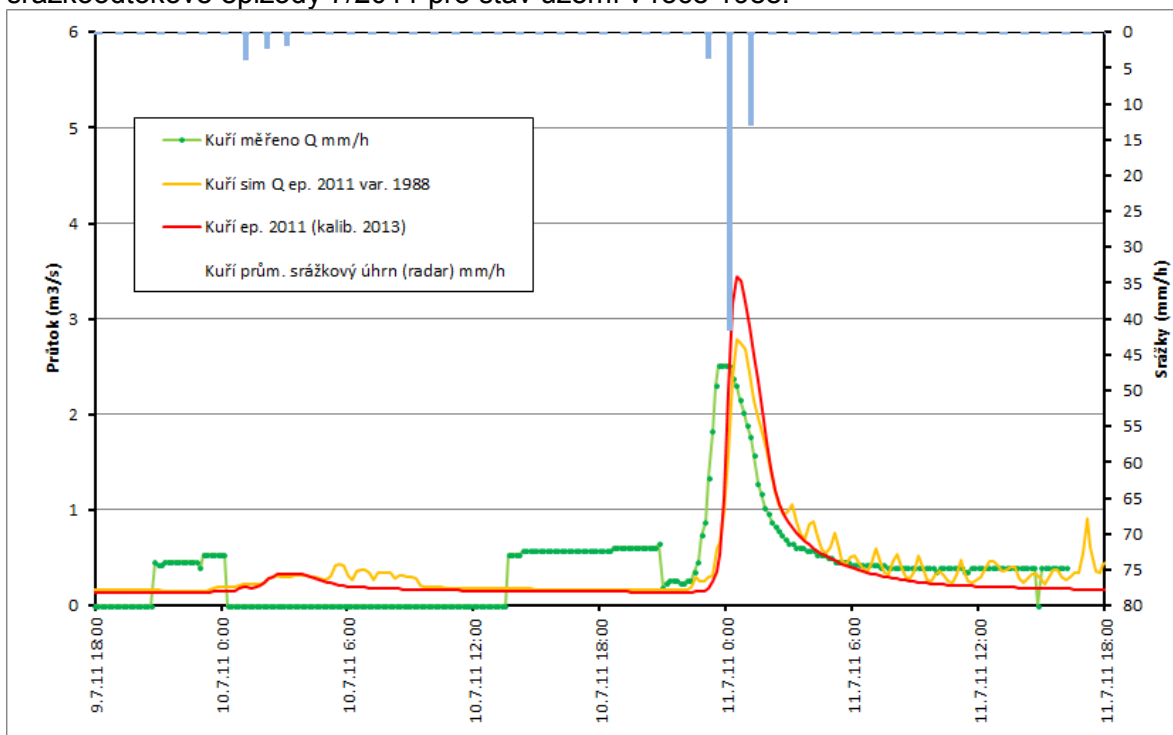
Tab. 15 Profily, plochy povodí a odtokový koeficient epizody 7/2011 (úhrny 10.7.2011 22:00 – 11.7.2011 22:00)

Profil	potok	Provo- zovatel	Plocha dílčího povodí	Celk. plocha povodí	Srážková výška	Odtoková výška	Odtokový koeficient
			km ²	km ²	mm	mm	%
Kuří	Pitkovický	Lesy	17.0	17.0	59	3.1	5
Benice	Pitkovický	Lesy	8.4	25.4	60	8.6	14
Modletice	Chomutovický	Lesy	4.5	4.5	58	2.9	5
Dobřejovice ⁽¹⁾	Dobřejovický	Lesy	6.8				
Průhonice ⁽¹⁾	Dobřejovický	ČHMÚ	1.7 + 6.8	12.9			
Jesenice	Jesenický	Lesy	3.7	3.7	26	2.1	8
Průhonice	Botič	Lesy	23.5	40.2	47	5.3	11

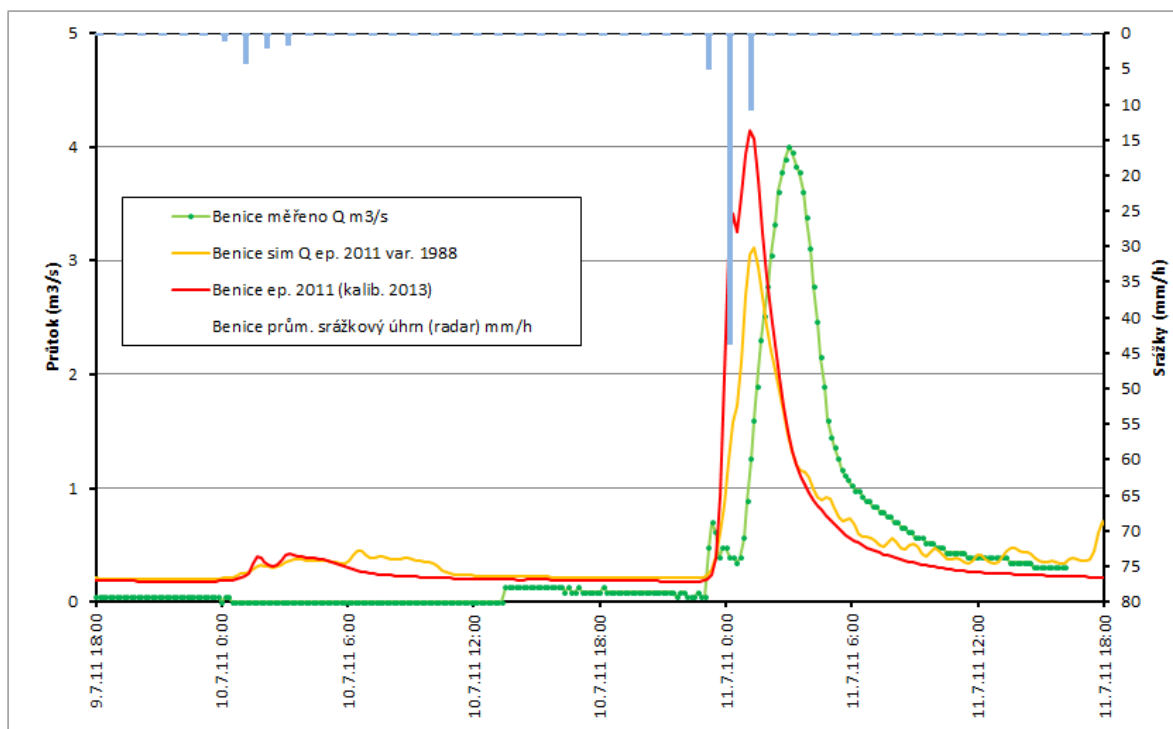
Z tabulky je zřejmé, že odtokové koeficienty jsou velmi nízké, velká část srážkového úhrnu byla zadržena v povodí. Je zřejmé, že měření stanic Dobřejovice (Lesy hl. m. Prahy) a Průhonice (ČHMÚ – Dobřejovický potok) jsou zatíženy chybou. Ostatní hydrogramy byly porovnány s výsledky simulací modelem (dále na obrázcích). Pro většinu profilů je shoda simulovaných a měřených hydrogramů uspokojivá.

