

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA ZDRAVOTNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ



POSOUZENÍ SRÁŽKO-ODTOKOVÝCH VZTAHŮ STOKOVÉHO SYSTÉMU OBCE BUKOVNO-LÍNY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Kateřina Patková

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

KVĚTEN 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Patková Jméno: Kateřina Osobní číslo: 470247
Zadávající katedra: zdravotního a ekologického inženýrství
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Posouzení srážko-odtokových vztahů stokového systému obce Bukovno-Líny
Název bakalářské práce anglicky: Assessment of rainfall-runoff processes in Bukovno-Líny sewer system

Pokyny pro vypracování:

Práce bude obsahovat teoretickou a praktickou část. V teoretické části bude popsána problematika odvádění odpadních a srážkových vod z urbanizovaných území a popsány metody pro posouzení funkce stokových sítí. Praktická část bude obsahovat kalibrace přístrojů pro terénní monitoring a tvorbu a kalibraci jednoduchého srážko-odtokového modelu.

Seznam doporučené literatury:

Krejčí a kol. Odvodnění urbanizovaných území: Konceptní přístup, NOEL 2000
Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1
Monitoring v městském odvodnění – část I. – Dešťové srážky, SOVAK

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

Datum zadání bakalářské práce: 12.2.2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.5.2021
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 bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské 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“.

Datum převzetí zadání

/ Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že předloženou práci jsem zpracovala samostatně. Veškerou použitou literaturu jsem uvedla v seznamu a v textu řádně uvedla její použití. Práci s modelem, kalibraci srážkoměru, vyhodnocení kalibrace profilů pomocí stopovače, vyhodnocení dat získaných monitorovací kampaní a vyhodnocení citlivostní analýzy jsem prováděla samostatně a aktivně jsem se podílela na monitorovací kampani a provádění měření koncentrace stopovače.

Svým podpisem stvrzuji, že text závěrečné práce v písemné podobě je shodný s textem v elektronické podobě.

V Praze dne 17. 5.2021

Kateřina Patková

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala panu doc. Ing. Davidu Stránskému, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, trpělivost, ochotu a cenné rady. Děkuji také Ing. Vojtěchu Barešovi, Ph.D. za pomoc při monitoringu a doc. Ing. Janě Nábělkové, Ph.D. za pomoc při kalibraci multimetru. Velké díky patří také mým nejbližším, kteří pro mě byli nesmírnou oporou.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá stavbou a kalibrací schematizovaného simulačního modelu popisujícího srážko-odtokové procesy v zájmové lokalitě Bukovno–Líny a jeho následnou aplikací pro návrh přečerpávací stanice odpadních vod. V teoretické části jsou popsány možné metody monitoringu a modelování. Praktická část se věnuje stavbě modelu, jeho kalibraci a verifikaci na základě dat získaných monitorovací kampaní a jeho aplikací pro návrh přečerpávací stanice odpadních vod. Na závěr jsou vyhodnoceny výsledky kalibrace a návrh přečerpávací stanice odpadních vod na základě výsledků modelu.

Klíčová slova

stokové systémy, monitoring, model, SWMM simulace, kalibrace, verifikace, přečerpávací stanice odpadních vod

Abstract

This bachelor thesis deals with building and calibrating schematic rainfall-runoff simulation model describing rainfall-runoff processes at catchment of interest Bukovno–Líny and its application for designing a sewage pumping station. In the theoretical part, methods of monitoring and modelling are described. Practical part focuses on creation of the model, its calibration and verification based on data obtained by monitoring campaign, and its application for the design of sewage pumping station. The results of calibration and the sewage pumping station design based on those model results are evaluated at the end.

Keywords

sewerage systems, monitoring, model, SWMM simulation, calibration, verification, sewage pumping station

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Teoretický základ	9
2.1	Problematika městského odvodnění	9
2.2	Druhy odpadních vod	11
2.3	Stokové soustavy	14
2.4	Srážko-odtokové procesy	18
2.5	Nástroje pro popis srážko-odtokových jevů	22
2.5.1	Monitoring	22
2.5.2	Modelování	32
2.5.3	SWMM.....	37
2.5.4	Potřebná data.....	39
3	Cíle práce	43
4	Zájmové území Bukovno–Líny	44
4.1	Charakter území	44
4.2	Systém odvodnění	45
5	Metodika	47
5.1	Orientace v zájmovém území	47
5.2	Monitorovací kampaň.....	47
5.2.1	Kalibrace srážkoměru.....	48
5.2.2	Kalibrace měrných profilů pomocí stopovače	52
5.3	Tvorba modelu	54
5.4	Kalibrace a verifikace modelu.....	55
5.5	Návrh přečerpávací stanice	56
5.6	Citlivostní analýza efektivity přečerpávací stanice	57
6	Výsledky a pozorování.....	59

6.1	Orientace v zájmovém území	59
6.2	Monitorovací kampaň.....	59
6.2.1	Kalibrace srážkoměru.....	59
6.2.2	Kalibrace měrných profilů pomocí stopovače	62
6.2.3	Výsledky monitoringu.....	63
6.3	Tvorba modelu	64
6.4	Kalibrace a verifikace modelu.....	67
6.5	Návrh přečerpávací stanice	71
6.6	Citlivostní analýza efektivity přečerpávací stanice	73
7	Závěr	76
8	Seznam použité literatury.....	78
9	Seznam obrázků	84
10	Seznam tabulek	87
11	Seznam použitých zkratk.....	89
12	Přílohy.....	90
12.1	Karty měrných profilů	90
12.2	Monitorované průtoky	93
12.3	Průběhy odezvy stopovače.....	95
12.4	Vyhodnocení bezdeštných průtoků.....	97
12.5	Kalibrační grafy	98
12.6	Verifikační grafy.....	101
12.7	Vyhodnocení objektivních funkcí odchylek	103
12.8	Analýza efektivity retenční nádrže	104
12.9	Fotografie.....	108

1 Úvod

Antoine de Saint-Exupéry řekl: „*Zemi nedědíme po předcích, nýbrž si ji jen vypůjčujeme od našich dětí.*“ Tato myšlenka výstižně charakterizuje princip udržitelného rozvoje, na který je kladen stále větší a větší zřetel. Stav naší planety, ale i její vývoj a budoucnost, závisí pouze na nás, jsou odrazem našeho způsobu života. Aby mohly další generace žít kvalitní život, je potřeba věnovat dopadům naší činnosti na životní prostředí patřičnou pozornost.

Právě z důvodu zvyšování ochrany životního prostředí, ale také z důvodů nárůstu počtu obyvatel, bývají v současnosti stále častěji rušeny malé čistírny odpadních vod (dále jen ČOV) a dochází k přepojování a čerpání odpadních vod na větší čistírny, které disponují vyspělejšími technologiemi a jsou provozovány s vyšší spolehlivostí. V důsledku tak dochází k efektivnějšímu čištění odpadních vod, menšímu zatížení recipientů, a tedy i životního prostředí.

Aby mohlo dojít k přepojení odtoku na větší ČOV, je nutné znát odtokové charakteristiky povodí a kanalizační sítě. Jelikož zájmové území většinou není vybaveno dlouhodobým monitoringem, lze tyto informace získat krátkodobou monitorovací kampaní, která musí být doplněna o simulační model srážko-odtokových procesů. Model díky popisu chování povodí a kanalizační sítě umožňuje vytvořit optimální návrh přečerpávací stanice odpadních vod.

Tato situace začíná být aktuální v obcích Bukovno a Líny, kde je kapacita společné ČOV nedostačující a zatížení recipientu je nadále nevyhovující. Jako reakce na tuto skutečnost vznikl požadavek na vytvoření simulačního modelu srážko-odtokových procesů oblasti Bukovno–Líny a následnou analýzu návrhu přečerpávací stanice odpadních vod. Právě jeho vypracování je předmětem této bakalářské práce.



[1]

2 Teoretický základ

2.1 Problematika městského odvodnění

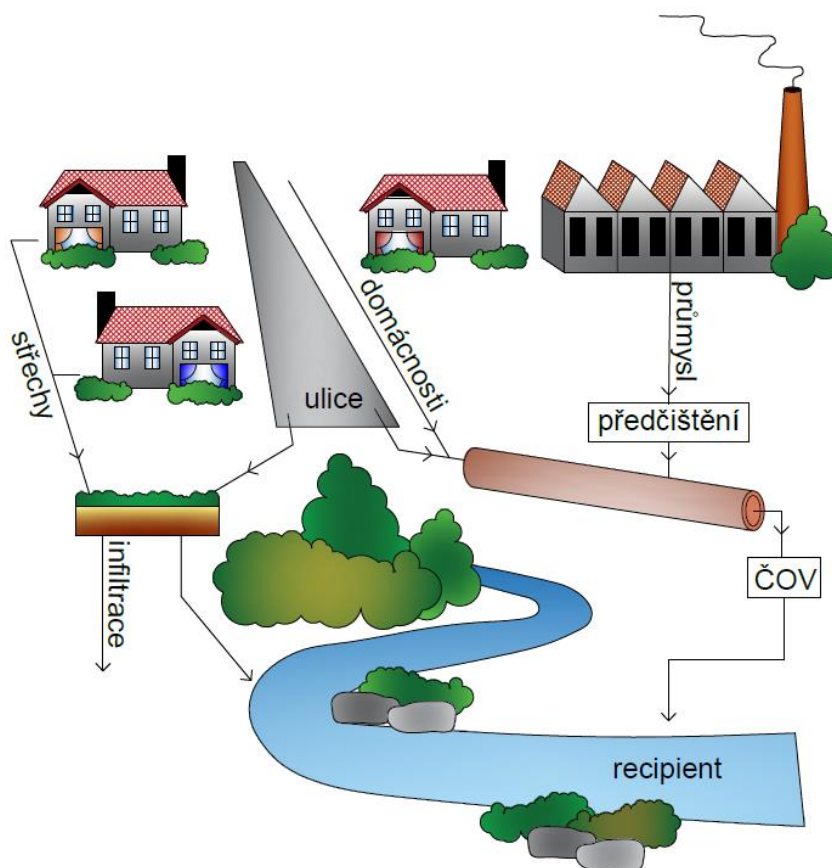
Oborem zájmu městského odvodnění je nejen vznik a transport odpadních vod, ale i jejich čištění v ČOV a vliv odpadních vod na vodní toky a vodní zdroje. Odvádění odpadních vod z urbanizovaného území je velice významné jak pro osobní hygienu obyvatel, tak pro obecnou hygienu zastavěných území, kde zároveň zvyšuje komfort bydlení a přispívá k ochraně nemovitostí před lokálními záplavami. [2] [3] Svou oporu nachází městské odvodnění v legislativě a administrativní struktuře a jeho funkce je zabezpečena vhodným technickým vybavením. [2]

Právě na řešení problematiky hygieny a ochrany nemovitostí byla založena původní koncepce městského odvodnění, která se vyvíjela od první poloviny 19. století. Odvádění odpadních vod se stalo jedním z neodmyslitelných prvků občanské vybavenosti. Tato koncepce však narazila na překážku z hlediska své nedostatečnosti v dlouhodobém zajištění optimálního plnění jejích funkcí, které není možné z důvodu stále stoupajících nákladů a ohrožování stavu vodních toků a vodních zdrojů. [2] Podzemní vody mohou být kontaminovány infiltrací dešťové vody ze silně znečištěných urbanizovaných ploch, či exfiltrací odpadních vod z poškozené kanalizace. U povrchových vod potom může docházet k bodovému znečištění výtoku z ČOV, kde se zvyšuje koncentrace škodlivých látek (například hladina hormonů, která následně ovlivňuje akvatický ekosystém), ke znečištění kvůli umístění odlehčovacích komor, popřípadě potom vodou z výustí oddílné dešťové kanalizace. [2] [4] Mezi další negativní dopady urbanizace na hydrologický systém můžeme dále zařadit snižování hladiny podzemní vody, záplavy způsobené přívalovými dešti nebo například hydraulický stres. [5]

V důsledku tohoto myšlení se v současnosti uplatňuje koncept oboustranné ochrany, tedy ochrana člověka před přírodou, avšak i přírody před člověkem. Proto jde v rámci trvale udržitelného rozvoje v městském odvodnění o snahu dlouhodobě zajistit hygienické a samozřejmě hydraulicky vyhovující odvádění městských odpadních vod zohledňující potřebu ochrany podzemních i povrchových vod. Cílem je taktéž podpora výparu a vsaku, zpomalení odtoku srážkové vody z povodí a využívání akumulované vody např. z dešťových nádrží. Možnost zpomalení odtoku srážkových vod a jejich propojení s městskou zelení podporuje výpar, čímž pozitivně ovlivňuje

městské mikroklima. Důležitým parametrem návrhu odvodnění je zabezpečení vhodných životních podmínek organismů žijících ve vodních tocích a nádržích, ale zároveň zachování požadavků společnosti na využívání povrchových vod, například k rekreaci. [2]

Nová koncepce městského odvodnění se snaží co nejvíce přiblížit přirozenému odvodnění v nezastavěném území zmírňujícímu negativní dopady urbanizace na lokální hydrologický systém i akvatický ekosystém. Oproti technickému odvodnění, které omezuje infiltraci a zmenšuje retenční objemy ploch, čímž podporuje a urychluje povrchový odtok, přirozené odvodnění umožňuje pomalejší odvádění odpadních vod s menším jednotkovým objemem transportované vody vzhledem k dešťovým srážkám a napojuje pouze nezbytné odpadní vody. [2] Systém odvádění odpadních vod založený na nových zásadách znázorňuje Obr. 1.



Obr. 1: Systém městského odvodnění odpovídající novým zásadám; upraveno z [2]

2.2 Druhy odpadních vod

Dle zákona č. 254/2011 Sb., zákon o vodách a změně některých zákonů (vodní zákon): „Odpadní vody jsou vody použité v obytných, průmyslových, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, pokud mají po použití změněnou jakost (složení nebo teplotu) a jejich směsi se srážkovými vodami, jakož i jiné vody z těchto staveb, zařízení nebo dopravních prostředků odtékající, pokud mohou ohrozit jakost povrchových nebo podzemních vod. Odpadní vody jsou i průsakové vody vznikající při provozování skládek a odkališť nebo během následné péče o ně, s výjimkou vod, které jsou zpětně využívány pro vlastní potřebu organizace, a vod, které odtékají do vod důlních.“ [15][6]

Odpadní vody můžeme dělit na jednotlivé typy na základě původu jejich vzniku. [7] Takové rozdělení uvádí norma ČSN 75 6101, která odpadní vody dělí na:

- splaškové,
- průmyslové,
- zemědělské,
- infekční,
- ostatní.

Odpadní vody **splaškové**, nebo též domovní, jsou všechny vody, které vznikly v obytných objektech, zařízeních občanské vybavenosti, hygienických a zdravotnických zařízeních průmyslu a zemědělství. Jde tedy o veškeré vody z WC, koupelen, prádelen, kuchyní, ale také jídelen nebo sprch v závodech. Splaškové vody jsou charakteristické převažujícím organickým znečištěním, které se vyskytuje ve všech formách, od rozpuštěných látek po látky usaditelné. Právě z důvodu vysokého obsahu živin, které se stávají potravou pro bakterie v biologickém stupni čištění, jsou splaškové odpadní vody snáze čistitelné v mechanicko-biologické čistírně odpadních vod. Jejich kvalita bývá ustálená a odtok má pravidelný denní průběh. [7] [8]

Vody použité při výrobním procesu jako vody technologické nebo chladicí nazýváme odpadními vodami **průmyslovými**. Tento typ odpadních vod se vyznačuje svou proměnlivou kvalitou a množstvím, které kolísá v závislosti na charakteru používané výrobní technologie. Jiný objem odpadních vod bude vytvářet výroba papíru a jiný zase kovovýroba a kvalita odpadních vod bude rovněž odlišná.

Průmyslové vody mohou být odváděny kanalizací pouze za předpokladu, že jejich charakter neohrozí technický stav a provoz stokové sítě a zároveň negativně neovlivní technologie na ČOV. Příloha č. 15 k vyhlášce č. 428/2001 Sb. udává maximální přípustné limity znečištění, při kterých ještě mohou být průmyslové vody odváděny spolu se splaškovými. Další limity a omezení následně určuje příslušný kanalizační řád. Jsou-li limity překročeny, je nutné vodu před vypuštěním předčistit. [7] [8]

Zemědělskými nazýváme hlavně odpadní vody z provozoven zemědělské živočišné výroby, například oplachové vody z mléčnic. Zemědělské odpadní vody disponují vysokým obsahem dusíku a často také fosforu a draslíku, které se do vody dostanou splachy z hnoje. [8]

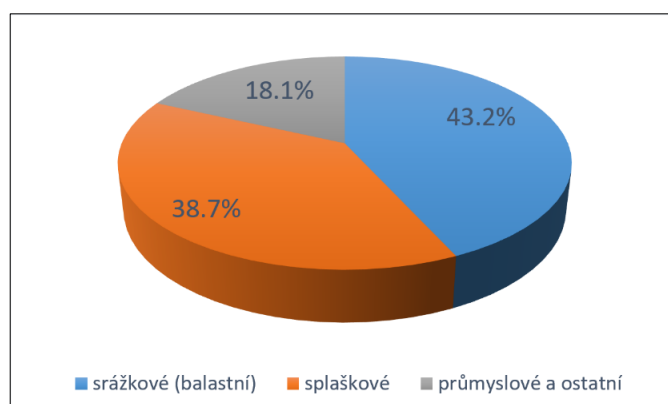
Odpadní vody pocházející z infekčních oddělení nemocnic, TBC sanatorií, výroben očkovacích sér, mikrobiologických laboratoří nebo například kafilérií (likvidace vedlejších živočišných produktů) jsou odpadní vody **infekční**. [8] Infekční odpadní vody představují velké zdravotní riziko kvůli choroboplodným zárodkům, které se v nich vyskytují a jsou zdrojem nemocí. Právě z tohoto důvodu vyžadují zvláštní režim zacházení. [9] Infekční odpadní vody bývají buď odváděny samostatným oddílným systémem a před vypuštěním do veřejné kanalizace důkladně hygienicky zabezpečeny nebo musí být čištěny přímo v místě jejich vzniku. [8] Hygienické zabezpečení probíhá chemicky nebo například dezinfekcí pomocí sterilizace v autoklávech. Způsoby a podmínky zacházení s odpadními vodami ze zdravotnických zařízení uvádí norma ČSN 75 6406. [10]

Ostatní odpadní vody mají jiný původ a bývají spojeny se vznikem mimořádných okolností.

