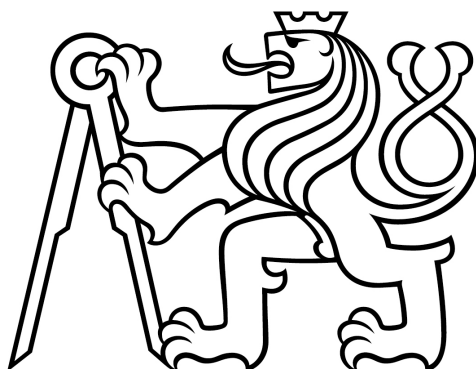


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA ZDRAVOTNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ



MODELOVÁNÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH PROCESŮ
V POVODÍ STOKOVÉ SÍTĚ MĚSTA ČELÁKOVICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Anna Špačková

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. David Stránský, Ph.D.

leden 2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Špačková Jméno: Anna Osobní číslo: 439086
Zadávající katedra: Katedra zdravotního a ekologického inženýrství
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování srážko-odtokových procesů v povodí stokové sítě města Čelákovice

Název diplomové práce anglicky: Rainfall-runoff processes modelling of Čelákovice sewer system catchment

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat teoretickou a praktickou část. Teoretická část bude zaměřena na rešerši modelování srážko-odtokových procesů s ohledem na různou míru schematizace a popis metodického postupu. Praktická část bude sestávat ze stavby modelu experimentální lokality (stoková síť města Čelákovice) v prostředí PCSWMM a jeho následné kalibrace na základě provedené monitorovací kampaně. Výsledky budou interpretovány vzhledem k rozdílné úrovni schematizace modelu.

Seznam doporučené literatury:

Krejčí, V. a kol. (2002). Odvodnění urbanizovaných území - Koncepční přístup

Butler, D. (2000). Urban Drainage

CIWEM. Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Urban Drainage Systems. 1. vyd. London: CIWEM, 2017

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. David Stránský, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 24/9/2019

Termín odevzdání diplomové práce: 5. 1. 2020

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

24.9.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 5. 1. 2020

Podpis.....

Poděkování

Chtěla bych poděkovat především doc. Ing. Davidu Stránskému, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc při formování této diplomové práce. Též patří poděkování Ing. Lukáši Novákovi za ochotné konzultování stavby modelu. Oba mi byli vynikajícími mentory s mnoha cennými radami. Za nebývalou trpělivost s přístroji a podporu při monitoringu děkuji Ing. Vojtěchu Barešovi, Ph.D. Dále bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli podklady pro tvorbu modelu a též společnosti CHI, která mi propůjčila licenci k programu PCSWMM. Děkuji také svým rodičům za veškerou podporu, kterou mi při mém dosavadním studiu poskytli.

Annotation

This master thesis deals with building and calibration of two different schematizations of simulation models describing rainfall-runoff processes of experimental location at town Čelákovice. In the theoretical part differences between distributed and lumped model schematizations are explored. Practical part concerns with construction of both models and their calibration and verification based on data obtained from monitoring campaign. The results of calibration of both models are compared and evaluated at the end.

Keywords:

sewerage systems, PCSWMM simulation, lumped model, calibration, verification

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá stavbou a kalibrací dvou různě schematizovaných simulačních modelů popisujících srážko-odtokové procesy na experimentální lokalitě města Čelákovice. V teoretické části jsou zkoumány rozdíly mezi hrubě a podrobně schematizovanými modely. Praktická část se věnuje stavbě obou modelů a jejich kalibraci a verifikaci na základě dat získaných z monitorovací kampaně. Výsledky kalibrace obou modelů jsou na závěr porovnány a zhodnoceny.

Klíčová slova:

stokový systém, PCSWMM simulace, hrubě schematizovaný model, kalibrace, verifikace

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíle práce	9
3	Optimalizace funkce stokových systémů	10
3.1	Principy optimalizace stokových systémů	10
3.2	Standardy, metodiky a legislativa	11
4	Modelování srážko-odtokových procesů	12
4.1	Stavba modelů	12
4.1.1	Stavba hrubě schematizovaného modelu	13
4.1.2	Stavba podrobně schematizovaného modelu	14
4.2	Získávání dat měrnou kampaní	19
4.2.1	Měření srážek	20
4.2.2	Měření průtoků a hladin	22
4.3	Kalibrace a verifikace modelů	25
4.4	Srovnání různě schematizovaných modelů	28
5	Aplikace na experimentální lokalitě	31
5.1	Popis experimentální lokality a jejího odvodnění	31
5.2	Podklady	34
5.3	Hrubě schematizovaný model	34
5.4	Podrobně schematizovaný model	36
5.4.1	PCSWMM	37
5.4.2	Modelované objekty	38
5.5	Měrná kampaň	42
5.5.1	Měření srážek	43
5.5.2	Měření průtoků a hladin	46
5.5.3	Vybrané srážkové události	49
5.6	Kalibrace a verifikace modelů	53
5.6.1	Kalibrace a verifikace hrubě schematizovaného modelu	53
5.6.2	Kalibrace a verifikace podrobně schematizovaného modelu	54
5.6.3	Kritéria pro hodnocení kalibrace a verifikace	57

6	Diskuze výsledků a srovnání modelů	58
6.1	Hrubě schematizovaný model	58
6.2	Podrobně schematizovaný model	60
6.3	Srovnání modelů	62
7	Závěr	66
8	Seznam použitých zdrojů	67
9	Seznam obrázků	69
10	Seznam tabulek	73
11	Seznam použitých zkratk a symbolů	74
12	Přílohy	77
12.1	Kalibrace srážkoměrů	78
12.2	Listy charakteristik měrných profilů	84
12.3	Mapa rozmístění průtokoměrů a hladinoměrů	121
12.4	Vzorové hektary	122
12.5	Výsledky kalibrace hrubě schematizovaného modelu	126
12.6	Výsledky kalibrace podrobně schematizovaného modelu	138
12.7	Výsledky verifikace hrubě schematizovaného modelu	147
12.8	Výsledky verifikace podrobně schematizovaného modelu	158
12.9	Schéma hrubě schematizovaného modelu	167
12.10	Schéma podrobně schematizovaného modelu	168
12.11	Záznam monitoringu	169

1. Úvod

Vývoj simulačních prostředků dosáhl k dříve ani netušeným možnostem popisu srážko-odtokových dějů v urbanizovaném prostředí. Svět je velice heterogenní a stejně tak je rozmanitá i člověkem urbanizovaná krajina. Simulování takového prostředí přináší mnoho výzev v oblasti schematizace jak probíhajících procesů, tak fyzických rysů modelované oblasti.

Hrubě schematizované modely jsou jednoduché, ovšem výše zmíněnou heterogenitu světa popisují ve větším prostorovém a časovém kroku. Tato vlastnost se ale hodí jen pro některé aplikace. Podrobně schematizované modely naopak umožňují detailní popis chování systému a stejně tak i jeho posouzení.

Pokud je modelováno odvodnění identické urbanizované oblasti po kvantitativní stránce jako hrubě a podrobně schematizovaný model, dospějí oba modely k podobným kvalitám simulovaných dat v porovnání se změřenými daty? Přeneseně je otázkou, zda je pro modelování průtoku vody proteklé stokovým systémem potřeba detailní, propracovaný a prostorově distribuovaný model. Pokud je cílem, aby model létal (produkoval reálné proteklé objemy vody), je nutné, aby byl tolik detailní, nebo k tomuto účelu stačí prostší řešení? (Obrázek 1)



Obrázek 1: Je jejich cílem letět? Pokud ano, který z modelů poletí? [fotografie autorky]

2. Cíle práce

Cílem této diplomové práce je interpretace výsledků kalibrace podrobného (*distributed*) simulačního modelu stokové sítě města Čelákovice a jeho porovnání s hrubě schematizovaným (*lumped*) modelem. Rešeršní teoretická část srovnává rozdíly srážko-odtokových modelů s ohledem na míru jejich schematizace. Též je řešena metodika postupu tvorby modelu a jeho kalibrace. V praktické části jsou představeny oba postavené modely v experimentální lokalitě Čelákovice. Podrobný simulační model byl vytvořen v prostředí programu PCSWMM a hrubě schematizovaný model v programu Microsoft Excel s částečným využitím programovacího jazyka Visual Basic for Applications (VBA). Pro kalibraci a verifikaci modelů byla uplatněna data z měrné kampaně, při které byla shromažďována data o intenzitách srážek, průtocích ve stokách a hladinách na přepadových hranách odlehčovacích komor. Výsledky kalibrace a verifikace obou modelů byly porovnány a zhodnoceny.

Organizace diplomové práce kopíruje pracovní strukturu řešení problému. Po výše nastíněných cílech práce jsou v kapitole 3 rozebrány motivace k tvorbě simulačních modelů, problematika metodik a neexistence závazných požadavků na používané metody modelování. V kapitole 4 je popsán teoretický základ a principy stavby hrubě (*lumped*) a podrobně (*distributed*) schematizovaných modelů, sběr dat měrnou kampaní a kalibrace obou modelů. V závěru této kapitoly je vytvořeno srovnání obou modelů na základě literární rešerše. Následně jsou v kapitole 5 tyto teoretické poznatky aplikovány na experimentální lokalitě v Čelákovicích. V této kapitole jsou popsány zájmová lokalita, postavené modely, průběh a výsledky měrné kampaně, kalibrace a verifikace modelů. Ve kapitole 6 je proveden rozbor a diskuze výsledků a též srovnání a hodnocení postavených modelů. Nechybí ani ohlédnutí za vytyčenými cíli a porovnání dosaženými výsledky v závěrečné kapitole.

3. Optimalizace funkce stokových systémů

3.1. Principy optimalizace stokových systémů

Městská krajina se vyvíjí, rozšiřuje se a taktéž se mění i její charakter. V urbanizovaných oblastech se stále více vyzdvihují nároky na kvalitní, bezpečné a zdravé životní prostředí. Tyto tendence se propisují dále i do nakládání s vodou, jakožto nedílné součásti celého systému.

Města a obce mají již většinou vybudované a po léta využívané stokové systémy, ty ovšem kvůli své rigidní struktuře dokážou jen těžko pružně reagovat na změny charakteru urbanizovaných oblastí. Například spotřeba vody na osobu za několik posledních desítek let razantně poklesla, stokový systém zůstal ovšem stejný. Základní vhodnou metodou pro optimalizaci současného stavu, ale i vizualizaci budoucího vývoje stokové sítě je využívání počítačových modelů. Ty umožňují nejenom účinněji se stávající stokovou sítí pracovat, ale i precizněji navrhovat její případná rozšíření a změny. Simulační modely proto mohou značně pomoci při posouzení stávajícího stavu stokové sítě a optimalizaci jejího provozu skrze aplikaci podrobného srážko-odtokového popisu lokality. Stejně tak se dá pomocí modelu simulovat budoucí vývoj, od změny spotřeby vody v domácnostech po vyšší úroveň zasakování v urbanizovaných oblastech.

Aby bylo dosaženo efektivního využívání modelu, je nutné ho ověřovat a porovnávat se skutečným fungováním stokové sítě, k tomuto účelu slouží monitorovací kampaně. Data z monitoringu se využívají ke kalibraci a následné verifikaci modelu. Kalibrací se rozumí úprava parametrů simulačního modelu tak, aby jím předkládané výsledky odpovídaly reálně naměřeným hodnotám. Verifikace pak následně ověřuje, zda kalibrovaný model obstojí i v konfrontaci s nezávislými daty. Odhaluje tím, zda nebyl model kalibrován tak, aby vyhověl pouze konkrétním sériím naměřených dat. [1] [2]

Podle účelu může být využito podrobnějšího (*distributed*) či méně podrobného (*lumped*) modelu. Zjednodušení může být aplikováno jak na samotné stokové síti (např. vynechání podružných úseků), tak i na podrobnosti popisu stavební konstrukce objektů

na síti a jejich funkce (např. odlehčovací komora (OK) nebo čerpací stanice). V případě hrubě schematizovaného modelu se model může zjednodušit až do té míry, že neřeší stokovou síť jako úseky potrubí a šachet, ale pouze jako odtokové oblasti. [2]

3.2. Standardy, metodiky a legislativa

Ačkoliv současný vývoj výpočetní techniky poměrně dlouho umožňuje vytváření simulačních modelů stokových systémů a mnoho obcí a měst těchto prostředků již naplno využívá, žádný zákon či nařízení neudává vlastníkům pevně daná pravidla jak o modely odvodnění náležitě pečovat.

V obecné rovině jsou základy pro užívání sofistikovaných simulačních modelů naznačeny ve směrnici Rady Evropských společenství 91/271/EHS „*Projektování, výstavba a udržování stokových soustav se provádí v souladu s nejlepšími technickými znalostmi, nepřináší-li to nadměrné náklady...*“ [3] Nejlepší technické znalosti v podobě simulačních modelů jsou, ovšem snadno se při jejich realizaci vyplní dovětek výše citované části směrnice. Samotné vytvoření modelu, jeho následná správa a aktualizace jsou finančně nákladné a mohly by tvořit významnou položku v rozpočtech malých měst a obcí. V případě velkých stokových systémů bude naopak přínos simulačního modelu významnější.

Pevně nejsou zakotveny ani metody, pro využívání simulačních modelů. Doporučeným návodem v českých podmínkách je metodická příručka *Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí* [2] zpracovaná Asociací čistírenských expertů České republiky v roce 2009. Ze zahraničních metodik se problematikou zabývá Chartered Institution of Water and Environmental Management (CIWEM), dříve pojmenovaná Wastewater Planning Users Group (WaPUG). Tato organizace ve svém *Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Urban Drainage Systems* [1] popisuje celý proces tvorby modelu od definice projektu až po management výsledného modelu.

4. Modelování srážko-odtokových procesů

Komplikované děje městského stokování mohou být popsány simulačními srážko-odtokovými modely. Ty se v principu skládají ze dvou modelovaných vrstev, a to hydrologické a hydraulické. Hydrologický model, popisující povrchový odtok z povodí, řeší tvorbu a koncentraci efektivního deště. Mnoho faktorů může způsobit, že déšť dopadlý na povrch se vůbec nemusí propast do množství vody ve stokovém systému. Těmito faktory jsou trvalé ztráty, retence, evapotranspirace, intercepce, infiltrace propustnými povrchy, ale i infiltrace puklinami zdánlivě nepropustných povrchů či nevyzpytatelná a náročná přesná definice odtokových cest. Právě ztráty vody v povodí a charakteristika podpovodí ovlivňující výsledný odtokový hydrogram jsou klíčovými faktory první vrstvy srážko-odtokového modelu. Další vrstva, hydraulická, popisuje odtok vody ve stokové síti. Neustálené proudění v potrubích s volnou hladinou popisují Saint-Venantovy rovnice. Základními charakteristikami jsou informace o potrubí, jeho sklonu, průměru a drsnosti. Chování stokového systému ovlivňují též objekty na síti, jako jsou odlehčovací komory, retenční nádrže a další. [2] [4]

Jelikož tato práce porovnává dvě míry schematizace, je důležité zmínit, že podrobně schematizovaný model se skládá z více prvků podpovodí než hrubě schematizovaný model. Jednotlivé hydrogramy spočítané pro každé podpovodí v podrobně schematizovaném modelu jsou pak přiřazeny konkrétním vtokovým šachtám a tvoří tak základ pro hydraulický model stokové sítě. V případě hrubě schematizovaného modelu jsou podpovodí rozměrnější a zpravidla popisují povodí nad významnými objekty stokové sítě. Pohyb vody ve stokové síti je tak zanedbán. Takové modelování může být užitečné v případě nedostatečného množství dat o podpovodích, které by detailněji popisovaly různorodost oblasti. [2] [5]

4.1. Stavba modelů

Ačkoliv modely s různou mírou schematizace popisují tutéž problematiku odtoku vody z urbanizovaných oblastí, každý z nich se liší svou komplexností, počtem modelovaných

objektů a množstvím parametrů těchto objektů. Z tohoto vyplývá i odpovídající množství a podoba matematických vztahů.

4.1.1 Stavba hrubě schematizovaného modelu

Hrubě schematizovaný (*lumped*) model řeší velikost průtoků v čase v konkrétním uzávěrném profilu, průtok je tak funkcí pouze času. Ve svém jádru se jedná o aplikaci rovnice kontinuity (1).

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (1)$$

Jestliže přítok I bude reprezentovat vodu vstupující do systému a odtok Q bude vyjadřovat vodu protékající ve stoce uzávěrným profilem povodí, tak bude možné oblast schematizovat jako lineární rezervoár. Evapotranspirace a infiltrace vody tak nejsou v tomto případě podrobněji na území podpovodí řešeny.

Průběh výtoku z naplňovaného a vyprazdňovaného rezervoáru má podobné charakteristiky jako křivky odtoku z povodí způsobené krátkými dešti. Oba mají prudkou stoupající část a mírnější klesání. Odtok je pak funkcí výšky hladiny v rezervoáru se svislými stěnami (2). [6] [7]

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{K_{Sp}} \cdot \frac{dV_{Sp}}{dt} \quad (2)$$

Podmínkou je kontinuita v rámci rezervoáru, která vyjadřuje změny objemu vody v čase (3).

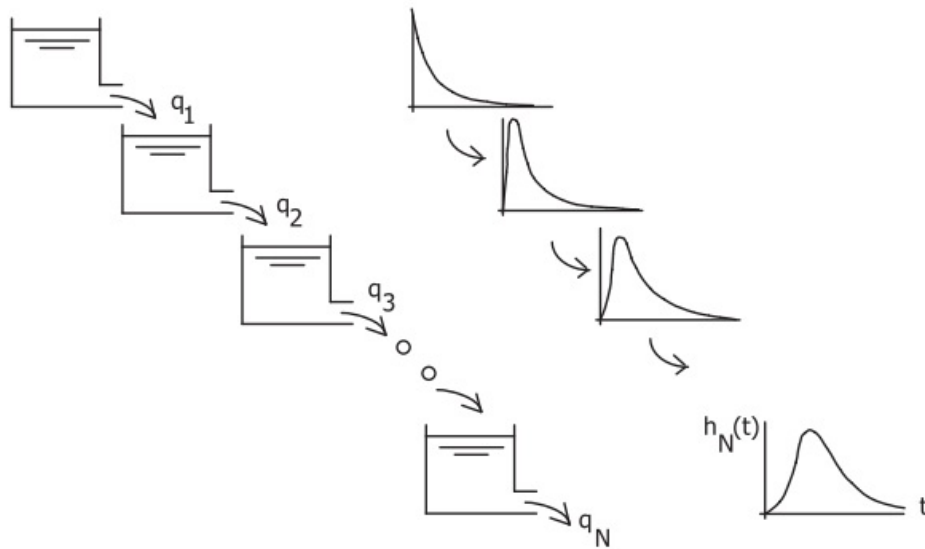
$$\frac{dV_{Sp}}{dt} = r_{eff}(t) \cdot A - Q \quad (3)$$

Výsledkem dosazením rovnice (3) do rovnice (2) je diferenciální rovnice lineárního rezervoáru. (4).

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{K_{Sp}} (r_{eff} \cdot A - Q) \quad (4)$$

Klíčovou otázkou této rovnice je určení retenční konstanty K_{Sp} . Konstantu je možné odvodit z pozorovaného (monitoringem sledovaného) průběhu hydrogramu v uzávěrném profilu, či použít některou z empirických rovnic (např. dle Neumanna, či Viesmanna s omezeními velikosti plochy a sklonu povodí). [7]

Definování celé odvodňované oblasti nad uzávěrným profilem jako jeden rezervoár je vhodné pouze v případě menších rozloh povodí nad uzávěrným profilem s kratšími dobami dotoku. Jelikož popsání celé odvodňované oblasti by bylo často příliš simplicistní, je vhodné podpovodí rozdělit na více rezervoárů. Nash v roce 1957 navrhl model kaskády lineárních rezervoárů, kde je odtok z prvního rezervoáru okamžitým přítokem do druhého. Parametrem modelu se pak stává nejenom retenční konstanta, ale také počet rezervoárů. Schéma modelu je znázorněno na Obrázku 2. [4] [5]



Obrázek 2: Schéma kaskády lineárních rezervoárů [4]

Pokud skrze soustavu lineárních rezervoárů projde jednotkové množství vody, výsledkem je funkce okamžitého jednotkového hydrogramu (5).

$$h(t) = \left(\frac{t}{K_{Sp}} \right)^{N-1} \frac{\exp(-t/K_{Sp})}{K_{Sp}(N-1)!} \quad (5)$$

Odtokový hydrogram pak vznikne znásobením rovnice s množstvím vody spadlé na povodí. Retenční konstanta K_{Sp} je předmětem kalibrace modelu.

4.1.2 Stavba podrobně schematizovaného modelu

Na rozdíl od *lumped* modelu, podrobně schematizovaný (*distributed*) model neomezuje popis průtoku na konkrétní uzávěrný profil, ale řeší ho plošně v celém povodí. Průtok je tak funkcí času a prostoru. Jelikož se množství protéké vody stokovou sítí výrazně

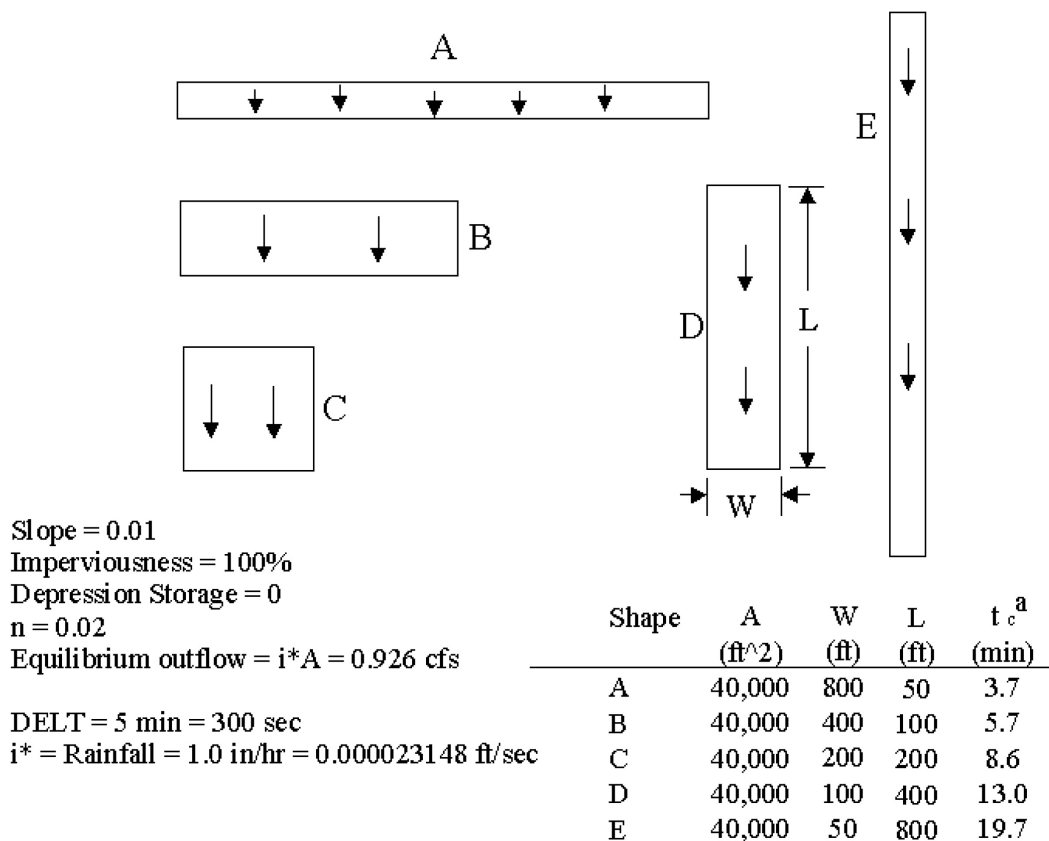
mění v čase, je v praxi důležité modelování neustáleného proudění. Změny průtoku jsou popsány vztahy zákonů zachování hmoty, energie a hybnosti. [4] [8]

Modelování podpovodí

Určení odtokových poměrů v modelované oblasti se stanovuje pomocí hydrotechnické situace, která je pak hlavním podkladem pro modelování podpovodí. Dle ČSN 75 6101 se hranice podpovodí určují při sklonu terénu do 5 % dle metody ideálních střech. V případě větších sklonů je použita hydrologická metoda. Maximální velikost povodí by měla být 1 ha. [9]

CIWEM pro definování podpovodí doporučuje detailnější analýzu oblasti. Povodí by měla mít stejný charakter, využití území a půdní typ. Velké nepropustné plochy jako školy, parkoviště a supermarkety by měly být modelovány individuálně. Zaústění odtoků z významných objektů jako jsou nemocnice a industriální oblasti by měly být modelovány dle podkladů vlastníků, aby se předešlo nereálným zahlcením potrubí v modelu. Velká povodí mají být rozdělena na více území a zaústěna do odpovídajícího místa stokové sítě. Pro městské oblasti CIWEM doporučuje maximální plochu podpovodí 2 ha, tedy dvojnásobnou oproti ČSN. [1]

Model podpovodí se snaží zachytit proces od dopadu deště na povrch přes tvorbu efektivního deště po jeho zaústění do stokové sítě. Přesun vody po povodí je poměrně komplikovaně zachytitelný děj a jeho přesný popis se stále vyvíjí. V rámci podpovodí se mohou určit preferenční cesty (*flow paths*), ze kterých se za pomoci známé plochy podpovodí určí jeho šířka. V závislosti na šířce a délce podpovodí se dramaticky mění doba dotoku k zaústění do stokové sítě. Tuto závislost ilustruje Obrázek 3, na kterém jsou čtyři obdélníková a jedno čtvercové podpovodí o stejné celkové ploše. Se zvyšující se délkou povodí se významně zvyšuje doba dotoku. [1] [10]



Obrázek 3: Různé tvary odvodňovaných oblastí ilustrující efekt délky podpovodí [10]

Důležitým parametrem je podíl propustných a nepropustných ploch a popis ztrát na těchto površích. Propustné a nepropustné plochy se dají určit osobní prohlídkou lokality, z leteckých snímků, digitalizovaných map, či geografických informačních systémů popisujících charakter oblasti a velikosti ploch. Další možností jsou družicová data, z kterých se dají na základě barevného (i infračerveného) spektra rozlišit jednotlivé kategorie povrchů. Největší nevýhodou této metody je cena družicových snímků. Též je možné použít metodu vzorových hektarů, kdy se podíl jednotlivých druhů povrchů spočítá na jednom typizovaném hektaru. Infiltraci ovlivňuje mnoho parametrů závislých na půdním typu, struktuře a zhutnění půdy a půdní vlhkosti. Vztahy infiltrace jsou popsány například Hortonovou či Green-Amptovou rovnicí. [4] [7]

Dalšími parametry podpovodí jsou drsnost povrchu a kapacita povrchové retence. Jednotlivá podpovodí by dále měla mít ideálně po celé své ploše jednotný sklon terénu. Pro oblasti s vysokou hladinou podzemní vody může být relevantní zapojit

také parametry týkající se podzemních vod. Pro kontinuální modelování se mohou aplikovat i parametry pro evapotranspiraci. [4] [10]

Modelování proudění

Pro nerovnoměrné jednorozměrné proudění v otevřených kanálech s pozvolna se měnící hladinou odvodil Saint-Venant rovnice, jež jsou po něm pojmenovány. Základ tvoří rovnice kontinuity (6) a pohybová rovnice (7). [4]

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

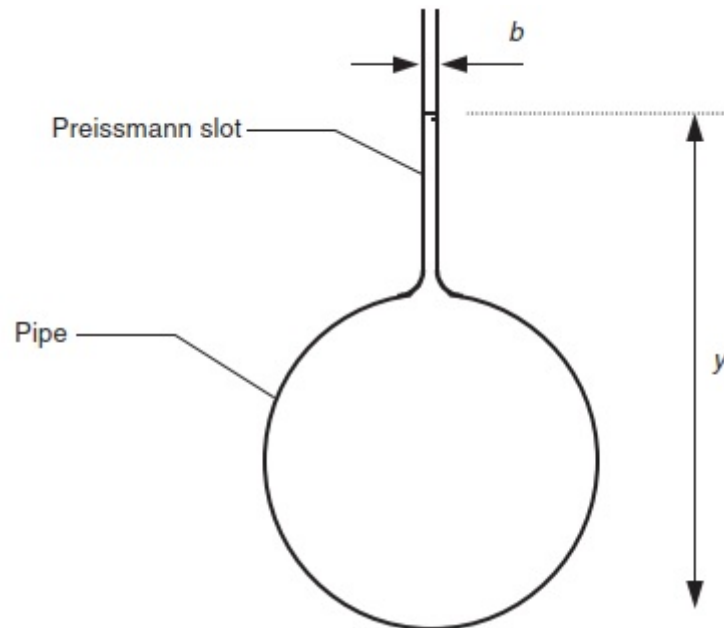
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (7)$$

Každý z členů rovnice (7) umožňuje jinak detailní výpočet. První a druhý člen rovnice vyjadřuje setrvačné síly, třetí člen zachycuje síly tlakové a poslední člen vyjadřuje rozdíl třecí a gravitační síly. Poslední člen by samostatně vytvořil rovnici kinematické vlny, která je pro svou jednoduchost v modelování nedostačující (aplikuje se na rovnoměrné ustálené proudění). Pokud je do rovnice přidán člen tlakových sil, vznikne difuzní vlna. Vztah pak popisuje změny proudění také po délce. Toho se pak využívá při modelování zpětného vzdutí. Pokud jsou brány v úvahu všechny členy rovnice, jedná se o rovnici dynamické vlny, ta už popisuje i setrvačné síly. Pro řešení Saint-Venantových rovnic se zpravidla používá metoda konečných diferencí, kdy se podélná vzdálenost a čas rozdělí do malých, diskretních úseků. Pro výpočet jsou také důležité okrajové podmínky, které model limitují (průtok na vtoku a výška hladiny na výtoku). [4] [7]

Saint-Venantovy rovnice platí za následujících předpokladů:

- Rozložení tlaku je hydrostatické.
- Sklon dna je tak malý, že měřená vertikální hloubka je téměř shodná s normálou sklonu dna.
- Rozložení rychlostí v profilu je uniformní.
- Koryto je prismatické.
- Ztráty třením určené při ustáleném proudění jsou platné i pro neustálené proudění.
- Laterální proudění je zanedbatelné. [4]

Ačkoliv tlakové proudění v gravitační síti není žádoucí, může k němu dojít při zahlcení stoky. Model je připraven i na tuto situaci. Aby mohly být rovnice kontinuity (6) a pohybová rovnice (7) nadále platné, aplikuje se na zahlcené potrubí Preissmanova štěrbina (Obrázek 4). Tato pomyslná škvíra na vrcholu potrubí umožní vznik větší hloubky než je průměr potrubí a proudění tak může být popsáno jak rovnicemi pro tlakové proudění, tak rovnicemi pro proudění s volnou hladinou. [4] [7]



Obrázek 4: Preissmanova štěrbina [4]

Modelování šachet

Šachty jsou v principu retenční objekty s konstantní plochou hladiny. Šachtám se definuje plocha retenčního prostoru, místní ztráty a celková výška konstrukce, úroveň hladiny je hlavní závislou proměnnou. Výška hladiny v šachtě (hloubka), která se v čase mění, se uvažuje v rámci šachty jako konstantní. V šachtách se zachovává rovnice kontinuity. [10]

Modelování odlehčovacích komor

Odlehčovací komory se navrhují jako retenční objekty s přelivem. V těchto objektech platí rovnice kontinuity. Přelivy jsou čelní, boční, či se liší tvarem přepadu (obdélník, trojúhelník, lichoběžník). Hydraulika odlehčovacích komor se počítá buď

rovnici přepadu přes přelivnou hranu, podrobnějším hydraulickým výpočtem, nebo matematickým modelem. [7] [10]

Modelování přečerpávacích stanic odpadních vod

Přečerpávací stanice mohou být navrženy jako přímo napojené potrubí nebo mu může předcházet retenční objekt, z něhož je voda čerpána. Čerpadlu se určí, při jaké výšce se má zapnout a splaškovou vodu čerpat a při jaké se má vypnout, také se definuje, jaký je čerpaný průtok. Výška hladiny pro zapnutí čerpadla by měla být vyšší než výška pro vypnutí čerpadla. [10]

4.2. Získávání dat měrnou kampaní

Měrná kampaň neboli monitoring stokové sítě je prostředkem pro získávání informací o skutečném chování stokové sítě města a o jevech, které toto chování zapříčiňují. Jedná se o časově a finančně náročnou činnost. Soustavně je zaznamenáván vývoj měřených charakteristik v čase a tak jsou naměřená data z principu neopakovatelná a originální. Měřenými veličinami jsou průtoky, výšky hladin a srážky na povodí. V případě rozšíření modelu o kvalitativní složku, je sledováno a měřeno složení vody. [11]

Vhodným obdobím pro provádění monitoringu jsou měsíce, kdy je největší pravděpodobnost přívalových srážek a kdy nehrozí vznik sněhové pokrývky a jejího tání. Nejvhodnějšími měsíci pro provedení monitoringu za účelem kalibrace modelu je proto období mezi dubnem a říjnem. Krátkodobá měrná kampaň by měla trvat řádově několik týdnů (6-12). Délka monitoringu se může upravit podle naměřených dat a intenzit srážek, jelikož krátkodobý monitoring pro kalibraci a verifikaci modelu se soustředí na zaznamenání především rozličných srážko-odtokových situací. [1] [2]

Počet kusů měřicí techniky se odvíjí od plochy a členitosti odvodňované oblasti, složitosti stokové sítě a cílů měrné kampaně. V některých případech lze využít data ze stálých měření (např. na ČOV či čerpacích stanicích). [2]

Cílem měrné kampaně je získání takových souborů dat, které je následně možné použít pro kalibraci a verifikaci modelu. Jedná se o informace o průtocích splaškových vod a balastních vod, dále o deštích, případně o složení vod a jejich vlivu na recipient.

Na fungování stokového systému mají vliv též manipulace na stokové síti, jejichž dopady je možné monitorovat a následně též simulovat, stejně jako chování odlehčovacích komor a dešťových nádrží za různých průběhů deště. Data je možné použít pro vyhodnocení hydraulické spolehlivosti stok, optimalizaci řízení provozu, případně pro modelování výhledových stavů. [1] [2]

4.2.1 Měření srážek

Pro měření srážkových úhrnů a jejich intenzit je vyvinuto mnoho přístrojů založených na různých fyzikálních zákonitostech. Ovšem zadáním monitoringu na stokové síti je potřeba zaznamenat v čase různé průběhy dešťů, mimo jiné i přívalových (konvektivních) srážek. Ty stokovou síť dostatečně zatíží díky své velké intenzitě a krátkému trvání. Časový krok záznamu měření srážek by měl být 1 min. [2] [12]

Princip měření srážek

Zařízení zaznamenávajících srážky je mnoho druhů, ale zdaleka ne všechny jsou vhodné pro účely kalibrace a verifikace modelu stokové sítě města.

Těmi nejméně vhodnými jsou totalizátory, které nemají schopnost zachytit časový průběh deště. Obecně se používají spíše v těžko přístupných oblastech. Pro monitoring městského odvodnění se nepoužívají ani ombrografy, které sice zachycují časový průběh srážek, ale jsou velice poruchové a již překonané. [12]

Pro nepřímé měření srážek je možné využít meteorologické radary, akustické srážkoměry a optické srážkoměry (disdrometry). Srážky zaznamenané radary jsou měřeny pomocí vysílaných elektromagnetických pulzů, jejichž útlumem se zaznamenává pozice a intenzita hydrometeorů v atmosféře. Velikost hydrometeorů je omezujícím faktorem přesnosti dat, stejně tak prostorová přesnost (1 intenzita na 1 km²) a též fakt, že měření radarem probíhá vysoko nad zemským povrchem. Čím vzdálenější lokalita od radaru je, tím se navíc přesnost snižuje. Nicméně použitím radaru je možné získat informaci o plošném rozložení srážek a jejich sledování v čase. Optické přístroje měří pomocí laserového či mikrovlnného paprsku tvar, velikost a rychlost hydrometeorů. Rozlišují tak i typ srážek, což je využitelné spíše při

dlouhodobém monitoringu. Akustické srážkoměry zaznamenávají nárazy dešťových kapek na membránu a z intenzity zvuku je následně odvozena intenzita srážek. Srážkoměr je citlivý na hluk z okolí a v městském monitoringu se proto nepoužívá. [8] [12] [13]

Srážkoměry měřící srážky přímo jsou buď váhové, nebo člunkové. Váhové sice měří s velkou přesností, ovšem váha přístroje může být ovlivněna i nečistotami ve válci, větrem nebo výparem. Člunkové srážkoměry jsou nejčastějšími přístroji používanými pro městský monitoring. Přístroj nemá velkou spotřebu elektrické energie a je konstrukčně jednoduchý. Nevýhodou jsou významnější nepřesnosti při měření vyšších intenzit srážek. [12]

Srážkoměry jsou vystaveny mnoha neodvratitelným vlivům, které mohou ovlivňovat sběr dat (smáčení sběrného válce, mechanické fungování srážkoměru, rozstřík vody). Srážkoměr musí být před použitím zkalibrovaný, aby záznam měření co nejlépe odpovídal skutečnosti. [13]

V konkrétním případě této diplomové práce byl použit člunkový srážkoměr. Princip měření a kalibrace tohoto přístroje je proto blíže popsána v kapitole 5.5.1 Měření srážek.

Optimální umístění srážkoměrů

Počet srážkoměrů se odvíjí od cílů měření a též členitosti lokality a prostorového pokrytí (Tabulka 1). Za optimální pro účely kalibrace se považuje využití minimálně tří srážkoměrů popisujících plošné rozložení srážek (Tabulka 2). Při použití dvou srážkoměrů je druhý přístroj pouze záložní. [11]

Tabulka 1: Nároky na počet srážkoměrů podle členitosti oblasti [11]

členitost lokality	doporučený počet stanic
ploché území	1+1 na 4 km ²
mírně členité území	1+1 na 2 km ²
členité území	1+1 na 1 km ²

Tabulka 2: Doporučený počet a rozložení stanic dle velikosti lokality [12]

počet stanic	velikost povodí	rozmístění
1 srážkoměr	velmi malá povodí (jednotky hektarů)	v centru (těžišti) povodí
2 srážkoměry	velmi malá povodí (jednotky hektarů)	v centru (těžišti) povodí
3 srážkoměry	min. počet pro popis plošního rozložení	do trojúhelníku
více srážkoměrů	rozsáhlejší povodí	do mřížky proti směru dešťů

Konkrétně musí být srážkoměry umístěny na otevřeném prostoru, kde je zajištěn přístup srážek ze všech směrů. V našich podmínkách by měl být srážkoměr standardně ve výšce 1 m nad terénem, ale ve městě lze za účelem monitoringu využít i nízké objekty. Ohled musí být brán též na zavlažovací zařízení, ovlivnění otřesy země a ptačí populaci. Měření nesmí být ovlivněno přítomností okolních objektů. Minimální vzdálenost od okolních objektů se dle literatury liší, zahraniční CIWEM doporučuje pouze vzdálenost přesahující výšku okolních objektů, české Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR (SOVAK) je více na straně bezpečnosti a doporučuje alespoň 3 - 5 násobek výšky nad sběrnou plochou. [12] [13]

4.2.2 Měření průtoků a hladin

Měření rychlostí a hladin (přeneseně průtoků) je hlavním zdrojem dat o chování stokového systému. Do kanalizace se umisťují měřidla zaznamenávající změny rychlostí a hladin vody v čase. Od provozovatelů je pak vhodné získat informace o údržbě a případných dočasných změnách v systému, které mohly ovlivnit měření. [1]

Charakteristické bezdeštné průtoky jsou pak odvozeny pomocí naměřených dat. Jsou vybrány takové časové řady, které jsou neovlivněné odtoky z dešťů, nebo jinými nepravidelnými či jinak neobvyklými jevy. Křivka tak vykazuje pravidelný denní rytmus s minimy během nocí a ranními maximy. Celkový bezdeštný průtok je tvořen domovními vodami, průmyslovými vodami, vod z bodových zdrojů a infiltrací balastních vod, která se však může v průběhu roku měnit. [14]

Princip měření průtoků a hladin

Průtokové charakteristiky se dají obecně měřit vícero způsoby využívajícími různé principy. V rámci monitoringu splaškové vody je možné měřit protékající množství vody jen některými metodami. Zpravidla jsou měření založena na zaznamenávání hloubky a rychlosti proudící vody. [7]

Mezi nejméně vhodné pro dočasná měření během monitoringu na stokové síti se řadí měrné přelivy a žlaby. Konstrukce takových objektů vyžaduje náročné stavební úpravy. Navíc je měření často znehodnoceno špatnou instalací, nevhodnými odtokovými nebo přítokovými poměry a mnoha dalšími častými problémy. Nejčastější je pro monitorování průtokových charakteristik měření pomocí ultrazvukového signálu, využívající Dopplerův efekt změny frekvence zvukové vlny po odražení od nečistot ve vodě v kombinaci s měřením hladiny. [7]

Pro měření hladiny je možné využít také mnoha metod. Od plovákových hladinoměrů, přes mechanické hladinoměry, tlakové, elektrické či optické hladinoměry, po ultrazvukové hladinoměry. [15]

Ať jsou pro měření průtoků a hladiny použity jakékoliv způsoby, přístroje musí být zkalibrované, aby bylo zajištěno, že měření odpovídá skutečnosti.

Pro konkrétní monitoring dále popisovaný v této práci byly použity kombinované průtokové sondy měřící rychlost a hladinu a ultrazvukové hladinoměry pro měření přepadových výšek na odlehčovacích komorách. Tyto metody jsou blíže popsány v kapitole 5.5.2 Měření průtoků a hladin.

Pro měření průtoků a hladin jsou doporučeny konkrétní časové kroky záznamu. Za deště by měl být interval záznamu 1 - 2 min, v době bezdeští pak 5 - 15 min. [11].

Optimální umístění průtokoměrů a hladinoměrů

Průtokoměry a hladinoměry by měly být umístěny tak, aby naplňovaly cíle dané úlohy monitoringu a vytvořeného simulačního modelu. Důležité je monitorování výtoků ze systému. Podstatné je též měření na místech se známými vážnými problémy, aby se ukázalo, že model v takových situacích reaguje stejně. To se týká i odlehčovacích komor

a jejich případů nebo retenčních nádrží. Zároveň je třeba splnit i další podmínky mimo vytyčené cíle monitoringu, jako je bezpečnost pro vstup (stavební stav), vnější umístění poklopu vstupní šachty nebo nepřítomnost nebezpečných plynů. [1] [2]

Průtokoměry by neměly být umístěny v místě turbulentního proudění, jako jsou zatačky, spadiště, hrany odlehčovacích komor, ale i místa významných nerovností ve stěnách a dně potrubí. Vliv šachty by měl být eliminován umístěním průtokoměru ideálně 2 až 4 průměry proti proudu od vstupní šachty. V místě umístění průtokoměru by měla být dostatečná hladina i během bezdeštných období, aby se měřené průtoky daly ověřit nezávislým měřidlem. Pro nejdůležitější monitorovaná místa může být užitečné též zaznamenávání chování za dešťových stavů kamerou. Minimální počty přístrojů pro účely kalibrace a verifikace modelu jsou uvedeny v Tabulce 3. [1] [2]

Tabulka 3: Minimální doporučený rozsah monitoringu pro účely kalibrace a verifikace matematického modelu stokové sítě [2]

velikost obce [obyv.]	počet průtokoměrů	počet hladinoměrů
> 5 000	min 3	min 1
> 20 000	min 6	min 2
> 50 000	min 8	min 4
> 100 000	individuálně	individuálně

Monitorování odlehčovacích komor je náročné, za bezdeštných stavů není v potrubí odvádějícím přepadající vodu zpravidla žádné proudění a monitorování přímo v hlavním proudu přináší zase mnoho nejistot. Pokud jsou přepady malé vůči odtoku, tak měření přepadu pouhým odečtením odtoku od přítoku může být nepřesné. Monitorováním výšky přepadového paprsku je zase u některých typů přepadů a konstrukčních řešení (např. bočních přepadů) získána pouze bodová informace nerepresentující celý přepad, kde se hloubka po délce liší. [1]

4.3. Kalibrace a verifikace modelů

Kalibrace a verifikace je nezbytnou součástí přípravy simulačního modelu, který má co nejlépe reprezentovat skutečné chování stokové sítě. Tento proces si klade za cíl minimalizovat chyby parametrů modelu.

Rovnice popisující model obsahují řadu konstant a parametrů. Konstanty představují veličiny, které mají stále stejnou hodnotu. Parametry se naopak mohou lišit a jejich určení je jedním z cílů kalibrace. V případě podrobně schematizovaného modelu mají obě modelované vrstvy, hydrologická a hydraulická, své parametry. V hydrologickém modelu jsou to parametry ovlivňující tvorbu a koncentraci povrchového odtoku (součinitel odtoku, koeficienty infiltrace, a další parametry ztráty v povodí). Hydraulický model je kalibrován pomocí parametrů popisujících drsnost potrubí, koeficienty rovnice přepadu, či velikosti ztrát v objektech na stokové síti. [2]

Předpokladem pro provedení kalibrace a verifikace jsou data z měrné kampaně. Během kalibrace jsou výsledky ze simulačního modelu srovnávány s naměřenými hodnotami, následně jsou parametry modelu opakovaně upravovány tak, až se výsledky dostatečně přiblíží. Verifikací se zkalibrovaný model ověří proti nezávislé sadě dat, která nebyla použita pro kalibraci. Teprve až z verifikace je možné určit přesnost modelu. [2]

Kalibrace jsou prováděny buď manuálně, nebo automaticky. Manuální kalibrace parametrů je založena na vizuálním porovnání simulovaných a měřených hydrogramů společně s výpočty objektivních funkcí (*objective function*), statistickými a dalšími vztahy popisujícími rozdíly mezi oběma sadami dat. Následně jsou parametry manuálně měněny. Během automatické kalibrace jsou pozorovaná a modelovaná data vyhodnocena objektivní funkcí tak, aby bylo možné po sobě jdoucí iterované kalibrace porovnat. Objektivní funkce obvykle vychází z metody nejmenších čtverců, nebo z metody maximální věrohodnosti. Kalibrace je tak automaticky opakována dokud se změnou parametrů modelu daří hodnotu této funkce zdokonalovat. [16] [17]

Manuální kalibrace je pro nezkušené uživatele náročnější a zdlouhavější. Ovšem uživateli nabízí hlubší vhled do struktury modelu a chování odvodňované oblasti. Při manuální kalibraci je též každý krok přiblížení možné logicky zdůvodnit a ověřit.

Uživatel též lépe rozumí silným a slabým stránkám výsledného kalibrovaného modelu. Nevýhodou je, že finální kalibrovaný model je produktem jednoho uživatele, různí lidé by model mohli nakalibrovat jinak. Velice náročné je manuálně kalibrovat model s více než deseti parametry. Naopak automatická kalibrace nabízí rychlejší postup a objektivnější výsledek nezatížený vlivem uživatele. [16] [17]

Model simuluje celou škálu situací, které mohou ve stokové síti nastat. Proto i vybrané kalibrační a verifikační události musí být rozličné, od bezdeštných průtoků, přes dlouhotrvající deště, po intenzivní krátké deště. Pro kalibraci srážkových stavů je doporučeno použít nejméně 2 až 3 události, které jsou na sobě nezávislé. Pro následnou verifikaci pak alespoň 2 události. [12] [13] [18]

Srážková událost je definována jako období mezi bezdeštnými stavy včetně návratu průtoků do bezdeštných podmínek po dešti. Charakteristiky kalibračních dešťů by měly být odlišné. Minimálně jeden déšť by měl být krátký a intenzivní, povodí by před tímto deštěm mělo mít minimum zadržené vody. Takto se typizují letní přívalové deště. Další srážková událost by měla být naopak s menší intenzitou a delším trváním. Ačkoliv v roce 2009 CIWEM (ještě pod svým dřívějším názvem WaPUG) ve svém článku *WaPUG User Note No 6* [18] doporučoval minimální hodnoty intenzit a délek srážkových události v závislosti na rozlehlosti povodí, v roce 2016 ve své publikaci *Rainfall Modelling Guide 2016* [13] již žádné konkrétní hodnoty neuvádí. Naopak vyzdvihuje rozličnost charakteristik různých povodí a z toho vyplývající rozmanitost reakcí povodí na srážkové události. Užití pevně stanovených minimálních hodnot úhrnů srážek proto může vést ke zbytečnému vyřazení jinak vyhovujících srážkových událostí. Nicméně původní doporučení uvádělo minimální úhrn 5 mm a průměrnou minimální intenzitu 5 mm/h po dobu alespoň 15 min pro povodí do 20 ha. Pro větší povodí byla doba trvání dvojnásobná. [13] [18]

Stejně tak je třeba definovat i přepady v odlehčovacích komorách. Například společnost DHI ho definuje jako událost, při které je průtok alespoň 10 l/s odlehčován po dobu nejméně 5 min. Pokud se takto děje v rozmezí pěti hodin, jsou oba přepady chápány jako jedna událost. [19]

Jelikož reálné procesy jsou svým způsobem neopakovatelné, model se realitě může jen přiblížit. Pro vyjádření míry tohoto přiblížení se používá mnoho vztahů popisujících průtoky, hladiny, objemy, časy a maxima vrcholů hydrogramů, případně koncentrace znečištění (u kvalitativních modelů).

