

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta životního prostředí
Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování

Posouzení metody nízkonákladové kalibrace srážko-
odtokového modelu v urbanizovaném území
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Diplomant: Bc. Kateřina Kubíková
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Máca, Ph.D.
2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Petra Máci, Ph.D., a že jsem uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze, 22.4.2013

.....

Bc. Kateřina Kubíková

Podkování

Tímto bych chtěla podkovat společnost DHI a.s. za poskytnutí dat k jednotlivým modelům, za možnost práce v softwaru MIKE URBAN a především Ing. Davidu Hrabákovi za odbornou pomoc při práci s modely a softwarem. Dále bych chtěla podkovat Ing. Vojtěchu Barešovi, Ph.D. za odborné konzultace, Ing. Petru Mácovi, Ph.D. za odborné vedení a motivaci a rodině, partnerovi a přátelům za neobyčejnou podporu a trpělivost.

ABSTRAKT

Mrná kampa je jednou z nejtěžších položek nákladů na vytvoření srážko-odtokového modelu stokové sítě, a tím se matematický model často stává pro obce finančně neúnosným. V roce 2008 publikovali Rasmussen & kol. článek, ve kterém popisují metodiku nízkonákladové kalibrace modelu malého povodí stokové sítě zakoněnou jednou odlehovací komorou. Tato metoda je založena na kalibraci redukčního faktoru povodí na základě informací o době propadu na odlehovací komoře. Metodika je posouzena na třech modelech, které zároveň slouží jako modely referenční. Bylo zjištěno, že redukční faktor jednotlivých dešových událostí nelze porovnávat s průměrným redukčním faktorem referenčního povodí. Pro nalezení spolehlivější metody kalibrace byla provedena citlivostní analýza, která definuje místní ztráty na komoře jako další významný parametr ovlivňující odtok na síti. Pro porovnání výkonnosti modelů bylo dále vytvořeno srovnání na základě koeficientu determinace hladin a průtoků. Z výsledků vyplývá, že popisovaná metoda je velmi nestabilní, ale v případě jejího rozšíření by bylo možné ji použít. Jako rozšíření je navržena kalibrace místních ztrát na komoře nebo nalezení redukčního faktoru pro různé dešové události.

Klíčová slova: kalibrace, odtok, urbanizované území

ABSTRACT

A measuring campaign is one of the largest cost items for urban drainage rainfall-runoff model compilation, hence for small municipalities is the mathematical model financially intolerable frequently. Rasmussen et al. published in 2008 an article describing a methodology for low cost calibration of rainfall-runoff model of a small catchment sewer network ended by sewer overflow structure. That method is based on catchment reduction factor calibration depending on duration of an overflow. The methodology is evaluated on three models, which are also used as reference models. It was found that the reduction factor of individual rainfall events can not be compared with the average reduction factor of a catchment. It was performed sensitivity analysis to find more reliable calibration method which defines outflow head losses as another important parameter affecting the network runoff. Coefficient of determination was evaluated for depth and discharge time series to compare the performance of the models. It was found that the methodology is very unstable, but it could be used in the case of another extension. It was proposed to extend the method by calibration of head losses or finding the reduction factor for different rain events.

Key words: calibration, runoff, urban drainage

OBSAH

Obsah	6
1 Úvod.....	11
2 Literární rešerše.....	13
2.1 Matematické modely	13
2.2 Tvorba modelu	14
2.3 Modelování srážko-odtokového procesu	16
2.3.1 Definice úlohy	17
2.3.2 Ohraničení a schematizace systému.....	18
2.3.3 Výběr modelu.....	18
2.3.4 Kalibrace a verifikace	19
2.4 Kritéria používaná pro vyhodnocení výkonnosti modelu	19
2.5 Nejistoty v simulacích modelech a datové potřeby model	23
2.5.1 Nejistoty	23
2.5.2 Nároky na data a monitoring.....	24
3 Metodika	26
3.1 Model MOUSE	26
3.1.1 Charakteristiky vybraných prvků MOUSE.....	27
3.1.1.1 Uzel	27
3.1.1.2 Spoj	29
3.1.1.3 Funkce	29
3.1.2 Modul povrchového odtoku „Runoff“ - „Time/Area Method“	30
3.1.2.1 Parametry modulu „Runoff“	31
3.1.2.2 Okrajové podmínky modulu „Runoff“	32
3.1.2.3 Výpočet modulu „Runoff“	33
3.1.3 Hydraulický modul „Network“	33
3.1.3.1 Počáteční podmínky modulu „Network“	33
3.1.3.2 Okrajové podmínky modulu „Network“	34
3.1.3.3 Popis nerovnoměrného proudění v potrubí.....	34
3.1.3.4 Řešení tlakového proudění.....	35
3.1.3.5 Transformace proudění v uzlech.....	35
3.1.3.6 Místní ztráty a ztráty třením.....	36
3.1.3.7 Numerické řešení	38
3.2 Zájmová území a modely	39
3.2.1 Zájmové území Ostrava	39
3.2.1.1 Povodí Na Pastvinách (Proskovice).....	40
3.2.1.2 Povodí Pavlova (Ostrava-Jih)	41
3.2.2 Zájmové území povodí Uničov	43
3.3 Vstupní data	45
3.3.1 Na Pastvinách – vstupní data	45
3.3.1.1 Srážky Na Pastvinách.....	45
3.3.1.2 Ostatní vstupy Na pastvinách.....	48
3.3.2 Pavlova – vstupní data	48
3.3.2.1 Srážky Pavlova.....	48
3.3.2.2 Ostatní vstupy Pavlova.....	51
3.3.3 Uničov – vstupní data.....	51
3.3.3.1 Srážky Uničov.....	51
3.3.3.2 Ostatní vstupy Uničov.....	54

3.4	Zpracování dat.....	54
3.4.1	Gandalf.....	54
3.4.2	MIKE URBAN	54
3.4.3	ArcMap	55
3.4.4	MIKE View.....	55
3.4.5	R.....	55
3.5	M rná kampa	56
3.5.1	M rná kampa Ostrava.....	56
3.5.1.1	OK Na Pastvinách.....	57
3.5.1.2	OK Pavlovova.....	59
3.5.1.3	OK Pavlovova II	60
3.5.2	M rná kampa Uni ov.....	62
3.5.2.1	OK Uni ov	62
3.6	Simulace.....	64
3.7	Kalibrace a vyhodnocení výsledk	65
3.7.1	Kalibrace	65
3.7.2	Citlivostní analýza modelu.....	68
3.7.3	Porovnání asových ad.....	69
4	Diskuse.....	72
5	Záv r	75
6	P ehled literatury a použitých zdroj	77

NOMENKLATURA

A	průtoku plocha [m ²]
A_B	průtoku plocha nádrže [m ²]
A_{out}	průtoku plocha odtoku [m ²]
B	šířka epadové hrany [m]
D	průměr šachty [m]
E	koeficient determinace
EO	ekvivalentní obyvatel
g	gravitační zrychlení [m/s ²]
h	hloubka vody [m]
H	kóta hladiny [m n. m.]
h_B	hloubka vody v nádrži v čase t [m]
h_B'	hloubka vody v nádrži v čase $t + \Delta t$ [m]
H_{bott}	kóta dna šachty [m n. m.]
i	počet nátok do šachty
i_0	sklon dna
i_E	sklon křivky energie
j	počet odtoků ze šachty
k	ekvivalentní drsnost potrubí [m]
l	délka spoje [m]
m	počet dílčích celků povodí
$max(x)$	maximální hodnota dané veličiny
$min(x)$	minimální hodnota dané veličiny
n	počet posuzovaných událostí, Manningův součinitel drsnosti
N	počet výpočetních bodů
OK	odlehovací komora
Q	průtok [m ³ /s]
Q_{in}	nátok do šachty [m ³ /s]
Q_{max}	maximální průtok [m ³ /s]
Q_{out}	odtok ze šachty [m ³ /s]
R	hydraulický poloměr [m]
Re	Reynoldsovo číslo
t	čas [s]

t_{max}	čas dosažení maxima
TOC	čas koncentrace [min.]
t_{Qmax}	čas dosažení maximálního průtoku
V	objem [m^3]
v_i	rychlost proudění na nátoku [m/s]
v_j	rychlost proudění na odtoku [m/s]
v_m	rychlost proudění v uzlu [m/s]
$volume(y_{sim})$	celkový objem asové ady [m^3]
x	vzdálenost ve směru proudění [m]
\tilde{x}	střední hodnota dané veličiny
y_{ref}	referenční hodnota
y_{sim}	simulovaná hodnota
	Boussinesq v souinitelnosti
E_i	ztráta energie na nátok do uzlu
E_j	ztráta energie na odtok
t	časový krok [s]
x	vzdálenost mezi výpočetními body [m]
$contr.$	ztráta energie způsobená změnou profilu na odtoku
dir	ztráta energie způsobená změnou směru proudění
$level$	ztráta energie způsobená změnou nadmořské výšky
μ	viskozita odtoku

1 ÚVOD

Matematické modelování je v dnešní době významným nástrojem při řešení úloh v oblasti městského odvodnění. Za použití simulacích modelů je možné řešit úlohy jako je posouzení funkčnosti stokové sítě, ovlivnění recipientu v oblasti protipovodňové ochrany, optimalizace tlakových poměrů na vodovodní síti a snižování ztrát; uplatní se především při řešení generel odvodnění i kanalizace. Popis srážko-odtokového procesu v urbanizovaném území je jedním z hlavních cílů při řešení koncepčních úloh v oblasti vodního hospodářství. Základními nástroji popisu procesu při řešení odtoku jsou právě matematické modely a monitoring. Díky monitoringu je možné nastavit parametry sestaveného modelu tak, aby co nejvíce ji popisoval realitu. Data získaná monitoringem jsou klíčovým prostředkem pro vytvoření dobře kalibrovaného modelu. Zároveň tvoří zásadní položku nákladů na vytvoření modelu, a díky tomu je často pro některé obce sestavení modelu stokové sítě finančně neúnosné.

Rasmussen & kol. publikovali v roce 2008 článek, ve kterém popisují možnost řešení nízkonákladové metody kalibrace modelu stokové sítě malého povodí. Analyzují experimentální povodí města Frejlev v Dánsku, jehož stoková síť je zakončena jednou odlehovací komorou. Na předepadovou hranu komory byl umístěn spínač, který zaznamenává čas předpadu na komoře. Tato data byla společně se srážkami jediným monitoringem na síti. K modelování sítě byl použit model MOUSE, jehož parametry byly nastaveny na defaultní hodnoty. Na základě doby předpadu na komoře byl následně kalibrován redukční faktor povodí. Jedná se o parametr definující podíl objemu srážky na povodí, který vstoupí do stokové sítě. Kalibrace na čtyřech dešových událostech ukázala, že nalezený redukční faktor (pro každou srážku zvlášť) je velmi blízký redukčnímu faktoru, který byl nalezen analýzou 293 dešových událostí na tomto povodí v práci Thorndahl (2008). Pro verifikaci byl použit průměr nalezených redukčních faktorů. V závěru práce je kalibrace danou metodou vyhodnocena jako úspěšná, ovšem je dány důraz na odlišný redukční faktor jednotlivých událostí.

Cílem této práce je posouzení využití výše uvedené metody v praxi, na vybraných modelech kalibrovaných na datech plnohodnotného monitoringu.

K posouzení budou použity i referenční modely zpracované společností DHI a.s. Strukturální data modelů zůstanou zachována, ale parametry modelu budou nastaveny na defaultní hodnoty. Na základě metody kalibrace podle Rasmussen & kol. (2008) bude nalezen redukční faktor každého povodí, který bude následně porovnán s redukčním faktorem referenčního modelu. Na základě výsledků kalibrace bude posouzeno využití uvedené metody nízkonákladové kalibrace v praxi.

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE

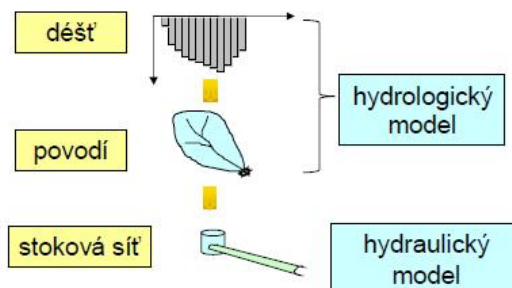
2.1 MATEMATICKÉ MODEL Y

Matematické modely se používají pro simulaci chování určitého systému. V oblasti vodního hospodářství mají matematické simulační modely velké uplatnění, nebo s jejich pomocí lze řešit široké množství úloh, jako například mapování záplavových území a s tím spojené plánování řešení krizových událostí, erozní činnost, transport sedimentu a znečištění ve vodních tocích, proudění podzemních vod a v neposlední řadě také chování kanalizačních sítí a vodohospodářských jevů v urbanizovaných oblastech. Pro každou úlohu je ovšem potřeba zvolit nejvhodnější typ modelu. Matematické modely se obecně dělí na stochastické a deterministické. *Stochastický* model je takový model, který obsahuje náhodnou proměnnou. V opačném případě se jedná o model *deterministický*, který nezahrnuje žádné nejistoty, na rozdíl od modelu stochastického, jehož vstupní data a parametry jsou popsány statistickým rozdělením. Výstup deterministického modelu bude pro stejné vstupní parametry vždy identický (Zoppou, 2001; Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000).

Dále je možné modely rozdělit podle způsobu popisu jevu na empirické (black box), polo-fyzikální (grey box) a fyzikální (white box). *Empirické* modely neberou v úvahu příčiny procesů, jsou založeny čistě na jejich statistickém vyhodnocení. Na opačné straně stojí *fyzikální* modely, které jasně popisují dané jevy na základě fyzikálních zákonů. U většiny hydrologických úloh se ovšem setkáme s *polofyzikálními* modely, které popisují některé jevy fyzikálně a složitější jevy empiricky (Carstensen & kol., 1997). Pro fyzikální modely se také někdy používá výraz „konceptuální“.

Při řešení odtoku v intravilánu se setkáme s dalšími dvěma typy modelů, a to s modelem hydrologickým a modelem hydraulickým. *Hydrologický* model se zabývá povrchovým odtokem na povodí, nebo také efektivním deštěm, a jeho transformací na odtokový hydrogram. Jinými slovy se zabývá odtokem z povodí a způsobem, jakým je transportován k uzavřenému profilu. *Hydraulický model*, který je vázán mezi modely fyzikálními, pracuje s hydrodynamickými rovnicemi a simuluje odtok ve stokové síti (Stránský, Kabelková & kol., 2009).

S obma typy model uvedenými výše se setkáme při simulaci srážko-odtokového procesu na stokové síti. Schéma napojení model je zobrazeno na Obr. 1.



Obr. 1 Schéma řešení srážko-odtokového modelu stokové sítě (Stránský, Kabelková & kol., 2009).

Modely povodí lze dále klasifikovat podle typu simulací na epizodní (*event*) a kontinuální (*continuous*). *Epizodní* modely se využívají pro simulaci krátkodobých událostí (nap. konkrétních srážkových událostí) a jsou vhodné pro návrh infrastruktury mstského odvodnění. *Kontinuální* modely slouží k celkovému popisu chování povodí vase a využívají se pro dlouhodobé plánování infrastruktury. Jsou ovšem náročné na data, protože je potřeba je zatížit dostatečně dlouhou historickouadou dešť (Zoppou, 2001).

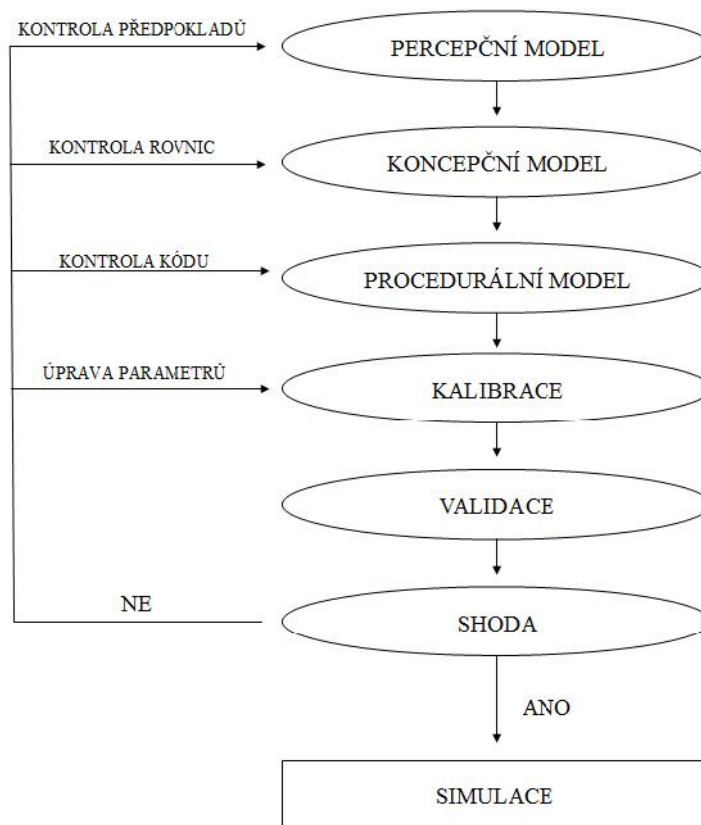
Výše uvedené modely představují pouze základní rozdělení, které je pro tuto práci dostačující. Široký pohled typologie modelů užívaných v hydrologii sepsali Jajarmizadeh, Sobri & Salarpour (2012).

2.2 TVORBA MODELU

Model jako takový je pouze „zjednodušená reprezentace části přírodního nebo umělého formovaného světa, která má za reprodukovat některé z jeho charakteristik“ (Dooge, 1986), a tak nikdy nelze namodelovat proces přesně. Vtšinou se v literatuře setkáváme s tím, že na počátku každého modelu stojí určitá definice výpočetní úlohy. Beven (2001) navíc do procesu zavádí jistý nultý bod, kterému říká *percepční model*. Tímto pojmem zavádí předpoklady srážko-odtokového procesu na povodí, tedy zamyšlení nad tím, jaké srážky se na povodí vyskytují a jakou očekáváme reakci povodí. Percepční model je čistě individuální

a liší se u každého podle nabytých zkušeností. Pestože nemá žádné hmatatelné a podložené výsledky, a v literatu e se asto nevyskytuje, je to jeden z nejd ležit jších krok p i tvorb modelu, protože dává tv rci modelu jistý nadhled nad asto složitým a komplexním problémem (Beven, 2001).

Proces modelování dále pokračuje matematickým popisem percep ního modelu, který Beven (2001) nazývá modelem *konceptuálním*. Konceptuální p ístup p i tvorb hydrologického modelu popisuje také Lee (1993). Jakmile je úloha popsána explicitn , jsou rovnice transformovány do zdrojového kódu (*procedurální model*). Nyní už je model schopen p ijímat vstupy a vypo ítávat výstupy. Vstupní data ovšem obsahují prom nné, které se pro každý konkrétní p ípad liší, v pr b hu simulace se m ní nebo se jedná o fyzikální veli iny, které není snadné zm ít; tvar povodí, p dní vláha, hladina podzemní vody, hydraulická vodivost, pórovitost, aj. Proto je nutné každý model *nakalibrovat*, tedy najít takové parametry, které co nejv rohodn ji popisují reálný proces na povodí. Existuje celá ada kalibra ních metod, jejich popis nelze v rozsahu této práce zpracovat. P ehledný soupis kalibra ních metod a p ístup poskytují ve své práci Knapp, Durguno lu & Ortel (1991) nebo také Pechlivanidis & kol. (2011). Metody kalibrace porovnávají Vojinovic & Solomatine (2006), kte í analyzují metodu pokus-omyl, automatickou kalibraci, metodu Code of Good Practice a koncept ekvifinality (detailn popsán Bevenem, 2006). Cílem kalibrace je získat co možná nejlepší shodu dat modelovaných s daty nam enými na povodí. Standardn se pro takové vyhodnocení používají data maximálního pr toku, as jeho výskytu a objem odtoku, p i posuzování funkce odleh ovací komory se také uvažuje tvar k ivky (Novák & Stránský, 2007). Vhodn zvolený soubor nalezených parametr je nutné *verifikovat* na nezávislém souboru nam ených dat. Pokud jsou výsledné odchylky modelovaných a o ekávaných dat uspokojiv malé, je model *p ipraven pro simulace*. Pokud je verifikace neúsp šná, je pot eba se vrátit ke kalibraci a najít vhodn jší parametry modelu. Pokud ani tento krok zp t není úsp šný, je t eba se vrátit ješt dál; chyba se m že vyskytnout již na po átku tvorby modelu a potom je nutné celý proces absolvovat znovu. P ehledné schéma tvorby modelu podle Bevena (2001) je zobrazeno na Obr. 2.

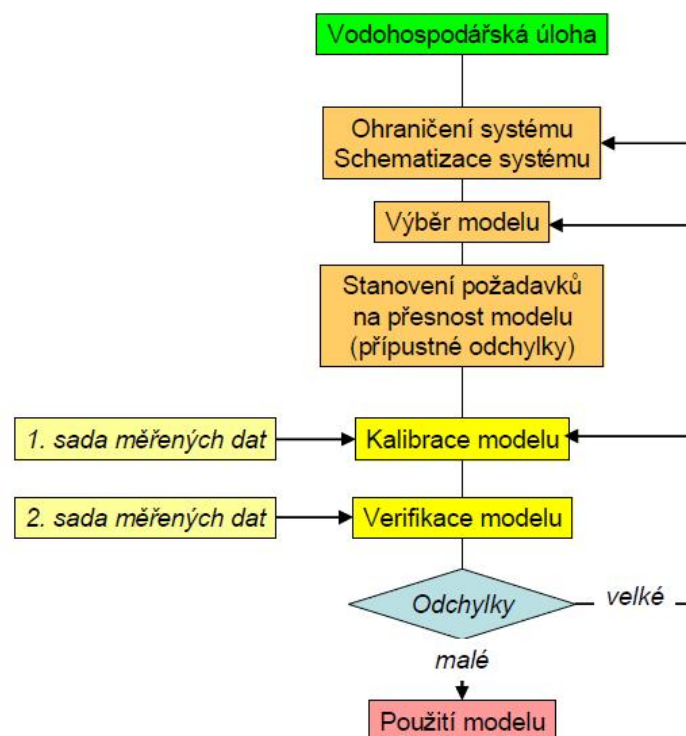


Obr. 2 Schéma tvorby modelu dle Bevena (2001).

Beven (2001) zde popisuje obecný postup procesu tvorby srážko-odtokového modelu. Nkte í auto i používají detailn jší popis, ovšem každý krok je vždy obsažen v n kterém z Bevenových krok .

2.3 MODELOVÁNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÉHO PROCESU

Jednotlivé kroky uvedené v p edchozí kapitole lze aplikovat samoz ejm také p i modelování srážko-odtokového procesu v urbanizovaném území. Detailn jší popis krok osv d ený p i ešení vodohospodá ských úloh vypracovali Stránský, Kabelková & kol. (2009) (Obr. 3) a bude podrobn ji rozpracován v následující kapitole.



Obr. 3 Schéma postupu tvorby modelu v oblasti vodního hospodářství (Stránský, Kabelková & kol., 2009).