7.2 Dopad změny využití území pro srážkoodtokovou epizodu 7/2011

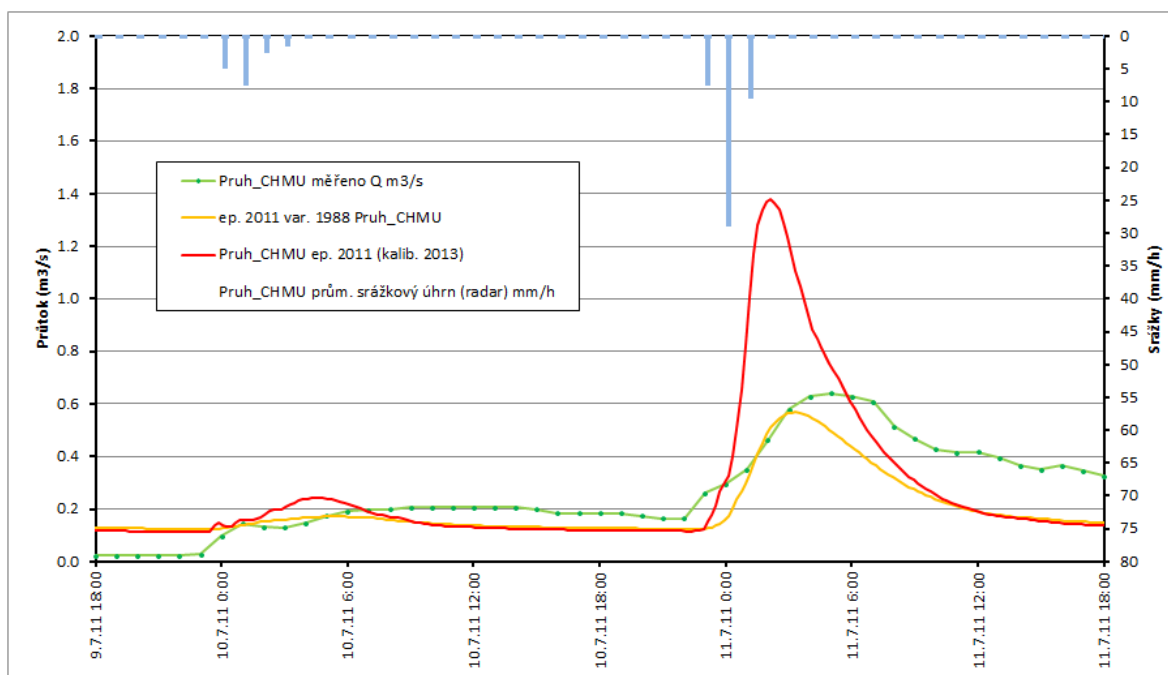
V dalším kroku byly v modelu provedeny úpravy stejným způsobem jako v případě epizody 6/2013: mapy vegetace, půdních charakteristik a podílu nepropustných ploch byly zaměněny tak, aby charakterizovaly stav k roku 1988, zároveň byla provedena variantní simulace pro nastavení počátečních podmínek. Na takto upraveném modelu byla provedena simulace srážkoodtokové epizody 7/2011 pro stav území v roce 1988.



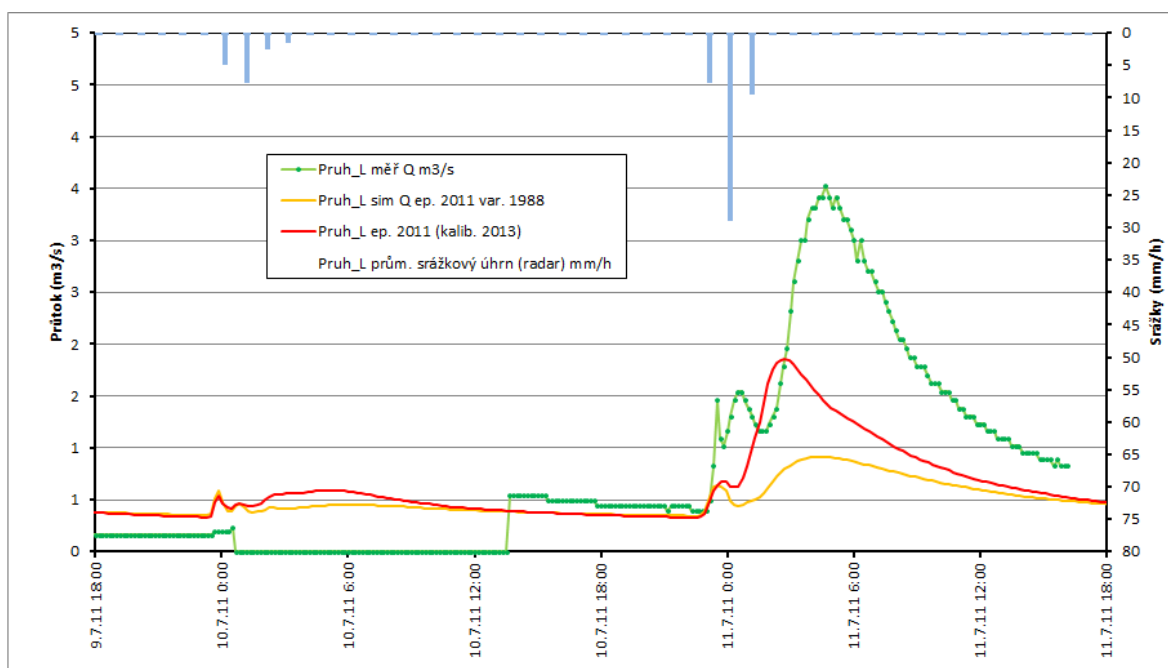
Obr. 39 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, stanice Kuří.



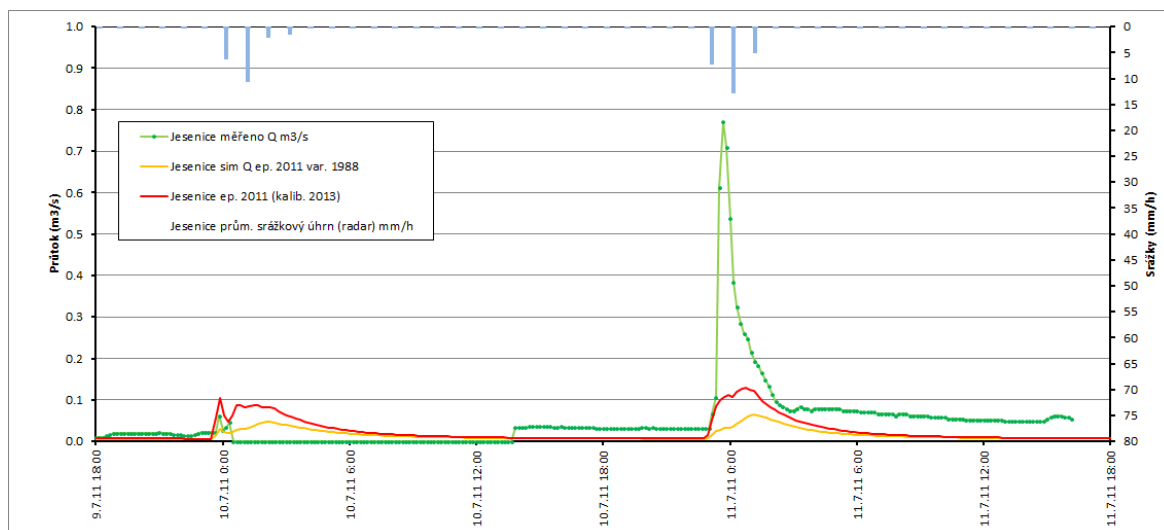
Obr. 40 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, stanice Benice.