Norma jako odpadní vody uvádí i vody **srážkové**. Ty se ale dle § 5, odst. 3 vodního zákona (z. č. 254/2001 Sb.) stávají odpadními až ve chvíli, kdy se v jednotné kanalizaci smísí s vodami odpadními, jinak jsou považovány za vody povrchové. [6] Do stokové sítě vnikají odtokem ze střech, nezpevněných i zpevněných povrchů, a to přípojkami nebo uličními vpustmi. Jejich množství, stejně jako kvalita, se odvíjí od intenzity a doby trvání deště, zároveň ale i od velikosti, sklonu a charakteru odvodňovaného území. Srážkové odpadní vody lze dále dělit na znečištěné a neznečištěné. Pokud přitékají ze znečištěných povrchů, silnic nebo výrobních areálů, považujeme je za srážkové vody znečištěné. Je-li ale původ srážkových vod na komunikacích

s nízkou hustotou provozu, střeších, pěších zónách, v parcích apod., jedná se o srážkové vody neznečištěné. Znečištění atmosférických srážek může být způsobeno i vymýváním atmosféry nebo reakcí s různými materiály. [7] [8] K nejzásadnějšímu znečištění dochází krátce po započetí dešťové události („first flush“). [2] Znečištění srážkových vod je proměnlivé a je tvořeno anorganickými i organickými látkami ve všech formách.

Podstatnou složku vod ve stokové síti tvoří vody **balastní**. Vody z bodových zdrojů, které jsou neznečištěné a neodváděné do stokové sítě, nejsou považovány za odpadní vody a je snaha je samostatně odvádět do recipientu nebo zasakovat. Dostanou-li se ale tyto vody do kanalizace, ať už z bodových zdrojů nebo netěsnostmi stoky, označujeme je jako balastní. Norma ČSN 75 0161 balastní vody definuje jako „*nežádoucí přítok vody do stokového systému a přípojek (převážně přítok podzemní vody netěsnostmi systému)*“. [11] Norma ČSN 75 6401 uvádí, že nátok balastních vod do kanalizace by měl být maximálně 15 % z denního průměrného bezdeštného přítoku [12], reálně ovšem tato hodnota dosahuje i 50 % [13]. Balastní vody navyšují průtok, což snižuje kapacitu potrubí stok, dochází k častějším přepadům na odlehčovacích komorách, či zvyšují náklady na čerpání. Zatěžují tak jak stokovou síť, tak jednotlivé technologické stupně ČOV. Dále balastní vody způsobují ochlazení transportovaných odpadních vod, což v důsledku snižuje účinnost biologického čištění v ČOV, které pro množení bakterií vyžaduje určitou teplotu. [8] V oddílných splaškových stokách jsou balastními vodami vody srážkové, které mohou průtok zásadně navyšovat. Zastoupení jednotlivých odpadních vod v celkovém objemu čištěných vod v ČR roku 2019 demonstruje Obr. 2.



Obr. 2: Procentuální zastoupení odváděných odpadních vod za rok 2019 podle [14]

Každému návrhu kanalizace vždy předchází bilance charakteru odpadních vod a požadavků na jejich odvádění a zneškodňování. Složení transportovaných odpadních vod má významný vliv na výběr materiálu, ale i profilu potrubí a dalších parametrů stokové sítě. [8] Podle zákona č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu, „je přípustné vypouštění odpadních vod do kanalizace pouze, pokud je v souladu se schváleným příslušným kanalizačním řádem kanalizace a pokud jsou splněny podmínky uzavřené smlouvy o odvádění odpadních vod do kanalizace“. Každý žadatel, který chce do kanalizace vypouštět odpadní vody vyžadující předčištění (odlučovače tuků, olejů apod.), potřebuje schválení vodoprávního úřadu a musí doložit potvrzení o neškodnosti vypouštěných odpadních vod pro stokovou síť a ČOV a potvrzení o plnění limitů stanovených normou. [15]

2.3 Stokové soustavy

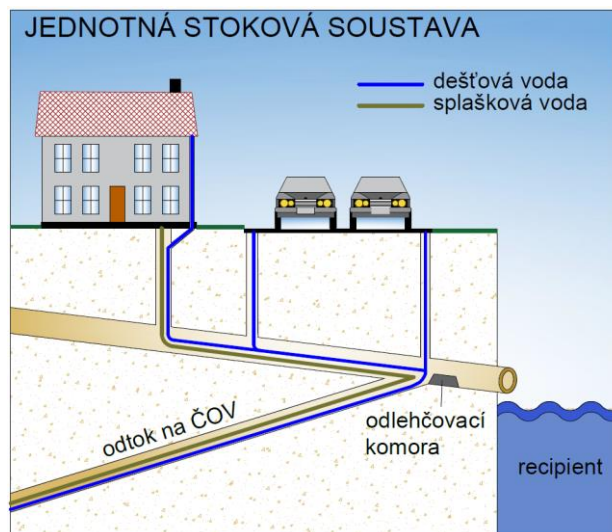
Stoková síť je soustava dílčích stok, účelně spojených s ohledem na dispozici terénu i recipientu, počet obyvatel, stávající odkanalizování aj., k odvádění znečištěných vod z osídlených území. První systematické odkanalizování vzniklo začátkem 70. let 19. století. [8]

Podle způsobu odvádění odpadních vod dělíme stokové systémy na 3 základní typy:

- jednotná soustava,
- oddílná soustava,
- kombinovaná soustava.

Jednotná stoková soustava (schematicky vyobrazená na Obr. 3) směřuje všechny druhy odpadních vod a zajišťuje jejich dopravu na ČOV. Protože odvádí i vody obsahující fekální znečištění, musí být stoky vždy zatrubněny [16] a měly by být vždy vedeny pod úroveň vodovodu. Návrh jednotné soustavy se provádí na součet průtoků (extrémní průtok) všech dílčích odpadních vod, které odvádí. Největší podíl na extrémním průtoku mají potom vody srážkové. Aby nemuselo dojít ke zvětšení potřebného profilu potrubí a aby byl zajištěn požadovaný přítok na ČOV, osazuje se jednotná stoková síť odlehčovacími komorami. Při deštích přepadají zředěné odpadní vody přes přeliv a jsou odváděny přímo do recipientu. Odlehčovacími komorami tak vzniká přímé spojení mezi stokou a recipientem, což může způsobit znečištění vody v recipientu. K eliminaci tohoto projevu lze využít mechanicky stírané česle osazené v odlehčovacích komorách, mokřady, vírové separátory, či dešťové nádrže (záchytné,

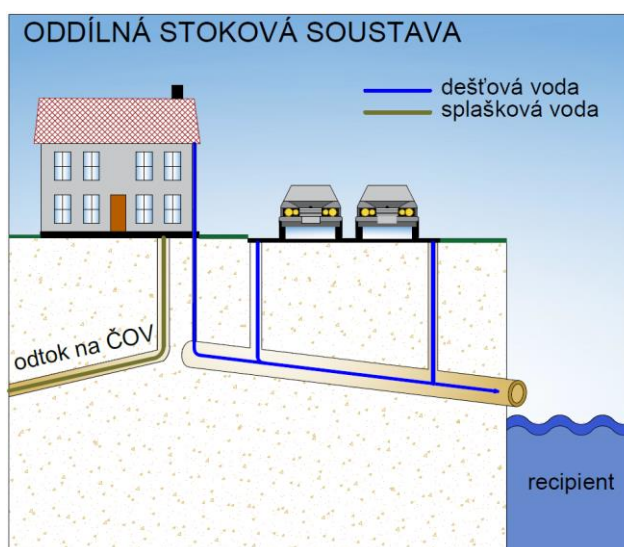
průtočné) vystavěné jako nižší stupeň předčištění, či v případě záchytných dešťových nádrží jako retenční zařízení. Další metodou proti znečištění recipientu při dešti je využití přirozené nebo umělé retence odpadních vod s postupným vypouštěním na ČOV. [17] Při nátoku zředěných odpadních vod dochází vlivem nižšího obsahu živin a nižší teploty ke snížení účinnosti biologického stupně čištění v ČOV. Zároveň může s větším objemem odpadních vod dojít k hydraulickému zatížení některých objektů ČOV. Při dešťové události dochází k proplachu potrubí a tím se snižuje riziko jeho zanášení. Pokud však ke srážkám dojde po delším bezdeštném období, vyplachuje se ze stoky do recipientu i usazené znečištění. Jednotná stoková soustava není vhodná do suchého klimatu nebo do oblastí s málo vodným recipientem, a to z důvodu nedostatečného zředění odlehčené vody v recipientu. Vzhledem k tomu, že jde při výstavbě pouze o jedno potrubí, může být jednotná soustava z hlediska investic považována za výhodnější. Na území ČR je většina sídel odvodňována právě tímto typem soustavy. V současné době se jednotné kanalizace nenavrhují a je snaha od nich zcela upustit. [8] [17]



Obr. 3: Jednotná stoková soustava; upraveno z [18]

Soustava odvádějící splaškovou a dešťovou odpadní vodu samostatně je označována jako **oddílná** a je řešením pro eliminaci znečištění recipientu odlehčenými vodami. Pro dešťovou stoku vedoucí v souběhu se splaškovou se navrhují větší profily, pro menší obce lze potom využít otevřené příkopy, vodoteče apod. U splaškové stoky (vždy zatrubněné [16]) se pro menší obce navrhuje profil maximálně 300 mm. [8] Obecně platí, že stoka pro splaškovou odpadní vodu by měla být vždy pod úrovní vodovodu. Díky oddílné dopravě srážkových a splaškových vod je čištění v ČOV

účinnější. Na druhou stranu je tato soustava náchylnější na zanášení kvůli menším profilům, a proto je potřeba uměle proplachovat alespoň úseky s minimálním sklonem. Vedení dvou potrubí může být investičně, a samozřejmě i prostorově, náročnější, pokud se obě nově budují. Existuje však možnost rekolaudace jednotné soustavy na dešťovou oddílnou a následně stačí výstavba stoky splaškové. Tato varianta je ale organizačně velmi náročná. Oddílná stoková soustava je vhodná pro malé obce nebo kanalizace nově budované, dále pak pro oblasti s málo vodným recipientem, neboť nedochází k přímému napojení stoky a recipientu přes odlehčovací komory, které nejsou na oddílné síti potřeba. [8] [17] Oddílnou stokovou soustavu zachycuje Obr. 4. Obecně lze říct, že optimálním řešením odvádění odpadních vod je kombinace oddílné stokové soustavy s decentrálním řešením dešťových vod.



Obr. 4: Oddílná stoková soustava; upraveno z [18]

Každá z výše uvedených soustav má své nedostatky, které se snaží eliminovat **kombinovaná** stoková soustava. Návrhu této varianty předchází podrobný technicko-ekonomický rozbor hodnotící nejdůležitější morfologické, urbanistické, hydrologické a provozní faktory zájmového území a aspekty navrhovaného řešení. Nejčastěji se používají dvě varianty, prostá kombinace jednotné a oddílné soustavy nebo modifikovaná verze oddílné soustavy, tzv. „polooddílná“. První verze může vypadat například tak, že převážná část zájmového území bude odvodňována jednotnou soustavou a menší nebo okrajová část za přirozenou rozvodnicí bude řešena soustavou oddílnou. Modifikovaná verze je mnohem rafinovanější. Dešťová stoka je používána pouze pro neznečištěné srážkové vody, které jsou dále vedeny přímo do recipientu, zatímco znečištěné srážkové vody jsou odváděny se splašky na ČOV.

Popřípadě lze využít spojovacího potrubí, kdy na začátku dešťové události dochází při prvním oplachu k silnému znečištění srážkových vod, které natékají do dešťové stoky. [2] Dešťová stoka je propojena se stokou splaškovou spojovacím potrubím. Voda z prvního oplachu se tak dostane spojovacím potrubím do splaškové stoky a je odvedena spolu se splašky na ČOV. Po zahlcení spojovacího potrubí odtéká neznečištěná dešťová voda přímo do recipientu. Kombinovaná soustava je sice šetrnější k životnímu prostředí, je ale každopádně investičně náročnější, potřebuje větší dimenze potrubí a oplachová voda ve splaškové stoce může zapříčinit hydraulické přetížení sítě a snížení účinnosti ČOV. [8] [17]

Výše uvedené možnosti odvádění odpadních vod se ovšem z dlouhodobého hlediska jeví jako neudržitelné, a proto v posledních desetiletích dochází k vývoji odvodňovacích systémů zahrnujících **hospodaření s dešťovou vodou**. Postupně se tak upouští od tradičních systémů a větší pozornost je kladena na tzv. **decentralizovaný** (nebo také **decentrální**) **systém** odvodnění, jehož základním kritériem je právě udržitelnost. [4] Tento systém odvodnění se snaží maximálně přiblížit přirozenému lokálnímu koloběhu vody povodí a odvést tak vodu cestou jejího přirozeného koloběhu v přírodě, a to prostřednictvím decentrálních objektů, které dešťovou vodu zadržují, vsakují, vypařují a čistí v blízkosti jejího dopadu na zemský povrch. [19] Mezi objekty decentralizovaného systému odvodnění patří vegetační a šterkové střechy, propustně zpevněné povrchy, vsakovací průlehy, nádrže, rýhy a šachty, podzemní vsakovací bloky, suché nebo podzemní retenční nádrže, retenční nádrže se zásobním prostorem, umělé mokřady a objekty k předčištění dešťových vod. [5]

V rámci decentralizovaného systému odvodnění je potřeba důrazně rozlišovat a oddělovat neznečištěné a znečištěné srážkové vody z důvodu ochrany kvality podzemních a povrchových vod. Znečištěné srážkové vody je před zahrnutím do přirozeného koloběhu nutné předčistit. [5]

Hospodaření s vodou stojí na třech základních principech [19]:

- Redukce a transformace odtoku probíhá v místě dopadu deště.
- Dešťová voda se nemíchá se splaškovou.
- Množství odtoku z urbanizované oblasti je stejné jako z přirozeného povodí.