2.3.1 Definice úlohy

Stanovení úlohy vyplývá z identifikace problému. Problémem chápeme současný stav, který nevyhovuje a je třeba stanovit určitou představu, která by daný problém vyřešila. V tomto bodě je třeba stanovit cíle a také jasně určit podmínky jejich splnění (Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000).

Odtok na stokové síti lze obecně rozdělit na odtok při bezdeštném stavu a odtok zatížený srážkou. Za bezdeštného stavu se do kanalizační sítě dostávají pouze splaškové vody, které v průběhu dne i sezónně mírně kolísají. Toto kolísání je ale pro účely simulace zanedbatelné, a proto lze uvažovat, že se proudění vase výrazně nemění – jedná se tedy o ustálené nerovnoměrné proudění. Při zatížení srážkou se ovšem v síti začíná vyskytovat změna v hydraulických jevech, proudění může na některých úsecích přejít na tlakové, může se vyskytnout pohyblivý vodní skok – proudění se dostává do neustáleného režimu. (Hlavínek, Mišín & Prax, 2003) MOUSE řeší tento stav simulací jednorozměrného neustáleného proudění za použití Saint-Venantových pohybových rovnic a rovnice kontinuity.

2.3.2 Ohrani ení a schematizace systému

U každé úlohy je potřeba stanovit míru schematizace zájmového území a nároky na data, které vyplývají z definice úlohy a z požadované přesnosti modelu. Při modelování stokové sítě je základní schéma dáno šachtami a objekty, které tvoří uzly sítě. V uzlech může docházet ke změnám geometrie a hydraulických charakteristik; také jsou to místa pro zadání okrajových podmínek. Mezi uzly je vedena síť potrubí. Každý spoj mezi uzly má neměnný směr, sklon, příčný profil a drsnost (Hlavínek, Mišín & Prax, 2003).

Na základní definice úlohy je dále nutné stanovit její časové a prostorové ohraničení, rozhodující prvky a procesy v systému a vstupní a výstupní veličiny (Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000). Významnou úlohu hraje časové a prostorové měřítko úlohy; tedy jaké je časové měřítko modelovaného procesu, srovnatelné s daty a modelem samotného. Na které procesy mohou být například pozorovány a modelovány v krátkodobém měřítku, ale výsledky modelu jsou v měřítku dlouhodobém (např. životnost přehrady). Stanovením měřítka úlohy získáme následně nároky modelu na data (Bloschl & Sivapalan, 1995).

2.3.3 Výběr modelu

Matematické modelování má využití v široké škále oborů. Rozmanitost, kterou modelování nabízí, v sobě ale skrývá i určité komplikace. Pokud se rozhodneme řešit danou úlohu pomocí matematického modelu, je třeba vybrat vhodný typ modelu i simulačního programu. V dnešní době existuje celá řada simulačních programů, které matematické modelování značně usnadní. Je ovšem nutné, aby se uživatel před použitím takového programu pečlivě seznámil s principy a výpočty, které jsou při simulaci použity, a případně konzultoval případové studie zabývající se podobným problémem. Obecně je doporučeno přihlížet při výběru modelu k těmto kritériím: snadnost použití modelu, přesnost modelu, citlivost výstupu na změny v parametrech, teoretické limity modelu a datové limity (Knapp, Durgunolu & Ortel, 1991). Porovnání konkrétních modelů používaných pro simulaci srážko-odtokového procesu nabízí například Zoppou (2001) nebo Elliott & Trowsdale (2007).

2.3.4 Kalibrace a verifikace

Nejdůležitějšími otázkami při kalibraci a verifikaci jsou: Jaká data použít a v jakém množství? Jaké odchylky naměřených a vypočtených dat lze tolerovat? Jaká přesnost modelu je požadována pro dané použití? (Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000) Pokud jsme schopni na tyto otázky odpovědět, hledáme potom takovou sadu parametrů, která vede k nejmenším možným odchylkám (podrobněji viz následující kapitola). Nalezená sada parametrů je poté ověřena verifikační sadou dat. Modely urbanizovaných povodí jsou kalibrovány pod zatížením srážkovými událostmi. Kalibrační a verifikační sady dat by měly pokrýt všechny možné varianty vstupních dat, které mohou v povodí nastat; tedy bezdeštné období, dlouhotrvající méně intenzivní srážka i krátká významně intenzivní srážka. Stránský, Kabelková & kol. (2009) doporučují použít pro kalibraci stokové sítě alespoň 2-3 nezávislé srážkové události a pro verifikaci potom minimálně 2 srážkové události.

Kalibrací rozumíme doladění modelu do takové podoby, aby co nejlépe simuloval reálnou síť. Toho docílíme úpravou parametrů, které není snadné, nebo je vůbec nelze, změnit. Před kalibrací je nutné si uvědomit, které parametry modelu mají vliv na odtok a které z nich jsou pro nás neznámé (a jaký mají tyto parametry na odtok úinek). Může se jednat o parametry drsnosti, tvaru povodí, hodnot hydrologických ztrát na povodí atd. (Hlavínek, Mišín & Prax, 2003). S hydrologickými ztrátami povodí a tvarem povodí souvisí parametry redukční faktor a čas koncentrace povodí, které se při modelování odvodnění urbanizovaných povodí často kalibrují. Jedná se o parametry charakterizující vlastnosti povodí, které nelze přímo změnit. Redukční faktor udává, jaké množství vody, spadlé na povodí v podobě srážky, je odvedeno stokovým systémem a čas koncentrace je vlastnost povodí udávající nejdelší dobu pohybu částice vody z povodí do uzavřeného profilu (Hrádek & Kuřík, 2008).

2.4 KRITÉRIA POUŽÍVANÁ PRO VYHODNOCENÍ VÝKONNOSTI MODELU

Pro vyhodnocení výkonnosti modelu se používá statistické vyhodnocení a grafické porovnání simulovaných a měřených hodnot v podobě grafů a scatter grafů. Při simulaci odvodnění stokové sítě jsou pro kalibraci důležité parametry celkového objemu odtoku, maximální hodnoty průtoku, času výskytu maximální hodnoty průtoku a tvaru hydrogramu. Pro vyhodnocení přesnosti modelovaných

parametr se potom používají statistické funkce. V následující tabulce (Tab. 1) je uveden výčet vybraných užívaných statistických metod společně s metodami užívanými při simulaci v MOUSE.

Tab. 1 Přehled kritérií používaných pro vyhodnocení výkonnosti modelu (Krause, Boyle & Bäse, 2005; Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000; Stránský, Kabelková & kol., 2009; Novák & Stránský, 2007; DHI, 2012c).

statistická metoda a výpočet	význam
<p>relativní odchylka (RE)</p> $RE = \frac{y_{sim} - y_{ref}}{y_{ref}}$ <p>(1)</p>	Poměrný rozdíl mezi simulovanou a referenční hodnotou.
<p>standardní kvadratická odchylka relativních reziduí (RMSE)</p> $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{sim,i} - y_{ref,i})^2}{n}}$ <p>(2)</p>	Vyhodnocení podobnosti tvaru hydrogramu. Přesnost výpočtu vzhledem k referenčním hodnotám (ovlivněna mocninami jednotlivých velkých odchylek).
<p>koeficient determinace (Nash-Sutcliffe) (E)</p> $E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{ref,i} - y_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{ref,i} - \tilde{y}_{ref,i})^2}$ <p>(3)</p>	O kolik je daný model lepší, než kdyby byla predikovaná hodnota modelována pomocí standardní odchylky proměnné.
<p>průměrná odchylka (AE)</p> $AE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left \frac{y_{sim,i} - y_{ref,i}}{y_{ref,i}} \right $ <p>(4)</p>	Přesnost výpočtu vzhledem k referenčním hodnotám.
<p>porovnání maxima/minima (Max/Min Value)</p> $Max\ Value = \left \max(y_{sim}) - \max(y_{ref}) \right $ $Min\ Value = \left \min(y_{sim}) - \min(y_{ref}) \right $ <p>(5)</p>	Porovnání maximálních/minimálních hodnot simulované a referenční řady (dané extrémny se nemusí vyskytovat ve stejném řádku).

statistická metoda a výpočet	význam
<p>průměrná hodnota (Average Value)</p> $Average Value = \left \frac{\sum_{i=1}^n y_{sim}(t_{sim,i} - t_{sim,i-1})}{t_{sim,n} - t_{sim,1}} - \frac{\sum_{i=1}^n y_{ref}(t_{ref,i} - t_{ref,i-1})}{t_{ref,n} - t_{ref,1}} \right $ <p>(6)</p>	Rozdíl průměrných hodnot simulované a referenční asové ady. Každá průměrná hodnota je pořízena v závislosti na délce asového kroku.
<p>relativní chyba maxima (Peak Error) [%]</p> $Peak Error = \left 1 - \frac{\max(y_{sim})}{\max(y_{ref})} \right \cdot 100$ <p>(7)</p>	Relativní chyba maximálních hodnot simulované a referenční asové ady (dané extrémy se nemusí vyskytovat ve stejném asu).
<p>chyba doby dosažení maxima (Peak Time Error)</p> $Peak Time Error = \left t_{sim, \max(y_{sim})} - t_{ref, \max(y_{ref})} \right $ <p>(8)</p>	asová vzdálenost maximálních hodnot simulované a referenční asové ady.
<p>chyba objemu (Volume Error) [%]</p> $Volume Error = \left 1 - \frac{volume(y_{sim})}{volume(y_{ref})} \right \cdot 100$ <p>(9)</p>	Procentuální odchylka objem asových ad.

Význam zkratk: y_{sim} je simulovaná hodnota, y_{ref} je referenční hodnota, \bar{x} je střední hodnota dané veličiny, $\max(x)$ je maximální hodnota dané veličiny, $\min(x)$ je minimální hodnota dané veličiny, n je počet posuzovaných dešových událostí, t je asový krok a $volume(y_{sim})$ je celkový objem asové ady.

Kalibraci a verifikaci můžeme považovat za úspěšnou, pokud mají výše uvedené odchylky přijatelnou hodnotu. Tolerovaná velikost odchylek není nikde pevně stanovena, vyplývá z přesnosti vstupních dat a z charakteru úlohy a modelu. Některé auto i ovšem doporučí hodnoty, které lze při modelování stokových sítí tolerovat (Tab. 2). Další doporučené hodnoty nabízí WaPug (2002).

Tab. 2 Doporučené hodnoty kritérií.

parametr	kritérium	doporučená hodnota	zdroj
Q_{max}	RE	+25 % až -15 %	Saul, 1996
V	RE	+20 % až -10 %	Saul, 1996
h (při tlakovém proudění)	RE	+0,5 až -0,1 m	Saul, 1996
t_{max}	chyba doby dosažení maxima	< 5 min.	Stránský, Kabelková & kol., 2009
Q, Q_{max}, t_{Qmax}	AE	< 10 % při kalibraci < 30 % při verifikaci	Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000

Význam zkratk: v je objem, Q_{max} je maximální průtok, h je hloubka vody, t_{Qmax} je čas dosažení maximálního průtoku, t_{max} je čas dosažení maxima, Q je průtok, n je počet posuzovaných událostí.

Míra odchylky je úzce svázána se všemi kroky, které předcházejí kalibraci a verifikaci. Hodnoty odchylek, které indikují špatné výstupy modelu, mohou být důsledkem špatného nastavení parametrů, nekvalitních vstupních a systémových dat, nevhodnou matematickou formulací procesu nebo špatným výběrem typu modelu. Pokud při kalibraci a verifikaci neustále dochází k chybám, je nutné od kalibrace ustoupit a opravit chyby v předchozím kroku tvorby modelu (Novák & Stránský, 2007; Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000; DHI, 2012c).

2.5 NEJISTOTY V SIMULAČNÍCH MODELECH A DATOVÉ POTŘEBY MODEL

2.5.1 Nejistoty

Při vyhodnocování výkonnosti modelu je potřeba brát v úvahu nejistoty, které jsou s modelováním úzce spojené. Žádný model totiž není přesným popisem probíhajících procesů. Jak bylo uvedeno výše, systém je třeba schematizovat a zjednodušit tak, aby mly výsledky dostatečně vypovídající hodnotu, ale aby byly zároveň výsledné simulace časově a finančně únosné. Díky tomu je tedy nutné vyhodnotit, s jakou jistotou je schopen daný model reprezentovat realitu. Freni, Mannina & Viviani (2009) rozdělují nejistoty do tří skupin: nejistoty spojené se vstupními daty, nejistoty spojené s parametry modelu a nejistoty plynoucí z nedostatečného popisu systému (nejistoty struktury modelu). Pechlivanidis & kol. (2011) dále popisují přirozené (přirozené) nejistoty.

Přirozené nejistoty vyplývají z náhodných přirozených událostí, které neustále způsobují kolísání veličin ovlivňujících fyzikální procesy při odtokovém procesu. Strukturální nejistoty jsou způsobeny matematickou reprezentací hydrologických procesů, která je dána naším pochopením hydrologického systému. Daný hydrologický systém můžeme pochopit pouze na základě dat, které o systému nashromáždíme. Díky tomu jsou často nepozorované (nezaměřené) procesy ignorovány, a tím jsou do modelu vneseny právě strukturální nejistoty. Pro tuto práci jsou zásadní nejistoty spojené se vstupními daty, která mají dále vliv parametrické nejistoty. I model, který má k dispozici časové řady srážek, průtoků a hladin na síti je zatížen nejistotami, protože nepřijímá informace o veličinách v určitém časovém kroku a hodnoty mezi měřeními jsou v podstatě neznámé. S kratším časovým krokem měření tyto nejistoty klesají, ale stále to není plná kontinuální informace o dění v systému. Pokud některé informace nejsou k dispozici vůbec (v našem případě informace o průtocích), jsou tyto nejistoty o to vyšší (Pechlivanidis & kol., 2011).

Problematika stanovení nejistot při modelování je velice široké téma, které bylo předmětem zkoumání mnoha autorů. Porovnání technik stanovení nejistot poskytuje Dotto & kol. (2012). Jako příklady nástrojů pro stanovení a redukci nejistot lze uvést metody GLUE – Generalised likelihood uncertainty estimation (Beven & Binley, 1992), MME – Multi-model ensemble method (Liu and Gupta,

2007), BATEA – Bayesian total error analysis (Kavetski & kol., 2006), IBUNE – An integrated bayesian uncertainty estimator (Ajami, Duan & Sorooshian, 2007) i FUSE – Framework for understanding structural errors (Clark & kol., 2008). Příklady stanovení nejistot při modelování srážko-odtokového procesu nabízí Breinholt & kol. (2012).

2.5.2 Nároky na data a monitoring

Simulace modelů metského odvodnění vyžadují tři skupiny dat: vstupní data, systémová data, hodnoty modelových konstant a parametrů a data pro kalibraci a verifikaci modelu. Vstupními daty jsou hodnoty veličin relevantních při simulaci – srážky, množství a složení odpadní vody, atd. Vstupní data mohou být proměnná nebo konstantní, na rozdíl od parametrů, které se liší s každou aplikací. Systémová data slouží k popisu povodí a odvodňovacího systému a data pro kalibraci a verifikaci jsou data měřená v systému (Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000).

Z předchozí kapitoly jasně vyplývá, že čím podrobněji chceme pochopit modelovaný systém, tím více dat potřebujeme. Knapp, Durgunolu & Ortel (1991) kladou při modelování srážko-odtokových procesů velký důraz na spojitá data, která poskytují při kalibraci možnost porovnání jak hodnot veličin, tak i tvaru křivky. Může se jednat o veličiny jako vlhkost půdy, povrchový odtok, průtok korytem nebo hladina na pevné komoře. Spojitá data mají při kalibraci modelu mnohem větší vypovídající hodnotu, než porovnání bodových parametrů, jako je maximální průtok a proteklý objem.

Získání a oprava dat je nejnákladnější částí tvorby modelu. Je tedy nutné pro každou úlohu pečlivě zvážit, jaké očekáváme výstupy, jaká bude jejich přesnost a jaké máme finanční prostředky k vyřešení takové úlohy. Data pro kalibraci a verifikaci modelu je nutné získat monitoringem, který je navržen konkrétně pro potřeby daného modelu. Ostatní data je často možné získat od institucí, které v dané lokalitě potřebné údaje pravidelně měří – toto se týká například dat dlouhodobých měření, geodetického zaměření oblasti i tematických vrstev GIS. časové a finanční náklady na monitoring tvoří podstatnou položku při získávání dat (Tab. 3). V rámci monitorovací kampaně je nutné správně vytipovat lokalizaci měřných profilů, instalovat a spravovat přístroje, výsledky monitoringu následně přehledně zpracovat

a data upravit do formy finálních časových řad. Výsledky monitorovací kampan následně slouží jako podklad pro pochopení proces probíhajících v zájmovém území a hlavně pro kalibraci a verifikaci vytvořeného modelu území (Kabelková, Zeman & Krejčí, 2000).

Tab. 3 Hrubý odhad nákladů na získání měřicích dat pro kalibraci a verifikaci hydrodynamického simulacího modelu stokové sítě v malém městě (zdroj: DHI)

přístroj	počet přístrojů	celkové náklady (tis. Kč /3 m s.)
srážkoměr	3	80 – 120
průtokoměr	4	620 – 780
hladinoměr	4	290 – 450
celkové náklady		990 – 1350

3 METODIKA

V roce 2008 uveřejnili Rasmussen & kol. studii, ve které zjišťují, zda je možné získat v rozhodný model kalibrační redukčního faktoru, pouze za použití časových záznamů o padech na odlehovacím komoře (Rasmussen, Thorndahl & Schaarutp-Jensen, 2008). Jedná se o metodu kalibrace na jednoduchých datech získaných z levného monitoringu pepadů na odlehovacím komoře. Ve své studii kalibrují model stokové sítě MOUSE malého města Frejlev v Dánsku. Veškeré parametry modelu sítě nechávají na defaultních hodnotách a upravují pouze redukční faktor povodí. Při kalibraci dojdou k závěru, že model nelze zkalibrovat pouze na základě úprav redukčního faktoru, protože model nepracuje správně z hlediska kinematiky. Před kalibrací sítě redukčním faktorem proto kalibrují nejprve model povrchového odtoku a následně ztráty tání v síti. Model kalibrují na čtyřech dešových událostech a verifikují na dvou dešových událostech. Kalibrační získají hodnotu velmi blízkou hodnotě, kterou získali při plnohodnotném měření na stokové síti při zatížení 293 dešovými událostmi. V závěru práce uvádí, že pro různé dešové události je třeba použít různé redukční faktory.

V rámci projektu Generel odvodnění Ostrava provedla firma DHI, a.s. měřicí kampaň na stokové síti města Ostrava. Kampaň probíhala v období duben- červenec 2012 a získaná data byla použita pro kalibraci modelu odvodnění města. Na základě vytvořeného modelu MOUSE byla prozkoumána metoda uvedená v článku Rasmussen & kol. (2008). Pro další ověření byl dále použit model stokové sítě města Uničov vytvořený na základě měřicí kampaň v roce 2001.

3.1 MODEL MOUSE

MOUSE (MOdel for Urban SEwers) je softwarový balíček pro vytváření simulací modelů povrchového odtoku, průtoku, kvality vody a transportu sedimentů v urbanizovaném území. MOUSE byl vyvinut Dánským hydraulickým institutem (Danish Hydraulic Institute – DHI) v roce 1983 pro potřeby modelování s relativně nízkými nároky na techniku.

Při simulaci popisované v této práci byly použity dva základní moduly MOUSE – modul povrchového odtoku a hydrodynamický modul. První uvedený eš

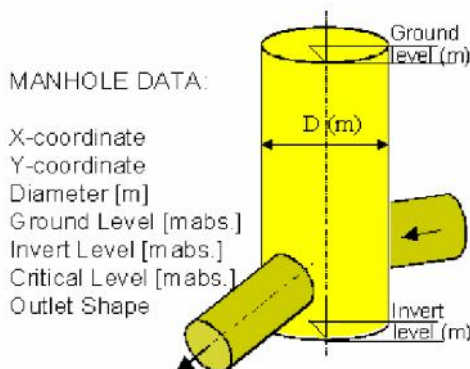
odtok z urbanizovaného povodí a vytváří v každém uzavřeném profilu hydrogram daného povodí. Hydrogramy vytvořené v této fázi simulace následně vstupují do výpočtu hydrodynamického modulu jako okrajová podmínka. Hydrodynamický modul poskytuje po zkalibrování informace o průbahu hladin, průtoku a rychlosti v síti a kontinuální bilanci objemu vody.

3.1.1 Charakteristiky vybraných prvků MOUSE

Numerický model MOUSE používá pro schematizaci systému čtyři základní skupiny prvků: uzly, spoje, funkce a identifikovatelné struktury. Uzly a spoje se dále dělí podle charakteristiky na konkrétní objekty, funkce popisují chování těchto objektů a identifikovatelné struktury popisují časově proměnné operace na objektech. Níže jsou uvedeny charakteristiky vybraných prvků použitých při simulacích v této práci.

3.1.1.1 Uzel

Uzel je objekt napojený na konec spoje. Každý spoj má právě dva uzly. Podle umístění v systému může být uzel propojený s jedním či více spoji. Každý uzel je definován souřadnicemi, identifikačním číslem a typem. Každý typ uzlu (viz níže) má dále odlišné charakteristiky.



Obr. 4 Schéma šachty (DHI, 2012a).

Šachta (Obr. 4) je defaultní nastavení nově vytvořeného uzlu. Jedná se o vertikální válec s následujícími parametry (Tab. 4):

Tab. 4 Povinné parametry šachty.

parametr	popis
Ground level [m n. m.]	kóta dna
Bottom level [m n. m.]	kóta povrchu
Diameter [m]	pr m r šachty
Outlet shape	tvar odtoku (dev t r zných typ) pot ebný pro výpo et ztrát v uzlu

Parametry šachty slouží k výpo tu výšky hladiny p i daném pr toku a k p ibližnému ur ení ztráty energie v uzlu. Rychlost proud ní v uzlu je dána výpo tem:

$$v = \frac{Q}{(H - H_{bott}) \cdot D} \quad (10)$$

kde H [m n. m.] je kóta hladiny, H_{bott} [m n. m.] je kóta dna šachty, Q [m³/s] je pr tok a D [m] je pr m r šachty. Pr to ná plocha vypo tená ve jmenovateli rovnice (10) je pouze zjednodušeným výpo tem, který p edpokládá stejný sm r odtoku jako nátoku, a tím je snížena reálná hodnota ztrát v šacht . Pro šachty s jedním nátokem a jedním odtokem je možné použít p esn jší formulaci pr to né plochy, která je popsána v referen ním manuálu MOUSE (DHI, 2012a).

Nádrž je typ uzlu, který zahrnuje objekty r zných tvar a velkých objem – šachty jiného tvaru než válce a nádrže (i p írodního charakteru); pat í sem tedy i odleh ovací komory. Parametry pot ebné pro charakteristiku nádrže jsou geometrie a typ (tvar) odtoku. Geometrie nádrže je zaznamenána v databázi, kde je pro danou výšku H uvedena plocha p í ného profilu A_c a plocha podélného profilu A_s (první ádek charakterizuje dno a poslední geometrii na povrchu, hodnoty mezi definovanými body jsou lineárn interpolovány).