Nejběžnějším způsobem k vyjádření odklonu od skutečnosti je relativní odchylka (8) porovnávající míru rozdílu mezi simulovanými a změřenými hodnotami, která se následně průměruje pro n kalibračních událostí (9). [2]

$$r_i = \frac{P - O}{O} \quad (8)$$

$$\frac{\sum r_i}{n} \quad (9)$$

V případě řešení průtoků, objemů a vodních stavů je dle metodické příručky *Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí* za uspokojující považována průměrná odchylka do 10 % při kalibraci a do 20 % při verifikaci. [2] Zahraněční autoři Pugh a Keeble pro dešťové události rozlišují kvalitu kalibrace pro každou sledovanou veličinu zvlášť. Pro hladiny je odchylka 30 %, maximální průtoky 15 % a objemy také 15 %. [20] Další zahraniční autor William James též rozlišuje jednotlivé veličiny. Pro maximální průtoky udává stejně jako předchozí autoři 15 %, pro objemy je ale s 10 % přísnější. [21]

Též je důležitá vizuální kontrola souladu monitorovaných dat a výsledků ze simulačního modelu. Časové sladění obou sad dat by mělo být s maximálním rozdílem 5 min. Největší rozdíly mezi simulovanými a změřenými hydrogramy nastávají při modelování extrémních událostí. Důvodem je menší nejistota modelování průběhu odtoku než tvorby povrchového odtoku. Objem a velikost průtoky jsou tudíž méně přesně modelované. Proto jsou nejkvalitněji modelovatelné středně intenzivní deště, při kterých není velký vliv ztrát jako při malých intenzitách, ani přílišná variabilita během silných dešťů. Dále je vhodné porovnat maximální průtoky (jejich časový odstup a velikost) a celková proteklá množství vody. [2] [7]

Dalším často užívaným vztahem vyjadřujícím efektivitu predikcí modelu je Nash-Suttcliffe koeficient E (10). V čitateli je umocněná zbytková odchylka a ve jmenovateli rozptyl. Jeho největší nevýhodou je silná citlivost na výrazně odchýlené hodnoty kvůli

mocnině v čitateli. To vede k nadhodnocení vyšších hodnot a podhodnocení nižších. Vztah není ani příliš citlivý na systematická podhodnocení a nadhodnocení. [22]

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

Nash-Suttcliffe koeficient má rozsah mezi záporným nekonečnem a 1, přičemž při nejlepším možném scénáři, kdy se obě sadu dat shodují, je dosaženo hodnoty 1. Hodnota 0 znamená, že průměr monitorovaných dat je stejně přesný jako simulace. [13] [22]

Dobrym nástrojem pro vizuální zobrazení odchylek je korelační diagram (*scatter plot*), který zaznamenává vztah dvou veličin vůči sobě. Blížností vnesených bodů pak lze porovnat kvalita vzájemného vztahu dat. [1]

4.4. Srovnání různě schematizovaných modelů

Ačkoliv se zvyšující se komplexitou simulačních modelů stoupá i počet parametrů, neznamená to, že takové modely přinášejí přesnější výsledky a lepší popis chování vody v povodí. Naopak namísto toho mnoho parametrů a jejich kombinací může předkládat stejné výsledky jako jiná kombinace parametrů. Tento efekt se nazývá equifinalita. V obecné rovině je to definice tvrzení, že stejného výsledku je možné dosáhnout rozličnými cestami. Ukázalo se, že některé hydrologické simulační modely pro efektivní práci nepotřebují tolik parametrů, kolik jich model umožňuje. Například z 19 parametrů modelu MODHYDROLOG nejsou nezbytně třeba zdaleka všechny a kalibrace pouze devíti z nich, umožňuje získat dobrou předpověď průtoků. Obdobně model Xinanjiang je citlivý jen na 7 z 15 svých parametrů. [23] [24] [25]

Obě míry schematizace modelů byly často srovnávány v obecné rovině pro hydrologické modely. Pověštinou je ale vzorek srovnávaných povodí malý, tudíž velice zatížený konkrétními místními podmínkami. Článek Charlese Perrina a kol., pojmenovaný *Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments* [23] shrnuje výsledky výzkumu zkoumajícího významně větší počet povodí. Celkem bylo modelováno 429

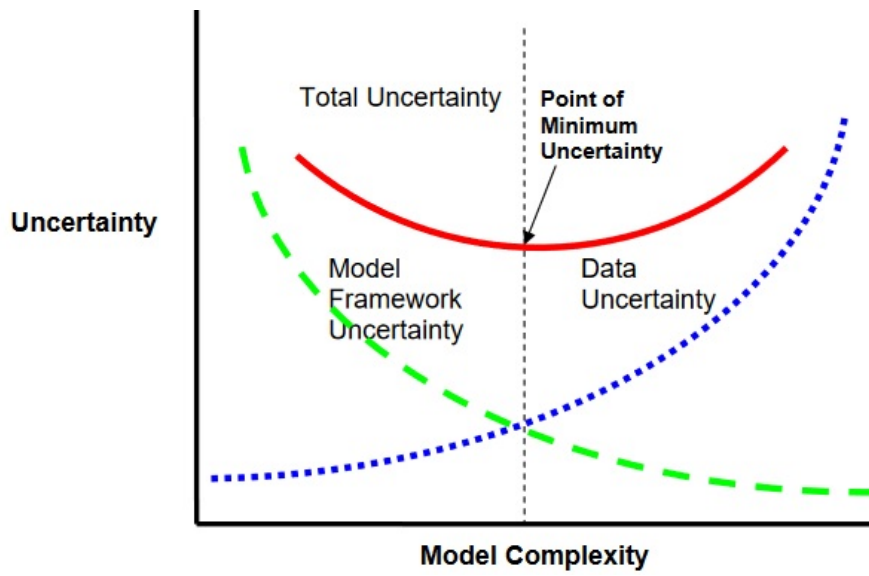
povodí z různých oblastí světa (Austrálie, USA, Brazílie, Francie a Pobřeží slonoviny) a tudíž zároveň z rozmanitých klimatických oblastí. Porovnáním různých typů simulačních modelů na povodích bylo konstatováno, že velmi jednoduché modely mohou dosáhnout téměř stejných výsledků jako modely s více parametry. Nicméně z tohoto testování nemohl být vyzdvížen žádný model, který by byl nejlepší ve všech ohledech. [23]

Světová meteorologická organizace (WMO) zase porovnávala 10 struktur modelů na 6 různě velkých povodích v různých klimatických oblastech a dospěla k závěru, že jednoduché modely v humidních oblastech vykazují stejně dobré výsledky jako modely komplexní, zatímco pro modely v semi-aridních oblastech je výběr vhodné struktury modelu náročnější. [25]

Národní úřad pro oceán a atmosféru (NOAA) porovnával 12 distribuovaných modelů s *lumped* modelem Sacramento Soil Moisture Accounting Model. Došel k závěru, že vyšší efektivita distribuovaných modelů se pojí s případy, kdy jsou parametry modelu více prostorově nestálé. [16]

Komplexnější model nemusí tedy vždy automaticky produkovat lepší výsledek. Společně s vyšší komplexitou začíná do modelu přispívat více parametrů a především jejich nejistot ovlivňující nejistotu celého modelu. Jakákoliv struktura modelu je vždy zatížena nejistotami. První je nejistota měřených dat, především jejich časová a prostorová diskretizace (např. bodová měření reprezentující určitou plochu). Další je nemožnost popsat přesně skutečné procesy a z toho vyplývající míra zjednodušení. Otázkou jsou často také neznámé počáteční podmínky (např. počáteční vlhkosti). I kdyby byly výše uvedené jevy eliminovány, tak stále zůstane jistá úroveň nejistoty spojená s přirozenou nahodilostí přírodních procesů, ta se ovšem nedá předjímat a nemůže být nijak redukována (i za předpokladu, že jsou použity dostatečně dlouhé záznamy dat). [25]

Obrázek 5 ilustruje, jak je zvyšující se komplexita modelu zahrnující více popisů fyzikálních procesů znehodnocována vyšším počtem parametrů a jejich nejistotami. Proto je důležité nalezení optimální úrovně komplexity (*point of minimum uncertainty*) pro daný úkol a cíl simulačního modelu. [26]



Obrázek 5: Vztah komplexity a nejistot modelu [26]

5. Aplikace na experimentální lokalitě

Cílem diplomové práce je srovnání kalibrace výsledků podrobného (*distributed*) simulačního modelu stokové sítě a hrubě schematizovaného (*lumped*) modelu města Čelákovice. Prostředkem k sestavení podrobného modelu je program PCSWMM vyvinutý vládní agenturou United States Environmental Protection Agency (US EPA). Hrubě schematizovaný model byl vytvořen pomocí programu Microsoft Excel s částečným využitím programovacího jazyka VBA.

Tato kapitola je věnována praktické aplikaci modelů na experimentální lokalitě v Čelákovicích. Po základní charakteristice lokality a popisu podkladů pro vybudování modelů bude představen program PCSWMM. Následně budou prezentovány oba sestavené modely. Popsána bude též měrná kampaň a z ní vybrané kalibrační události. V závěru kapitoly budou pro oba modely představeny evaluační funkce a jejich hodnotící stupnice.

5.1. Popis experimentální lokality a jejího odvodnění

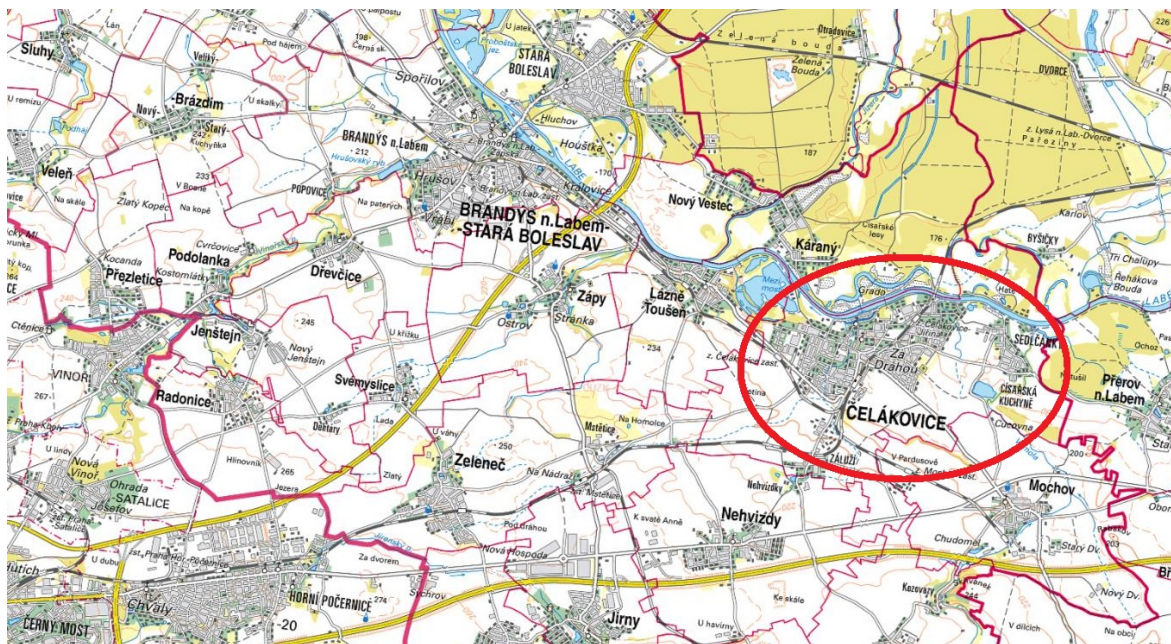
Město Čelákovice se nachází ve Středočeském kraji v okrese Praha - východ, přibližně 25 km severovýchodně od Prahy (Obrázek 6). Nadmořská výška území se pohybuje mezi 170 a 235 m n. m.

Obec spravuje další 3 místní části - Sedlčánky, Císařská Kuchyně a Záluží. Katastrální výměra města je 1 587 ha. Celé Čelákovice mají hlášeno 12 207 trvalých obyvatel (data k 1. 1. 2018). [27]

Na západě se rozkládají průmyslové areály (původně TOS Čelákovice). Na severu mají areál KOVOHUTĚ HOLDING DT, a. s., na jihu jsou pak další průmyslové a komerční objekty. Rezidenční zástavba je tvořena převážně rodinnými domy, v centru města se ovšem vyskytují až dvanácti patrové domy. Ze západu na jih a dále skrz obec na sever vede železnice.

Město se nachází na levém břehu Labe, které je recipientem vyčištěných odpadních vod. Zájmovou oblastí protéká Čelákovický potok a ve východní části města Jiřínský potok.

Dále na východ, na okraji místní části Sedlčánky, teče potok Výmola. Odlehčovací komory odvádějí vodu buď přímo do Labe (OK01A, OK03A, OK04A a OK01B) nebo do Čelákovického potoka (OK01AE a OK02A)



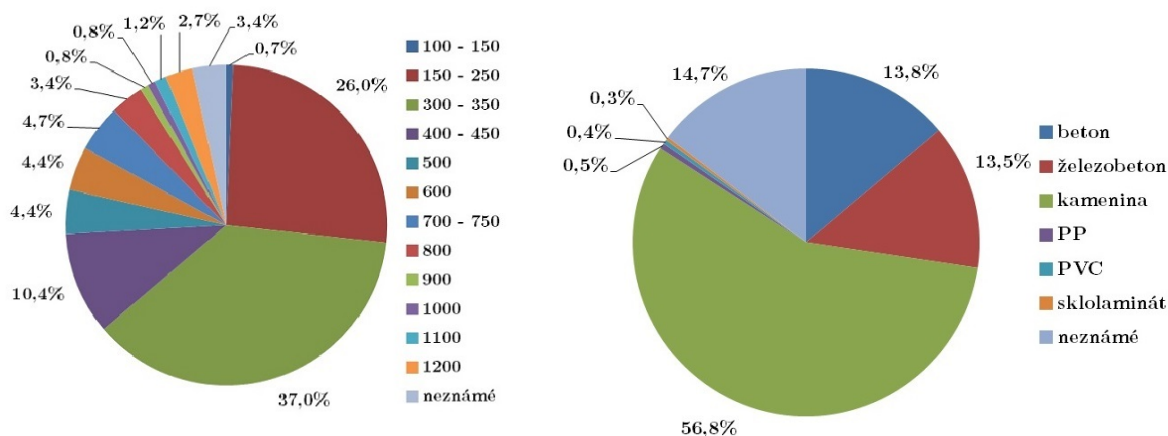
Obrázek 6: Poloha města Čelákovice [28]

V Čelákovicích je dominantní jednotná kanalizace. V nověji vybudovaných částech obce a v místních částech Sedlčánky a Císařská Kuchyně je odpadní voda většinou odváděna oddílnou kanalizací přes přečerpávací stanice odpadních vod (PSOV) a částečně též tlakovou kanalizací. V místní části Záluží není dosud kanalizace vybudována. Celková délka stokové sítě je 54 206,1 m. Z toho:

- jednotná kanalizace 39 402,9 m
- oddílná splašková kanalizace - gravitační 9 184,1 m
- oddílná splašková kanalizace - tlaková 2 424,5 m
- výtlačné řady z PSOV 3 194,6 m [27]

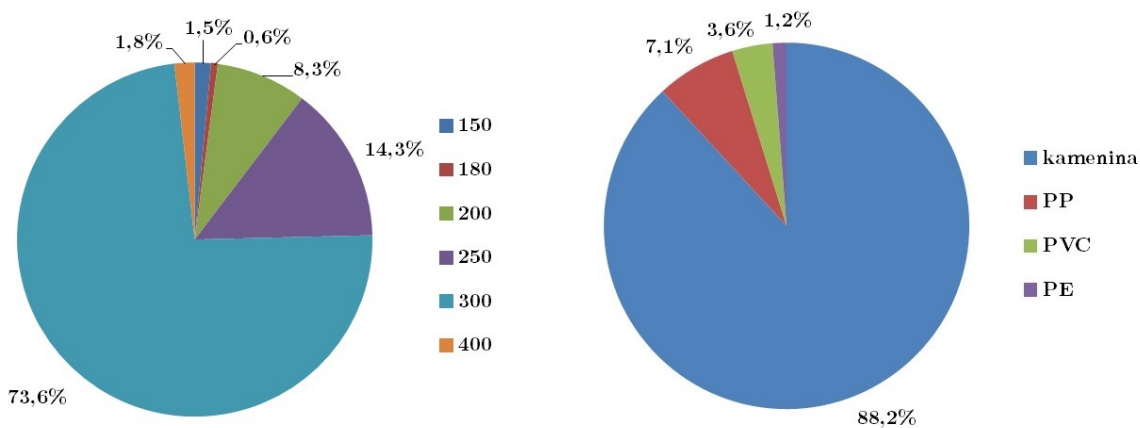
Pro přehlednější zobrazení charakteru potrubí jednotné a gravitační oddílné splaškové kanalizace byly vytvořeny koláčové grafy zobrazující podíly na výše uvedených délkách dle průměru (na celé síti jsou použita kruhová potrubí) a dle materiálu. Následujících grafy (Obrázek 7) zachycují poměrné zastoupení různých průměrů a materiálů potrubí jednotné kanalizace. V Čelákovicích mají téměř 3/4 všech potrubí maximálně DN 450. Typickým materiálem potrubí je kamenina (téměř 57 %), následuje beton a železobeton.

Poměrně velký podíl má i neznámý materiál potrubí (14,7 %), který je zapříčiněn vlastnictvím kanalizace jinými vlastníky než je město Čelákovice.



Obrázek 7: Podíly délek potrubí jednotné kanalizace dle průměru a materiálu

V celkové délce je gravitační oddílné splaškové kanalizace přibližně čtyřikrát méně a nachází se především v nově budovaných částech obce. Tomu odpovídá též vysoký podíl potrubí velikosti DN 300 (73,6 %). V naprosté většině (88,2 %) se jedná o kameninové potrubí (Obrázek 8).



Obrázek 8: Podíly délek potrubí gravitační oddílné splaškové kanalizace dle průměru a materiálu

Na stokové síti je vybudováno celkem 10 PSOV přečerpávajících vodu do gravitační kanalizace, 1 spojná komora (SK) a 6 OK, které za intenzivních dešťů oddělují část vod do recipientů. [27]

Na severozápadě Čelákovic se nachází ČOV, která má své ústí na levém břehu Labe (cca ř. km 871,05). Čistírna je vybavena mechanicko-biologickou částí s chemickým

srážení fosforu a kalovým hospodářstvím. Kapacita čistírny je cca 17 091 ekvivalentní obyvatel (EO). [27]

Srážkové vody jsou lokálně odváděny separátně. Oddílná dešťová kanalizace se zaústěním do recipientů je vybudována v nově urbanizovaných oblastech nebo v rekonstruovaných veřejných prostranstvích. Celková délka systémů odvádějících srážkovou vodu je přibližně 10 242,2 m. Z toho:

- oddílná dešťová kanalizace 7 338,5 m
- výtlačný řad 56,2 m
- drenážní systém 2 847,5 m [27]

5.2. Podklady

Pro tvorbu modelů byly využity následující podklady:

- Pasport vodohospodářské infrastruktury města Čelákovice – Kanalizace – Technická zpráva - Project ISA s.r.o., 9/2018
- Výkresová dokumentace - Project ISA s r.o., 9/2018
- Opravená výkresová dokumentace souborů GIS - Project ISA s r.o., 10/2019
- Mapové podklady - Český úřad zeměměřičský a katastrální (ČÚZK), 9/2019
- Data z měrné kampaně - 12/2019

5.3. Hrubě schematizovaný model

Hrubě schematizovaný model popisuje odvodňovanou oblast jako systém navazujících kaskád lineárních rezervoárů. Hydraulika v potrubním systému není tudíž řešena a model se soustředí na modelování průtoků v uzávěrných profilech (všechny OK včetně nemonitorovaných a SK).

Nejprve byly rozpočítány naměřené minutové intenzity ze tří srážkoměrů na jednotlivá podpovodí nad uzávěrnými profily. Jelikož jejich plocha zpravidla nebyla v dosahu pouze jednoho srážkoměru, byl jejich vliv určen metodou Thiessenových polygonů a vážený průměr ovlivněných ploch určil konkrétní intenzitu nad podpovodím.

Mimo standardních parametrů kaskády lineárních rezervoárů n a K_{Sp} byly do modelu zapracovány další čtyři parametry. Prvním je parametr popisující počáteční ztráty, tím se v čase zpozdí tvorba povrchového odtoku. Dalším je doba dotoku po povodí k uzávěrnému profilu, tímto parametrem se zachová tvar hydrogramu, ale celý se posune v čase. Další parametr podpovodí je součinitel odtoku, který výrazně upravuje velikost simulovaných průtoků a efektivně přibližuje simulované průtoky k monitorovaným. Tím je získán konkrétní odtokový hydrogram v daném uzávěrném profilu. Pro další zpřesnění byl zaveden parametr dotoku mezi uzávěrnými profily. Bylo vyzkoušeno, že bez těchto parametrů by se hrubě schematizovaný model neobešel.

Jako konstanta je v modelu uvažována celková velikost odvodňované oblasti podpovodí, její rozloha byla převzata z podrobně schematizovaného modelu. Z monitorovaných dat byla stejně jako pro potřeby podrobně schematizovaného modelu získána hodnota průměrného bezdeštného průtoku z jednotlivých podpovodí. Tato hodnota byla přičtena k odtokovému hydrogramu z podpovodí.

Průtoky byly měřeny před přepady na odlehčovacích komorách (s výjimkou měření na SK, kde není přepad), nicméně vliv na níže položená měření má průtok bez odlehčeného průtoku, který ze stokové sítě odchází přepadem do recipientu a v dalších profilech se již tudíž neobjevuje. Pro získání odlehčovaných průtoků bylo využito programu PCSWMM, který umožňuje sledovat průtoky v jednotlivých úsecích potrubí. Porovnáním dat průtoků přitékajících do OK a z nich odtékajících, byl pro každou OK (i nemonitorovanou) získán vztah popisující závislost přítoku a odtoku na OK. Modelovaný hydrogram odtoku z povodí byl takto převeden na odtok z OK, který vstupuje do výpočtu průtoku na profilu níže. Zavedením tohoto výpočtu byla umožněna srovnatelnost výsledků obou modelů.

Časový krok simulačního modelu se odvíjel od časového kroku záznamu srážek, tudíž byl 1 min.

Schéma zjednodušení stokové sítě na jednotlivá podpovodí nad OK je zobrazeno v příloze 12.9 Schéma hrubě schematizovaného modelu.

5.4. Podrobně schematizovaný model

Odvodnění Čelákovice je zajišťováno jednotnou i oddílnou kanalizací. Jelikož model řeší odtok jednotnou a splaškovou kanalizací, byly ze zdrojových dat vybrány pro stavbu modelu pouze zájmové objekty. Pro tvorbu podpovodí byl brán zřetel na oblasti odvodňované dešťovou kanalizací, případně žlaby, jež nezaústěovaly do jednotné kanalizace.

Postavený model se skládal z jednotlivých objektů, jejichž výsledný počet je zaznamenán v Tabulce 4. V rámci schematizace sítě nebyly modelovány uliční vpusti, kanalizační přípojky a počáteční úseky stok bez šachet. Celková délka modelované stokové sítě je cca 46,1 km. V mapové příloze 12.10 jsou na podkladu leteckých snímků zobrazeny linie stokové sítě společně s podpovodími a objekty na síti.

Tabulka 4: Počty objektů v podrobně schematizovaném modelu

typ objektu (PCSWMM)	český název	počet
junctions	šachty	1333
conduits	potrubí	1367
subcatchments	podpovodí	518
pumps	výtlačná potrubí	10
storages	retenční objekty	19
weirs	přeliv	8
outfalls	výtok	10
flow path	preferenční cesta odtoku	1379

Významné množství objektů nebylo výškově definováno. Chyběly kóty dna a terénu u šachet. Místy bylo pro jejich určení využito určených sklonů přiléhajících potrubí. V případě, že nebyly dostupné informace o sklonech přiléhajících potrubí a zároveň se šachty s neznámou kótou dna nacházely mezi známými šachtami, byla hloubka dna interpolována z těchto známých objektů. V místech, kde nebyla žádná návodná

informace o pozici dna šachet, byly sklony potrubí navrhnuty dle Městských standardů Prahy, v případě shodného DN s předchozím úsekem potrubí byl aplikován shodný sklon. Pro doplnění chybějících kót terénu byl využit digitální model reliéfu (DMR). V místech s chybějícími informacemi o DN a materiálu potrubí byly informace určeny odhadem. Všechny úpravy a doplnění zdrojových dat byly zaznamenávány, aby v případě nesrovnalostí v chování modelu byly zřejmé tyto nejistoty. Celkový počet jednotlivých doplnění zdrojových dat je uveden v Tabulce 5.

Tabulka 5: Počet doplnění zdrojových dat

typ doplnění dat	počet
doplnění dna šachty dle sklonu přiléhajícího potrubí	134
interpolace dna šachty	59
doplnění souřadnice poklopu z DMR	342
odhad materiálu stoky	142
sklon dle Městských standardů Prahy	101
úprava převýšení výtoku potrubí	100
doplnění chybějícího úseku potrubí	1
sklon dle předchozího úseku (shodné DN s předchozím úsekem)	19

5.4.1 PCSWMM

Existuje mnoho počítačových programů pro modelování srážko-odtokových dějů. Jedním z nich je program Storm Water Management Model (SWMM) vyvinutý agenturou US EPA již v roce 1971. Stále se rozvíjející program je používán nejen pro navrhování, ale též pro analýzy srážko-odtokových dějů. Umožňuje modelovat jednotlivé srážkové události, ale i jejich série. Program je schopný řešit i znečištění vody. Model je možné rozvinout do řešení podzemních vod, infiltrace do nenasycených půdních vrstev, povrchového výparu, sněhové pokrývky a jejího tání i retenčních a vsakovacích objektů. Program umožňuje využít mnoho tvarů potrubí, ale i otevřených koryt. [10]

Dle nastavení používá pro výpočet průtoků rovnici kinematické vlny či až plně dynamické modelování Saint-Venantovými rovnicemi. To umožňuje modelování stavů jako je zpětné vzduť vody ve stoce nebo výtok na povrch. Modelovat se dá mimo srážek i akumulace sněhu, ztráty evaporací, povrchovou retencí či infiltrací. Program umí porovnávat různé zátěžové stavy a nastavení simulace. Výsledky modelování jsou pak zobrazovány jako mapy umožňující barevné rozlišení dle nastavených kritérií, tabulky, grafy, podélné profily sítě, animace modelovaných dějů a reporty v textové podobě. [10]

Pro sestavení modelu stokové sítě města Čelákovice byl využit software PCSWMM (verze 5.1.013), což je komerční verze jinak bezplatného SWMMu. PCSWMM nabízí mnoho nadstavbových užitečných funkcí, z nichž jedna z nejpraktičtějších je zcela jistě možnost importovat již existující zakreslení stokové sítě pomocí funkce *Import GIS/CAD*. Získáním komerční verze programu byl též umožněn přístup do podpůrných databází programu.

5.4.2 Modelované objekty

Podpovodí

Vnější hranice odvodňované oblasti byla definována podle sklonů terénu a bariér bránících pohybu vody. Zřetel byl brán též na výskyt dešťové kanalizace, povrchových odvodňovacích žlabů zaústěných mimo jednotnou kanalizaci (do vodotečí, zeleně či do dešťové kanalizace). Z tohoto důvodu netvoří takto definovaná oblast souvislou plochu. Celková rozloha oblasti odvodňované jednotnou kanalizací je cca 194 ha.

Oblast bylo nutné následně rozdělit na podpovodí. Při jejich tvorbě bylo často využito metody střech, jelikož oblasti byly homogenní a často téměř ploché. Nicméně nezanedbatelné bylo i množství atypických oblastí, které byly řešeny individuálně s ohledem na terén z DMR nebo změny charakteru zástavby. Celkově bylo vytvořeno 518 podpovodí s průměrnou rozlohou 0,375 ha. Plocha jednotlivých podpovodí nikdy nepřesáhla 1 ha. V případě, že bylo nutné odvodnit větší souvislou plochu, tak bylo první podpovodí zaústěno na další podpovodí. Obdobně bylo nutné se vypořádat s areálem FVplastu s rozlohou 5,38 ha, kde nebylo možné získat relevantní informaci o stokové síti.

Pro určování zastoupení jednotlivých typů odvodňovaných povrchů by bylo v dané situaci nejlepší využít data z Geoportálu města Čelákovice, který umožňuje klasifikovat pozemky dle druhu a využití. Bohužel na prosbu o vyexportování dat z webové aplikace Geoportál Čelákovice [29] nikdo nereagoval. Bylo proto přistoupeno k metodě vzorových hektarů. Celkem byly vybrány čtyři typické druhy zástavby (průmyslové areály, nekompaktní zástavba, rodinné domy a centrum města). Dílčí hodnoty součinitele odtoku ψ byly převzaty z normy ČSN 75 6101 Stokové sítě a kanalizační přípojky [9] a to pro sklon povrchu 1 % až 5 %. Výsledný koeficient byl vypočten váženým průměrem velikostí jednotlivých ploch a příslušných součinitelů.

Též bylo třeba pro podpovodí definovat drsnosti pro propustné N_{perv} a nepropustné N_{imperv} povrchy. K tomu bylo přistoupeno též metodou vzorových hektarů. Hodnoty drsnostních koeficientů byly převzaty z manuálu programu.

V příloze 12.4 jsou listy jednotlivých vzorových hektarů s koeficienty odtoku před kalibrací. Některá podpovodí sestávající z homogenního charakteru povrchu (typicky silnice a zeleň) byla řešena individuálně přímým definováním součinitele odtoku (80 % pro silnice a 10 % pro zeleň) a drsnostního koeficientu (N_{perv} 0,1 pro silnice, 0,24 pro zeleň a N_{imperv} 0,001 pro silnice, 0,01 pro zeleň).

Každému povodí byla stanovena vtoková šachta. Zpravidla byla určena nejvýše položená šachta v povodí, nicméně kdyby bylo příliš podpovodí zaústěno do jedné šachty, tak byla za vtok označena níže položená šachta, aby nedocházelo k lokálnímu přetížení šachty v simulačním modelu.

Déle bylo pro každé podpovodí definováno několik preferenčních cest odtoku (*flow paths*), které se snaží zachytit skutečný pohyb vody po podpovodí. Užitečným nástrojem pro to bylo panoramatické snímkování ulic pro odhalení bariér pro odtok vody a mapová aplikace Analýzy výškopisu od ČÚZK, která umožňuje vykreslení zvoleného výškového profilu vedoucí k odhalení přesných změn sklonů terénu. Z preferenčních cest byla následně nástrojem *Set flow length/width* dopočítána průměrná délka a šířka povodí.

Hloubka povrchové retence (*depression storage*) byla před kalibrací nastavena na 1 mm pro nepropustné plochy a 7 mm pro propustné plochy, dle manuálu programu.

Procento povrchů bez povrchové retence (*Zero Imperv*) bylo definováno dle podílu šikmých střeš v jednotlivých typech vzorových hektarů. Jelikož srážkové úhrny nedosahovaly vysokých hodnot, bylo uvažováno, že se na nich voda zcela zasakuje, a proto byly propustné plochy zcela zanedbány. Dalším předpokladem proto bylo, že voda z propustných ploch nenasytí svrchní vrstvu půdy a voda nebude odtékat na nepropustné plochy. Pořadí přesunu vody v rámci povodí (*Subarea Routing*) bylo nastaveno tak, že voda z propustných ploch odtéká na nepropustné plochy a parametr *percent routed* byl proto nastaven na 0 %, tak aby bylo docíleno výše popsaného.

Sklon terénu v rámci podpovodí byl vypočten pomocí dat DMR 5. generace a funkce *Set DEM slope*.

Posledním krokem bylo přiřazení srážkoměru podpovodí. Metodou Thiessenových polygonů bylo území rozděleno na tři oblasti dosahu srážkoměrů. Podpovodí, která ležela na hranici byla ke srážkoměru přiřazena podle své majoritní plochy.

Ostatní parametry (podzemní voda, evapotranspirace atd.) byly v simulačním modelu vynechány.

Šachty

Šachty a jejich atributy byly importovány z dat z výkresové dokumentace k pasportu kanalizace. Jednalo se o název objektu, souřadnice jeho umístění, typ objektu a typ kanalizace, hloubku a nadmořskou výšku dna a terénu. Dále byly převzaty informace o přesnosti a původu hodnot výškového zaměření, přítomnosti sedimentu a historickém přetěžování objektu. Defaultně byl nastaven průměr šachty na 1 m.

V místech zaústění potrubí bez šachty, musela být šachta dodefinována manuálně, jelikož program takovou situaci neumí vytvořit. Dle Městských standardů Prahy [30] bylo takto nestandardně zaústěným potrubím definováno převýšení při napojení trubní stoky na kruhovou stoku, aby nedocházelo k falešnému zpětnému vzduť (zdrojová data neobsahovala informaci o zaměření výšky napojení).

Místa osmi výtoků ze sítě byla definována jako *Outfalls* s volným výtokem.

Potrubí

Charakteristiky definované pro úseky potrubí jsou tvar průřezu, dimenze, drsnost (Manningův součinitel drsnosti n), odsazení výšky nátoky do šachty či výtoku z ní (*Offset*) a název vtokové a výtokové šachty.

Z opravené výkresové dokumentace pasportu kanalizace (souborů GIS) byly do PCSWMMu importovány čáry úseků potrubí společně s nezbytnými identifikátory vtokových a výtokových šachet, offsety, dimenzemi a materiály úseků potrubí. Dalšími atributy, které byly k dispozici a mohly přinést hodnotné informace pro chování modelu, byly rok výstavby (možnost individuální úpravy drsnosti potrubí), druh a typ kanalizace, sklon (pro kontrolu programem vypočítaného sklonu se zaměřeným), informace o zanášení a původ informace o dimenzi a materiálu. V Tabulce 6 jsou uvedeny použité drsnosti pro jednotlivé druhy materiálů, které byly převzaty z doporučených rozpětí z manuálu programu.

Tabulka 6: Výchozí hodnoty Manningova součinitele drsnosti [10]

materiál potrubí	n [-]
beton a železobeton	0,016
kamenina	0,014
plastové materiály (PE, PEHD, PP, PVC)	0,012
sklolaminát	0,012

Přečerpávací stanice odpadních vod a tlaková kanalizace

V lokalitě je celkem 10 přečerpávacích stanic odpadních vod (5 v Čelákovících a 5 v Sedlčánkách). Byly namodelovány pomocí objektů *Pumps* definujících výtlačné potrubí a *Storages* retenční objekt popisující čerpací jímku. Z pasportu byl potrubím definován čerpaný průtok. Hloubka zapnutí čerpadla byla nastavena na 0,6 m a vypnutí na 0,5 m. Dle výkresů pasportu kanalizace byly vytvořeny křivky popisující průběh změny plochy hladiny po hloubce čerpací jímky (*Storage Curve*).

V lokalitě se nachází celkem 8 úseků tlakové kanalizace. Její vliv byl definován bodovým vtokem do šachty. Z fakturačních dat byl pro roky 2016 až 2018 pro každou virtuální oblast tlakové kanalizace vypočten průměrný průtok. Na něj byla následně aplikována křivka popisující nerovnoměrnost průtoku během dne získaná z měření na měrném profilu, ke kterému voda odtéká.

Odlehčovací komory a spojná komora

Pro ochranu sítě a ČOV před intenzivními dešti je ve stokové síti města 6 odlehčovacích komor. Do modelu byly definovány jako přelivy (*Weirs*) a retenční prostory (*Storages*). Dle výkresové dokumentace bylo rozhodnuto o typu přelivu a rozměrech přelivné hrany. Jelikož jsou hrany všude poměrně široké, byl určen koeficient přepadu dle manuálu programu na 1,65. Dvě odlehčovací komory jsou specifické dvěma oddělenými přelivnými hranami (OK01AE a OK02A), proto byly modelovány jako dvě komory propojené krátkým spojovacím potrubím.

Spojná komora SK01 byla namodelována jako retenční objekt *Storage* s definovanou *Storage Curve*.

5.5. Měrná kampaň

Měrná kampaň byla provedena pomocí dočasně umístěných měřidel ve stokové síti města Čelákovice. Celkově bylo monitorováno pět míst ve stokové síti (5 průtokoměrů a 5 hladinoměrů) a tři lokality srážkoměrů. Vzhledem k rozsahu lokality a mnoha problémech s měřicí technikou bylo osazování rozděleno do několika dní. První byly 31. 7. 2019 umístěny srážkoměry. Další tři dny (7. 8., 20. 8. a 5. 9. 2019) byly věnovány umístění hladinoměrů a průtokoměrů. Kompletně byl monitoring zahájen 5. 9. 2019. Ačkoliv literaturou doporučené období pro provádění monitoringu končí v říjnu, z důvodu pozdějšího uvedení všech přístrojů do provozu a malého počtu naměřených intenzivnějších dešťů, byla měrná kampaň ukončena až 28. 11. 2019, kdy byla všechna zařízení odmontována. Bohužel chladnější teploty se později začaly značně projevovat na výdrži baterií přístrojů. Celkem trval monitoring 84 dní (12 týdnů). Obsluha zařízení se konala přibližně 1x týdně, celkem proběhlo 13 kontrolních výjezdů.

Během výjezdů bylo nutné se vypořádat s velkým množstvím neočekávaných problémů. Mimo standardní výměny baterií, stažení dat, seřízení času a kontroly čistoty sond a případného odstranění nánosů (jednou dokonce kamene), nastalo i zdegradování napájecích kabelů od autobaterie, extrémně rychlé vybíjení baterií přístrojů z důvodu zapnutého GSM modulu, měření nereálných či žádných hodnot, nemožnost stažení dat u nových přístrojů nebo nefungující dálkový přenos dat, na samém závěru monitoringu pak průtokoměr profilu Q4 vybil baterie tak, že nemohly být jednoduše nabity a data poté stažena. Významnější problém nastal na profilu H4, kdy hladinoměr z počátku měrné kampaně měřil v pořádku, později se začaly objevovat stále výraznější výpadky a ke konci měrné kampaně již hladinoměr neměřil prakticky vůbec. Informace o výšce hladiny byly proto částečně doplněny daty z průtokoměru, který měří zároveň průtok a hladinu. Vrcholem pak bylo uplávání sondy v lokalitě Q5, kdy byla za naplnění kapacity potrubí (9. 9. 2019) vytržena celá obruč, připevněná po obvodu potrubí. Sonda s obručí pak visela na kabelu k přístroji o několik metrů dále po proudu. Nicméně přes veškeré komplikace se podařilo díky delší době monitoringu naměřit dostatečný počet různých srážkových událostí.

Dostupnost dat z měření je společně s informací o kategorii velikosti srážkového úhrnu a záznamu přepadu na OK je sumarizována v příloze 12.11 Záznam monitoringu.

5.5.1 Měření srážek

Použité srážkoměry

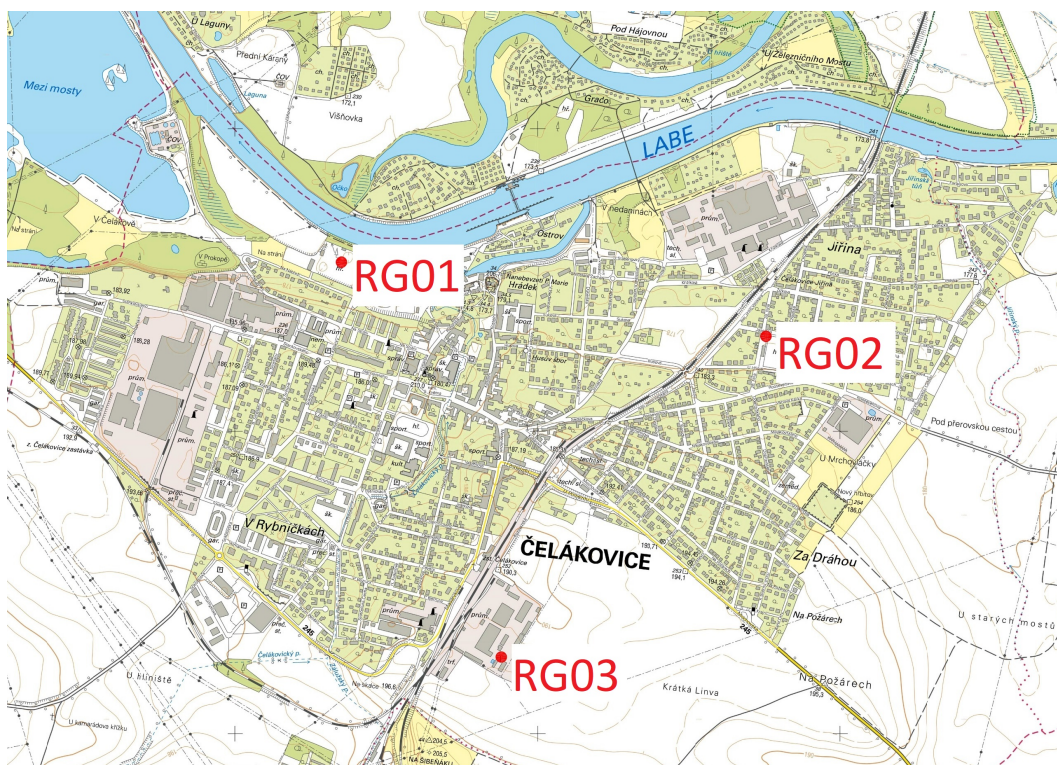
Pro měření intenzity srážek bylo použito tří překlopných člunkových srážkoměrů se sběrným cylindrem se záchytnou plochou 500 cm². Rozlišení srážkoměru bylo 0,1 mm (objem poloviny člunku odpovídá 5 ml). Srážkoměr zaznamenává jednotlivá překlopení (naplnění) člunku v čase pomocí zabudovaného feritového magnetu. Intenzity srážek se pak mohou dopočítat z frekvence těchto překlopení. Data o překlopení jsou zaznamenávána v registrační jednotce, ze které jsou data stahována při kontrolách zařízení. [12]

Pro všechny použité srážkoměry byly vytvořeny listy charakteristik monitorovacího místa, které jsou přiloženy jako příloha 12.2 Listy charakteristik měrných profilů.

Umístění srážkoměrů

Srážkoměry byly umístěny tak, aby jejich měření rovnoměrně pokrývalo město Čelákovice. Zároveň byl kladen důraz na bezpečnost lokality pro srážkoměry a minimální ovlivnění okolním prostředím. Vybrány byly střechy u dvou sportovišť a střecha v uzavřeném areálu společnosti FVplast.

Srážkoměry byly umístěny do téměř ideálního rovnostranného trojúhelníku s délkou strany cca 1,4 km. Nejvýše byl umístěn srážkoměr v areálu FVplastu (RG03) v cca 193 m n. m. Další dva srážkoměry byly umístěny o několik metrů níže (RG01 v cca 172 m n. m. a RG02 v cca 179 m n. m.)



Obrázek 9: Umístění srážkoměrů v Čelákovících [28]

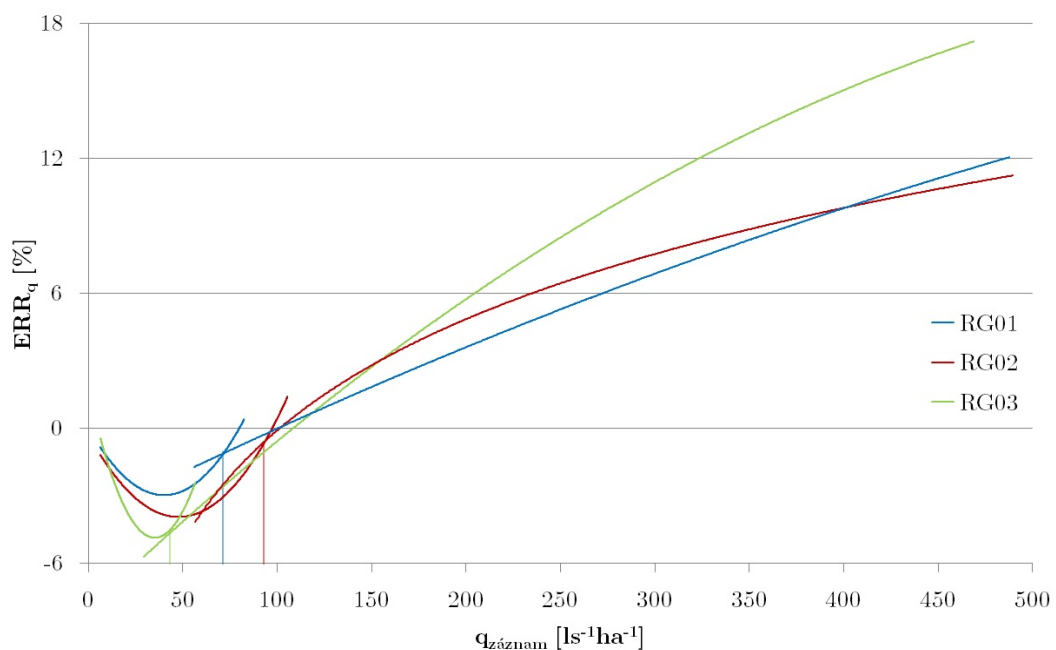
Kalibrace srážkoměrů

Z důvodu měnící se přesnosti mechaniky překlápení člunku srážkoměru je nutné před zahájením monitoringu kalibrovat přístroje. Kalibrace byla provedena 16. 7. 2019 (RG01 a RG02) a 24. 7. 2019 (RG03). Jednalo se o kalibraci statickou i dynamickou.

Nejprve byla provedena statická kalibrace, která měla za cíl ověření objemů obou částí člunku. Do poloviny člunku byla byretou dávkována voda až do okamžiku překlopení člunku. Potřebný objem byl následně zapsán pro pozdější vyhodnocení. Dávkování vody bylo opakováno pro každou polovinu člunku pětkrát. Z hodnot byl spočten průměr pro každou polovinu člunku tak, aby bylo ověřeno, že chyba dosahuje maximálně $\pm 6\%$. Přičemž spočtené hodnoty se musely pohybovat v rozmezí $\langle 4, 7; 5, 3 \rangle$ a zároveň $\langle 9, 7; 10, 3 \rangle$ pro součet obou polovin člunku. [12] Když nebyla tato podmínka splněna, byla poupravena aretace člunku a statická kalibrace zopakována.

Následovala dynamická kalibrace, kdy se pomocí peristaltického čerpadla do válce srážkoměru dávkovala různá čerpaná množství vody, a tím byly napodobovány vydatnosti dešťů. Zkoumáno bylo 10 vydatností od 5 do 500 $\text{ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$. Po ukončení testu byla vypočtena chyba měření pro jednotlivé vydatnosti vyjadřující rozdíl mezi vyčerpaným množstvím vody a množstvím vody zaznamenaným člunkem srážkoměru. Chyby měření a hodnoty zaznamenaných vydatností byly následně vyneseny do grafu a proloženy odpovídající křivkou tak, aby korelační koeficient byl maximálně 0,9. [12]

Pro ověření stálosti nastavení byla po dynamické kalibraci zopakována kalibrace statická, jejíž výsledky též musely opět splnit již výše uvedená rozpětí. Výsledkem byly tři kalibrační křivky zobrazené na Obrázku 10.

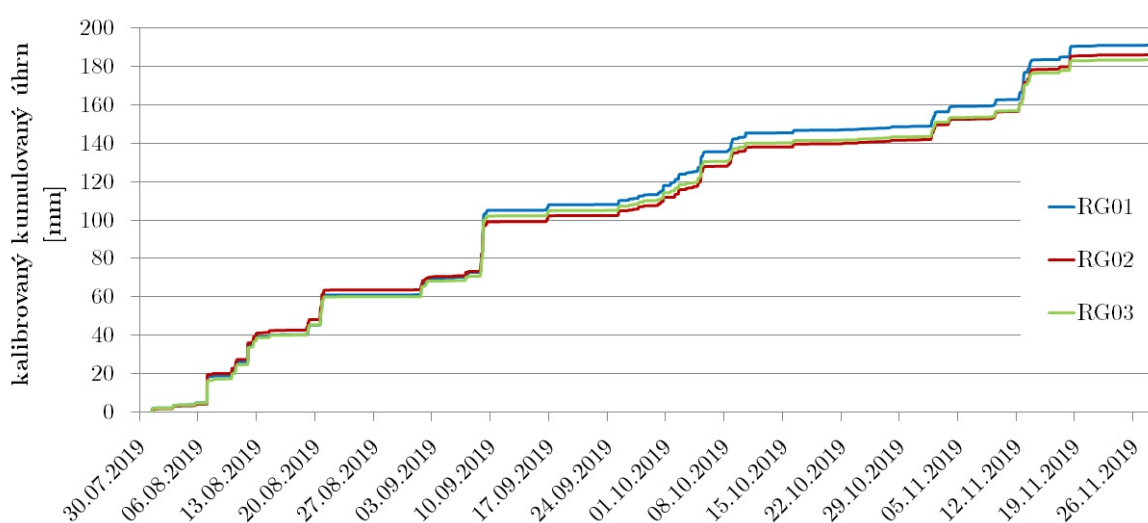


Obrázek 10: Kalibrační křivky srážkoměrů

Podrobnější záznamy a výsledky kalibrace pro každý srážkoměr jsou zaznamenány v příloze 12.1 Kalibrace srážkoměrů. Získané kalibrační křivky byly následně použity pro opravu měřených dat.

Výsledky srážkoměrné kampaně

Celkový zaznamenaný úhrn byl 186,7 mm (průměr všech srážkoměrů). Kalibrované kumulované dešťové úhrny jsou zobrazeny na Obrázku 11. Z grafu je zřejmé, že během celé doby měření nedošlo k žádnému výpadku a deště zpravidla zasahovaly všechny monitorované lokality v městě.



Obrázek 11: Kalibrované kumulované dešťové úhrny

5.5.2 Měření průtoků a hladin

Použité průtokoměry a hladinoměry

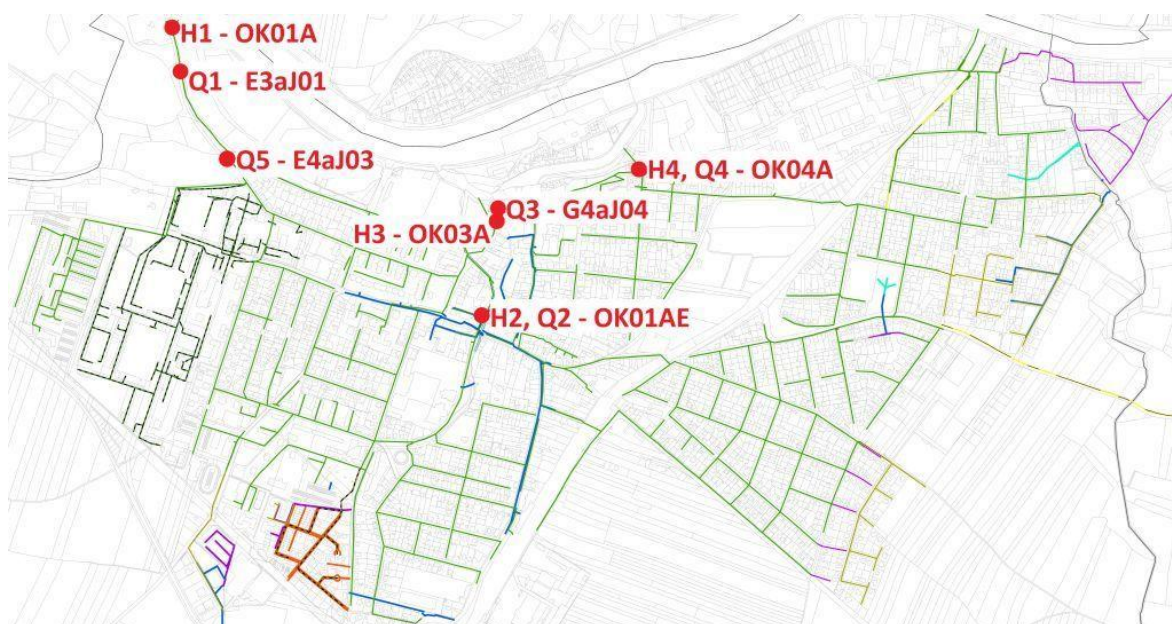
Pro měření průtoků byly použity přístroje založené na principu Dopplerova jevu. Částice znečišťující vodu jsou odrazovými body pro vysílané ultrazvukové vlny. Senzor zaznamenává časové rozdíly mezi odrazy vln od identických částic, tím získává doby jejich posuvu a následně vypočte rychlostní profil. Sondy běžně měří i hloubku proudící vody. V tom případě využívají buď toho, že tlak nutný k vypuštění vzduchu z bublátoru je přímo úměrný tlaku vodního sloupce, případně měří hloubku vody taktéž ultrazvukem. Vypočtená průtočná plocha společně se změřenou rychlostí proudění jsou dvěma komponenty potřebnými pro výpočet proudění v potrubí. [15] [31] [32]

Pro měření hladin na případech odlehčovacích komor byly použity ultrazvukové hladinoměry. Nad hladinou umístěné sondy zaznamenávají dobu letu vyslaného signálu k hladině a zpět. Pokud jsou vysílané frekvence vyšší, tak vytvářejí užší paprsek, naopak široký (rozptýlenější) paprsek může způsobit, že přijímaný signál bude slabší. Nevýhodou úzkého paprsku (vyšších frekvencí) ovšem je, že na zvlněné hladině má větší výkyvy. Chyby při měření hladiny ultrazvukem mohou být způsobeny vlněním hladiny nebo vznikem pěny. Přístroje též nemohou měřit v tzv. mrtvé zóně těsně před sondou. [15]

Pro všechny použité průtokoměry a hladinoměry byly vytvořeny listy charakteristik monitorovaných profilů, které jsou přiloženy jako příloha 12.2 Listy charakteristik měrných profilů. Celkově se jedná o 5 průtokoměrů a 5 hladinoměrů.

Umístění průtokoměrů a hladinoměrů

Průtokoměry a hladinoměry byly umístěny v místech odlehčovacích komor, vyjma průtokoměru Q5, který byl situován před spojnou komoru SK01A. Průtokoměry u odlehčovacích komor byly rozmístěny do nátokových potrubí. Hladinoměry snímaly přelivné hrany. Rozmístění přístrojů v rámci celého města je zaznamenáno v příloze 12.3 Mapa rozmístění průtokoměrů a hladinoměrů. Na Obrázku 12 je výřez části města, kde byly přístroje instalovány.



Obrázek 12: Umístění průtokoměrů a hladinoměrů v Čelákovicích

V některých měrných profilech (OK01A a OK03A) bylo před instalací zaznamenáno velké množství sedimentu a proto musel být průtokoměr umístěn dvě resp. jednu šachtu proti proudu před odlehčovací komoru. Ani v jednom případě není mezi komorou a místem měření žádný přítok. Měření hladiny v OK04A (H4) je zásadně ovlivněno levotočivou zatáčkou žlabu uvnitř komory před začátkem přelivného žlabu, proto je měření v tomto profilu spíše jen přibližné.

Kalibrace průtokoměrů a hladinoměrů

Dne 15. 10. 2019 bylo za bezdeštného stavu na všech lokalitách provedeno kontrolní hydrometrování elektromagnetickým průtokoměrem Ott Nautilus C2000. Porovnání měření instalovaným přístrojem a mobilním hydrometrem je shrnuto v Tabulce 7. Tabulka též popisuje odchylky pro nutné úpravy měřených dat.

Tabulka 7: Kalibrace průtokoměrů hydrometrováním - opravy hloubek měřených kombi sondami

měrný profil	oprava měření hloubky (<i>offsetu</i>) [m]
Q1	0,000
Q2	0,021
Q3	-0,010
Q4	-0,006
Q5	0,020

Hladinoměry byly kalibrovány během jejich instalace na počátku měrné kampaně. Ke kalibraci byl použit svinovací metr.