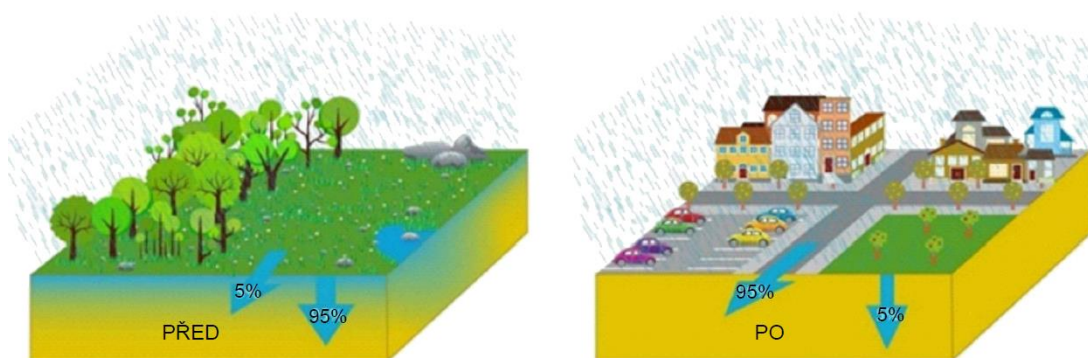
Takovýto způsob odvádění vod snižuje objem i maxima povrchového odtoku, čímž následně snižuje jak hydraulické, tak látkové zatížení toků. Zároveň méně zatěžuje ČOV a účinnost čištění se tak nesnižuje. V rámci návrhu stokové sítě lze díky decentrálním objektům navrhnout menší profily stok. Mezi nesporné výhody tohoto systému patří obnova zásob podzemních vod a recipientů v období sucha. Vodu akumulovanou v nádržích na soukromých parcelách lze využívat jako vodu užitkovou, například ke splachování WC, závlahám apod., a tím snížit spotřebu vody pitné. Decentralizovaný systém se snaží propojit odtok dešťové vody s městskou zelení a podpořit tak výpar jakožto základní prostředek zlepšení městského mikroklimatu. Jednotlivé objekty lze umisťovat do veřejné zeleně, kde mohou do jisté míry plnit i funkci estetickou. [5]

2.4 Srážko-odtokové procesy

Srážko-odtokovým procesem nazýváme odtok hydrologických srážek spadlých na dané území. Velikost a průběh odtoku srážek jsou ovlivněny hydrologickými srážkami, charakterem místního prostředí (klíma, roční období...), charakterem povrchu (spád, rostlinný pokryv...) a podloží (hladina podzemní vody, propustnost...) a parametry odvádějícího koryta (tvar, drsnost...). [2]

V osídlených oblastech se odtok liší významem a průběhem dílčích procesů odtoku hydrologických srážek. Hlavní příčinou těchto odlišností mezi přirozeným a urbanizovaným povodím tvoří především rozdíl v propustnosti povrchu [5] a existence stávajícího systému odvodnění v daném urbanizovaném území. [2]

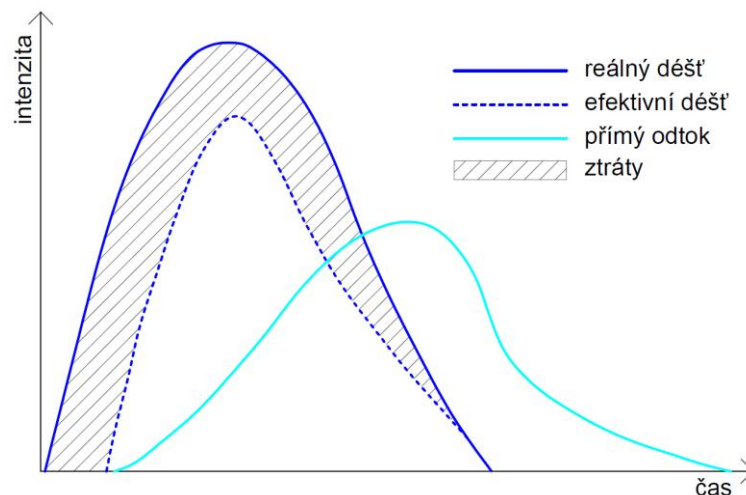
Odlišnost v rozdělení odtoku z přirozeného a urbanizovaného území znázorňuje Obr. 5.



Obr. 5: Vliv urbanizace na odtok vody z povodí [20]

V urbanizovaném území je převládajícím procesem přímý odtok, který lze označit za „rychlou složku odtoku hydrologických srážek“. „Pomalou složkou odtoku“ potom označujeme vodu infiltrovanou, popř. odváděnou drenážemi nebo netěsnostmi kanálů. [2]

Přímý dešťový odtok je popisován zpravidla ve třech krocích, jimiž jsou **tvorba dešťového odtoku, koncentrace dešťového odtoku a proudění ve stokové síti**. Tvorbu a koncentraci přímého dešťového odtoku graficky demonstruje Obr. 6.



Obr. 6: Znárodnění tvorby a koncentrace přímého dešťového odtoku; upraveno z [2]

Tvorba dešťového odtoku popisuje zachycení části reálného deště povodím, a to smáčením, povrchovou retencí, infiltrací, výparem a dalšími jevy, celkově označovanými jako **ztráty**. Po odečtení všech ztrát od reálné hydrologické srážky získáváme hodnoty **efektivního deště**.

Tento krok srážko-odtokového procesu je charakterizován především velikostí ztrát a momentálním nasycením povodí vodou. Těmto projevům povodí říkáme „připravenost k odtoku“. Pokud jsou všechny infiltrace schopné plochy plně nasyceny, veškeré nerovnosti povrchu povodí zcela naplněny, a i smáčení povrchu povodí je úplné, hovoříme o tzv. „úplné připravenosti k odtoku“ – všechna voda z dešťových srážek spadlá na takovéto povodí ihned přímo odtéká. [2]

Tvorbou dešťového odtoku můžeme tedy označit transformaci reálného deště na dešť efektivní odečtením ztrát. Dílčí procesy tvorby ztrát lze popisovat pomocí velmi zjednodušených modelů fungujících na principu jednoduchých matematických funkcí, jejichž parametry bývají zpravidla stanovovány empiricky. [2] Celkové ztráty vody v povodí tvoří:

Smáčení povrchu (intercepce): Smáčením rozumíme zadržení části srážky na povrchu předmětů nebo vegetace. Takto zachycená voda může být vypařována zpět do atmosféry nebo nakonec steče na zemský povrch. Velikost ztrátové výšky je závislá na druhu povrchu a jeho zastoupení v povodí, na místní vegetaci a jejím sezónním stavu, samozřejmě také na srážce jako takové (srážkové výšce, intenzitě, dešťových přestávkách atd.), na výparu a celé řadě dalších faktorů. Za ztrátovou výšku lze zjednodušeně považovat hodnotu kapacity intercepce C_S , kterou lze odečíst z příslušných tabulek. [2] [21]

Povrchová retence: Po dosažení úplného smáčení, tedy C_S , dále dochází ke ztrátám povrchovou retencí neboli plněním prohlubní v povrchu povodí. Ztrátová výška povrchové retence lze stanovit pomocí rovnice pro aktuální plnění prohlubenin nebo lze zjednodušit na hodnotu kapacity povrchové retence C_R , kterou lze rovněž nalézt v příslušných tabulkách. [2]

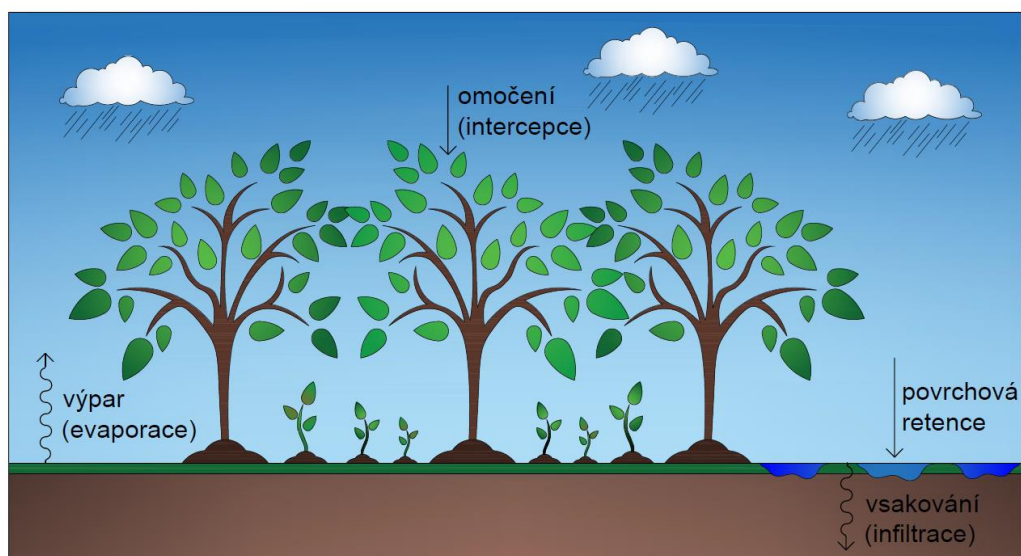
Vsakování (infiltrace): Infiltrace je jedním z nejdůležitějších procesů tvorby ztrát. Nejzásadnějších hodnot nabývá na propustných plochách, není ale vyloučena infiltrace v plochách zpevněných (puklinami v chodníku, stářím betonu apod.). Pro zjištění celkových ztrát infiltrací je pro urbanizovaná území nejvíce využíván Hortonův model [2], který předpokládá, že infiltrace začíná při určité počáteční hodnotě a s časem exponenciálně klesá na hodnotu konečnou. [21] Počáteční a konečné („rovnovážné“) hodnoty infiltrace jsou potom závislé na sklonu a drsnosti povodí, půdních vlastnostech a rostlinném porostu. Po skončení dešťové události dochází k obnově schopnosti půdy opět vodu infiltrovat. Tomuto procesu říkáme „regenerace půdy povodí“ a probíhá výrazně pomaleji než redukce schopnosti infiltrace. [2]

Výpar (evaporace): Procesem, ke kterému dochází během celé dešťové události i po ní, je výpar. V průběhu srážky nemá nijak zásadní význam. Toho ale nabývá právě v dešťových přestávkách, kdy ovlivňuje podmínky v povodí pro další dešťovou událost. [2] Výpar je určen třemi faktory:

- tepelným zářením (sluneční energií),
- stavem vlhkosti na povrchu a odváděním páry z povrchu, tedy rychlostí větru nad povrchem,
- specifickým vlhkostním gradientem. [21]

Hodnota výparu je pro středoevropské podmínky obvykle brána 1–3 mm/den. [2]

Výše uvedené ztráty schematizuje v přirozeném prostředí Obr. 7.



Obr. 7: Ztráty vody v přirozeném povodí

Ostatní ztráty („trvalé“): Odtok vody ze zpevněných ploch, který není dále odváděn kanalizací a zasakuje se tak na propustných plochách, označujeme jako ztráty trvalé. Ty vznikají unášením vody větrem nebo například rozstříkem při průjezdu dopravních prostředků. Trvalé ztráty bývají často nejvýznamnější částí celkových ztrát. Dosahují i 15 % dešťové srážky a v oblastech s hustým dopravním provozem může být tato hodnota podstatně vyšší. Tento typ ztrát nelze popsat fyzikálními postupy a tvoří hlavní důvod nutnosti kalibrace modelu. [2]

Plošný a postupně se soustřeďující odtok do systému odvodnění nazýváme **koncentrací dešťového odtoku**.

Posledním krokem dešťového odtoku je v urbanizovaném území **proudění v síti**.

Modely popisu všech výše uvedených procesů jsou uvedeny v kapitole 2.5.2.

2.5 Nástroje pro popis srážko-odtokových jevů

Pro popis srážko-odtokových procesů na existujících stokových systémech používáme simulační modely, které je nutno kalibrovat. Někdy je nutné obstarat pro kalibraci vlastní data, a proto probíhá proces monitoringu, tedy měření srážek a průtoků v síti zájmového území.

2.5.1 Monitoring

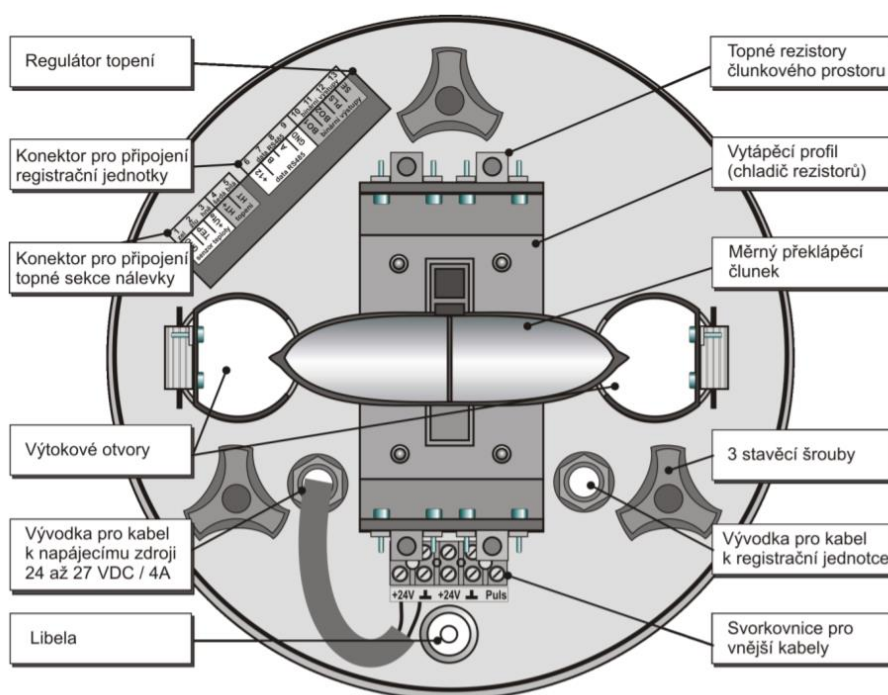
Sledování a vyhodnocování stavu měřené skutečnosti a jejího vývoje se nazývá monitoring. [2] Výstupem monitoringu jsou časové řady dat dále sloužící jako podklad pro kalibraci simulačních modelů. Pro kalibraci modelu je důležité získat data o různém průběhu srážek, tedy o dlouhých a méně intenzivních deštích, ale i deštích přívalových, a zároveň data o průtocích ve stokové síti. Nejvhodnější období pro monitoring za účelem následné kalibrace simulačního modelu je období s vyšší pravděpodobností výskytu přívalových dešťů. V našich podmínkách tak jde o období dubna až října. [22] Data jsou ze své podstaty neopakovatelná a tedy jedinečná, proto je potřeba jejich získávání věnovat potřebnou pozornost a pečlivost.

Monitoring srážek

Pro měření srážek je využíváno množství přístrojů, obecně nazývaných srážkoměry. [23] Přesnost měření je závislá na jejich umístění a hustotě rozmístění v oblasti. Až na meteorologické radary jde o získávání bodových dat.

Překlopné člunkové srážkoměry: Nejpoužívanějším a doporučeným přístrojem pro měření srážek v městském odvodnění je překlopný člunkový srážkoměr. Jde o nádobu osazenou trychtýřem o zachytné ploše 200 nebo 500 cm², ze které natéká voda do vahadla se dvěma nádobkami, tzv. překlopného člunku. Po naplnění jedné nádobky se člunek překlopí, první nádobka se vyprázdní a druhá se současně začne plnit. Jedno překlopení znamená zachycení určitého objemu vody, který v přepočtu na zachytnou plochu udává srážkový úhrn. Celkový úhrn srážky je potom dán počtem překlopení při dešťové události. Intenzitu deště lze stanovit z frekvence překlápění člunku. Tento typ měření umožňuje měřit i pevné srážky. V tom případě ale musí být zachytná plocha opatřena vyhříváním a teplotním čidlem. Vyhříváním trychtýře zároveň dochází k výparu, s čímž je potřeba kalkulovat. Při měření pevných srážek je důležité si uvědomit, že v reálném povodí odtékají pevné srážky se znatelným

časovým posunem. [23] [24] Schéma základní desky vyhřívaného typu představuje Obr. 8.



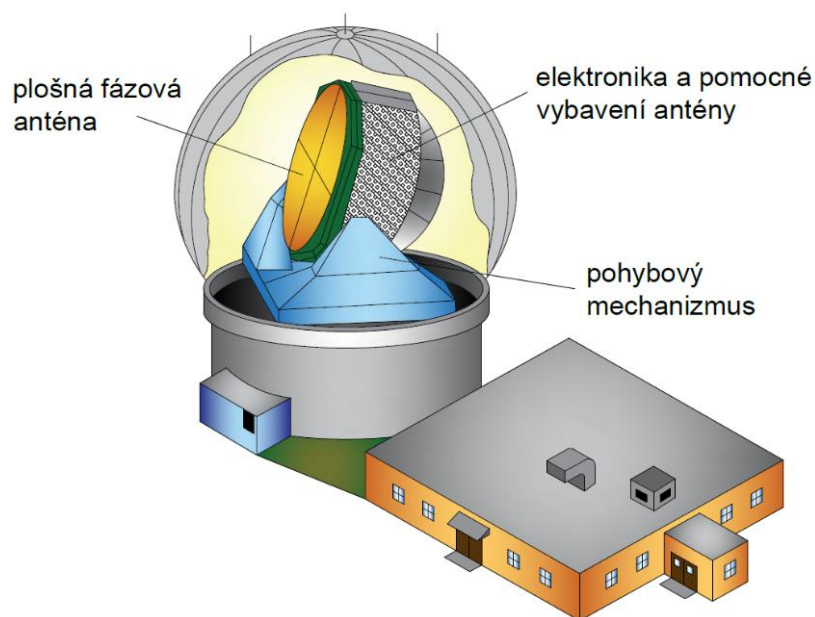
Obr. 8: Základna vytápěného srážkoměru SR03/V [25]

Nejistoty při měření člunkovým srážkoměrem dosahují 3 až 30 %. Systematickými chybami měření jsou ztráty způsobené větrem, výparem nebo například rozstříkem. Náhodné chyby mohou být způsobeny chybou v přenosu dat, ucpaním nálevky nebo jakýmkoli jiným narušením mechanické a elektrické funkce srážkoměru. Chyby však mohou vzniknout už při samotné kalibraci. Chyby při kalibraci může způsobovat například kapka, která ulpí mezi člunkem a stavěcím šroubkem, a která působením kapilárních sil může překlápění člunku oddálit. Opačný efekt může způsobit síla dopadu kapky do člunku, která může překlápění urychlit. Při reálném měření natéká voda od určité vydatnosti do člunku kontinuálně, tedy nekape, a proto při překlápění chvíli teče do špatné strany člunku, čímž vzniká chyba, která se s rostoucí vydatností zvyšuje. [23]

Je-li srážkoměr používán k dlouhodobému monitoringu, je doporučeno přístroj kalibrovat minimálně jednou za dva až čtyři roky. Pro střednědobé a krátkodobé monitorovací kampaně je vhodné srážkoměr kalibrovat před každou instalací v terénu. Kalibraci rozeznáváme dvojího typu, a to kalibraci statickou a kalibraci dynamickou. Statická kalibrace podává informaci o potřebě seřízení samotného člunku, zatímco

dynamická kalibrace zachycuje odchylky během měření testovaných vydatností a jejím výsledkem je kalibrační křivka udávající vztah mezi intenzitou deště a chybou měření. [23]