Výus je uzel, kde se systém dostává do kontaktu s recipientem. P edpokládá se, že objem recipientu je tak velký, že hladina ve výusti není ovlivn na odtokem ze sít . V závislosti na pr toku ve spoji p ed výustí a hladinou ve výusti m že dojít k proud ní v opa ném sm ru (od výusti do systému). Výus lze také definovat jako volnou, kdy není spoj nad výustí nikdy ovlivn n výškou její hladiny. Výus je charakterizována kótou dna a kótou hladiny ve výusti.

3.1.1.2 Spoj

Spoj je p ímý úsek, který spojuje dva uzly. Je definován jako 1D potrubí s konstantním p íným profilem, sklonem a Manningovým íslem. M že být otev ený (kanál) nebo uzav ený (potrubí). Parametry pot ebné pro charakteristiku spoje jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 Povinné parametry spoje.

parametr	popis
From-To	definování krajních bod spoje
Shape/CRS ID	p íný profil spoje – p edefinované standardní typy (kruh, vejce, obdélník, ovál) nebo definováno uživatelem v databázi CRS (lze definovat otev ený/uzav ený profil daný X-Z/H-W (výška-ší ka) sou adnicemi
UpLewel/DwLevel	nadmo ská výška dna krajních bod – MOUSE dopo ítá parametry podélného profilu (sklon, délka potrubí)
Material	materiál potrubí – na základ materiálu je následn p ipojeno Manningovo íslo (p edefinováno v MOUSE nebo ru n zadáno uživatelem)

Na základn definovaného p íného profilu jsou následn dopo ítány hodnoty pot ebné pro hydraulické výpo ty. Pro každý profil je vytvo ena tabulka se závislostí relativní výšky (hladiny), ší ky profilu, pr to né plochy a hydraulického polom ru.

3.1.1.3 Funkce

Funkce p epadu s volnou hladinou se používá pro charakteristiku odleh ení z odleh ovací komory. P i tomto výpo tu se p edpokládá, že hloubka hladiny podél p epadové hrany je konstantní. Pokud nelze tento p edpoklad splnit, je nutné použít funkci pro dlouhý p epad (více v DHI, 2012a). P epadová hrana m že být definována v šacht nebo v komo e (ne na výusti). Pro výpo et funkce je pot eba zadat následující parametry (Tab. 6):

Tab. 6 Povinné parametry funkce.

parametr	popis
From	uzel, ve kterém je umístěn na hrana
To	uzel, do kterého ústí spoj pod odlehovací komorou; tento uzel je v tšinou definován jako výus (může zstat nevyplněn – v případě odtoku ze systému)
Q/H Relation	Q-H křivka – vztah mezi výškou hladiny a korespondujícím průtokem (definována ve speciální tabulce a připojena k odlehovací komoře); první hodnota H je kóta přepadové hrany, poslední by neměla být nižší než maximální předpokládaná hloubka vody vstupující do výpotu
Crest level	kóta přepadové hrany
Crest width	šířka přepadové hrany
Orientation	orientace hrany vzhledem k směru proudění (90° pro přímý přepad, 0° nebo níže pro přepad)
Weir type	tvar přepadové hrany
Discharge coefficient	koeficient odtoku

Pro výpočet průtoku nad přepadovou hranou je možné použít dvě cesty: definovat vztah Q-H křivkou nebo použít předdefinovaný výpočet přepadu. Pokud definujeme Q-H křivku, není již potřeba definovat parametry přepadové hrany ani koeficient odtoku. Výpočet definovaný v MOUSE dále nabízí dvě metody získání odtoku v závislosti na znalosti odtokového koeficientu. Pokud získáme hodnotu koeficientu nevyplněna, je průtok vypočítán na základě koeficientu ztráty energie a orientace přepadové hrany (konkrétní rovnice viz DHI, 2012a). V případě, že je koeficient odtoku definován uživatelem, je průtok získán standardním výpočtem pro přepad:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}}, \quad (11)$$

kde μ je součinitel odtoku, B [m] je šířka přepadové hrany a h [m] je hloubka vody přepadu (DHI, 2008; DHI, 2012a).

3.1.2 Modul povrchového odtoku „Runoff“ - „Time/Area Method“

Matematický model MOUSE poskytuje pro výpočet povrchového odtoku čtyři různé výpočetní přístupy – „Time/Area Method“, „Non-linear Reservoir (kinematic wave)

Method“, „Linear Reservoir Method“ a „Unit Hydrograph Model“. Každá z uvedených metod je určena pro výpočet hydrogramu povodí. Jednotlivé výpočty se ovšem liší, stejně tak jako použité parametry a požadavky na vstupní data, a proto se liší i výsledky jednotlivých metod. Je tedy nutné pochopit pozadí výpočtů i daných metodách a posléze vybrat pro konkrétní případ tu nejvhodnější. V této práci byla aplikována metoda „Time/Area“, která je detailněji popsána níže.

3.1.2.1 Parametry modulu „Runoff“

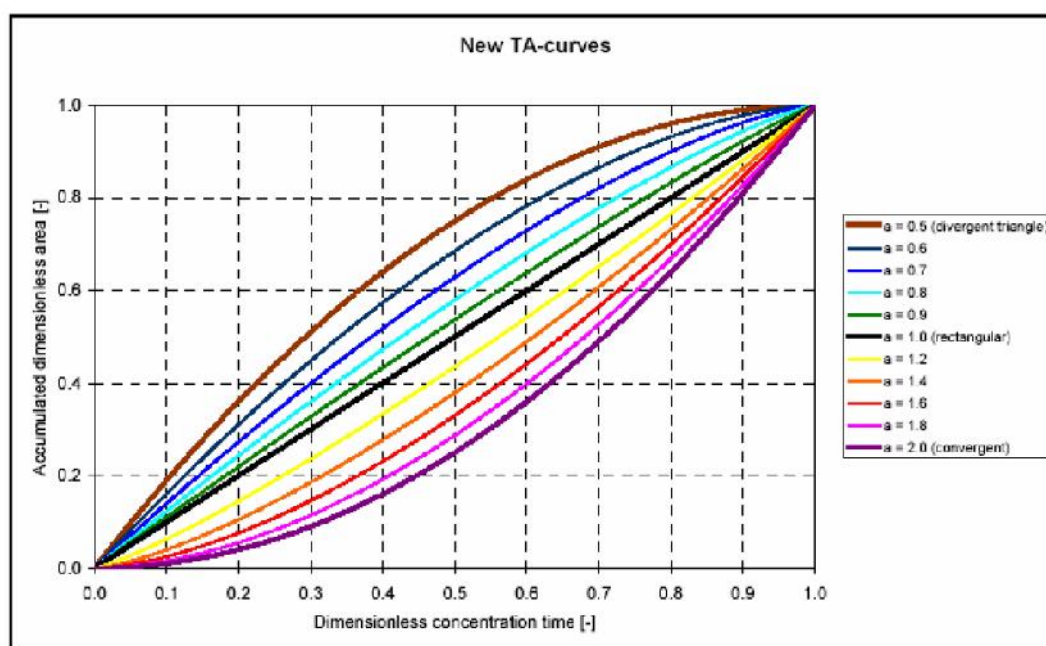
Pro výpočet povrchového odtoku je nutné do modelu zadat charakteristiky povodí a hydrologické parametry oblasti, které mají vliv na výsledný objem odtoku a tvar hydrogramu. Celkový objem odtoku je ovlivněn počátečními ztrátami na povodí, velikostí zájmového území a kontinuální hydrologickou ztrátou. Tvar hydrogramu se mění na základě rychlosti odezvy a tvaru povodí. Pěhled použitých parametrů je uveden v Tab. 7.

Tab. 7 Parametry odtokového modelu "Time/Area".

parametr	popis
Location	číslo bodu, na který je povodí napojeno
X-/Y- co-ordinates	souřadnice povodí pro účely připojení srážkových úrad – defaultně nastaveny na souřadnice bodu napojení, lze použít i souřadnice centra povodí
Catchment Area [ha]	velikost povodí
Inhabitants	počet obyvatel na povodí
Additional flow [m³/s]	konstantní přítok na povodí
Impervious area [%]	procento nepropustných ploch na povodí
Initial Loss [m]	počáteční ztráty – hodnota srážkového úhrnu, který je nutný pro vznik povrchového odtoku (defaultně $6 \cdot 10^{-4}$ m)
Hydrological Reduction	redukční faktor povodí – koeficient, který udává podíl objemu srážek doteklého do stokové sítě a celkového objemu srážek (defaultně 0.9)
Time/Area Curve	čivka udávající tvar povodí; lze zvolit obdélníkový, konvergentní (směrem k uzavřenému profilu se zužuje) a divergentní (směrem k uzavřenému profilu se rozšiřuje) tvar, možno upravit pomocí souřadnic tvaru povodí

parametr	popis
Time/Area Coefficient	souinitel tvaru povodí (v intervalu (0,1) divergentní tvar; v intervalu $\langle 1, \infty \rangle$ konvergentní tvar) (viz dále)
Concentration Time [min]	čas koncentrace povodí – nejdelší doba doba, kdy částice vody z povodí do uzavřeného profilu (Hrádek & Kuřík, 2008) (defaultně 7 min.)

Souinitel tvaru povodí je koeficient, který lze využít, pokud chceme tvar vyjádřit přesněji, než jen představenou křivkou (tedy konvergentní, divergentní a obdélníkový tvar). Je vyjádřen vztahem mezi bezrozměrným časem koncentrace a bezrozměrnou plochou (TA Curve).



Obr. 5 Variabilní souinitel tvaru povodí. Fialová – konvergentní tvar (TACurve3), hnědá – divergentní tvar (TACurve2) a černá – obdélníkový tvar (TACurve1) (DHI, 2012b).

3.1.2.2 Okrajové podmínky modulu „Runoff“

Vstupní okrajovou podmínkou je v modulu „Runoff“ srážka. Srážka v MOUSE je dána časovou řadou intenzity deště a její časový krok je shodný s časovým krokem Δt výpočtu. Časový krok vstupní řady se ovšem může lišit podle zdroje dat, proto je každá řada diskretizována podle Δt tak, že je zachován objem srážky. Pokud je v oblasti k dispozici více srážkoměrů, model vybere data z toho nejbližšího.

3.1.2.3 Výpočet modulu „Runoff“

Odtok je spojitá proměnná. Pro výpočet odtoku je diskretizován podle časového kroku Δt . Na základě Δt a času koncentrace (TOC – time of concentration) je následně diskretizováno povodí na m dílů celku s rzným časem koncentrace (vytvorí se izochrony). Počet dílů celku je dán výpočtem:

$$m = \frac{TOC}{\Delta t} \quad (12)$$

Výpočet odtoku probíhá v časovém kroku Δt v době, kdy hodnota srážkového úhrnu překročí hodnotu poáteční ztráty. V každém kroku je objem koncentrovaný v dílů celku povodí přesunut do celku následujícího. Celkový objem odtoku jednoho celku je potom dán bilancí, kde je vstupem objem daný srážkou a objem přiteklý z předchozího dílů celku, a výstupem je odtok do následujícího celku. Hydrogram daného povodí je určen odtokem z posledního dílů celku (DHI, 2012b).

3.1.3 Hydraulický modul „Network“

Hydraulický modul „Network“ se používá pro simulaci neustáleného proudění na stokové síti. Výpočet je založen na numerickém řešení 1D proudění s volnou hladinou metodou konečných diferencí (Saint-Venantovy rovnice). Tento výpočet lze použít pro výpočet odtoku u celé škály profilů potrubí, stejně tak jako v prismatických korytech. V případě, že se v průběhu simulace proudění změní na tlakové, je uzavřené potrubí svrchu vybaveno fiktivním otvorem (Preissmannova štrbina), který zmní uzavřený profil na otevřený. Tento profil se vyznačuje takovým tvarem, který přibližně napodobí chování potrubí při tlakovém proudění, a proto je při simulaci využito pouze jedno výpočetní schéma nezávislé na tlakových podmínkách.

3.1.3.1 Poáteční podmínky modulu „Network“

Poáteční hloubka vody vstupující do výpočtu „Network“ v čase $t = 0$ je defaultně nastavena na 0,5 % průměru potrubí, ovšem ne více, než 0,005 m. Parametry proudění jsou dány Manningovým vztahem pro rovnoměrné proudění. Pro realističtější poáteční podmínky je možné použít výsledkový soubor HOTSTART.

Jedná se o soubor, který je výsledkem vzorové simulace proudění v síti. V tomto souboru musí být uloženy výšky hladiny i průtok pro každý výpočetní bod sítě.

3.1.3.2 Okrajové podmínky modulu „Network“

Okrajové podmínky se mohou vyskytnout jak na okraji systému, tak uvnitř. Vnější okrajové podmínky popisují vliv vnějšího prostředí na systém uvnitř zájmové oblasti. Patří mezi ně externí průtok do systému (konstantní i variabilní), vstupní hydrogram, únik vody ze systému (konstantní, časově variabilní nebo daný Q-H křivkou) a objem odčerpávaný ven ze systému. Vnitřní okrajové podmínky popisují podmínky uvnitř systému a patří sem obecné hydraulické podmínky v uzlech a přepravních úsecích, a dále také únik nebo odčerpání, které ústí do bodu uvnitř struktury modelu (DHI, 2012a).

3.1.3.3 Popis nerovnoměrného proudění v potrubí

Nerovnoměrné proudění v potrubí je popsáno pomocí Saint-Venantových rovnic. Předpokládá se, že:

- voda je nestlačitelná a homogenní (hustota je konstantní),
- sklon dna je malý a uvažuje se nepohyblivé dno (kosinus úhlu sklonu vzhledem ke srovnávací rovině lze aproximovat na 1),
- směrem proudění je paralelní se sklonem dna, v proudu je vodorovná hladina, proměnné (Q, h, v) se mění pouze podél podélné osy kanálu,
- vliv tlaku se uvažuje jako při ustáleném rovnoměrném proudění,
- proudění je podkritické (Froudovo číslo < 1).

Základní rovnice pro výpočet proudění jsou rovnice kontinuity (13) a pohybová rovnice (14), kde Q [m^3/s] je průtok, A [m^2] je průřezová plocha, h [m] je hloubka vody, g [m/s^2] je gravitační zrychlení, x [m] je vzdálenost ve směru proudění, t [s] je čas, τ je Boussinesqův součinitel hybnosti (15), i_E je sklon úrovně energie a i_0 je sklon dna.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\boxed{1} \left[\frac{uQ}{ut} + \frac{u}{ux} \left(S \frac{Q^2}{A} \right) \right] + \boxed{2} \left[g \cdot A \frac{uh}{ux} \right] + \boxed{3} \left[g \cdot A \cdot i_E \right] = \boxed{4} \left[g \cdot A \cdot i_0 \right] \quad (14)$$

$$S = \frac{A}{Q^2} \int_A v^2 dA \quad (15)$$

Jedná se o parciální diferenciální rovnice prvního řádu hyperbolického typu, které je nutné řešit numericky (viz níže). Pohybová rovnice se skládá ze čtyř členů: 1 – setrvačné síly, 2 – tlakové síly, 3 – tečící síly, 4 – gravitační síla. Modelování v MOUSE umožňuje všechny typy vstupů k této rovnici. *Dynamická vlna*, použitá při výpočtech v této práci, zohledňuje všechny členy pohybové rovnice a používá se v případě, kdy setrvačné síly hrají významnou roli (malý sklon dna a malé odporové síly). *Difúzní vlna* zanedbává setrvačné síly a její použití je vhodné v případech, kdy jsou dominantní tečící síly a setrvačné síly jsou zanedbatelné. Posledním typem je *vlna kinematická*, která bere v úvahu pouze síly gravitační a odporové a je vhodná pro potrubí s významným sklonem dna. Kinematická vlna není, na rozdíl od dvou předchozích, vhodná pro simulaci vlivu zpevněného vzduší.

3.1.3.4 Řešení tlakového proudění

Řešení Saint-Venantových rovnic lze použít pouze pro proudění s volnou hladinou. Na stokové síti může ale, při zatížení srážkou, běžně docházet i k proudění tlakovému. Aby se předešlo komplikacím při přechodu proudění z jednoho režimu do druhého, používají se Saint-Venantovy rovnice i při tlakovém proudění, potrubí je ovšem opatřeno hypotetickou štrbinou (Preissmannovou štrbinou), ve které hloubka vody stoupá do úrovně tlakové výšky. Tím jsou zachovány údaje o tlaku a zároveň se jedná o proudění s volnou hladinou.

3.1.3.5 Transformace proudění v uzlech

MOUSE definuje spoj jako úsek s konstantním sklonem a příčným profilem, proto lze proudění v potrubí poměrně spolehlivě popsat pomocí výše uvedených rovnic. Ve chvíli, kdy se voda dostane do uzlu, nastane rychlá změna v geometrických i hydraulických parametrech proudění. Tento proces je nutné popsat samostatnými rovnicemi – rovnicí kontinuity (bilance nátoků a odtoků pro různé počet spojených potrubí), rovnicí zachování mechanické energie proudu a rovnicí popisující regulaci

funkci prvku. Pro tuto práci jsou relevantní vztahy pro prvky s reten ní funkcí, pro výtok otvorem a pro p epad p es p elivnou hranu, které jsou uvedeny níže.

Pro *prvky s reten ní funkcí* platí obecn následující rovnice kontinuity:

$$\left(\sum_1^i Q_{in} - \sum_1^j Q_{out} \right) \Delta t - (h_B - h'_B) A_B = 0, \quad (16)$$

kde i je počet nátok do šachty, j je počet odtok, Q_{in} [m³/s] je nátok do šachty, Q_{out} [m³/s] je odtok ze šachty, h_B a h'_B [m] jsou hloubky vody v nádrži vasech t a $t + \Delta t$ a A_B [m²] je p dorys nádrže.

Každý odtokový prvek má dále vlastní uzlovou podmínku. Pro *výtok otvorem* platí rovnice:

$$Q_{out} = -A_{out} \sqrt{2g \left(h_B - \frac{D}{2} \right)}, \quad (17)$$

kde μ je sou initel odtoku, A_{out} [m²] je pr to ná plocha odtoku a D je pr m r odtoku.

Základní rovnice pro *p epad p es p elivnou hranu* je uvedena v kap. 3.1.1 (rovnice (10)).

3.1.3.6 Místní ztráty a ztráty t ením

P i proud ní v potrubí dochází ke ztrátám, které mají za následek klesání áry energie. V potrubí se díky t ecím silám jedná o ztráty konstantní (viz pohybová rovnice (14)), v uzlech dochází v d sledku deformace rychlostního pole ke ztrátám místním, které mají za následek okamžitý pokles energie.

Pro ur ení t ecích sil je pot eba stanovit sklon áry energie, který je spojený s drsností potrubí. V MOUSE je možné definovat drsnost potrubí Manningovým íslem M nebo sou initelem t ení podle Colebrook-Whitea. V prvním p ípad je potom sklon áry energie dán Manningovou rovnicí:

$$i_E = \frac{Q|Q|}{M \cdot A^2 \cdot R} \quad \text{pro} \quad M = \frac{1}{n}, \quad (18), (19)$$

kde n je Manning v souinitel drsnosti, a $[m^2]$ je prtoná plocha a R [m] je hydraulický polom r. V p ípad druhém je sklon áry energie dán Darcy-Weisbachovou rovnicí (20) s použitím iterativní rovnice pro souinitel t ení (21):

$$i_E = \frac{Q^2}{2g \cdot A^2 \cdot R} \quad (20)$$

$$\sqrt{\frac{2}{\lambda}} = 6,4 - 2,45 \cdot \ln \left(\frac{3,3}{Re} \sqrt{\frac{2}{\lambda}} + \frac{k}{R} \right), \quad (21)$$

kde k [m] je ekvivalentní drsnost potrubí a Re je Reynoldsovo íslo. Dále je také možné použít Hazen-Williamsovu rovnici, kterou lze ovšem použít pouze pro vodu a nelze zapoítávat teplotu a viskozitu.

Pro stanovení místních ztrát je v MOUSE možné použít tři p ístupy: „standardní“ p ístup Englund, metodu vážené vstupní energie nebo je možné ztráty ignorovat. u prvního p ístupu se p edpokládá, že hladina vody na vstupu do uzlu a hladina v uzlu jsou stejné. Tato metoda zapoítává ztrátu energie na nátoku do uzlu

E_i (22) a ztráty na odtoku E_j (23), které zahrnují ztráty zp sobené zm nou sm ru proud ní dir , zm nou nadmo ské výšky $level$ a zm nou profilu na odtoku $contr$ (v_i [m/s] je rychlost proud ní na nátoku, v_j [m/s] rychlost proud ní na odtoku a v_m [m/s] je rychlost proud ní v uzlu):

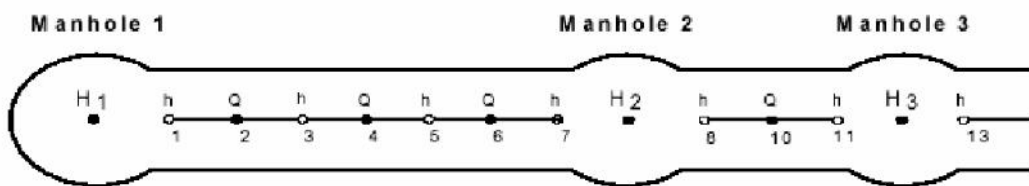
$$\Delta E_i = \frac{v_i^2 - v_m^2}{2g} \quad \Delta E_j = (\kappa_{dir} + \kappa_{level} + \kappa_{contr}) \frac{v_j^2}{2g} \quad (22), (23)$$

Metoda vážené vstupní energie zanedbává energetické ztráty na nátoku do uzlu, a tím je energie v uzlu rovna energii ve spodní ásti vstupního potrubí. Pro šachty s více vstupy je potom energie v šacht vypoítána na základ váženého pr m ru nátok . Tento p ístup lze uplatnit v šachtách s typickým proud ním. Naopak jej nelze aplikovat na šachty s malým nátokem o vysoké rychlosti, kde dochází k výrazným ztrátám na nátoku.

Poslední p ístup, který zanedbává veškeré ztráty v uzlech lze použít například v p ípad pomocného/um lého uzlu na rovné trati, kde prakticky nedochází k žádným ztrátám (DHI, 2012a; Kabelková & kol., 2000).

3.1.3.7 Numerické řešení

Rovnici kontinuity (13) a pohybovou rovnicí (14) nelze řešit explicitně, proto jsou řešeny numericky. MOUSE pro toto řešení využívá metodu konečných diferencí. V celé síti jsou nejprve definovány výpočetní body, ve kterých jsou v každém časovém kroku vypočítány hodnoty průtoku a výšky hladiny. V každém spoji je definován lichý počet výpočetních bodů (minimálně tři) tak, že v okrajových bodech (ušachet) a v každém dalším lichém bodě je vypočtena hladina h a v sudých bodech je vypočten průtok Q ; v uzlech jsou vypočítány hodnoty výšky hladiny (Obr. 6).