Výsledky měření průtokoměrů a hladinoměrů

Za dobu monitoringu byly v reakci na dešťové události zaznamenány přepady na přelivných hranách monitorovaných odlehčovacích komor. Ne na každé odlehčovací komoře však za deště voda přepadala. Kdy a které odlehčovací komory vodu oddělovaly je zdokumentováno v příloze 12.11 Záznam monitoringu.

Pro modelování bezdeštných průtoků byly z dat vybrány časové průběhy průtoků neovlivněné srážkami. Z nich byla vytvořena hodinová schémata nerovnoměrnosti průtoků (*time patterns*) pro všední dny a víkendy a to každému měrnému profilu.

Obdobně jako v případě tlakové kanalizace byly pro lokality s oddílnou splaškovou kanalizací vytvořeny virtuální oblasti slučující fakturační data odběrů vody objektů v oblasti jednoho úseku potrubí do jedné hodnoty. Celková fakturovaná suma byla následně rozpočítána jako průměrný průtok. Na něj byla následně uplatněna křivka popisující nerovnoměrnost průtoků během dne získaná z měření na měrném profilu, ke kterému voda odtéká.

Stejnou metodou virtuálních oblastí bylo přistoupeno k místům, ve kterých je dešťová voda odváděna separátně, ale kanalizace je vedena jako jednotná, jelikož jen prochází oblastí s vybudovanou dešťovou kanalizací. Jsou to tedy oblasti s jednotnou kanalizací, ale bez dešťových podpovodí.

Hodnota průměrného bezdeštného průtoků získaného monitoringem, očištěná o individuální vtoky z virtuálních oblastí tlakové kanalizace, oddílné splaškové kanalizace a jednotné kanalizace popsanych v předchozích odstavcích, byla rozpočítána dle velikosti a počtu dešťových podpovodí, na kterých se vyskytovala fakturační místa. Hodnota vypočteného průměrného průtoků byla zaústěna jako bodový vtok podpovodí do sítě. Tak byly průtoky rozprostřeny po povodí měrných profilů společně s konkrétními *time patterns*.

Celkově se jednalo o 404 dešťových podpovodí s výskytem fakturačních míst, 72 virtuálních oblastí splaškové oddílné kanalizace a 40 virtuálních oblastí jednotné kanalizace bez výskytu dešťových podpovodí.

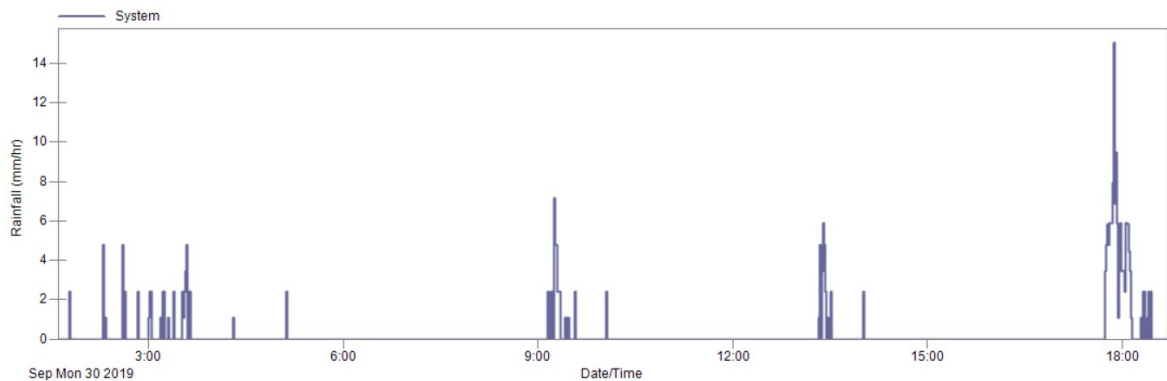
5.5.3 Vybrané srážkové události

Z významnějších srážkových událostí byly vybírány primárně deště s úhrnem nad 5 mm. Celkově bylo takových událostí 11. Vzhledem k pozdější instalaci zařízení ve stokové síti proběhly bohužel v době před oficiálním začátkem měrné kampaně (5. 9. 2019) čtyři takové události. Déšť s největším úhrnem (8. - 9. 9. 2019) zase

nebyl zaznamenán celý na všech přístrojích. Z průtokoměru Q1 se nepodařilo stáhnout všechna data z období před 12. 9. 2019 a výpadek měly hladinoměry H2, navíc v průběhu události vypadl hladinoměr H4 a průtokoměry Q4 a Q5. Výpadek nastal také při dešti 13. 11. 2019, kdy hladinoměr H3 vypověděl službu úplně a průtokoměr Q3 měřil zase záporné rychlosti, navíc na profilu Q4 nastal výpadek průtokoměru a tudíž i výpadek záznamu o hladinách, jelikož hladinoměr H4 v té době již neměřil vůbec. Problém s průtokoměrem Q4 se podepsal i na poslední významné srážkové události 18. 11. 2019.

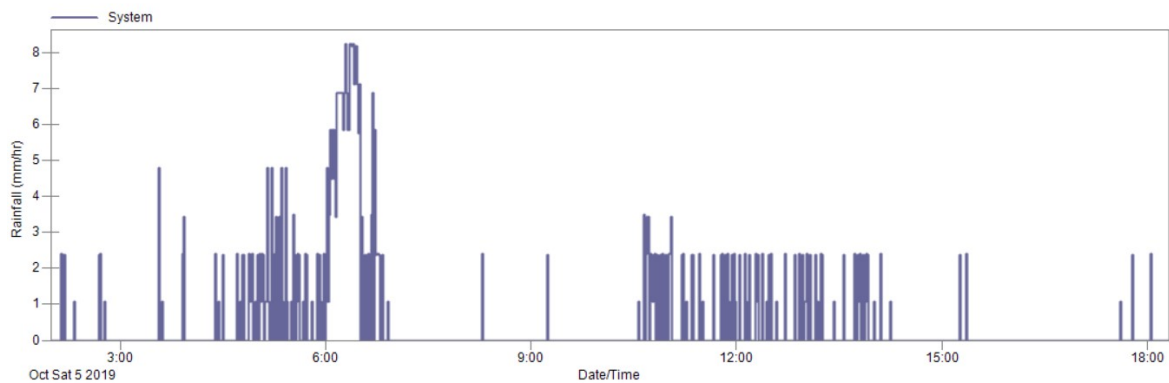
Nicméně i některé deště nesplňující podmínku úhrnu 5 mm způsobily přepady na OK. Z nich byly vybrány další 2 události doplňující svým průběhem rozličnost vybraných dešťů. Všechny vybrané srážkové události pro kalibraci a verifikaci jsou vyznačeny v příloze 12.11 Záznam monitoringu tučným písmem data události.

Pro kalibraci byly vybrány tři dešťové události. První z nich je událost 30. 9. 2019 (Obrázek 13), která nesplnila podmínku úhrnu 5 mm, ale způsobila přepad na OK. Je typická kratšími a méně intenzivními dešti na začátku události s intenzivnějším úhrnem v kratším časovém úseku ke konci události. Všechny grafy níže jsou převzaty z programu PCSWMM, který udává intenzity pouze v jednotkách mm/h.



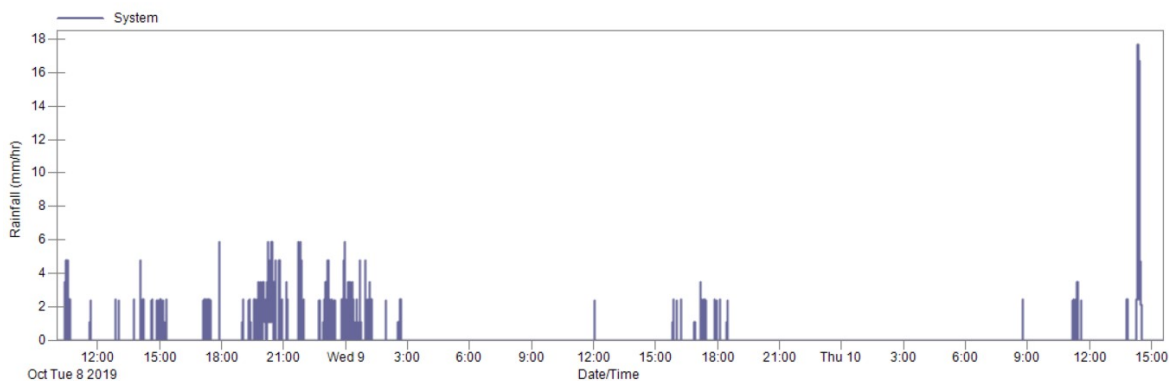
Obrázek 13: Průběh srážkové kalibrační události 30. 9. 2019

Další je kalibrační událost 5. 10. 2019 (Obrázek 14), kdy naopak intenzivnější část deště přišla na začátku a následoval méně intenzivní delší úsek deště.



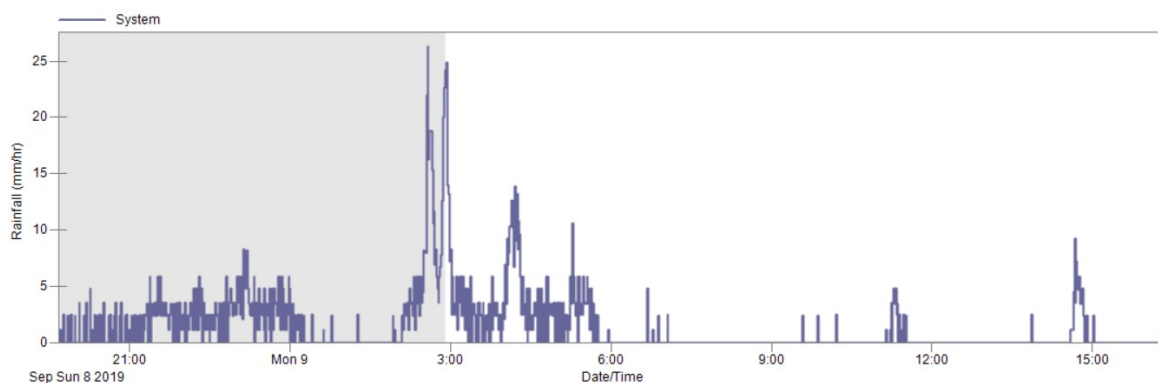
Obrázek 14: Průběh srážkové kalibrační události 5. 10. 2019

Jako poslední byla vybrána kalibrační událost 8. až 10. 10. 2019 (Obrázek 15). Nejintenzivnější úsek na konci události byl spojen s méně intenzivní srážkou večer 8. 10. a kratším deštěm 9. 9. Cílem bylo zaznamenat reakci na intenzivní dešť, kdy je již naplněna retenční kapacita povodí.



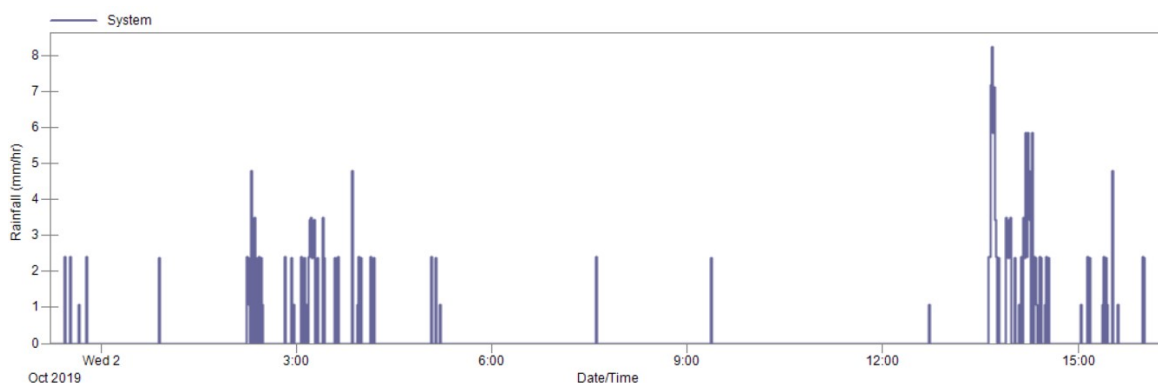
Obrázek 15: Průběh srážkové kalibrační události 8. 10. 2019

Jako verifikační byly vybrány tři události. Již zmiňovaná událost v noci z 8. na 9. 9. 2019 byla poznamenána zmiňovanými výpadky. Jelikož se ale jednalo o nejintenzivnější srážkovou událost, byl z ní verifikován alespoň počátek (šedě podbarvená část na Obrázku 16).



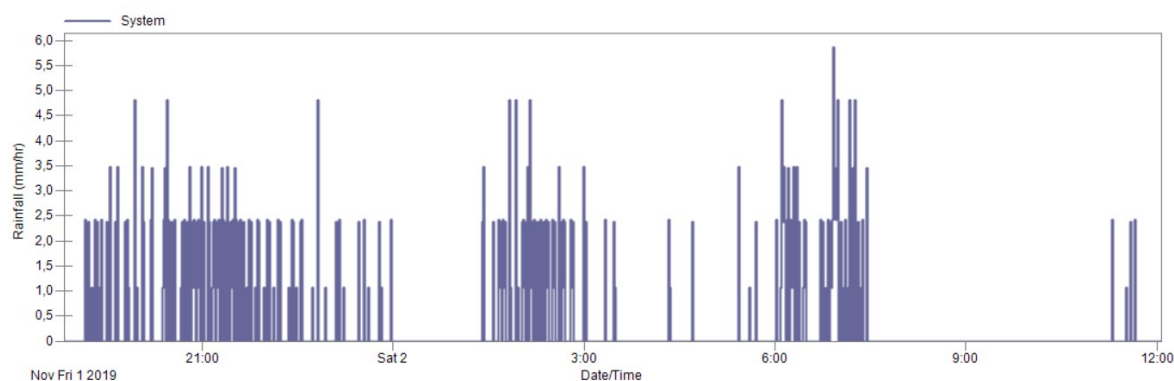
Obrázek 16: Průběh srážkové verifikační události 8. 9. 2019, šedě je vyznačena verifikovaná část události

Druhá verifikační událost má méně intenzivní začátek v noci z 1. na 2. 10. 2019 a intenzivnější závěr odpoledne 2. 10. 2019 (Obrázek 17).



Obrázek 17: Průběh srážkové verifikační události 2. 10. 2019

Jako poslední verifikační událost byl vybrán delší a poměrně rovnoměrný déšť, který nastal v noci z 1. na 2. 11. 2019 (Obrázek 18). Během celé noci nastalo jen několik víceminutových přerušení deště.



Obrázek 18: Průběh srážkové verifikační události 2. 11. 2019

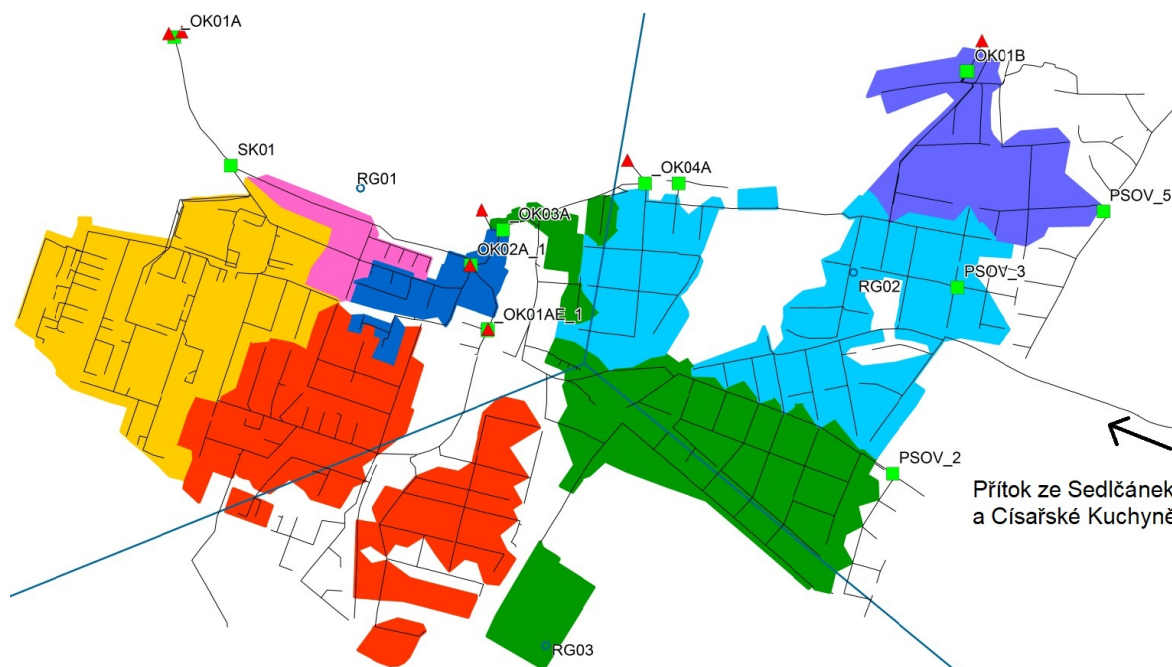
5.6. Kalibrace a verifikace modelů

Na základě srážkových událostí popsaných v předchozí kapitole byly oba modely kalibrovány. Monitorované profily jsou z většiny rozmístěny v proudu za sebou, a v důsledku toho i kalibrované průtoky výše proti proudu ovlivňují průtoky níže po proudu, proto byl model kalibrován od nejvyšších profilů až k profilu u ČOV. Kalibrace probíhaly s cílem dosáhnout co nejoptimálnějších výsledků šesti objektivních funkcí (Nash-Sutcliffe koeficient E , odchylka proteklých objemů δV , odchylka maximálních průtoků δQ_{max} , časová odchylka maximálních průtoků či hladin Δt_{peak} a v případě podrobně schematizovaného modelu i odchylka doby přepadů na přelivných hranách $\Delta t_{přep}$ a odchylka maximálních výšek hladin δH_{max}). Poté byly modely verifikovány nezávislými sadami dat. Dále v této kapitole jsou stanovena kritéria pro hodnocení kvality výsledků.

5.6.1 Kalibrace a verifikace hrubě schematizovaného modelu

V hrubě schematizovaném modelu byly modelovány a tudíž i kalibrovány pouze průtoky. Kalibrace modelu řešila optimální určení šesti parametrů modelu. Konkrétně se jednalo o dva parametry kaskády lineárních rezervoárů, parametr povrchové retence, dotoku po povodí, dotoku k dalšímu uzávěrnému profilu a součinitel odtoku daného podpovodí.

Přestože dvě OK nebyly monitorovány, byly pro ně parametry podpovodí nakalibrovány přibližně, a to s ohledem na profil dále po proudu a pokud to bylo možné tak i profily proti proudu. Jedná se o simulace Q6 (OK01B) a Q7 (OK02A). Lokalita Q6 (OK01B) je nejdále proti proudu položená OK a Q7 (OK02A) leží na soutoku dvou OK. Obě tato podpovodí jsou poměrně malá, poloviční, ale i menší než většina ostatních monitorovaných podpovodí nad OK, tudíž odtok z nich by neměl mít dramatický vliv na velikost a tvar hydrogramu. OK by ovšem neměly být zanedbány a to i z důvodu výpočtu odlehčovaného množství vody v místě OK. Rozdělení lokality na jednotlivá podpovodí je znázorněno na Obrázku 19.



Obrázek 19: Rozdělení podpodvodí hrubě schematizovaného modelu

Jelikož se časový krok záznamu na jednotlivých profilech lišil (od 1 min do 5 min), bylo nutné přizpůsobit pro jednotlivé profily i časové kroky simulace. Z celkové sady simulovaných dat s časovým krokem 1 min byla pro porovnání s monitoringem vybrána data ze simulace, jejichž časový údaj odpovídal záznamu monitoringu.

Pro verifikaci byly do připraveného modelu s již zkalibrovanými parametry vloženy sady verifikačních dat, které ověřily správnost nakalibrovaných parametrů.

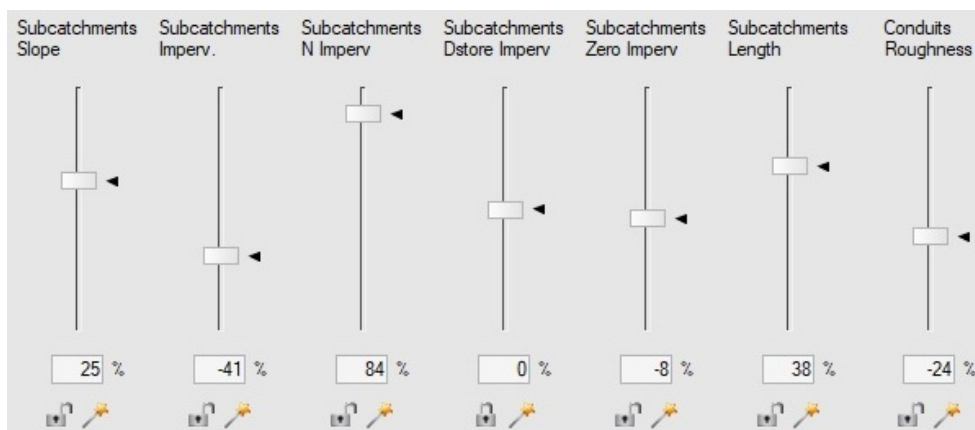
5.6.2 Kalibrace a verifikace podrobně schematizovaného modelu

Kalibrace podrobně schematizovaného modelu řešila určení parametrů tak, aby simulovaná data co nejlépe odpovídala monitorovaným průtokům a hladinám. Z monitorovaných hladin byl vyřazen profil H2b, na kterém voda nepřepadala nikdy s výjimkou ucpání odtokového potrubí. Důvodem neexistence přepadů je konstrukční řešení OK, kde voda přiváděná z první části OK s měřením H2a do druhé části s měřením H2b protéká nátokovým potrubím, které má stejnou kapacitu jako potrubí výtoku z OK a zároveň je úroveň záklenku potrubí ve stejné úrovni jako druhá přelivná hrana.

Ačkoliv numerická stabilita byla v celém modelu zachována při časovém kroku výpočtu 5 s, zrovna pro lokalitu OK s monitorováním H3 byl časový krok nedostačující. Krok byl pokusně snižen na 1 s, ovšem nepodařilo se dosáhnout lepších výsledků. Přibližný průběh hladiny je zřetelný, křivka ale není plynulá. Příčinou této numerické nestability může být velice nízký sklon na odtoku z OK společně v kombinaci s jen několik desítek metrů vzdálenou další OK s dalšími přítoky.

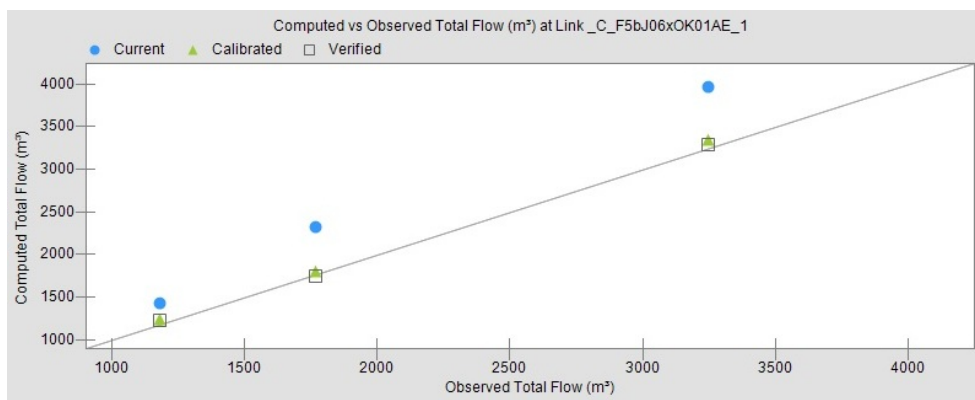
Pro podrobně schematizovaný model bylo kalibrováno sedm parametrů. Šest parametrů se týkalo charakteristik podpovodí (hydrologie) a jeden parametr potrubí (hydraulika). Kalibrován byl podpovodím sklon terénu, podíl nepropustných ploch, drsnost nepropustných ploch, hloubka (kapacita) povrchové retence, podíl plochy bez povrchové retence a délka (přeneseně i šířka) podpovodí. Potrubím byla kalibrována drsnost.

Jako velice praktické se ukázalo použití kalibrační pomůcky Sensitivity-based Radio Tuning Calibration (SRTC), která umožňuje sledovat okamžitou citlivost simulovaných dat na změny jednoho či více parametrů zároveň. Nejdříve se jednotlivým parametrům určí jejich nejistoty, následně se přistoupí k výběru počtu citlivostních bodů (*sensitivity points*). Citlivostní body určují, kolikrát bude parametr v rozsahu zadaných nejistot změněn a zároveň kolikrát s tímto měněným parametrem bude model přepočítáván. Na výběr je od 2 citlivostních bodů (minimum a maximum parametru se zadanou nejistotou) až po 8 citlivostních bodů. Jeden citlivostní bod znamená jeden běh simulace modelu. Jako optimální s ohledem na výpočtovou kapacitu počítače, bylo vybráno simulování se 4 citlivostními body. Za jedno spuštění pomůcky SRTC byl model proto přepočítán pro 4 změny 7 parametrů, celkem tedy 29 spuštění (včetně nulové varianty). Výsledkem bylo 7 posuvných ovladačů parametrů měnících tvar a velikost hydrogramu (Obrázek 20). Protože mezi 4 citlivostními body jsou změny tvaru grafů pouze lineárně interpolovány, je nutné nastavení zkalibrovaných parametrů vždy ověřit další simulací.



Obrázek 20: Ukázka ovladače SRTC

SRTC mimo vizuálního srovnávání kalibrovaných grafů umožňuje i výpočet objektivních funkcí, vizualizaci toho, jak má který parametr na kalibraci velký vliv, ale též i grafy znázorňující kvalitu kalibrovaného výsledku pro různé kalibrační události. Například na Obrázku 21 jsou v závislosti na pohybu parametrů po ovladači porovnávány pozorované a simulované celkové objemy, přičemž úhlopříčka znázorňuje ideální shodu. Modré body jsou hodnoty pro jednotlivé události před kalibrací, zelené body po zkalibrování parametrů a čtverce jsou výsledkem ověření zkalibrovaných parametrů.



Obrázek 21: Ukázka pomůcky pro více kalibračních událostí

Nicméně programu chybí možnost v simulaci parametry resetovat ve vybraném čase. Kapacita (hloubka) povrchové retence byla tak při spuštění modelu přes více událostí (*events*) naplněna během první události a zůstala zaplněna až do konce bez ohledu na to, že mezi událostmi uplynulo i několik dní. Parametr povrchové retence byl proto

kalibrován individuálně. Jeho největší vliv byl zpravidla z počátku srážkové události, a tak jeho kalibrace nezpůsobovala kompletní změny průběhu grafů.

5.6.3 Kritéria pro hodnocení kalibrace a verifikace

S cílem porovnat kvalitu výsledků obou modelovaných schematizací, bylo nutné zavést kritéria kvality, která se odvíjejí od objektivních funkcí.

Pro sady dat obou modelů byl spočten Nash-Sutcliffe koeficient E , odchylka proteklého objemu δV , odchylka maximálních průtoků δQ_{max} a časové odchylky maximálních průtoků či hladin Δt_{peak} . V případě podrobně schematizovaného modelu byla též sledována doba přepadu na přelivných hranách $\Delta t_{přep}$ a odchylka maximální výšky hladiny δH_{max} . Obě časové odchylky byly počítány jako rozdíl času výskytu jevu z pozorované sady dat a simulované sady dat.

Kritéria kvality výsledků jsou definována v Tabulce 8. Pro každé kritérium byl určen rozsah kvality výsledku objektivní funkce od vynikající po špatný. Jelikož mohou nabývat i záporných hodnot byla kritéria uvedená v Tabulce 8 aplikována symetricky i do záporných hodnot (pro přehlednost jsou uvedeny jen kladné rozsahy). Výjimku tvoří Nash-Sutcliffe koeficient E , který sám nabývá hodnot od mínus nekonečna do 1. Jednotlivá rozpětí byla určena přibližně dle literatury. Jelikož ani ta není jednotná, byla jako „vynikající“ vybrána přísnější kritéria a jako „uspokojivé“ ta méně přísná. Pro horší výsledky byly pak v obdobných intervalech vytvořeny další dvě kategorie.

Tabulka 8: Kritéria kvality výsledků

	vynikající	dobrý	uspokojivý	neuspokojivý	špatný
E [-]	$\langle 0; 8 \rangle$	$(0,8; 0,65)$	$(0,65; 0,5)$	$(0,5; 0,45)$	$<0,45$
δV [%]	$\langle 0; 5 \rangle$	$(5; 10)$	$(10; 15)$	$(15; 20)$	>20
δQ_{max} [%]	$\langle 0; 10 \rangle$	$(10; 15)$	$(15; 20)$	$(20; 30)$	>30
δH_{max} [%]	$\langle 0; 10 \rangle$	$(10; 15)$	$(15; 20)$	$(20; 30)$	>30
Δt_{peak} [min]	$\langle 0; 5 \rangle$	$(5; 10)$	$(10; 15)$	$(15; 20)$	>20
$\Delta t_{přep}$ [min]	$\langle 0; 5 \rangle$	$(5; 10)$	$(10; 15)$	$(15; 20)$	>20

6. Diskuze výsledků a srovnání modelů

6.1. Hrubě schematizovaný model

Hrubě schematizovaný model byl nejdříve cvičně nakalibrován pouze na jednu událost. Tím bylo zjištěno, že počet parametrů je dostačující. Výsledky byly velice dobré, grafy simulovaných a modelovaných dat si odpovídaly a to včetně maximálních průtoků. Právě maxima průtoků byla v kombinaci s dalšími událostmi poměrně náročná ke kalibraci. Parametry musely být kompromisně nastaveny tak, že kombinace více událostí dávala uspokojivý výsledek. Dobře kalibrovatelná byla kulminace průtoků v čase a to především proto, že parametr dotoku po povodí přímo ovlivňoval posun hydrogramu po časové ose bez změny jeho tvaru.

Všechny kalibrační grafy hrubě schematizovaného modelu včetně grafů nemonitorovaných profilů jsou v příloze 12.5 Výsledky kalibrace hrubě schematizovaného modelu. Verifikační grafy jsou pak v příloze 12.7 Výsledky verifikace hrubě schematizovaného modelu. Zelenou je značen simulovaný průběh veličiny a růžovou monitorovaný průběh.

Následující Tabulky 9 a 10 shrnují kalibraci a verifikaci modelu. I přes komplikovanější kalibraci maximálních průtoků naštěstí nedošlo k dramatickému zhoršení při verifikaci. Při verifikaci došlo k většinovému zlepšení měření celkového proteklého objemu, což potvrzuje správnost kalibrace. Časové odchylky kulminace průtoků ale často nebyly určovány tak dobře jako při kalibraci, na třech profilech tak došlo k zhoršení.

Jak bylo zmíněno v teoretické části, Nash-Sutcliffe koeficient E je velmi citlivý na výrazné rozdíly monitorovaných a simulovaných dat, tyto rozdíly mohou snadno nastat i při mírném časovém nesouladu obou sad dat. I proto se obecně uspokojivé hodnoty koeficientu z kalibrace snadno změnilo na horší při verifikaci.

Úplně původně zaznamenal výrazné zhoršení v objektivních funkcích při verifikaci profil Q5. Velkou měrou se na tom podílela poslední verifikační událost 2. 11. 2019, kdy přístroj dlouhé časové úseky neměřil (Obrázek 129). Je možné, že v době měření navíc

ani neměřil správně, čemuž nasvědčuje postupné přibližování se křivky grafu k nezvykle nízkému (až o jeden řád nižšímu) průtoku v nočních hodinách mezi jednotlivými dešťovými epizodami. Právě při takto nízkých hodnotách přístroj přestal měřit. Tato událost proto nebyla pro shrnutí verifikace brána jako relevantní. Vyřazení této události pak nejspíše způsobilo, že objektivní funkce vyšly při verifikaci až příliš dobře.

Celkové selhání modelu nastalo při verifikační události 2. 10. 2019, kdy nebylo na žádném simulovaném profilu zaznamenáno první výraznější navýšení průtoků. Nicméně, jak bude v další podkapitole popsáno, na dvou profilech se při stejné události s podobnými obtížemi setkal i podrobně schematizovaný model.

Tabulka 9: Výsledky kalibrace hrubě schematizovaného modelu

	monitorovaný profil				
	ČOV	náměstí	tvrz	garáž	areál TOS
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
E [-]	0,538	0,612	0,347	0,707	0,630
δV [%]	-7,66	9,75	-15,98	-10,08	-12,54
δQ_{max} [%]	3,91	2,23	15,93	9,53	12,94
Δt_{peak} [min]	2,50	3,50	-3,75	3,75	-3,87

Tabulka 10: Výsledky verifikace hrubě schematizovaného modelu

	monitorovaný profil				
	ČOV	náměstí	tvrz	garáž	areál TOS
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
E [-]	0,111	0,278	0,564	0,490	0,813
δV [%]	-9,12	-2,40	-8,69	-7,36	2,30
δQ_{max} [%]	-1,40	-20,09	-0,38	-11,87	9,95
Δt_{peak} [min]	14,00	-11,60	3,60	-1,00	-1,00

6.2. Podrobně schematizovaný model

S výjimkou průtokoměru na SK byly v každé monitorované lokalitě dva přístroje, průtokoměr a hladinoměr. Tím se kalibrace podrobně schematizovaného modelu obecně komplikovala, jelikož bylo nutné se najednou vypořádat s šesti průběhy grafů (dva přístroje měřící každý 3 srážkové události). Jediná lokalita, kde byl měřen pouze průtok, byla před SK připojující převážně průmyslový areál TOS Čelákovice (Q5). Stoková síť v průmyslovém areálu bohužel nebyla prozkoumána v rámci pasportu kanalizace, tudíž jsou informace o stokové síti areálu zatíženy velkou mírou nejistoty. To může být zdrojem komplikací při kalibraci. Především maximální průtoky byly náročnější na kalibraci. Některé události vyžadovaly naprosto opačné změny parametrů oproti výchozím hodnotám. Například maximum hydrogramu kalibrační události 5. 10. 2019 by bylo vhodné zvýšit (Obrázek 102), ale hydrogram události 8. 10. 2019 vyžaduje naprosto opačný přístup (Obrázek 111). Velké odchylky v maximálních hodnotách se propsaly i do Nash-Sutcliffe koeficientu.

Snaha provést uspokojivou kalibraci parametrů pro hladinu H4 a zároveň i průtok Q4 se ukázala jako neproveditelná. Stavební dispozice OK se zatáčkou před přelivnou hranou neumožňovala reprezentativní měření, protože voda přepadala už před místem, kde probíhalo měření. Kalibrován byl proto jen průtok Q4. Hladinoměr H4 byl sledován jen jako vedlejší produkt kalibrace. Nicméně alespoň tvar simulovaných průběhů hladin byl podobný. Simulace celkově průběh nadhodnocovala, což odpovídá skutečnosti, že monitoring probíhal v místě, kde už byl průtok částečně odlehčen.

Všechny kalibrační grafy podrobně schematizovaného modelu jsou v příloze 12.6 Výsledky kalibrace podrobně schematizovaného modelu. Všechny verifikační grafy jsou pak v příloze 12.8 Výsledky verifikace podrobně schematizovaného modelu. Zelenou je značen simulovaný průběh veličiny a růžovou monitorovaný průběh. Na grafech je shora patrný průběh srážek v mm/h. V dolní části grafu je pak průběh průtoků v m³/s nebo průběh hladin v m (vztaženo ke dnu stoky v OK).

Následující Tabulky 11 a 12 shrnují kalibraci a verifikaci modelu. Obdobný efekt jako u hrubě schematizovaného modelu se projevil při verifikační události 2. 11. 2019 na profilu Q5 (Obrázek 156). Taktéž měla poslední událost velký vliv na celkové

zhoršení parametrů objektivních funkcí. Opakování stejného jevu přispělo k rozhodnutí s poslední verifikační událostí na profilu Q5 nepočítat. Je proto nutné upozornit na významnou kumulaci nejistot na tomto profilu. Povodí tohoto profilu je zatíženo nejistotami ohledně samotného stokového systému a zároveň verifikace proběhla pouze na jedné celé a jen části další verifikační události.

Velice dobře ve všech objektivních funkcích vyšel monitorovaný profil Q2 a H2a a to jak při kalibraci, tak i při verifikaci. Poměrně dobře v mnoha ohledech kalibrace dopadl též nejnižše položený monitorovaný profil Q1 a H1. Oblast odvodňovaná přímo k tomuto profilu je ze všech nejmenší (méně než 6 ha), a tak jsou simulovaná data převážně závislá na kvalitě kalibrací ostatních profilů nad touto lokalitou.

Výrazně špatný výsledek kalibrace proteklého objemu na profilu Q3 je způsobený malou hustotou monitorovaných dat při události 5. 10. 2019, čímž nejspíše nebyly zaznamenány některé vyšší průtoky. Vizuelní porovnání průběhu průtoku Q3 (Obrázek 99) s vývojem hladiny H3 (Obrázek 98) totiž naznačuje, že místem protékalo více vody.

Stejně jako v hrubě schematizovaném modelu nebyl na profilech u Q4 a Q3 (a odpovídajících simulovaných hladinách) při verifikační události 2. 10. 2019 téměř zaznamenán příchod prvního výraznějšího zvýšení průtoku. Vliv obou těchto velkých povodí (obě s rozlohou přes 41 ha) se dále pak propsal stejným efektem do posledního profilu (Q1 a H1).

Tabulka 11: Výsledky kalibrace podobně schematizovaného modelu

	monitorovaný profil								
	ČOV		náměstí		tvrz		garáž		areál TOS
	H1	Q1	H2a	Q2	H3	Q3	H4	Q4	Q5
E [-]	0,752	0,555	0,792	0,654	0,794	0,569	-0,538	0,829	0,447
δV [%]		-7,90		2,83		55,56		-4,31	9,37
δQ_{max} [%]		-16,74		17,97		-1,09		6,32	20,90
δH_{max} [%]	3,78		5,94		20,64		27,09		
Δt_{peak} [min]	2,25	-1,50	2,25	4,67	-0,25	-0,50	1,00	2,25	-0,50
Δt_{prep} [min]	-42,04		0,12		-19,87		-100,06		

Tabulka 12: Výsledky verifikace podrobně schematizovaného modelu

	monitorovaný profil								
	ČOV		náměstí		tvrz		garáž		areál TOS
	H1	Q1	H2a	Q2	H3	Q3	H4	Q4	Q5
E [-]	0,585	0,421	0,725	0,664	-0,088	0,722	-0,785	0,588	0,575
δV [%]		-3,45		10,62		6,55		-8,17	3,62
δQ_{max} [%]		-25,74		11,25		-1,21		9,86	-42,77
δH_{max} [%]	3,93		-2,92		10,21		22,21		
Δt_{peak} [min]	12,00	10,50	6,75	5,00	4,25	7,00	9,00	8,75	2,50
$\Delta t_{přep}$ [min]	-72,08		1,75		-5,88		-80,08		

6.3. Srovnání modelů

Co do náročnosti samotného sestavení modelu byl podrobnější model pracnější, nejnáročnější byla tvorba podpovodí s preferenčními cestami odtoku (*flow paths*) a též zavedení všech jednotlivých vtoků rozpočítaných bezdeštných průtoků. Jeho kalibrace probíhala ale díky SRTC pomůcce snadněji. Hrubě schematizovaný model vyžadoval ruční úpravu parametrů a opakované přepočítávání. Dlouho proto trvala i počáteční fáze sledování citlivosti modelu na změny jednotlivých parametrů. S SRTC poznávání citlivosti probíhá snadným pohybem tlačítka ovladače.

Přidáváním nezbytných parametrů do hrubě schematizovaného modelu se rozdíl počtu parametrů mezi podrobně a hrubě schematizovaným modelem snížil na jeden. Nicméně nastavbové parametry neuvedené přímo v transformační rovnici odtoku z většiny ovlivňují tvar hydrogramu přímo úměrně a jejich vzájemné kombinace jsou dobře předvídatelné. V případě podrobnější varianty modelu parametry tak jednoznačné vlastnosti nemají. Obdobný počet parametrů tudíž neznamena přímo podobný vliv na kalibraci modelu.

V hrubě schematizovaném modelu má navíc každý parametr zásadní vliv, jinak by nebyl ani do modelu přidáván. V případě podrobnějšího modelu byla citlivost na některé parametry několikanásobně menší než na ostatní. Největší vliv měl parametr podílu nepropustných ploch a drsnost potrubí, naopak jeden z nejmenších měl sklon terénu a

délka podpovodí (vzhledem k velikosti celé lokality má převládající vliv délka dotoku v potrubí ne na podpovodí).

V následujících Tabulkách 13 a 14 jsou vedle sebe srovnávány výsledky kalibrace obou modelů a následně i jejich verifikace. Srovnávanou veličinou jsou z průtoků odvozené charakteristiky, jelikož ty byly simulovány v obou modelech. Na první pohled se nedá konstatovat, že jeden model kvalitativně exceluje.

Lepší je proto hledat, kde výsledky kalibrace modelů souzní. Modely spojují o něco horší výsledky kalibrace na profilech Q5 a Q3. V případně Q5 ještě o trochu výraznější chyby produkuje podrobně schematizovaný model, to může být způsobeno primárními vstupujícími nejistotami tamní stokové sítě, které v hrubě schematizované variantě nejsou. Výpadky monitoringu pak ovlivnily oba modely v případě průtoků Q3. Oba mají ale úspěšně kalibrovány časy kulminace průtoků, a to dokonce na všech profilech.

Tabulka 13: Srovnání kalibrace průtoků obou modelů (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)

	monitorovaný profil									
	Q1		Q2		Q3		Q4		Q5	
	P	H	P	H	P	H	P	H	P	H
E [-]	0,555	0,538	0,654	0,612	0,569	0,347	0,829	0,707	0,447	0,630
δV [%]	-7,90	-7,66	2,83	9,75	55,56	-15,98	-4,31	-10,08	9,37	-12,54
δQ_{max} [%]	-16,74	3,91	17,97	2,23	-1,09	15,93	6,32	9,53	20,90	12,94
Δt_{peak} [min]	-1,50	2,50	4,67	3,50	-0,50	-3,75	2,25	3,75	-0,50	-3,87

Při verifikaci výrazněji vyčnívá špatný Nash-Sutcliffe koeficient na profilu Q2 v hrubě schematizovaném modelu. To je způsobené většími časovými odchylkami během třetí verifikační události 2. 11. 2019, která má navíc proměnlivější průběh hydrogramu, což ještě umocňuje celkovou náchylnost tohoto koeficientu (Obrázek 126). Obecně při této události neměl žádný monitorovaný profil hydrogram, který by tvarem dobře odpovídal monitoringu.

Tabulka 14: Srovnání verifikace průtoků obou modelů (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)

	monitorovaný profil									
	Q1		Q2		Q3		Q4		Q5	
	P	H	P	H	P	H	P	H	P	H
E [-]	0,421	0,111	0,664	0,278	0,722	0,564	0,588	0,490	0,575	0,813
δV [%]	-3,45	-9,12	10,62	-2,40	6,55	-8,69	-8,17	-7,36	3,62	2,30
δQ_{max} [%]	-25,74	-1,40	11,25	-20,09	-1,21	-0,38	9,86	-11,87	-42,77	9,95
Δt_{peak} [min]	10,50	14,00	5,00	-11,60	7,00	3,60	8,75	-1,00	2,50	-1,00

Porovnatelným kalibrovaným parametrem obou modelů je procento nepropustných ploch. Tento parametr je odvozen ze součinitele odtoku. Ve všech případech byla výchozí hodnota určená pomocí součinitele odtoku z normy ČSN 75 6101 Stokové sítě a kanalizační přípojky [9] pro navrhování stok snížena, což je logické, protože v normě je uváděn špičkový součinitel. Hodnoty procenta nepropustných ploch byly po kalibraci zpravidla o několik procent nižší v případě podrobně schematizovaného modelu (Tabulka 15).

Tabulka 15: Srovnání procenta nepropustných ploch před a po kalibraci (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)

	monitorovaný profil									
	Q1		Q2		Q3		Q4		Q5	
	P	H	P	H	P	H	P	H	P	H
po kalibraci [%]	19,1	20,0	21,9	30,0	23,3	29,0	14,8	21,8	39,5	34,0

Následující Tabulka 16 shrnuje hodnocení obou modelů. Čas potřebný ke kalibraci modelu byl uvažován bez počátečního času stráveného sledováním citlivosti modelu na změny jednotlivých parametrů, jelikož tento faktor byl ovlivněn malým množstvím zkušeností autorky. A zároveň bylo uvažováno, že čekání na výsledky simulace SRTC netrvalo mnoho hodin. Hodnocení přesnosti kalibrace je spíše subjektivním názorem na výše prezentované výsledky. Ani jeden model negeneroval přesvědčivě lepší výsledky ve všech ohledech. Výsledky podrobně schematizovaného modelu můžou být naopak částečně zatíženy snahou vyhovět při kalibraci i měření hladin.

Tabulka 16: Stručné slovní hodnocení modelů (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)

	H	P
náročnost počítačového programu	menší	větší
množství potřebných podkladů	nižší	vyšší
doba potřebná k sestavení modelu	kratší	delší
čas potřebný ke kalibraci	přibližně stejný	
přesnost kalibrace	o velice málo nižší	o velice málo vyšší

7. Závěr

Úroveň schematizace simulačního modelu by měla odpovídat požadované přesnosti simulačního modelu. Podrobně schematizovaný model má detailnější prostorové rozlišení a neabstrahuje realitu do jednoduchých schémat.

Ani jedna z použitých schematizací nebyla bezchybná, a zároveň ani jedna úplně neselhala. Naopak hrubě schematizovaný model příjemně překvapil svými výsledky. Vyšší míra zobecnění reality tak může s poměrně snesitelnou nejistotou predikovat průtoky za dešťových událostí.

Při kalibraci oba modely spojovalo problematické hledání správných nastavení parametrů, která dobře vystihnou velikosti maximálních průtoků. Na druhou stranu byla v obou případech poměrně snadná kalibrace časových odchylek kulminací průtoků.

Nemělo by být ovšem opomenuto, že v tomto případě byla řešena pouze jedna experimentální oblast, která má svá lokální specifika. Vzorek proto není dostatečný k vytvoření nějakého obecně platného tvrzení pro všechny ostatní případy.

V návaznosti na obrázek v samém úvodu této práce se dá říci, že prostší hrubě schematizovaný model kaskády lineárních rezervoárů doletěl překvapivě daleko. Zároveň každý jeho záhyb papíru má svůj důvod a je jasné k čemu slouží. Podrobně schematizovaný model je spíše modelem větroně, kterého tvůrci do detailu propracovali, umožnili jeho nepřímou kontrolu, vytáhli do vzduchu a on plachtí. Ve výsledku ale oba doplachtí skoro stejně daleko.

8. Seznam použitých zdrojů

- [1] CIWEM. *Code of Practice for the Hydraulic Modelling of Urban Drainage Systems*. 1. vyd. London: CIWEM, 2017.
- [2] STRÁNSKÝ D. a kol. *Metodická příručka - Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí*. Státní fond životního prostředí ČR, 2009.
- [3] Rada Evropských společenství. *Směrnice rady, o čištění městských odpadních vod*. [online]. [cit. 23. 9. 2019]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271&from=CS>.
- [4] BUTLER D. a DAVIES J. W. *Urban drainage*. 1. vyd. London: E & FN Spon, 2000. ISBN: 0-419-22340-1.
- [5] PEDERSEN J. T., PETERS J. C. a HELWEG O. J. *Hydrographs by Single Linear Reservoir Model*. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 1980.
- [6] CHOW V. T., MAIDMENT D. R. a MAYS L. W. *Applied hydrology*. New York: McGraw - Hill Professional, 2013. ISBN: 978-0071743914.
- [7] KREJČÍ V. a kol. *Odvodnění urbanizovaných území - koncepční přístup*. Brno: Noel, 2002. ISBN: 80-86020-39-8.
- [8] NICKLOW J. W., BOULOS P. F. a MULETA M. K. *Comprehensive urban hydrologic modeling handbook for engineers and planners*. 1. vyd. Pasadena, CA: MWH Soft, Inc., 2006. ISBN: 0-9745689-6-1.
- [9] *ČSN 75 6101 Stokové sítě a kanalizační přípojky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [10] JAMES W., ROSSMAN L. E. a JAMES W. R. C. *Users guide to SWMM*. Ontario: Computational Hydraulics International CHI, 2010. ISBN: 978-0-9808853-5-4.
- [11] SUCHÁNEK M., PRYL K. a KABELKOVÁ I. *Základní přístupy k monitoringu v městském odvodnění*. Vodní hospodářství, 2013.
- [12] SUCHÁNEK M., SÝKORA P. a STRÁNSKÝ D. *Monitoring v městském odvodnění - Část I. - Dešťové srážky*. 1. vyd. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, 2012. ISBN: 978-80-87140-25-3.
- [13] CIWEM. *Rainfall Modelling Guide 2016*. London: CIWEM, 2016.
- [14] ARMSTRONG R. J. *WaPUG User Note No 33, Modelling Dry Weather Flow*. WaPUG, 2009.
- [15] ĎAĎO S., BEJČEK L. a PLATIL A. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN: 80-7300-156-X.
- [16] PECHLIVANIDIS I. a kol. *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*. GlobalNEST International Journal, 2011.

- [17] VAZE J. a kol. *Guidelines for Rainfall-Runoff Modelling: Towards Best Practice Model Application*. eWater CRC, 2011.
- [18] GOOCH M. N. *WaPUG User Note No 6, Use of Rainfall Data from Flow Surveys*. WaPUG, 2009.
- [19] emailová komunikace s Milanem Suchánkem. *Přepady SčVK*. [online]. [cit. 29. 11. 2019].
- [20] PUGH A. a KEEBLE R. *A Comparison of Full pipe and Skeletonised Models. When Bigger Is Better (and Faster)*. New Zealand: New Zealand Water a Wastes Association, 2004.
- [21] James W. *Rules for responsible modeling*. Guelph, Ont.: CHI, 2003.
- [22] KRAUSE P. a kol. *Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment*. Advances in Geosciences, 2005.
- [23] PERRIN C. a kol. *Does a Large Number of Parameters Enhance Model Performance? Comparative Assessment of Common Catchment Model Structures on 429 Catchments*. Journal of Hydrology, 2001.
- [24] BEVEN K. J. *Rainfall-runoff modelling the primer*. 1. vyd. Hoboken: Wiley, 2006. ISBN: 978-0-470-86671-9.
- [25] WAGENER T., GUPTA H. V. a WHEATER H. S. *Rainfall-Runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. London: Imperial College Press, 2008. ISBN: 1-86094-466-3.
- [26] Council for Regulatory Environmental Modeling. *Guidance on the Development, Evaluation, and Application of Environmental Models*. EPA/100/K-09/003. Washington, DC: US EPA Office of Research a Development, 2009.
- [27] Project ISA s.r.o. *Pasport vodohospodářské infrastruktury města Čelákovice - KANALIZACE - Technická zpráva*. Praha, 2018.
- [28] Český úřad zeměměřičský a katastrální. *Geoportál ČÚZK*. [online]. [cit. 22. 8. 2019]. URL: <https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/?wmcid=486#ipsQueue>.
- [29] GEPRO spol. s r.o. *Geoportál Čelákovice*. [online]. [cit. 15. 9. 2019]. URL: <https://celakovice.obce.gepro.cz/#/>.
- [30] Pražská vodohospodářská společnost a.s. *Městské standardy vodovodů a kanalizací na území hl. m. Prahy - kanalizační část*. Praha: Pražská vodohospodářská společnost a.s., 2018.
- [31] Hach. *Sigma 950 Flow Meter*. [online]. [cit. 2. 11. 2019]. URL: <https://ca.hach.com/sigma-950-flow-meter-with-75-khz-ultrasonic-in-pipe-sensor/product-downloads?id=22264687743>.
- [32] HydroVision. *Q-Eye PSC portable*. [online]. [cit. 2. 11. 2019]. URL: <https://www.hydrovision.de/products-produkte/portable-pulse-doppler-flow-meter-for-pipes-and-open-channels-q-eye-psc-portable/>.