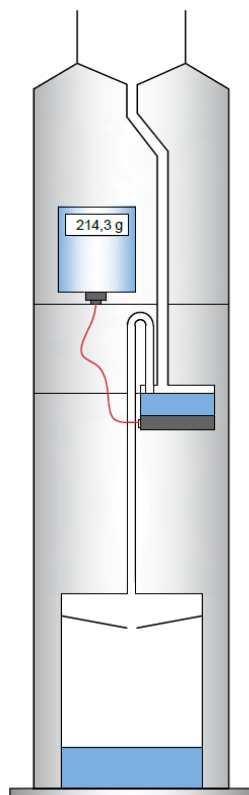
Meteorologické radary: Měření srážek pomocí meteorologických radarů (schematicky zobrazen na Obr. 9) je založeno na schopnosti dešťových částic odrazet radiové vlny. Radar vysílá do atmosféry úzký svazek krátkých elektromagnetických pulzů a následně anténou přijímá odraženou energii. Na základě rychlosti odrazu a množství odražené energie lokalizuje srážku a odhaduje její intenzitu. Dále umí meteorologický radar zjistit rychlost a směr postupu srážky nebo její plošné rozložení. Pro kvalitní výsledky měření není zapotřebí tak hustá síť stanic jako u ostatních metod měření a jde o nejrozšířenější metodu plošného monitoringu. Přesto jde o investičně nákladnou technologii s vyššími nároky na instalaci a vyhodnocování dat. Podle vlnové délky vysílaného signálu rozlišujeme pásmo C s vlnovou délkou 5 nebo 3 cm a pásmo X s kratší vlnovou délkou (do 2,5 cm). Horizontální rozlišení dvou meteorologických radarů měřících v pásmu C provozovaných ČHMÚ (Brdy a Skalka) je 2 x 2 km (po optimalizaci 1 x 1 km), a proto nejsou tyto radary pro měření v městském prostředí vhodným řešením. Pro „jemnější“ rozlišení je nutné zakoupit radar měřící v pásmu X, který je sice dostupný, oproti bodovým srážkoměrům však výrazně dražší. [23] [26]



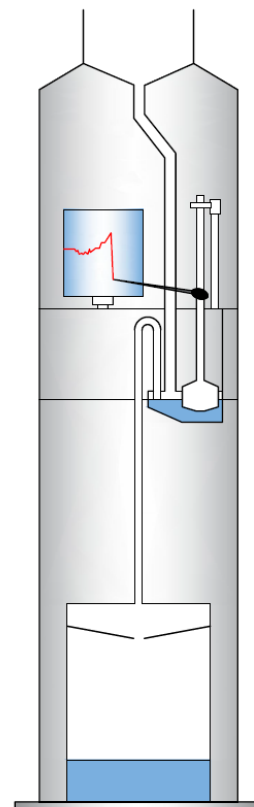
Obr. 9: Schéma meteorologického radaru; upraveno z [27]

Váhové srážkoměry: Tento typ srážkoměru je založen na principu záznamu změny hmotnosti v nádobce pomocí elektronických vah. Váhy měří změnu hmotnosti s přesností až 0,1 g. Jde o metodu měření velice citlivou, ale zároveň také investičně poměrně nákladnou. Váhové srážkoměry lze těžko zbavovat nepříznivých jevů jako je působení větru, vnikání nečistot nebo výpar. [23] Schéma váhového srážkoměru představuje Obr. 10.

Ombrografy: Ombrografem (Obr. 11) rozumíme komoru s plovákem a registračním zařízením, na níž je nasazena kónická sběrná plocha, po které stéká zachycená voda. Voda vtéká do komory s plovákem ovládajícím registrační pero, které zaznamenává úhrn srážek za 24 hodin na registrační papír dělený po 1 mm úhrnu. Při naplnění komory dojde k zahlcení násosky, která komoru následně poměrně rychle vyprázdní. Nevýhoda ombrografů spočívá v jejich vysoké poruchovosti (ucpání násosky, porucha plováku...) a nepřesném vyhodnocování záznamu, a proto se od jejich použití ustupuje. Novější ombrografy jsou místo plováku vybaveny ultrazvukem, který měří vzdálenost hladiny, tedy hloubku vody v komoře, a je provozně spolehlivější. [23]



Obr. 10: Schéma váhového srážkoměru



Obr. 11: Schéma ombrografu; upraveno z [28]

Optické srážkoměry (disdrometry): Méně používanou metodou měření srážek jsou disdrometry založené na principu laserového paprsku, který je schopen zaznamenávat tvar, velikost i rychlost hydrometeorů (= vodních částic) větších než 0,16 mm, které paprskem proletí. Díky těmto schopnostem je možné měřit nejen vydatnost, ale i typ srážky. Přístroj je však zatížen chybami způsobenými například průletem hmyzu, či částecek prachu apod. [23]

Akustické srážkoměry: Zajímavým způsobem měření srážek je měření akustickými srážkoměry spočívajícími na principu „bubnování“ kapek o membránu nebo vodní hladinu. Pod plochu nárazu kapek je umístěn mikrofon zaznamenávající zvuky, z jejichž intenzity lze následně vyhodnotit intenzitu a úhrn srážky. Pro městské odvodnění je tato metoda nevhodná už kvůli vysoké citlivosti na okolní hluk. [23]

Mikrovlnné spoje mobilních sítí: Vysoký potenciál má měření srážek pomocí komerčních mikrovlnných spojů, jako je síť spojů pro mobilní telefony, která neustále expanduje. Mikrovlnný signál je tlumen úměrně srážkové aktivitě mezi jednotlivými stanicemi. Dešťové kapky totiž absorbují část mikrovln a dochází k rozptylu svazku signálu. Čím je kapek více a čím jsou kapky větší, tím vyšší je útlum signálu. Naměřená hodnota signálu je porovnávána s referenčními hodnotami naměřenými v průběhu slunečných dní. [29] Přesnost měření je ovlivněna přesností jednotlivých mikrovlnných spojů a jejich rozložením v síti. Tato metoda zachycuje časoprostorovou variabilitu srážek lépe než běžné srážkoměry právě díky hustotě sítě, což je výhodné u silných srážek, které jsou rozhodující pro návrh městského odvodnění. [30]

Umístění srážkoměrů

Počet instalovaných srážkoměrů je určen na základě členitosti zájmového území a potřeby jeho prostorového pokrytí. Za účelem kalibrace je vhodné do malých území umístit jeden srážkoměr, do větších potom alespoň tři. [31]

Umístění srážkoměru je doporučeno do volné plochy, aby měly ke srážkoměru přístup srážky ze všech směrů. Vzdálenost od okolních objektů je doporučeno udržovat na tři až pěti násobku výšky objektu nad sběrnou plochou srážkoměru. V našich podmínkách je vhodné srážkoměr instalovat ve výšce jednoho metru nad terénem, což je v urbanizovaném území těžko dosažitelné, proto bývá ve městech instalován na objekty do tří metrů výšky nad terénem. Při výběru lokality je nutné dbát na dostatečnou vzdálenost od závlahových systémů nebo od ornitologicky

významných koridorů. Správnou funkci srážkoměru mohou narušit i otřesy z přilehlých frekventovaných komunikací apod. Neméně podstatným kritériem je snaha minimalizovat možnost odcizení nebo poškození vandalismem. [23]

Monitoring průtokových charakteristik ve stokové síti

Druhou oblastí monitoringu pro srážko-odtokový proces je **monitoring průtokových charakteristik ve stokové síti**. Množství odpadních vod se stanovuje přímým měřením v konkrétních, předem dobře vybraných, místech povodí. Měření v gravitační kanalizaci se splaškovými odpadními vodami je zatíženo chybami vzniklými kvůli zachycení plovoucího znečištění přístroji, zhoršeným klimatickým prostředím ve stoce nebo vlněním hladiny. Volba přístroje pro měření průtoku je velmi zásadní a při rozhodování je potřeba zaměřit se na všechny možné charakteristiky přístroje. Výběr tak závisí na kvalitě transportovaných odpadních vod a rozsahu měřeného průtoku, investičních a provozních nákladech, na chybovosti měření, energetické ztrátě, požadavcích na instalaci nebo například možnosti dálkového sběru dat. Pro sledování množství odpadních vod v kanalizaci můžeme používat metody založené buď na měření hladiny nebo hladiny a rychlosti proudu. Zvláštním případem je potom měření látkové koncentrace rozpuštěných látek. Průtok jako takový totiž nelze měřit přímo, a proto měříme zástupnou veličinu, ze které následně průtok dopočítáváme.

Jednu z možností představuje měření rychlosti v [m/s] a výšky hladiny h [m]. Díky znalosti geometrie potrubí lze pomocí změřené výšky hladiny dopočítat plochu průtočného profilu S [m²]. Jejím vynásobením naměřenou hodnotou rychlosti získáme průtok Q [m³/s], tj. aplikujeme rovnici kontinuity (1). Při této metodě je podchyceno hysteretní chování konzumpční křivky.

$$Q = v \cdot S \quad (1)$$

Druhou možností je měření pouze hladiny h [m], kdy ze znalosti geometrie potrubí dokážeme vypočítat plochu průtočného profilu S [m²] a omočený obvod O [m]. Dle rovnice (2) lze následně spočítat hydraulický poloměr R [m]. Po odhadu Manningovy drsnosti n [-] je možné pomocí rovnice (3) dopočítat Manningův rychlostní součinitel C [m^{0.5}/s], který spolu se známým sklonem i [-] a hydraulickým poloměrem R určují průtočnou rychlost v [m/s] podle rovnice (4). Hodnoty v a S stačí

následně dosadit do rovnice kontinuity (1) a získat hodnotu příčného průtoku Q [m^3/s], U této metody se s hysterezí konzumpční křivky nepočítá.

$$R = \frac{S}{O} \quad (2)$$

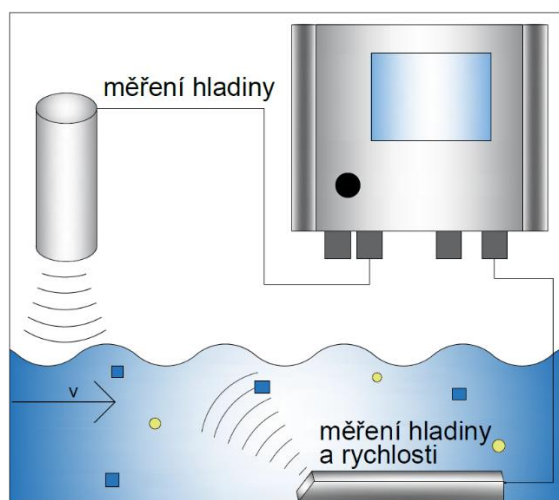
$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (3)$$

$$v = C\sqrt{Ri} \quad (4)$$

Ultrazvukové sondy: Ultrazvuková sonda se umísťuje nad hladinu vody a vysílá směrem k hladině ultrazvukové vlny. Při měření je zaznamenáván čas, za který přijde signál odražený od vodní hladiny. Na základě tohoto údaje a znalosti geometrie profilu je následně dopočítána hloubka vody, proto je také důležité znát vzdálenost dna potrubí od instalované sondy. Jde o metodu velmi přesnou, s nulovými hydraulickými ztrátami a snadnou údržbou. [32]

Měření rychlosti spolu s hladinou je možno provádět rovněž technologií na základě ultrazvuku, a to **ultrazvukovou rychlostní sondou** (Obr. 12). Ta funguje na základě Dopplerova jevu a měří hodnoty bodových rychlostí proudění částic nerozpuštěných látek ve vodě pomocí translace zvukového obrazu. Sonda se umísťuje na dno stoky, odkud v krátkých časových intervalech vysílá ultrazvukový signál. [32]

Měření hladiny a rychlosti ultrazvukovými sondami je schematicky znázorněno na Obr. 12.

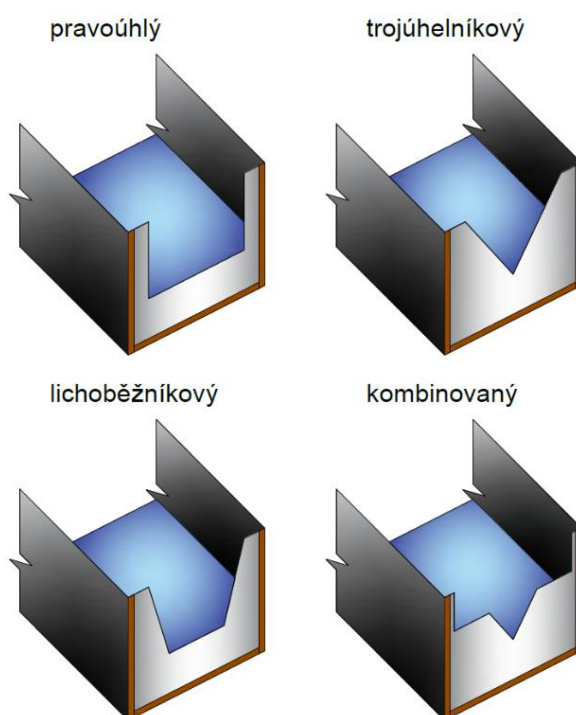


Obr. 12: Schéma ultrazvukových sond; upraveno z [33]

K méně vhodným metodám měření průtoku ve stokové síti patří měrné žlaby a přelivy. V proudu vody vytváří překážku a v důsledku dochází ke zpětnému vzduť hladiny, které je v kanalizaci nežádoucí. Umisťují se proto spíše do míst s méně kolísavými průtoky, jaké nalezneme například na odtoku z ČOV. Přelivy a žlaby jsou však používány pro zpřesňování měření průtoků, a proto jsou zde zmíněny.

Měrné žlaby: Pro dlouhodobé měření na stokové síti je možným řešením měrný žlab. Jde o žlab vestavěný výhradně do splaškové kanalizace a zužující průtočný profil tak, aby vznikl přechod z říčního proudění na bystrinné. Z měřené výšky vodního sloupce ve stanoveném místě se dále pomocí Q-h křivky stanovuje průtok. [32]

Měrné přelivy: Měrný přeliv se hodí jak k dlouhodobému, tak ke krátkodobému monitoringu. Přeliv vytváří překážku v toku, přes kterou přepadá voda s měřenou výškou přepadového paprsku. Podmínkou měření je zabezpečení dokonalého přepadu. Nejčastěji používanými měrnými přelivy bývají ostrohranné přelivy trojúhelníkového nebo obdélníkového tvaru. Tyto a některé další typy můžeme vidět na Obr. 13. Měření pomocí přelivů je nenáročné a poměrně přesné. Nevýhodou jsou ale výrazné ztráty energie a při použití v kanalizaci také riziko zanášení. [32]



Obr. 13: Některé typy ostrohranných přelivů

Další možností měření rychlosti je použití **elektromagnetického průtokoměru**. Ten je založen na principu Faradayova indukčního zákona, který říká, že pohybuje-li se elektrický vodič (v tomto případě odpadní voda) v elektromagnetickém poli, indukuje se na něm elektrické napětí přímo úměrné střední rychlosti jeho pohybu. [34] Toto napětí je snímáno instalovaným ponorným senzorem, který může mít cylindrický nebo plochý tvar. Cylindrický senzor je obecně nevhodné umisťovat do mělkých míst průtočných profilů. Plochý snímač je naopak pro taková měření navržen a jeho senzor je namířen ode dna vzhůru. Příklad výše uvedených typů senzorů od výrobce Valeport je na Obr. 14. Měření elektromagnetickým průtokoměrem je přesné a je alternativou k hydrometrickým vrtulím, které se v kanalizaci rychle zanáší. [35]



Obr. 14: Plochý (vlevo) a cylindrický (vpravo) senzor elektromagnetického průtokoměru modelu 801 od firmy Valeport [35]

Umístění průtokoměrů

Počet a umístění měrných profilů se odvíjí od konceptu měření. Rozhodnutí o umístění ve velké míře ovlivňuje kvalitu měřených dat, a tedy i úspěšnost monitorovací kampaně. Výběr měrného profilu musí zohlednit přístupnost, a to jak vnější, tedy umístění šachty v terénu, tak vnitřní, tedy stavební stav šachty. Dalšími podmínkami vhodnosti jsou potom jakékoli faktory ohrožující bezpečnost a zdraví. [31]

Z hydraulického hlediska je potřeba vybrat místo v síti, které je minimálně ovlivněno turbulentním prouděním a objekty na síti, kde nevzniká pravděpodobnost tlakového proudění a tvar proudového pole je symetrický. Je vhodné vybrat profil bez výrazných výstupků a s minimálním rizikem zanášení sedimentem. Pochopitelně je potřeba vybrat měrný profil, ve kterém budou hodnoty hladiny a rychlosti odpovídat mezím měřitelnosti instalovaných senzorů. [31]

Měření průtoků stopovači

Měření koncentrace stopovací látky v čase je nepřímou metodou měření průtoku. Jinak se jí také říká metoda stopovačů nebo z angličtiny „tracerová“. Tuto metodu lze s výhodou použít pro kalibraci měření průtoků pomocí výše uvedených principů. Koncentrace stopovací látky se sleduje ve vhodné vzdálenosti, aby došlo k úplnému smísení stopovače s vodou. [36] Ideálními stopovači jsou látky se stejnými transportními vlastnostmi jako má voda, látky ve vodě se přirozeně nevyskytující, dobře rozpustné a pochopitelně netoxické. Zároveň by měl být stopovač chemicky stabilní a snadno analyzovatelný. [37] Pro měření průtoků se využívá různých barviv (metylmodř, fluorescein...), selektivních iontů (bromid, fluorid...), solí (NaCl, KCl...), různých izotopů nebo taky teploty. Nejběžnějším stopovačem používaným pro stokové sítě je kuchyňská sůl (NaCl). Metoda stopovačů je relativně přesná a je nezávislá na geometrii stoky a rychlosti proudění. [36] Stopovací metoda je používána ve dvou variantách:

- integrální metoda,
- metoda kontinuálního dávkování.