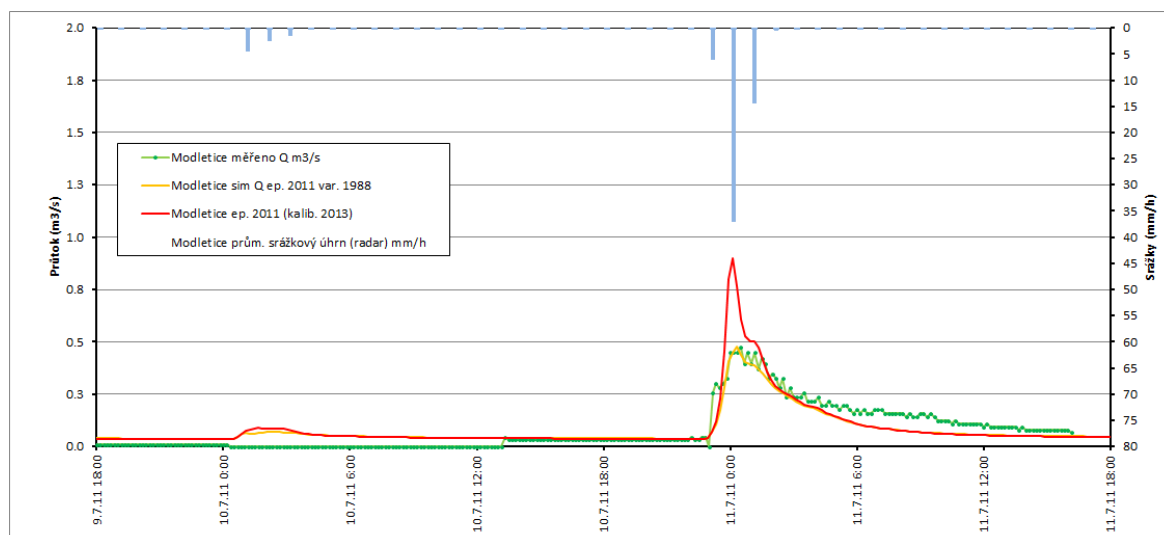
Obr. 41 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, stanice Průhonice (Dobřej. Potok, ČHMÚ). Předpokládáme, že měřené hodnoty (zeleně) jsou zatíženy chybou.



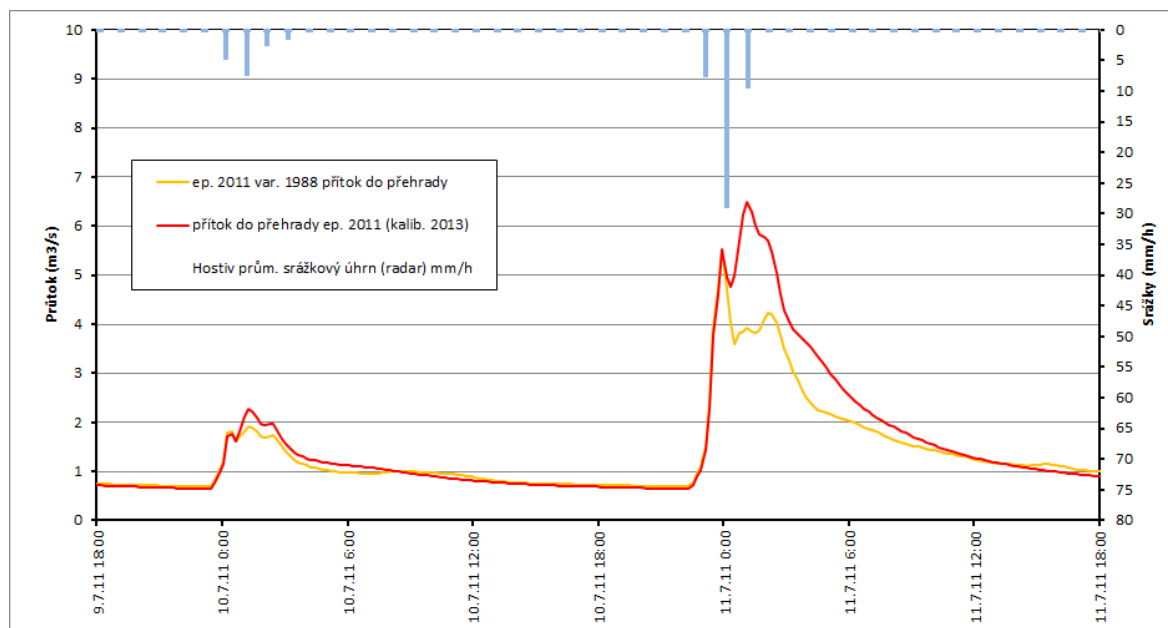
Obr. 42 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, stanice Průhonice (Průhonický potok, Lesy hl. m. Prahy).



Obr. 43 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, stanice Jesenice.



Obr. 44 Pozorovaný a simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, stanice Modletice



Obr. 45 Simulovaný průtok pro kalibraci (stav území 2013) a variantu stavu území 1988, 10 min průměry. Epizoda 7/2011, průtok do přehrady Hostivař.

Tab. 16 Porovnání simulovaného kulminačního průtoku a odtoku pro epizodu 7/2011 (10.7.2011 22:00 -11.7.2011 22:00). Výsledky simulací na kalibrovaném modelu podle epizody 2013 a varianty 1988 pro vybraná podpovodí.

	Kulminační průtok (m³/s)		Odtoková výška z mezipovodí (mm)	
	stav 2013	stav 1988	stav 2013	Stav 1988
Modletice	0.90	0.48	2.5	2.2
Dobřejovice	1.32	0.52		
Průhonice (Dobřejov. p. ČHMÚ)	1.38	0.57	2.7	1.5
Jesenice	0.13	0.06	0.6	0.4
Průhonice (Botič)	1.85	0.92	1.5	1.2
Kuří	3.45	2.79	2.6	2.4
Benice	4.15	3.12	2.0	1.2
průtok do n. Hostivař	6.49	5.52		

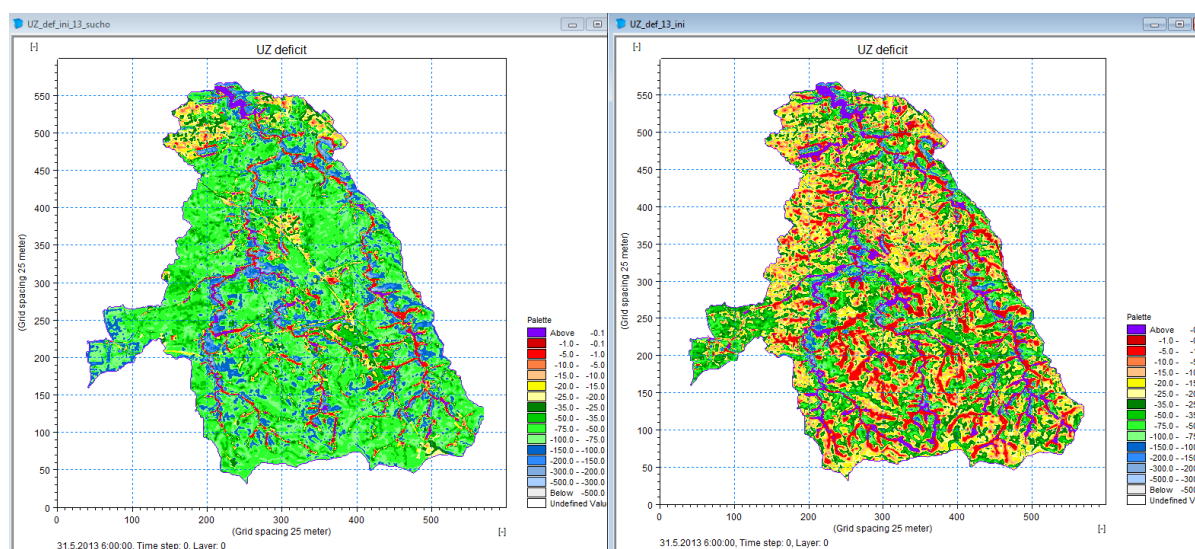
Z tabulky je zřejmé, že v případě nižších hodnot odtoků z menší srážkoodtokové epizody a v případě povodí s vyšším podílem urbanizovaných ploch jsou simulované odtoky i kulminační průtoky dle očekávání vyšší. Rozdíly mezi více urbanizovaným povodím (stav 2013) a variantou s nižším procentem urbanizace (1988) mohou dosahovat i přes 100% v kulminační hodnotě průtoku a přes 50% v celkové odtokové výšce (mediánové hodnoty pro zkoumaná povodí: 102% pro kulminační průtok, 45% pro celkovou odtokovou výšku. Pokud porovnáme koeficienty odtoku, rozdíly se velmi liší mezi jednotlivými dílčími povodími: nárůst 6% (Kuří) až 72% (Benice). Hodnoty je ale nutno posuzovat s ohledem na retenční objemy, které se liší v dílčích povodích a v této epizodě pravděpodobně ovlivnily odtok z dílčích povodí.