9. Seznam obrázků

1	Je jejich cílem letět? Pokud ano, který z modelů poletí? [fotografie autorky]	8
2	Schéma kaskády lineárních rezervoárů [4]	14
3	Různé tvary odvodňovaných oblastí ilustrující efekt délky podpovodí [10]	16
4	Preissmanova štěrbina [4]	18
5	Vztah komplexity a nejistot modelu [26]	30
6	Poloha města Čelákovice [28]	32
7	Podíly délek potrubí jednotné kanalizace dle průměru a materiálu	33
8	Podíly délek potrubí gravitační oddílné splaškové kanalizace dle průměru a materiálu	33
9	Umístění srážkoměrů v Čelákovících [28]	44
10	Kalibrační křivky srážkoměrů	45
11	Kalibrované kumulované dešťové úhrny	46
12	Umístění průtokoměrů a hladinoměrů v Čelákovících	47
13	Průběh srážkové kalibrační události 30. 9. 2019	50
14	Průběh srážkové kalibrační události 5. 10. 2019	51
15	Průběh srážkové kalibrační události 8. 10. 2019	51
16	Průběh srážkové verifikační události 8. 9. 2019, šedě je vyznačena verifikovaná část události	52
17	Průběh srážkové verifikační události 2. 10. 2019	52
18	Průběh srážkové verifikační události 2. 11. 2019	52
19	Rozdělení podpovodí hrubě schematizovaného modelu	54
20	Ukázka ovladače SRTC	56
21	Ukázka pomůcky pro více kalibračních událostí	56
22	Graf dynamické kalibrace srážkoměru RG01	78
23	Graf dynamické kalibrace srážkoměru RG02	80
24	Graf dynamické kalibrace srážkoměru RG03	82
25	Pohled na povrch lokality H1 [fotografie autorky]	85
26	Fiedler Q2 pro měření hladiny v OK u ČOV [fotografie autorky]	85
27	Umístění měrného profilu H1 [28]	86
28	Pohled na povrch lokality Q1 [fotografie autorky]	88
29	Fiedler Q2 pro měření průtoku 2 šachty před OK u ČOV [fotografie autorky]	88
30	Umístění měrného profilu Q1 [28]	89
31	Pohled na povrch lokality H2 [fotografie autorky]	90
32	Hladinové sondy pro měření hladin v OK u náměstí [fotografie autorky]	91
33	Fiedler M4016 pro měření hladiny v OK u náměstí [fotografie autorky]	91
34	Umístění měrného profilu H2 [28]	92
35	Pohled na povrch lokality Q2 [fotografie autorky]	94
36	Hach Sigma 950 pro měření průtoku před OK na náměstí [fotografie autorky]	94
37	Umístění měrného profilu Q2 [28]	95
38	Pohled na povrch lokality H3 [fotografie autorky]	97
39	Fiedler M4016 pro měření hladiny v OK u tvrže [fotografie autorky]	97
40	Umístění měrného profilu H3 [28]	98

41	Pohled na povrch lokality Q3 [fotografie autorky]	100
42	Hach Sigma 950 pro měření průtoku jednu šachtu před OK u tvrže [fotografie autorky]	100
43	Umístění měrného profilu Q3 [28]	101
44	Pohled na povrch lokality H4 [fotografie autorky]	102
45	Celkový pohled do OK04A [fotografie autorky]	103
46	Hladinová sonda [fotografie autorky]	103
47	Umístění měrného profilu H4 [28]	104
48	Pohled na povrch lokality Q4 [fotografie autorky]	106
49	Fiedler M4016 pro měření hladiny v přelivném žlabu (vlevo) a HydrooVision Q-Eye pro měření průtoku před nátokem do OK u garáží (vpravo) [fotografie autorky]	106
50	Kombi sonda [fotografie autorky]	107
51	Umístění měrného profilu Q4 [28]	108
52	Pohled na povrch lokality Q5 [fotografie autorky]	110
53	Nivus Nivuflow mobile 750 pro měření průtoku před spojnou komorou u areálu TOS Čelákovice [fotografie autorky]	110
54	Umístění měrného profilu Q5 [28]	111
55	Pohled na lokalitu RG01 [fotografie autorky]	112
56	Osazený srážkoměr na střeše klubovny [fotografie autorky]	113
57	Umístění monitorovacího místa RG01 [28]	114
58	Pohled na lokalitu RG02 [fotografie autorky]	115
59	Osazený srážkoměr na střeše garáže [fotografie autorky]	116
60	Umístění monitorovacího místa RG02 [28]	117
61	Pohled na lokalitu RG03 [fotografie autorky]	118
62	Osazený srážkoměr na střeše budovy č. 18 [fotografie autorky]	119
63	Umístění monitorovacího místa RG03 [28]	120
64	Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 30. 9. 2019	126
65	Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 30. 9. 2019	126
66	Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 30. 9. 2019	127
67	Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 30. 9. 2019	127
68	Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 30. 9. 2019	128
69	Průběh průtoku na profilu Q6 - kalibrační událost 30. 9. 2019	128
70	Průběh průtoku na profilu Q7 - kalibrační událost 30. 9. 2019	129
71	Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 5. 10. 2019	130
72	Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 5. 10. 2019	130
73	Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 5. 10. 2019	131
74	Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 5. 10. 2019	131
75	Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 5. 10. 2019	132
76	Průběh průtoku na profilu Q6 - kalibrační událost 5. 10. 2019	132
77	Průběh průtoku na profilu Q7 - kalibrační událost 5. 10. 2019	133
78	Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 8. 10. 2019	134
79	Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 8. 10. 2019	134
80	Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 8. 10. 2019	135
81	Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 8. 10. 2019	135
82	Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 8. 10. 2019	136
83	Průběh průtoku na profilu Q6 - kalibrační událost 8. 10. 2019	136

84	Průběh průtoku na profilu Q7 - kalibrační událost 8. 10. 2019	137
85	Průběh hladiny na profilu H1 - kalibrační událost 30. 9. 2019	138
86	Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 30. 9. 2019	138
87	Průběh hladiny na profilu H2a - kalibrační událost 30. 9. 2019	138
88	Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 30. 9. 2019	139
89	Průběh hladiny na profilu H3 - kalibrační událost 30. 9. 2019	139
90	Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 30. 9. 2019	139
91	Průběh hladiny na profilu H4 - kalibrační událost 30. 9. 2019	140
92	Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 30. 9. 2019	140
93	Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 30. 9. 2019	140
94	Průběh hladiny na profilu H1 - kalibrační událost 5. 10. 2019	141
95	Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 5. 10. 2019	141
96	Průběh hladiny na profilu H2a - kalibrační událost 5. 10. 2019	141
97	Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 5. 10. 2019	142
98	Průběh hladiny na profilu H3 - kalibrační událost 5. 10. 2019	142
99	Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 5. 10. 2019	142
100	Průběh hladiny na profilu H4 - kalibrační událost 5. 10. 2019	143
101	Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 5. 10. 2019	143
102	Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 5. 10. 2019	143
103	Průběh hladiny na profilu H1 - kalibrační událost 8. 10. 2019	144
104	Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 8. 10. 2019	144
105	Průběh hladiny na profilu H2a - kalibrační událost 8. 10. 2019	144
106	Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 8. 10. 2019	145
107	Průběh hladiny na profilu H3 - kalibrační událost 8. 10. 2019	145
108	Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 8. 10. 2019	145
109	Průběh hladiny na profilu H4 - kalibrační událost 8. 10. 2019	146
110	Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 8. 10. 2019	146
111	Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 8. 10. 2019	146
112	Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 8. 9. 2019	147
113	Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 8. 9. 2019	147
114	Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 8. 9. 2019	148
115	Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 8. 9. 2019	148
116	Průběh průtoku na profilu Q6 - verifikační událost 8. 9. 2019	149
117	Průběh průtoku na profilu Q7 - verifikační událost 8. 9. 2019	149
118	Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 10. 2019	150
119	Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 10. 2019	150
120	Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 10. 2019	151
121	Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 10. 2019	151
122	Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 10. 2019	152
123	Průběh průtoku na profilu Q6 - verifikační událost 2. 10. 2019	152
124	Průběh průtoku na profilu Q7 - verifikační událost 2. 10. 2019	153
125	Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 11. 2019	154
126	Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 11. 2019	154
127	Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 11. 2019	155
128	Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 11. 2019	155
129	Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 11. 2019	156
130	Průběh průtoku na profilu Q6 - verifikační událost 2. 11. 2019	156

131	Průběh průtoku na profilu Q7 - verifikační událost 2. 11. 2019	157
132	Průběh hladiny na profilu H1 - verifikační událost 8. 9. 2019	158
133	Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 8. 9. 2019	158
134	Průběh hladiny na profilu H3 - verifikační událost 8. 9. 2019	158
135	Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 8. 9. 2019	159
136	Průběh hladiny na profilu H4 - verifikační událost 8. 9. 2019	159
137	Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 8. 9. 2019	159
138	Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 8. 9. 2019	160
139	Průběh hladiny na profilu H1 - verifikační událost 2. 10. 2019	161
140	Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 10. 2019	161
141	Průběh hladiny na profilu H2a - verifikační událost 2. 10. 2019	161
142	Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 10. 2019	162
143	Průběh hladiny na profilu H3 - verifikační událost 2. 10. 2019	162
144	Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 10. 2019	162
145	Průběh hladiny na profilu H4 - verifikační událost 2. 10. 2019	163
146	Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 10. 2019	163
147	Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 10. 2019	163
148	Průběh hladiny na profilu H1 - verifikační událost 2. 11. 2019	164
149	Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 11. 2019	164
150	Průběh hladiny na profilu H2a - verifikační událost 2. 11. 2019	164
151	Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 11. 2019	165
152	Průběh hladiny na profilu H3 - verifikační událost 2. 11. 2019	165
153	Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 11. 2019	165
154	Průběh hladiny na profilu H4 - verifikační událost 2. 11. 2019	166
155	Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 11. 2019	166
156	Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 11. 2019	166

10. Seznam tabulek

1	Nároky na počet srážkoměrů podle členitosti oblasti [11]	21
2	Doporučený počet a rozložení stanic dle velikosti lokality [12]	22
3	Minimální doporučený rozsah monitoringu pro účely kalibrace a verifikace matematického modelu stokové sítě [2]	24
4	Počty objektů v podrobně schematizovaném modelu	36
5	Počet doplnění zdrojových dat	37
6	Výchozí hodnoty Manningova součinitele drsnosti [10]	41
7	Kalibrace průtokoměrů hydrometrováním - opravy hloubek měřených kombi sondami	48
8	Kritéria kvality výsledků	57
9	Výsledky kalibrace hrubě schematizovaného modelu	59
10	Výsledky verifikace hrubě schematizovaného modelu	59
11	Výsledky kalibrace podobně schematizovaného modelu	61
12	Výsledky verifikace podrobně schematizovaného modelu	62
13	Srovnání kalibrace průtoků obou modelů (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)	63
14	Srovnání verifikace průtoků obou modelů (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)	64
15	Srovnání procenta nepropustných ploch před a po kalibraci (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)	64
16	Stručné slovní hodnocení modelů (P - podrobně schematizovaný model, H - hrubě schematizovaný model)	65
17	Statická kalibrace před dynamickou kalibrací (RG01)	78
18	Dynamická kalibrace RG01	79
19	Statická kalibrace po dynamické kalibraci (RG01)	79
20	Statická kalibrace před dynamickou kalibrací (RG02)	80
21	Dynamická kalibrace RG02	81
22	Statická kalibrace po dynamické kalibraci (RG02)	81
23	Statická kalibrace před dynamickou kalibrací (RG03)	82
24	Dynamická kalibrace RG03	83
25	Statická kalibrace po dynamické kalibraci (RG03)	83

11. Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

CIWEM	Chartered Institution of Water and Environmental Management
ČOV	čistírna odpadních vod
ČSN	česká technická norma
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
DMR	digitální model reliéfu
DN	Diamètre Nominal
EO	ekvivalentní obyvatel
GIS	Geografický informační systém
NOAA	Národní úřad pro oceán a atmosféru
OK	odlehčovací komora
PSOV	přečerpávací stanice odpadních vod
SK	spojná komora
SOVAK	Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR
SRTC	Sensitivity-based Radio Tuning Calibration
SWMM	Storm Water Management Model
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VBA	Visual Basic for Applications
WaPUG	Wastewater Planning Users Group
WMO	Světová meteorologická organizace

Symboly

A	plocha
B	šířka v hladině
E	Nash-Sutcliffe koeficient
ERR_q	chyba měření srážkoměru
g	gravitační zrychlení
h	funkce okamžitého jednotkového hydrogramu
δH_{max}	odchylka maximální hladiny
I	přítok
K_{Sp}	konstanta lineárního rezervoáru
N	počet rezervoárů
n	Manningův součinitel drsnosti, počet překlopení, počet událostí
O	měřená veličina
o	otáčky čerpadla
P	simulovaná veličina
ψ	součinitel odtoku
q	vydatnost
Q	odtok, průtok
δQ_{max}	odchylka maximálního průtoku
q_{real}	skutečná vydatnost
N_{imperv}	Manningův součinitel pro nepropustné povrchy
N_{perv}	Manningův součinitel pro propustné povrchy
$q_{záznam}$	zaznamenaná vydatnost
r_{eff}	intenzita efektivního deště
r_i	relativní odchylka
S	akumulace
t	čas
t_E	čas posledního překlopení

Δt_{peak}	časová odchylka maximálních průtoků
$\Delta t_{přep}$	odchylka délky přepadu
t_s	čas prvního překlopení
δV	odchylka celkového proteklého objemu
$V_{\bar{c}}$	čerpaný objem
V_{Sp}	objem rezervoáru
V_z	zaznamenaný objem
x	podélná vzdálenost
y	hloubka

12. Přílohy

Seznam příloh

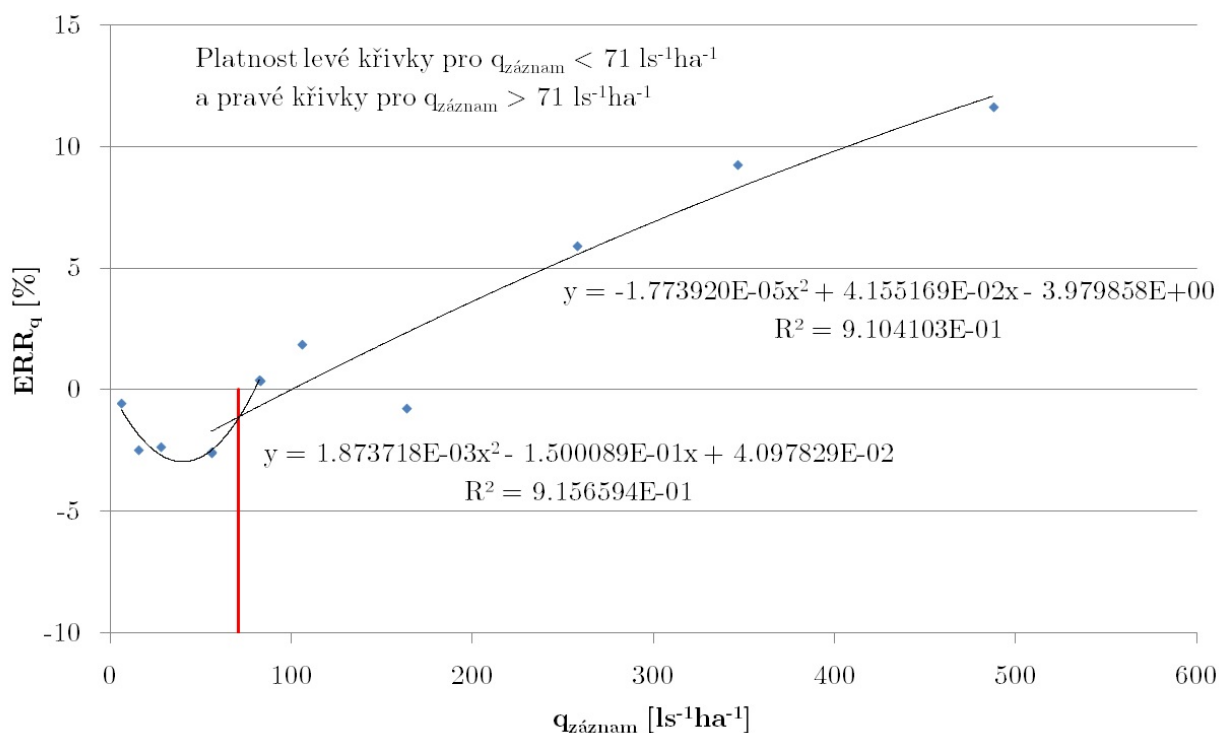
- 12.1 Kalibrace srážkoměrů
- 12.2 Listy charakteristik měrných profilů
- 12.3 Mapa rozmístění průtokoměrů a hladinoměrů
- 12.4 Vzorové hektary
- 12.5 Výsledky kalibrace hrubě schematizovaného modelu
- 12.6 Výsledky kalibrace podrobně schematizovaného modelu
- 12.7 Výsledky verifikace hrubě schematizovaného modelu
- 12.8 Výsledky verifikace podrobně schematizovaného modelu
- 12.9 Schéma hrubě schematizovaného modelu
- 12.10 Schéma podrobně schematizovaného modelu
- 12.11 Záznam monitoringu

12.1. Kalibrace srážkoměrů

Kalibrace srážkoměru RG01

Tabulka 17: Statická kalibrace před dynamickou kalibrací (RG01)

	levá strana [ml]	pravá strana [ml]
	4,9	5,2
	4,8	4,9
	4,7	4,8
	4,7	5,0
	4,8	4,8
průměr	4,8	4,9
součet LS+PS		9,7



Obrázek 22: Graf dynamické kalibrace srážkoměru RG01

Tabulka 18: Dynamická kalibrace RG01

o [-]	q [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	$V_{\tilde{c}}$ [ml]	t_s	t_E	q_{real} [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	n [-]	V_z [ml]	$q_{záznam}$ [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	ERR_q [%]
2	5	54,7	9:31:25	10:00:28	6,28	11	55	6,31	-0,55
5	15	63,4	10:05:19	10:19:11	15,24	13	65	15,63	-2,46
9	25	63,5	10:23:14	10:30:59	27,31	13	65	27,96	-2,31
18	50	126,7	10:34:32	10:42:17	54,49	26	130	55,91	-2,54
27	75	195,8	10:44:32	10:52:25	82,79	39	195	82,45	0,41
35	100	254,8	10:54:38	11:02:33	107,28	50	250	105,26	1,92
53	150	387,3	11:04:21	11:12:18	162,39	78	390	163,52	-0,69
88	250	651,6	11:14:16	11:22:14	272,64	123	615	257,32	5,95
123	350	907,2	11:24:54	11:32:54	378,00	166	830	345,83	9,30
176	500	1300,9	11:35:41	11:43:39	544,31	233	1165	487,45	11,67

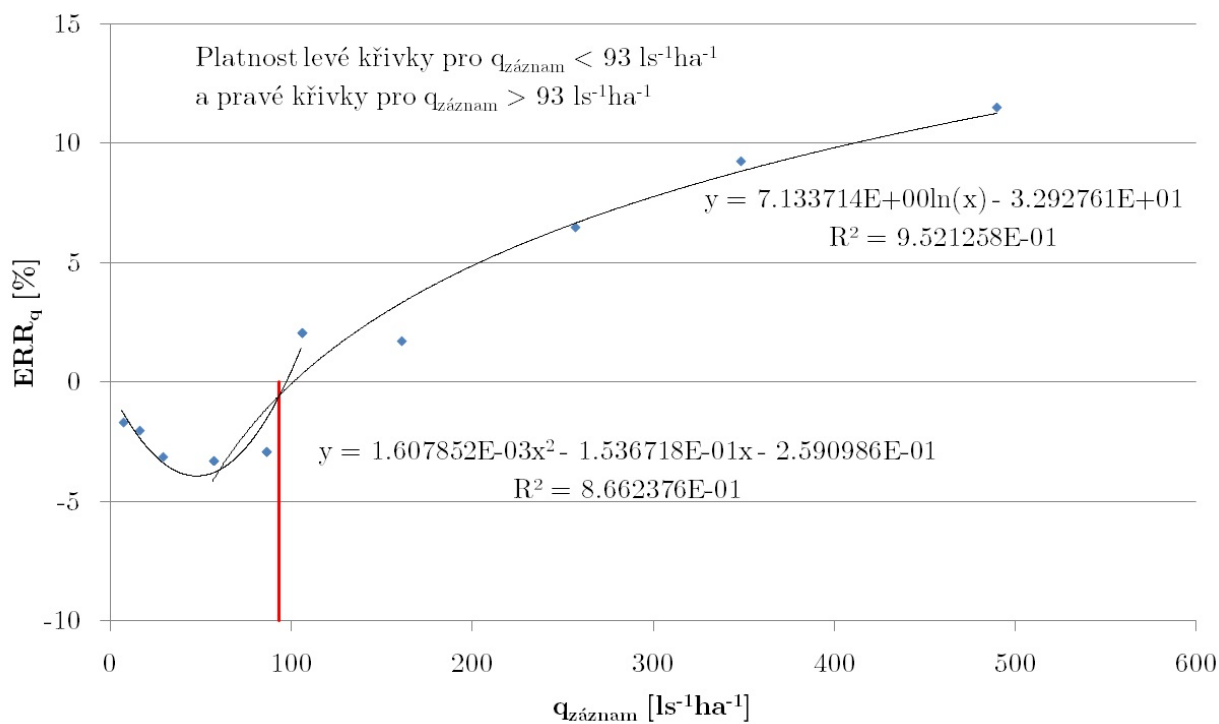
Tabulka 19: Statická kalibrace po dynamické kalibraci (RG01)

	levá strana [ml]	pravá strana [ml]
	4,7	5,1
	4,7	5,0
	4,8	4,9
	4,8	5,0
	4,9	4,9
průměr	4,8	5,0
součet LS+PS	9,8	

Kalibrace srážkoměru RG02

Tabulka 20: Statická kalibrace před dynamickou kalibrací (RG02)

	levá strana [ml]	pravá strana [ml]
	5,0	5,1
	4,8	4,9
	4,8	5,0
	4,9	4,9
	5,1	5,1
průměr	4,9	5,0
součet LS+PS	9,9	



Obrázek 23: Graf dynamické kalibrace srážkoměru RG02

Tabulka 21: Dynamická kalibrace RG02

o [-]	q [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	$V_{\tilde{c}}$ [ml]	t_s	t_E	q_{real} [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	n [-]	V_z [ml]	$q_{záznam}$ [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	ERR_q [%]
2	5	54,1	13:15:11	13:43:43	6,32	11	55	6,43	-1,64
5	15	63,7	13:47:34	14:01:23	15,37	13	65	15,68	-2,00
9	25	63,0	14:03:10	14:10:49	27,45	13	65	28,32	-3,08
18	50	130,6	14:12:10	14:20:07	54,76	27	135	56,60	-3,26
27	75	199,1	14:21:58	14:29:56	83,31	41	205	85,77	-2,88
35	100	255,2	14:31:36	14:39:30	107,68	50	250	105,49	2,08
53	150	391,8	14:41:46	14:49:46	163,25	77	385	160,42	1,77
88	250	655,0	14:51:35	14:59:34	273,49	123	615	256,78	6,50
123	350	912,6	15:02:07	15:10:07	380,25	167	835	347,92	9,29
176	500	1310,3	15:12:29	15:20:29	545,96	235	1175	489,58	11,51

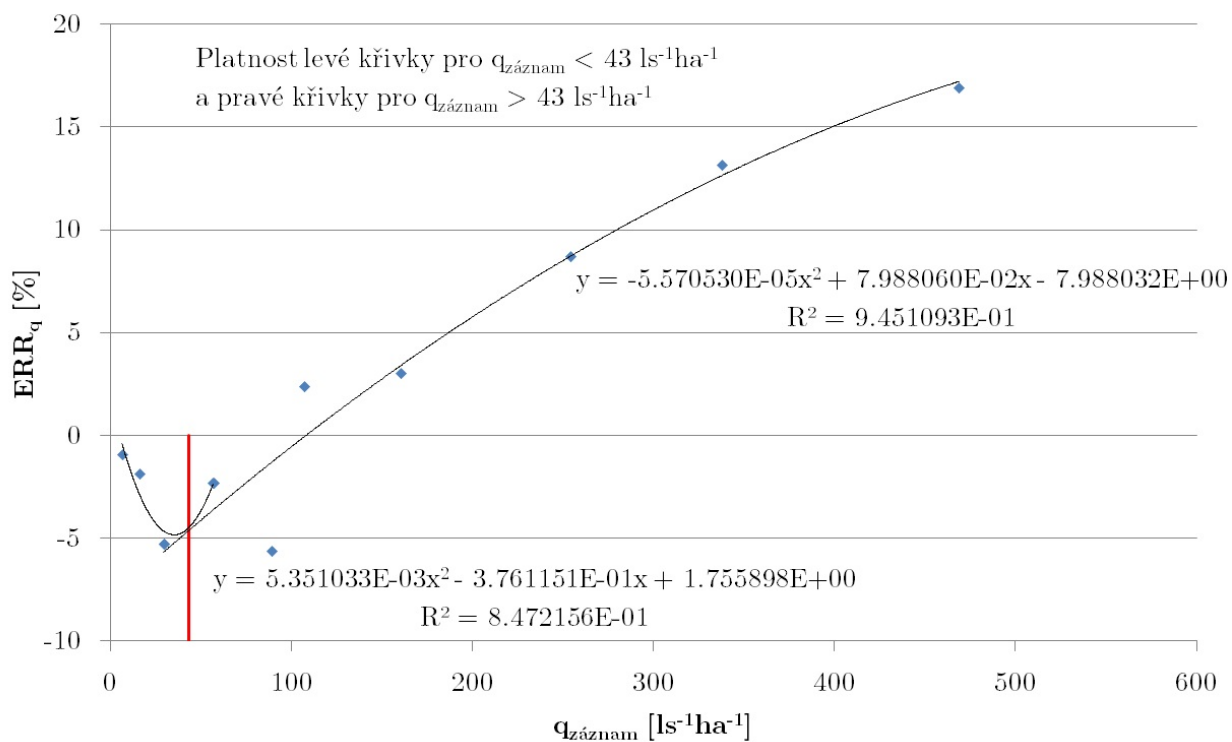
Tabulka 22: Statická kalibrace po dynamické kalibraci (RG02)

	levá strana [ml]	pravá strana [ml]
	5,0	4,9
	4,9	5,0
	4,9	4,8
	4,8	5,0
	4,9	4,9
průměr	4,9	4,9
součet LS+PS	9,8	

Kalibrace srážkoměru RG03

Tabulka 23: Statická kalibrace před dynamickou kalibrací (RG03)

	levá strana [ml]	pravá strana [ml]
	4,7	5,3
	4,5	5,3
	4,7	5,3
	4,6	5,1
	4,9	5,4
průměr	4,7	5,3
součet LS+PS	10,0	



Obrázek 24: Graf dynamické kalibrace srážkoměru RG03

Tabulka 24: Dynamická kalibrace RG03

o [-]	q [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	$V_{\bar{c}}$ [ml]	t_s	t_E	q_{real} [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	n [-]	V_z [ml]	$q_{záznam}$ [ls ⁻¹ ha ⁻¹]	ERR_q [%]
2	5	54,5	14:12:43	14:41:25	6,33	11	55	6,39	-0,91
5	15	63,8	14:45:04	14:58:46	15,52	13	65	15,82	-1,85
9	25	66,3	15:00:52	15:08:51	27,68	14	70	29,23	-5,29
18	50	131,9	15:10:36	15:18:33	55,30	27	135	56,60	-2,30
27	75	198,2	15:20:23	15:28:15	83,98	42	210	88,98	-5,62
35	100	261,1	16:07:08	16:15:07	109,02	51	255	106,47	2,39
53	150	391,6	15:43:08	15:51:03	164,88	76	380	160,00	3,05
88	250	657,8	15:56:52	16:04:49	275,81	121	605	253,67	8,73
123	350	916,9	16:17:22	16:25:22	382,04	162	810	337,50	13,20
176	500	1309,8	16:28:05	16:36:03	548,03	224	1120	468,62	16,95

Tabulka 25: Statická kalibrace po dynamické kalibraci (RG03)

	levá strana [ml]	pravá strana [ml]
	4,9	5,0
	4,8	5,0
	5,2	5,1
průměr	5,0	5,0
součet LS+PS	10,0	

12.2. Listy charakteristik měrných profilů

Charakteristika měrného profilu H1

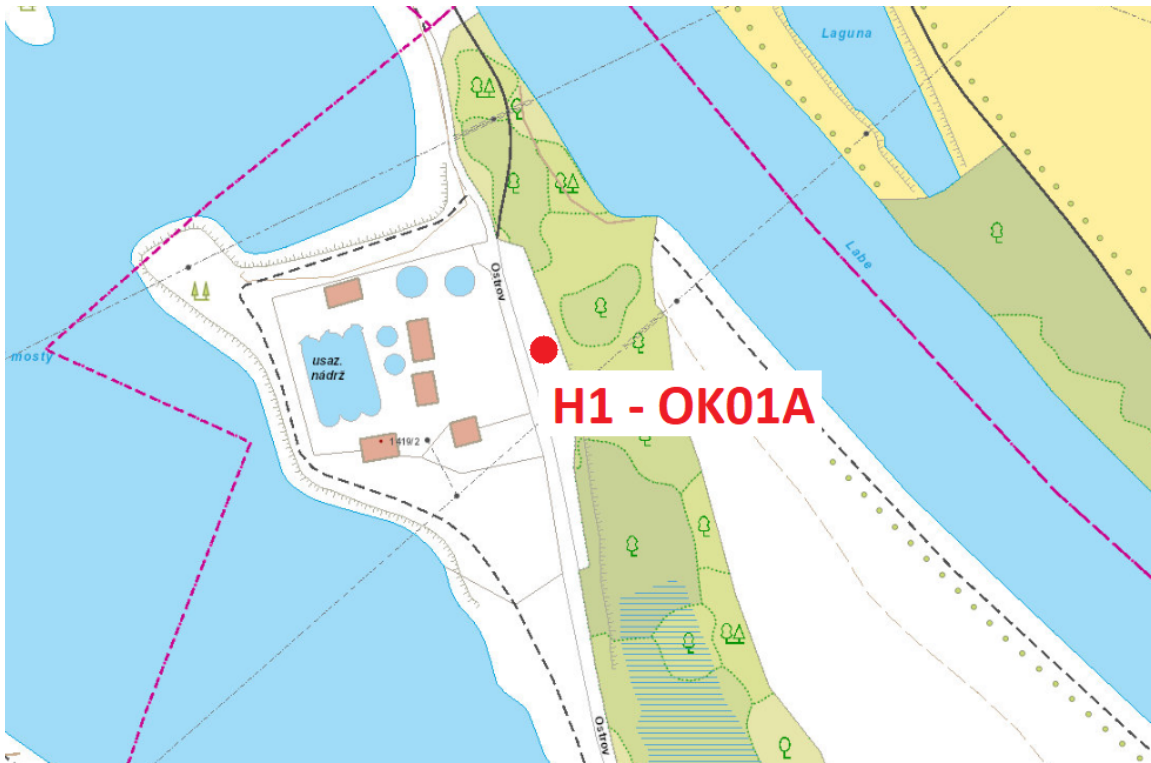
Název profilu:	H1 - ČOV	
Lokalita:	OK mezi stromy naproti ČOV přes cyklostezku	
Název šachty/objektu:	OK01A	
Druh kanalizace:	jednotná	
Jednotka:	Fiedler Q2	
Senzor:	ultrazvukový hladinový US3200	
Umístění senzoru:	nad středem přítoku do OK	
Interval záznamu dat:	2 min	
Instalace/Odinstalace:	5. 9. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 25: Pohled na povrch lokality H1 [fotografie autorky]



Obrázek 26: Fiedler Q2 pro měření hladiny v OK u ČOV [fotografie autorky]



Obrázek 27: Umístění měrného profilu H1 [28]

Charakteristika měrného profilu Q1

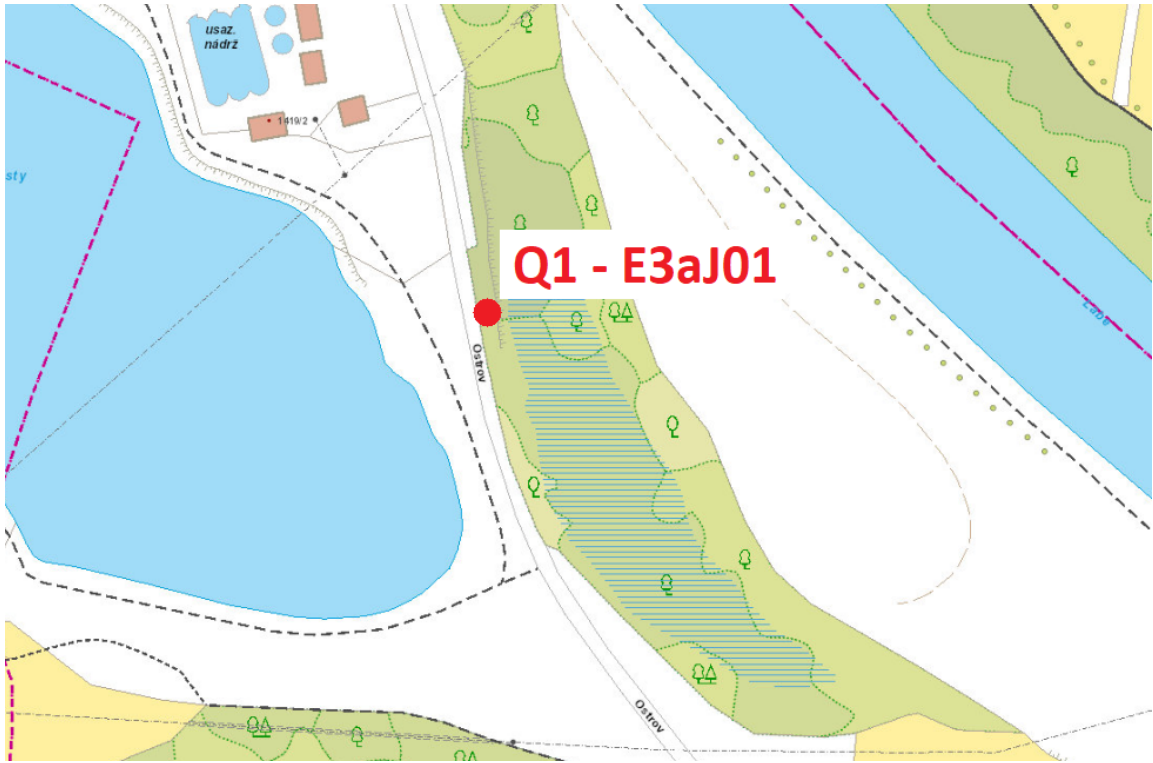
Název profilu:	Q1 - ČOV	
Lokalita:	u ČOV, 2 šachty proti proudu od OK01A	
Název šachty/objektu:	E3aJ01	
Druh kanalizace:	jednotná	
Parametry profilu:	Tvar: kruh	
	Průměr: 1200 mm	
	Materiál: beton	
Jednotka:	Fiedler Q2	
Senzor:	senzor KDO	
Umístění senzoru:	cca 20 cm před vtokem do šachty	
Interval záznamu dat:	1 min	
Instalace/Odinstalace:	20. 8. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 28: Pohled na povrch lokality Q1 [fotografie autorky]



Obrázek 29: Fiedler Q2 pro měření průtoku 2 šachty před OK u ČOV [fotografie autorky]



Obrázek 30: Umístění měrného profilu Q1 [28]

Charakteristika měrného profilu H2a a H2b

Název profilu:	H2a,b - Náměstí	
Lokalita:	náměstí 5. května, stání pro invalidy	
Název šachty/objektu:	OK01AE	
Druh kanalizace:	jednotná	
Jednotka:	Fiedler M4016	
Senzor:	ultrazvukový hladinový US3200 (H2a), US1200 (H2b)	
Umístění senzoru:	2x nad středy přelivných hladin	
Interval záznamu dat:	1 min do 19. 9. 2019, poté 5 min	
Instalace/Odinstalace:	5. 9. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



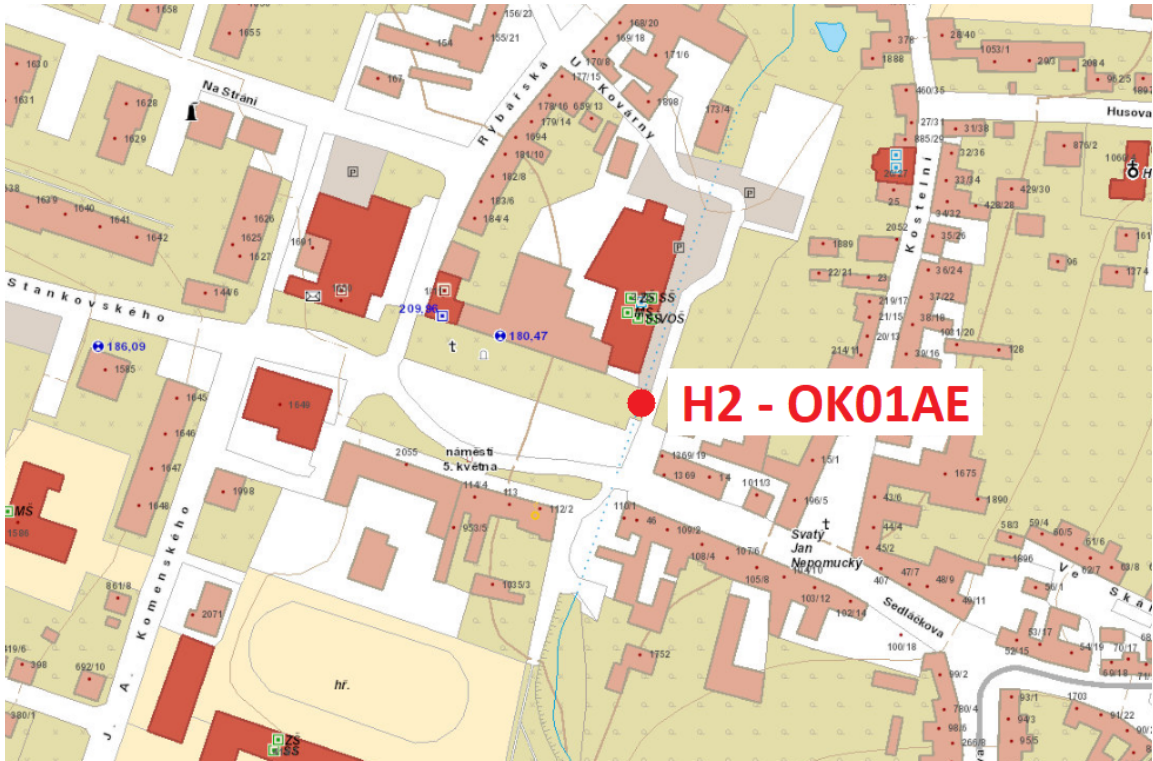
Obrázek 31: Pohled na povrch lokality H2 [fotografie autorky]



Obrázek 32: Hladinové sondy pro měření hladin v OK u náměstí [fotografie autorky]



Obrázek 33: Fiedler M4016 pro měření hladiny v OK u náměstí [fotografie autorky]



Obrázek 34: Umístění měrného profilu H2 [28]

Charakteristika měrného profilu Q2

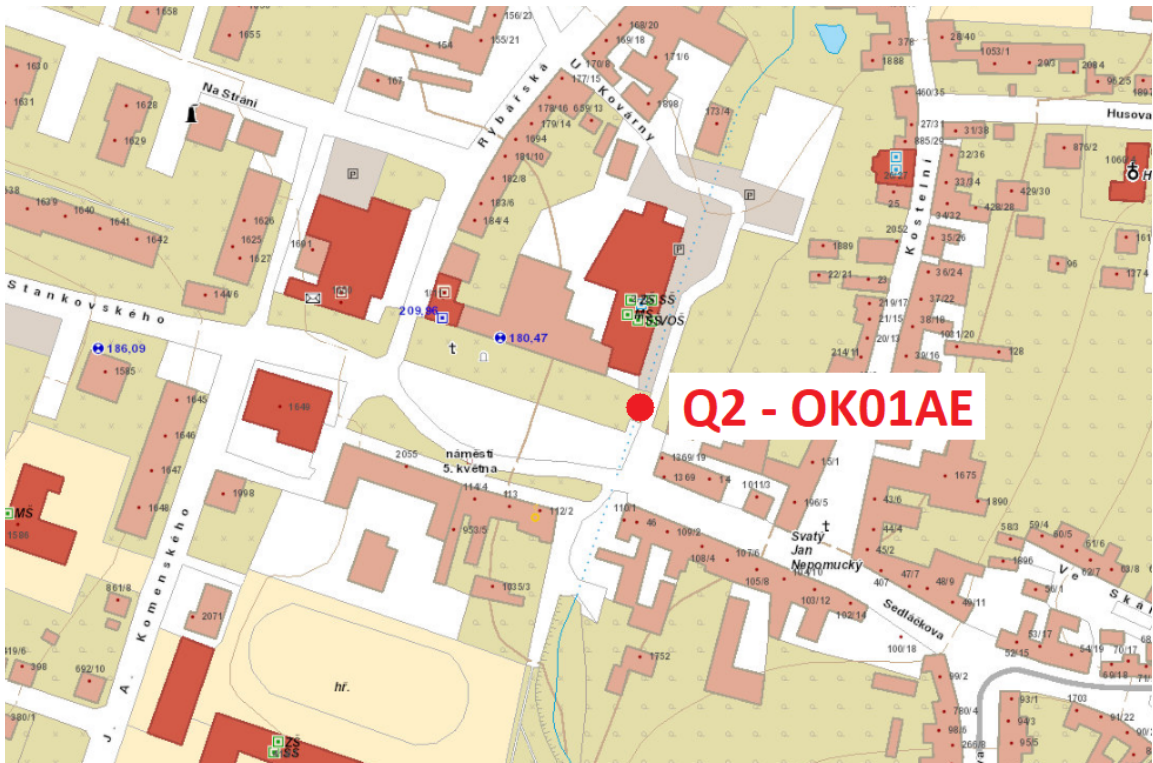
Název profilu:	Q2 - Náměstí	
Lokalita:	náměstí 5. května, stání pro invalidy	
Název šachty/objektu:	OK01AE	
Druh kanalizace:	jednotná	
Parametry profilu:	Tvar: kruh	
	Průměr: 1200 mm	
	Materiál: beton	
Jednotka:	Hach Sigma 950	
Senzor:	kombi senzor	
Umístění senzoru:	cca 30 cm před vtokem do OK	
Interval záznamu dat:	2 min	
Instalace/Odinstalace:	7. 8. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 35: Pohled na povrch lokality Q2 [fotografie autorky]



Obrázek 36: Hach Sigma 950 pro měření průtoku před OK na náměstí [fotografie autorky]



Obrázek 37: Umístění měrného profilu Q2 [28]

Charakteristika měrného profilu H3

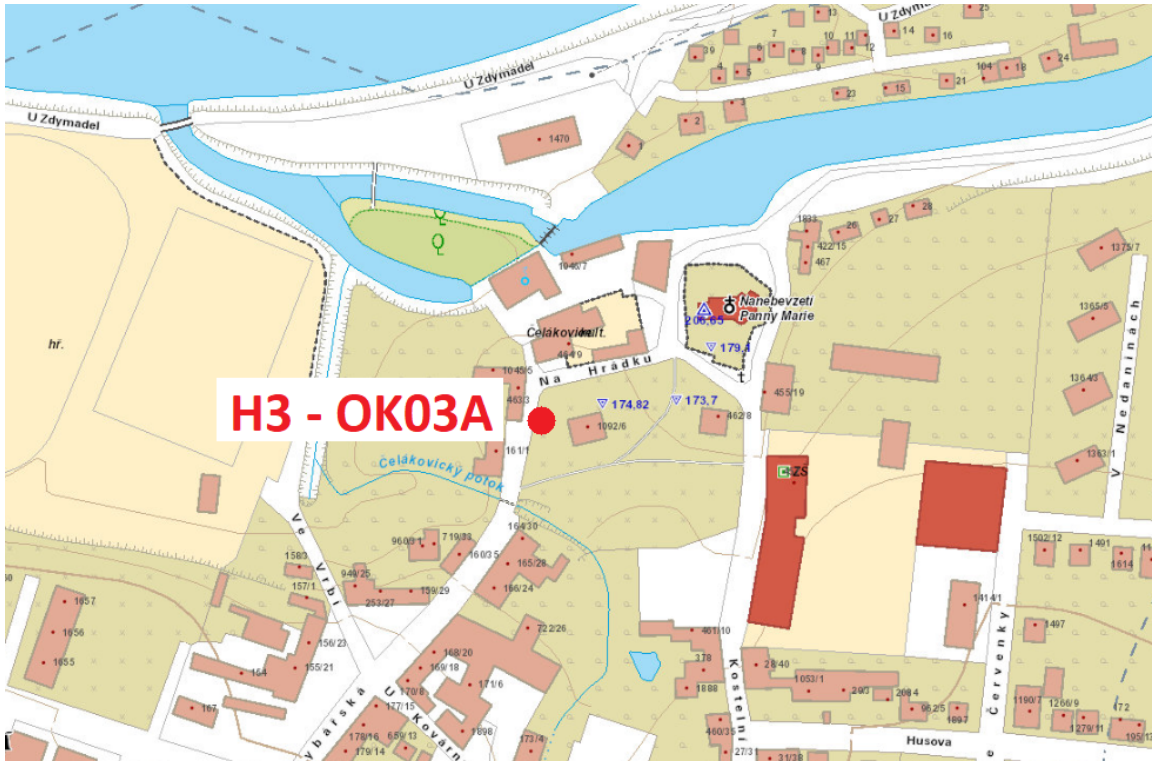
Název profilu:	H3 - Tvrz
Lokalita:	Na Hrádku, u tvrže Čelákovice
Název šachty/objektu:	OK03A
Druh kanalizace:	jednotná
Jednotka:	Fiedler M4016
Senzor:	ultrazvukový hladinový US3200
Umístění senzoru:	nad středem žlabu, 1600 mm od výtoku z OK
Interval záznamu dat:	2 min do 15. 10. 2019, poté 3 min
Instalace/Odinstalace:	5. 9. 2019 28. 11. 2019
Poznámky:	15. 10. 2019 - výměna senzoru



Obrázek 38: Pohled na povrch lokality H3 [fotografie autorky]



Obrázek 39: Fiedler M4016 pro měření hladiny v OK u tvrže [fotografie autorky]



Obrázek 40: Umístění měrného profilu H3 [28]

Charakteristika měrného profilu Q3

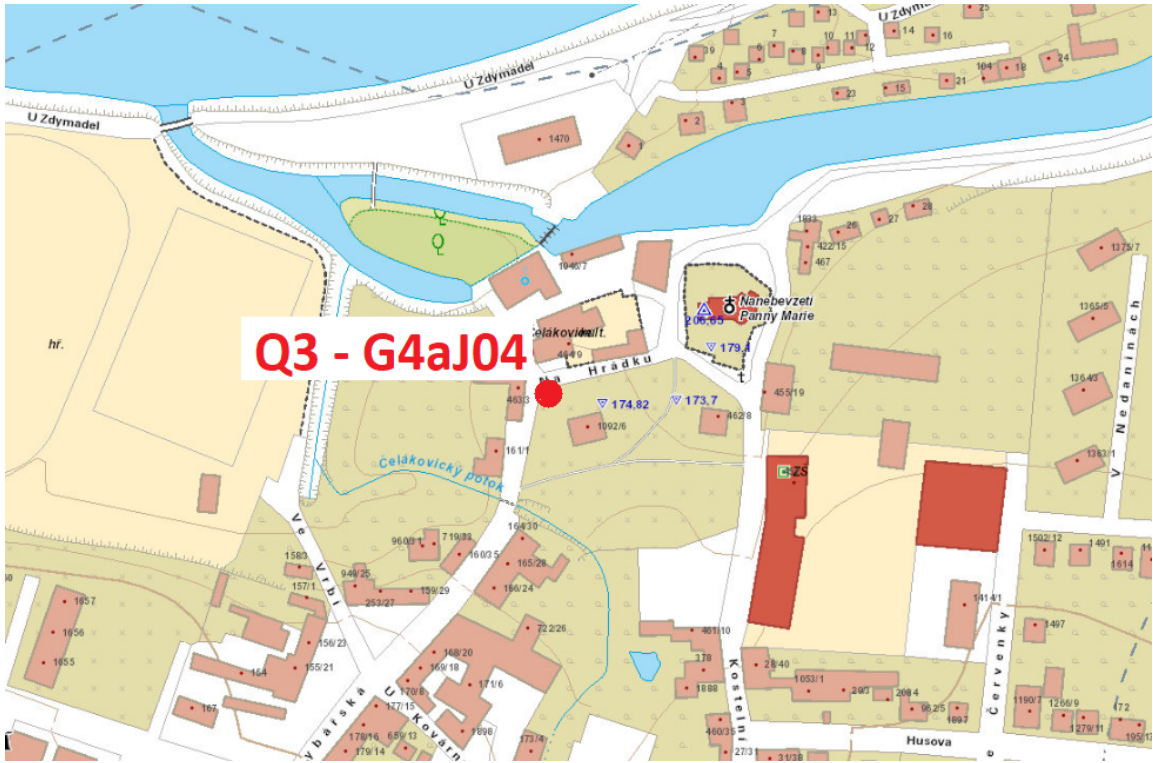
Název profilu:	Q3 - Tvrz	
Lokalita:	u tvrže Čelákovice; 1 šachta proti proudu od OK03A	
Název šachty/objektu:	G4aJ04	
Druh kanalizace:	jednotná	
Parametry profilu:	Tvar: kruh	
	Průměr: 1200 mm	
	Materiál: beton	
Jednotka:	Hach Sigma 950	
Senzor:	kombi senzor	
Umístění senzoru:	cca 50 cm před vtokem do šachty	
Interval záznamu dat:	3 min	
Instalace/Odinstalace:	5. 9. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 41: Pohled na povrch lokality Q3 [fotografie autorky]



Obrázek 42: Hach Sigma 950 pro měření průtoku jednu šachtu před OK u tvrže [fotografie autorky]



Obrázek 43: Umístění měrného profilu Q3 [28]

Charakteristika měrného profilu H4

Název profilu:	H4 - Garáž	
Lokalita:	ulice V Nedanínách, u garáží	
Název šachty/objektu:	OK04A	
Druh kanalizace:	jednotná	
Jednotka:	Fiedler M4016	
Senzor:	ultrazvukový hladinový US3200	
Umístění senzoru:	nad středem začátku přelivného žlabu	
Interval záznamu dat:	2 min do 24. 9. 2019, poté 3 min	
Instalace/Odinstalace:	20. 8. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 44: Pohled na povrch lokality H4 [fotografie autorky]



Obrázek 45: Celkový pohled do OK04A [fotografie autorky]



Obrázek 46: Hladinová sonda [fotografie autorky]



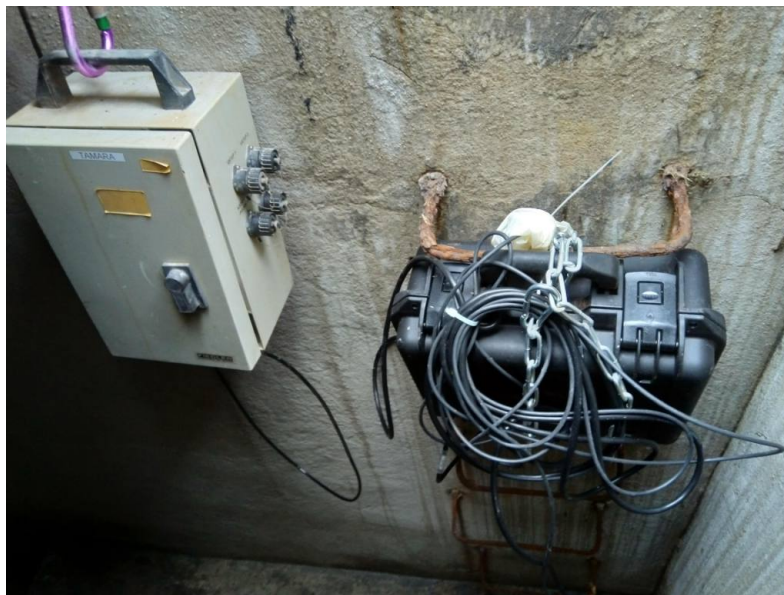
Obrázek 47: Umístění měrného profilu H4 [28]

Charakteristika měrného profilu Q4

Název profilu:	Q4 - Garáž
Lokalita:	ulice V Nedanínách, u garáží
Název šachty/objektu:	OK04A
Druh kanalizace:	jednotná
Parametry profilu:	Tvar: kruh
	Průměr: 1200 mm
	Materiál: beton
Jednotka:	HydrooVision Q-Eye
Senzor:	kombi senzor
Umístění senzoru:	cca 75 cm před vtokem do OK
Interval záznamu dat:	2 min do 9. 9. 2019, poté 5 min
Instalace/Odinstalace:	5. 9. 2019 28. 11. 2019
Poznámky:	