Při **integrální metodě** se do proudu vlije roztok připravený z dané navážky stopovače najednou a níže po proudu probíhá kontinuální měření koncentrace stopovače ve vodě. Před zahájením měření je nutné nejprve zjistit pozadřovou koncentraci stopovací látky ve vodě. Měření probíhá po celou dobu odezvy stopovače až do snížení zpět na hodnotu pozadřové koncentrace. Vyhodnocení spočívá v zákonu zachování hmotnosti, tedy z faktu, že množství vlitého stopovače musí být stejné při průtoku níže položeným profilem. Průtok Q [m^3/s] se potom spočte jako poměr hmotnosti vlitého stopovače ku integrálu křivky vzniklé závislosti koncentrace na čase, tedy podle rovnice (5) [36]

$$Q = \frac{m_A}{\int_{t_2}^{t_1} (c_t - c_p) dt} \quad (5)$$

m_A [mg] – hmotnost stopovače vlitá do proudu ve výše položeném profilu

c_t [mg/l] – měřené koncentrace stopovače v níže položeném profilu v čase t

c_p [mg/l] – pozadřová koncentrace stopovače ve vodě

t_1, t_2 [s] – čas začátku, resp. konce odezvy stopovače v níže položeném profilu

Při **metodě kontinuálního dávkování** se do proudu dávkuje konstantní průtok roztoku se známou koncentrací stopovací látky. Níže po proudu je potom měřena koncentrace stopovače ve vodě. Měření probíhá až do doby, kdy se koncentrace stopovače ve vodě v místě měření ustálí. Průtok Q [m³/s] je následně vypočten dosazením do rovnice (6). [36]

$$Q = Q_d \frac{c_d - c_m}{c_m - c_p} \quad (6)$$

Q_d [mg] – průtok dávkovaného roztoku stopovače ve výše položeném profilu

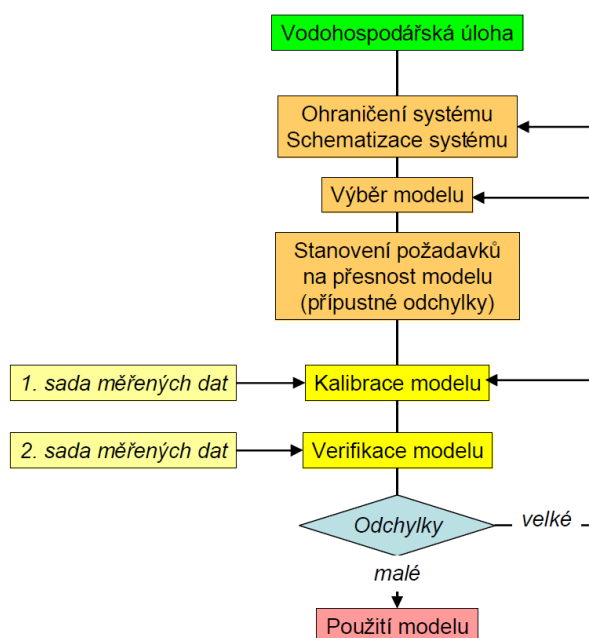
c_d [mg/l] – koncentrace stopovače v dávkovaném roztoku

c_m [mg/l] – ustálená koncentrace stopovače měřená v níže položeném profilu

c_p [mg/l] – pozadřová koncentrace stopovače ve vodě

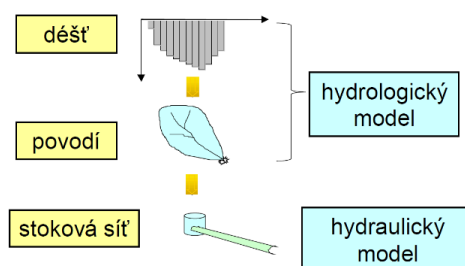
2.5.2 Modelování

Simulační modely jsou mocnými nástroji, a právě proto je nutné používat je kriticky. Svoji podstatu mají pro návrh objektů na stokové síti, ČOV, ale i pro ověření návrhu stokové sítě racionálními metodami. Základní princip a proces tvorby simulačního modelu je schematicky znázorněn na Obr. 16.



Obr. 16: Postup při matematickém modelování [22]

Při modelování srážko-odtokových jevů rozlišujeme dvě základní modelované vrstvy, a to hydrologickou a hydraulickou, jak je ukázáno na Obr. 17. V relevantních případech lze model doplnit o modely transportu, či transformace znečištění. [22]



Obr. 17: Simulační srážko-odtokové modely [22]

Hydrologické modely

Hydrologické modely se zabývají tvorbou povrchového odtoku, tedy transformací reálného deště odečtením ztrát na dešť efektivní, a jeho koncentrací, tedy transformací efektivního deště na odtokový hydrogram. [22]

Pro simulace **tvorby přímého odtoku** využíváme modelové metody zdůrazňující většinou převažující proces tvorby dešťových ztrát v povodí. Z modelových metod lze uvést např.:

Metoda počátečních ztrát: Jde o nejjednodušší metodu používanou při významných počátečních ztrátách, která předpokládá, že po dosažení počátečních ztrát veškerá další srážková voda odtéká. Ke zjednodušení dochází v této metodě i z hlediska povrchové retence, která počítá s naplněním všech prohlubní v povodí ve stejný moment. Metoda počátečních ztrát nepřihlíží k trvalým ztrátám a používá se především pro území s vysokým podílem zarostlých ploch, kde jsou počáteční ztráty tvořeny smáčením a povrchovou retencí. [2]

Metoda konstantních ztrát: Na rozdíl od metody počátečních ztrát bere tato metoda v úvahu trvalé ztráty jako dominantní složku celkových ztrát. Trvalé ztráty zde nejsou ovlivňovány aktuální dešťovou událostí. Metoda konstantních ztrát vezme nejprve v úvahu počáteční ztráty smáčením a po jejich zahrnutí jsou ostatní ztráty v každém časovém intervalu definovány jako konstantní. [2]

Metoda konstantního podílu ztrát (procentová metoda): Metoda používaná v průměrných městských podmínkách bývá označována jako procentuální. Stejně jako metoda konstantních ztrát, uvažuje i tato metoda nejprve počáteční ztráty smáčením.

V každém časovém intervalu ale dále přihlíží k ostatním ztrátám jako k podílu tzv. redukčním faktorem ϕ vzhledem k aktuální dešťové intenzitě. Jde tedy o metodu, kde jsou dominantními opět ztráty trvalé a je používána v městském odvodnění, kde je odtok závislý především na aktuální dešťové intenzitě. [2]

Hraniční metoda: Hraniční metoda uvažuje počáteční ztráty pouze smáčením. Pro výpočet povrchové retence potom používá samostatný model plnění terénních depresí. Zároveň se v každém dalším kroku zohledňují ztráty trvalé. Ty jsou zde vyjádřeny redukčním faktorem. [2]

Modely **koncentrace přímého odtoku** jsou matematickým popisem transformace efektivního deště do odtokového hydrogramu v určitém místě povodí. Při koncentraci odtoku dochází ke dvěma procesům. Řeč je o translaci, tedy časovém posunu, a retenci odtoku. Pro použití v městském odvodnění jsou využívány simulační modely lineární a časově invariantní. Lineárním chováním rozumíme lineární výstup systému jako odezva na lineární vstup. Časová invariance potom značí, že systém reaguje na určitý vstupní signál v každém časovém okamžiku stejným způsobem. [2]

Pro **translaci** dešťového odtoku se nejčastěji používá **translační model (metoda izochron)**, který stanovuje doby dotoku jednotlivých částic vody od určitého bodu povodí k jeho uzávěrovému profilu. Spojíme-li všechny body povodí se stejnou dobou dotoku, vzniknou spojnice označované jako izochrony. Na základě izochron jsou stanovena elementární odtoková povodí, tzv. izochronní plochy. Z výše položených dílčích povodí odtéká voda do těch níže položených za stejný časový interval. Po dopadu hydrologické srážky tedy nejprve přispívá odtoku nejbližší položené elementární povodí, později přispívají výše položená povodí, až nakonec k odtoku přispěje i nejdálčenější dílčí povodí. Na základě translace a superpozice tohoto jevu lze vytvořit odtokový hydrograf. Jako první se stanoví dílčí plochy A_i mezi izochronami a následně se vykreslí křivka jejich relativního rozdělení v čase A_i/A . Časovým vynásobením relativního rozdělení ploch v čase jednotlivými pořadnicemi hydrogramu efektivního deště lze následně vytvořit diagram času a plochy. Ten udává, v jakém časovém sledu a jakým podílem přispívají jednotlivé dílčí plochy A_i k odtoku v uzávěrovém profilu. [2] [21]

Pro proces **retence** lze využít představy nádrže, či jinak rezervoáru, kinematické vlny nebo jednotkového hydrogramu. Vzhledem k tomu, že většina programů pro vytváření modelů využívá lineárního popisu, jsou dále přiblíženy lineární vyjádření retence.

Krátké deště s přibližně stejnou intenzitou mají odtokovou křivku velmi podobnou odtokové křivce nádrže (rezervoáru), kde dochází ke strmému „plnění“ a pozvolnějšimu exponenciálnímu „prázdnění“. [21] Metoda využívající této skutečnosti je **metoda lineárního rezervoáru**, kde linearitou rozumíme, že množství odtoku je proporcionální k objemu zadržené vody. [38] Jde o metodu s jednoduchým použitím, která ovšem nepřihlíží k translaci odtoku. Tím pádem bude maximální hodnota výsledného hydrogramu současná s maximální hodnotou vstupního hyetogramu. Zatížení takovou chybou lze eliminovat tím, že jako vstupní hodnoty použijeme místo hyetogramu hydrogram z diagramu času a plochy nebo použitím metody kaskády rezervoárů. [2]

Kaskádou lineárních rezervoárů je série stejných lineárních rezervoárů, kdy výtok z jednoho rezervoáru je současně vtokem do dalšího rezervoáru kaskády. Vzniká tak zpoždění odtoku bližší skutečným odtokovým poměrům. [2] Přítok do prvního rezervoáru je tvořen hydrogramem efektivního deště. Výsledný odtok z posledního rezervoáru se potom získá lineární superpozicí hydrogramů jednotlivých rezervoárů. [21]

Další možností může být **metoda kinematické vlny**. Metoda počítá s rovnicí kontinuity a rovnicí hybnosti a je založena na úvaze, že se na zpevněném povrchu vytvoří ustálený stav podobný průtoku otevřeným obdélníkovým korytem velké šířky a nepatrné hloubky. Zjednodušení vzhledem k velkému vlivu tření spočívá v rovnosti sklonu čáry energie a sklonu fiktivního koryta. [2] [39]

Vytváříme-li odtokovou křivku na základě jednotkového efektivního deště (netto deště) používáme **metodu jednotkového hydrogramu**. Jednotkový déšť je časově konstantní a z jeho jednotkového hydrogramu lze na základě empiricky stanovené funkce odvodit odtokové hydrogramy libovolných dešťů. [21] Tuto metodu je vhodné používat pouze pro hydrologicky homogenní povodí, což neplatí pro urbanizovaná území. [2]

Hydraulické modely

Hydraulické modely řeší odtok vody ve stokové síti, a to na základě použití Saint-Venantyho rovnic pro neustálené proudění s volnou hladinou, jejichž základ je tvořen rovnicí kontinuity v diferenciálním tvaru (7) a rovnicí hybnosti (8). [40]

$$B \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (8)$$

Použití těchto rovnic umožňuje i simulaci zpětného vzduť, při využití Priessmanovy štěrbinový i tlakového proudění nebo vytékání vody nad terén. Jsou-li řešeny všechny tři členy rovnice, jde o metodu dynamické vlny. [22]

Platnost Saint-Venantyho rovnic je dána následujícími předpoklady:

- Rozložení tlaku je hydrostatické.
- Sklon dna potrubí je tak malý, že vertikálně měřená hloubka je téměř shodná s normálou sklonu dna.
- Rozložení rychlostí je jednotné.
- Profil je prismatický.
- Ztráty třením stanovené z ustáleného proudění jsou platné i pro neustálené proudění.
- Boční proudění je zanedbatelné. [40]

Kalibrace a verifikace modelu

Ke tvorbě každého modelu se váže potřeba kalibrace a verifikace. Kalibrace modelu spočívá ve vědomém upravování parametrů tak, aby výsledky simulačního modelu co nejvíce odpovídaly datům získaných monitorovací kampaní, a tím bylo docíleno redukce nejistot. Kalibrace se provádí buď metodou „pokus omyl“, nebo matematickými optimalizačními technikami, a to postupem podle typu simulačního modelu.

Příručka Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí [22] popisuje verifikaci modelu následovně: „*Verifikace modelu umožňuje přezkoušení modelu pro jiná období a zatížení systému než při kalibraci. Výpočty při verifikaci se provádějí s jinou sadou měřených vstupních dat, avšak s kalibrovanými parametry modelu*

a porovnává se výsledek simulace s měřenými daty. Na základě verifikace je pak posouzeno, zda daný simulační model je pro řešení stanovené úlohy dostatečně přesný a může být použit.“

2.5.3 SWMM

SWMM neboli Storm Water Management Model je jedním z nejpoužívanějších dynamických srážko-odtokových simulačních modelů, který byl vyvinut v USA agenturou pro ochranu životního prostředí U.S. EPA. Program je volně stažitelný a k dispozici jsou dostupná i jeho rozšíření. SWMM simuluje povrchový odtok z charakteristických hodnot povrchu (množství nepropustných ploch, sklon...), proudění v potrubí a parametrů stokové sítě (průměr, sklon...). Dokáže simulovat jednu událost, ale takéž dešťovou sérii včetně bezdeštných období mezi jednotlivými srážkami (potom hovoříme o kontinuální simulaci) a kvalitu vody. Využíván je například pro dimenzování protipovodňové ochrany a zadržovacích zařízení, k plánování, analýzám a návrhům jednotné i oddílné kanalizace a dalších systémů v městském odvodnění. Program SWMM je schopen počítat s mnoha procesy, jako jsou časově proměnné srážky, výpar z povrchu, retence, či infiltrace, a sledovat kvalitu a kvantitu vody v každém úseku potrubí v rámci celé zájmové oblasti. [39]

Odtokový proces je založen na tzv. podpovodích (subcatchments), na něž padá srážka a následně vzniká povrchový odtok a jeho znečištění, který dále odtéká do systému potrubí, dešťových zdrží a dalších objektů sítě. Obecně SWMM umožňuje návrh neomezeně velké sítě, modelování speciálních prvků, jako jsou zdrže, přečerpávací stanice nebo například odlehčovací komory, a nabízí širokou nabídku profilů potrubí, koryt a kanálů. Výpočet se skládá z jednotlivých časových kroků a výsledky lze prezentovat jako mapy povodí, grafy nebo tabulky. [39]

Pro účely výpočtu povrchového odtoku počítá program ve dvou krocích, kterými jsou tvorba a koncentrace povrchového odtoku. Při tvorbě ztrát je zadávána hodnota počátečních ztrát ($D_{storeImperv}$) a ostatní (průběžné) ztráty počítá přes podíl nepropustných ploch a šikmých střech v povodí. Infiltrace je řešena pomocí Hortonovy nebo Green-Amptovy metody, či jejich modifikací. Pro výpočet povrchového odtoku pohlíží SWMM na každé podpovodí jako na nelineární rezervoár, jehož kapacita je uvažována jako součet ztrát na povodí, tedy povrchové retence, intercepce apod. Drsnost povrchu je uvažována parametrem N_{Imprev} . [39]

Při výpočtu proudění vody v potrubí se SWMM řídí zákony zachování hmoty, energie a hybnosti a používá Saint-Venantovy pohybové rovnice. Pro simulaci je na výběr ze tří metod proudění v potrubí:

- ustálené rovnoměrné proudění,
- kinematická vlna,
- dynamická vlna.