7.3 Simulace epizody 6/2013 s upravenými počátečními podmínkami

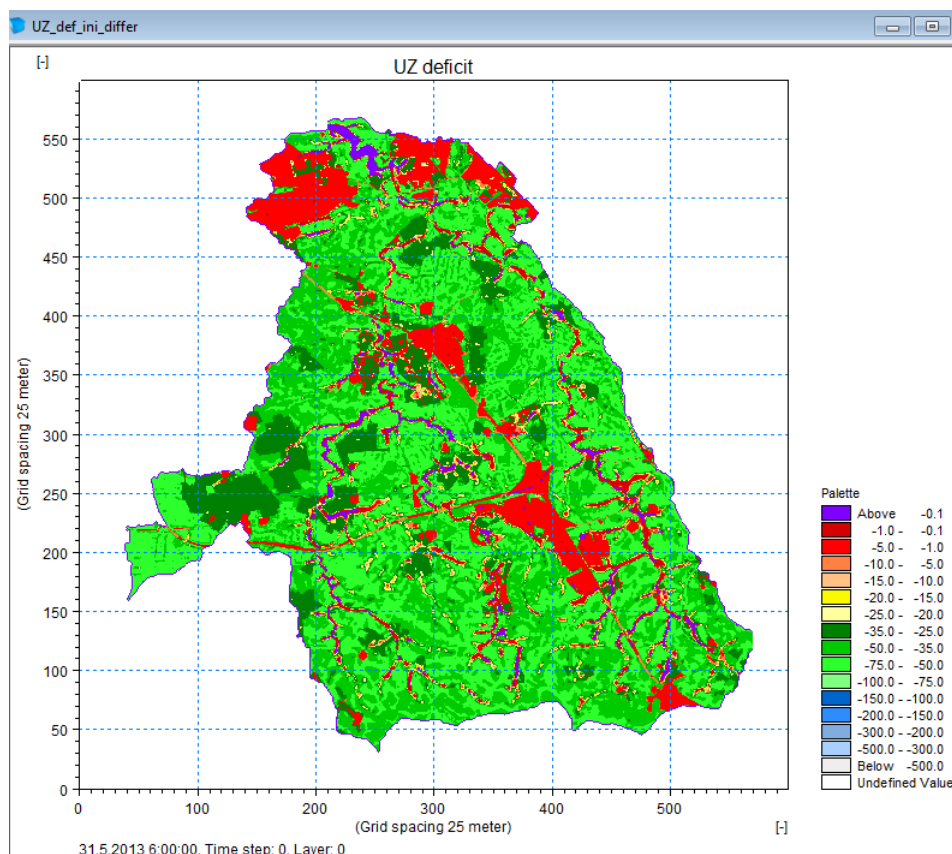
V předchozí části jsme prokázali, že model, kalibrovaný na datech epizody 6/2013 je schopen adekvátně simulovat průtoky i pro méně významné srážkoodtokové epizody a běžné až suché počáteční podmínky a to bez nutnosti měnit kalibrační parametry.

Na takto ověřeném modelu je možno provést hypotetické simulace a ohodnotit dopad změny využití území v povodí Botiče pro teoretický případ: za předpokladu, že by se srážkoodtoková epizoda 6/2013 vyskytla v období běžných až sušších vlhkostních podmínek.

V modelu byly změněny srážkové podmínky během května, což vede k sušším počátečním podmínkám pro vlastní období simulované epizody. Na internetu jsou k dispozici měsíční srážkové úhrny stanice Karlov: květen 2011: 46 mm, květen 2013: 109 mm. Denní srážkové úhrny na povodí v modelu byly pro tuto variantu přenásobeny koeficientem 0.42, tedy ze 105 mm (vážený průměr stanic) sníženy na 44 mm za měsíc květen 2013 a provedeny nové simulace s podmínkami využití území 2013 a 1988. Dále jsou označeny jako „suché“ podmínky.

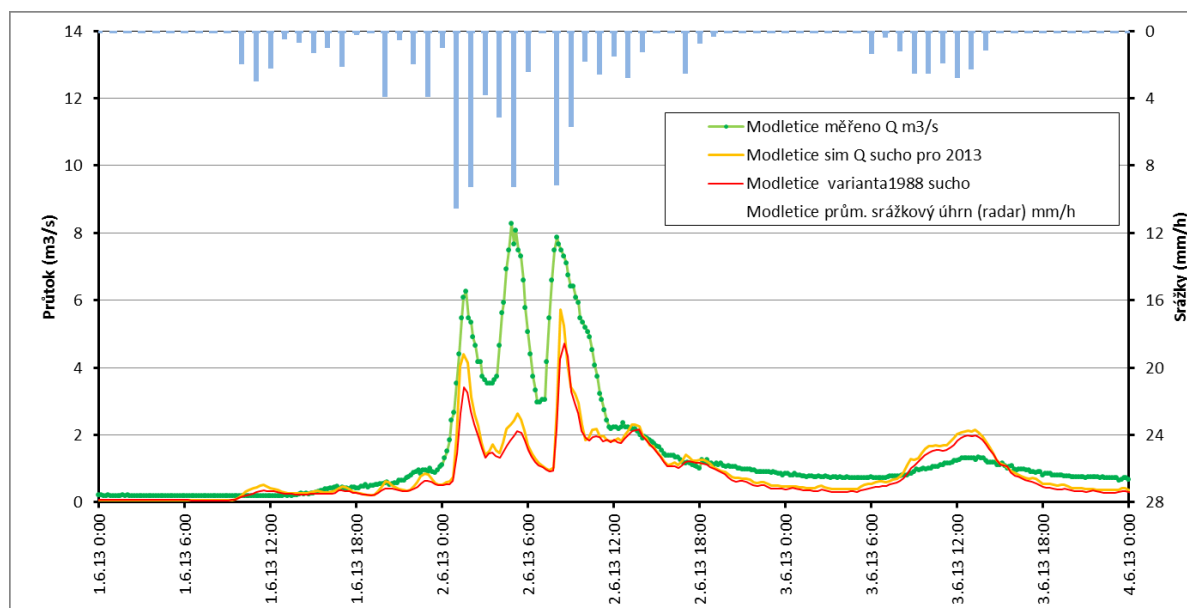


Obr. 46 Deficit obsahu vody v nenasycené zóně na počátku epizody (mm vodního sloupce). Vlevo podmínky „suché“; vpravo simulované pro skutečný úhrn srážek v květnu 2013.

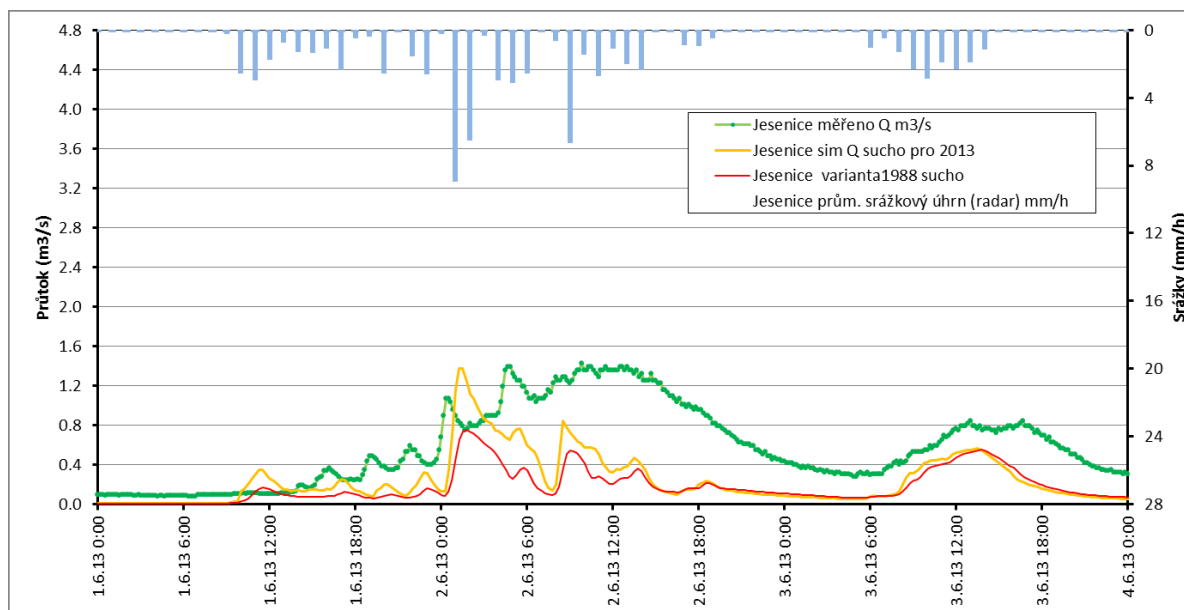


Obr. 47 Rozdíl v deficitu obsahu vody v nenasycené zóně na počátku epizody. Pro podmínky „suché“ byl simulován v průměru asi o 50 mm vyšší deficit než při podmínkách simulovaných pro skutečný úhrn srážek v květnu 2013.