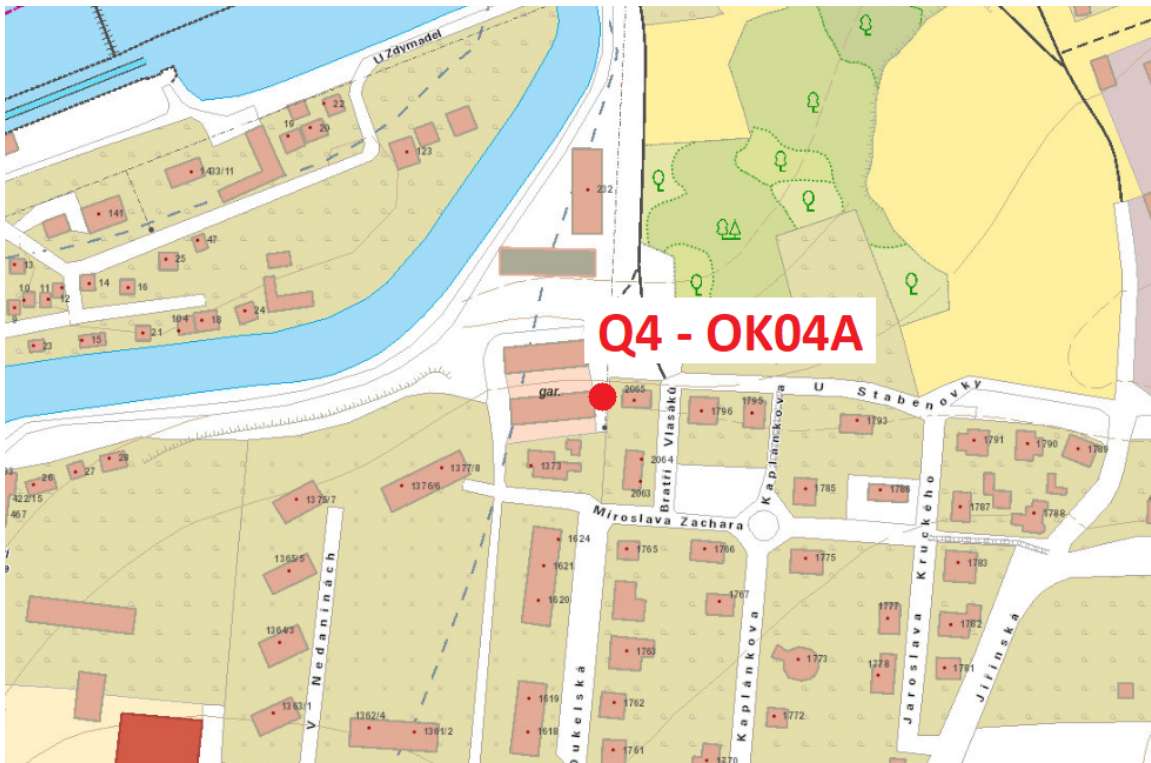
Obrázek 48: Pohled na povrch lokality Q4 [fotografie autorky]



Obrázek 49: Fiedler M4016 pro měření hladiny v přelivném žlabu (vlevo) a Q-Eye PSC pro měření průtoku před nátokem do OK u garáží (vpravo) [fotografie autorky]



Obrázek 50: Kombi sonda [fotografie autorky]



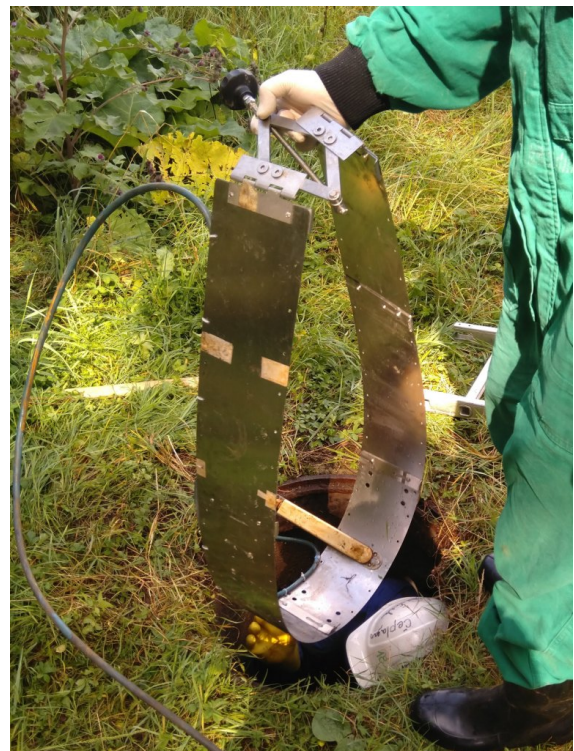
Obrázek 51: Umístění měrného profilu Q4 [28]

Charakteristika měrného profilu Q5

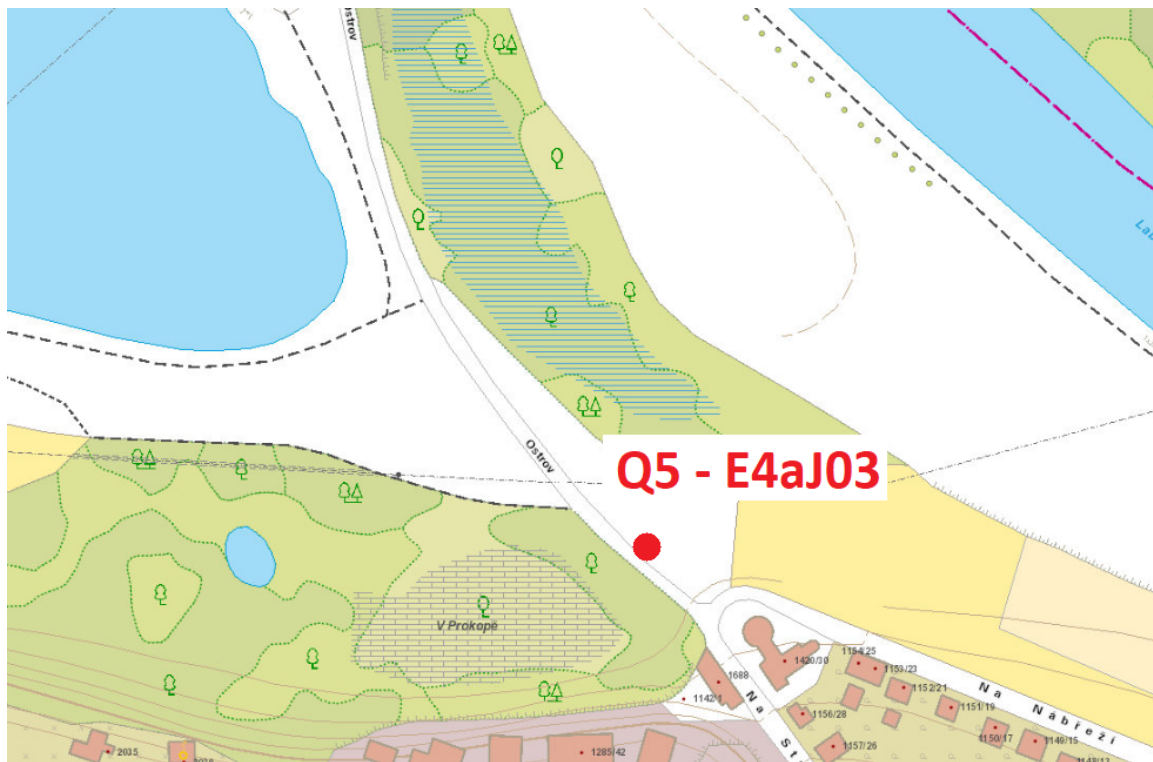
Název profilu:	Q5 - Areál	
Lokalita:	u průmyslového areálu TOS Čelákovice	
Název šachty/objektu:	E4aJ03	
Druh kanalizace:	jednotná	
Parametry profilu:	Tvar: kruh	
	Průměr: 740 mm	
	Materiál: beton	
Jednotka:	Nivus NivufLOW mobile 750	
Senzor:	kombi senzor	
Umístění senzoru:	těsně před vtokem do šachty	
Interval záznamu dat:	2 min	
Instalace/Odinstalace:	7. 8. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 52: Pohled na povrch lokality Q5 [fotografie autorky]



Obrázek 53: Nivus Nivuflow mobile 750 pro měření průtoku před spojnou komorou u areálu TOS Čelákovice [fotografie autorky]



Obrázek 54: Umístění měrného profilu Q5 [28]

Charakteristika monitorovacího místa RG01

Název místa:	RG01 - tenis	
Lokalita:	tenisový areál Čelákovice, U Kapličky 1705	
Měřicí přístroj:	Srážkoměr SR03, jednotka Fiedler M4605	
Umístění přístroje:	střecha klubovny	
Instalace/Odinstalace:	31. 7. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 55: Pohled na lokalitu RG01 [fotografie autorky]



Obrázek 56: Osazený srážkoměr na střeše klubovny [fotografie autorky]



Obrázek 57: Umístění monitorovacího místa RG01 [28]

Charakteristika monitorovacího místa RG02

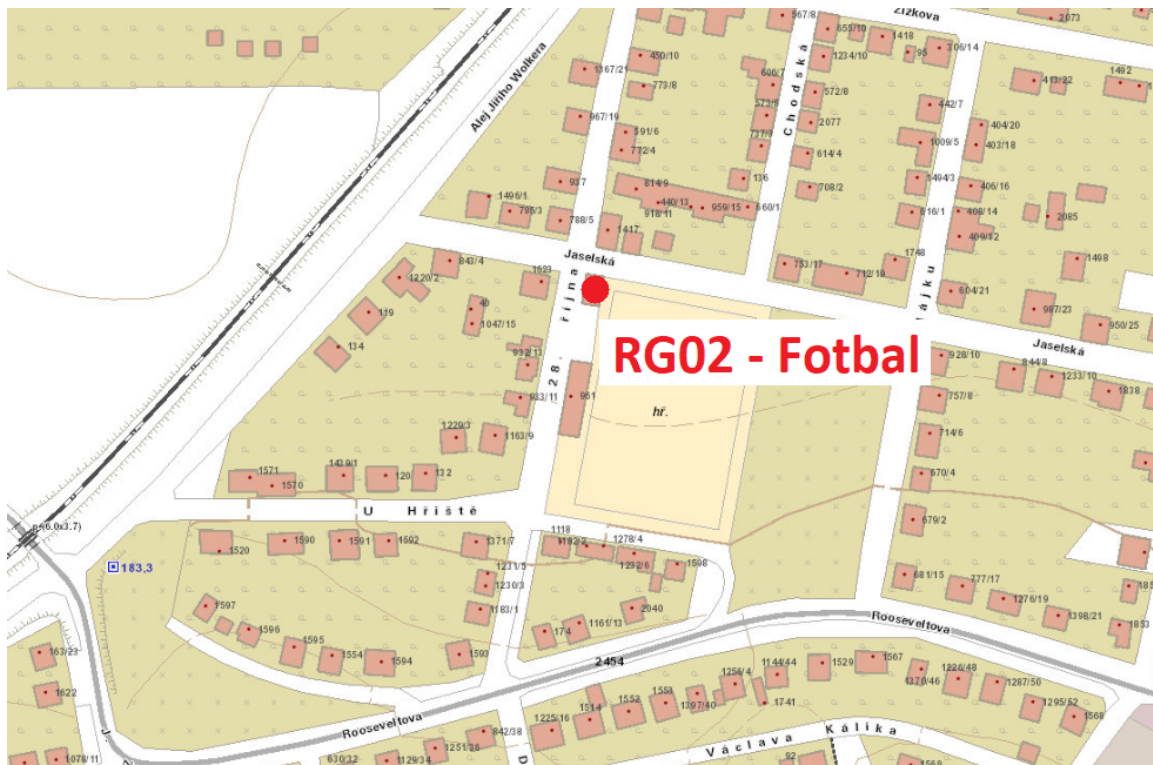
Název místa:	RG02 - fotbal	
Lokalita:	UNION Čelákovice, křížení ulic Jaselská a 28. října	
Měřicí přístroj:	Srážkoměr SR03, jednotka Fiedler M4605	
Umístění přístroje:	střecha garáže fotbalového areálu	
Instalace/Odinstalace:	31. 7. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 58: Pohled na lokalitu RG02 [fotografie autorky]



Obrázek 59: Osazený srážkoměr na střeše garáže [fotografie autorky]



Obrázek 60: Umístění monitorovacího místa RG02 [28]

Charakteristika monitorovacího místa RG03

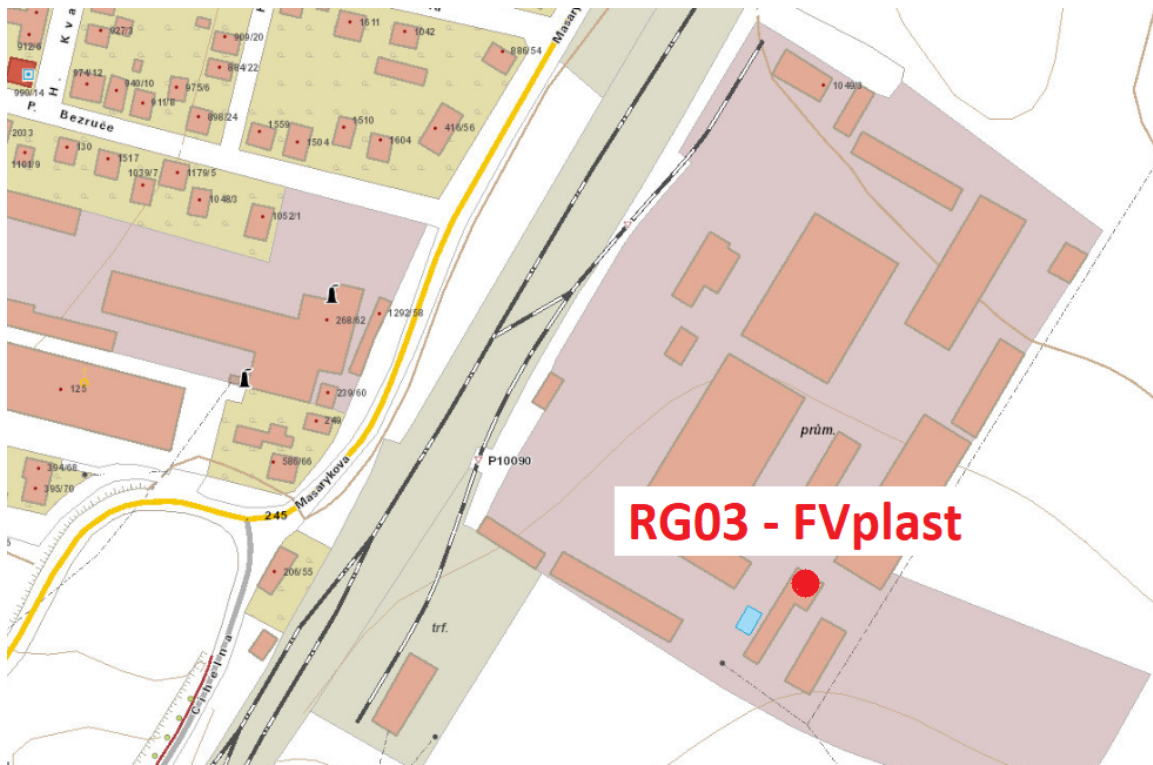
Název místa:	RG03 - FVplast	
Lokalita:	areál FV – Plast, Kozovazská 1049/3	
Měřicí přístroj:	Srážkoměr SR03, jednotka Fiedler M4605	
Umístění přístroje:	střecha jednopodlažní budovy č. 18 v areálu podniku	
Instalace/Odinstalace:	31. 7. 2019	28. 11. 2019
Poznámky:		



Obrázek 61: Pohled na lokalitu RG03 [fotografie autorky]

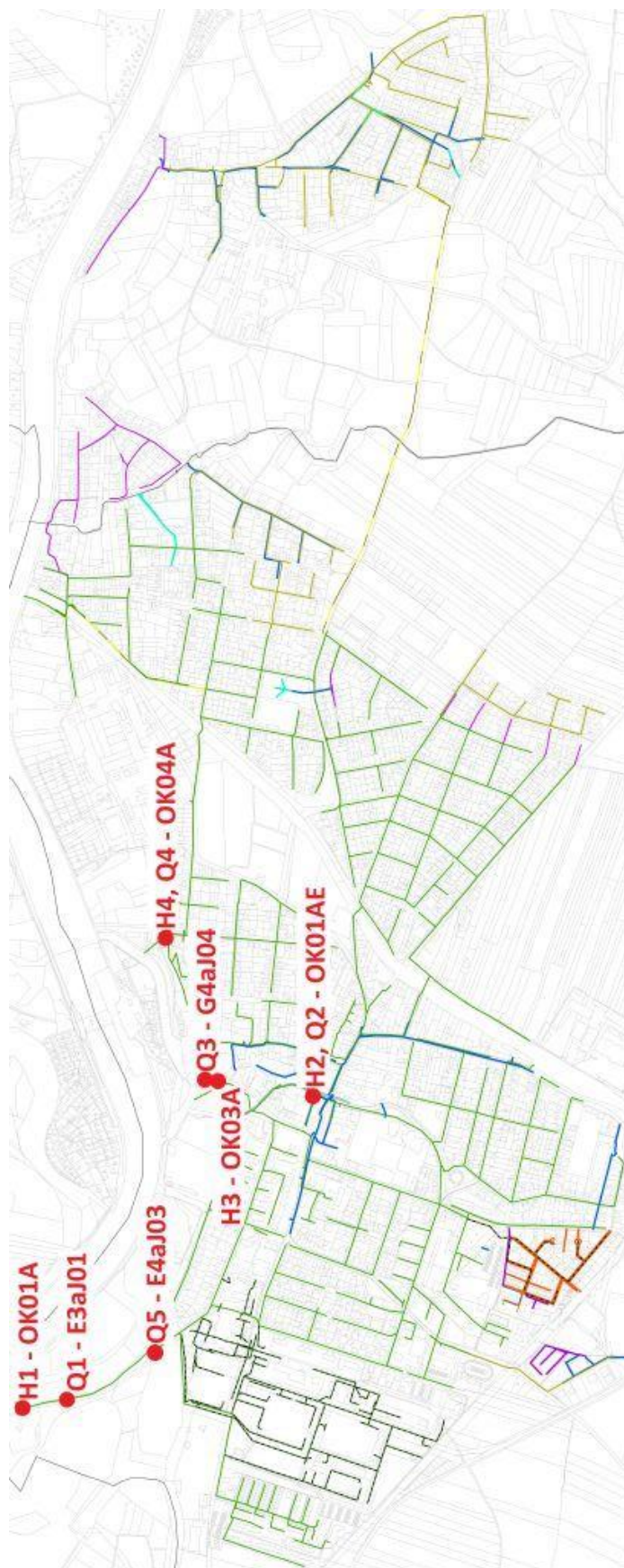


Obrázek 62: Osazený srážkoměr na střeše budovy č. 18 [fotografie autorky]



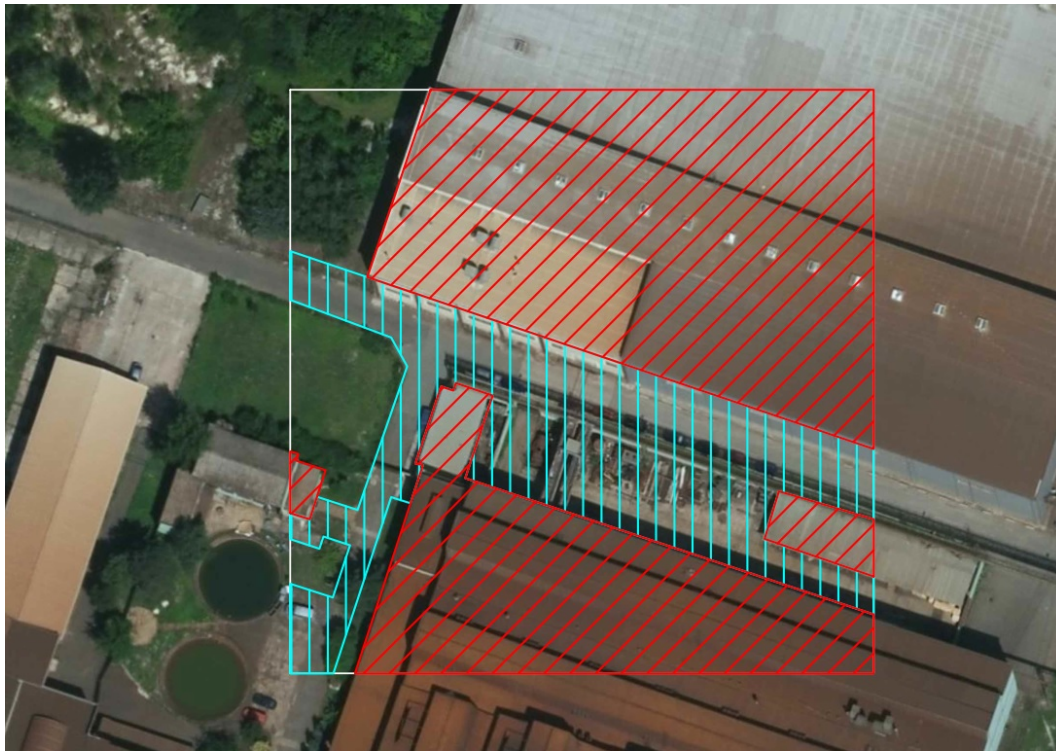
Obrázek 63: Umístění monitorovacího místa RG03 [28]

12.3. Mapa rozmístění průtokoměrů a hladinoměrů



12.4. Vzorové hektary

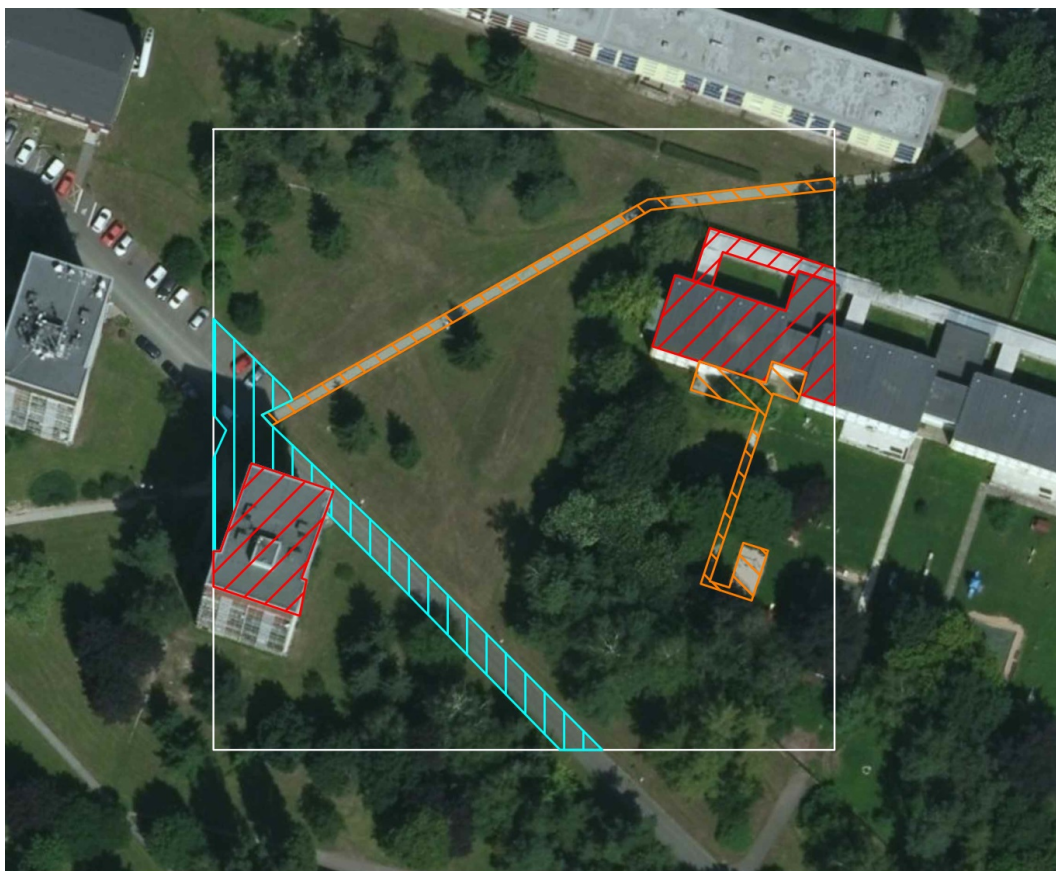
Vzorový hektar - průmyslové areály



- zatravněné plochy
- střechy
- asfaltové, betonové plochy,
dlažby se zálivkou spár

povrch	A [ha]	ψ [-]	N_{imperv} [m ^{1/6}]	N_{perv} [m ^{1/6}]
zatravněné plochy	0,124	0,1		0,150
střechy	0,621	1,0	0,015	
asfaltové, betonové plochy, dlažby se zálivkou spár	0,255	0,8	0,011	
vážený průměr		0,837	0,013	0,150

Vzorový hektar - nekompaktní zástavba



- zatravněné plochy
- střechy
- asfaltové, betonové plochy, dlažby se zálivkou spár
- dlažby s pískovými spárami

povrch	A [ha]	ψ [-]	N_{imperv} [$m^{1/6}$]	N_{perv} [$m^{1/6}$]
zatravněné plochy	0,838	0,1		0,150
střechy	0,075	1,0	0,015	
asfaltové, betonové plochy, dlažby se zálivkou spár	0,053	0,8	0,011	
dlažby s pískovými spárami	0,035	0,6	0,024	
vážený průměr		0,222	0,016	0,150

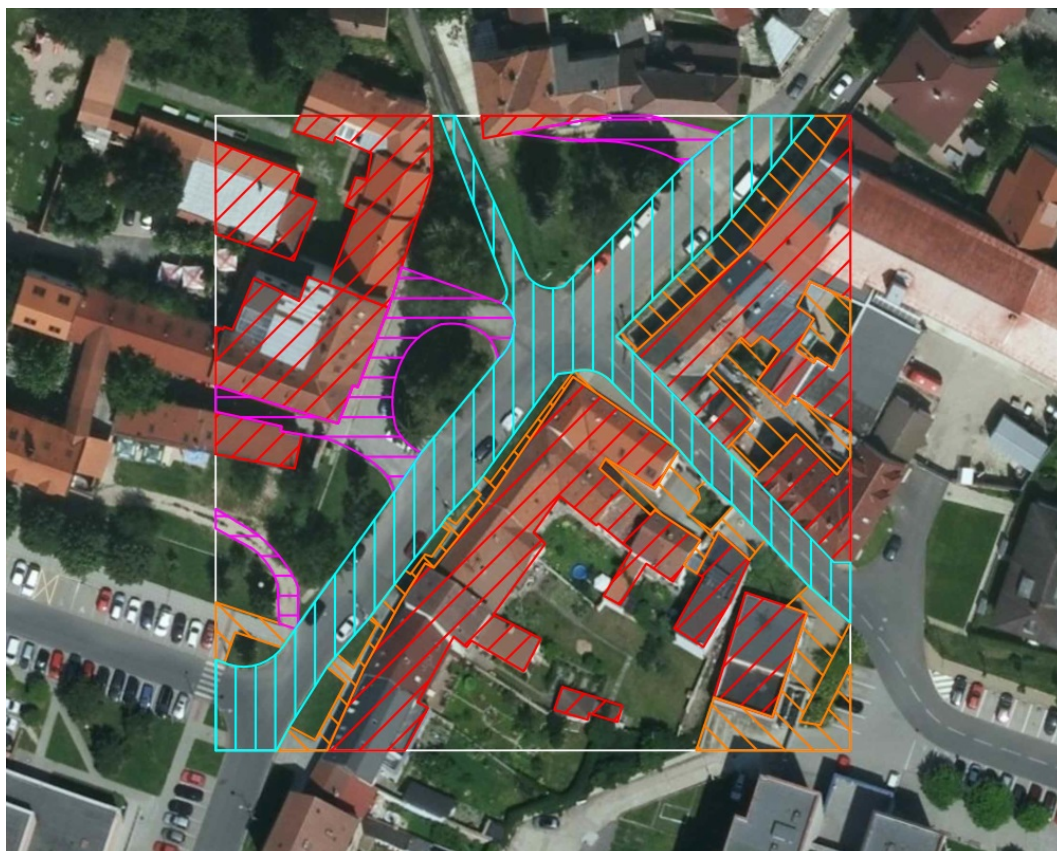
Vzorový hektar - rodinné domy








- zatravněné plochy
- střechy
- asfaltové, betonové plochy,
dlažby se zálivkou spár
- dlažby s pískovými spárami

povrch	A [ha]	ψ [-]	N_{imperv} [$\text{m}^{1/6}$]	N_{perv} [$\text{m}^{1/6}$]
zatravněné plochy	0,533	0,1		0,150
střechy	0,209	1,0	0,015	
asfaltové, betonové plochy, dlažby se zálivkou spár	0,078	0,8	0,011	
dlažby s pískovými spárami	0,180	0,6	0,024	
vážený průměr		0,433	0,018	0,150

Vzorový hektar - centrum města

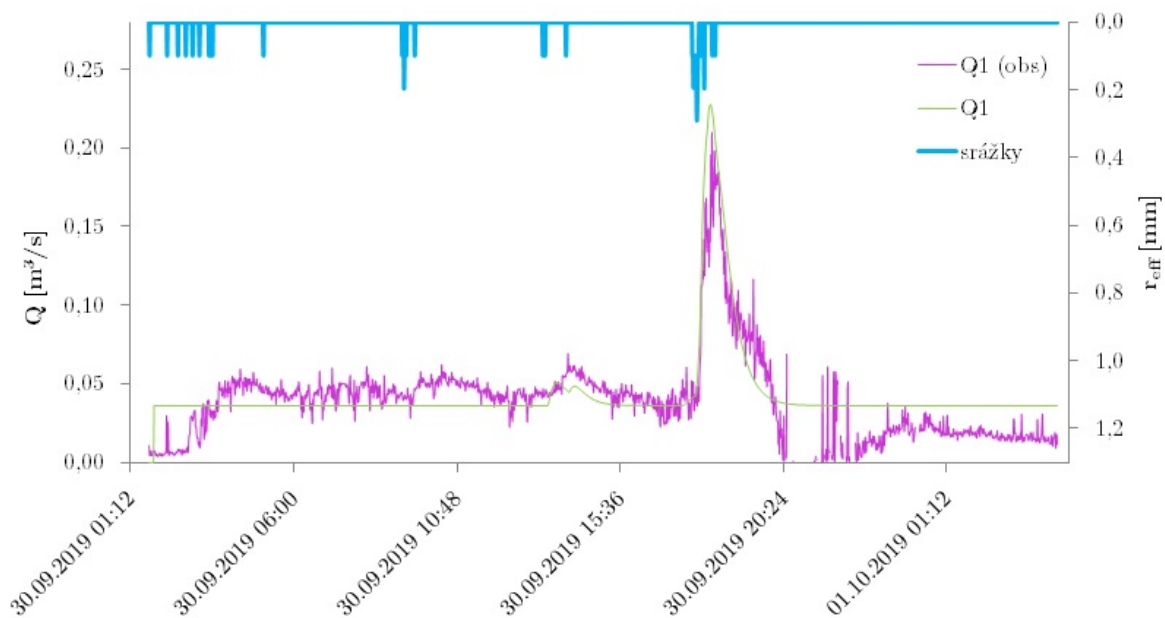


	zatravněné plochy		dlažby s pískovými spárami
	střechy		upravené štěrkové plochy
	asfaltové, betonové plochy, dlažby se zálivkou spár		

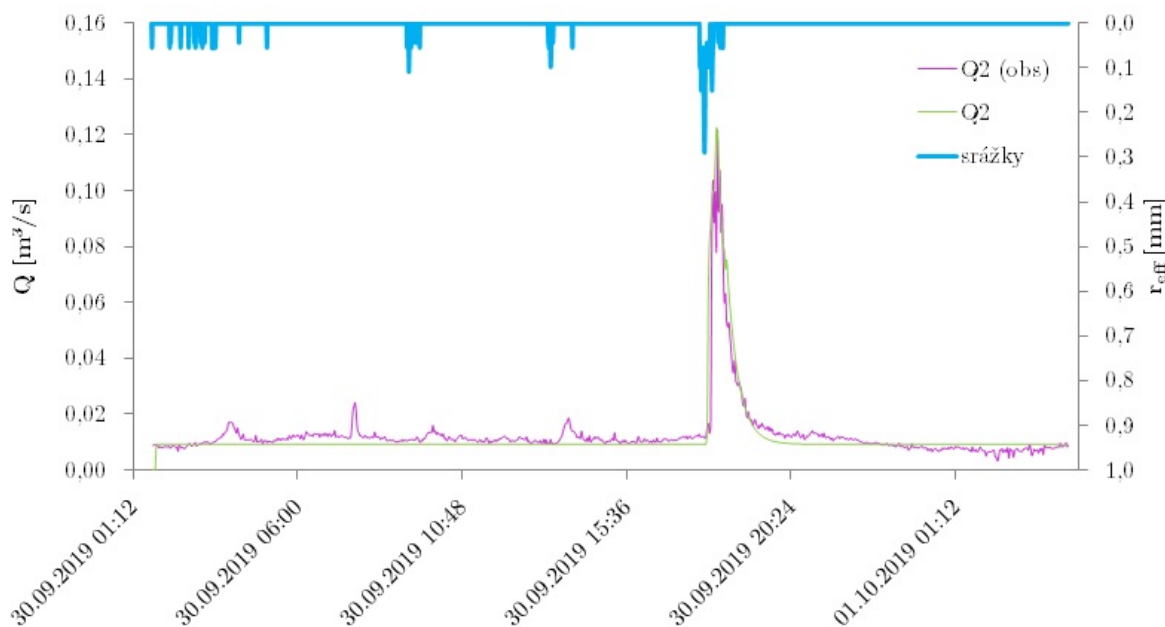
povrch	A [ha]	ψ [-]	N_{imperv} [$\text{m}^{1/6}$]	N_{perv} [$\text{m}^{1/6}$]
zatravněné plochy	0,327	0,1		0,150
střechy	0,330	1,0	0,015	
asfaltové, betonové plochy, dlažby se zálivkou spár	0,174	0,8	0,011	
dlažby s pískovými spárami	0,115	0,6	0,024	
upravené štěrkové plochy	0,054	0,4		0,020
vážený průměr		0,592	0,016	0,131

12.5. Výsledky kalibrace hrubě schematizovaného modelu

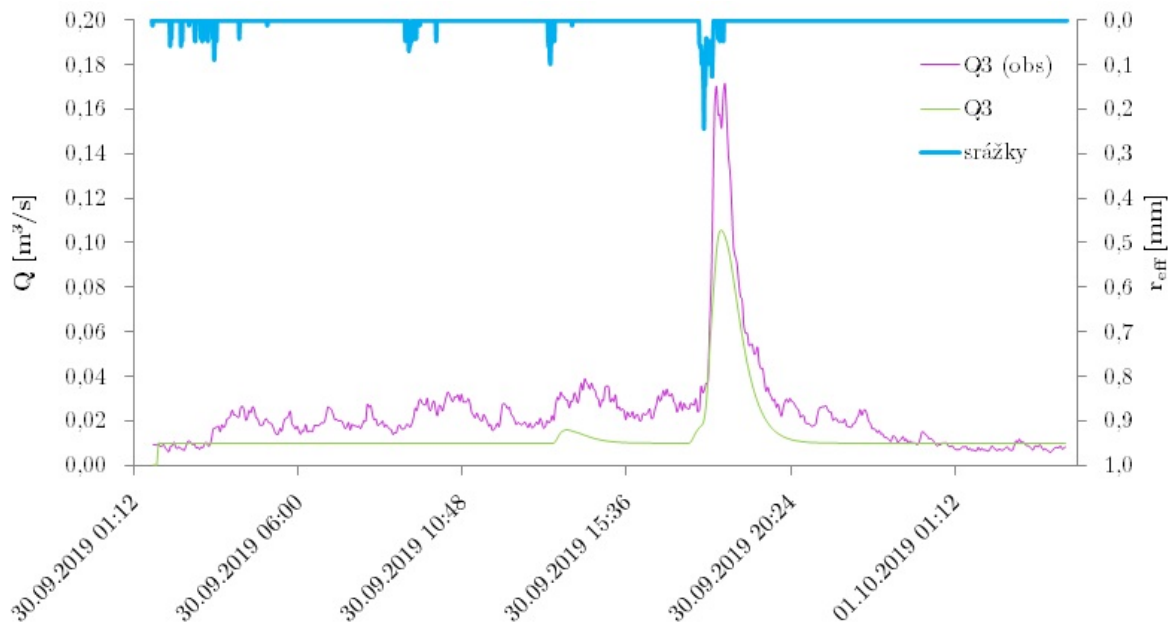
Kalibrační událost 30. 9. 2019



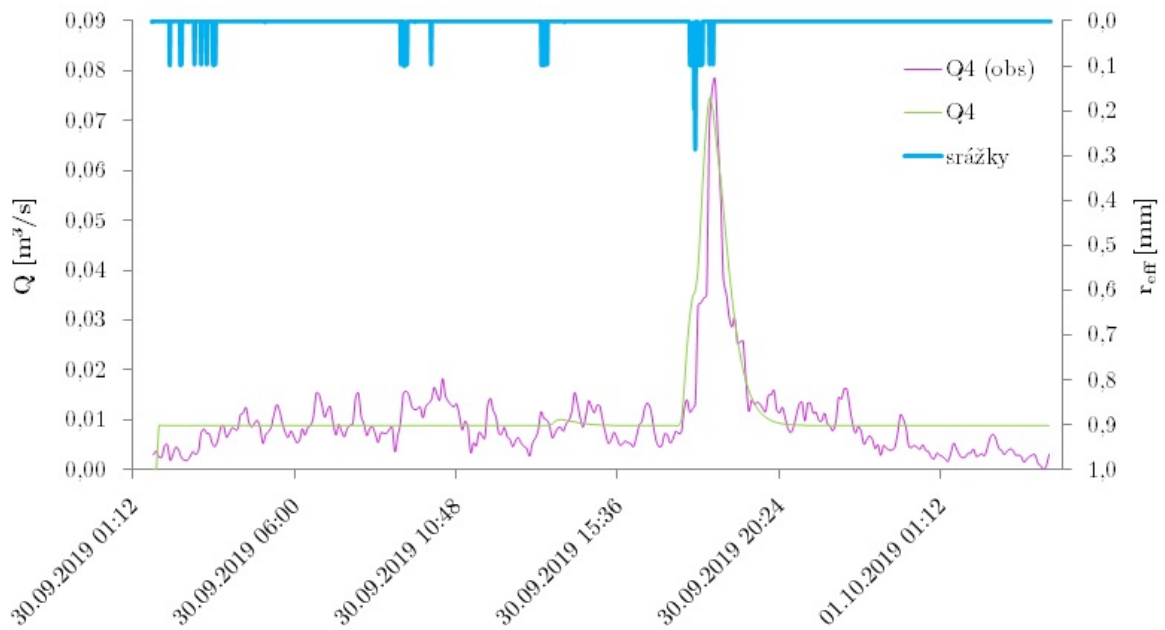
Obrázek 64: Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 30. 9. 2019



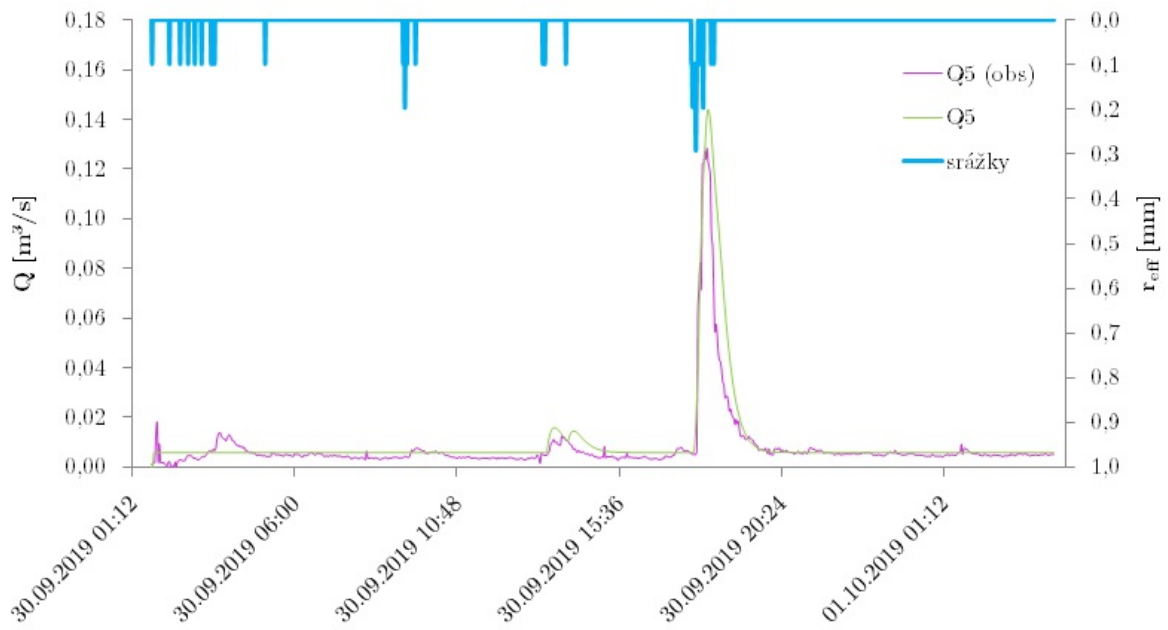
Obrázek 65: Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 30. 9. 2019



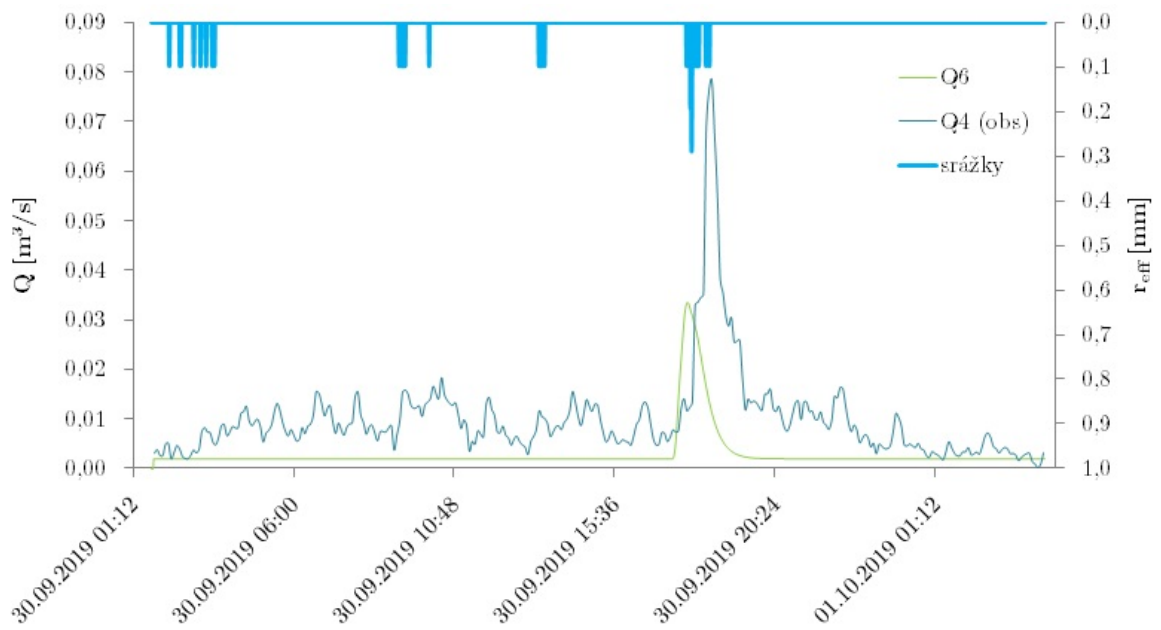
Obrázek 66: Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 30. 9. 2019



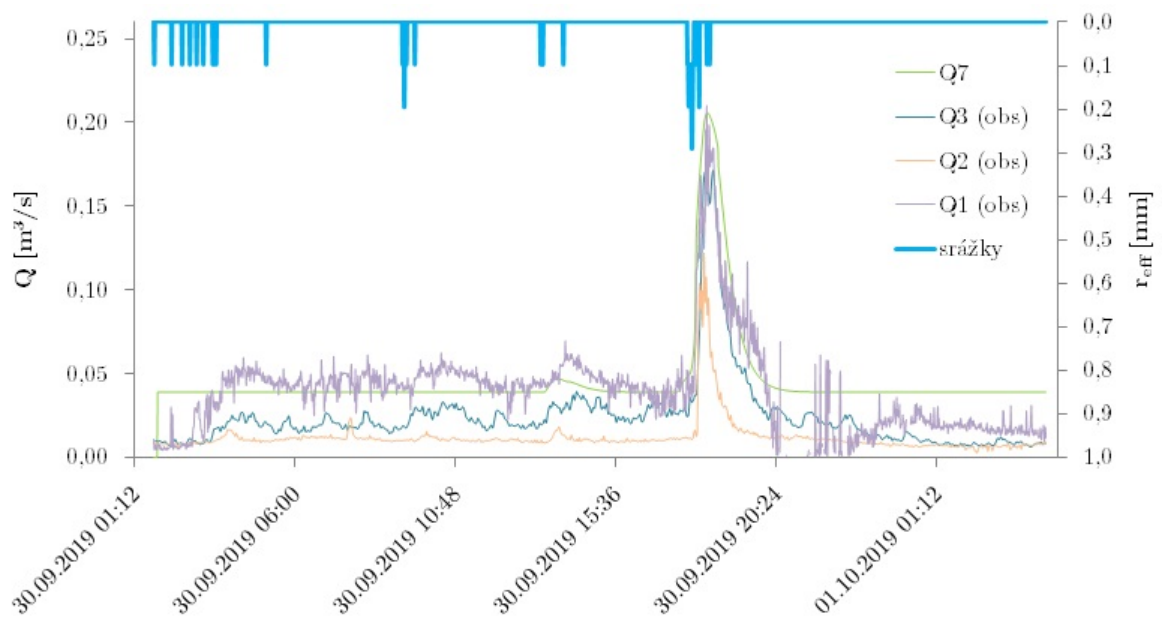
Obrázek 67: Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 30. 9. 2019



Obrázek 68: Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 30. 9. 2019

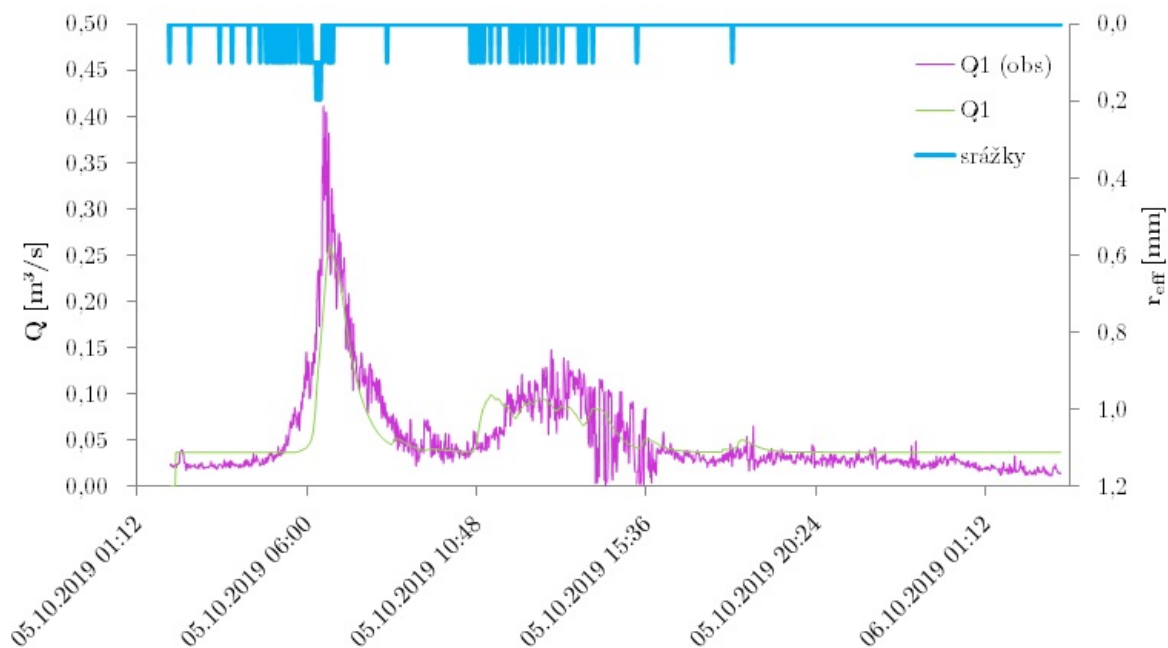


Obrázek 69: Průběh průtoku na profilu Q6 - kalibrační událost 30. 9. 2019

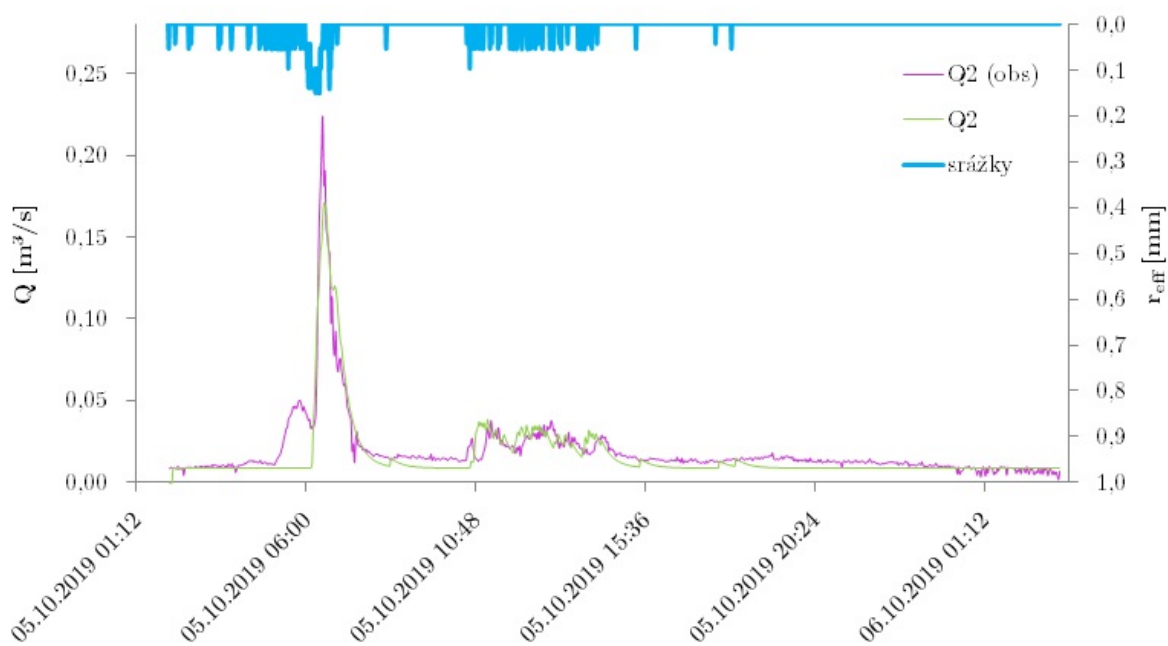


Obrázek 70: Průběh průtoku na profilu Q7 - kalibrační událost 30. 9. 2019

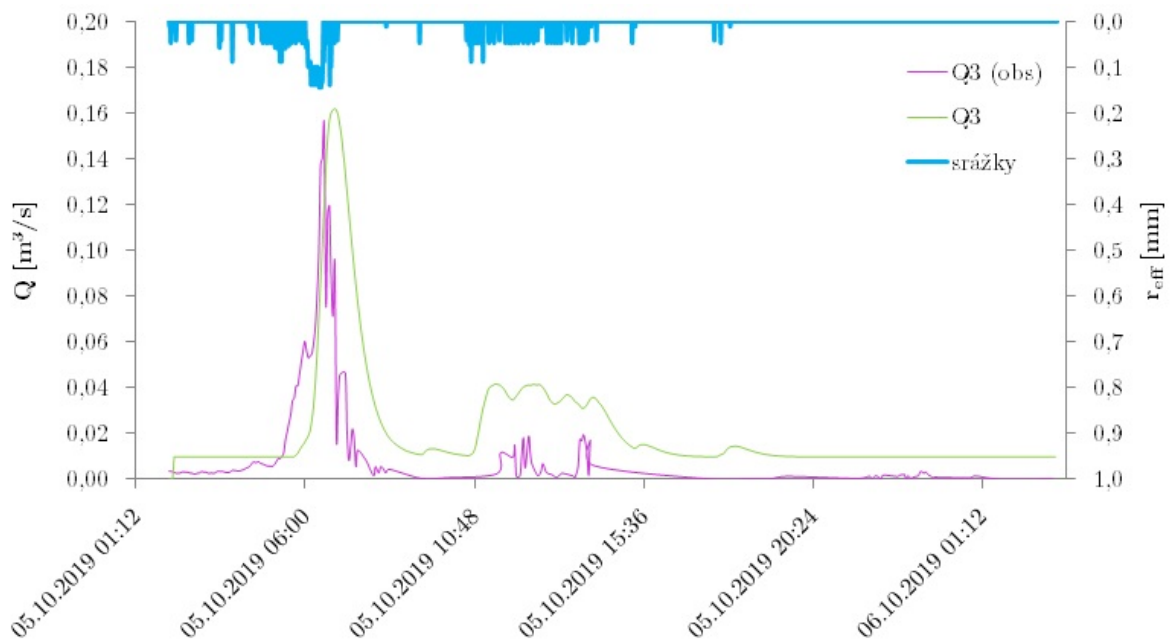
Kalibrační událost 5. 10. 2019



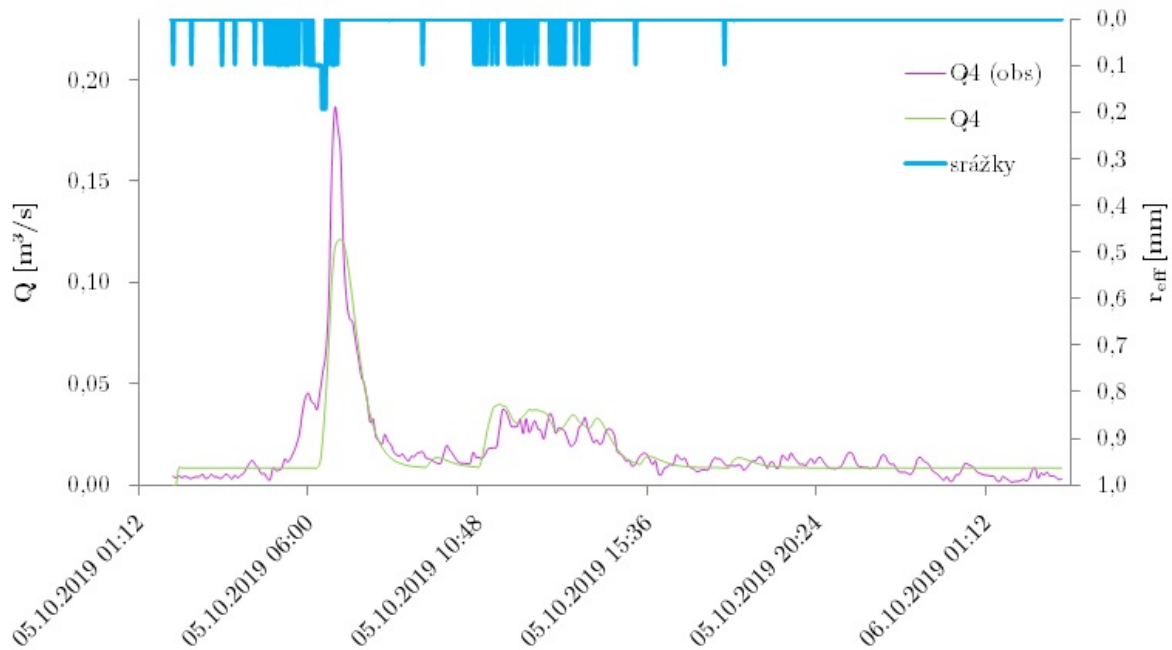
Obrázek 71: Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 5. 10. 2019