Metoda **ustáleného rovnoměrného proudění** je nejjednodušší a předpokládá zaústění přítoku do horního konce potrubí a jeho převedení beze změn na konec potrubí. Každý uzel modelu musí mít svůj přítok i odtok a nelze tedy používat rozdělovače průtoků. Při rovnoměrném proudění neumí SWMM počítat s potrubní retencí, zpětným vzduťm ani ztrátami na vtocích a výtocích. [39][40]

Kinematická vlna využívá rovnici kontinuity a zjednodušenou rovnici hybnosti na každém úseku modelu a předpokládá, že sklon hladiny je shodný se sklonem potrubí a že maximální průtok je právě průtok kapacitní (neumí totiž počítat s tlakovým prouděním). Nastane-li situace, že je průtok větší než maximální, je jeho „přebytečná“ část zanedbána nebo „uskladněna“ na povrchu, dokud nedojde k uvolnění kapacity potrubí, kdy se „přebytek“ opět vrátí do systému. Metoda kinematické vlny umožňuje plošné a průtočné změny v potrubí v závislosti na čase a místě, čímž může vytvářet zpoždění průtočného hydrogramu. Jde o numericky stabilní metodu, pokud jsou použity středně dlouhé kroky, tedy kroky po 5 až 15 minutách. Stejně jako metoda ustáleného rovnoměrného proudění ale nepočítá ztráty na vtocích a výtocích a neuvažuje zpětné vzduť. [2] [39]

Dynamická vlna je řešena kompletními Saint-Venantyho rovnicemi, tedy rovnicí kontinuity a pohybovou rovnicí, a vytváří nejpřesnější výsledky. [40] Na rozdíl od kinematické vlny se „přebytečná voda uskladňuje“ až za případu, že voda stoupne do větší výšky, než je hloubka šachet. Umožňuje tedy tlakové proudění. Po uvolnění kapacity se „přebytečná“ voda opět vrací do systému. Jako jediná ze tří možných metod proudění počítá s trubní retencí, zpětným vzduťm i ztrátami na vtoku a výtoku. Metoda dynamické vlny je vhodná pro řešení systémů s regulátory průtoků, jelikož spojuje řešení výšky hladin v uzlech i potrubí. Oproti kinematické vlně ovšem potřebuje pro své výpočty kratší časový krok, a to v řádu minut. [39]

Kvalitu vody SWMM modeluje na základě simulace transportu a eliminace mikropolutantů, kdy potrubí považuje za kontinuálně promíchávaný reaktor. [39]

2.5.4 Potřebná data

Pro tvorbu modelu jsou potřebné čtyři základní skupiny dat:

- systémová data,
- vstupní data,
- data pro kalibraci a verifikaci modelů,
- hodnoty modelových konstant a parametrů. [22]

Systémová data slouží k popisu odvodňovacího systému zájmového území. Pro hydrologické modely jde o popis povodí, kdy modelu musíme určit, jakou mají jednotlivá podpovodí plochu, kde a jak se napojují na stokovou síť, či jaký je jejich sklon ve směru k napojení na stokovou síť. Dále nás zajímá procento nepropustných ploch a délka, potažmo šířka. [22] Podíl nepropustných ploch v povodí lze určit mnoha způsoby. Nejspolehlivější metodou je osobní prohlídka území. Ne vždy je však možnost se na místo dostat, ať už z časových nebo jiných důvodů. Dalšími možnostmi jsou využití leteckých snímků, digitalizovaných map nebo například dat družicových, která jsou ovšem dražší. [2] Vhodnou metodou je i vzorový hektar, kdy je z mapového podkladu získaného leteckými snímky v povodí zvolena plocha jednoho hektaru, která nejlépe charakterizuje celé zájmové území. V tomto hektaru je následně grafickou metodou vypočítán podíl nepropustných ploch, který lze přenést na celé povodí. Hydraulický model stokové sítě vyžaduje zanesení patřičných informací o potrubí, šachtách a objektech na síti. Tato data lze získat například na základě Geografického informačního systému (GIS) obce nebo v příslušném kanalizačním řádu. [22]

Nejsou-li k dispozici dostatečná systémová data, je potřeba urychlit výpočet nebo to umožňují nároky na přesnost výstupu, přistupuje se k zjednodušení povodí a stokové sítě, tzv. **schematizaci systémových dat**.

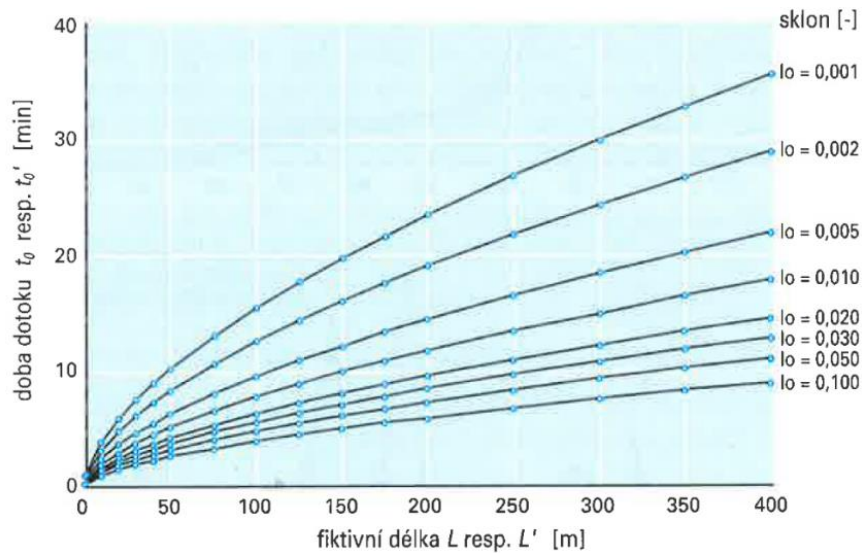
Schematizací povodí rozumíme redukci dílčích povodí a zjednodušení jejich tvaru. Celková velikost připojené plochy ke sledovanému profilu se nezmění a dojde pouze ke změně rozlišení dílčích ploch povodí a ke změně uzlu jejich napojení na stokovou síť. Klíčovou veličinou schematizace je tzv. „fiktivní délka“ L udávající fiktivní vzdálenost transportu elementární částice deště z jednotlivých dílčích povodí až do příslušného uzlu stokové sítě. Schematizovat takto povodí lze pouze

nad nezanedbatelnými uzly stokové sítě, tedy v místech, kde lze schematizovat stokovou síť, přičemž schematizace povodí má tyto dva kroky:

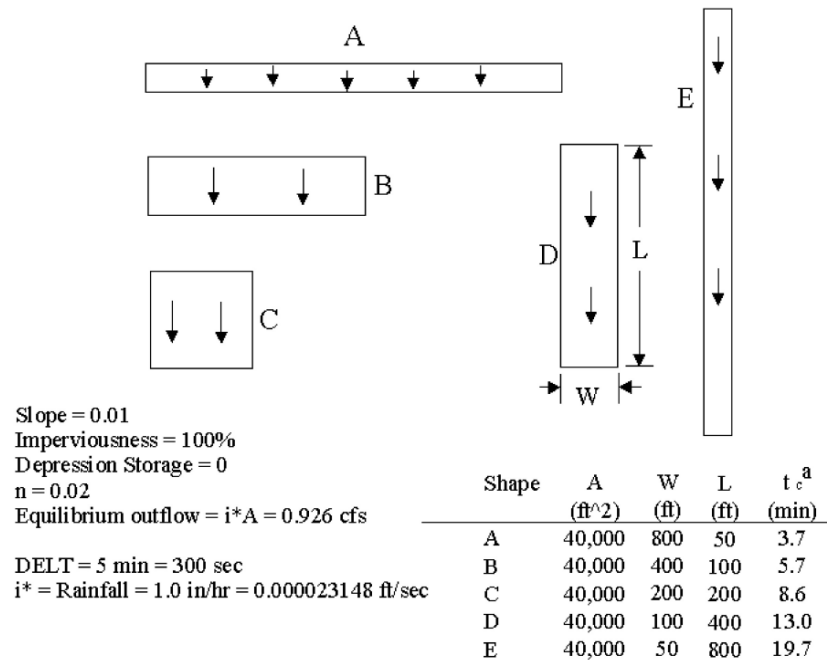
- ohraničení vlastního povodí,
- stanovení fiktivní délky L .

Při ohraničování se do povodí započítává veškerá uzavřená zástavba bez významných zelených ploch, jako jsou například parky, a homogenní zástavba s co nejmenší variabilitou sklonových a jiných parametrů. Ohraničení se tvoří přibližně do tvaru obdélníku. [2]

Pro stanovení fiktivní délky se nejprve ze situačního plánu udělá odhad délky L , pro který bude z grafu na Obr. 18 odečtena doba dotoku do jednotlivých úseků t_0 . V místech zanedbání stokové sítě se doba dotoku t_k do uzlového bodu odhadne například na základě délky kanalizace a rychlosti průtoku. Po sečtení $t_0 + t_k$ získáme dobu dotoku pro sloučené území t_0' , na jejímž základě se z grafu zpětně odečte fiktivní délka L' používaná jako vstupní hodnota modelu. V rámci programu SWMM se zadává šířka povodí W , kterou lze na základě známe plochy A a délky L vypočítat. [2] Závislost doby dotoku na délce, a potažmo šířce povodí, je znázorněna na Obr. 19.

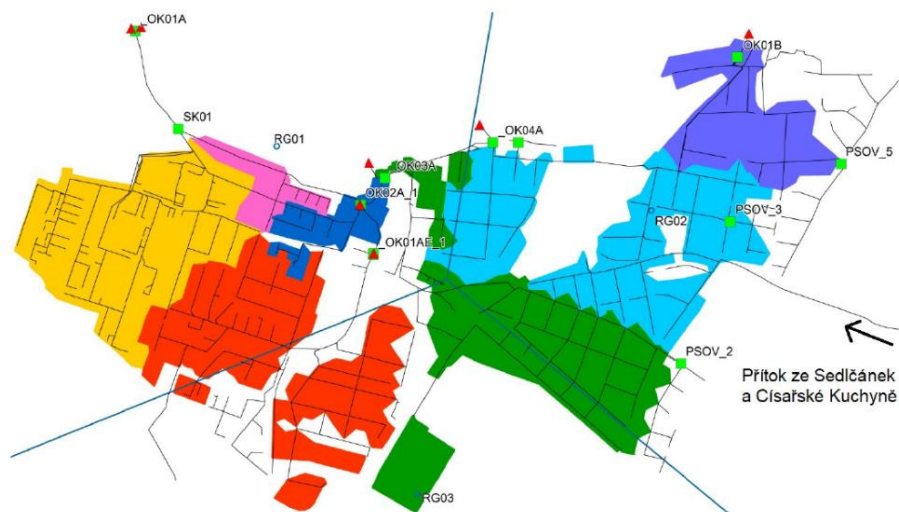


Obr. 18: Graf pro stanovení fiktivních délek L a L' ve schematizovaném povodí [2]



Obr. 19: Různé tvary odvodňovaných oblastí ilustrující efekt délky podpovodí [41]

Při schematizaci stokové sítě dochází k redukci počtu šachet a úseků, změn trasy, spádu, či délky a průřezu jednotlivých stok. Nejprve se stanoví všechny důležité a nezanedbatelné uzly, které nelze zjednodušovat. Mezi takové patří například odlehčovací komory, spojné a rozdělné komory, čerpací stanice nebo významná napojení na síť (např. průmysl). [2] Dále je zapotřebí stanovit úseky se vzduším, což bývají zpravidla úseky s nepatrným spádem nebo úseky pod některými objekty, a úseky s hydraulickým přetížením. Takovéto úseky nelze v modelu zanedbat. [22] Posledním krokem schematizace sítě je potom spojení všech uzlů. Ukázka schematizace systému je demonstrována na Obr. 20.



Obr. 20: Rozdělení podpovodí hrubě schematizovaného modelu [42]

Vstupními daty rozumíme dešťová data a bezdeštné průtoky v síti. [22] Informace o průběhu srážek a průtocích ve stokové síti jsou zároveň daty potřebnými **pro kalibraci a verifikaci modelu**. Zdrojem těchto dat mohou být historické srážkové řady od ČHMÚ nebo například čáry náhradních vydatností. Často je ale nutností obstarat data vlastní, ať už z důvodu nedostupnosti výše zmíněných možností, nebo z důvodu jejich nedostatečnosti, a to právě monitorovací kampaní. [23]

Modelové konstanty, kterou je například gravitační zrychlení, jsou neměnné. Naopak **modelové parametry** se mohou pro jednotlivé aplikace modelu měnit. V hydrologických modelech jsou parametry například součinitel odtoku nebo jednotlivé ztráty v povodí. Parametry hydraulických modelů myslíme například drsnost potrubí, ztráty na jednotlivých objektech nebo jakost proudící vody. [22]

3 Cíle práce

Hlavním cílem této závěrečné práce je zjištění srážko-odtokových poměrů v obcích Bukovno a Líny a následné vytvoření simulačního modelu za účelem návrhu přečerpávací stanice odpadních vod. Ta bude umístěna v oblasti Močidel a bude zabezpečovat transport odpadních vod do ČOV v Mladé Boleslavi, a to z důvodu rušení místní biologické ČOV.

Pro naplnění hlavního cíle práce je nutné dosáhnout následujících dílčích cílů:

→ orientace v území, kde bude měření probíhat

Cílem je vytvoření představy o prostorovém uspořádání stokové sítě a následně výběr vhodných měrných profilů pro monitorovací kampaň.

→ monitoring průtoků v dílčích stokách

Cílem je získat dostatečně dlouhou průtokovou řadu s dostatečným množstvím zaznamenaných dešťových událostí pro kalibraci modelu.

→ stavba schematizovaného modelu zájmové oblasti a systému odvodnění

Cílem je příprava modelu stokové sítě a povodí.

→ kalibrace a verifikace modelu

Cílem je vědomě upravit vstupní parametry povodí a sítě, aby průběh modelované řady co nejvíce odpovídal skutečnosti, a následně přezkoušet jeho platnost pomocí verifikace.

→ návrh přečerpávací stanice odpadních vod (dále PSOV)

Cílem je navrhnout PSOV a její retenční objem a následně ověřit její funkci pomocí zatížení modelu desetiletou řadou srážkových úhrnů z blízké meteorologické stanice.

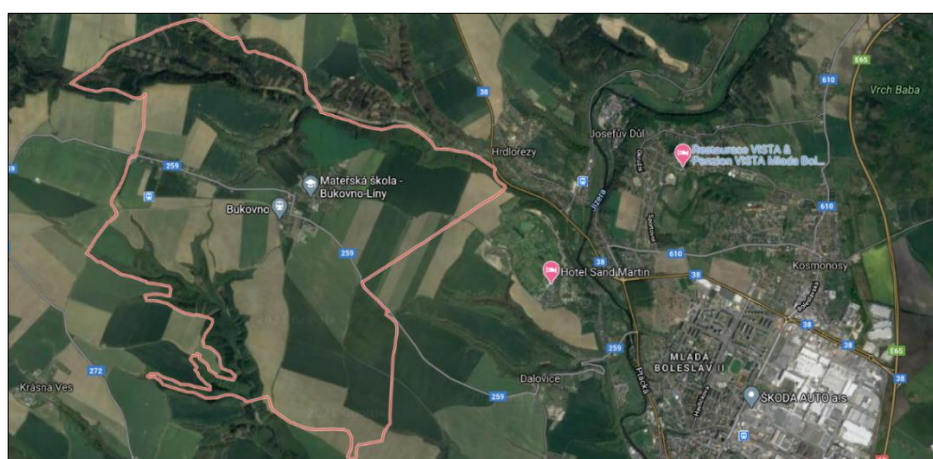
→ citlivostní analýza efektivity přečerpávací stanice

Cílem je posoudit závislost ceny realizace na snížení množství přepadajících odpadních vod přípustným zvětšováním retenčního objemu PSOV.

4 Zájmové území Bukovno–Líny

4.1 Charakter území

Obec Bukovno se nachází ve Středočeském kraji, okresu Mladá Boleslav a její součástí je území obce Líny. Bukovno nalezneme asi sedm kilometrů severozápadně od Mladé Boleslavi, jak lze vidět na Obr. 21, tedy v údolí Čistého potoka, levobřežního přítoku řeky Jizery. Líny potom najdeme o další asi dva kilometry dál stejným směrem. Řeka Jizera je ve smyslu vyhlášky Ministerstva zemědělství ČR č. 178/2012 Sb. významným vodním tokem. [43] Geograficky se oblast Bukovno–Líny nalézá na území Jizerské tabule s nejvyšším vrcholem Horka (410 m n. m.), která se rozprostírá podél dolního toku Jizery. Jde o erozně denundační reliéf s výškově konstantními plošinami tvořenými křídovými horninami, rozčleněnými výraznými zářezy a místy s mělkými sníženinami. [44]



Obr. 21: Ortofotografická mapa oblasti Bukovno a Líny [45]

Obec Bukovno se nachází mimo záplavová [46] a poddolovaná území. [47]

Z hlediska hydrologie a klimatologie jde o oblast s krátkou mírně teplou a suchou až velmi suchou zimou s průměrným sezónním úhrnem srážek 200–300 mm a dlouhým teplým suchým létem s průměrným sezónním úhrnem srážek 350–400 mm. Průměrná teplota vzduchu je zde mezi 8 a 9 °C. [48]

Půdy jsou v této oblasti převážně hlinité hnědozemě a luvizemě. [49]

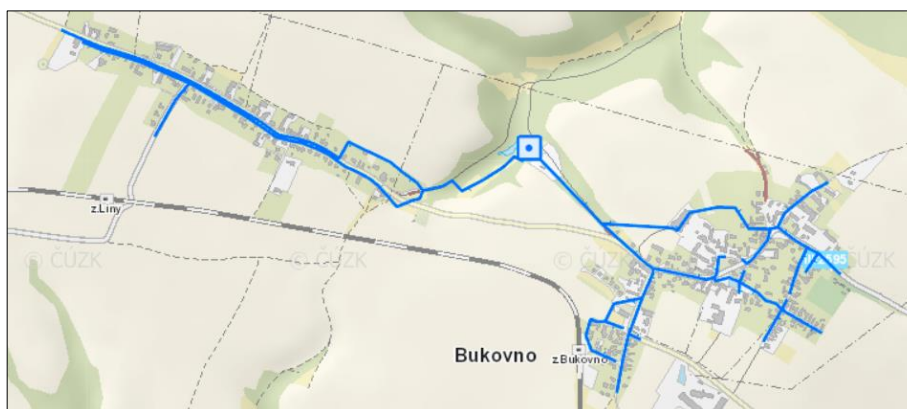
Z hlediska občanské vybavenosti nalezneme v části Bukovno obecní úřad, jehož součástí je společenský sál a mateřská školka, prodejnu potravin a pohostinství V Sokolovně. V části Líny se z občanské vybavenosti nachází pouze restaurace Na Statku.