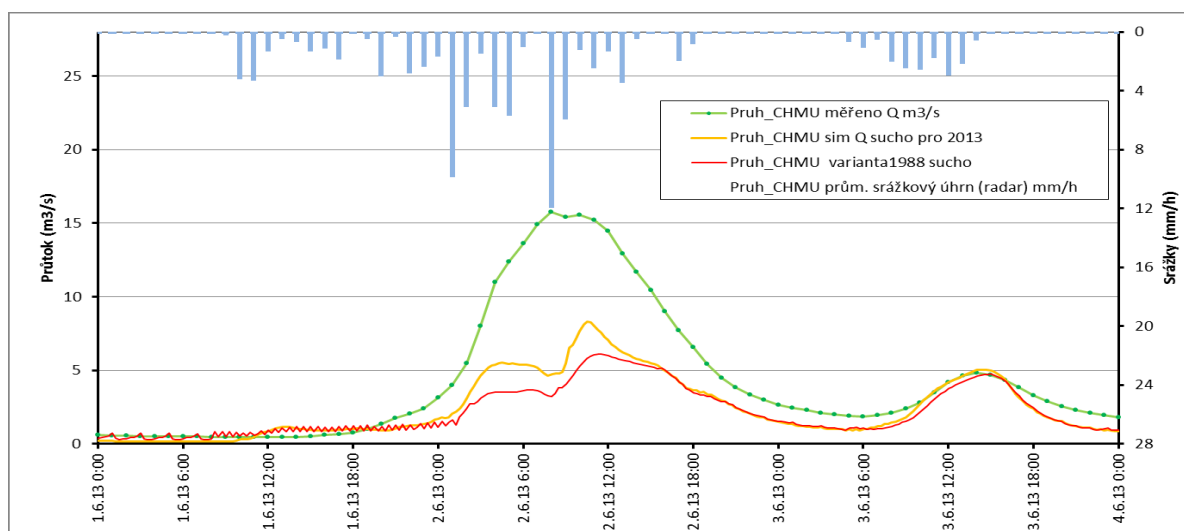
Simulované hydrogramy vycházející ze „suchých“ počátečních podmínek pro stav roku 2013 a stav roku 1988 jsou v následujících obrázcích.



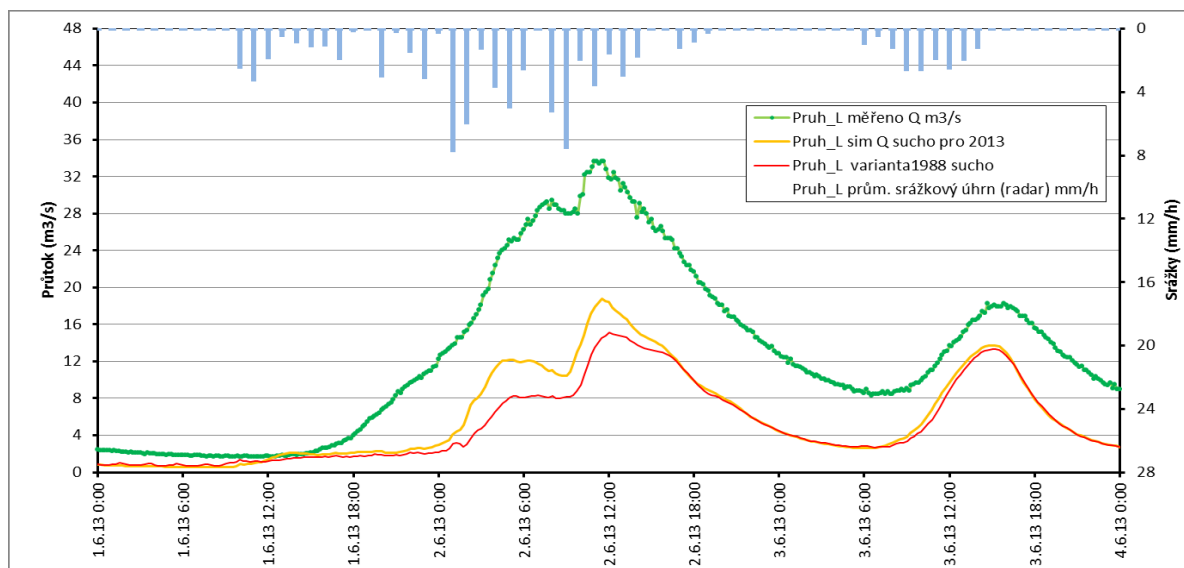
Obr. 48 Pozorovaný průtok v roce 2013 a simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – stanice Modletice.



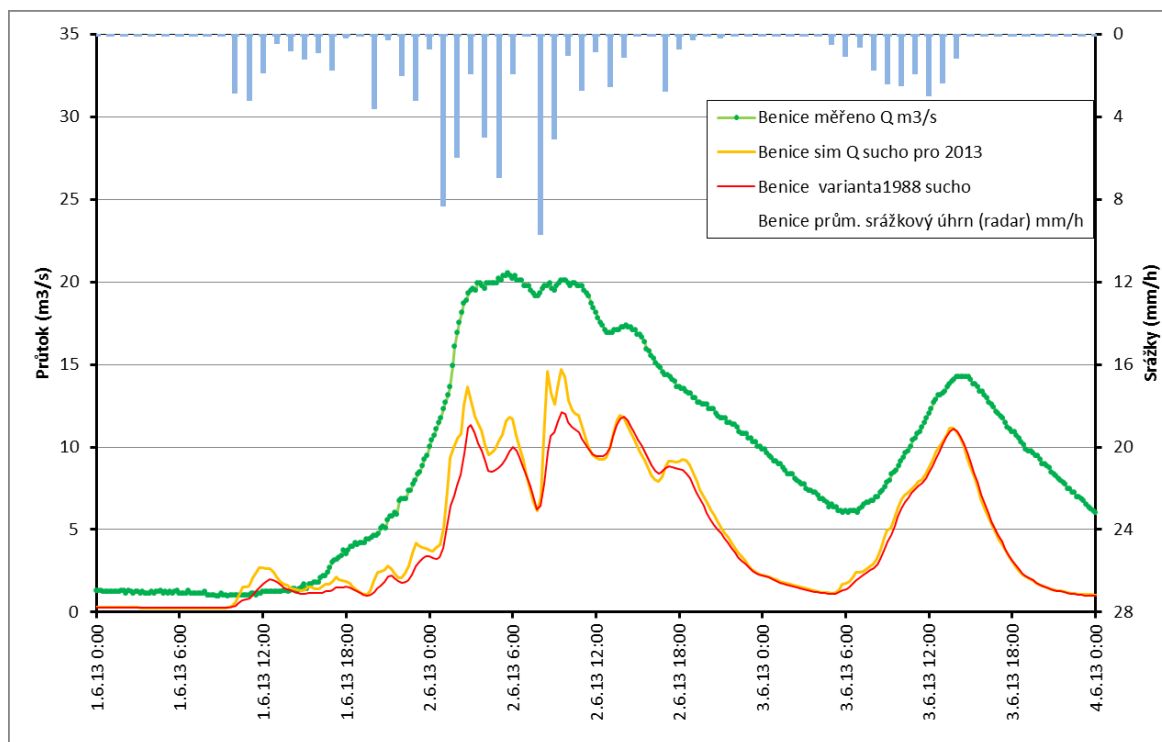
Obr. 49 Pozorovaný průtok v roce 2013 a simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – stanice Jesenice.