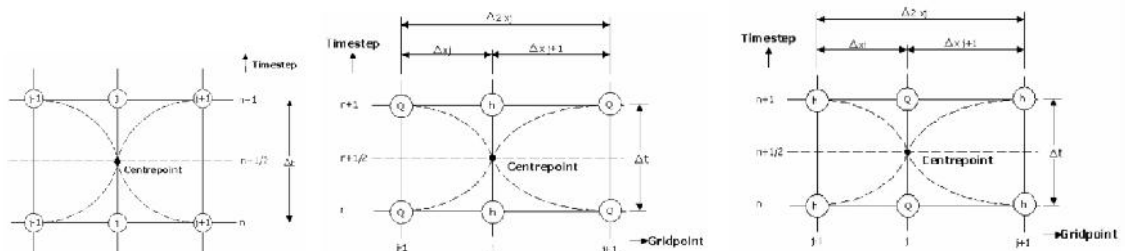


Obr. 6 Výpočetní síť v MOUSE (DHI, 2012a).

Body jsou rozděleny ve stejné vzdálenosti podle vztahu:

$$\Delta x = \frac{l}{N-1}, \quad (24)$$

kde l je délka spoje [m], N je počet výpočetních bodů a x je vzdálenost mezi nimi. Numerické schéma rovnice kontinuity a pohybové rovnice je založeno na centralizovaném šestibodovém Abbottově schématu (Obr. 7). V případě rovnice kontinuity je rovnice centralizována do h -bodu, pohybová rovnice je potom centralizována do Q -bodu.



Obr. 7 Abbotovo schéma a jeho aplikace (DHI, 2012a).

Všechny rovnice použité k popisu procesů v síti jsou sepsané v MOUSE Pipe flow reference manual (DHI, 2012a).

3.2 ZÁJMOVÁ ÚZEMÍ A MODELY

V práci jsou zpracovávána i malá povodí pojmenována Na Pastvinách, Pavlovova a Uni ov. První dvě se nachází na území Ostravy a jsou pojmenována podle umístění odlehovacích komor, třetí povodí je z obce Uni ov, která se nachází asi 20 km severozápadně od Olomouce. Povodí v Ostravě jsou samostatná povodí vyjmutá z rozsáhlého modelu Ostravy. Všechna i povodí mají jednotnou stokovou síť a jsou zakončena odlehovací komorou, na které je analyzován odpad.

Každý model obsahuje dílčí povodí, schematizovanou stokovou síť v podobě spojů (potrubí) a uzlů (šachty, odlehovací komora) a ostravská povodí navíc obsahují i připojení objektů do stokové sítě (zatížení stokové sítě). Každý spoj je definován krajními body, délkou, sklonem, nadmořskou výškou krajních bodů, příčným profilem a materiálem. Každá šachta má i azeny souadnice, průměr a nadmořskou výšku dna a povrchu. Jednotlivé nátoky do sítě jsou definovány jako body připojené do šachty spojem a obsahují informace o souadnicích a hodnotu daného nátoku do sítě v m³/den. Každé povodí je napojeno na šachtu a je definováno plochou, umístěním (souadnice centrálního bodu) a procentem nepropustných ploch.

3.2.1 Zájmové území Ostrava

Ostrava se nachází v mírně teplé klimatické oblasti (Quitt, 1971). Průměrná nadmořská výška města je 227 m n. m., nejvýše položené místo (Krásné Pole) má 336 m n. m. a nejnižší položené místo (Slezská Ostrava) 193 m n.m. Průměrný roční úhrn srážek v oblasti je podle dat HMÚ (2013) 705 mm. Průměrné měsíční úhrny Moravskoslezského kraje jsou uvedeny v Tab.8. Průměrná roční teplota v Ostravě je 8,6 °C (Magistrát města Ostravy, 2013).

Tab. 8 Průměrné měsíční úhrny Moravskoslezského kraje (HMÚ, 2013).

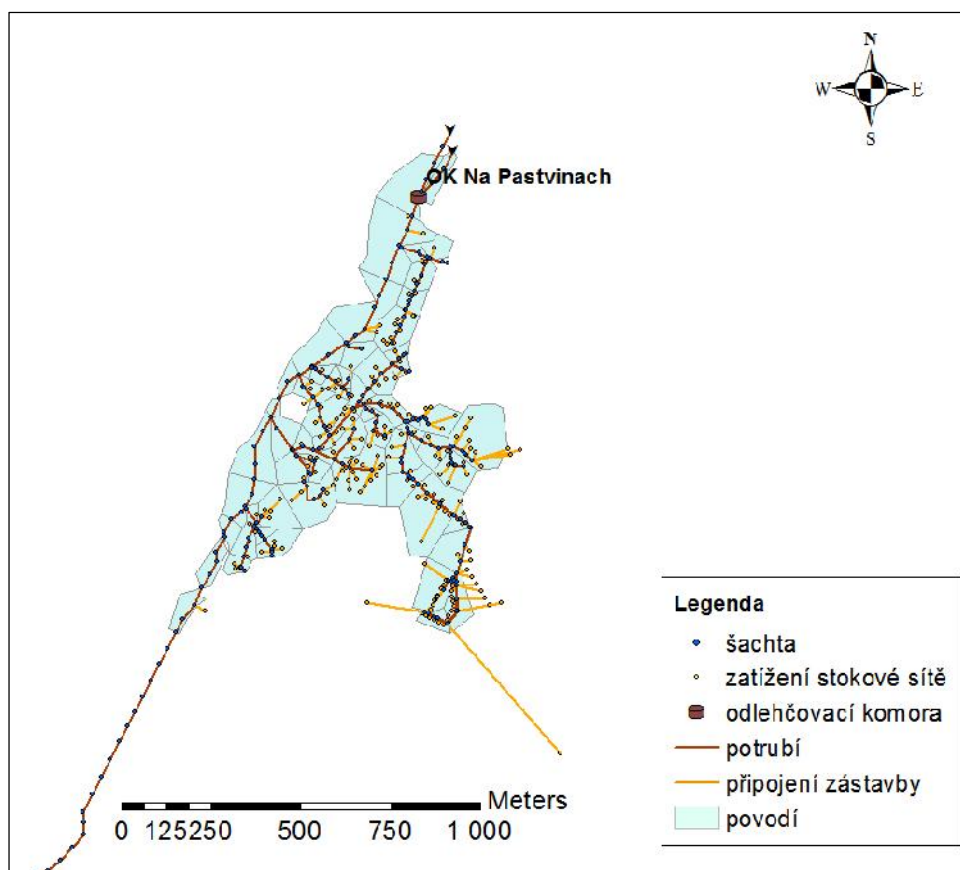
měsíc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
dlouhodobý srážkový normál 1961–1990 [mm]	42	44	43	59	94	108	105	98	63	50	58	52

Ostrava spadá z geomorfologického hlediska do oblasti Severní vn karpatské sníženiny a do celku Ostravské pánve. V p dním profilu p evažují organozem a geologické podloží tvo í hlíny, spraše, písky a št rky (CENIA, 2013a).

V práci jsou zpracovávána dv povodí na území Ostravy. Povodí nazvané Na Pastvinách, které zahrnuje stokovou sí obce Proskovice s napojením obce Stará Ves a povodí nazvané Pavlovova, které zahrnuje stokovou sí oblasti Ostrava-Jih.

3.2.1.1 Povodí Na Pastvinách (Proskovice)

Povodí Na Pastvinách (Obr. 8) má celkovou rozlohu 437 409 m², z toho 9,5 % nepropustných ploch a počet obyvatel obce Proskovice byl ke dni 1.1.2013 1 216 (Ú ad m stského obvodu Proskovice, 2013). Povodí je rozd leno na 57 díl ích povodí napojených na šachty stokové sí . Vybrané statistické údaje o povodí jsou uvedeny v Tab. 9. V P íloze 1 jsou dále uvedeny histogramy p í ných profil , plochy díl ích povodí a sklonitosti díl ích povodí.



Obr. 8 Schéma zájmového povodí Na Pastvinách.

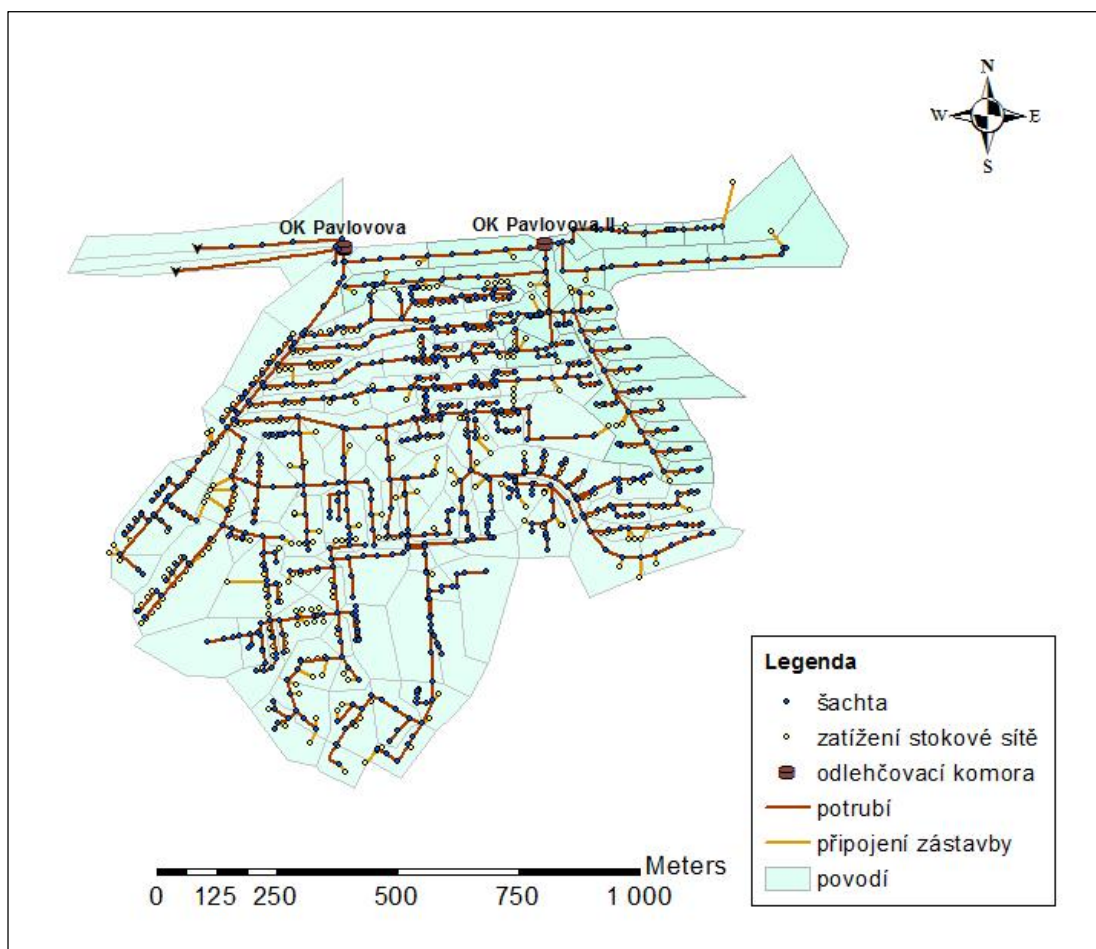
Tab. 9 Charakteristika povodí Na Pastvinách.

	po et	celkem	minimum	maximum	pr m r
díl í povodí – plocha	57	437 409 m ²	1 155 m ²	26 883 m ²	7 674 m ²
potrubí – délka	211	5 865,5 m	0,9 m	98,3 m	27,9 m
potrubí – sklon	211	-	0,06 %	45,16 %	4,65 %
denní množství odpadní vody (24.1.2011)	211	92,4 l m ³ /den	0,00 l m ³ /den	11,90 l m ³ /den	0,44 l m ³ /den
šachty – nadm. výška dna	576	-	216,84 m n. m.	277,71 m n. m.	237,85 m n. m.

Zájmovým územím protéká Mlýnský potok v délce p ibližn 3 km (íslo hydrologického po adí 2-01-01-125), do kterého je zaúst no odleh ení a který se po cca 1 km vlévá do Odry.

3.2.1.2 Povodí Pavlova (Ostrava-Jih)

Povodí Pavlova (Obr. 9) má celkovou rozlohu 1 024 117 m², z toho 39,52 % nepropustných ploch. Povodí je rozd leno na 128 díl ích povodí napojených na šachty stokové sít . Na povodí jsou dv odleh ovací komory – Pavlova a Pavlova II. Na odleh ovací komoru Pavlova II jsou svedeny splašky z 29 díl ích povodí o celkové rozloze 206 623 m² a jsou dále vedeny na odleh ovací komoru Pavlova. Vybrané statistické údaje o povodí jsou uvedeny v Tab. 10. V P íloze 1 jsou dále uvedeny histogramy p í ných profil , plochy díl ích povodí a sklonitosti díl ích povodí.



Obr. 9 Schéma zájmového povodí Pavlovova.

Tab. 10 Charakteristika povodí Pavlovova.

	po et	celkem	minimum	maximum	pr m r
díl í povodí – plocha	128	1 024 117 m ²	142 m ²	30 830 m ²	8 000 m ²
potrubí – délka	729	19 363,1 m	0,5 m	337,7 m	26,6 m
potrubí – sklon	729	-	-3,4 %	93,1 %	2,4 %
denní množství odpadní vody (24.1.2011)	453	1 317,608 m ³ /den	0,002 m ³ /den	65,130 m ³ /den	2,909 m ³ /den
šachty – nadm. výška dna	723	-	222,37 m n. m.	241,64 m n. m.	232,64 m n. m.

Odleh ovací komora Pavlovova je vyúst na p ibližn 1 700 m západn od komory do Odry (íslo hydrologického po adí 2-01-01-156).

3.2.2 Zájmové území povodí Uni ov

Uni ov se nachází v teplé klimatické oblasti (Quitt, 1971). Průměrná nadmořská výška místa je 248 m n. m. Průměrný roční úhrn srážek v oblasti je podle dat HMÚ (2013) 732 mm. Průměrné měsíční úhrny Olomouckého kraje jsou uvedeny v Tab. 11. Průměrná roční teplota Olomouckého kraje je 7,4 °C (HMÚ, 2013).

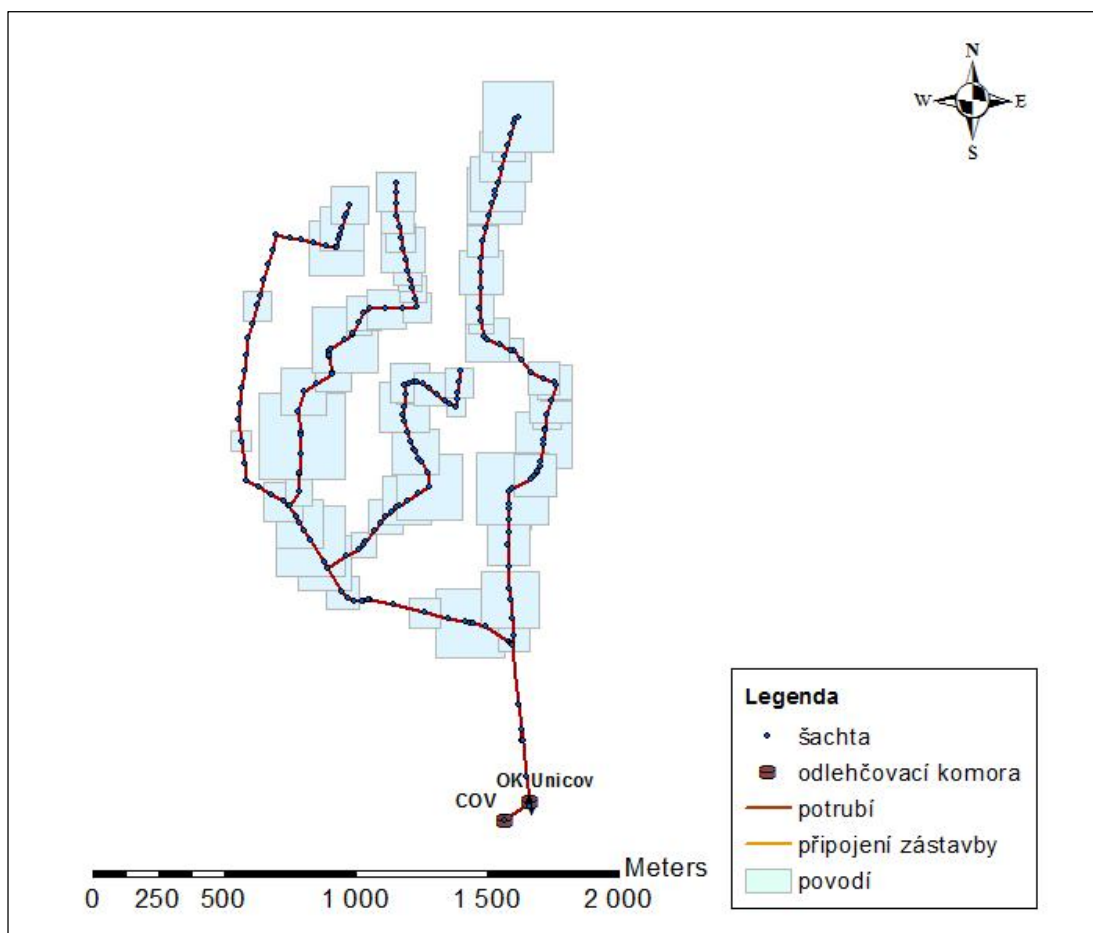
Tab. 11 Průměrné měsíční úhrny Olomouckého kraje (HMÚ, 2013).

m síc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
dlouhodobý srážkový normál 1961-1990 [mm]	42	40	40	49	80	94	90	84	55	48	56	52

Uni ov spadá z geomorfologického hlediska do oblasti Západní vn karpatské sníženiny a do celku Hornomoravského úvalu. V podélném profilu převažují hory a geologické podloží tvoří hlíny, spraše, písky a štěrky (CENIA, 2013a).

Povodí Uni ova (Obr. 10) má celkovou rozlohu 1 792 065 m², z toho 29 % nepropustných ploch a počet obyvatel obce Uni ov byl v roce 2001 12 547. Povodí je rozděleno na 70 dílčích povodí napojených na šachty stokové sítě. Vybrané statistické údaje o povodí jsou uvedeny v Tab. 12. V Příloze 1 jsou dále uvedeny histogramy přírodních profilů, plochy dílčích povodí a sklonitosti dílčích povodí.

Model Uni ova byl zpracován ve starší verzi MOUSE, která nepodporuje grafické znázornění tvaru povodí, proto jsou dílčí povodí vyobrazena jako tvrdce (toto nemá vliv na výpočet).



Obr. 10 Schéma zájmového povodí Uni ov.

Tab. 12 Charakteristika povodí Uni ov.

	po et	celkem	minimum	maximum	pr m r
díl í povodí – plocha	70	1 792 065 m ²	3 343 m ²	107 674 m ²	25 600 m ²
potrubí - délka	221	9 068,7 m	1,2 m	132,7 m	41,0 m
potrubí – sklon	221	-	-0,5 %	20,6 %	0,5 %
denní množství odpadní vody	12 547 obyvatel	2 070,255 m ³ /den	3,795 m ³ /den	124,410 m ³ /den	0,165 m ³ /EO/den
šachty – nadm. výška dna	212	-	230,78 m n. m.	236,07 m n. m.	232,91 m n. m.

Uni ov na východ obtéká eka Oskava (íslo hydrologického po adí 4-10-03-057), do které na jihu zájmového území vyús uje odleh ovací komora.

3.3 VSTUPNÍ DATA

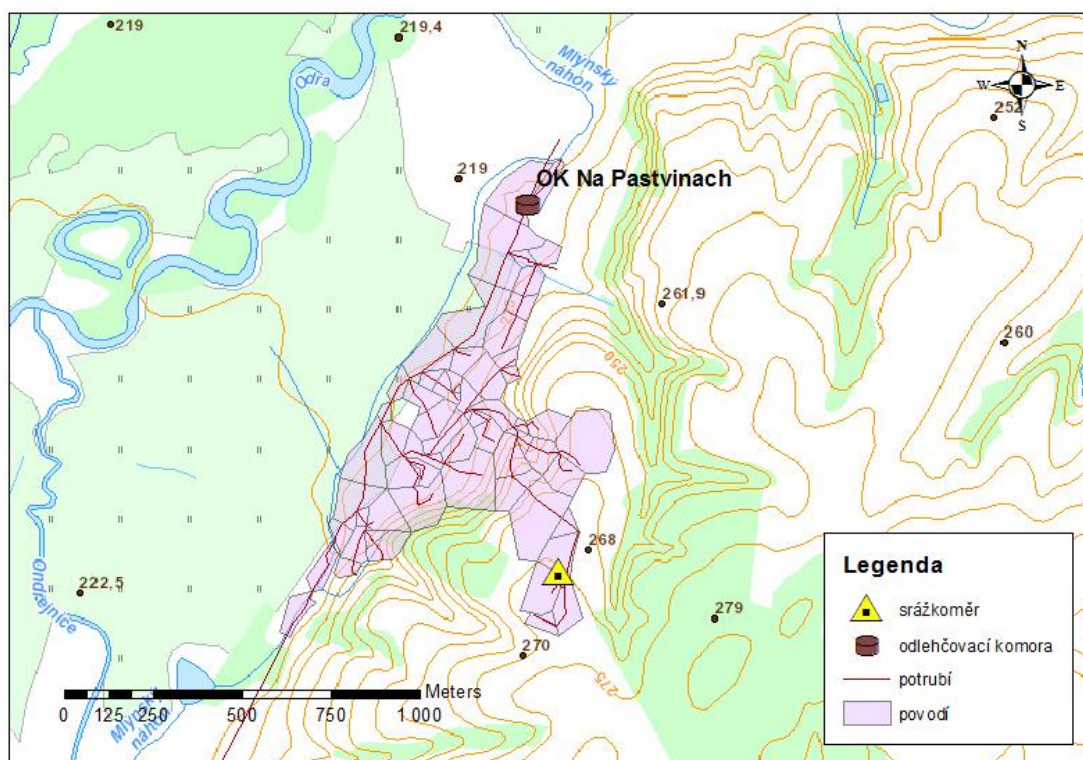
Každý model má své specifické vstupní hodnoty, které tvoří okrajové podmínky. Hlavní složkou vstupních dat jsou srážkové údaje poskytnuté ze srážkoměrů v průběhu monitoringu. Tyto údaje vyvolávají na síti zvýšené hodnoty odtoku. V bezdeštném období je potom síť zatěžována pouze splašky, jejichž množství lze definovat průměrným konstantním průtokem v síti nebo průměrným nátokem z jednotlivých objektů napojených na síť. Konkrétní okrajové podmínky jsou dále popsány pro jednotlivá povodí.

Pro simulace byly vybrány srážky, které v průběhu monitoringu způsobily na síti takový odtok, že došlo k přepádu na odlehlovacím komoedu.