4.2 Systém odvodnění

V obcích Bukovno a Líny bylo k 1. 1. 2021 evidováno celkem 724 obyvatel. [50] Poslední údaje o počtu obyvatel v jednotlivých vesnicích jsou z roku 2014, kdy bylo v obcích celkem 682 obyvatel, z toho 480 v obci Bukovno a 202 v obci Líny. [51] Velká část obyvatelstva odjíždí z obce za zaměstnáním, a to převážně do Mladé Boleslavi do ŠKODA AUTO, a.s. nebo do zemědělství. Oblast je plně zásobena pitnou vodou z vodovodu pro veřejnou potřebu, na který jsou napojeni všichni obyvatelé obce. [51] Zástavba Bukovna i Lín je téměř výhradně tvořena rodinnými domy.

Odpadní vody vznikající na území obce jsou odpadní vody z bytového fondu, občanské vybavenosti, srážkové a povrchové vody a v minimální míře vody z výrobní činnosti. Znečištění produkované od dojíždějících občanů je zahrnuto v průmyslu a vybavenosti. [51] Pro oblast Bukovno–Líny je průměrný srážkový úhrn 601 mm/rok a směrodatný přívalový dešť je uvažován o intenzitě $i = 117 \text{ l/s/ha}$ při době trvání deště $t = 15 \text{ min}$ a četnosti opakování $n = 1$. Odtokový koeficient byl pro Bukovno stanoven $\psi = 0,3$ a pro Líny potom $\psi = 0,25$. Specifická produkce na jednoho připojeného obyvatele byla uvažována 101,3 l/den. [51]

Systém odvodnění je tvořen dvěma soustavami stok s téměř 290 přípojkami. Schematizaci stokové sítě prezentuje Obr. 22. Odpadní vody z obce Bukovno jsou odváděny gravitačně betonovou stokou jednotné kanalizace o vnitřním průměru 500 mm. Odvodňování části Líny probíhá gravitačně splaškovou oddílnou kanalizací z plastového potrubí vnitřního průměru 250 mm. Tyto dvě soustavy se spojují v odlehčovací komoře umístěné před nátokem na ČOV, který má vnitřní průměr 150 mm a je provozován jako tlakový. [51]



Obr. 22: Znázornění stávající kanalizace obcí Bukovno a Líny [46]

Biologická ČOV (Obr. 23) umístěná v Močidlech čistí odpadní vody a stabilizuje vzniklý kal. Při stabilizaci kalu vzniká oxid uhličitý, který čistírna dále využívá při biologickém rozkladu k posílení fotosyntetických pochodů ve vegetačním prstenci. Produktem podporované fotosyntézy je kyslík, který je použit opět v čistícím procesu pro biologický rozklad organického znečištění. Kal vzniklý na ČOV je částečně odvodňován skelnými knoty s vysokou kapilární nasákavostí. Ty elevují vodu ke kořenům rostlin vegetačního prstence a tím je vyživují. Kapacita ČOV je 700 EO, proto je pro aktuální obyvatelstvo Bukovna a Lín nedostačující. Maximální průtok odpadních vod, na který byla čistírna navržena, je 5 l/s. [51]



Obr. 23: Biologická ČOV v Močidlech, Bukovno

Posledním stupněm dočištění je biologický rybník nacházející se na katastrálním území obce Bukovno o vodní ploše 922 m² a objemu 1 096 m³. Doba zdržení vody v rybníku je 8,7 dní a účinnost čištění podle BSK₅ je 60 %. [51]

Recipientem pro systém odvodnění obce Bukovno je potok Čistý, který je dle vyhlášky č. 178/2012 Sb. klasifikován jako drobný vodní tok. [43] [51]

Vlastníky kanalizace jsou:

- Obec Bukovno, Bukovno 63, 293 01, IČ 002 375 91
- Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a.s., Mladá Boleslav, Čechova 1 151, 293 22, IČ 463 569 83

Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a.s. jsou zároveň provozovatelem této kanalizace. [51]

5 Metodika

V následující kapitole jsou popsány aplikované metody a zvolené postupy, a to od přípravy monitorovací kampaň, přes její průběh a zpracování naměřených dat, stavbu, kalibraci a verifikaci modelu, až k návrhu přečerpávací stanice a vyhodnocování výsledků.

5.1 Orientace v zájmovém území

Pro úspěšnou monitorovací kampaň je zásadní terénní průzkum a výběr vhodných měrných profilů. K získání představy o prostorovém uspořádání kanalizační sítě byla prostudována projektová dokumentace kanalizační sítě a GIS obcí Bukovno a Líny, dále potom letecké snímky oblasti. Jelikož letecké snímky, a stejně tak i příslušné listy projektová dokumentace, nemusí vždy odpovídat aktuálnímu stavu povodí, či samotné kanalizace, byla provedena osobní návštěva lokality, při které proběhla i prohlídka a kontrola vytipovaných měrných míst. Výběr profilů pro umístění měřicích přístrojů byl proveden s ohledem na splnění podmínek zmíněných v kapitole 2.5.1. Pro monitorovací kampaň byly vybrány šachty před spojením větví kanalizace v odlehčovací komoře, pro Líny druhá šachta proti proudu a pro Bukovno první šachta proti proudu.

5.2 Monitorovací kampaň

Do vybraných měrných profilů byly umístěny měřicí přístroje. Do obou měrných profilů byla nainstalována ultrazvuková sonda US1200 s registrační jednotkou M4016 od firmy Fiedler AMS, s.r.o. pro měření hladiny, do profilu Bukovno potom i ultrazvuková rychlostní sonda NivuFlow Mobile 750 měřící rychlost proudu. Zároveň došlo k instalaci předem kalibrovaného srážkoměru SR03 s registrační jednotkou M4605 firmy Fiedler AMS, s.r.o., který byl umístěn na budovu obecního úřadu, resp. mateřské školy. Všechny měřicí přístroje, včetně srážkoměru, bylo nutné časově synchronizovat. Po umístění přístrojů do vybraných měrných profilů a jejich časovém nastavení bylo potřeba přístroje zabezpečit proti krádeži. Dále probíhala každé dva týdny kontrola průběhu měření přístroji a v případě potřeby výměna baterií. Doba výdrže baterie je vedle vlastní spotřeby přístroje a kapacity baterie ovlivňována též klimatickými podmínkami v jejím okolí, což bylo vzhledem k období

monitorovací kampaně v podzimních měsících podstatným faktorem, a samozřejmě také stářím samotné baterie.

Aby byla zachycena co možná největší škála dešťových událostí, probíhalo měření v obcích Bukovno a Líny 8 týdnů.

5.2.1 Kalibrace srážkoměru

Abychom ze záznamu měřených dat srážkoměru získali hodnoty odpovídající skutečnosti, bylo potřeba použitý srážkoměr před instalací v terénu seřídít, tedy zkalibrovat, a to pomocí statické i dynamické kalibrace. Pro monitorovací kampaň Bukovno–Líny byl vybrán srážkoměr SR03 se zachytnou plochou cylindru 500 cm² a s rozlišením 0,1 mm, kde záznam dat probíhá elektronicky přes registrační jednotku.

Statická kalibrace

Cílem statické kalibrace bylo nastavit člunek stavěcími šrouby tak, aby překlopení každé strany člunku proběhlo při naplnění předepsaného objemu, který byl v tomto případě 5 ml. Pro statickou kalibraci byla použita laboratorní byreta s přesností 0,1 ml a srážkoměr bez ustalovacího válce.

Postup statické kalibrace byl následující:

1. Před zahájením měření bylo nutné překlápěcí člunek umýt a očistit.
2. Srážkoměr byl ustaven do horizontální polohy pomocí vestavěné libely srážkoměru a znovu přeměřen nezávislou libelou.
3. Byreta byla umístěna nad osu člunku a do jeho středu asi 1 cm nad přepážku.
4. Mimo měření došlo ke smáčení člunku po dobu 6 až 8 překlopení člunku.
5. Z byrety byla upouštěna voda do člunku a při každém překlopení byl ze stupnice byrety odečten upuštěný objem. Pro každou stranu překlopného člunku bylo provedeno pět měření. Při upouštění vody z byrety bylo dbáno na pomalé odkapávání před překlopením člunku, čímž došlo k přesnějšímu stanovení objemu.
6. Dále byl vypočten průměr objemu pro jednotlivé strany (V_L a V_P) i pro jejich součet ($V_L + V_P$). Vzhledem k tomu, že oba výsledky spadaly do potřebných intervalů, což pro jednotlivé strany znamená interval od 4,7 do 5,3 a pro průměr součtu interval 9,7 až 10,3, bylo nastavení člunku shledáno vyhovujícím a dále

se přistoupilo ke kalibraci dynamické. Pokud by nastavení nevyhovovalo, bylo by nutné nastavení upravit stavěcími šrouby a provést statickou kalibraci znovu.

Dynamická kalibrace

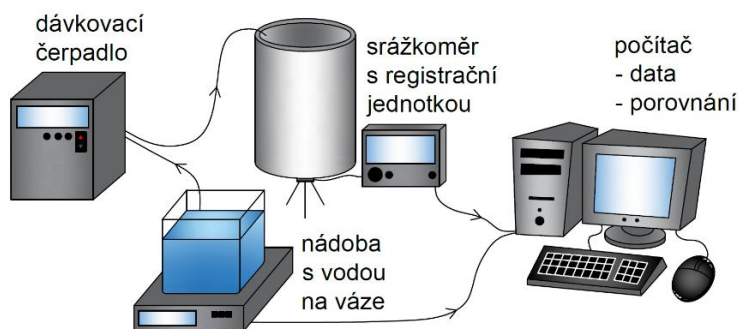
Při dynamické kalibraci byl srážkoměr zatěžován definovanými vydatnostmi deště po určitou dobu a následně byly porovnány hodnoty dodaného a zaznamenaného objemu, čímž vznikla kalibrační křivka. Délka testů pro jednotlivé vydatnosti byla stanovena podle analýzy nejistot [52] a je uvedena v Tab. 1. Různá délka měření odpovídá nerovnoměrnému rozložení nejistot v rámci všech vydatností, kdy u nižších vydatností vznikají větší nejistoty a u vyšších vydatností naopak nejistoty menší. Doby měření byly stanoveny tak, aby v celé škále vydatností byla absolutní hodnota nejistoty maximálně 1 %. Časy uvedené v závorkách jsou minuty od počátku testu, které se do vyhodnocování nezapočítávají. Pro správnost výsledků je obecně potřeba zajistit kontinuitu čerpání během jednotlivých měření, což bylo zajištěno použitím peristaltického čerpadla. Vydatnost příslušná otáčkám čerpadla v Tab. 1 je orientační, při vyhodnocení kalibrace je nutné z naměřených dat spočítat skutečnou vydatnost, kterou byl dešťoměr zatížen.

Tab. 1: Doby dynamické kalibrace jednotlivých vydatností při aplikaci nové metodiky (číslo v závorce udává počet minut na počátku testu, které jsou vyloučeny z vyhodnocení) a hodnoty čerpání a nastavených otáček odpovídající vydatnostem; upraveno z [23]

vydatnost [l/s/ha]	délka testu [min]	čerpání [ml/s]	otáčky [ot./min]
5	33 (-3)	0,025	2
15	16 (-2)	0,075	5
25	9 (-1)	0,125	9
50	9 (-1)	0,250	18
75	9 (-1)	0,375	27
100	9 (-1)	0,500	35
150	9 (-1)	0,750	53
250	11 (-1)	1,250	88
350	11 (-1)	1,750	123
500	13 (-1)	2,500	176

Pro uskutečnění dynamické kalibrace bylo třeba si připravit elektrickou laboratorní váhu s přesností 0,1 g pro kontinuální záznam úbytku hmotnosti čerpané vody, dále srážkoměr včetně ustalovacího válce a registrační jednotky, peristaltické čerpadlo s potřebným rozsahem, tedy 0,025–2,5 ml/s, což odpovídá vydatnostem 5–500 l/s/ha

dle Tab. 1, plastové hadičky k propojení a řídicí počítač pro záznam. Schéma dynamické kalibrace je znázorněno na Obr. 24.



Obr. 24: Schéma aparatury dynamického testu

Průběh dynamické kalibrace:

1. Ustalovací válec byl vyčištěn a umyt, dále došlo k ověření průchodnosti otvoru ve válci a průchodnosti plastových hadiček.
2. Srážkoměr byl ustaven do horizontální polohy pomocí vestavěné libely a ustavení bylo následně přeměřeno nezávislou libelou. Srážkoměr byl propojen s registrační jednotkou a ustalovací válec nasazen na základní desku.
3. Nádobu s vodou pro čerpání byla ustavena na laboratorní váhu propojenou s počítačem. Do vody byla ponořena hadička dostatečně hluboko tak, aby v průběhu testu nemohlo dojít k nasátí vzduchu. Dále došlo k zajištění hadičky tak, aby se nedotýkala nádoby.
4. Hadička byla krátkým čerpáním naplněna vodou.
5. Následně proběhlo měření pro jednotlivé vydatnosti po dobu dle Tab. 1. Doba v závorce z Tab. 1 je doba potřebná pro ustálení čerpání. Test započal vždy po prvním překlopení člunku od zapnutí čerpadla. První překlopení udalo čas t_0 , který byl zaznamenán. Po uplynutí doby testu plus jedno překlopení člunku navíc došlo k ukončení testu. Měření bylo opakováno pro všechny potřebné vydatnosti.
6. Dalším krokem bylo stažení dat z registrační jednotky a záznamu z digitální váhy. Z měření byly získány hodnoty hmotnosti odčerpané vody a počet překlopení člunku během testu.
7. V posledním kroku došlo k vyhodnocení kalibrační křivky podle postupu uvedeného dále.

Postup vyhodnocení kalibrační křivky:

1. Z vyhodnocovaných dat bylo vyřazeno prvních několik minut testu dle Tab. 1.
2. Pro jednotlivé otáčky byl z hmotnosti stanoven objem odčerpané vody V_{real} [ml] převodem $1 \text{ g} = 1 \text{ ml}$ a z počtu překlopení potom objem předpokládaný V_{rec} [ml] dle rovnice (9).
3. Vydatnost čerpadla q_{rec} [l/s/ha] byla stanovena rovnicí (10) a chyba měření srážkoměru za daný interval pro danou vydatnost ERR_q [%] podle rovnice (11).
4. Do grafu byla vynesena chyba měření ERR_q jako funkce q_{rec} a její průběh byl následně proložen vhodně zvolenou závislostí.
5. Proložení závislostí bylo učiněno s ohledem na její korelační koeficient R^2 , který by měl být větší než 9, jinak je potřeba kontrola dat, případně opakování kalibrace.
6. Výsledkem byla korelační funkce chyby měření $ERR_{q,proložená} = f(q_{rec})$, která byla následně použita při korelaci dat měřených srážkoměrem.

$$V_{real} = n \cdot V_{jedn.} \quad (9)$$

n = počet překlopení člunku v průběhu testu

$V_{jedn.}$ = objem jedné strany člunku (5 ml)

$$q_{rec} = \frac{n \cdot h}{t} 1000 \quad (10)$$

h = srážkový úhrn [mm], jednomu překlopení použitého srážkoměru odpovídá 0,1 mm

t = doba trvání testu [s]

$$ERR_q = 100[(V_{real}/V_{rec}) - 1] \quad (11)$$

Korekce dat získaných z měření v terénu probíhala výpočtem podle rovnice (12).

$$q_{real} = q_{rec}(1 + ERR_{q,proložená}) \quad (12)$$

Proložení grafu vhodnou závislostí proběhlo pomocí dvou křivek, aby došlo k přesnějšímu vystižení průběhu nejistot.

Po dynamické kalibraci byla provedena znovu kalibrace statická sloužící jako kontrola, zda si srážkoměr udrží nastavení i po dynamické zátěži.

5.2.2 Kalibrace měrných profilů pomocí stopovače

K ověření správného nastavení použitých ultrazvukových sond byla zvolena metoda stopovačů. Na základě průtoku změřeného pomocí stopovačů byla ověřena hodnota průtoku vypočtená na základě měření sond. Pro tuto kalibraci byla stopovačem kuchyňská sůl – NaCl a měření probíhalo formou jednorázové injekce, tedy integrální metodou.