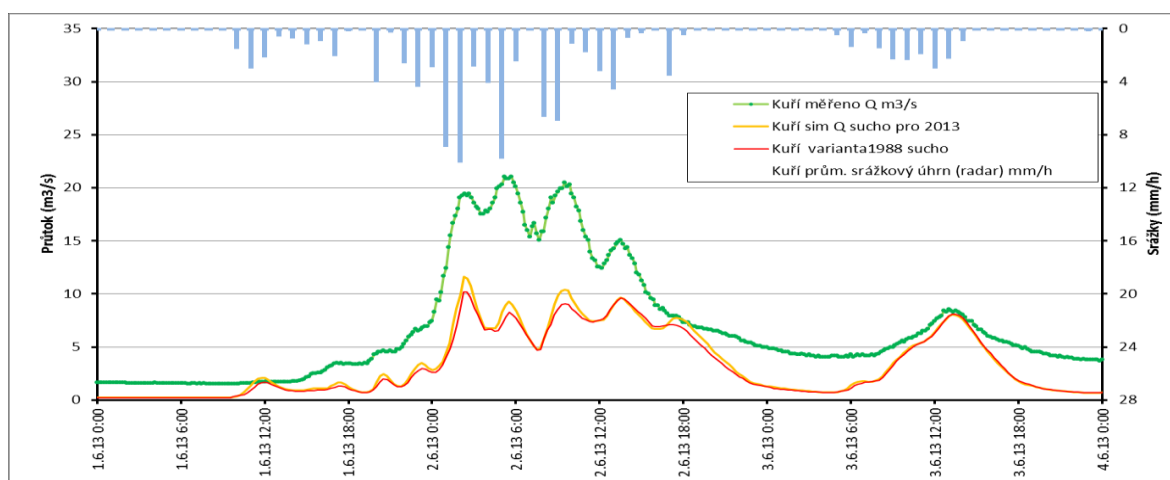
Obr. 50 Pozorovaný průtok v roce 2013 a simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – stanice ČHMÚ Průhonice.



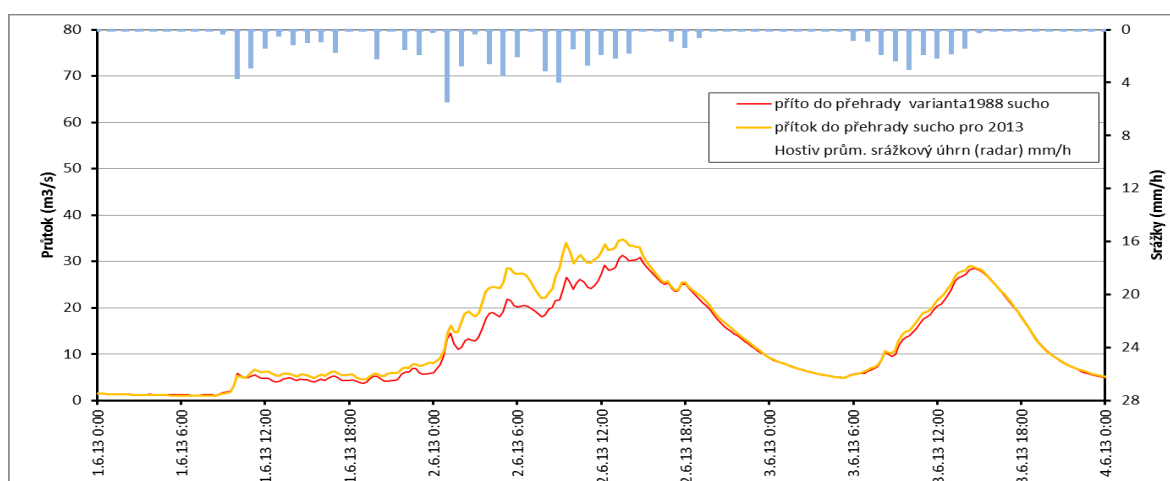
Obr. 51 Pozorovaný průtok v roce 2013 a simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – stanice Lesů Průhonice na Botiči.



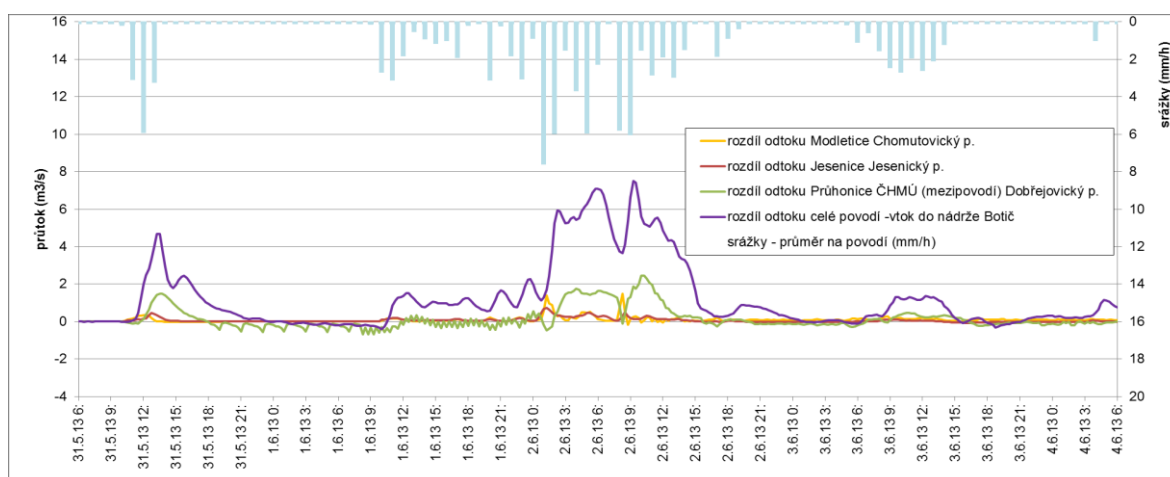
Obr. 52 Pozorovaný průtok v roce 2013 a simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – stanice Benice.



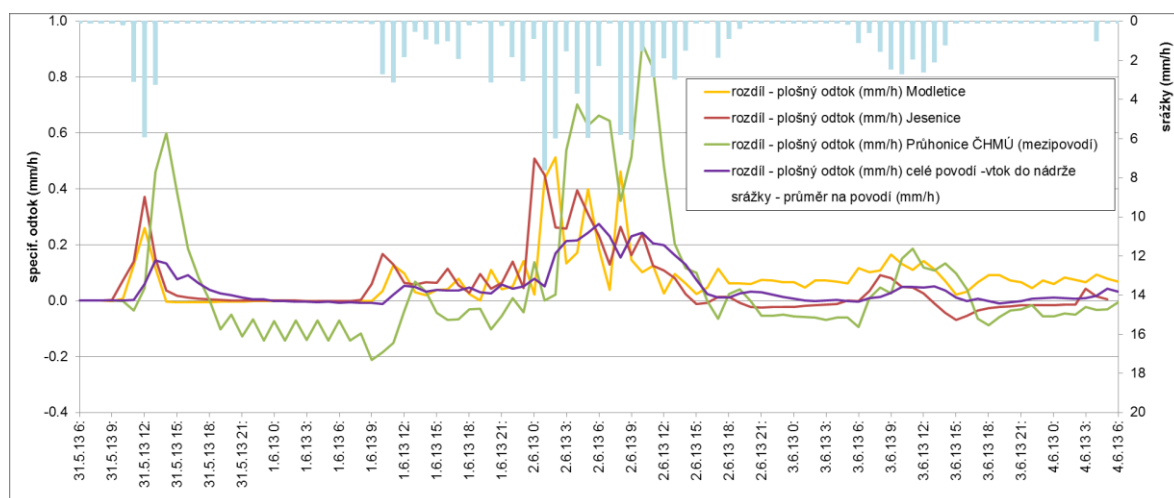
Obr. 53 Pozorovaný průtok v roce 2013 a simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – stanice Kuří.