3.3.1 Na Pastvinách – vstupní data

3.3.1.1 Srážky Na Pastvinách

časová data srážek byla poskytnuta srážkoměrem s označením S9 Proskovice o zachytné ploše 500 cm^2 . Jedno překlopení lunky srážkoměru reprezentuje srážkový úhrn $0,1 \text{ mm/m}^2$ a data byla zaznamenána v časovém kroku jedné minuty. Srážkoměr byl umístěn přímo na povodí, tudíž lze usuzovat poměrně přesné zachycení srážek nad povodím (Obr. 11). Vstupní data jsou definována jako časová data intenzity deště. Pro simulace na tomto povodí byly vybrány srážky 4.5.2012 a 6.5.2012 jako kalibrační a 5.5.2012 jako verifikační.

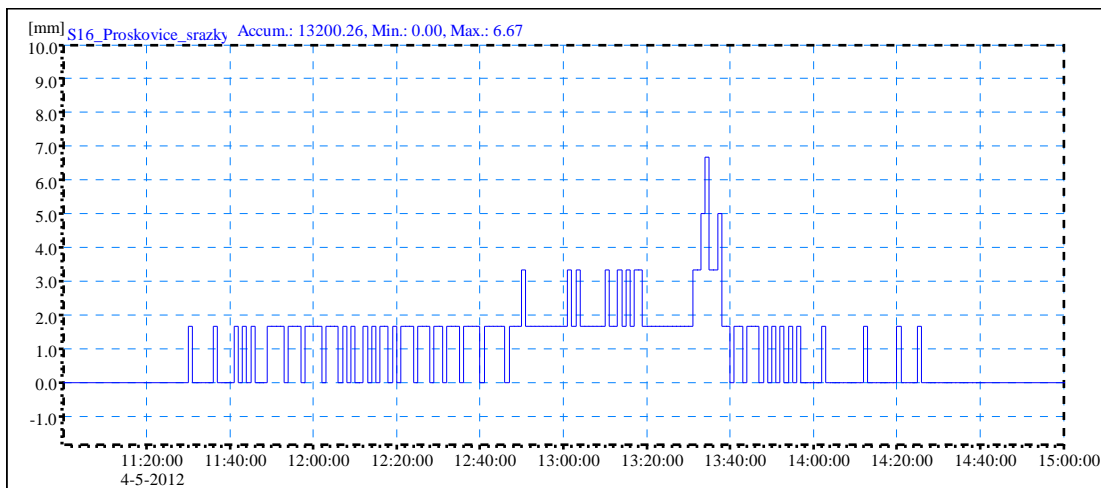


Obr. 11 Schéma umístění srážkoměru v povodí Na Pastvinách (CENIA,2013b).

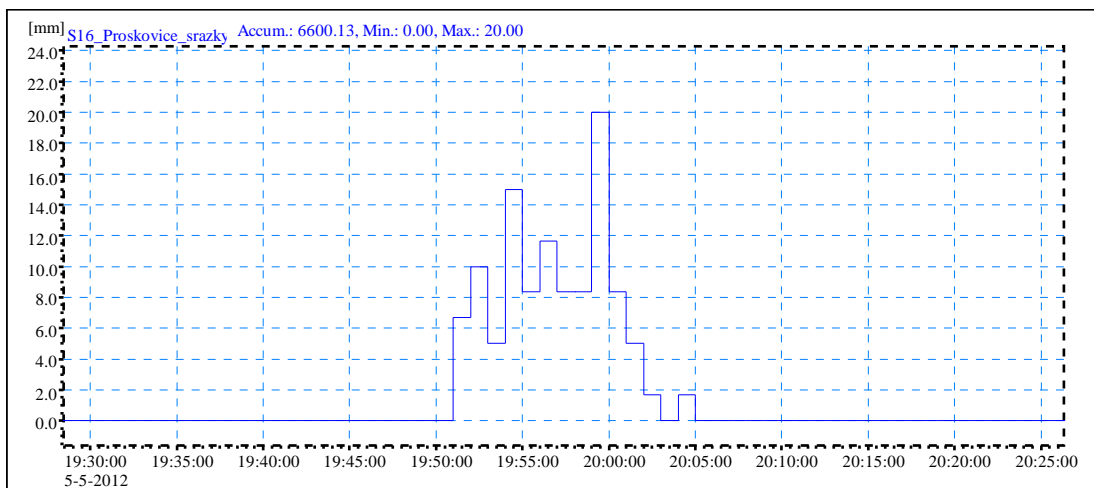
Základní parametry jednotlivých srážek jsou uvedeny v Tab. 13. Grafické znázornění časových údajů ukazují Obr. 12, Obr. 13 a Obr. 14.

Tab. 13 Parametry srážek nad povodím Na Pastvinách.

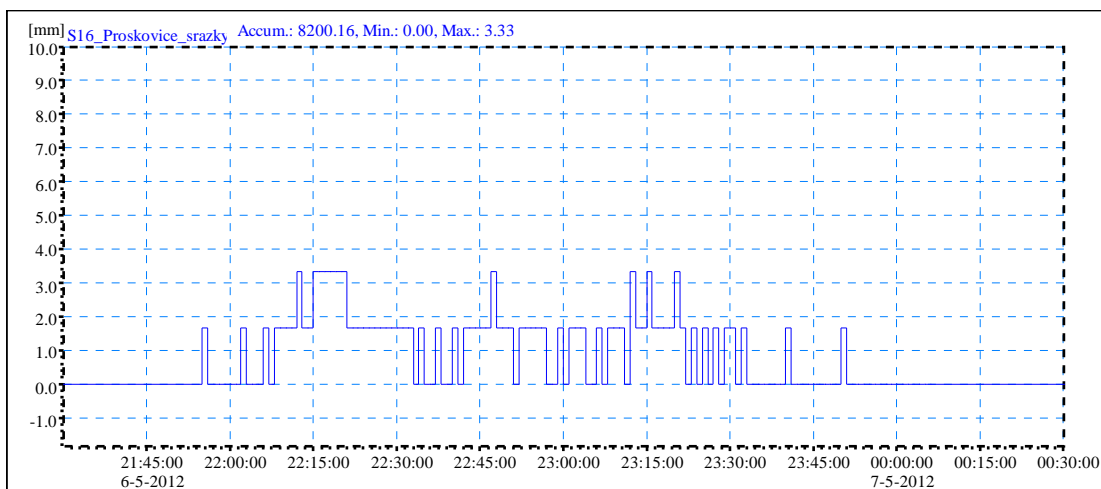
Srážka	4.5.2012	5.5.2012	6.5.2012
Začátek	4.5.2012 11:30	5.5.2012 19:51	6.5.2012 21:55
Konec	4.5.2012 14:26	5.5.2012 20:05	6.5.2012 23:51
Doba trvání [hod:min]	2:56	0:14	1:56
Úhrn [mm]	13,2	6,6	8,2
Max. intenzita [l/s.ha]	66,67	200,00	33,33
Prům. intenzita [l/s.ha]	12,50	78,57	11,78



Obr. 12 Srážka nad povodím Na Pastvinách ze dne 4.5.2012.



Obr. 13 Srážka nad povodím Na Pastvinách ze dne 5.5.2012.



Obr. 14 Srážka nad povodím Na Pastvinách ze dne 6.5.2012.

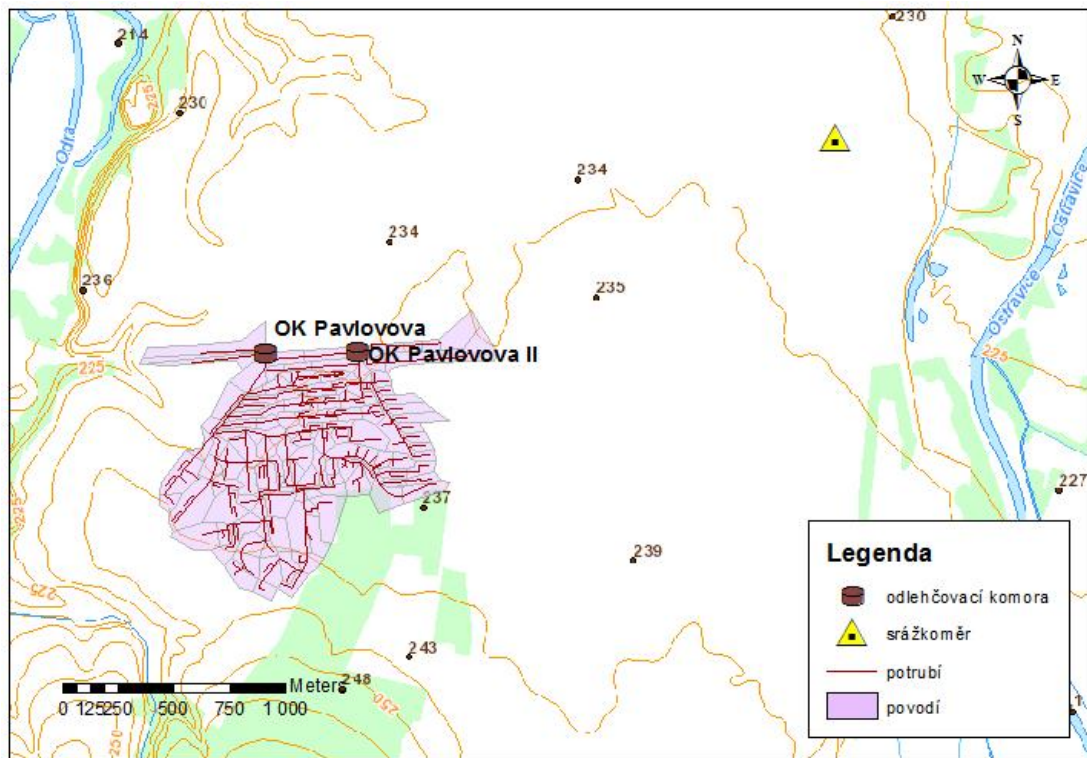
3.3.1.2 Ostatní vstupy Na pastvinách

Do sítě jsou napojeny další dvě okrajové podmínky, a to splašky z napojených objektů a splašky, které přicházejí z čerpací stanice ve Staré Vsi, přibližně 2,5 km jižně od povodí. Množství splašků v povodí je definováno pro každý objekt v m³/den. Reprezentativní hodnoty byly odečteny dne 24.1.2011 společností Ostravské vodárny a kanalizace a.s. Průměrná hodnota denního objemu splašků pro jeden objekt je 0,44 m³. Nátok z čerpací stanice Stará Ves je do modelu připojen jako časová řada pro tok daná množstvím odpadní vody na ekvivalentního obyvatele Staré Vsi na den a cyklickým vzorem. Celkový počet obyvatel Staré Vsi činí 2 601 obyvatel a hodnota objemu splašků je 0,09 m³/EO/den.

3.3.2 Pavlovova – vstupní data

3.3.2.1 Srážky Pavlovova

Časová řada srážek byla poskytnuta srážkoměrem s označením S11 Zábrhel nad Odrou o zachytné ploše 500 cm². Jedno překlopení lunky srážkoměru reprezentuje srážkový úhrn 0,1 mm/m² a data byla zaznamenána v časovém kroku jedné minuty. Srážkoměr byl umístěn přibližně 2 km od povodí, tudíž je třeba očekávat určité odchylky v objemu a časovém rozložení srážky na srážkoměru a na povodí (Obr. 15). Vstupní data jsou definována jako časová řada intenzity deště.

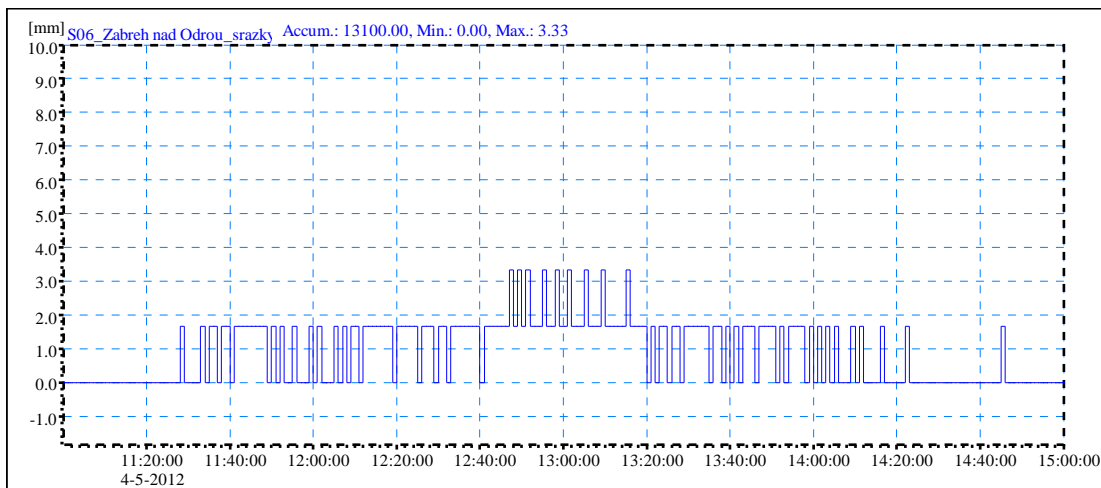


Obr. 15 Schéma umístění srážkoměru povodí Pavlova (CENIA, 2013b).

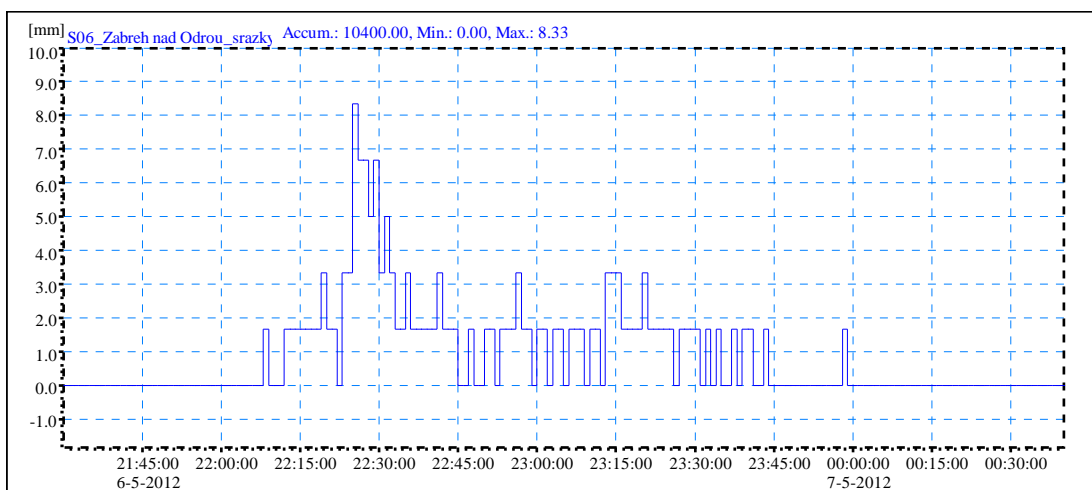
Základní parametry jednotlivých srážek jsou uvedeny v Tab. 14. Grafické znázornění časových ad ukazují Obr. 16, Obr. 17 a Obr. 18.

Tab. 14 Parametry srážek nad povodím Pavlova.

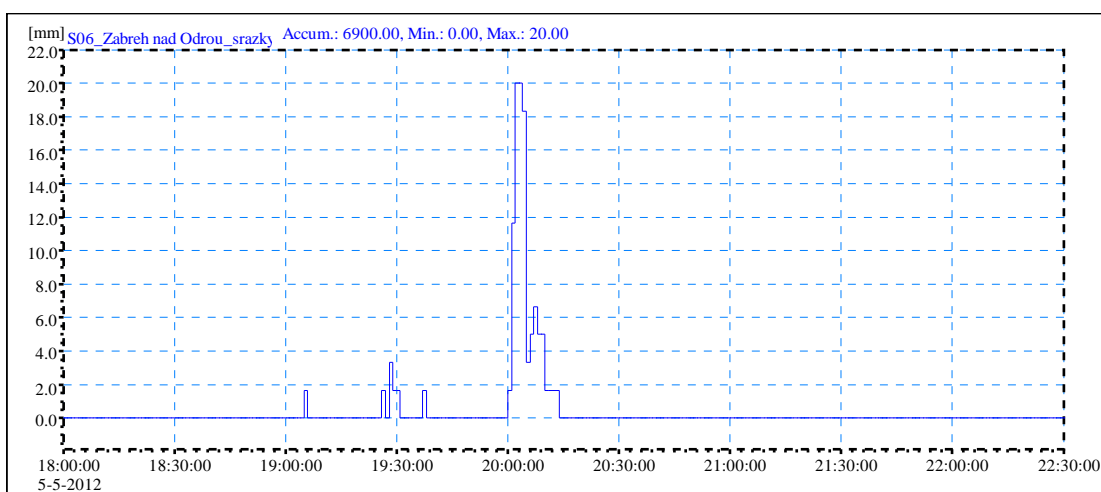
Srážka	4.5.2012	5.5.2012	6.5.2012
Začátek	4.5.2012 11:28	5.5.2012 19:05	6.5.2012 22:08
Konec	4.5.2012 14:46	5.5.2012 20:14	6.5.2012 23:59
Doba trvání [hod:min]	3:18	1:09	1:51
Úhrn [mm]	13,1	6,9	10,4
Max. intenzita [l/s.ha]	33,33	200,00	83,33
Prům. intenzita [l/s.ha]	11,03	16,67	15,62



Obr. 16 Srážka nad povodím Pavlova ze dne 4.5.2012.



Obr. 17 Srážka nad povodím Pavlova ze dne 5.5.2012.



Obr. 18 Srážka nad povodím Pavlova ze dne 6.5.2012.

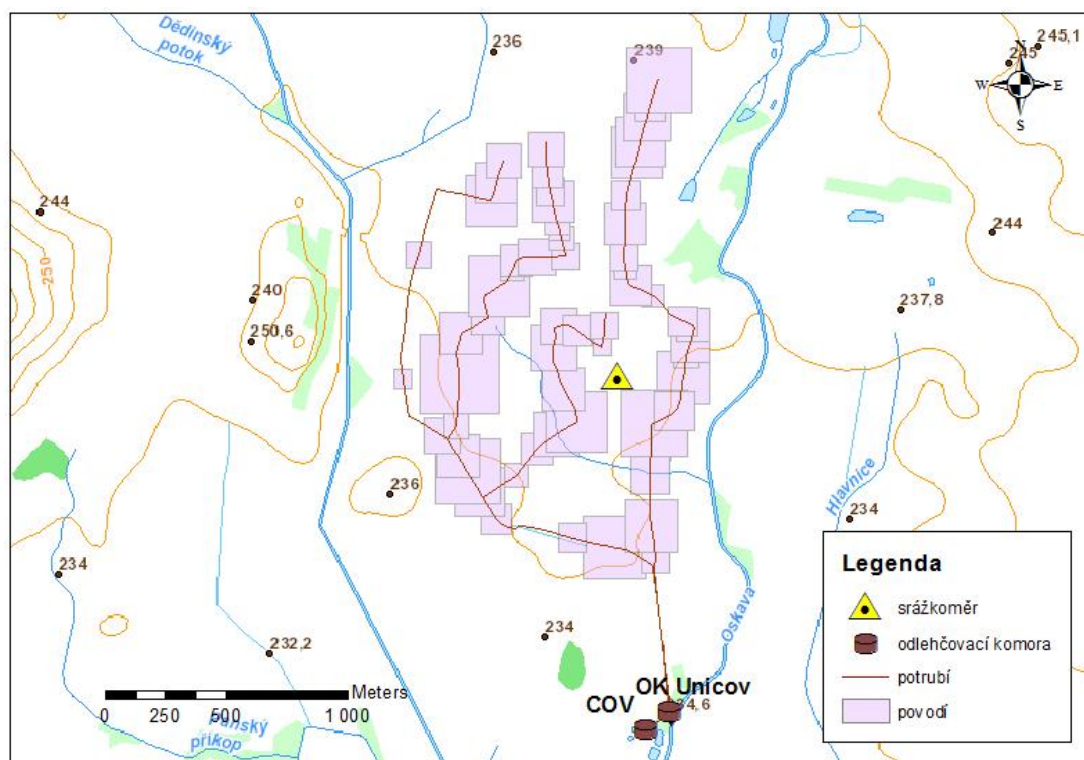
3.3.2 Ostatní vstupy Pavlova

Do sít je napojena krom deš ještě okrajová podmínka, popisující splašky z napojených objekt . Množství splašk v povodí je definováno pro každý objekt v m^3/den . Reprezentativní hodnoty byly ode teny dne 24.1.2011 společností Ostravské vodárny a kanalizace a.s. Pr m má hodnota denního objemu splašk pro jeden objekt je $2,9 m^3$.

3.3.3 Uni ov – vstupní data

3.3.3.1 Srážky Uni ov

asová ada srážek byla po ízena srážkom rem o záchytné ploše $200 cm^2$. Jedno p eklopení lunku srážkom ru reprezentuje srážkový úhrn $0,2 mm/m^2$ a data byla zaznamenána v asovém kroku jedné minuty. Srážkom r byl umíst n p ímo na povodí, tudíž lze usuzovat pom m p esné zachycení srážek nad povodím (Obr. 19). Vstupní data jsou definována jako asová ada intenzity deš .

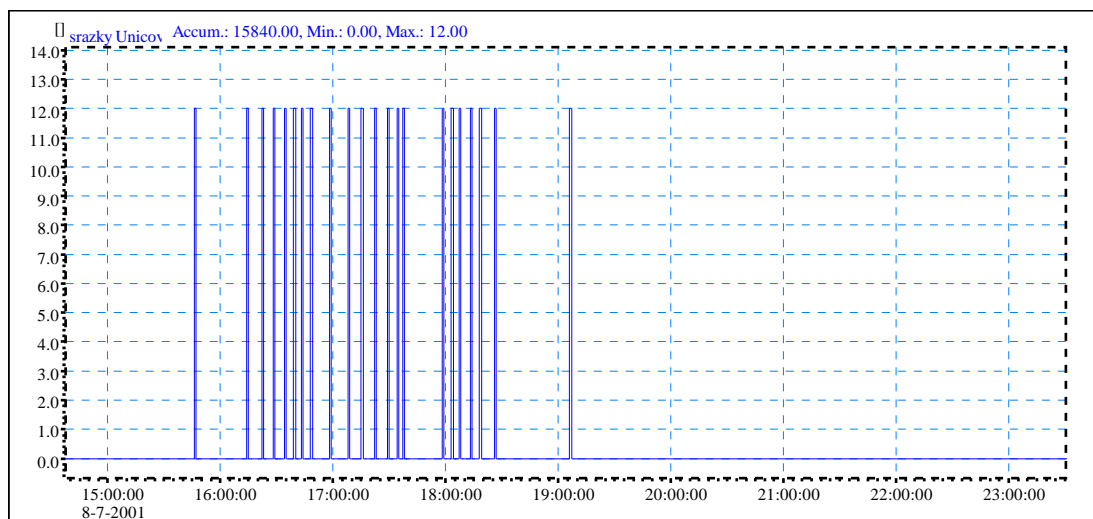


Obr. 19 Schéma umíst ní srážkom ru povodí Uni ov (CENIA, 2013b).