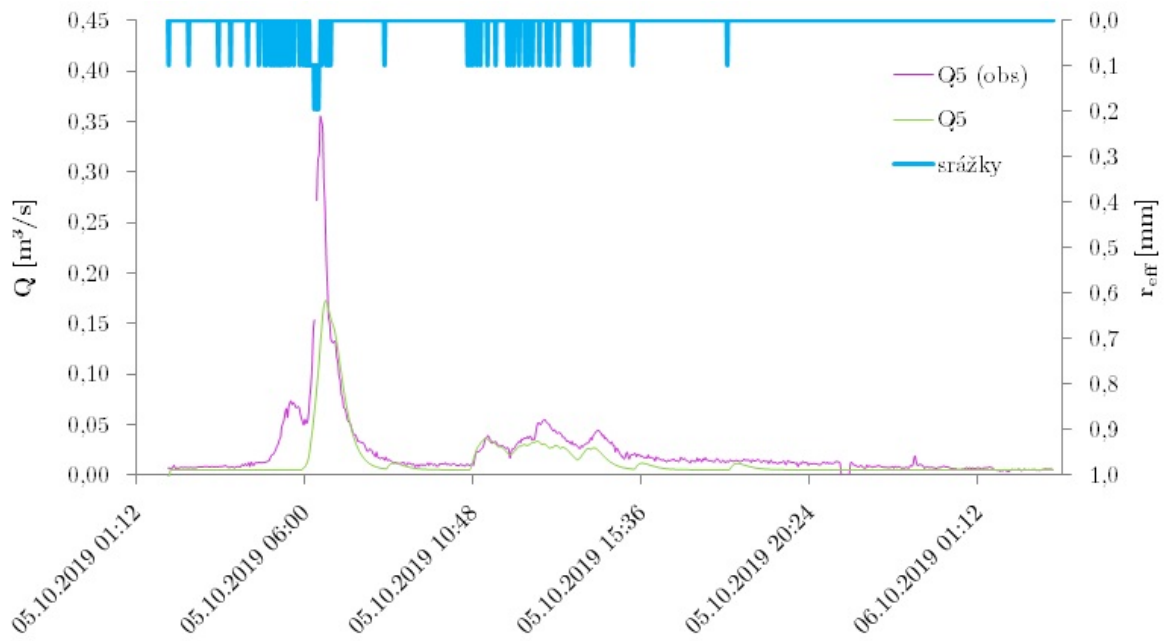
Obrázek 72: Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 5. 10. 2019



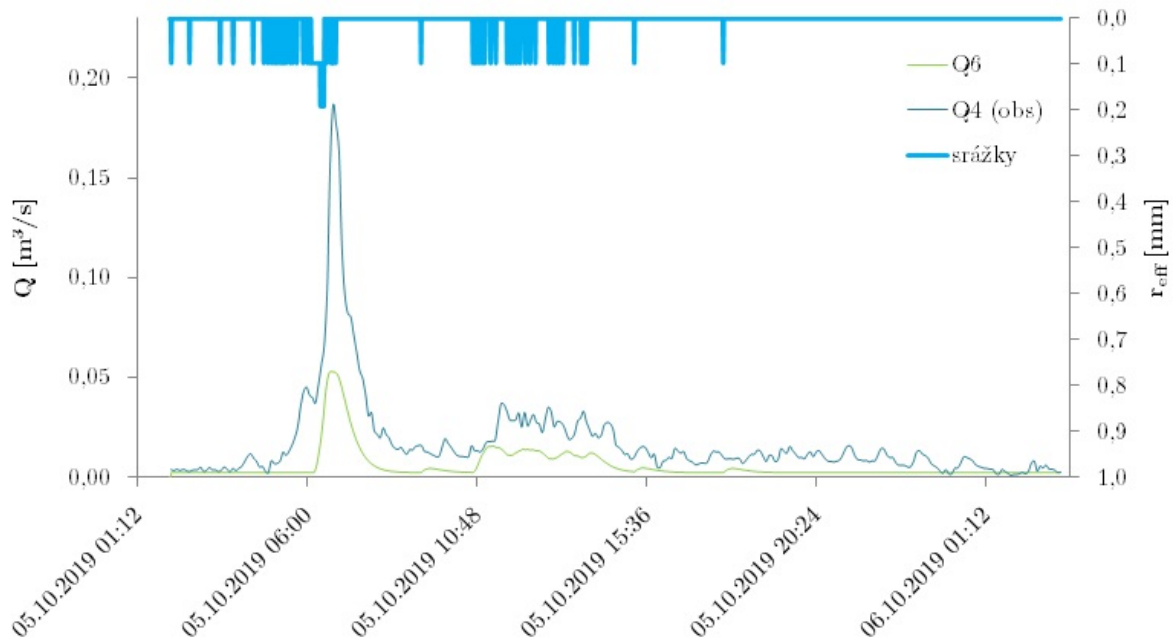
Obrázek 73: Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 5. 10. 2019



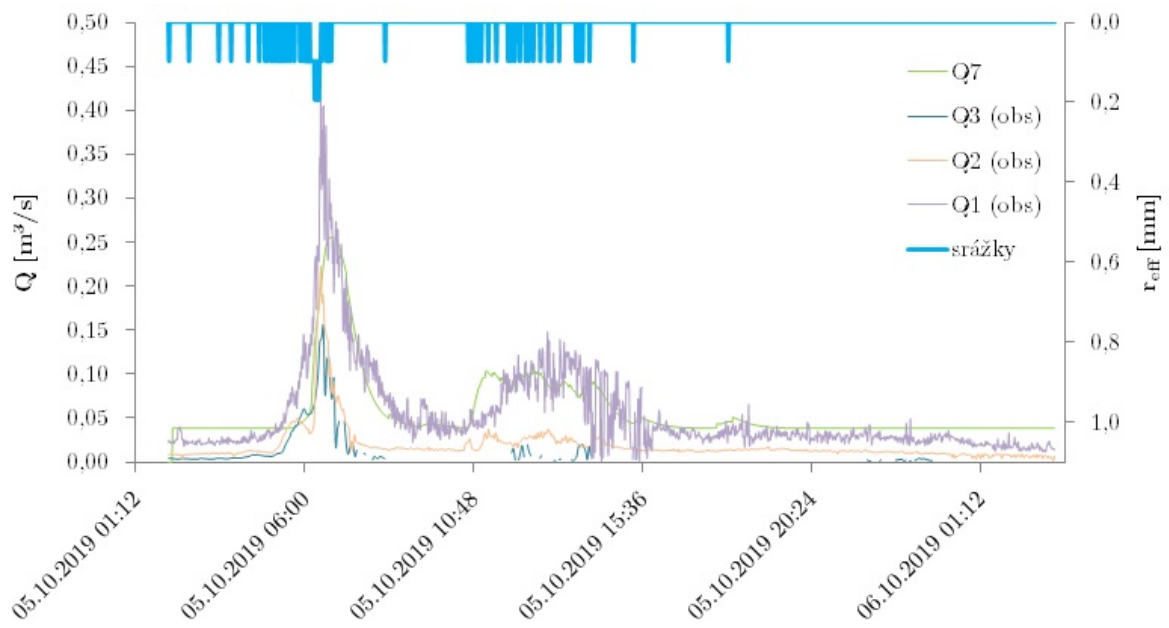
Obrázek 74: Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 5. 10. 2019



Obrázek 75: Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 5. 10. 2019

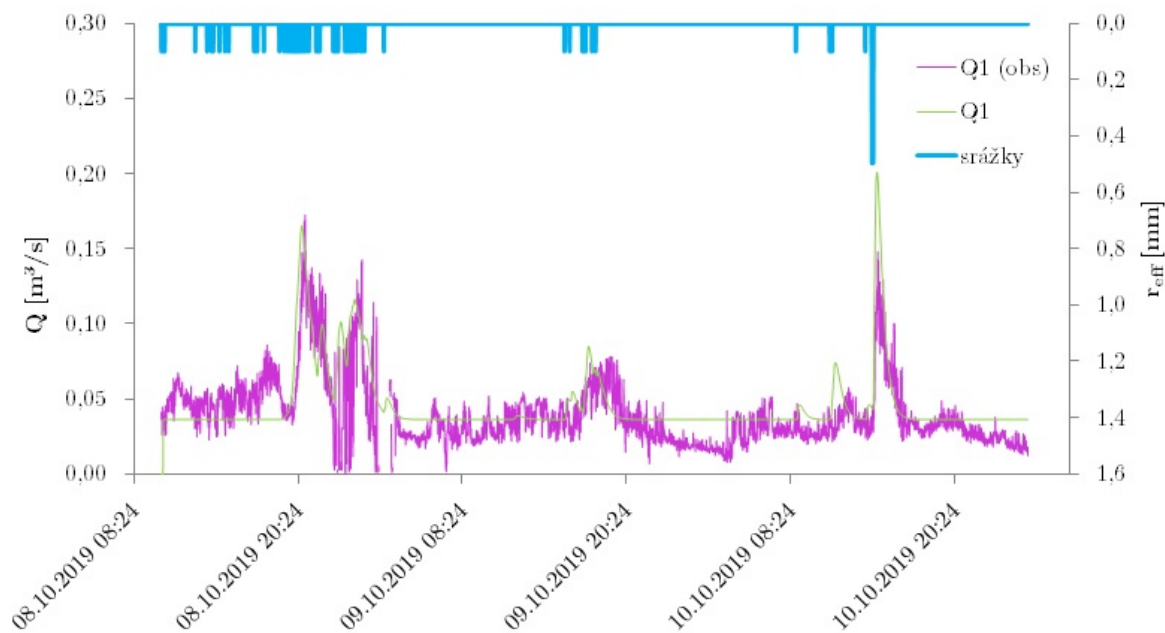


Obrázek 76: Průběh průtoku na profilu Q6 - kalibrační událost 5. 10. 2019

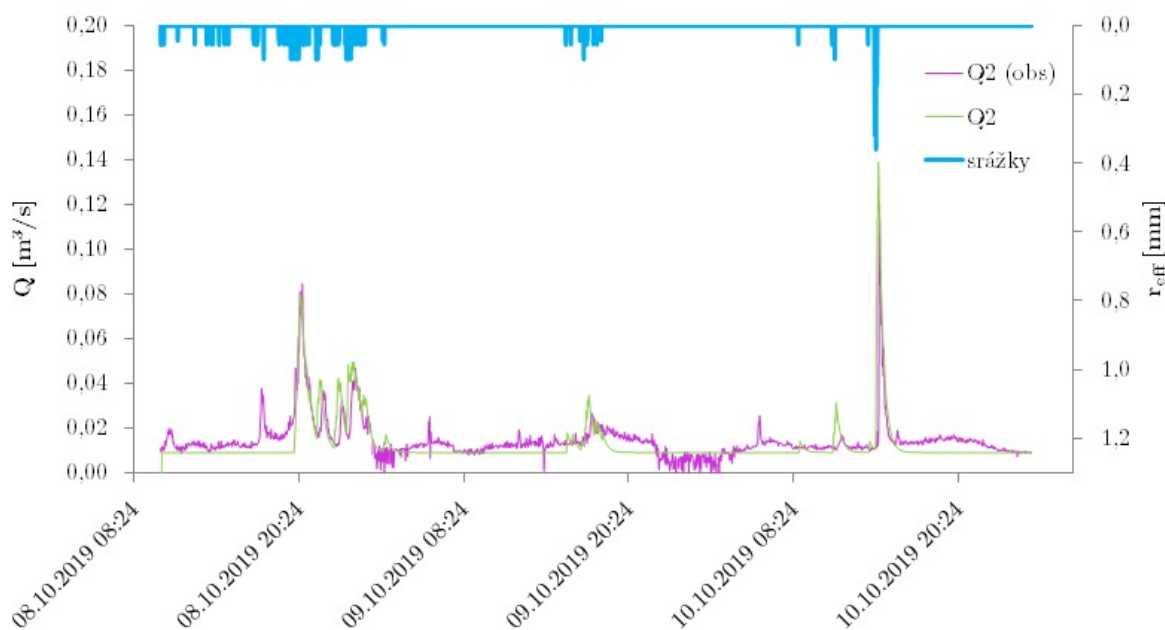


Obrázek 77: Průběh průtoku na profilu Q7 - kalibrační událost 5. 10. 2019

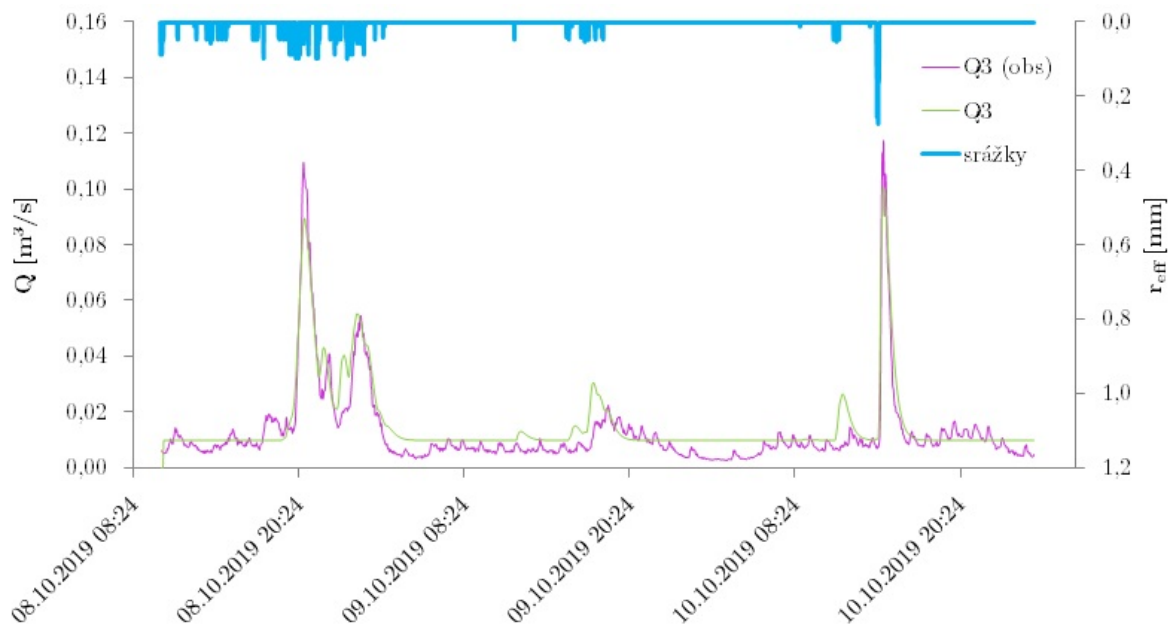
Kalibrační událost 8. 10. 2019



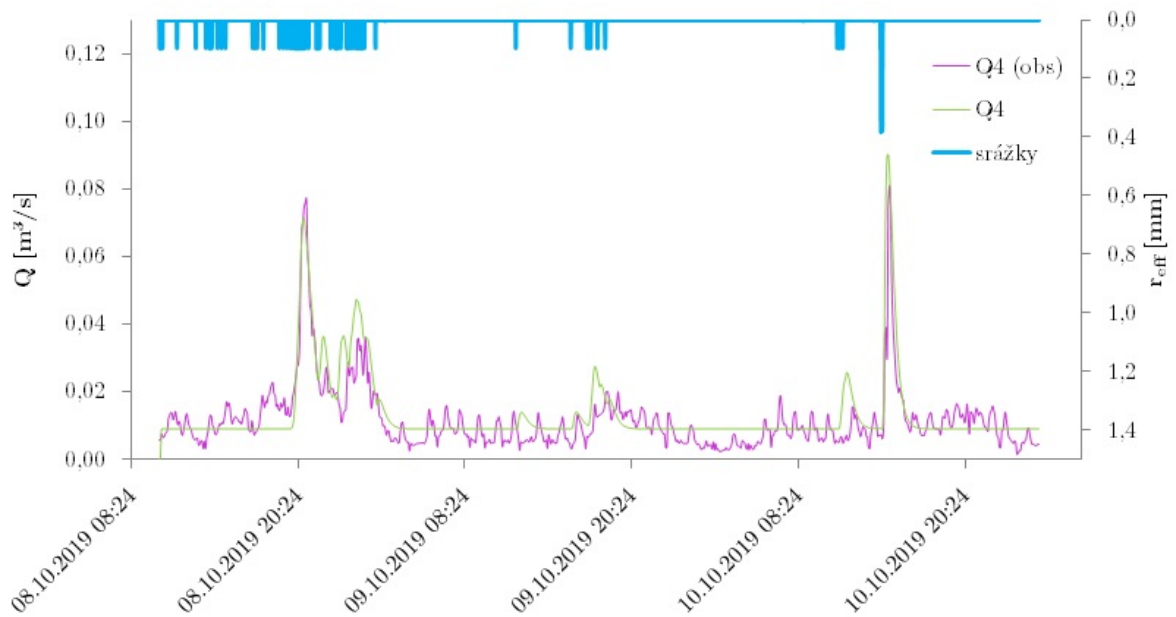
Obrázek 78: Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 8. 10. 2019



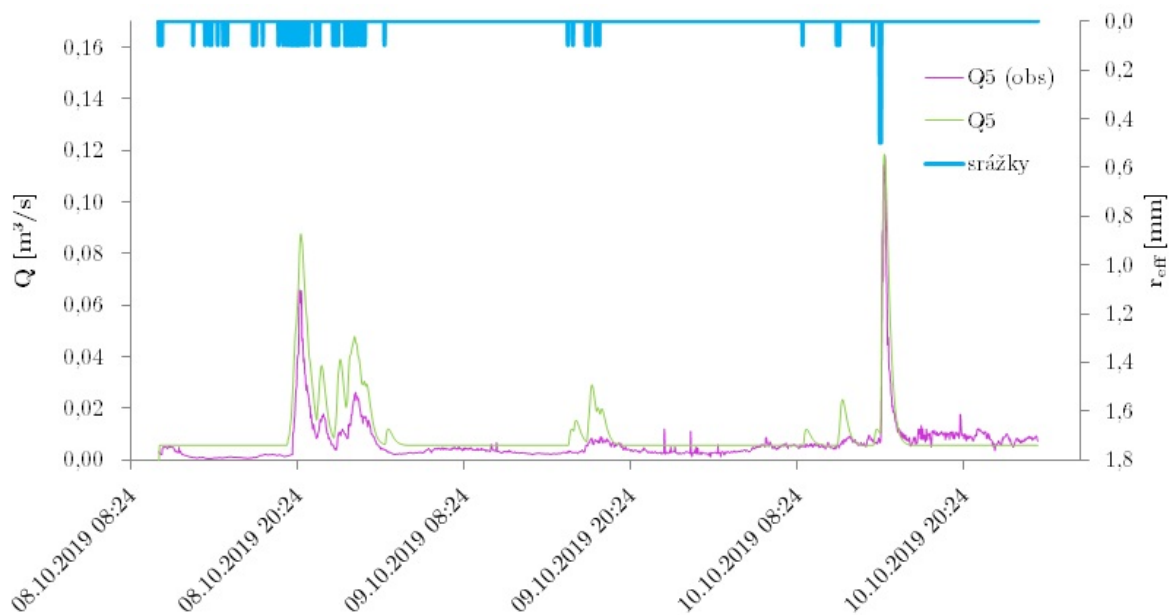
Obrázek 79: Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 8. 10. 2019



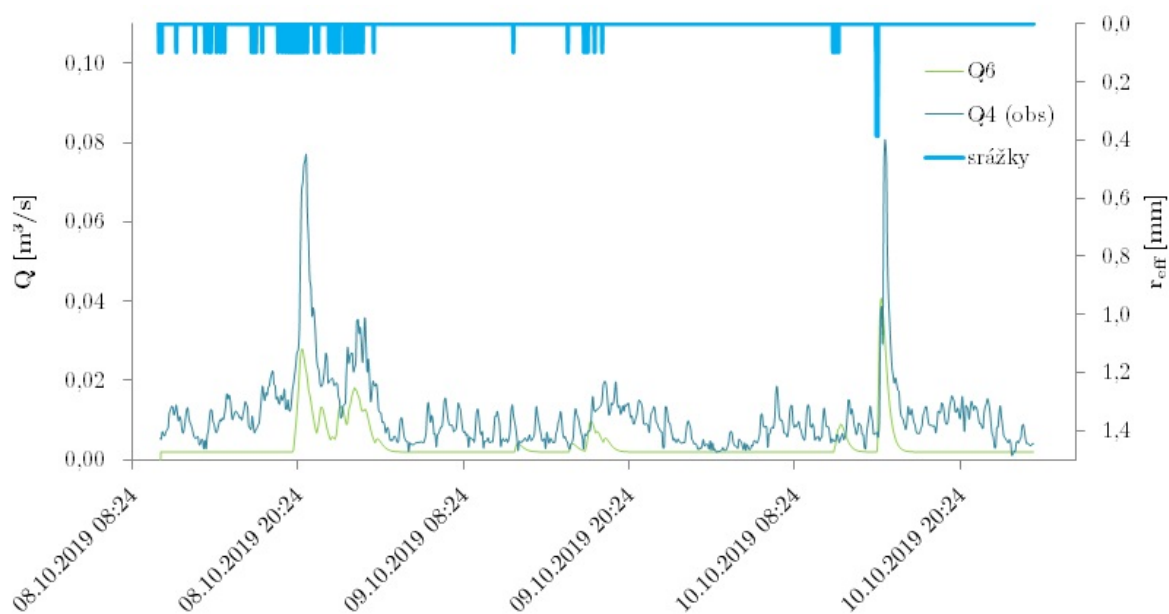
Obrázek 80: Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 8. 10. 2019



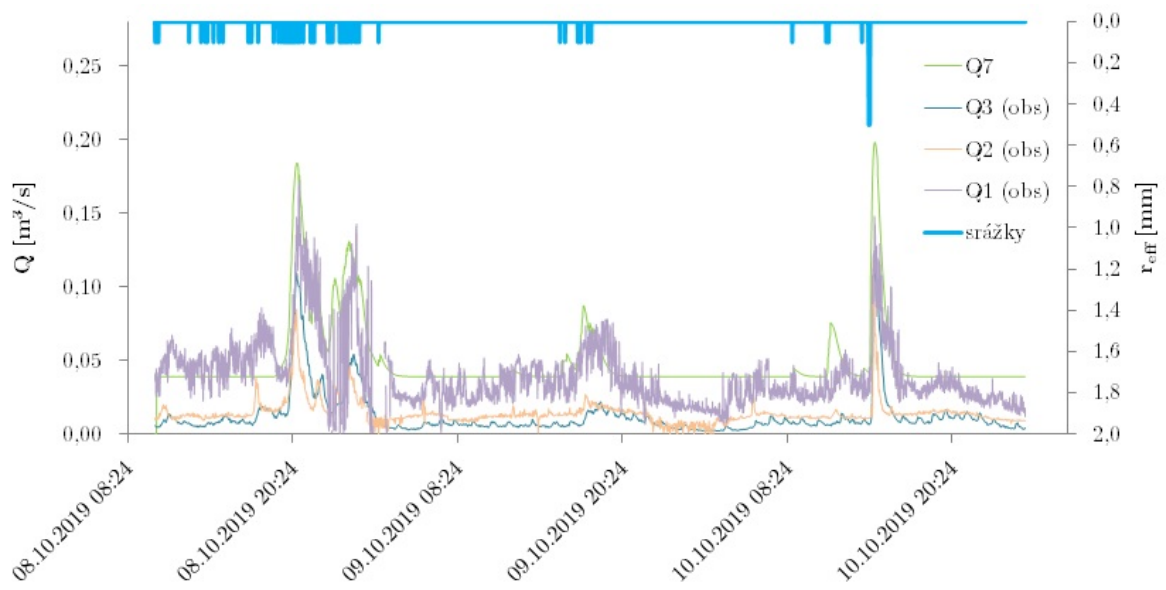
Obrázek 81: Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 8. 10. 2019



Obrázek 82: Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 8. 10. 2019



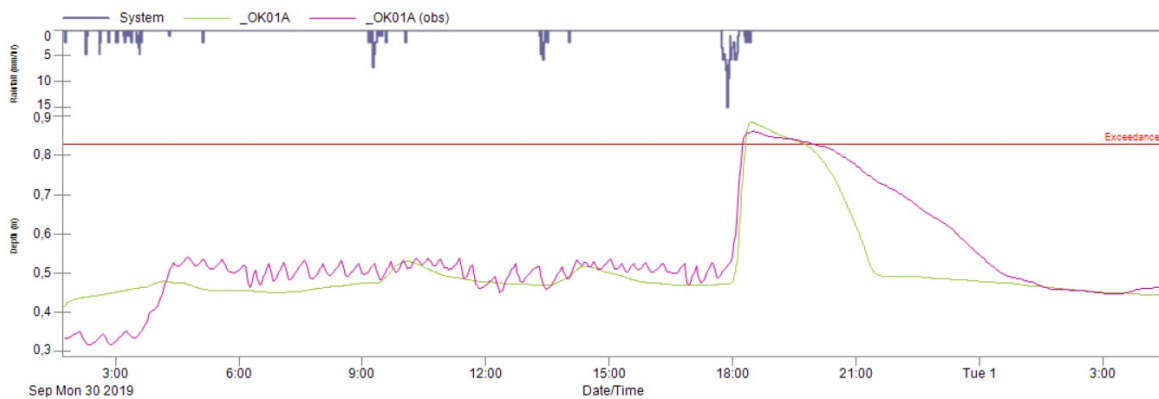
Obrázek 83: Průběh průtoku na profilu Q6 - kalibrační událost 8. 10. 2019



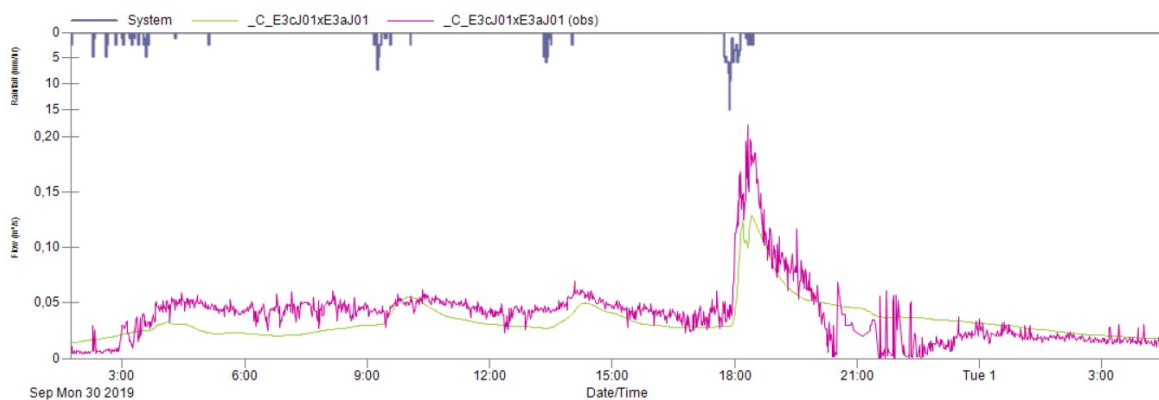
Obrázek 84: Průběh průtoku na profilu Q7 - kalibrační událost 8. 10. 2019

12.6. Výsledky kalibrace podrobně schematizovaného modelu

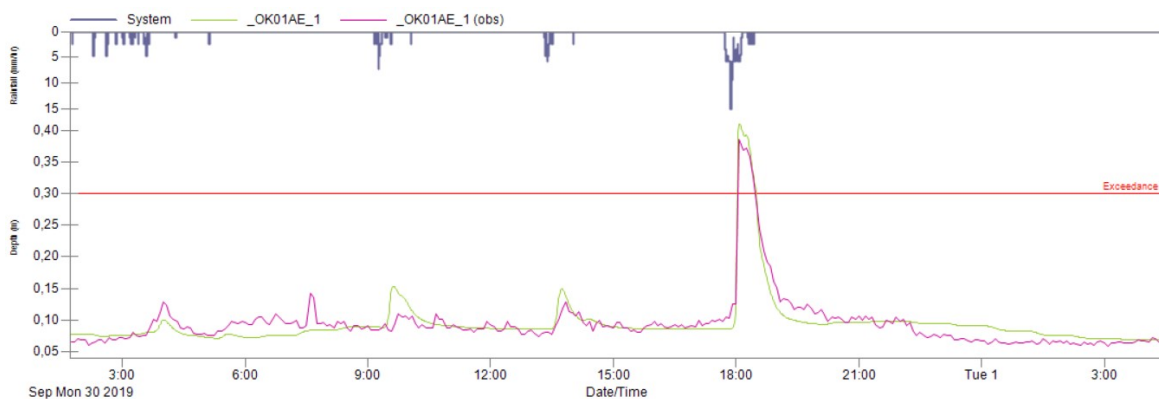
Kalibrační událost 30. 9. 2019



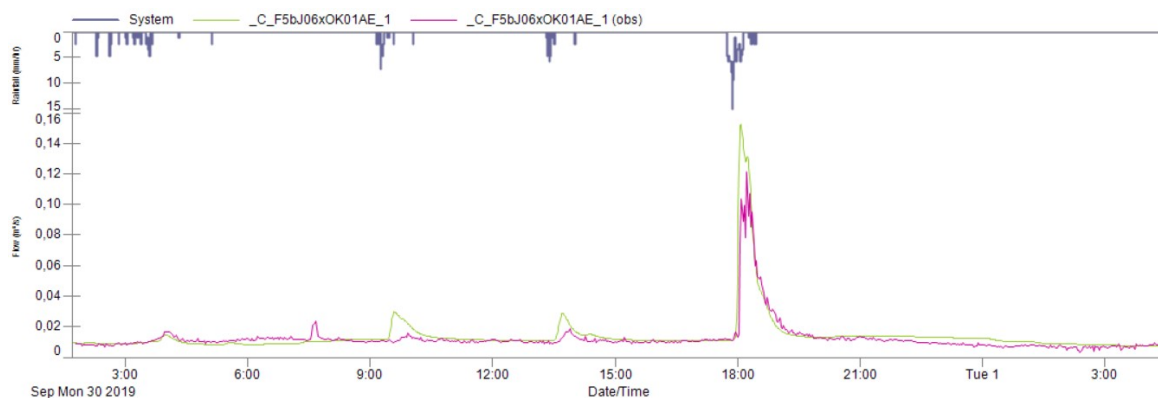
Obrázek 85: Průběh hladiny na profilu H1 - kalibrační událost 30. 9. 2019



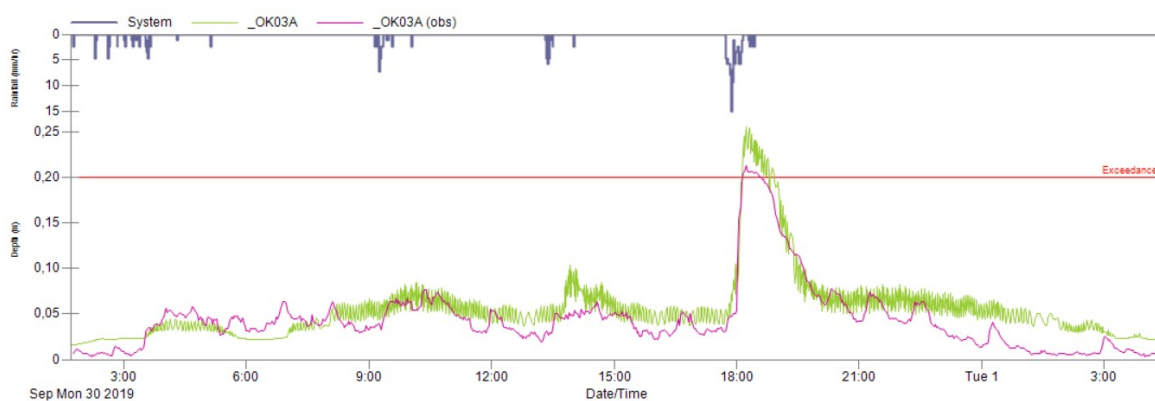
Obrázek 86: Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 30. 9. 2019



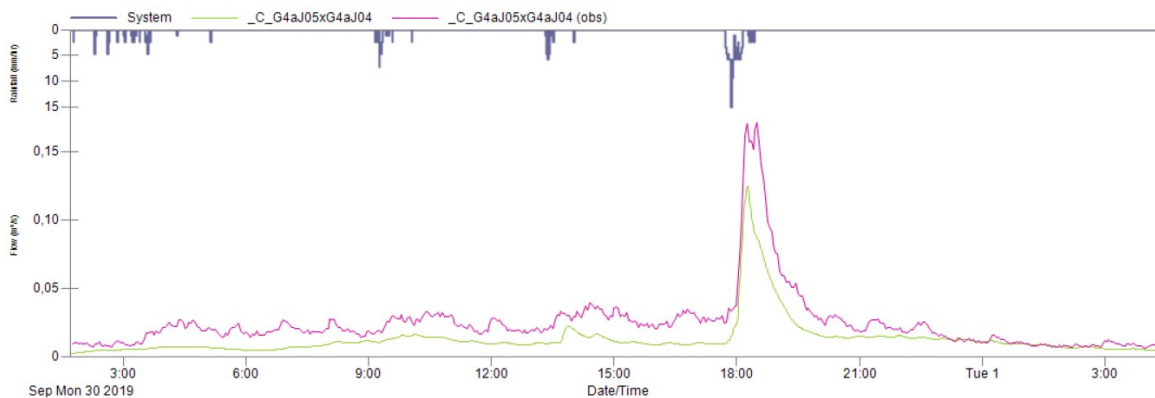
Obrázek 87: Průběh hladiny na profilu H2a - kalibrační událost 30. 9. 2019



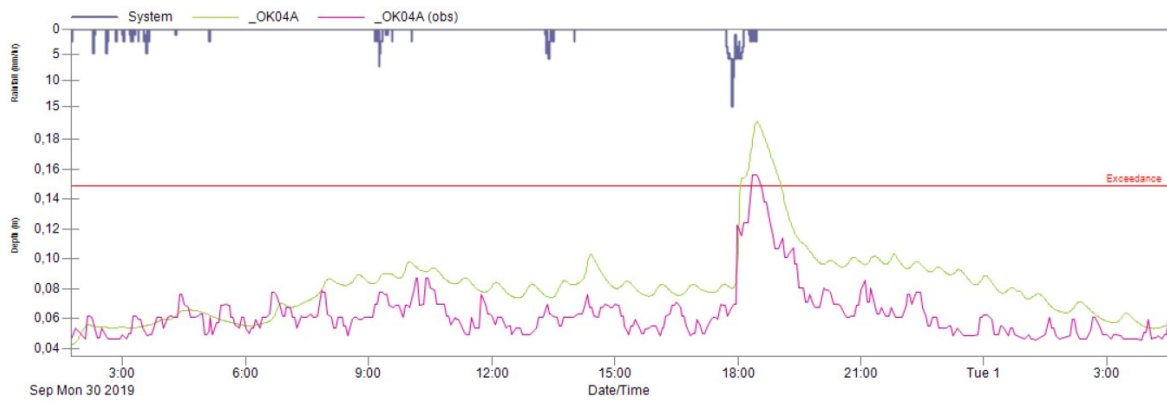
Obrázek 88: Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 30. 9. 2019



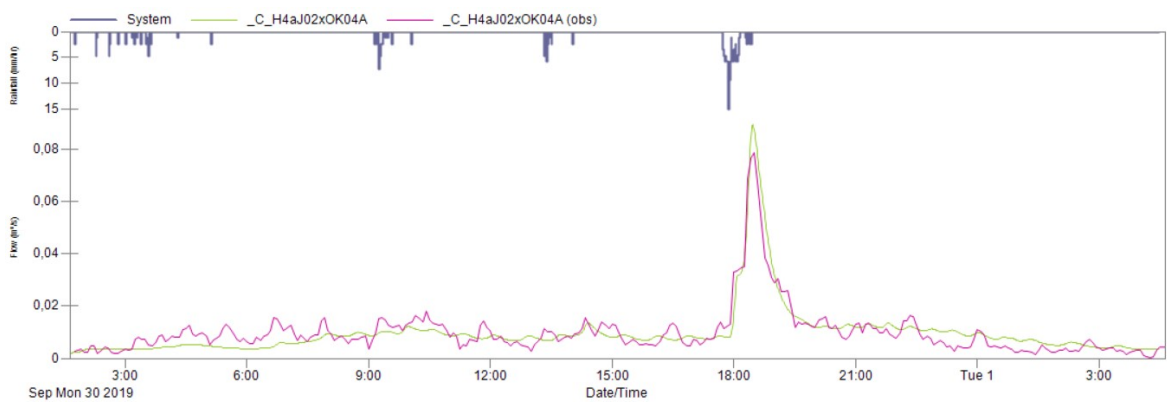
Obrázek 89: Průběh hladiny na profilu H3 - kalibrační událost 30. 9. 2019



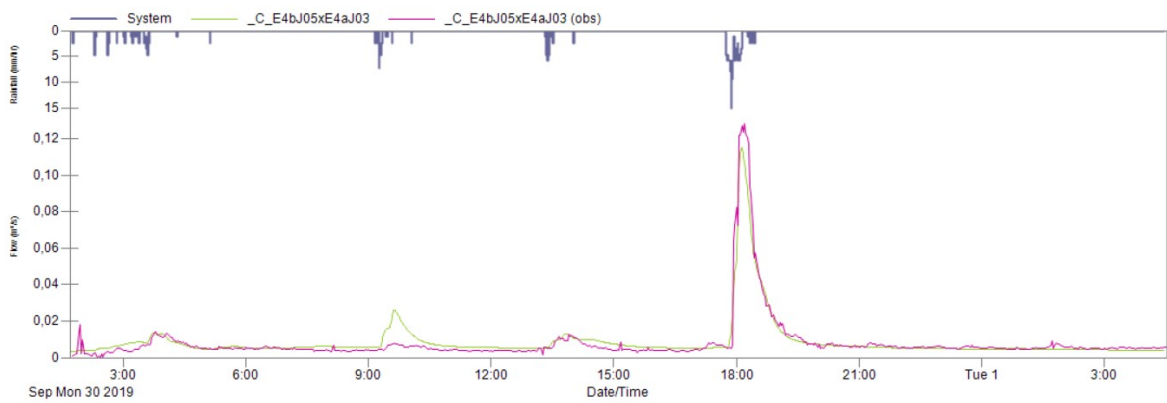
Obrázek 90: Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 30. 9. 2019



Obrázek 91: Průběh hladiny na profilu H4 - kalibrační událost 30. 9. 2019

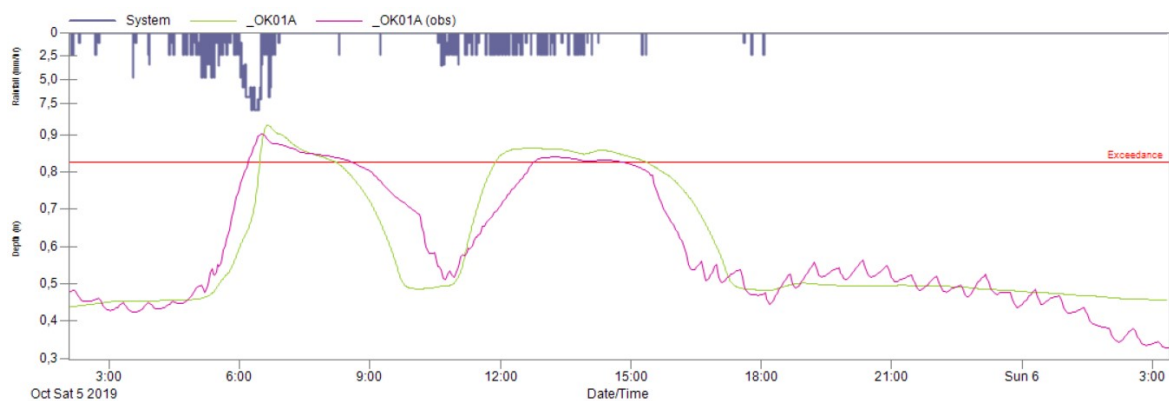


Obrázek 92: Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 30. 9. 2019

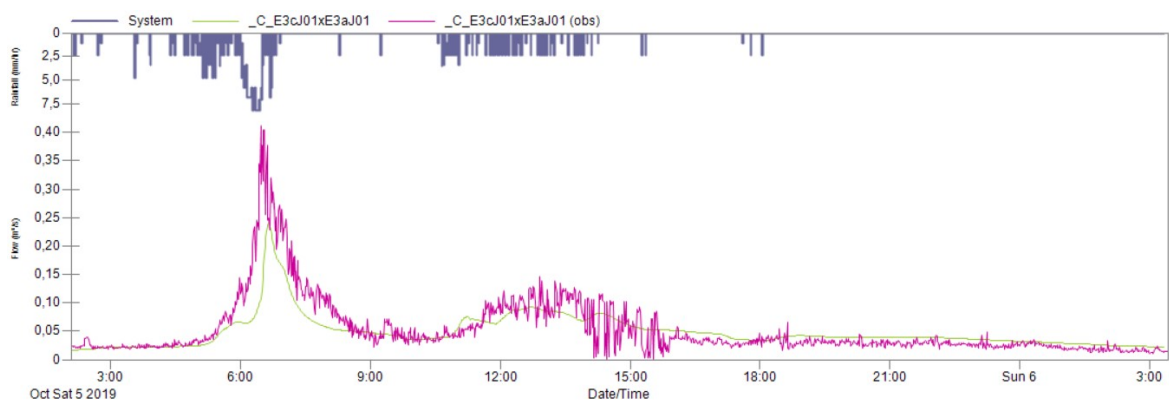


Obrázek 93: Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 30. 9. 2019

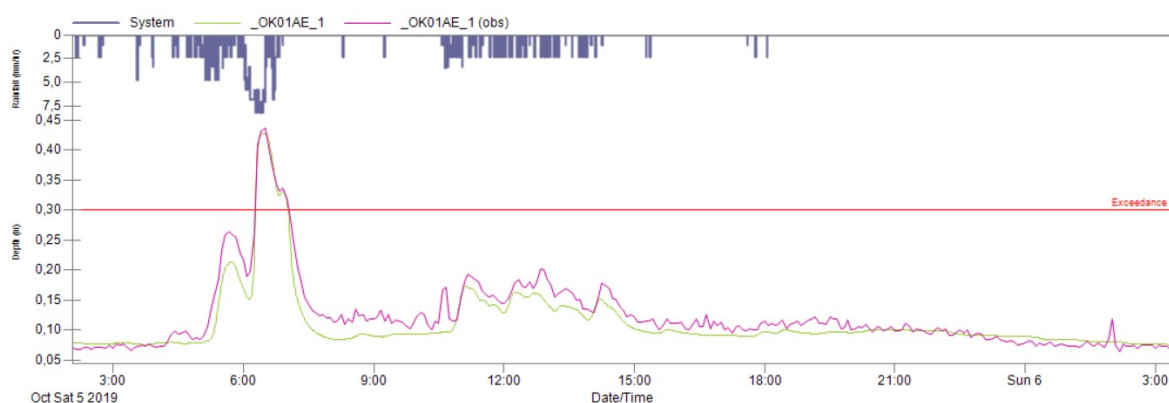
Kalibrační událost 5. 10. 2019



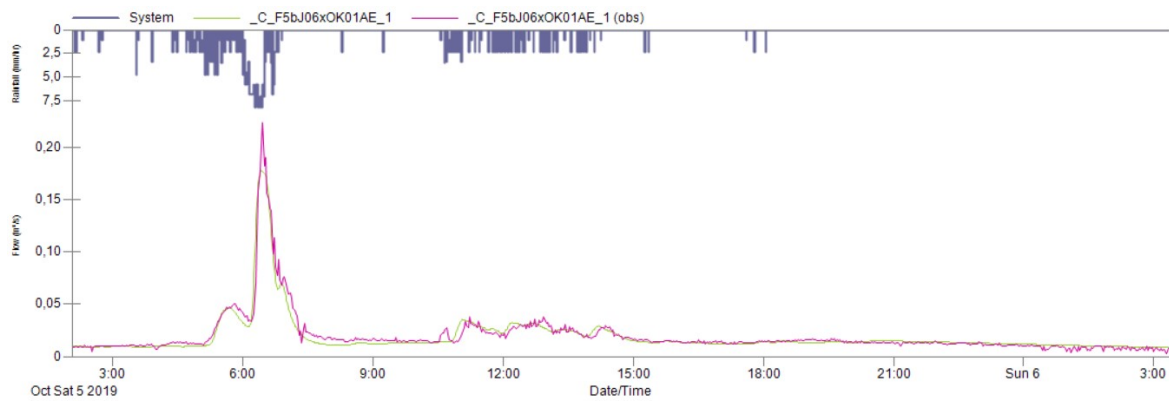
Obrázek 94: Průběh hladiny na profilu H1 - kalibrační událost 5. 10. 2019



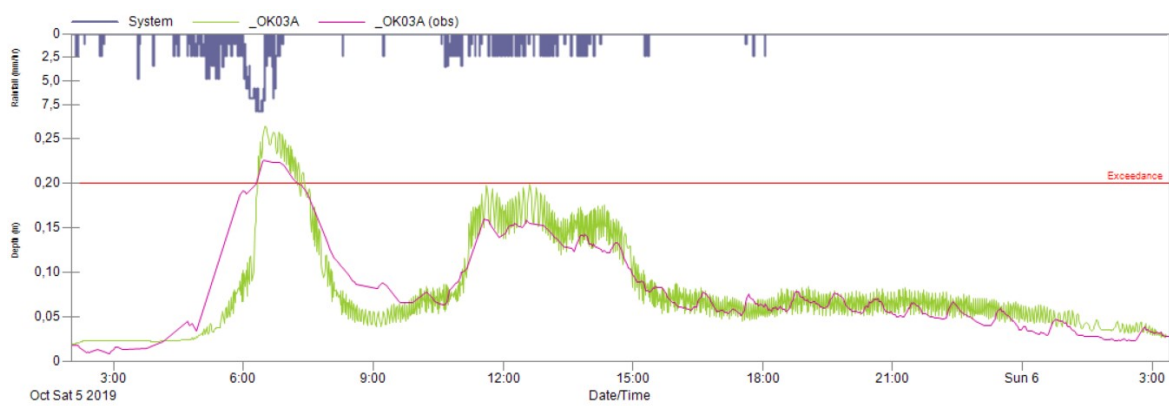
Obrázek 95: Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 5. 10. 2019



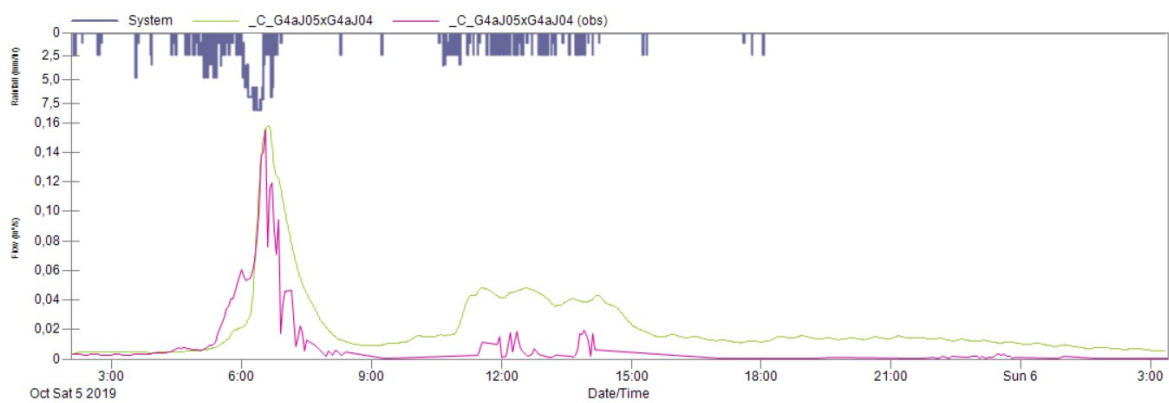
Obrázek 96: Průběh hladiny na profilu H2a - kalibrační událost 5. 10. 2019



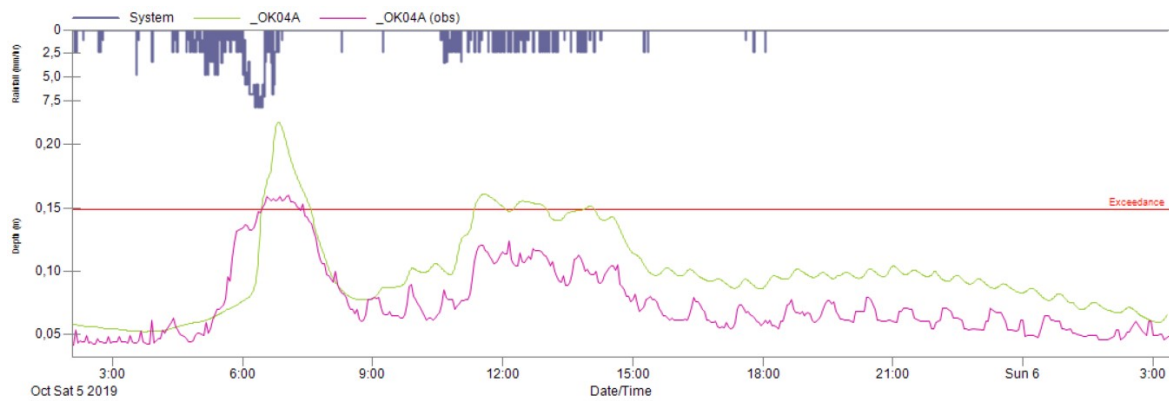
Obrázek 97: Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 5. 10. 2019