Obr. 54 Simulovaný průtok pro suché počáteční podmínky a stav území v roce 2013 a v roce 1988 – přítok do nádrže Hostivař.



Obr. 55 Rozdíly v průtocích (stav 2013 - stav 1988) pro vybraná dílčí povodí



Obr. 56 Rozdíly ve specifických odtocích (stav 2013 - stav 1988) pro vybraná dílčí povodí

Tab. 17 Porovnání vybraných složek hydrologické bilance během epizody (31.5.2013 6:00 - 4.6.2013). Výsledky simulací stavu 2013 a stavu 1988 pro počáteční suché podmínky.

Suché počáteční podmínky		povrchový odtok (mm)	podpovrchový odtok (mm)	změna zásoby vody v povodí (mm)	odtok korytem (mm)
Jesenice	stav 2013	15	4	66	19
	stav 1988	7	6	71	14
Modletice	stav 2013	22	36	52	59
	stav 1988	18	33	55	51
Průhonice ČHMÚ	stav 2013	25	25	48	51
	stav 1988	16	29	57	45
Přítok Hostivař	stav 2013	20	22	50	42
	stav 1988	14	23	54	37

Tab. 18 Porovnání odtoku a kulminačního průtoku (31.5.2013 6:00 - 4.6.2013 6:00). Výsledky simulací na kalibrovaném modelu (stav území 2013) a varianty stavu území 1988 pro vybraná podpovodí, upravené (suché) počáteční podmínky

	Kulminační průtok (m ³ /s)		Odtoková výška z mezipovodí (mm)	
	stav 2013	stav 1988	stav 2013	stav 1988
Modletice	5.7	4.7	59	51
Dobřejovice	8	6		
Průhonice (ČHMÚ)	8	6	51	45
Jesenice	1.4	0.8	19	14
Průhonice (Botič)	19	15	40	34
Kuří	12	10	56	53
Benice	15	12	43	35
přítok do n. Hostivař	35	31		

Výsledky hypotetických simulací potvrzují závěry v předchozí podkapitole. Počáteční nasycení povodí má výrazný vliv na jeho odtokovou reakci. Ze srovnání tabulek 13 a 17 vyplývá, že rozdíly mezi simulovaným objemem odtoku při „suchých“ počátečních podmínkách a reálných podmínkách v roce 2013 jsou i více než dvojnásobné (pro odpovídající si stav využití území). Obdobně z uvedených hydrogramů vychází porovnání

kulminačních průtoků, např. přítok do nádrže Hostivař by při předcházejícím suchém květnu (jako byl v roce 2011) dosáhl pouze cca 35 m³/s.

Změna využití území mezi roky 1988 a 2013 se při suchých počátečních podmínkách v simulacích projevila významněji, tj. zvýšením objemu odtoku asi o 12-14% (profily Modletice, Průhonice ČHMÚ a vtok do nádrže). Na vtoku do nádrže Hostivař byly simulovány průtoky na vzestupné větvi až do kulminace asi o 6 m³/s (tj. asi 11%) vyšší než pro stav území v roce 1988.

8 Dílčí závěry, diskuse a návrhy

Vliv změn na území povodí Botiče nad VD Hostivař byl posuzován pomocí distribuovaného srážkoodtokového modelu, který byl kalibrován pomocí pozorovaných hydrogramů v profilech Modletického potoka, Jesenického potoka, Dobřejovického potoka (limnigraf ČHMÚ) a Botiče (Průhonice, limnigraf Lesů hl. m. Prahy.) a validován vůči pozorovanému hydrogramu v profilech Benice a Kuří pro epizodu 6/2013. Změny ve využití území byly do modelu zavedeny jako změny v plošném rozložení parametrů vegetace, hydraulické drsnosti povrchu, infiltrační schopnosti půd a mělkého podpovrchového odtoku na základě interpretované mapy využití území pro roky 1988/89 (za jinak stejných podmínek). Posléze byl model validován na méně významné srážkoodtokové epizodě 7/2011 a prokázal schopnost adekvátně simulovat odtok i za běžných až suchých počátečních podmínek.

Ze získaných poznatků lze učinit následující (dílčí) závěry

1. Přestože byly k dispozici nadstandardní datové podklady, ukázalo se, že v obou srážkových epizodách (6/2013 i 7/2011) dostupný popis dynamiky změn srážkového pole v prostoru a čase (tj. hlavní vstup do modelu) byl limitujícím faktorem pro schopnost modelu dobře vystihnout odtok z jednotlivých dílčích povodí. Prostorové (1x1 km) i časové (15min, resp. 10 min) rozlišení radarových produktů je limitní vzhledem k velikostem použitých dílčích povodí (jednotky km²) a pozorované rychlosti odtokové odezvy. Je zřejmé i velká plošná i časová variabilita příčinné srážky (rozdíly mezi přepočtenými hodnotami úhrnů v jednotlivých buňkách i mezi jednotlivými radarovými snímky) – viz obr. 6. Otázkou je i spolehlivost přepočtu radarových odrazů na srážkový úhrn při vysokých hodnotách srážkových intenzit (i nad 45 mm/h). V jižní části povodí (s nejvyššími srážkovými úhrny) nebyl bohužel k dispozici žádný srážkoměr pro pozemní ověření srážkových úhrnů vypočtených podle radarových produktů.
2. V epizodě 6/2013 byly zjištěny extrémně vysoké koeficienty odtoku (73-85%). Předpokládáme, že příčinou je kombinace vysokých úhrnů srážek (více než 120 mm) s vysokým předchozím nasycením povodí (nadprůměrné úhrny srážek během května).
3. Retenční prostory v povodí nad Hostivařskou přehradou byly ve zkoumané epizodě 6/2013 ve vztahu k vysokým objemům odtoku z jednotlivých dílčích povodí relativně nevýznamné. K ovlivnění odtoku podle interpretovaných výsledků modelu došlo především v případě Jesenického potoka (nádrž Pančák v Jesenici), méně výrazně pak na Dobřejovickém potoce (rybník pod obcí Dobřejovice).
4. Pro studovanou epizodu 6/2013 a reálné počáteční podmínky vyvolává změna ve využití území (především ze zemědělské půdy a luk na urbanizované území a/nebo zpevněné plochy) na dílčích povodích v rozsahu 4 až 20% plochy území relativně malou změnu v simulovaném kulminačním průtoku (nejvíce o 2 m³/s, obvykle méně než 1 m³/s) i v celkovém odtokovém množství (do 7%, většinou 2-3%). Zjištění lze interpretovat tak, že ve zkoumaném případě byla retenční schopnost půdy do značné míry vyčerpána na počátku srážky a tudíž se rozdíly mezi jednotlivými kategoriemi využití území prakticky neprojeví.
5. Na základě analýzy výsledků lze předpokládat zvýšení podílu rychlého povrchového odtoku (pro vybraná povodí asi 6-17%) při výše popsané změně ve využití území
6. Modelem byl simulován hydrogram přítoku do nádrže Hostivař s kulminačním průtokem asi 73 m³/s dne 2.6.2013 asi v 10:45 SELČ.