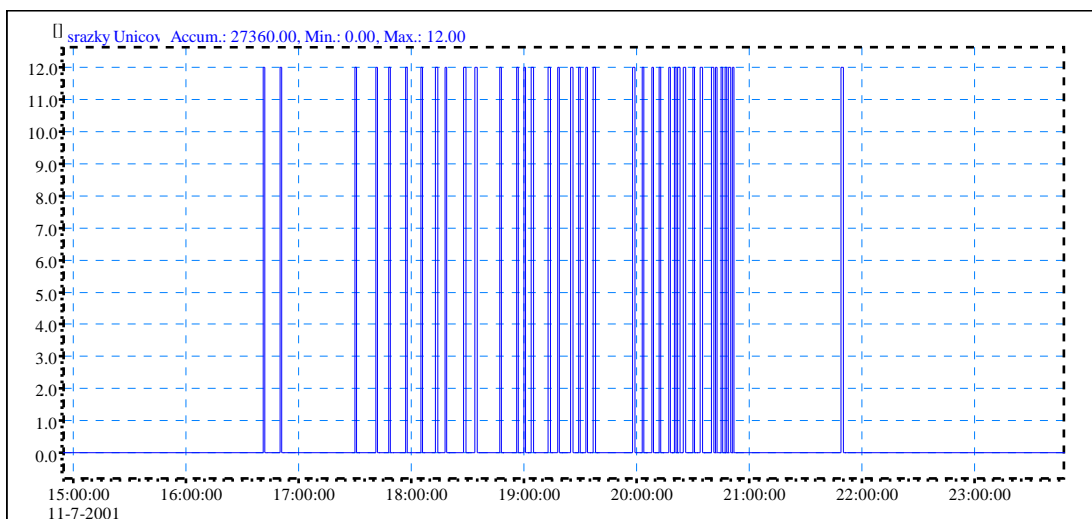
Základní parametry jednotlivých srážek jsou uvedeny v Tab. 13. Grafické znázorn ní asových ad ukazují Obr. 20, Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23.

Tab. 15 Parametry srážek nad povodím Uni ov.

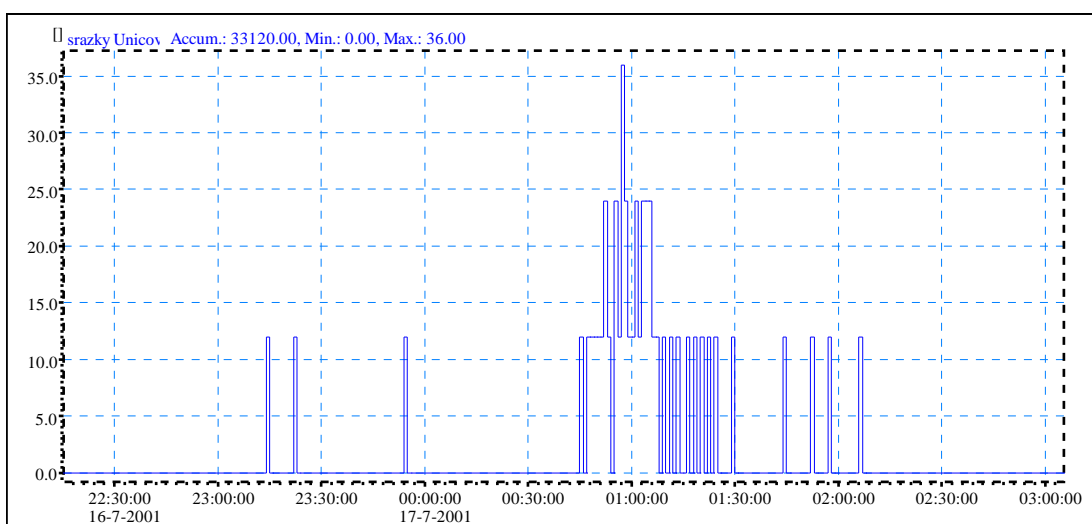
Srážka	8.7.2001	11.7.2001	16.7.2001	17.7.2001
Za átek	8.7.2001 15:46	11.7.2001 16:41	16.7.2001 23:14	17.7.2001 12:14
Konec	8.7.2001 19:07	11.7.2001 21:50	17.7.2001 02:07	18.7.2001 03:20
Doba trvání [hod:min]	3:21	5:09	2:53	15:06
Úhrn [mm]	15,84	27,36	33,12	41,04
Max. intenzita [l/s.ha]	12	12	36	12
Pr m. intenzita [l/s.ha]	1,31	1,48	3,19	0,75



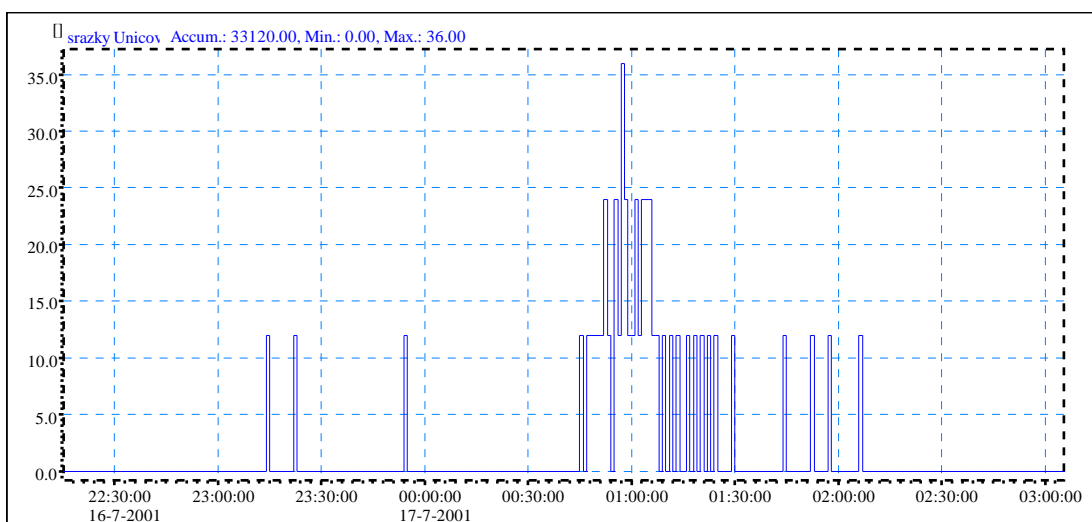
Obr. 20 Srážka nad povodím Uni ov ze dne 8.7.2001.



Obr. 21 Srážka nad povodím Uni ov ze dne 11.7.2001.



Obr. 22 Srážka nad povodím Uni ov ze dne 16.7.2001.



Obr. 23 Srážka nad povodím Uni ov ze dne 17.7.2001.

3.3.3.2 Ostatní vstupy Uni ov

Do sít je napojena krom deš ještě okrajová podmínka, popisující splašky z díl ích povodí. Množství splašk díl ích povodí je definováno na základ po tu obyvatel daného povodí a pr m rné hodnoty spot eby vody na ekvivalentního obyvatele na den, která íní 165 l/EO/den.

3.4 ZPRACOVÁNÍ DAT

3.4.1 Gandalf

Pro jednotlivé simulace a jejich následné vyhodnocení bylo pot eba zpracovat asové ady srážek a hladin na odleh ovacích komorách. K tomuto byl využit software Gandalf, který umož ũje zpracování, správu a prezentaci asových ad. asové ady srážek byly upraveny podoby hyetogram – tedy sloupcových diagram srážkových výšek – a graficky prezentovány. Dále byla provedena analýza asových ad srážek, p í které byla asová ada na základ zadané asové proluky mezi dešti a jejich vrcholy rozd lena na jednotlivé dešt . Dešt byly zanalyzovány a byly získány jejich základní charakteristiky – doba trvání, celkový úhrn, maximální intenzita a pr m rná intenzita. asové ady výšky hladiny na odleh ovacích komorách z monitoringu bylo t eba upravit do formátu, který bychom získali nízkonákladovým monitoringem, abychom nebyli p í kalibraci ovlivn ni tvarem k ívky, ale pouze dobou p epadu. S využitím exponenciální funkce v Gandalfovi byly asové ady upraveny tak, že v p ípad p epadu byla hodnota asové ady rovna výšce p epadové hrany a v opa ném p ípad byla hodnota rovna nule. Tím vznikly asové ady, ze kterých je možné vy íst pouze as p epadu, nikoliv jeho hodnotu. Upravené asové ady byly následn exportovány do formátu DFS a DFS0.

Software Gandalf je produktem spole nosti DHI Group a p í zpracování dat byla použita verze 2012. V pr b hu zpracování této práce byl využit pro p ehlednou správu asových ad a pro jejich grafickou prezentaci.

3.4.2 MIKE URBAN

Pro práci s modelem byl využit software MIKE URBAN verze 2012. V tomto prost edí bylo provedeno nastavení modelu, okrajových podmínek, veškeré editace a simulace, které jsou popsány níže. Výsledkovým souborem simulace je soubor typu

CRF (z modulu „runoff“) nebo PRF (z modulu „network“), který je dále možné na íst jako vstup do další simulace. Výsledkový soubor PRF obsahuje veškeré hodnoty hladin, rychlostí a pr tok pro každý uzel a spoj modulu v každém asovém kroku simulace.

MIKE URBAN je programový prost edek společ nosti DHI Group pro globální analýzu funkce vodovodních a kanaliza ních systém . Jedná se o sjednocení uživatelského rozhraní programových prost edk MOUSE a SWMM5 a jeho hlavní výhodou je integrace do prost edí GIS. Pro ú ely této práce byl v rámci MIKE URBAN využit model MOUSE, který je detailn popsán v kapitole 3.1.

3.4.3 ArcMap

Software ArcMap společ nosti ESRI je úzce provázán s MIKE URBAN a celý model je možné konvertovat práv to tohoto prost edí. ArcMap verze 10.1 byl v této práci používán pro generování map a schémat a také pro vyhodnocení statistiky jednotlivých vrstev uzl , linií a ploch.

3.4.4 MIKE View

MIKE View (verze 2012) společ nosti DHI Group je prezenta ní modul, který se používá k prohlížení výsledkových soubor simulací. Pro vyhodnocení doby p epadu jednotlivých simulací byl na ten výsledkový soubor, do kterého byla importována asová ada nam ených p epad . Na základ této ady byl následn ode ten as simulovaného p epadu a hodnota byla zaznamenána do tabulky.

3.4.5 R

R je matematický free software a jazyk pro statistické výpo ty a grafiku vyvinutý v Bell Laboratories. V této práci byl využit pro grafické znázorn ní asových ad charakteristik povodí a pro grafické vyhodnocení výsledk kalibrace a citlivostní analýzy. P i generování graf byly využity balí ky {rgl}, {ggplot2} a {reshape2}.

3.5 MĚRNÁ KAMPA

3.5.1 Měrná kampa Ostrava

Měrná kampa probíhala ve dvou etapách v rámci projektu Generel odvodnění města Ostravy v období duben- červenec 2012. Měření srážek, hloubek a prtok zajišťovala společnost DHI, a.s. ve spolupráci se společností OVAK, a.s. Cílem monitoringu bylo získat ze státní dobé měrné kampan data o srážko-odtokových poměrech na jednotné stokové síti města Ostrava, která byla následně použita pro kalibraci a verifikaci hydrodynamického modelu stokové sítě. V rámci měrné kampan bylo instalováno 18 srážkoměrů, dále byl monitorován prtok na 19-ti měrných profilech kmenových sběračů a na 47 odlehovacích komorách, kde byl zaměřen prtok na nátok a odtok a hloubka hladiny v odlehovacích komorách. Na základě naměřených dat byly zpracovány charakteristiky jednotlivých měrných profilů a odezva sítě na vybrané srážkové události. Dále byly zpracovány informace o plošném rozložení deště nad sítí, které byly využity pro výběr kalibračních dešťů.

Na jednotlivých lokalitách byl instalován lunkový srážkoměr Fiedler SR03/RD, jehož zachytná plocha činí 500 cm². Jedno překlopení lunkou tohoto srážkoměru reprezentuje srážkový úhrn 0,1 mm/m². časový údaj překlopení lunkou je uložen do paměti registrační jednotky a z těchto dat je následně vytvořena časová sada dešťů. Záznam srážek je archivován s ekvidistantním časovým krokem jedné minuty.

Pro měření prtoků byl použit prtokoměr ADS 3600 pro sběr dat v otevřených korytech a potrubích. Tento prtokoměr využívá systém snímání hloubka-rychlost, což bylo zajištěno hloubkoměrnou ultrazvukovou sondou a rychlostním senzorem s registrační jednotkou. Rozsah měření ultrazvukového senzoru je 0-3 m s rozlišením 0,5 mm. Senzor maximální okamžité rychlosti měří rychlost po celé hloubce proudění v rozsahu rychlostí -1,5 až 6,1 m/s s rozlišením 0,01 m/s. Záznam prtoků byl archivován v časovém kroku dvou minut.

Měření hloubek probíhalo na oddělovacích komorách (OK) za účelem získání informací chování sítě za dešťového a bezdeštného stavu. Snímání hladiny bylo zajištěno ultrazvukovou sondou US3000/US1000/US6000 firmy Fiedler-Magr, umístěnou v odlehovacích komorách nad stokou, ve výjimečných případech – kdy

docházelo ke skokovému kolísání hladiny – p ímo nad p epadovou hranu. Nam ená data byla v intervalu dvou minut archivována v registra ní jednotce M4016.

3.5.1.1 OK Na Pastvinách

V rámci zájmového území Na Pastvinách bylo provedeno m ení pr toku na nátoku a na odtoku z odleh ovací komory a dále m ení hladiny hladinoměrem umíst ěným nad stokou v odleh ovací komo e. Pro celé povodí Na Pastvinách byl instalován jeden srážkom r, jehož umíst ění je zobrazeno výše (Obr. 11). V Tab. 16 jsou uvedeny charakteristiky odleh ovací komory Na Pastvinách. Na Obr. 24 je pohled do odleh ovací komory s ultrazvukovou sondou.

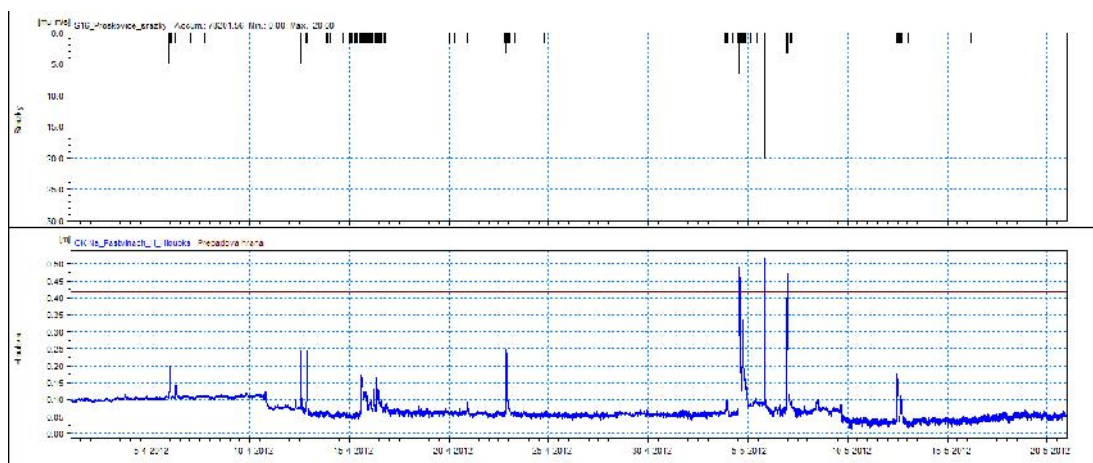
Tab. 16 Charakteristiky odleh ovací komory Na Pastvinách.

OK Na Pastvinách			
	nátok	odtok	v ýus
materiál	sklolaminát	kamenina	sklolaminát
p í ný profil	kruh DN 1200	kruh DN 300	kruh DN 1200
sklon	3,25 ‰	5,93 ‰	2,40 ‰
umíst ění sondy	ve st edu OK nad stokou		
nadmo ská výška dna	217,93 m n. m.		
v ýška p epadové hrany	0,418 m		
typ p epadu	jednostranný bo ní		
poznámka	<ul style="list-style-type: none"> - v OK dochází k ob asné tvorb ě nepravidelného nánosu - v pr b hu monitoringu nebylo zjišt ěno ovlivn ění stokového systému zp ětným vzduťm - na výusti esle - monitoring prob ěhl bez výpadk 		



Obr. 24 Pohled do odlehovací komory Na Pastvinách.

Následující graf ukazuje celkovou časovou řadu srážek a hladin na odlehovací komoře v průběhu měřené kampaně (Obr. 25). Přehled přesepadovou hranu je uveden v Tab. 17.



Obr. 25 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Na Pastvinách.

Tab. 17 Přehled přesepadovou hranu na OK Na Pastvinách.

Začátek p epadu	Konec p epadu	Délka p epadu
4.5.2012 13.18	4.5.2012 14.08	50 min.
5.5.2012 20.14	5.5.2012 20.30	16 min.
6.5.2012 23.32	6.5.2012 23.52	20 min.

3.5.1.2 OK Pavlovova

Na odlehovací komoře Pavlovova byl měřen průtok na nátoku a na výusti a hladina byla zaměřena sondou umístěnou nad stokou v komoře. Pro celé povodí Pavlovova byl instalován jeden srážkoměr, jehož umístění je zobrazeno výše (Obr. 15). V Tab. 18 jsou uvedeny charakteristiky odlehovací komory Pavlovova. Na Obr. 26 je pohled do odlehovací komory s ultrazvukovou sondou.

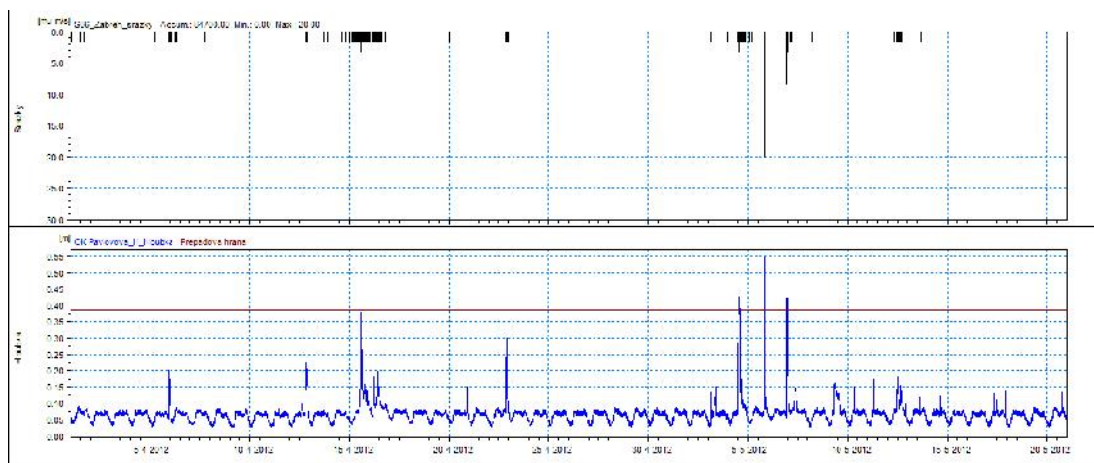
Tab. 18 Charakteristiky odlehovací komory Pavlovova.

OK Pavlovova			
	nátok	odtok	výus
materiál	zděná stoka	sklolaminát	beton
průřezný profil	vejce 110/1875	kruh DN 1200	kruh DN 1100
sklon	3 ‰	84,47 ‰	10 ‰
umístění sondy	ve středě OK nad stokou		
nadmořská výška dna	225,94 m n. m.		
výška přeplavové hrany	0,384 m		
typ přeplavu	jednostranný boční		
poznámka	- v průběhu monitoringu nebylo zjištěno ovlivnění stokového systému způsobeným vzdutím - monitoring probíhal bez výpadků		



Obr. 26 Pohled do odlehovací komory Pavlovova.

Následující graf ukazuje celkovou časovou soustavu srážek a hladin na odlehovací komoře v průběhu měřené kampaně (Obr. 27). Přehled o epadách přes epadovou hranu je uveden v Tab. 19.



Obr. 27 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Pavlovova.

Tab. 19 Přehled o epadách na OK Pavlovova.

Začátek epadu	Konec epadu	Délka epadu
4.5.2012 13.08	4.5.2012 14.02	54 min.
5.5.2012 20.10	5.5.2012 20.32	22 min.
6.5.2012 22.38	6.5.2012 22.52	34 min.
6.5.2012 23.22	6.5.2012 23.42	

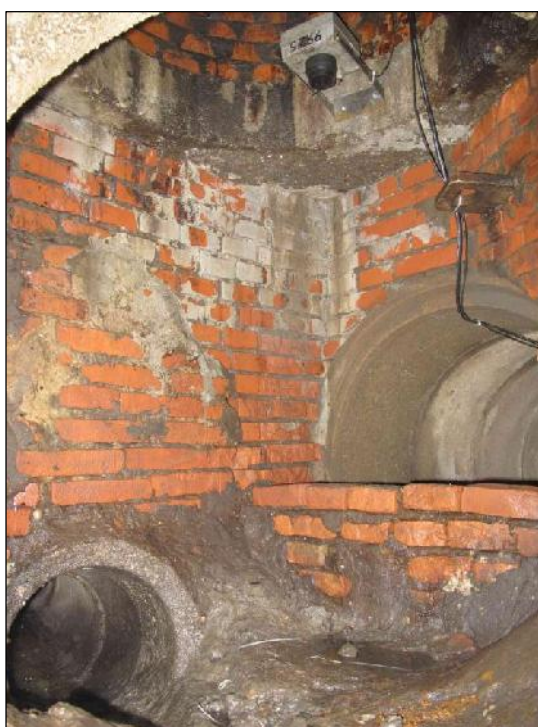
3.5.1.3 OK Pavlovova II

Odlehovací komora Pavlovova II měla zamenený průtok na odtoku a výšce hladiny byla měřena sondou nad epadovou hranou komory. V Tab. 20 jsou uvedeny charakteristiky odlehovací komory Pavlovova II. Na Obr. 28 je pohled do odlehovací komory s ultrazvukovou sondou.

Tab. 20 Charakteristiky odlehovací komory Pavlovova II.