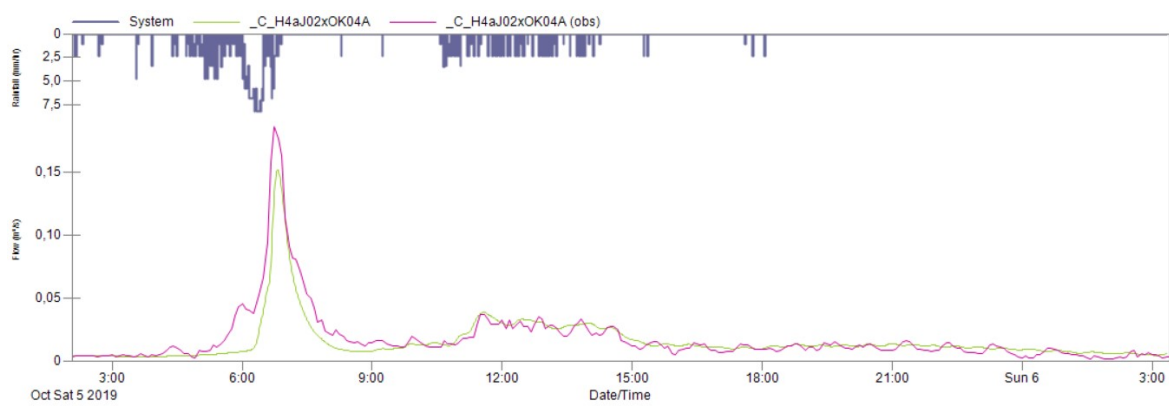
Obrázek 98: Průběh hladiny na profilu H3 - kalibrační událost 5. 10. 2019



Obrázek 99: Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 5. 10. 2019



Obrázek 100: Průběh hladiny na profilu H4 - kalibrační událost 5. 10. 2019

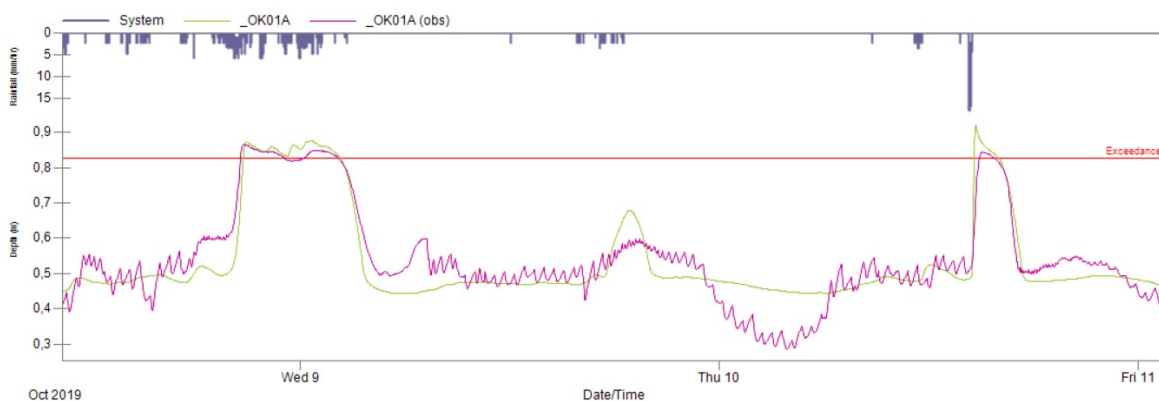


Obrázek 101: Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 5. 10. 2019

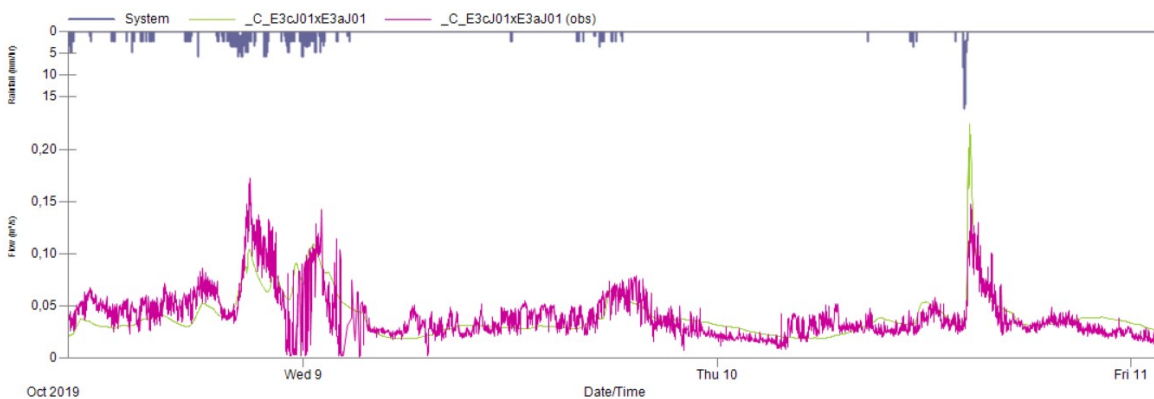


Obrázek 102: Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 5. 10. 2019

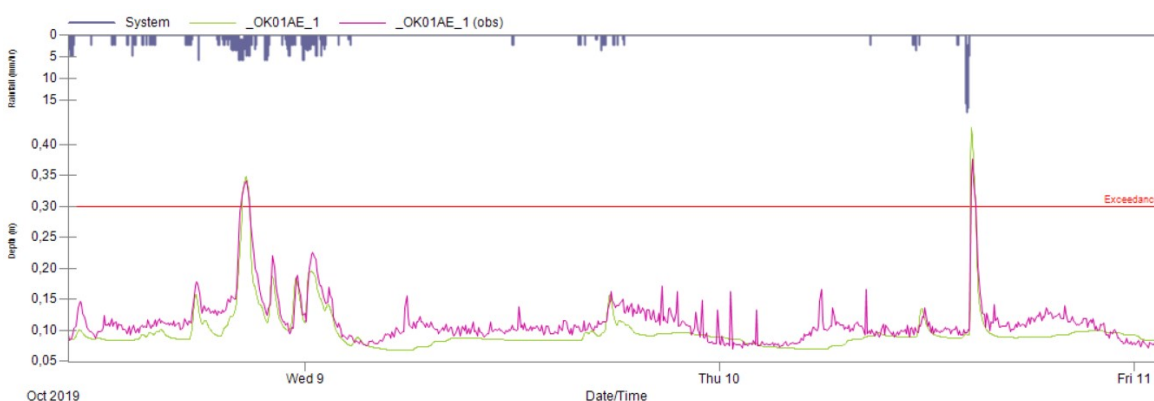
Kalibrační událost 8. 10. 2019



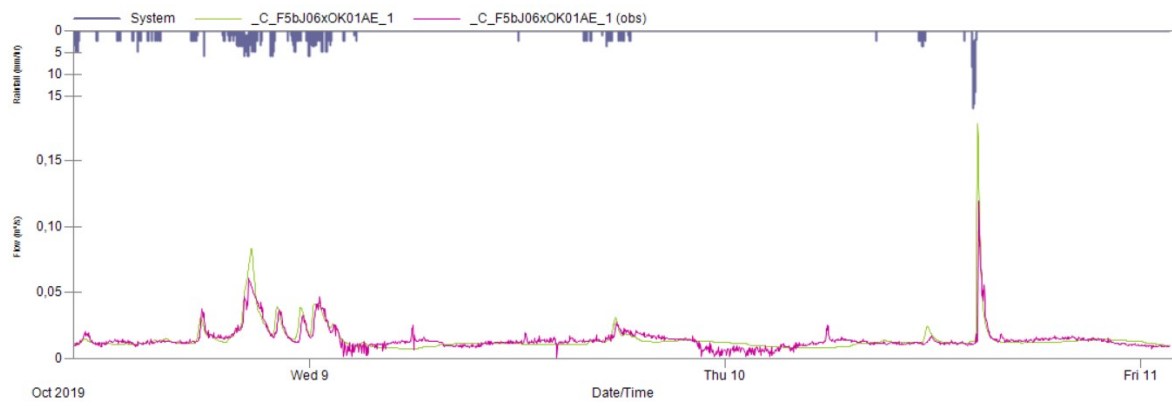
Obrázek 103: Průběh hladiny na profilu H1 - kalibrační událost 8. 10. 2019



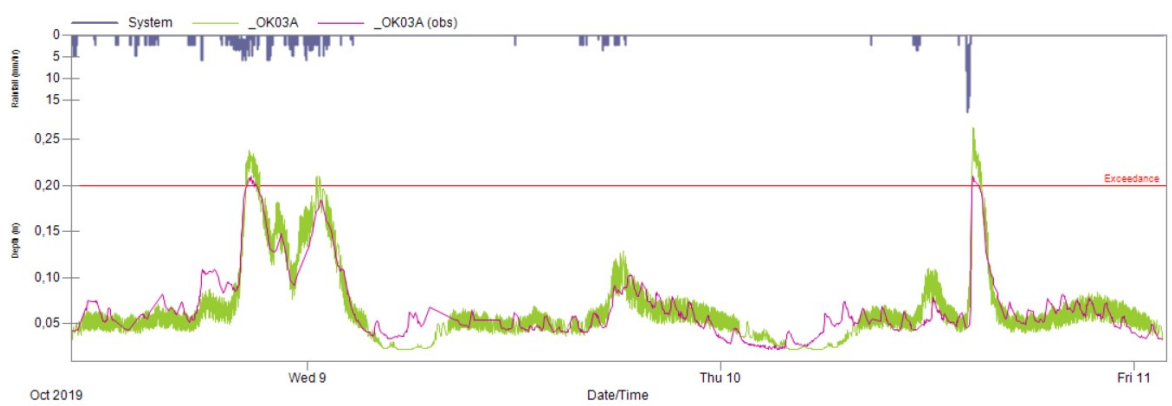
Obrázek 104: Průběh průtoku na profilu Q1 - kalibrační událost 8. 10. 2019



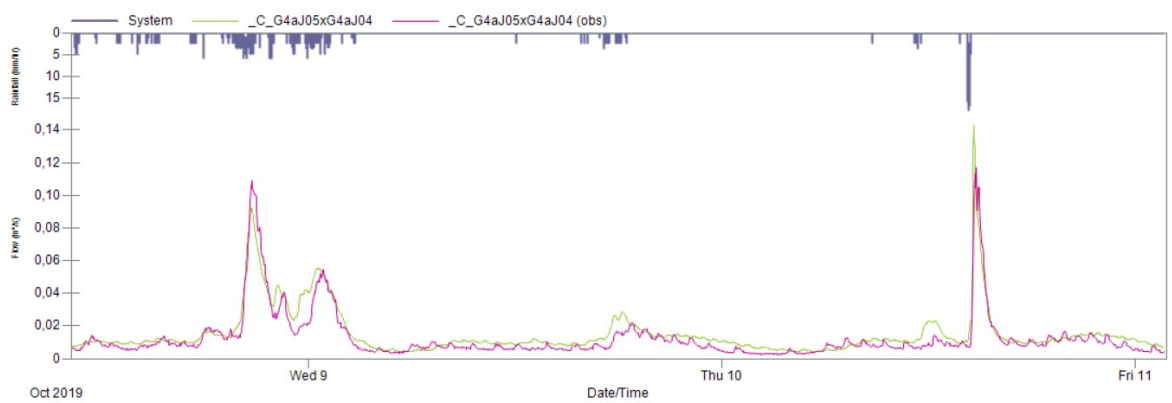
Obrázek 105: Průběh hladiny na profilu H2a - kalibrační událost 8. 10. 2019



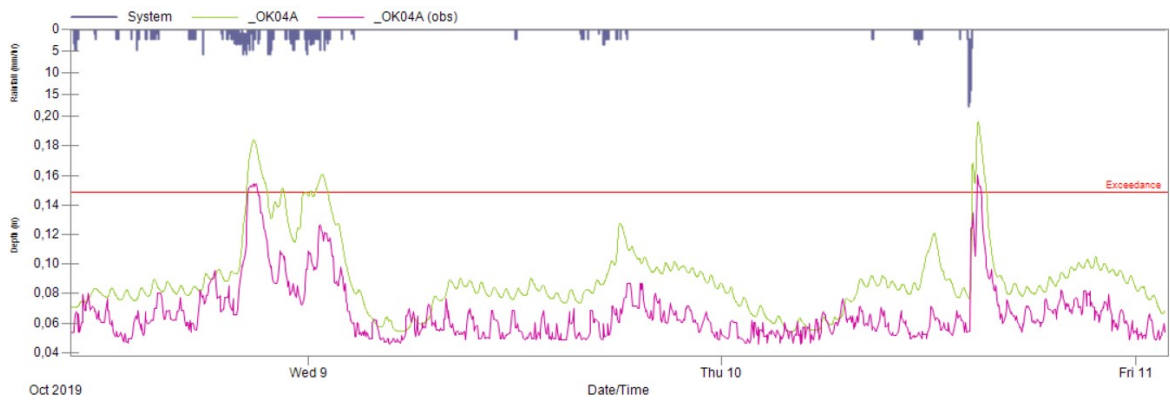
Obrázek 106: Průběh průtoku na profilu Q2 - kalibrační událost 8. 10. 2019



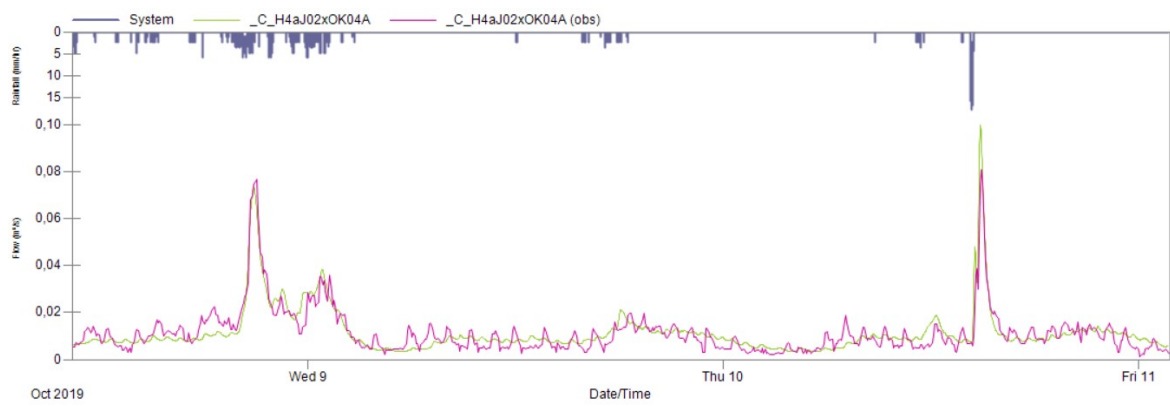
Obrázek 107: Průběh hladiny na profilu H3 - kalibrační událost 8. 10. 2019



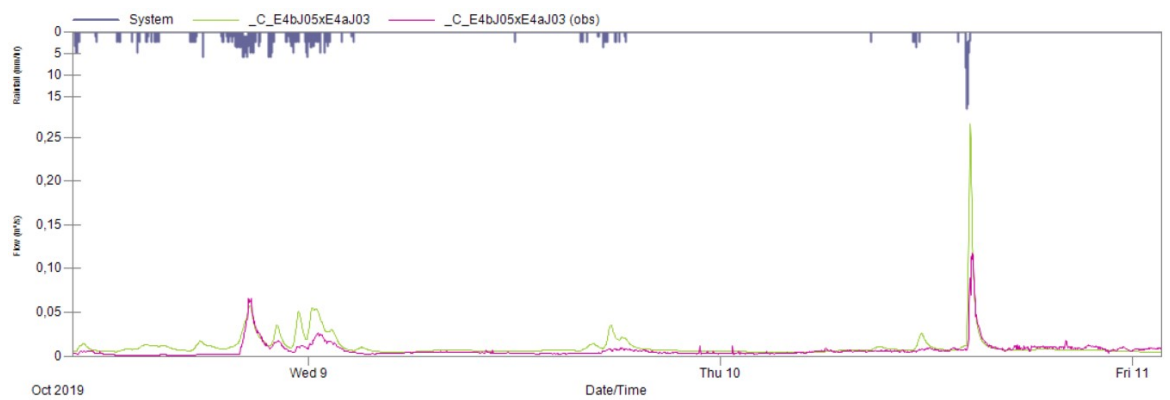
Obrázek 108: Průběh průtoku na profilu Q3 - kalibrační událost 8. 10. 2019



Obrázek 109: Průběh hladiny na profilu H4 - kalibrační událost 8. 10. 2019



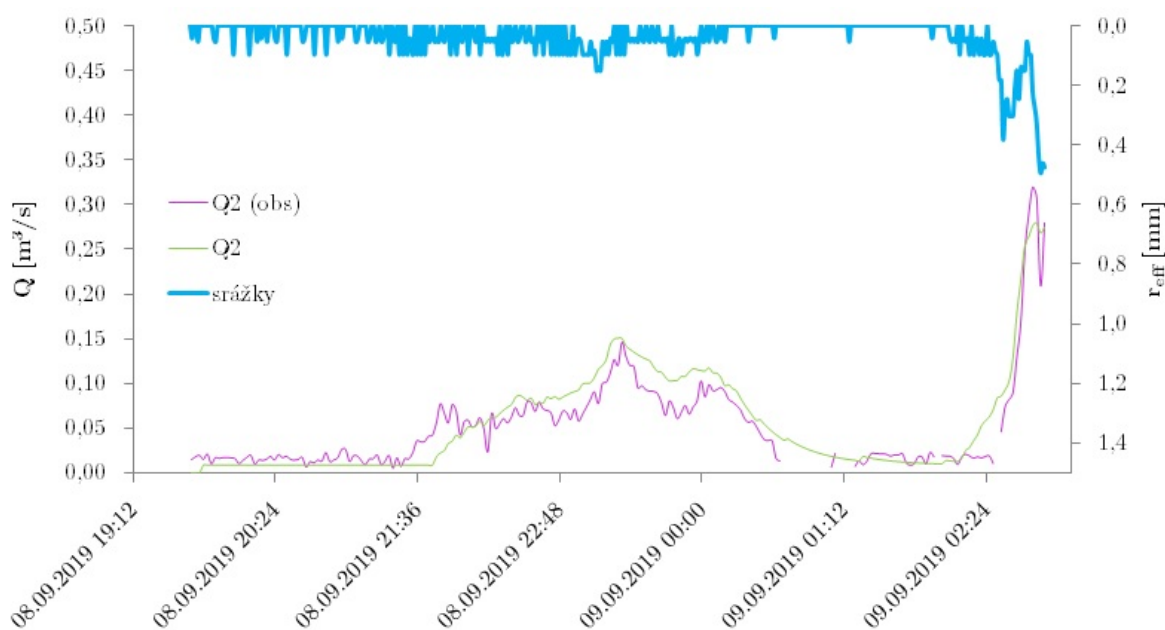
Obrázek 110: Průběh průtoku na profilu Q4 - kalibrační událost 8. 10. 2019



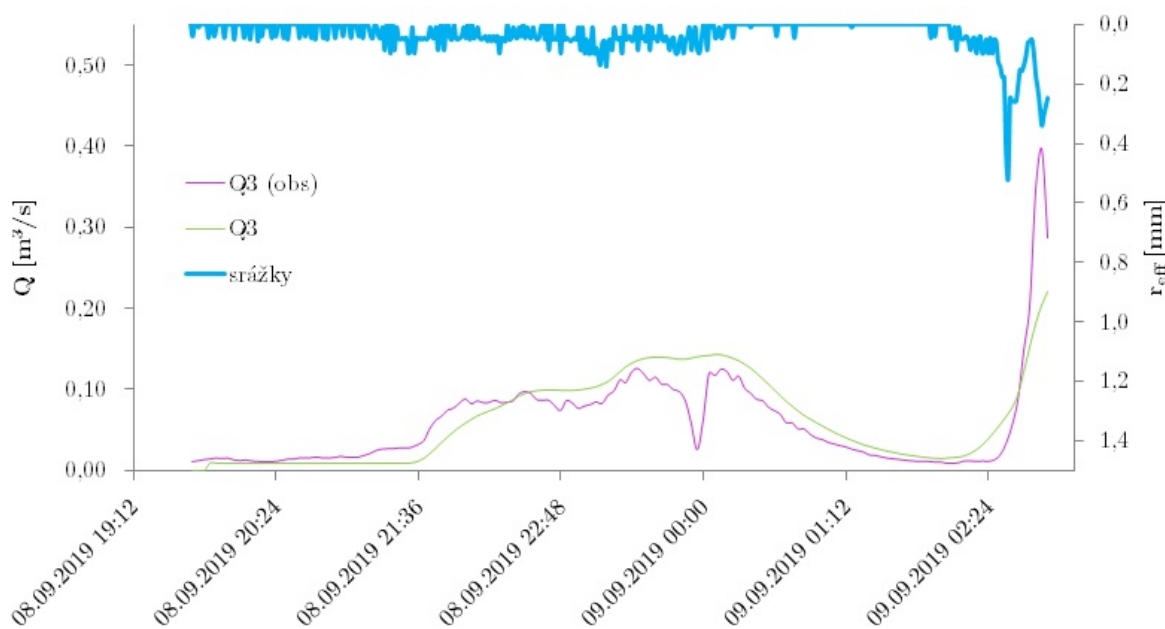
Obrázek 111: Průběh průtoku na profilu Q5 - kalibrační událost 8. 10. 2019

12.7. Výsledky verifikace hrubě schematizovaného modelu

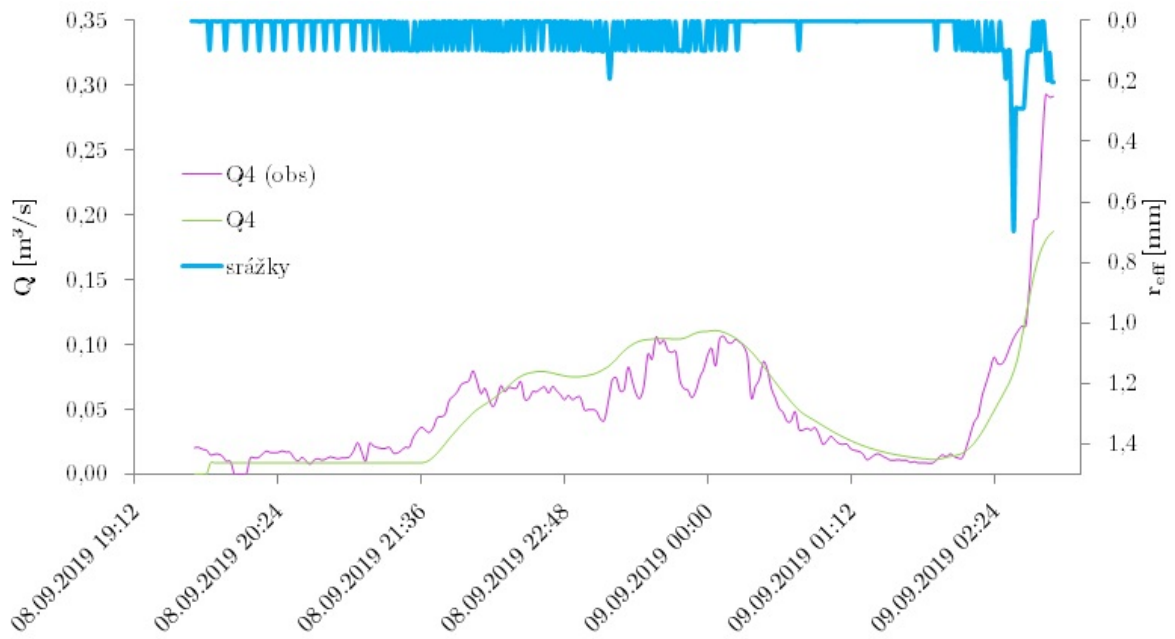
Verifikační událost 8. 9. 2019



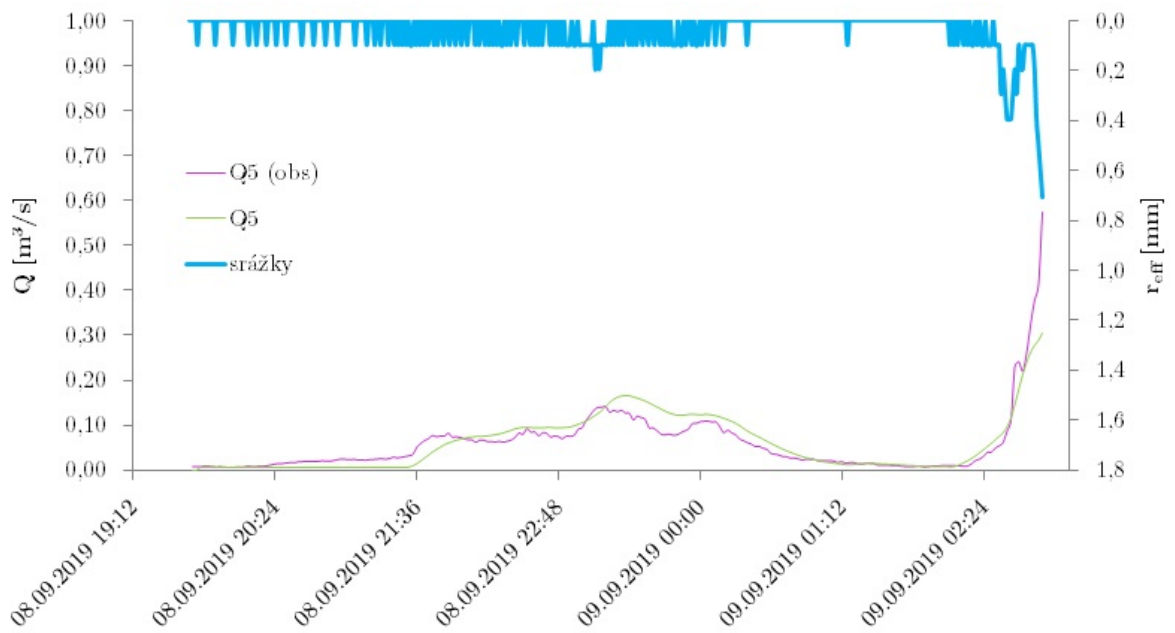
Obrázek 112: Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 8. 9. 2019



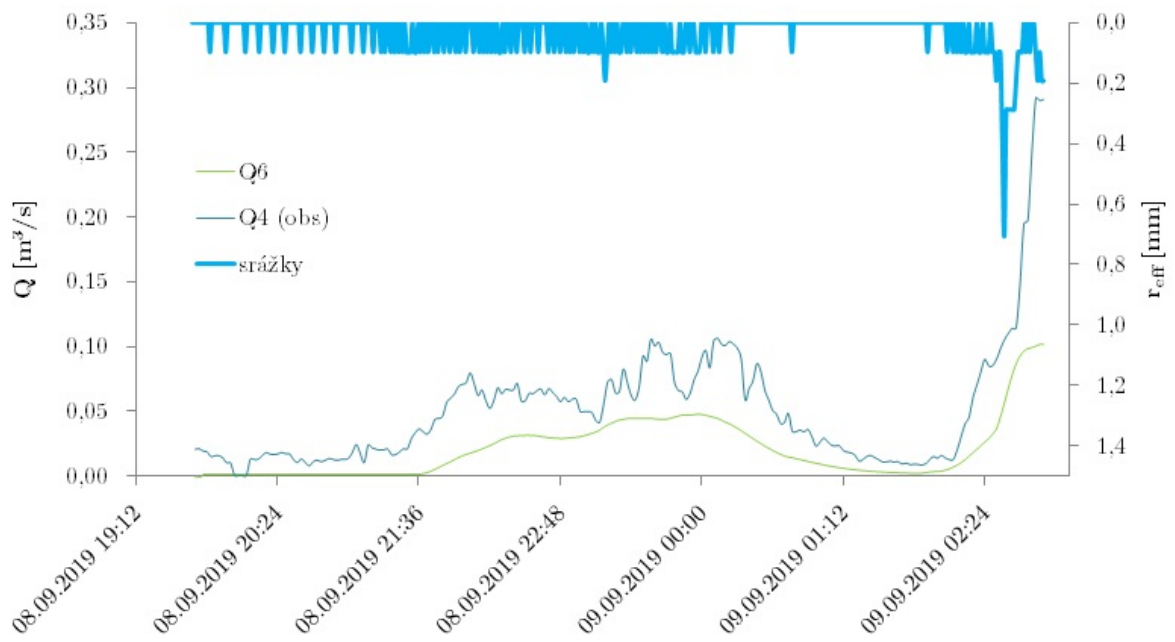
Obrázek 113: Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 8. 9. 2019



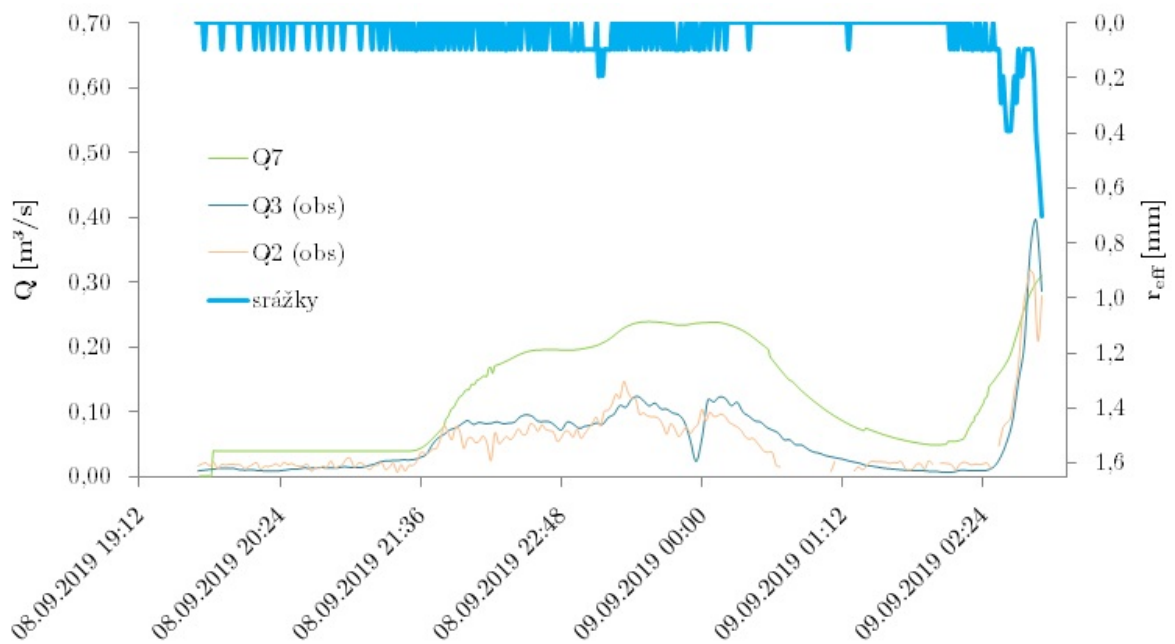
Obrázek 114: Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 8. 9. 2019



Obrázek 115: Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 8. 9. 2019

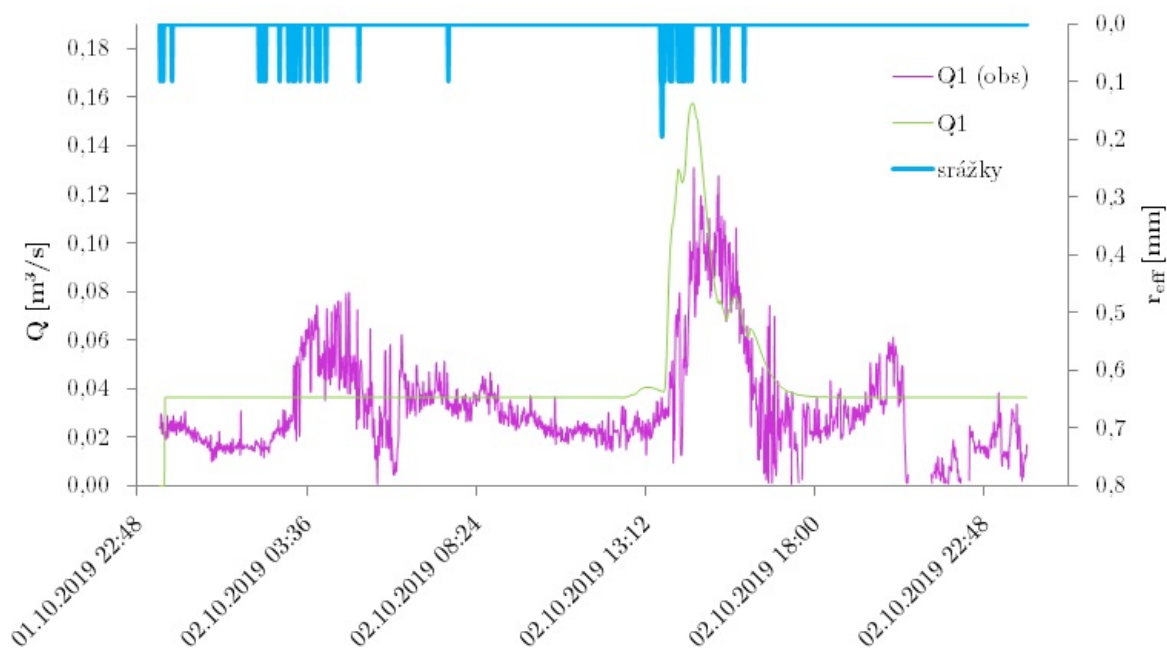


Obrázek 116: Průběh průtoku na profilu Q6 - verifikační událost 8. 9. 2019

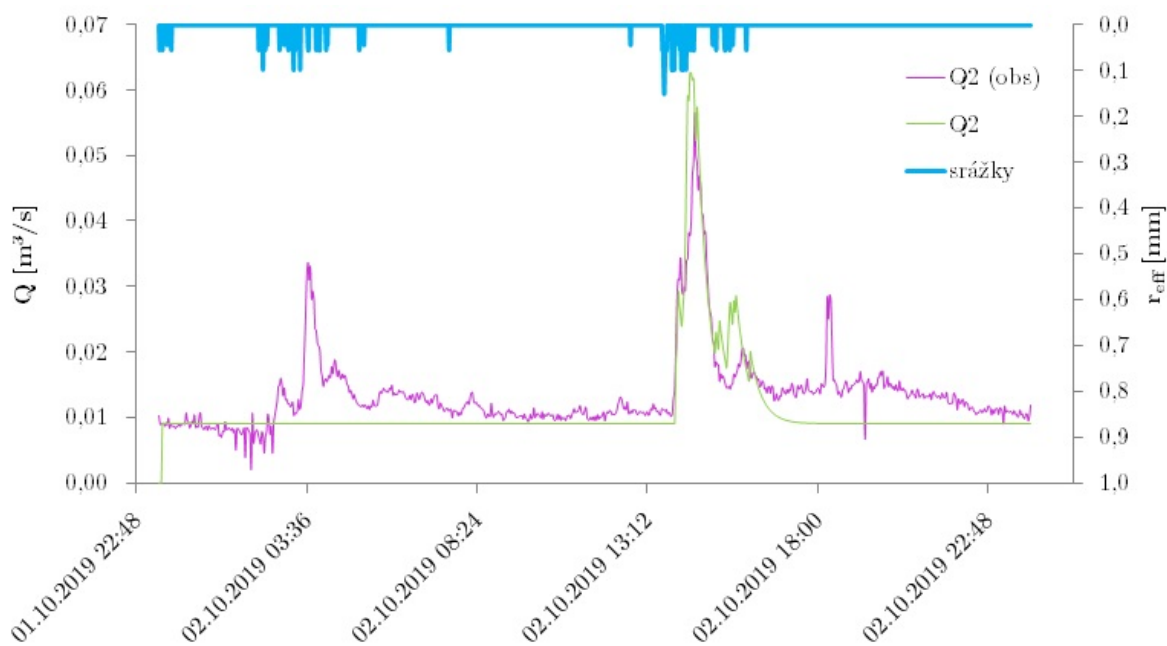


Obrázek 117: Průběh průtoku na profilu Q7 - verifikační událost 8. 9. 2019

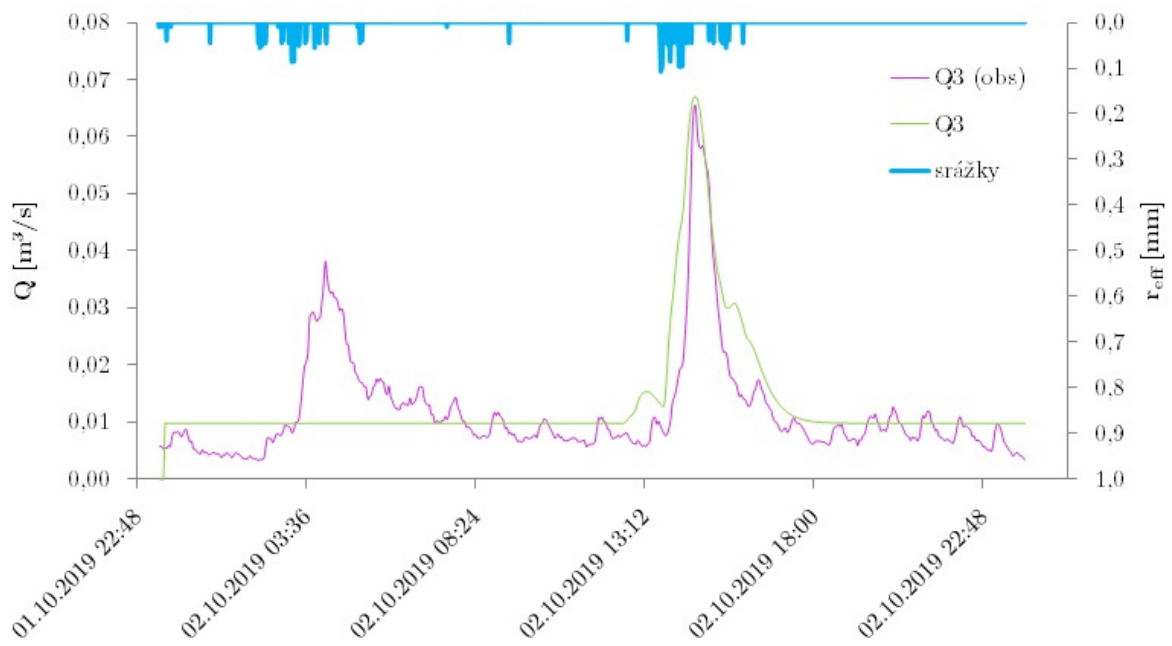
Verifikační událost 2. 10. 2019



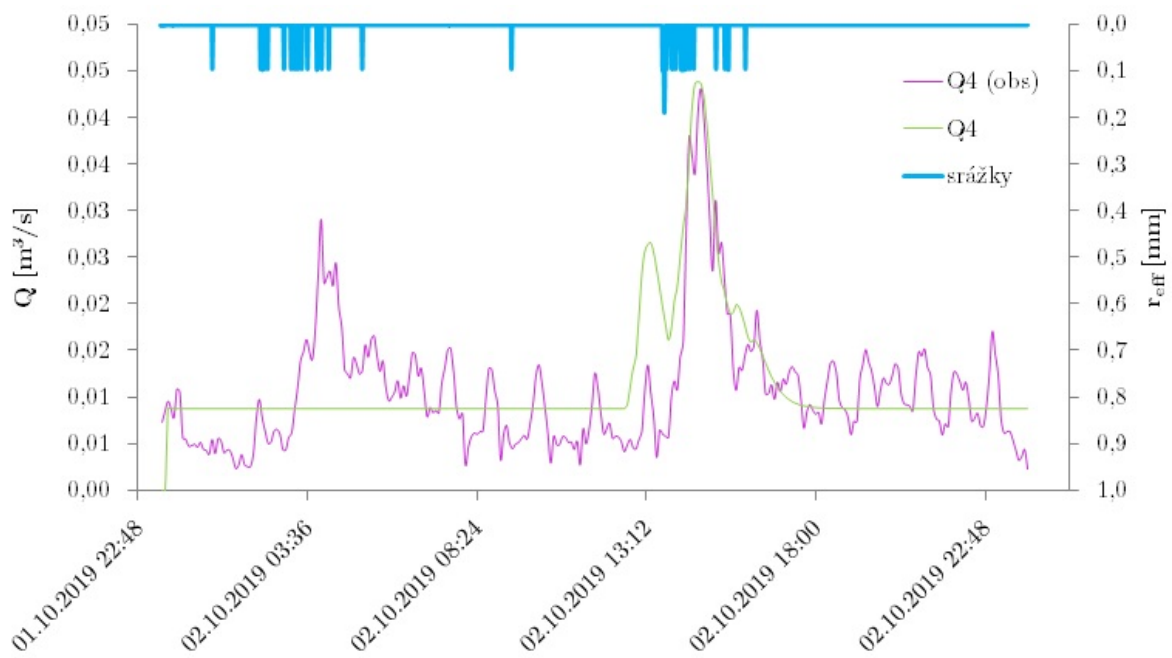
Obrázek 118: Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 10. 2019



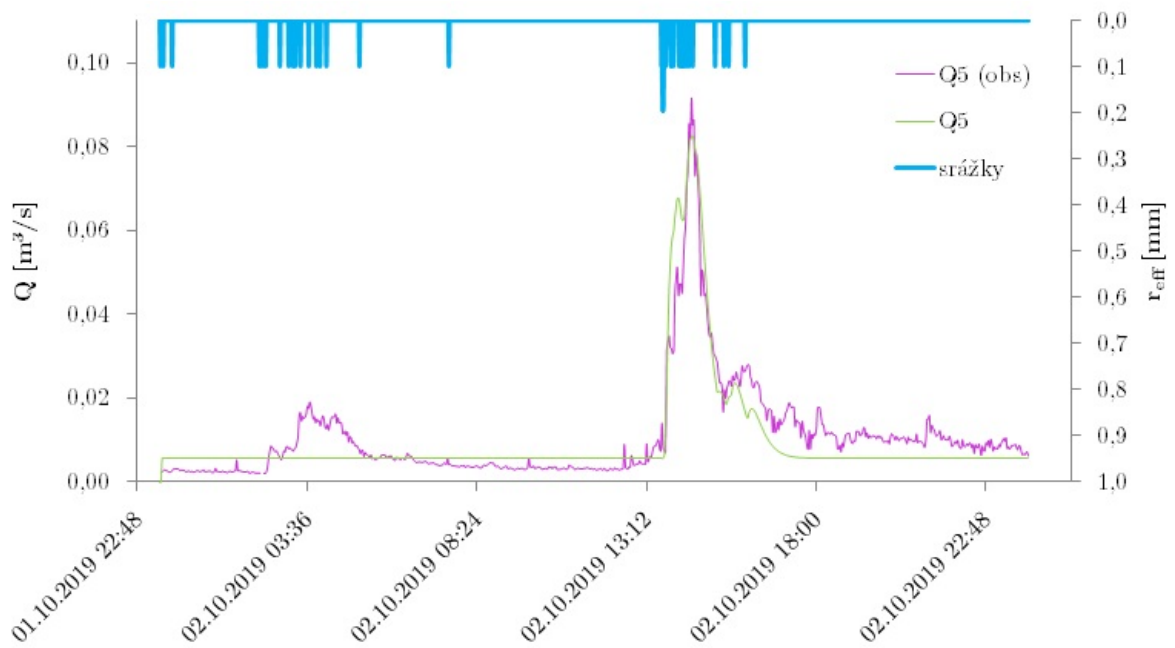
Obrázek 119: Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 10. 2019



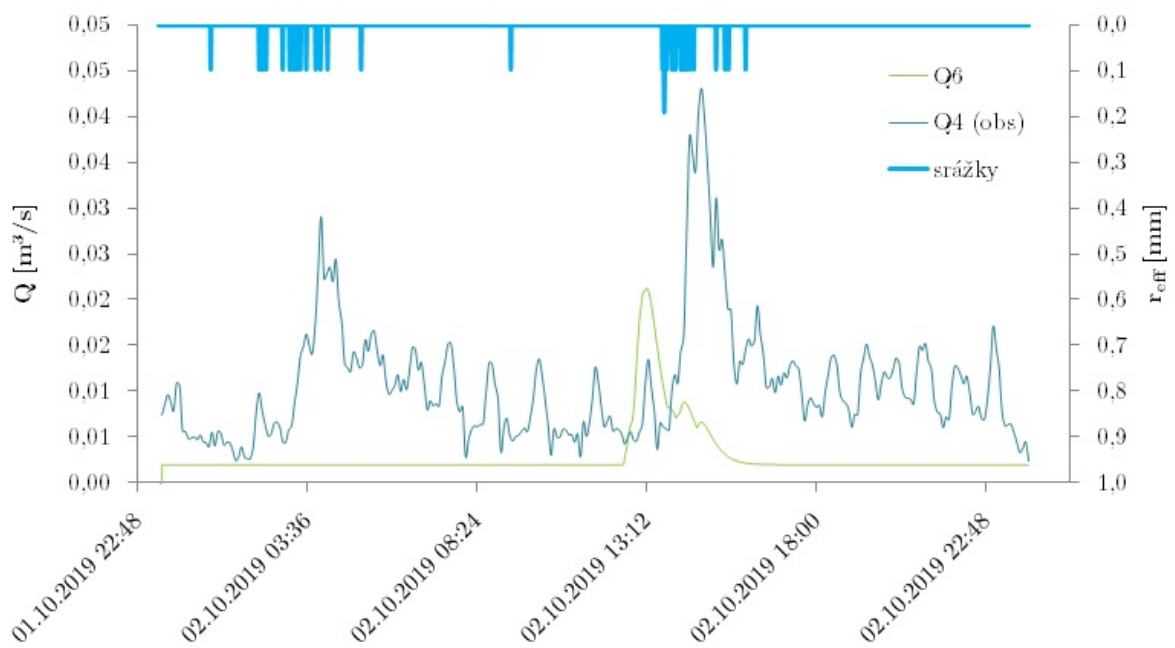
Obrázek 120: Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 10. 2019



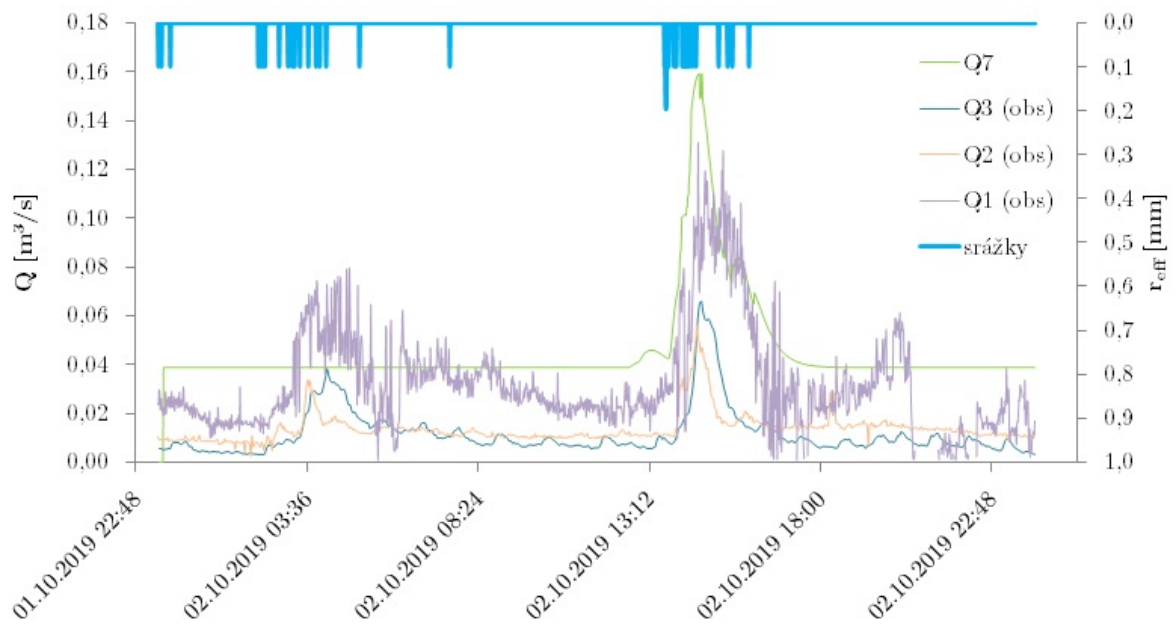
Obrázek 121: Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 10. 2019