7. Otázkou zůstává příčina rozdílů mezi pozorovaným a simulovaným průtokem v profilu Jesenice. Jedním z možných vysvětlení je vliv transformace v nádrži v obci nebo vliv odtoku z urbanizovaného území přímo nad měrným profilem.
8. S vědomím nejistot ve vstupních srážkových datech lze konstatovat, že model byl schopen adekvátně simulovat odtok z dílčích povodí i ve validační epizodě 7/2011 s výrazně nižším celkovým úhrnem srážek a s průměrnými až suchými počátečními podmínkami (koeficient odtoku mezi 5 a 14%). Tím se prokázalo, že model je vhodný pro posouzení vlivu využití území i pro méně nasycené počáteční podmínky (než v případě epizody 6/2013).
9. Pro epizodu 7/2011 se porovnáním variantní simulace (stav území 1988) se simulací kalibrovaným modelem podle stavu území 2013 ukazuje, že při běžných až suchých podmínkách na počátku „běžné“ srážkové epizody (průměrný odvozený úhrn na povodí v 7/2011 činil 49 mm) model simuluje kulminační průtoky o více než 100% vyšší a celkovou odtokovou výšku o 45% vyšší pro urbanizované území (stav území 2013). Rozdíly mezi jednotlivými povodími jsou značné, pravděpodobně i v důsledku zachycení významné části odtoku v retenčních objemech (rybníky, nádrže) v některých povodích.
10. Počáteční podmínky při nástupu příčinné srážky mají zásadní vliv na odtokovou odezvu. Z porovnání výsledků modelu pro skutečné podmínky epizody 6/2013 a hypotetické simulace s běžnými až suchými podmínkami na počátku srážky plyne, že kulminační průtok byl více redukován v případě varianty stavu území 1988 (o 55% ve srovnání s 45% pro stav území 2013), podobně celková odtoková výška (o 46% resp. 42%) – hodnoty vypočteny jako průměr ze všech sledovaných dílčích povodí.
11. Přehledné porovnání rozdílů mezi kalibrovaným modelem pro podmínky 2013 a variantou 1988 je uvedeno v následující souhrnné tabulce. Jde o procentní vyjádření rozdílu hodnot kulminačního průtoky (jako základ jsou vzaty hodnoty pro variantu 1988) z vybraných dílčích povodí s větší změnou využití území (v rozsahu 11-20% plochy). Dále jsou v tabulce 18 vypočteny procentní rozdíly v celkové odtokové výšce pro epizody stejným způsobem. Potvrzuje se obecný předpoklad, že za velmi nasycených počátečních podmínek se rozdíly v odtoku pro obě varianty využití území liší obvykle jen málo (jednotlivá procenta); v případě profilu Benice se dosažená hodnota vymyká všem ostatním. Naopak v případě méně významné srážky (2011) a sušších počátečních podmínek mohou rozdíly v kulminačním průtoku činit i přes 100%, celkový odtok může být navýšen až o 67%. Pokud by extrémní srážková událost 6/2013 vypadla do běžných (méně nasycených) počátečních podmínek, rozdíly v kulminačním průtoku lze uvažovat v rozmezí 22 až 33%, v celkovém odtoku 16 až 24%. Hodnoty pro profil Jesenice považujeme za diskutabilní vzhledem k problematické kalibraci modelu.

Tab. 18 Rozdíl hodnot kulminačního průtoky a celkové odtokové výšky pro stav území 2013 oproti stavu území 1988 (vyjádřeno v %; základ = 1988), pro vybraná dílčí povodí a tři simulované situace: a) epizoda 6/2013 ; b) epizoda 6/2013 s upravenými počátečními podmínkami (suchá var.); c) epizoda 7/2011

Rozdíl mezi stavem území 2013 a 1988 v procentech	Kulminační průtok			Odtoková výška z mezipovodí		
	epizoda 2013	epizoda 2013 suchá var.	epizoda 2011	epizoda 2013	Epizoda 2013 suchá var.	epizoda 2011
Benice	0	22	33	2	24	67
Dobřejovice	17	33	154			
Jesenice		83	117		40	50
Průhonice (Botič)	0	24	101	-3	16	25

12. Pokud stejným způsobem zpracujeme další dílčí povodí s rozsahem změn využití území 7-8% plochy (tj. Kuří, Modletice a Průhonice – ČHMÚ), jsou výsledky pro epizodu 6/2013 obdobné (jednotky procent). Pro epizodu 6/2013 s upravenými počátečními podmínkami jsou však hodnoty poněkud nižší než v případě povodí uvedených v Tab. 18 (pokud porovnáme průměry z obou skupin, jde asi o 2% z kulminačního průtoku a 9% z celkového odtoku). Ještě nižší jsou pak rozdíly pro epizodu 7/2011 (o 12% pro kulminační průtok i celkový odtok). Lze tedy konstatovat, že pokud porovnááme skupiny dílčích povodí (nikoliv jednotlivé profily), rozdíl v odtocích i kulminačním průtoku narůstá se zvyšujícím se podílem urbanizované plochy povodí (8% až 15% plochy) a to více pro sušší počáteční podmínky a méně významnou srážkovou epizodu.

Získané výsledky lze porovnat s aktuálně provedenými výpočty pro profil VD Hostivař: Fošumpaur a Kopecká (2013) pomocí návrhových dešťů s předepsanou dobou opakování zjišťovali dopad vlivu urbanizace v území. Pro srážku s dobou opakování 100 let (průtok asi 68 m³/s v profilu VD Hostivař) autoři udávají asi 15% rozdíl v kulminaci (asi 59 m³/s) pro stav území v roce 1953 s tím, že pro nižší průtoky se rozdíl mezi vypočteným kulminačním průtokem (stav 2013 – stav 1953) zvyšuje, pro vyšší průtoky naopak snižuje.

Z dosažených poznatků vyplývají také návrhy na další kroky. Z výsledků je zřejmé, že vlhkostní podmínky (nasycenost území) na počátku příčinné srážky mají zcela zásadní vliv na rychlost, objem i kulminační průtok odtokové odezvy. Tomuto tématu by měla být věnována zvýšená pozornost, zejména kvantifikaci tohoto obecně známého poznatku v konkrétních podmínkách na konkrétních povodích. Pro lepší porozumění plošné i časové variability podmínek na počátku srážky (v dostatečném prostorovém rozlišení) je vhodná další analýza výzkumného charakteru (přesahující zadání tohoto projektu) a posléze aplikace získaných poznatků do předpovědní praxe. To může významným způsobem zlepšit ochranu obyvatelstva před (především lokálními) povodněmi. Zde lze navazovat například na získané poznatky (a také zkušenosti s jejich aplikací na předpovědním pracovišti ČHMÚ) v rámci VaV MŽP 1D/1/5/05, především DÚ 3 „Rozvoj a testování modelovacího systému pro predikci povodňových odtoků v malých povodích“.

Zároveň doporučujeme věnovat pozornost dalšímu rozvoji metod pro zpřesňování určení dynamiky srážkového pole v kombinaci radarových produktů a pozemního měření pro povodí o velikosti jednotek až prvních desítek km². Jde o zcela zásadní vstup pro plošně distribuované matematické modelování srážkoodtokových vztahů.

Distribuovaný matematický modelovací nástroj MIKE SHE je vhodným nástrojem také pro porovnání předpokládaných dopadů změn využití území v různých částech povodí (v pramenné oblasti, údolní nivě apod.), takže může být využit i pro podporu návrhů komplexních úprav krajiny nebo při posuzování změn územních plánů obcí a jejich dopadů na hydrologický režim a tvorbu odtoku (povodňové odezvy, celková bilance, nebezpečí sucha).

9 Literatura

Graham D.N. and Butts M. B., "Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE". In "Watershed Models", Eds. V.P. Singh & D.K. Frevert. CRC Press. (2005)

Kristensen, K. J. a Jensen, S. E. (1975): A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. Royal Veterinary and Agricultural University, Nordic Hydrology, 6, 170 – 188.

Fošumpaur, P. a Kopecká, P. (2013): VD Hostivař – Změny v povodí Botiče a povodně 2013. In: „Sborník příspěvků ze Semináře Adolfa Patery 2013“, Eds.: P. Fošumpaur a P. Kopecká. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky ISBN 978-80-02-02501-6.