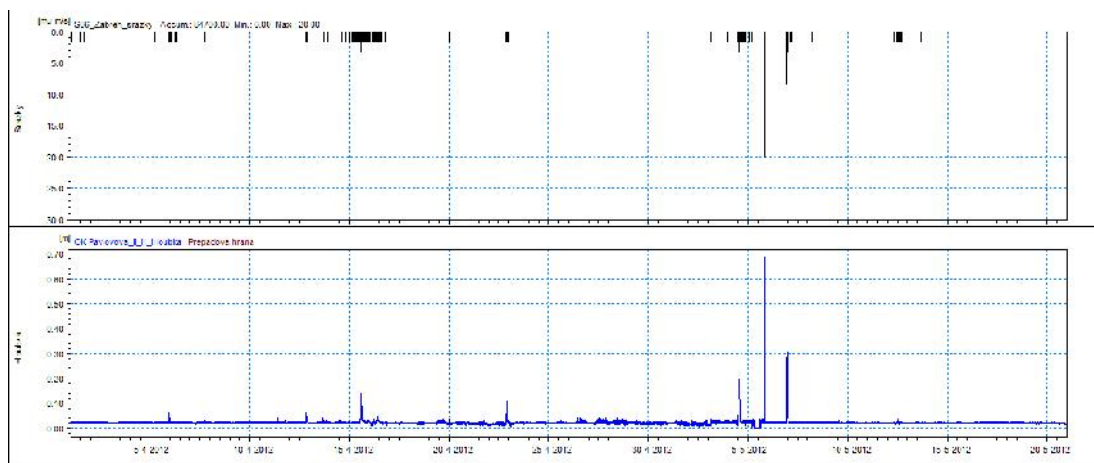
OK Pavlovova II				
	nátok 1	nátok 2	odtok	výus
materiál	beton	beton	beton	beton
průřezový profil	kruh DN 1000	kruh DN 600	kruh DN 400	kruh DN 1000

OK Pavlova II				
sklon	11,93 ‰	17,58 ‰	54,89 ‰	8 ‰
umíst ní sondy	na hranu p epadu OK			
nadmo ská výška dna	228,72 m n. m.			
výška p epadové hrany	0,368 m			
typ p epadu	jednostranný bo ní			
poznámka	<ul style="list-style-type: none"> - v pr b hu monitoringu nebylo zjišt no ovlivn ní stokového systému zp tným vzduším - monitoring prob hl bez výpadk 			



Obr. 28 Pohled do odleh ovací komory Pavlova II.

Následující graf ukazuje celkovou asovou adu srážek a hladin na odleh ovací komo e v pr b hu m rné kampan (Obr. 29). P ehled p epad p es p epadovou hranu je uveden v Tab. 21.



Obr. 29 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Pavlovova II.

Tab. 21 Přehled přepadů na OK Pavlovova II.

Začátek přepadu	Konec přepadu	Délka přepadu
5.5.2012 20.08	5.5.2012 20.24	16 min.

3.5.2 Měrná kampaň Uničov

Měrná kampaň měřičem Uničov probíhala v období červen- červenec 2001 v rámci projektu Uničov – Generel odvodnění měřiče II. etapa – posouzení stokové sítě a byla zprostedkována společností DHI Hydroinform a.s. (v současné době DHI a.s.). Cílem krátkodobé měřiče kampaň bylo získání informací o srážko-odtokových poměrech na povodí měřiče a kalibračních a verifikačních dat, která byla dále použita pro hydrodynamický simulační model stokové sítě měřiče Uničov.

V rámci měřiče kampaň byly nainstalovány tři průtokoměry (ADS flow monitor a Sigma 900 Max), dva srážkoměry (SR49B/200) a jeden hladinoměr (MS4016).

3.5.2.1 OK Uničov

Na odlehlovací komoře byl měřič průtok na odtoku (ADS flow monitor) a výška hladiny na výstupu. Měření hladin na oddělováči bylo zvoleno tak, aby bylo možné zjistit případné ovlivnění kanalizace hladinou z řeky Oskavy. Pro měření srážek byl použit srážkoměr o záchytné ploše 200 cm² (Obr. 19). Záznam srážek byl archivován

v časovém kroku jedné minuty. V Tab. 22 jsou uvedeny charakteristiky odlehovací komory Uni ov. Na Obr. 30 je fotografie umístění hladinoměru.

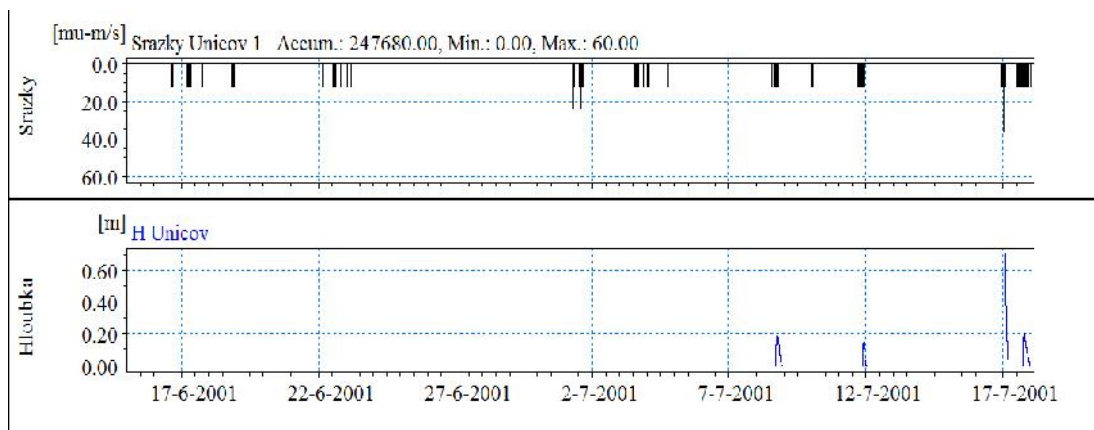
Tab. 22 Charakteristiky odlehovací komory Uni ov.

OK Uni ov				
	nátok 1	nátok 2	odtok	výus
materiál	beton	beton	beton	beton
průřezový profil	kruh DN 2200	kruh DN 2200	kruh DN 600	obdélník 1100x1500
umístění sondy	na výusti z oddělovací			
nadmořská výška dna	231,08 m n. m.			
výška přepadové hrany	0,670 m			
typ přepadu	příčný kolmý			



Obr. 30 Umístění hladinoměru Uni ov.

Následující graf ukazuje celkovou časovou řadu srážek a hladin na odlehovací komoře v průběhu měřené kampaně (Obr. 31). Přehled přepadů přes přepadovou hranu je uveden v Tab. 23.



Obr. 31 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Uni ov.

Tab. 23 Přehled přepadů na OK Uni ov.

Začátek přepadu	Konec přepadu	Délka přepadu
8.7.2001 16.38	8.7.2001 22.14	336 min.
11.7.2001 21.08	12.7.2001 0.16	188 min.
16.7.2001 01.32	16.7.2001 05.08	216 min.
17.7.2001 16.58	17.7.2001 23.34	396 min.

3.6 SIMULACE

Při kalibraci a verifikaci proběhly pro každou dešovou událost tyto simulace. Pro získání realistických podmínek výpočtu byl pro každé povodí napořádán soubor vzorové simulace HOTSTART. Jedná se o výpočet proudění na síti, tedy „network“ simulaci. Pro všechna povodí byla napořádána jednodenní simulace odtoku na síti, přičemž parametry byly nastaveny na defaultní hodnoty.

Dalším výpočtem byla simulace odtoku za bezdeštného stavu, tedy simulace odtoku splaškového. Tento výpočet probíhá na síti, jako HOTSTART byl nastaven výsledkový soubor předchozího výpočtu a vstupními daty byly, podle konkrétního povodí, splašky z napojených objektů v povodí anebo nátok na povodí.

Ve této fázi bylo potřeba napořádat odezvu povodí na srážku – povrchový odtok – byl použit modul „runoff“. Pro tuto simulaci byl nastaven čas simulace tak, aby pokryl jak dobu trvání srážky, tak pravděpodobnou odezvu na síti. Vstupními daty simulace byla srážková časová řada.

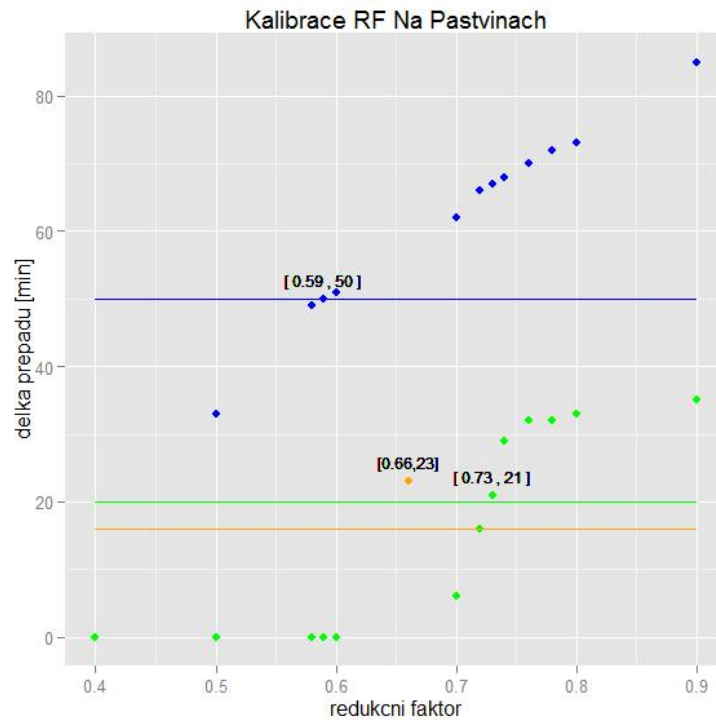
Poslední simulace – odtok na síti (modul „network“) – byla nastavena ve stejném ase, jako simulace povrchového odtoku. Tato simulace využívala jako vstupy výsledkové soubory dvou předchozích simulací. Při úpravě parametrů povrchového odtoku bylo tedy nutné vždy předpokládat jak povrchový odtok, tak odtok na síti.

3.7 KALIBRACE A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

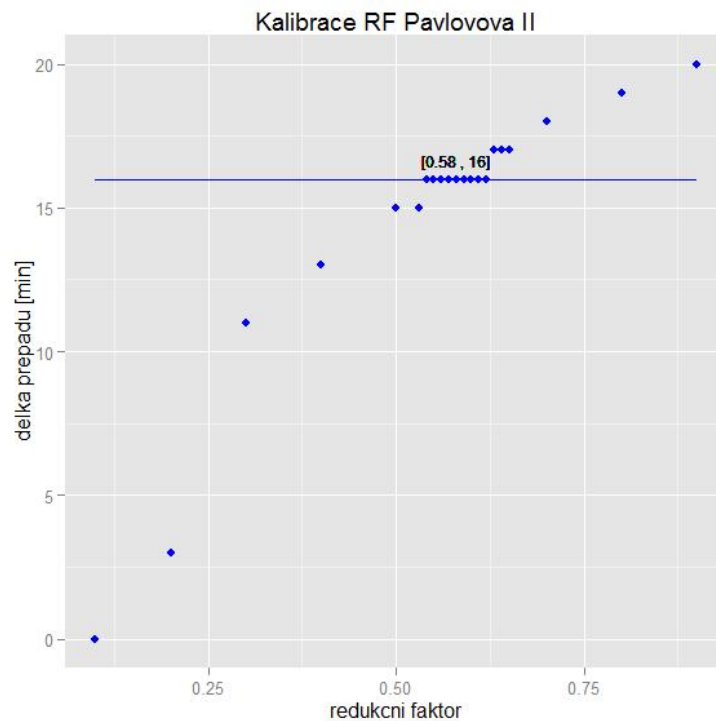
3.7.1 Kalibrace

Rasmussen & kol. (2008) uvádí ztráty v povodí jako parametr, který nesmí zůstat na defaultních hodnotách a je třeba jej před kalibrací danou metodou nakalibrovat. Modely použité v této práci mají u každého potrubí již definován materiál a s ním spojený koeficient ztrát daný Manningovým číslem. Ztráty v povodí lze proto na základě simulací považovat za nakalibrované.

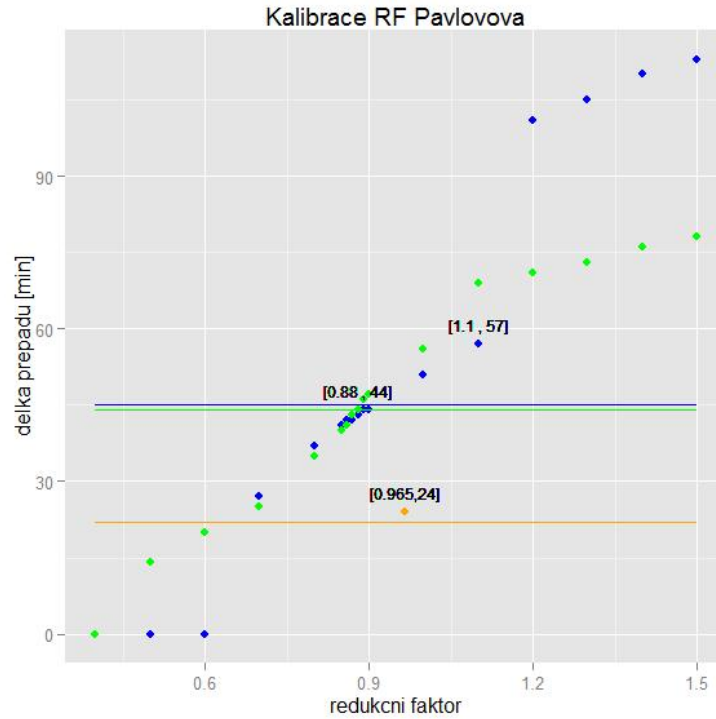
V první fázi simulací byly veškeré hodnoty parametrů povrchového odtoku a místních ztrát nastaveny na defaultní hodnoty a byl kalibrován pouze redukční faktor, jak je uvedeno v metodice uváděné Rasmussenem & kol. (2008). Pro každé povodí a každou kalibrační srážku proběhla simulace odtoku pro různé hodnoty redukčního faktoru a následně simulace odtoku na síti s defaultními hodnotami. Pro každou simulaci byla následně vyhodnocena délka předepadu. Nejprve byly zjištěny hodnoty délky předepadu pro redukční faktor 0,9 a další o 0,1 nižší, dokud žádná voda nepředepadala, a následně byly provedeny další simulace pro nalezení přesné hodnoty vyhovujícího redukčního faktoru. Cílem kalibrace bylo dosáhnout takové délky předepadu, která by byla co nejbližší naměřené délce předepadu. Grafy jednotlivých kalibrací jsou uvedeny na Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35. Pro každý déšť byla nalezena vhodná hodnota redukčního faktoru. Redukční faktor povodí byl vyhodnocen jako průměr těchto hodnot a nalezená hodnota byla použita pro verifikaci modelu. Vyhodnocení kalibrace je shrnuto v Tab. 24.



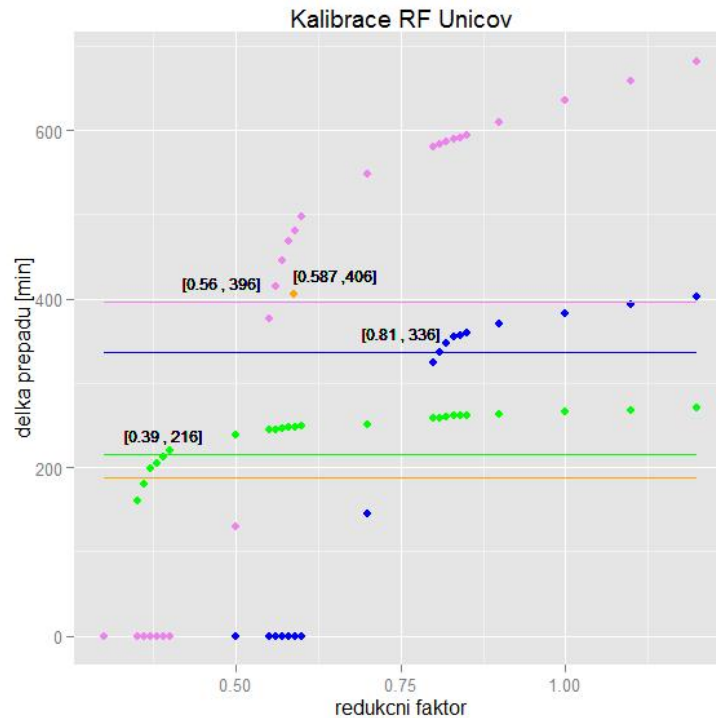
Obr. 32 Graf kalibrace OK Na Pastvinách. Body zobrazují jednotlivé kalibrace, linie zobrazují naměřené čas p epadu. Mod e srážka 4.5.2012, zelen e srážka 6.5.2012, oranžov ý výsledek verifikace – srážka 5.5.2012.



Obr. 33 Graf kalibrace OK Pavlova II. Body zobrazují jednotlivé kalibrace, linie zobrazuje naměřené čas p epadu (pouze jeden p epad 5.5.2012).



Obr. 34 Graf kalibrace OK Pavlova. Body zobrazují jednotlivé kalibrace, linie zobrazují naměřené časové údaje. Modré srážka 4.5.2012, zelená srážka 6.5.2012, oranžová srážka 5.5.2012.



Obr. 35 Graf kalibrace OK Uni ov. Body zobrazují jednotlivé kalibrace, linie zobrazují naměřené časové údaje. Modré srážka 6.7.2001, zelená srážka 16.7.2001, fialová srážka 17.7.2001 a oranžová srážka 11.7.2001.

Tab. 24 Souhrn dat po kalibraci a verifikaci.

povodí	Na Pastvinách	Pavlovova II	Pavlovova	Uni ov
referen ní RF	0,39	0,22	0,51	0,29
kalibrovaný RF	0,66	0,58	1,10	0,59
RE reduk ního faktoru	0,69	1,64	1,16	1,03
nam ená doba p epadu [min]	16	16	22	188
modelovaná doba p epadu [min]	23	16	24	406
RE doby p epadu	0,44	0	0,09	1,16

Po kalibraci na všech povodích bylo zjišeno, že nalezený reduk ní faktor je výrazn vyšší než reduk ní faktor nalezený kalibrací na plných datech. Také hodnoty verifikace nejsou v p ípad povodí Na Pastvinách a povodí Uni ova uspokojivé. Na základ tohoto zjiš ní byla následn provedena citlivostní analýza model na ur itých parametrech, aby byly nalezeny další parametry, které je třeba spoen s reduk ním faktorem kalibrovat.

3.7.2 Citlivostní analýza modelu

P í kalibraci model na datech z plného monitoringu byla na základ informací o pr tocích nejprve provedena bilance vstup a výstup na síti. Následn byl na základ hodnot extrém pr tok nakalibrován as koncentrace povodí. Nam ené hodnoty hladin byly využity pro kalibraci splašk – tedy pr tok za bezdeštného stavu. Dále byly kalibrovány energetické ztráty v uzlech a kone n také reduk ní faktor povodí. Na základ informací o p vodní kalibraci a konzultací s odborníky byly pro citlivostní analýzu vybrány tyto parametry: as koncentrace, sou initel tvaru povodí, po áte ní ztráty a místní ztráty na komo e. V MOUSE jsou tyto parametry vyjád eny t mito prom nnými (v po adí): Time of concentration (ConcTime), Time-area coeff (TACoeff), Initial loss (Iloss) a Outlet head loss (LossPar.Coeff). První t í parametry jsou parametry povrchové odtoku popsán v kapitole 3.1.2.1, místní ztráty hrají roli p í proud ní na síti a jsou popsány v kap. 3.1.3.6. P í kalibraci místních ztrát byl upravován parametr „Total HLC“, který popisuje hodnotu celkových ztrát

na odtoku. V tomto případě model ignoruje geometrii uzlu a používá hodnotu parametru pro každý odtok z uzlu.

Pro vyhodnocení vlivu jednotlivých parametrů na srážko-odtokové poměry na síti byly napočítány hodnoty doby přepadu pro tři srážkové události na povodí Na Pastvinách. Pro každý parametr a srážku byla provedena sada simulací, jejichž výsledkem je tabulka závislosti doby přepadu na redukčním faktoru a daném parametru. Počet simulací pro každý parametr byl vyhodnocen v průběhu analýzy na základě vlivu parametru na dobu přepadu. Výsledkem analýzy je 12 grafů, které jsou všechny uvedeny v Příloze 2.

Z výsledných grafů vyplývá, že kromě redukčního faktoru nemá žádný z analyzovaných parametrů povrchového odtoku výrazný vliv na dobu přepadu na odlehlovací komoře. Nejvýraznější a zároveň zásadní vliv na přepad mají potom místní ztráty na komoře, jejichž kalibrací lze dojít k podobnému redukčnímu faktoru povodí, jaký dává referenční model.

3.7.3 Porovnání časových řad

Při kalibraci modelu na základě času přepadu jsme došli k závěru, že je obtížné dosáhnout podobného redukčního faktoru, který popisuje referenční model. Toto by bylo možné, pokud by parametry referenčního modelu byly nakalibrovány tak, že by model simuloval čas přepadu shodný s časem přepadu měřených dat. Abychom měli představu o chování referenčního a kalibrovaného modelu, porovnali jsme časové řady průtoků a hladin obou modelů a měřených dat. Toto porovnání proběhlo pro všechna zájmová území a všechny analyzované srážky a výsledné grafy jsou v Příloze 3.

Kromě vizuálního porovnání byl dále vypočten pro každou simulovanou časovou řadu koeficient determinace E (Nash-Sutcliffe) (3). Výstupní časové řady modelů bylo nutno transformovat tak, aby bylo možné porovnat hodnoty ve stejném měřítku. Transformace na ekvidistantní časový krok měřených dat byla provedena v softwaru Gandalf pomocí funkce „Eqidistant“. Statistické vyhodnocení koeficientu determinace E proběhlo v softwaru R a výsledné hodnoty jednotlivých modelů jsou uvedeny v Tab. 25 a Tab. 26.

Nash-Sutcliffe v koeficient determinace se pohybuje v intervalu $(-1; 1]$. Čím blíže je hodnota jedné, tím přesnější je model. Pokud je koeficient roven jedné, koresponduje model s referenčními hodnotami; pokud je roven nule, jsou modelovaná data přesná jako průměrná hodnota dat pozorovaných; pokud je menší, než nula, je průměrná hodnota referenčních dat lepší hodnotou, než data modelovaná. Podle Rittera & Munoz-Carpena (2013) je výkonnost modelu velmi dobrá pro $E > 0,9$, dobrá pro E z intervalu $(0,8; 0,9)$, přijatelná pro E z $(0,65; 0,8)$ a nepřijatelná pro $E < 0,65$.

Tab. 25 Koeficient determinace (Nash-Sutcliffe) model kalibrovaných na základě informací o průběhu povodňového jevu pro jednotlivé srážkové události.

odlehovací komora	srážková událost	E hloubky	E průtok
Na Pastvinách	4.5.2012	0,95	0,54
	5.5.2012	0,89	0,15
	6.5.2012	0,90	0,51
Pavlovo	4.5.2012	-0,09	-68,47
	5.5.2012	0,64	0,73
	6.5.2012	0,44	-41,16
Pavlovo II	5.5.2012	0,87	-3,04
Uničov	8.7.2001	-0,60	0,41
	11.7.2001	0,32	-6,54
	16.7.2001	0,03	0,41
	17.7.2001	-0,90	-12,20

Tab. 26 Koeficient determinace (Nash-Sutcliffe) model kalibrovaných dat z plnohodnotného monitoringu pro jednotlivé srážkové události.

odlehovací komora	srážková událost	RE hloubky	RE průtok
Na Pastvinách	4.5.2012	0,89	0,95
	5.5.2012	0,85	0,77
	6.5.2012	0,95	0,95
Pavlovo	4.5.2012	0,74	0,07
	5.5.2012	0,93	0,52
	6.5.2012	0,91	0,15
Pavlovo II	5.5.2012	0,31	-1,47
Uničov	8.7.2001	0,51	-0,36
	11.7.2001	-0,17	-7,29
	16.7.2001	0,48	0,14
	17.7.2001	0,22	-12,61

Z grafického porovnání a z Tab. 25 a Tab. 26 lze usoudit, že referenční model má obecně lepší výsledky při generování průtoků. V případě asových hladin se výkonnost liší komoru od komory. Odlehovací komora Na Pastvinách má lepší koeficient determinace u průtoků, než referenční model. Odchyłka ovšem není ani v jednom případě úplně mimo přípustné hodnoty a v případě asových hladin je dokonce lepší, než u referenčního modelu. Jinak tomu je u odlehovací komory Pavlova, jejíž koeficient determinace u hladin jsou výrazně horší, než u referenčního modelu a odchyłky průtoků jsou naprosto nepřípustné. To může být způsobeno špatnou kalibrací odlehovací komory Pavlova II, která se nachází před odlehovací komorou Pavlova nebo vysokou nejistotou vstupních dat (nevhodné umístění srážkoměru). Na odlehovací komoře v Uniovi je koeficient determinace ve všech případech nevyhovující. V případě hladin je ale model kalibrovaný na dobrou dobu mnohem blíže přípustným hodnotám, než model referenční.