Obrázek 122: Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 10. 2019

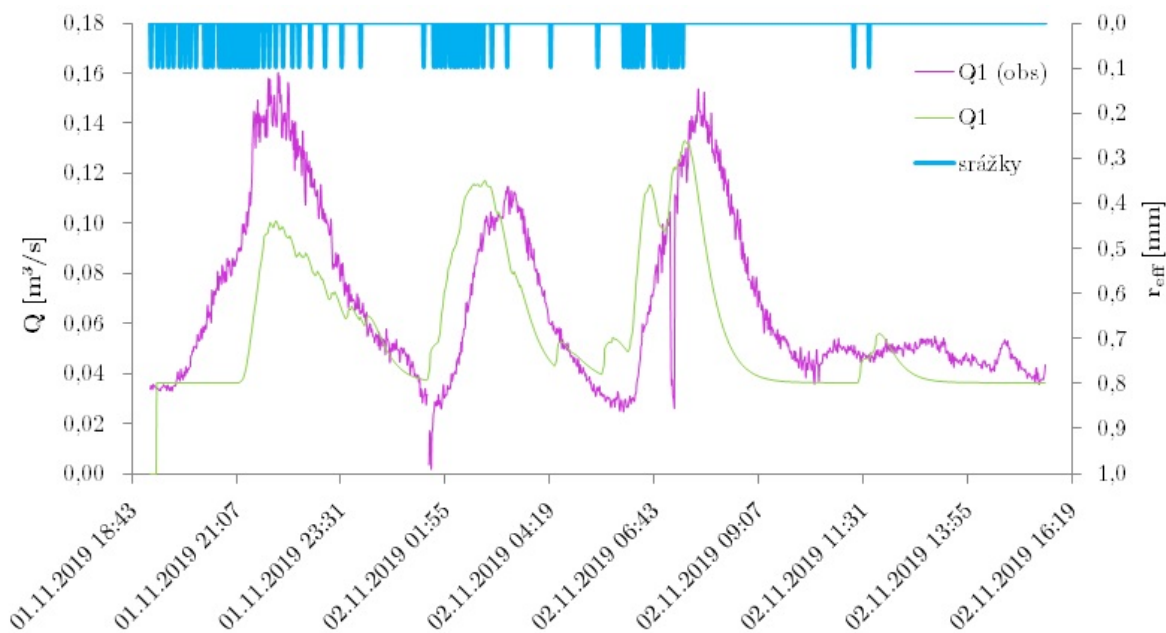


Obrázek 123: Průběh průtoku na profilu Q6 - verifikační událost 2. 10. 2019

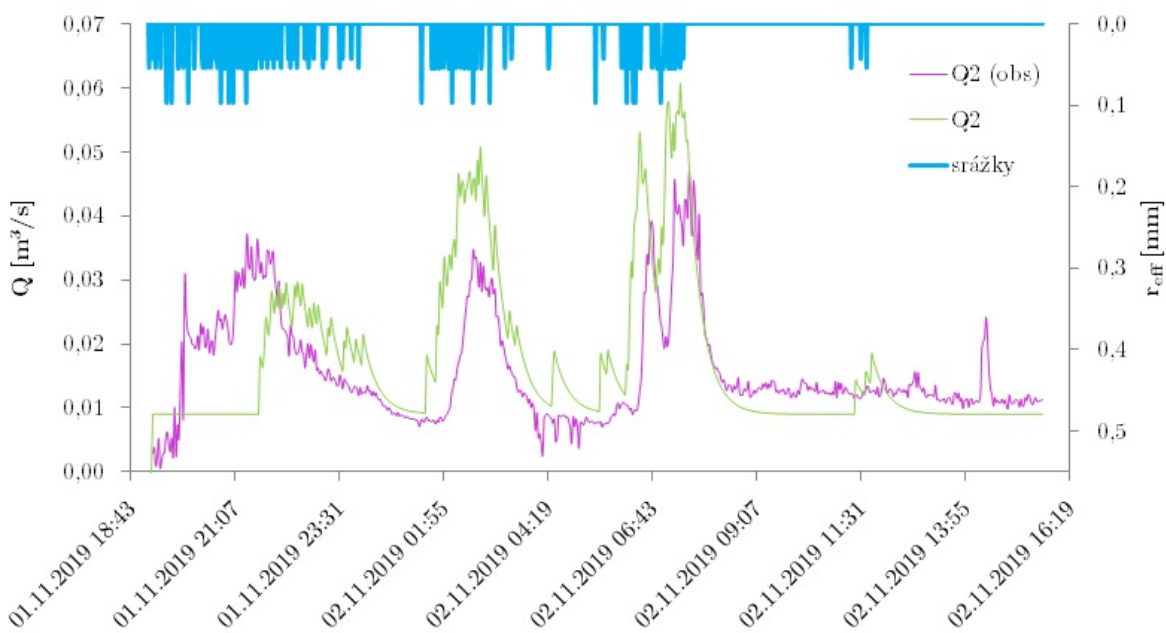


Obrázek 124: Průběh průtoku na profilu Q7 - verifikační událost 2. 10. 2019

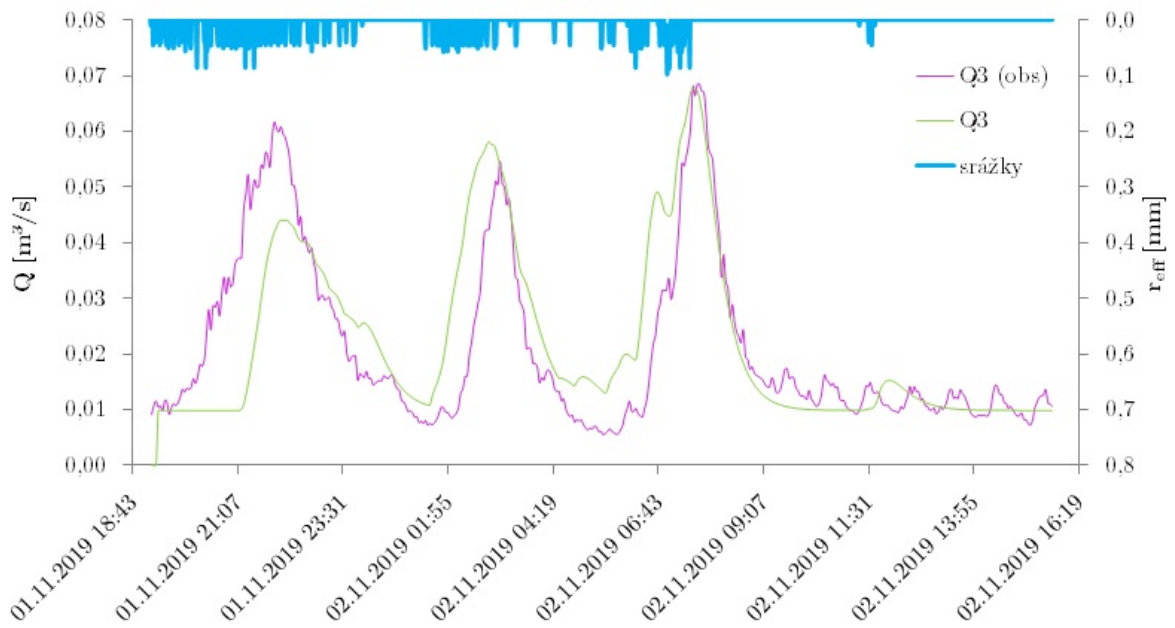
Verifikační událost 2. 11. 2019



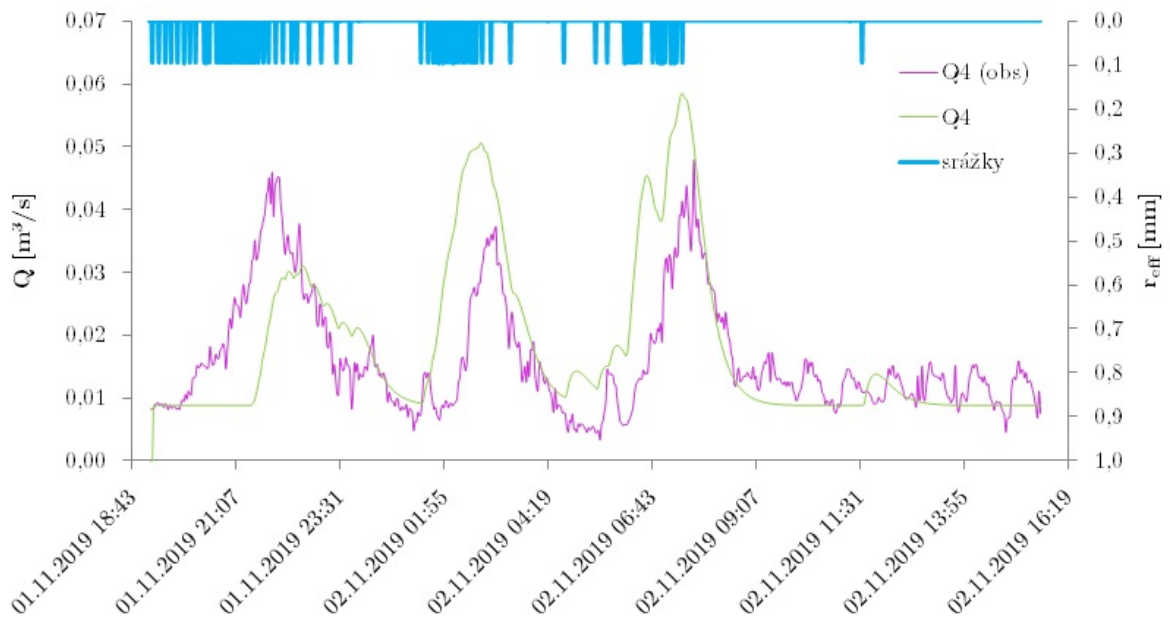
Obrázek 125: Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 11. 2019



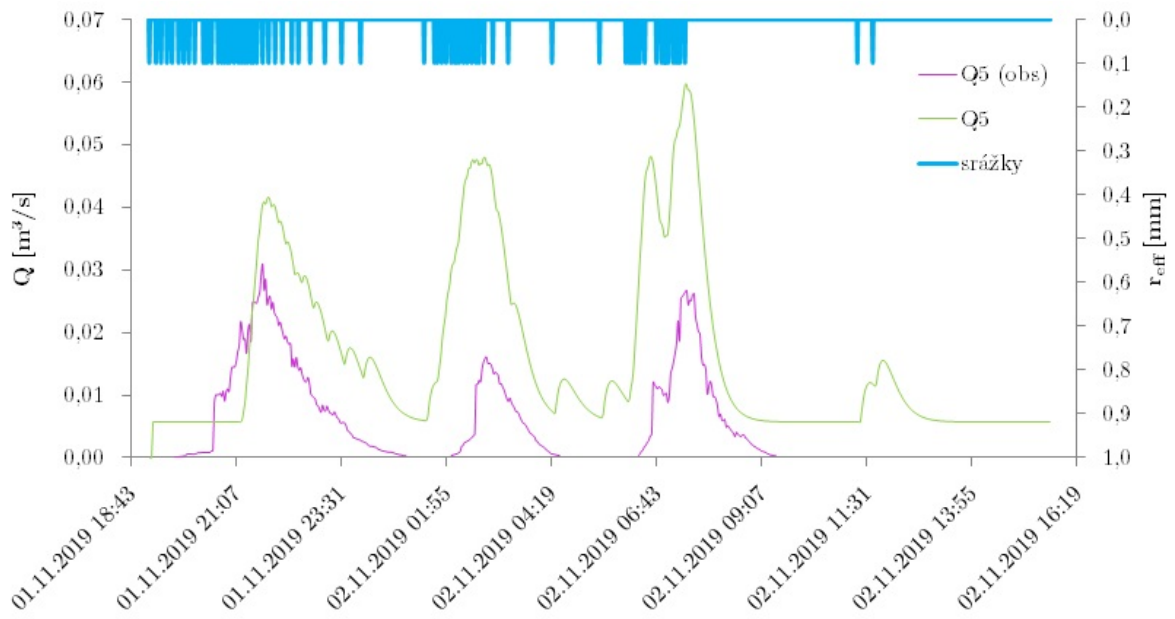
Obrázek 126: Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 11. 2019



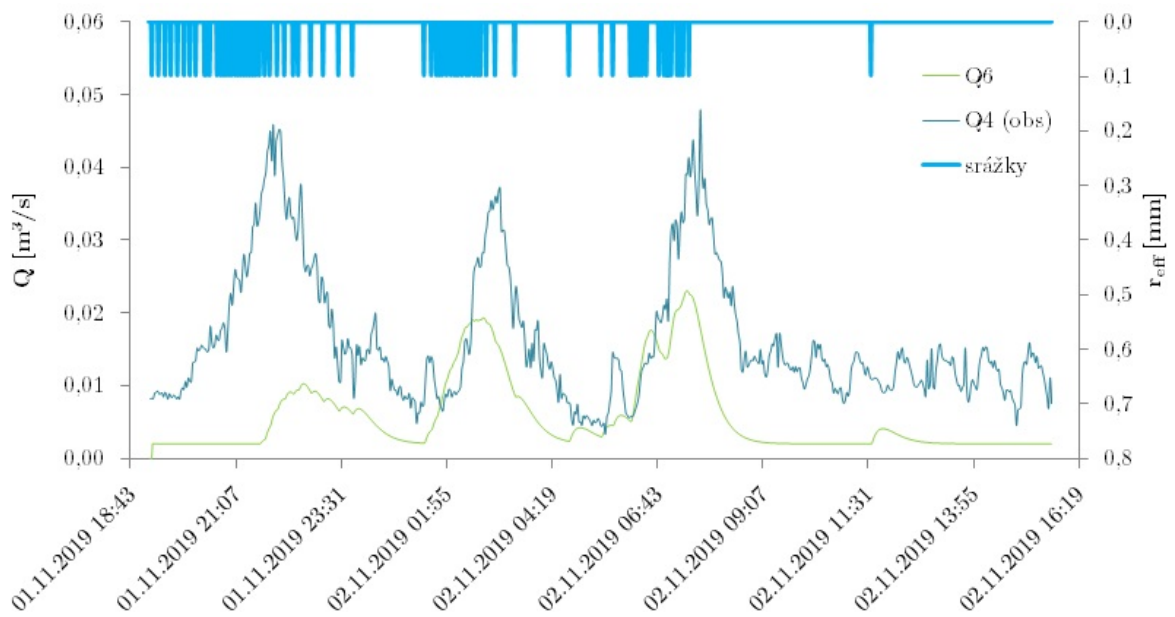
Obrázek 127: Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 11. 2019



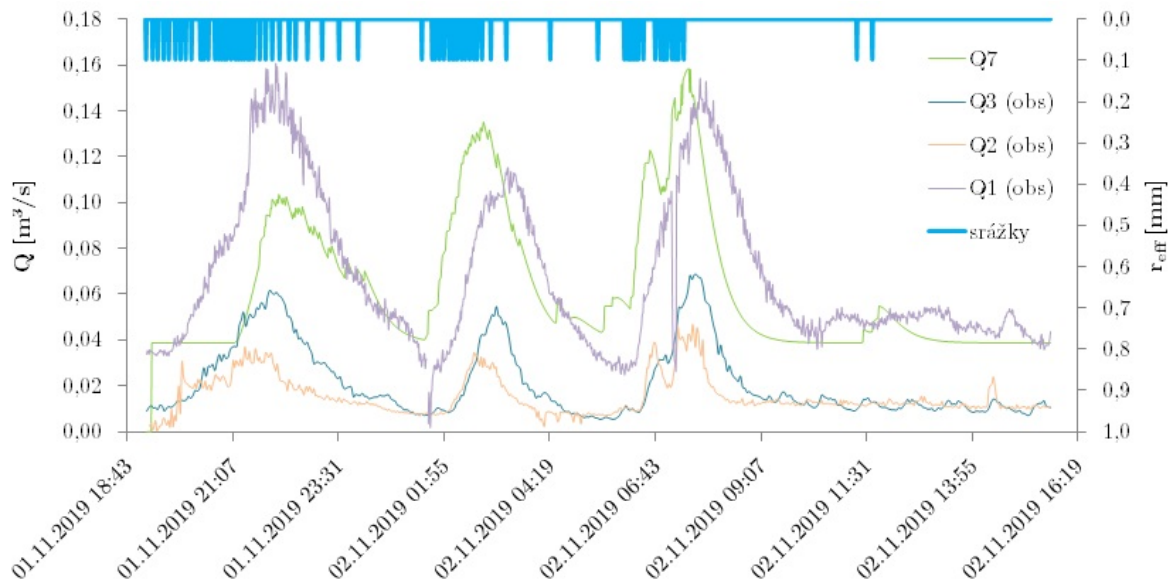
Obrázek 128: Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 11. 2019



Obrázek 129: Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 11. 2019



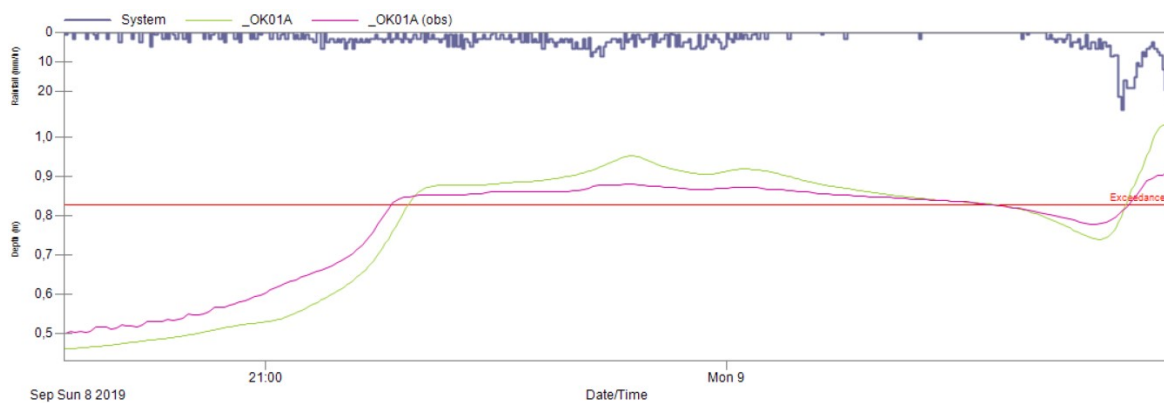
Obrázek 130: Průběh průtoku na profilu Q6 - verifikační událost 2. 11. 2019



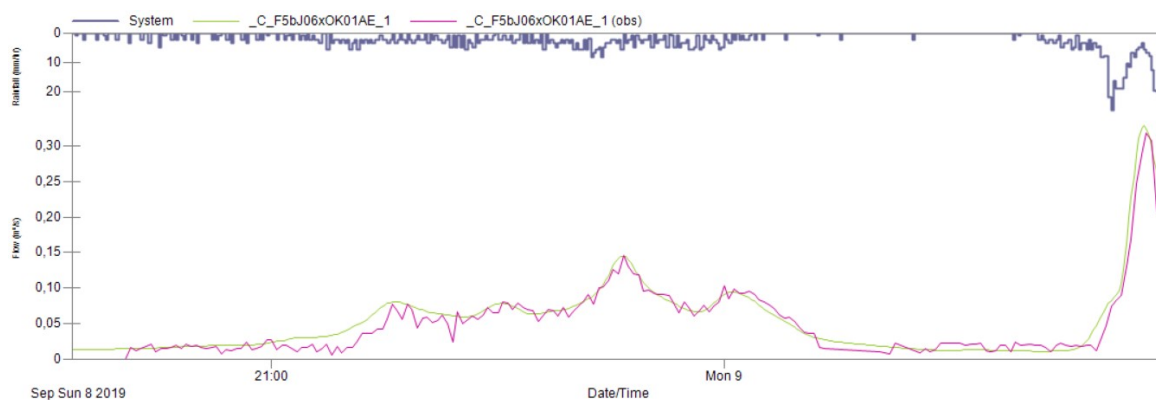
Obrázek 131: Průběh průtoku na profilu Q7 - verifikační událost 2. 11. 2019

12.8. Výsledky verifikace podrobně schematizovaného modelu

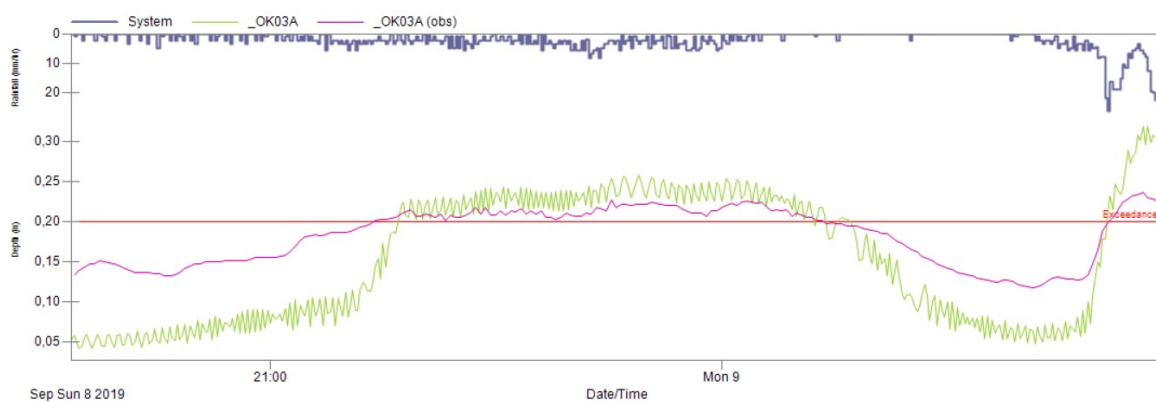
Verifikační událost 8. 9. 2019



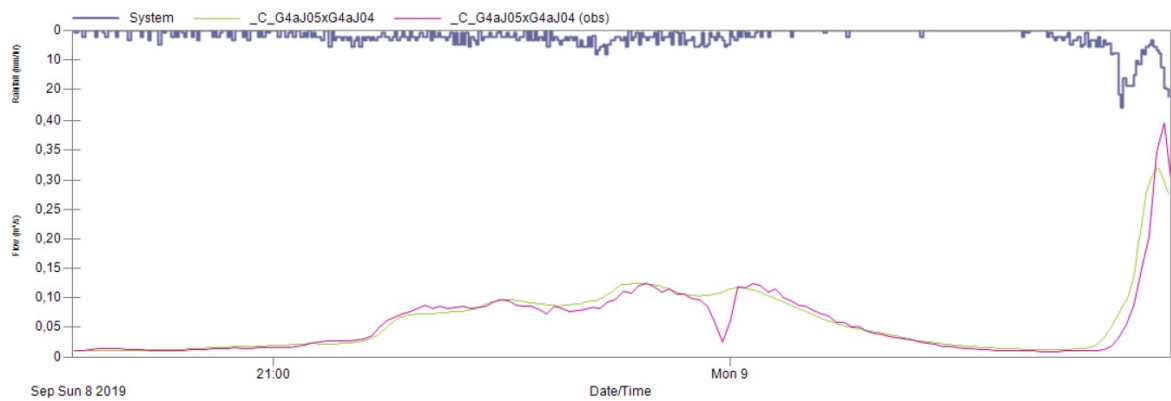
Obrázek 132: Průběh hladiny na profilu H1 - verifikační událost 8. 9. 2019



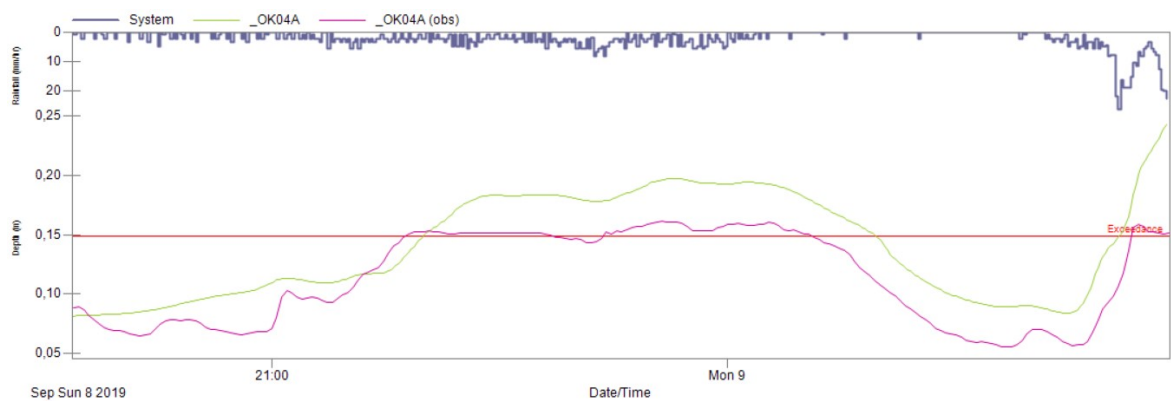
Obrázek 133: Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 8. 9. 2019



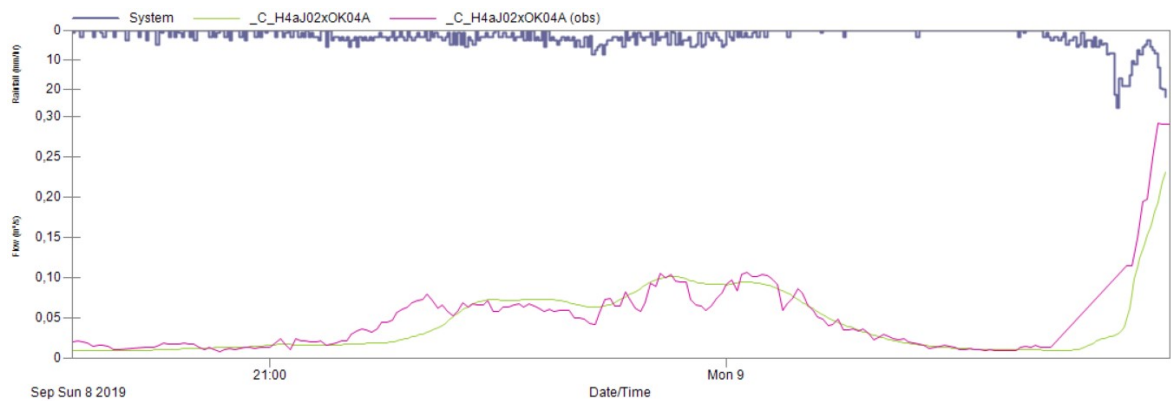
Obrázek 134: Průběh hladiny na profilu H3 - verifikační událost 8. 9. 2019



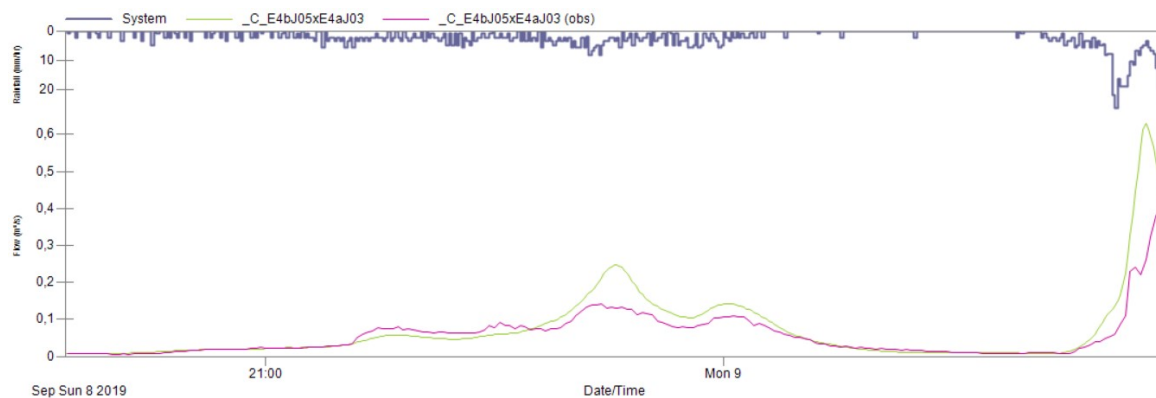
Obrázek 135: Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 8. 9. 2019



Obrázek 136: Průběh hladiny na profilu H4 - verifikační událost 8. 9. 2019

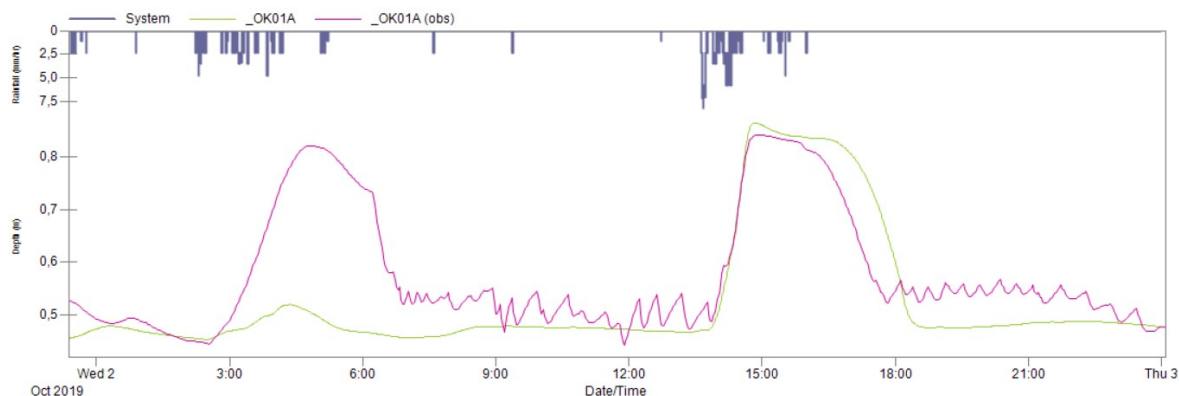


Obrázek 137: Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 8. 9. 2019

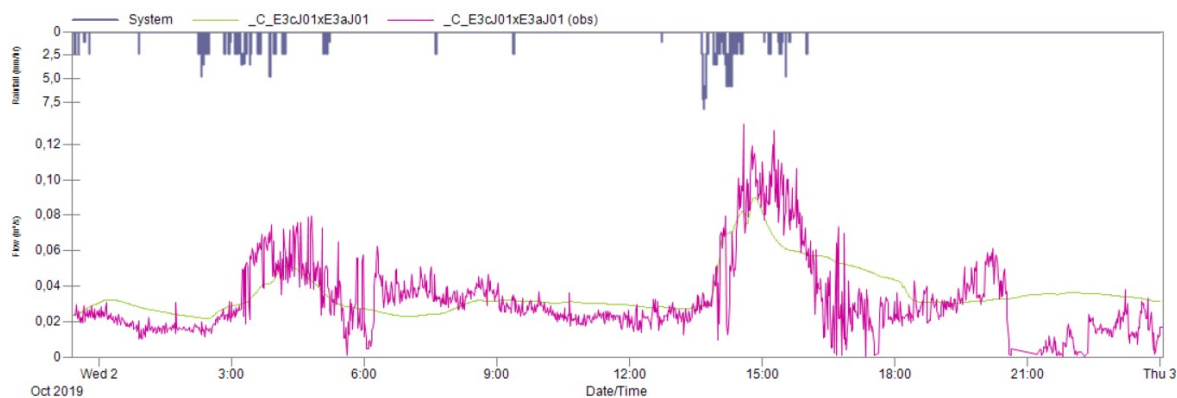


Obrázek 138: Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 8. 9. 2019

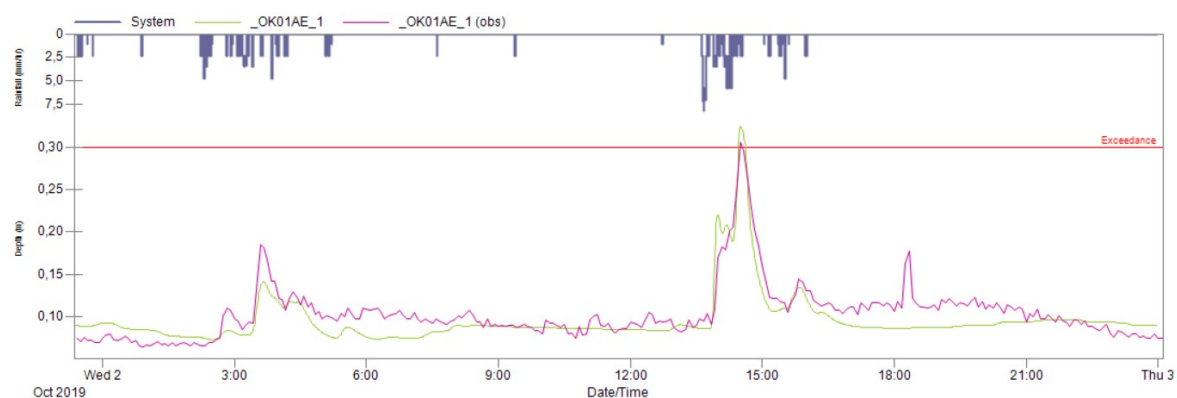
Verifikační událost 2. 10. 2019



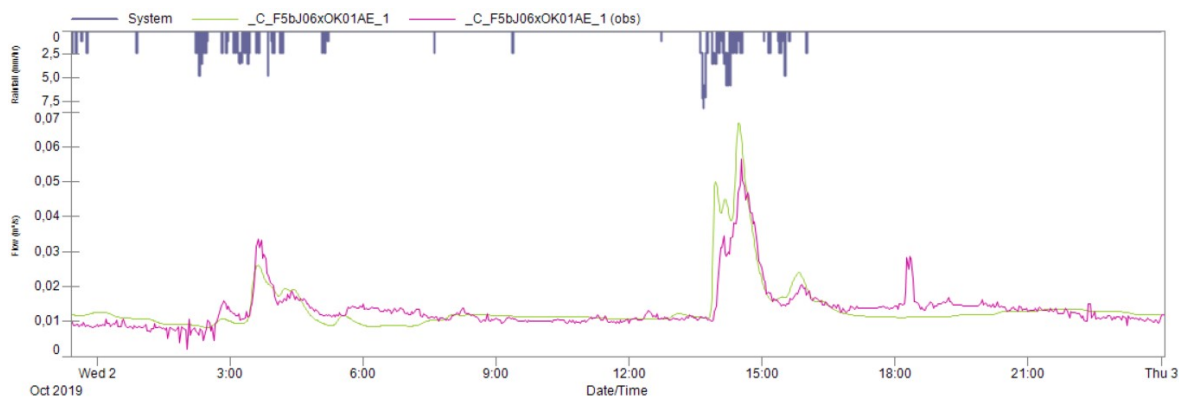
Obrázek 139: Průběh hladiny na profilu H1 - verifikační událost 2. 10. 2019



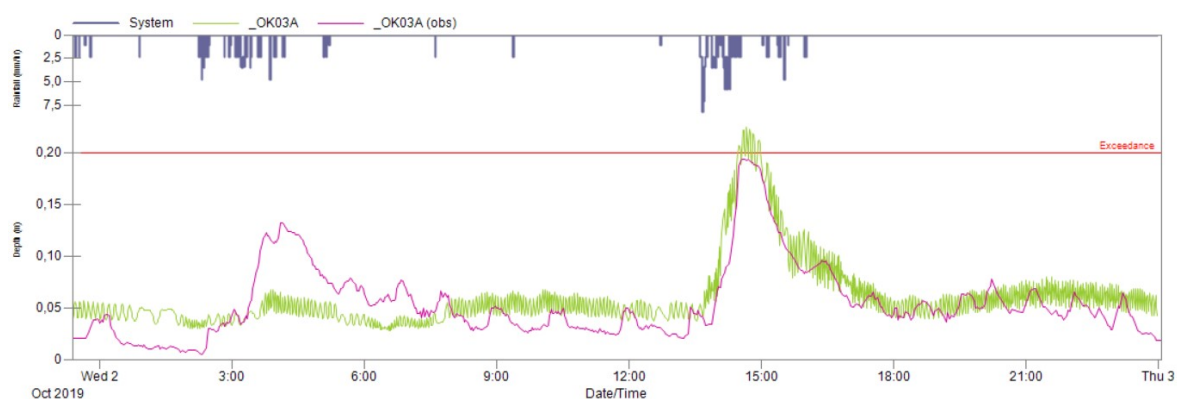
Obrázek 140: Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 10. 2019



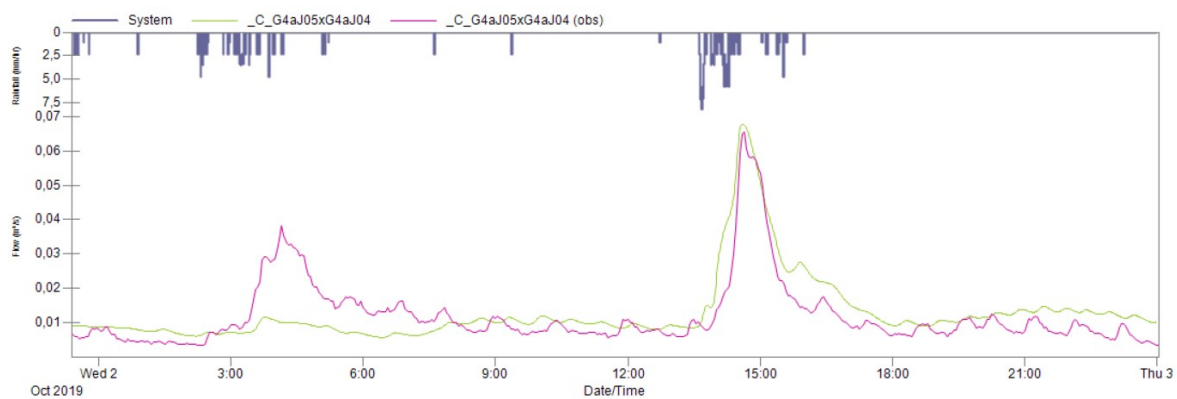
Obrázek 141: Průběh hladiny na profilu H2a - verifikační událost 2. 10. 2019



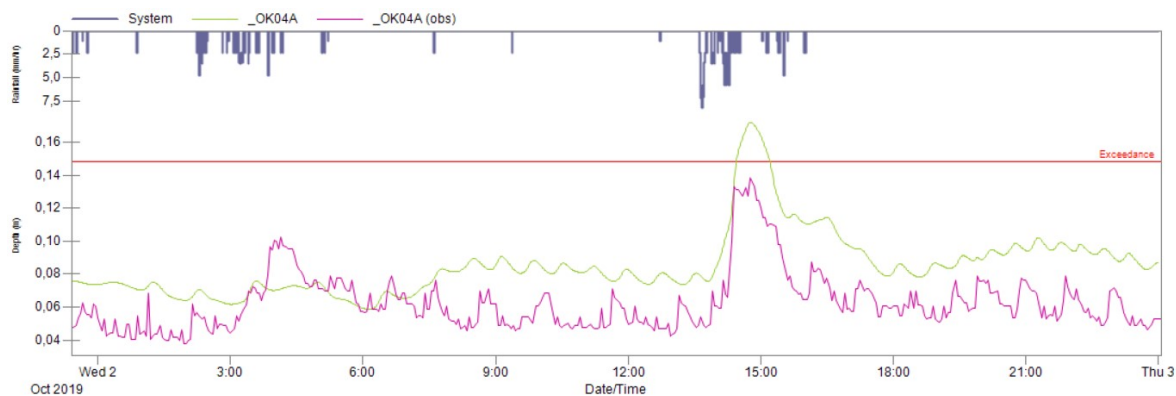
Obrázek 142: Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 10. 2019



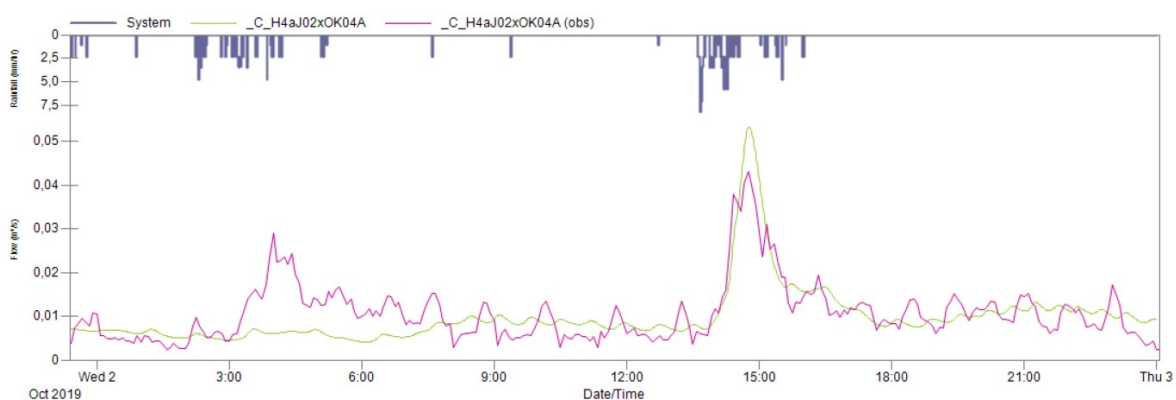
Obrázek 143: Průběh hladiny na profilu H3 - verifikační událost 2. 10. 2019



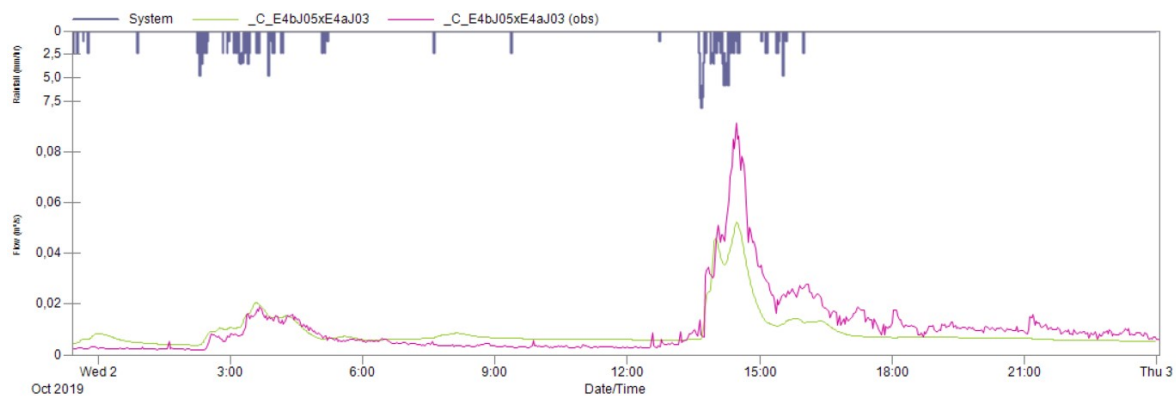
Obrázek 144: Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 10. 2019



Obrázek 145: Průběh hladiny na profilu H4 - verifikační událost 2. 10. 2019

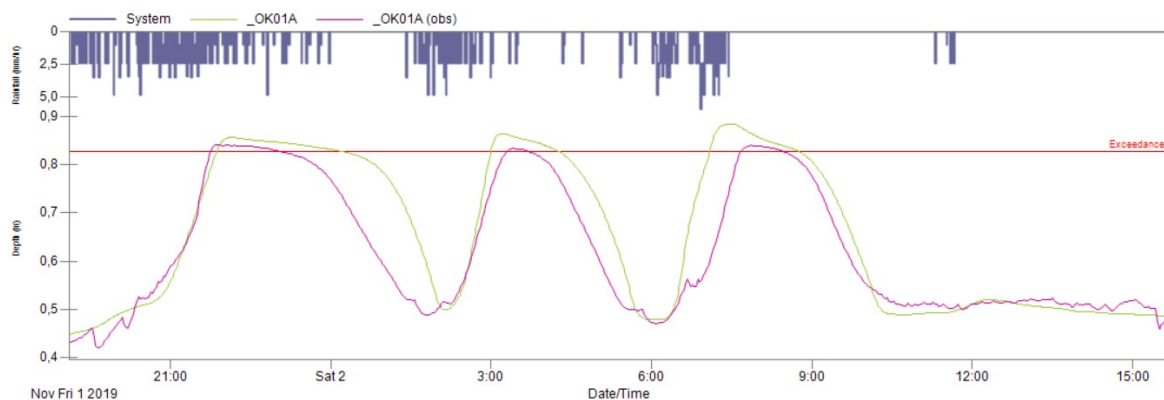


Obrázek 146: Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 10. 2019

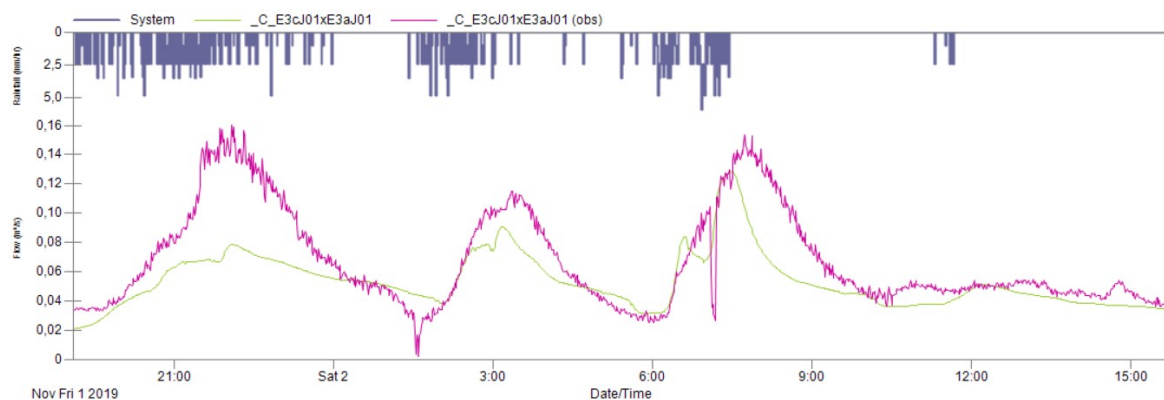


Obrázek 147: Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 10. 2019

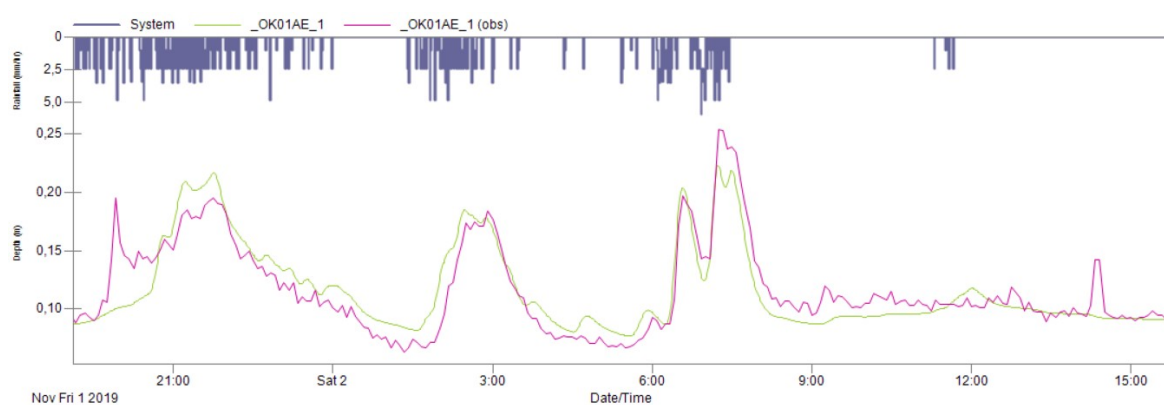
Verifikační událost 2. 11. 2019



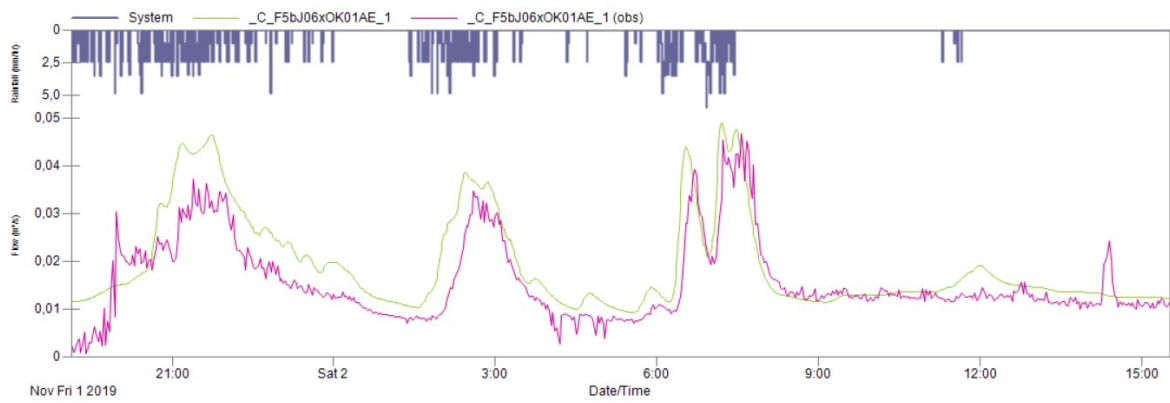
Obrázek 148: Průběh hladiny na profilu H1 - verifikační událost 2. 11. 2019



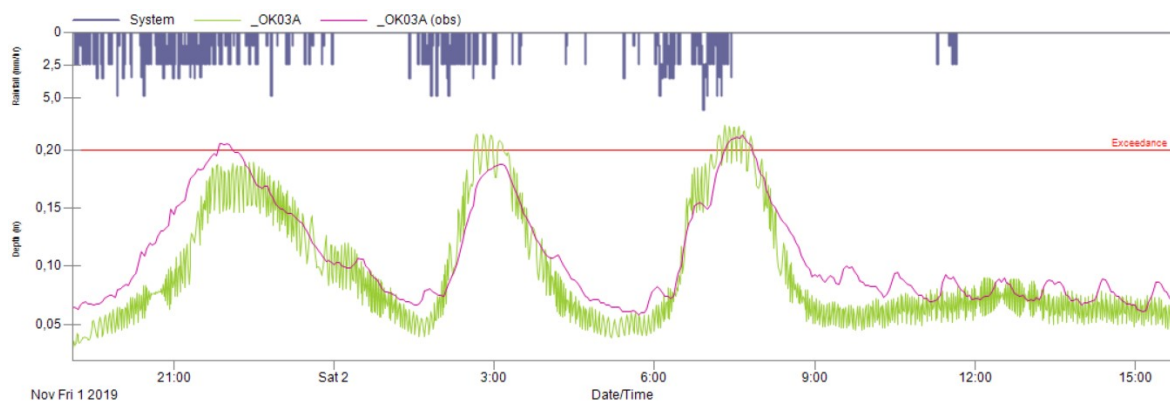
Obrázek 149: Průběh průtoku na profilu Q1 - verifikační událost 2. 11. 2019



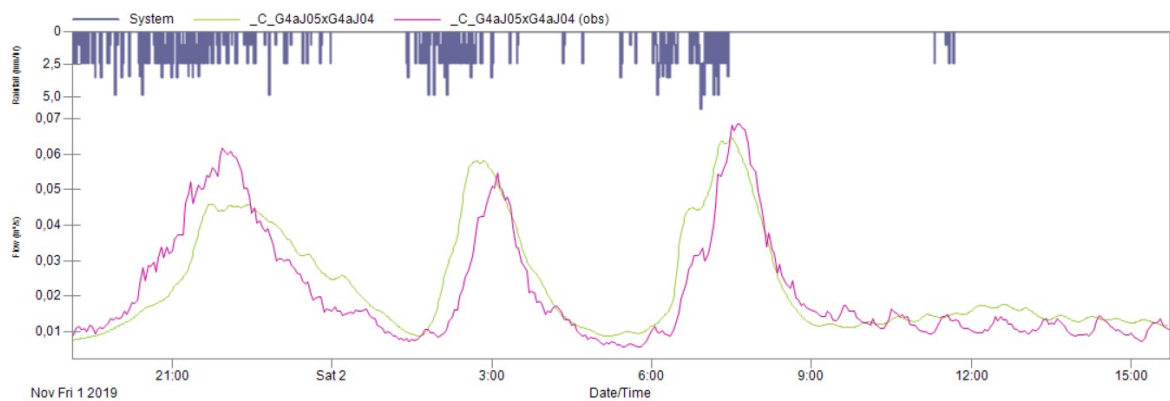
Obrázek 150: Průběh hladiny na profilu H2a - verifikační událost 2. 11. 2019



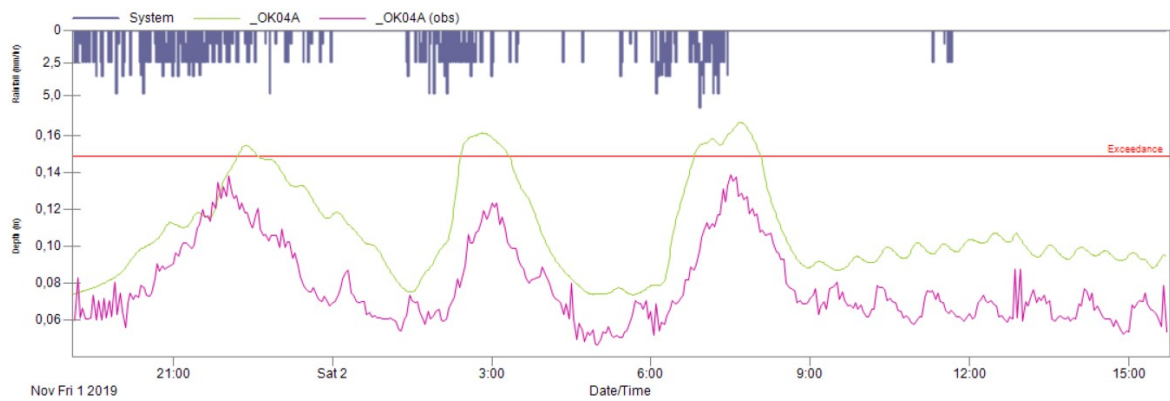
Obrázek 151: Průběh průtoku na profilu Q2 - verifikační událost 2. 11. 2019



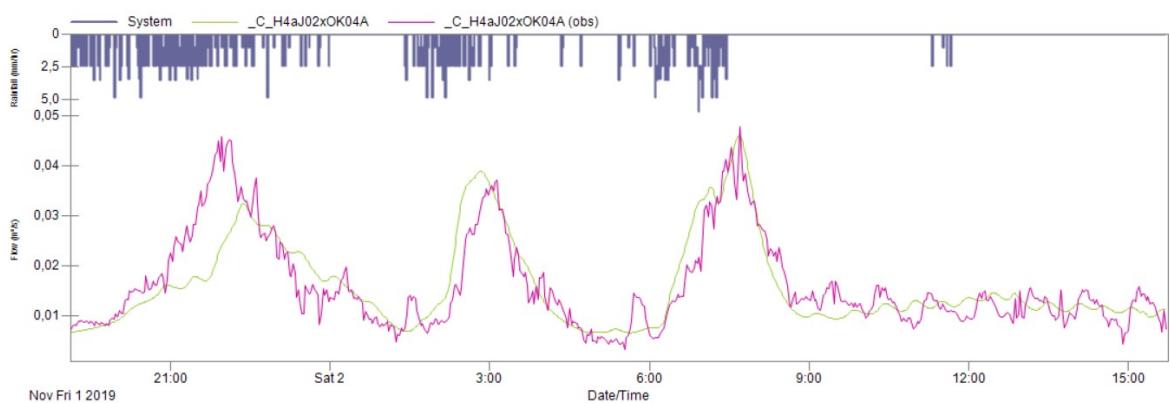
Obrázek 152: Průběh hladiny na profilu H3 - verifikační událost 2. 11. 2019



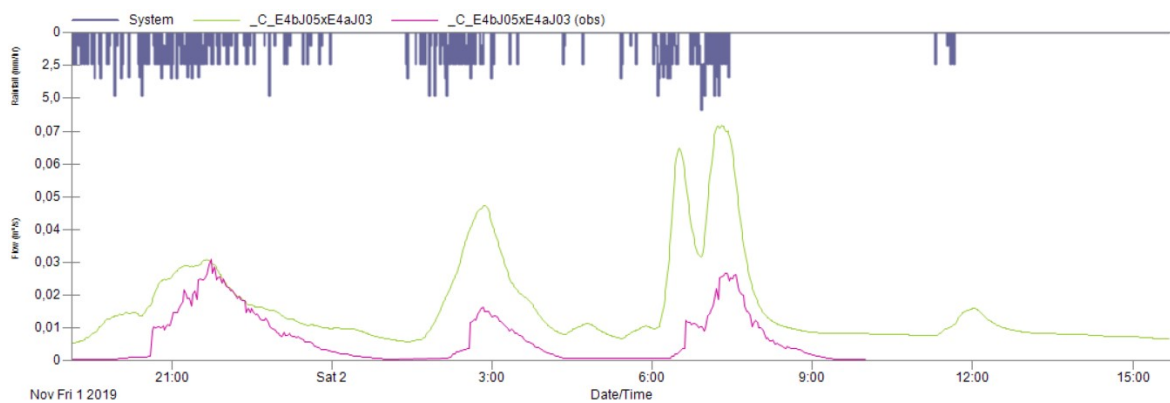
Obrázek 153: Průběh průtoku na profilu Q3 - verifikační událost 2. 11. 2019



Obrázek 154: Průběh hladiny na profilu H4 - verifikační událost 2. 11. 2019



Obrázek 155: Průběh průtoku na profilu Q4 - verifikační událost 2. 11. 2019



Obrázek 156: Průběh průtoku na profilu Q5 - verifikační událost 2. 11. 2019