4 DISKUSE

Rasmussen & kol. (2008) mají ve své práci k dispozici redukční faktor pro každou z 293 srážek, které na experimentálním povodí v Dánsku zpracovával Thorndahl (2008). Kalibrovaný redukční faktor tedy neporovnávají s jedním redukčním faktorem povodí, ale s redukčním faktorem dané srážky. Ve své práci poukazují na to, že průměrný redukční faktor nelze použít pro každou srážkovou událost, protože je odezva povodí na každou srážku jiná. Kalibrace redukčního faktoru pro konkrétní srážku má ovšem i přes strohá data z monitoringu poměrně přesné výsledky, a proto lze považovat za úspěšnou. V praxi se ovšem kalibruje jeden redukční faktor pro povodí, který je následně uplatněn pro každou dešovou událost. V praxi se ovšem také nekalibruje jen redukční faktor, ale mnohem více parametrů hydrologického i hydraulického modelu a ke kalibraci máme k dispozici mnohem více informací o systému. Pokud bychom chtěli uplatnit posuzovanou metodu monitoringu, museli bychom najít rozšíření metody kalibrace tak, aby výsledné hodnoty byly více stabilní. Rozšířením metodiky by mohlo být *a) vyšetření redukčního faktoru pro různé srážkové události* nebo *b) kalibrace dalšího parametru*.

Ad a) Pokud bychom měli k dispozici dostatečně dlouhou časovou řadu srážek a povodí, bylo by možné srážky rozdělit podle jejich parametrů (doba trvání, úhrn, průměrná a maximální intenzita) do několika skupin a pro každý tento „typ“ srážky následně nakalibrovat redukční faktor. Verifikace by proběhla s takovým redukčním faktorem, který by byl vyhodnocen pro danou verifikační srážku.

Ad b) Kalibraci by bylo možné rozšířit o kalibraci parametru ztrát na komoře, které mají podle citlivostní analýzy velký vliv na odtok na síti. Koeficient místních ztrát na komoře je možné přiblížit reálnější hodnotě, než je hodnota defaultní. Předpokládejme, že je kóta povodňové hrany nižší, než kóta nejvyššího bodu příčného profilu odtoku. Při povodni tedy nedochází k tlakovému proudění na odtoku a výška hladiny na odtoku je rovna výšce povodňové hrany (takto je koncipována v tloušťce odlehovacích komor). Na základě informací o průměru a sklonu odtoku je možné pomocí základních hydraulických rovnic (rovnice kontinuity, Chézyho rovnice) získat hodnotu průtoku na odtoku z komory při povodni (výška hladiny je nastavena na výšku povodni). Pokud následně zatížíme nátok na komoru tímto

pr tokem, je možné kalibrovat ztráty na komo e. Hodnota koeficientu místních ztrát je nalezena ve chvíli, kdy výška hladiny v komo e odpovídá výšce p epadové hrany. Tento postup byl aplikován na odleh ovací komo e Na Pastvinách. Koeficient místních ztrát byl nakalibrován na hodnotu 1,34 a následně prob hla kalibrace reduk ního faktoru podle metodiky. Nalezený pr m rný reduk ní faktor byl 0,55, což je oproti reduk nímu faktoru nalezenému bez kalibrace ztrát (0,66) vyhovující hodnota p i porovnání s referen ním reduk ním faktorem 0,39 (RE = 0,41). Toto rozší ení metodiky je tedy žádoucí.

Rozdílný reduk ní faktor model m že být také zp soben nedostate ným množstvím srážek použitých pro kalibraci modelu. Z celkového monitoringu byly použity v p ípad Ostravy jen dv kalibra ní srážky, protože metodika vyžaduje takové srážkové události, které zp sobí odtok na p epadu. Dv srážkové události nelze považovat za v rohodný reprezentativní vzorek a nalezený pr m rný reduk ní faktor tedy nemusí odpovídat pr m rnému reduk nímu faktoru referen ního modelu.

P i vyhodnocení výkonnosti model byl jediný model povodí Na Pastvinách vyhodnocen jako vyhovující. Povodí Pavlova m že být ovlivn no nevhodným umíst ním srážkom ru a také faktem, že zde byly dv odleh ovací komory za sebou, což je nad rámec zadání metodiky. V p ípad Uni ova byly délky p epadu díky nízko položené p epadové hran ádov delší, než v p ípad p epad v Ostrav i na experimentálním povodí v Dánsku. P i výše položené p elivné hran dochází k p epadu krátce a p epad zaznamenává vrchol k ivky hladiny. P i citlivostní analýze bylo zjišt no, že ím kratší je délka p epadu, tím je citliv jší na zm nu parametru. V p ípad povodí Uni ov m že být tedy výsledek kalibrace nevhodný práv díky extrémn dlouhým dobám p epadu.

Citlivostní analýza byla provedena pro ty i vytypované parametry, z nich koeficient místních ztrát na komo e jako jediný vykazoval výrazný vliv na délku p epadu. Dalšími parametry by mohly být ztráty t ením a koeficient, který redukuje splašky za bezdeštného stavu. Ztráty t ením jsou v modelu vyjád eny Manningovým íslem pro každý typ materiálu a mají na odtok obecn mnohem menší vliv, než charakteristiky povodí. Splašky v uvedené metodice kalibrovat nelze, ale na délku p epadu by nem ly mít velký vliv. Výška hladiny p i bezdeštném stavu se totiž

pohybuje v rámci desetín nebo setín výšky hladiny při extrémních průtocích, které způsobí epadu na komo e.

Při vyhodnocování výkonnosti modelu musíme počítat s nejistotami různých aspektů popsaných v kap. 2.5. V případě modelů použitých v této práci jsou vysoké nejistoty spojené se vstupními daty a nejistoty spojené s monitoringem. Je třeba si uvědomit, že naměřené hodnoty neodpovídají přesně reálnému dění ve stoce. Při měření průtoků může docházet až k dvacetiprocentní chybě, proto měřená data nelze brát jako stoprocentně pravdivá. To může za následek velikost odchylek modelovaných dat od měřených. V případě povodí Na Pastvinách vykazují oba modely uspokojivé výsledky, v modelu Pavlovova mají modely buď dobrý průtok nebo hloubky a v případě Uni ova dochází k chybám, a to takovým, že pokud má model kalibrovaný na dobrou epadu nepřijatelné výsledky, jsou výsledky neuspokojivé i u modelu referenčního. Příčinou mohou být právě nejistoty spojené s měřením.

Pro žádné posouzení modelu by bylo potřeba více srážkových událostí ze srážkovým umístěných přímo na povodí. Referenční časové řady byly upraveny na základě dat měřených plnohodnotným monitoringem. Měrná kampaň je v tomto případě díky finanční náročnosti jen tak dlouhá, aby získaná data byla dostatečná pro kalibraci a verifikaci modelu. Pro další posouzení nízkonákladové metody kalibrace je tedy žádoucí dlouhodobý soubor dat o délce epadu na odlehovacím komo e malého povodí.

Pokud bychom chtěli nalézt další možnosti nízkonákladové kalibrace, mohli bychom zvážit instalaci hladinoměru nad stoku v odlehovacím komo e. Jedná se o odlišnou metodiku, než je uvedena v Rasmussen & kol. (2008), která je nákladnější, ale stále je relativně levnější než monitoring hloubek i průtoků. Pokud bychom měli k dispozici tvarokřivky hladiny v odlehovacím komo e, byla by kalibrace přesnější a zároveň by bylo možné kalibrovat mnohem více parametrů, než jen redukční faktor.

5 ZÁV R

Práce se zabývá metodikou nízkonákladové kalibrace srážko-odtokového modelu urbanizovaného území. Vychází ze článku „A low cost calibration method for urban drainage models”, který publikovali Rasmussen & kol. V roce 2008. Cílem práce bylo zhodnocení této metodiky a posouzení jejího použití v praxi. Pro zhodnocení byly použity tři modely MOUSE stokových sítí malých povodí zakončených odlehovací komorou. Modely byly zatíženy splašky a dešovými událostmi, které způsobily popádní odlehovací komory. V modelech byl kalibrován parametr povodí – redukční faktor – tak, aby byla dosažena doba popádní odpovídající naměřeným datům. Po kalibraci na dešových událostech byl redukční faktor zprůměrován a dosazen do verifikační srážky. Výsledná redukční faktor povodí byl porovnán s referenčním redukčním faktorem.

Na základě výsledků kalibrace bylo vyhodnoceno, že je obtížné najít pomocí popsané metodiky jednotný redukční faktor povodí. Pro pohled o citlivosti modelu na změnu dalších parametrů byla provedena citlivostní analýza závislosti doby popádní na redukčním faktoru a čtyřech parametrech – času koncentrace, poátních ztrátách, na místních ztrátách na komoře a na koeficientu tvaru povodí. Z citlivostní analýzy vyplynulo, že kromě redukčního faktoru nemají ostatní analyzované parametry povodí výrazný vliv na čas popádní na komoře. Zásadní úlohu ovšem hrají místní ztráty na odtoku z odlehovací komory.

Pro srovnání kalibrovaného a referenčního modelu byly následně porovnány časové průtoky a hladiny obou modelů a naměřených hodnot. Pro jednotlivá povodí a dešové události byly vypočteny relativní odchylky a ty byly porovnány graficky.

Model povodí Na Pastvinách byl po kalibraci nízkonákladovou metodou vyhodnocen jako dostatečně výkonný pro simulaci srážko-odtokového procesu na síti. V případě dalších modelů ovšem toto tvrdit nelze, proto je třeba se dále zabývat tím, jaké alternativy bychom mohli pro nízkonákladovou kalibraci použít. Jednou z variant je dlouhodobý monitoring a vyšetření různých redukčních faktorů pro různé typy dešových událostí. Další možností je rozšíření kalibrace o nalezení koeficientu místních ztrát na komoře. Pokud bychom netrvali na metodice kalibrace na základě

doby p epadu, bylo by možné prov ít kalibraci na základ výšky hladiny. K tomuto by ovšem byla za pot ebí instalace hladinom ru, což je varianta sice nákladn jší, ovšem ne tak nákladná, jako plnohodnotný monitoring.

V záv ru je nutné zd raznit, že pokud se chceme popisovanou metodou dále zabývat, je pot eba provést dlouhodob jší m rnou kampa , a tím získat informace o reakcích povodí na r zné deš ové události. Pokud by se rozší ení metody popsané v diskusi prokázalo jako dobré ešení kalibrace, bylo by možné tuto metodu použít jako levn jší variantu pro sestavování model stokových sítí.

6 P EHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJ

AJAMI N. K., DUAN Q. & SOROOSHIAN S., 2007: An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework. Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. *Water Resources Research* 43: W01403.

BEVEN K., 2001: Rainfall runoff modelling: The primer. John Wiley and Sons, London, 372 s.

BEVEN K., 2006: a manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology* 320: 18-36.

BEVEN K. J. & BINLEY A.M., 1992: The future of distributed models: Model calibration and predictive uncertainty. *Hydrological Processes* 6: 279-298.

BLOSCHL G. & SIVAPALAN M., 1995: Scale issues in Hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes* 9: 251-290.

BREINHOLT A., MØLLER J. K., MADSEN H. & MIKKELSEN P. S., 2012: a formal statistical approach to representing uncertainty in rainfall-runoff modelling with focus on residual analysis and probabilistic output evaluation – Distinguishing simulation and prediction. *Journal of Hydrology* 472-473: 36-52.

CARSTENSEN J., VANROLLGHEM P., RAUCH W. & REICHERT P., 1997: Terminology and methodology in modelling for water quality management – a discussion starter. *Water Science and Technology* 36: 157-168.

CENIA, 2013a: Geoportal. Online: geoportal.gov.cz, staženo: 9.2.2013.

CENIA, 2013b: Geoportal, mapová vrstva arccr. Online:

<http://geoportal.gov.cz/ArcGIS/services/>

CENIA/cenia_arccr/MapServer/WMSServer, mapový podklad staženo: 4.4.2013.

CLARK M. P., SLATER A. G., RUPP D. E., WOODS R. A., VRUGT J. A., GUPTA H. V., WAGENER T. & HAY L. E., 2008: Framework for Understanding Structural Errors (FUSE): a modular framework to diagnose differences between hydrological models. *Water Resources Research* 44: W00B02.

HMÚ, 2013: Historická data. Online:
http://www.chmi.cz/portal/dt?menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_1_Zakl_Info, staženo: 9.2.2013.

DHI, 2008: MIKE URBAN Collection system user guide. DHI Group, 444 s.

DHI, 2012a: MOUSE Pipe flow reference manual. DHI Group, 118 s.

DHI, 2012b: MOUSE Runoff reference manual. DHI Group, 60 s.

DHI, 2012c: MIKE URBAN Tools, Result Verification, Comparison between results. DHI Group, 18 s.

DOOGE J. C. I., 1986: Looking for Hydrologic Laws. *Water Resources Research*, 22: 46-58.

DOTTO C. B. S., MANNINA G., KLEIDORFER M., VEZZARO L., HENRICHS M., MCCARTHY D. T., FRENI G., RAUCH W. & DELETIC A., 2012: Comparison of different uncertainty techniques in urban stormwater quantity and quality modelling. *Water research* 46: 2545-2558.

ELLIOTT A. H. & TROWSDALE S. A., 2007: a review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software* 22: 394-405.

FRENI G., MANNINA G. & VIVIANI G., 2009: Uncertainty assessment of an integrated urban drainage model. *Journal of Hydrology* 373: 392-404.

HLAVÍNEK P., MIŠKIN J. & PRAX P., 2003: Stokování a čištění odpadních vod. CERM, s.r.o., Brno, 284 s.

HRÁDEK F. & KUŠEK P., 2008: Hydrologie. Reprografické studio PEF ZU, Praha, 280 s.

JAJARMIZADEH M., HARUN S. & SALARPOUR M., 2012: a review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science & Technology* 5: 249-261.

KABELKOVÁ I., HAVLÍK V., POLLERT J. & HLAVÍNEK P., 2000: Proud ní, transport a transformace látek ve stokové síti. In: KREJ Í V. & KOL., 2000: Odvodn ní urbanizovaných území – koncep ní p ístup. NOEL, s.r.o., Brno, 562 s.

KABELKOVÁ I., ZEMAN E. & KREJ Í V., 2000: Simula ní modely. In: KREJ Í V. & KOL., 2000: Odvodn ní urbanizovaných území – koncep ní p ístup. NOEL, s.r.o., Brno, 562 s.

KAVETSKI D., KUCZERA G. & FRANKS S. W., 2006: Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modelling: 2. Application. *Water Resources Research* 42: W03408.

KNAPP H. V., DURGUNO LU A. & ORTEL T. W., 1991: a review of rainfall-runoff modelling for stormwater management. Champaign, Ill. : Illinois State Water Survey, 92 s.

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

LEE J., 1993: a formal approach to hydrological model conceptualization. *Hydrological Sciences Journal* 38, 391-401.

LIU Y. & GUPTA H. V., 2007: Uncertainty in hydrologic modelling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research* 43: W07401.

MAGISTRÁT M STA OSTRAVY, 2013: o Ostrav . Online: <http://www.ostrava.cz/cs/o-meste>, staženo: 9.2.2013.

NOVÁK L. & STRÁNSKÝ D., 2007: Možnosti vyhodnocení kalibrace srážko-odtokového simula ního modelu. *Optimalizace návrhu a provozu stokových sítí a OV* 2007: 121-126.

PECHLIVANIDIS I. G., JACKSON B. M., MCINTYRE N. R. & WHEATER H. S., 2011: Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal* 13, 193-214.

QUITT, E., 1971: Klimatické oblasti Československa. *Studia Geographica*, Brno, 73 s.

RASMUSSEN M. R., THORNDahl S. & SCHAARUTP-JENSEN K., 2008: a low cost calibration method for urban drainage models. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh.

RITTER A. & MUNOZ-CARPENA M., 2013: Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology* 480, 33–45.

SAUL A. J., 1996: Hydraulic assessment. In: READ G. F. & VICKRIDGE I., 1996: *Sewers: Repair and Renovation*. Butterworth-Heinemann, 432 s.

STRÁNSKÝ D., KABELKOVÁ I. & KOL., 2009: Metodická příručka posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí. *Optimalizace návrhu a provozu stokových sítí a OV 2009*. ARDEC s.r.o., Brno, 84 s.

THORNDahl S., 2008: Uncertainty assessment in long term urban drainage modelling. *Disertační práce*, Aalborg University, 222 s.

ÚAD MĚSTSKÉHO OBVODU PROSKOVICE, 2013: Základní data. Online: <http://www.ostrava-proskovice.cz/cs/o-proskovicich/zakladni-data-1>, staženo: 20.2.2013.

VOJINOVIC Z. & SOLOMATINE D. P., 2006: Evaluation of different approaches to calibration in the context of urban drainage modelling. 7th International Conference on Urban Drainage, Melbourne.

WAPUG, 2002: Code of practice for the hydraulic modelling of sewer systems 3rd Edition. Wastewater planning users group, 69 s.

ZOPPOU CH., 2001: Review of urban storm water models. *Environmental modelling and software* 16: 195-231.

SEZNAM OBRÁZK

Obr. 1 Schéma řešení srážko-odtokového modelu stokové sítě	14
Obr. 2 Schéma tvorby modelu dle Bevena.....	16
Obr. 3 Schéma postupu tvorby modelu v oblasti vodního hospodářství.	17
Obr. 4 Schéma šachty.....	27
Obr. 5 Variabilní souřadnice tvaru povodí.	32
Obr. 6 Výpočetní síť v MOUSE.	38
Obr. 7 Abbotovo schéma a jeho aplikace.....	38
Obr. 8 Schéma zájmového povodí Na Pastvinách.	40
Obr. 9 Schéma zájmového povodí Pavlovova.	42
Obr. 10 Schéma zájmového povodí Uničov.	44
Obr. 11 Schéma umístění srážkoměru povodí Na Pastvinách.	46
Obr. 12 Srážka nad povodím Na Pastvinách ze dne 4.5.2012.	47
Obr. 13 Srážka nad povodím Na Pastvinách ze dne 5.5.2012.	47
Obr. 14 Srážka nad povodím Na Pastvinách ze dne 6.5.2012.	47
Obr. 15 Schéma umístění srážkoměru povodí Pavlovova.	49
Obr. 16 Srážka nad povodím Pavlovova ze dne 4.5.2012.	50
Obr. 17 Srážka nad povodím Pavlovova ze dne 5.5.2012.	50
Obr. 18 Srážka nad povodím Pavlovova ze dne 6.5.2012.	50
Obr. 19 Schéma umístění srážkoměru povodí Uničov.	51
Obr. 20 Srážka nad povodím Uničov ze dne 8.7.2001.....	52
Obr. 21 Srážka nad povodím Uničov ze dne 11.7.2001.....	53
Obr. 22 Srážka nad povodím Uničov ze dne 16.7.2001.....	53
Obr. 23 Srážka nad povodím Uničov ze dne 17.7.2001.....	53
Obr. 24 Pohled do odlehovací komory Na Pastvinách.....	58
Obr. 25 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Na Pastvinách.	58
Obr. 26 Pohled do odlehovací komory Pavlovova.....	59
Obr. 27 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Pavlovova.	60
Obr. 28 Pohled do odlehovací komory Pavlovova II.	61
Obr. 29 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Pavlovova II.	62
Obr. 30 Umístění hladinoměru Uničov.....	63
Obr. 31 Graf srážek a průběhu hladiny pro OK Uničov.	64
Obr. 32 Graf kalibrace OK Na Pastvinách.....	66
Obr. 33 Graf kalibrace OK Pavlovova II.	66
Obr. 34 Graf kalibrace OK Pavlovova.....	67
Obr. 35 Graf kalibrace OK Uničov.....	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 P ehled kritérií používaných pro vyhodnocení výkonnosti modelu	20
Tab. 2 Doporu ené hodnoty kritérií.	22
Tab. 3 Hrubý odhad náklad na t ím sí ní m ení dat v malém m st	25
Tab. 4 Povinné parametry šachty.	28
Tab. 5 Povinné parametry spoje.	29
Tab. 6 Povinné parametry funkce.	30
Tab. 7 Parametry odtokového modelu "Time/Area"	31
Tab. 8 Pr m rné m sí ní úhrny Moravskoslezského kraje.	39
Tab. 9 Charakteristika povodí Na Pastvinách.	41
Tab. 10 Charakteristika povodí Pavlova.	42
Tab. 11 Pr m rné m sí ní úhrny Olomouckého kraje.	43
Tab. 12 Charakteristika povodí Uni ov.	44
Tab. 13 Parametry srážek nad povodím Na Pastvinách.	46
Tab. 14 Parametry srážek nad povodím Pavlova.	49
Tab. 15 Parametry srážek nad povodím Uni ov.	52
Tab. 16 Charakteristiky odleh ovací komory Na Pastvinách.	57
Tab. 17 P ehled p epad na OK Na Pastvinách.	58
Tab. 18 Charakteristiky odleh ovací komory Pavlova.	59
Tab. 19 P ehled p epad na OK Pavlova.	60
Tab. 20 Charakteristiky odleh ovací komory Pavlova II.	60
Tab. 21 P ehled p epad na OK Pavlova II.	62
Tab. 22 Charakteristiky odleh ovací komory Uni ov.	63
Tab. 23 P ehled p epad na OK Uni ov.	64
Tab. 24 Souhrn dat po kalibraci a verifikaci.	68
Tab. 25 Koeficient determinace (Nash-Sutcliffe) model kalibrovaných na základ informací o asu p epadu na odleh ovací komo e pro jednotlivé srážkové události.	70
Tab. 26 Koeficient determinace (Nash-Sutcliffe) model kalibrovaných datech z plnohodnotného monitoringu pro jednotlivé srážkové události.	70

SAMOSTATNÉ P ÍLOHY

P íloha 1 – Charakteristiky zájmových území

P íloha 2 – Porovnaní parametr

P íloha 3 – Porovnaní asových ad