Před samotným provedením měření pomocí stopovačů proběhla nutná kalibrace použité vodivostní sondy, kterou byl získán vztah mezi měřenou konduktivitou a koncentrací stopovače. [53] Do připravených vzorků vody byly dávkovány různá množství NaCl a přístrojem měřena konduktivita. Závislost naměřené konduktivity na použitém množství stopovače byla vynesena do grafu a následně proložena vhodnou křivkou závislosti. Rovnice této křivky následně posloužila k vyhodnocení koncentrace NaCl z dat naměřených v terénu.

Pro uskutečnění testu byla zajištěna cisterna s vodou a do nádob byly odměřeny různé navážky NaCl. Měření probíhalo multimetrem HQ40D Hach. Níže uvedený postup byl proveden pro stoku Líny i Bukovno.

Nejprve bylo potřeba vybrat dva vhodné profily, jeden pro injekci stopovače a druhý, níže po proudu, pro měření konduktivity. Profily byly vybrány tak, aby splňovaly podmínky uvedené v kapitole 2.5.1.

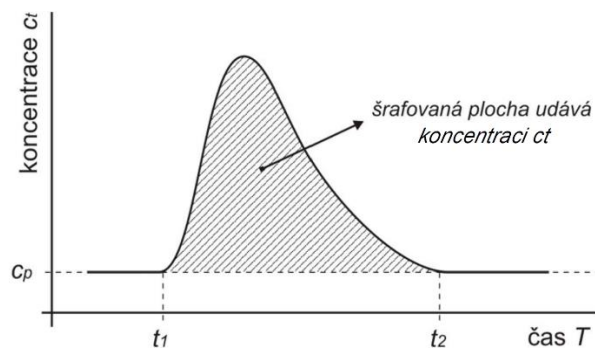
V dalším kroku byl do níže položeného měrného profilu umístěn multimetr a proběhlo změření pozad'ové koncentrace soli v odpadní vodě. Po zjištění této hodnoty byla následně do výše položeného profilu vlita dávka stopovače a čas tohoto úkonu byl zaznamenán. V níže umístěném profilu probíhalo měření po celou dobu odezvy stopovače až do doby, kdy se koncentrace NaCl opět vrátila k hodnotě pozad'ové koncentrace naměřené před testem. Postup byl opakován pro všechny tři navážky.

První dvě měření proběhla s menší navážkou NaCl při aktuálním průtoku ve stoce a následně proběhlo jedno měření s navýšenou navážkou NaCl při nadlepšeném průtoku, tedy při zvýšení průtoku pomocí vody z cisterny. Jednotlivé navážky jsou zaznamenány v Tab. 2. Pro snazší průběh testu byla mezi účastníky měření zajištěna komunikace na dálku.

Tab. 2: Jednotlivé navážky NaCl pro kalibraci pomocí stopovače

		navážka NaCl [g]
Bukovno	A1	39,55
	A2	44,65
	A5 + A6	155,60
Líny	B1	37,85
	B2	39,35
	B5 + B6	159,60

Výstup záznamu ve formě průběhu konduktivity v čase bylo nutno podle kalibrační rovnice přepočítat na průběh koncentrace NaCl v čase. Po odečtení hodnoty pozad'ové koncentrace a následné integraci koncentrace od nástupu průchodu dávky NaCl až po jeho konec, byla získána celková koncentrace c_t . Podílem navážky NaCl a této hodnoty byla vypočtena hodnota průtoku. Princip výpočtu vyjadřuje Obr. 25 spolu s rovnicí (5). Integrál ve jmenovateli lze díky konstantnímu kroku měření zjednodušit dle rovnice (13).



Obr. 25: Záznam měření koncentrace stopovače v níže položeném profilu, c_p udává pozad'ovou koncentraci stopovače; upraveno z [36]

$$Q = \frac{m_A}{\int_{t_2}^{t_1} (c_t - c_p) dt} \quad (5)$$

$$\int_{t_2}^{t_1} (c_t - c_p) dt = dT \sum_{t=t_1}^{t_2} (c_t - c_p) \quad (13)$$

m_A [mg] = hmotnost stopovače vlitá do proudu ve výše položeném profilu

c_t [mg/l] = měřené koncentrace stopovače v níže položeném profilu v čase t

c_p [mg/l] = pozad'ová koncentrace stopovače ve vodě

t_1, t_2 [s] = čas začátku, resp. konce odezvy stopovače v níže položeném profilu

dT [s] = časový krok měření

5.3 Tvorba modelu

Pro další práci s daty a následné zpracování návrhu přečerpávací stanice odpadních vod bylo potřeba vytvořit model systému.

Do programu SWMM byl nahrán letecký snímek zájmového povodí a umístěn na příslušné souřadnice tak, aby program dokázal měřit potřebné délky a plochy. Následně došlo ke zjednodušení struktury stokové sítě a povodí. Oblast byla rozdělena na dvě dílčí povodí, tedy na Bukovno a Líny, ve kterých bylo možné kanalizační síť zanedbat.

Každému povodí byly zadány specifické parametry, a to především příslušný výtokový uzel, plocha, šířka, sklon povodí, podíl šikmých střech a podíl nepropustných ploch. Podíl nepropustných ploch a šikmých střech v povodí byl stanoven metodou vzorového hektaru. Dále byl k povodí přiřazen instalovaný srážkoměr, jemuž byla v textovém souboru připojena data naměřená srážkoměrem při monitoringu. Vzhledem k vysokému podílu zeleně v povodí nebylo se srážkovým odtokem z propustných ploch uvažováno.

Pro potrubí byl zadán výchozí a koncový bod (šachta) úseku, jeho délka a drsnost. Zároveň byl definován tvar profilu a jeho průměr. Každé šachtě byla vyplněna kóta dna a její hloubka.

Z dat získaných při monitoringu byly vypočteny koeficienty pro hodinové intervaly bezdeštných průtoků v systému, které byly následně zaneseny do záložky Time Series v programu SWMM, a to následujícím postupem.

Nejprve bylo z monitorovacího období vybráno pět všedních a tři víkendové bezdeštné dny. Hodnoty průtoků byly zobecněny zvláště pro všední i víkendové dny pomocí mediánu. Dále byly hodnoty z tříminutového, resp. pětiminutového, intervalu převedeny na hodinový. Jako mezivýsledek tak vznikly dvě tabulky s průměrnými hodnotami hodinových průtoků, a to jedna pro všední a jedna pro víkendové dny. Hodinové hodnoty byly opět zprůměrovány a vznikl tak denní průměr Q_{24} . Následně byl vypočten jeho vážený průměr $Q_{24,prům.}$ podle rovnice (14).

$$Q_{24,prům.} = \frac{5Q_{24,všední} + 2Q_{24,víkend}}{7} \quad (14)$$

Poměrem hodinových hodnot průtoků a celkového denního průměru $Q_{24,prům.}$ byly vypočteny koeficienty průtoků pro jednotlivé hodinové intervaly, které bylo následně

možné vložit do záložky Time Series v programu SWMM jakožto podklad modelu pro výpočet průtoku odpadních vod v síti.

Posledním krokem přípravy modelu bylo nastavení záložky Options, kde byla v General zvolena metoda výpočtu proudění v potrubí, v tomto případě metoda dynamické vlny. Dále došlo k nastavení časového rozmezí monitorovací kampaně a časového kroku výpočtu a zaznamenávání výsledků.

Takto sestavený model byl připraven ke spuštění výpočtu, resp. ke kalibraci.

5.4 Kalibrace a verifikace modelu

Kalibrace modelu probíhala úpravou vybraných parametrů takovým způsobem, aby simulovaná řada průtoků v síti co nejpřesněji odpovídala datům získaných monitorovací kampaní, a tím došlo k redukci nejistot. Kalibrace metodou „pokus omyl“ je sice náročnější než matematické optimalizační metody, ale umožňuje hlubší pochopení závislosti průběhu průtoků na jednotlivých parametrech. Optimalizace parametrů je značně variabilní a neexistuje tak jedno jediné správné řešení. Jednotlivé kroky kalibrace byly postupně zapisovány, aby bylo možné se případně vrátit k předchozím variantám nastavených parametrů.

Nejprve byly do grafu vyneseny naměřené průtoky v závislosti na čase zachycující reakci sítě na dešťové události. Na základě průběhu dešťů a těchto grafů byly pro kalibraci vybrány tři dešťové události, ke kterým byl v grafu následně připojen i průběh modelovaných průtoků. Na vybraných událostech byly sledovány změny průběhu průtoků při změně jednotlivých parametrů.

U tvorby a koncentrace povrchového odtoku byly měněny celkem 4 parametry. Jedním z nich byla šířka povodí. Ta mohla být z map, leteckých snímků, či osobní prohlídky lokality chybně odhadnuta nebo změřena. To samé platí pro sklon povodí. Zmenšováním šířky povodí docházelo k prodlužování doby dotoku vody do systému. Stejný účinek má zmírňování sklonu povodí. Dalším měněným parametrem byl podíl nepropustných ploch v povodí. Menší zastoupení nepropustných ploch v povodí způsobuje snížení průtoků vody v síti, jelikož dochází k nárůstu trvalých ztrát na zpevněných plochách. Posledním měněným parametrem byla v modelu hodnota počátečních ztrát. Čím vyšší byla hodnota tohoto parametru, tím později došlo k odtoku vody z povodí, neboť byla prodloužena doba tvorby dešťového odtoku.

V rámci proudění v síti docházelo pouze k úpravě drsnosti potrubí, která tak byla přibližována reálnému stavu materiálu potrubí kanalizační sítě, případně nánosu sedimentů.

Pro vyhodnocení přesnosti byly zvoleny čtyři objektivní funkce, a to odchylka protékaných objemů $V_{celk.}$, odchylka maximálních průtoků Q_{max} , časová odchylka maximálních průtoků $T_{Q_{max}}$ a koeficient účinnosti modelu NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient). Odchylky $V_{celk.}$ a Q_{max} byly vyžadovány maximálně ve výši 10 %, časová odchylka maximálních průtoků potom do 5 minut a NSE ve výši minimálně 0,8.

Pro verifikaci byly vybrány dvě dešťové události nezávislé na událostech pro kalibraci modelu. Do grafu byly vyneseny měřené hodnoty i hodnoty modelované, a to se sadou parametrů získanou kalibrací, a následně byla zhodnocena přesnost výpočtů simulačního modelu. I pro verifikaci byla vyhodnocena přesnost pomocí odchylek, jejichž přípustná meze byla navýšena na 20 %, časová odchylka a NSE byly ponechány s omezením jako v kalibraci.

5.5 Návrh přečerpávací stanice

Aby bylo možné navrhnout optimální řešení PSOV, byl model doplněn o přečerpávací stanici reprezentovanou retenční nádrží, odtokovým potrubím se škrcením na $2Q_{h,max}$ a potrubím odvádějícím vodu z bezpečnostního přelivu do recipientu. Toto zadání umožnilo měnit retenční objem přečerpávací stanice a analyzovat jeho vliv na poměr odlehčeného množství odpadní vody vůči množství čerpanému.

Při reálném provozu se počítá se dvěma čerpadly navrženými na průtok $2Q_{h,max}$, kde $Q_{h,max}$ je maximální hodinový průtok, která budou ovšem provozována se střídavým chodem. Tato skutečnost byla do modelu zanesena zadáním maximálního možného průtoku v potrubí představujícím potrubí výtlačné. Umístění přelivu, tedy vtoku do přepadového potrubí, bylo vybráno s ohledem na úroveň vtoku do retenční nádrže tak, aby při jejím naplnění nedošlo k výraznějšímu zpětnému vzduť v kanalizační síti. Retenční nádrži byla zadána úroveň dna, hloubka a půdorysná plocha.

Dle ČSN 75 6560 by měla PSOV zahrnovat tzv. havarijní akumulací objem odpovídající čtyřem hodinám maximálního denního přítoku. [54] Tato skutečnost je zanedbána, jelikož se práce nezabývá stavebním řešením PSOV.

Pro citlivostní analýzu efektivity PSOV v dalším kroku byl měněn retenční objem PSOV reprezentovaný retenční nádrží. Ten umožnil zvyšování množství čerpaných odpadních vod odváděných na ČOV Mladá Boleslav při dodržení maximálního průtoku $2Q_{h,max}$ odpovídajícího výkonu čerpání.

Sestavený model byl následně zatížen desetiletou řadou srážkových úhrnů z blízké meteorologické stanice, aby bylo možné vyhodnotit čerpané a přepadající množství odpadních vod.

5.6 Citlivostní analýza efektivity přečerpávací stanice

Cena výstavby PSOV se odvíjí od kubatury obestavěného prostoru a ta se zase odvíjí od toho, jaké množství vody jsme ochotni nechat přepadnout přes bezpečnostní přeliv.

Při citlivostní analýze efektivity PSOV docházelo ke zvětšování retenčního objemu zvětšováním půdorysné plochy retenční nádrže. Jeden metr krychlový obestavěného prostoru přečerpávací stanice stojí podle ceníku vydaného Ústavem územního rozvoje od 7 600 Kč do 18 000 Kč. [55] Pro analýzu byly ceny PSOV vypočítány z minimální i maximální udávané ceny za 1 m^3 .

Z modelových dat byla získána bilance množství čerpané ($V_{\text{čerpaní}}$) a přepadající vody ($V_{\text{přepad}}$), a to pro každou zkoušenou půdorysnou plochu retenční nádrže a pro každý rok desetileté zatěžující srážkové řady. Pro názornost byl stanoven i počet přepadů, kde byl jeden přepad definován jako voda přepadající přes bezpečnostní přeliv v čase t , pokud byl objem přepadlé vody v intervalu $\langle t - 1 \text{ hod}; t \rangle$ nulový. Jinými slovy, je-li mezi přepady menší než hodinový interval bez přepadu, považuje se událost za jeden přepad. Další sledovanou veličinou bylo objem čerpaných srážkových vod $V_{\text{čerp.sráž.}} [\text{m}^3]$, který byl stanoven pomocí rovnice (15) závislé na objemu splaškových vod $V_{\text{splašky}} [\text{m}^3]$ z rovnice (16). Podíl srážkového odtoku na ČOV Mladá Boleslav $R_{\text{sráž.čov.}} [\%]$ z celkového odtoku z PSOV byl vypočten dle (17). Pro každou zkoušenou plochu byl následně z deseti let vypočten roční průměr všech sledovaných veličin a zanesen do tabulky.

$$V_{\text{čerp.sráž.}} = V_{\text{čerpaní}} - V_{\text{splašky}}, \quad (15)$$

$$\text{kde } V_{\text{splašky}} = \frac{Q_{24,\text{prům.}}(\text{Bukovno}) + Q_{24,\text{prům.}}(\text{Bukovno})}{1000} t \quad (16)$$

$$R_{sráž.čov} = \frac{V_{čerp.sráž.}}{V_{čerp.sráž.} + V_{přepad}} 100 \quad (17)$$

Zhodnocení efektivity PSOV proběhlo porovnáním množství přepadlé vody, resp. počtu přepadů, a nákladů na zvětšení retenčního objemu. Stanovené hodnoty podílu čištěných srážkových vod $R_{sráž.čov}$ byly porovnány s požadavky udávanými normou ČSN 75 6262. Norma sice uvádí podíl srážkového odtoku na ČOV 2 000 EO a více, čemuž počtem EO ČOV Bukovno neodpovídá, ale dojde k jejímu odstavení a odpadní vody budou čerpány na ČOV Mladá Boleslav, která je navržena pro více než 100 000 EO [56]. Pro kategorii ČOV 10 001–100 000 EO udává norma podíl srážkového odtoku 55 % [57].

6 Výsledky a pozorování

6.1 Orientace v zájmovém území

Výběr měrných profilů proběhl na základě GIS obce Bukovno a osobní návštěvy zájmového území. Vzhledem k tomu, že cílem bylo získat informace o dešťových událostech, ale i bezdeštných průtocích mezi nimi, byly vybrány dva měrné profily – jeden na jednotné kanalizaci obce Bukovno a jeden na oddílné splaškové kanalizaci obce Líny. Umístění vybraných měrných profilů a instalovaného srážkoměru je zobrazeno na Obr. 26. V příloze 12.1 jsou k nahlédnutí karty jednotlivých měrných stanovišť.



Obr. 26: Umístění měrných profilů v zájmové oblasti; upraveno z [46]

6.2 Monitorovací kampaň

K instalaci přístrojů došlo v úterý 6. 10. 2020 a monitoring následně pokračoval až do pondělí 30. 11. 2020. Demontáž přístrojů proběhla 20. 12. 2020. Jelikož 25. 10. 2020 proběhla změna času z letního na zimní, došlo v získaných datech k časovému posunu o hodinu a tuto skutečnost bylo nutné vzít v potaz při jejich vyhodnocování. Každé dva týdny proběhla kontrola přístrojů a v případě potřeby i výměna baterií. Měření proběhlo bez výpadků.

6.2.1 Kalibrace srážkoměru

Před instalací srážkoměru v terénu proběhla jeho kalibrace, a to jak statická, tak dynamická. Kalibrace byly prováděny v laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze pod odborným dohledem.

Statická kalibrace

Statická kalibrace byla provedena dle metodiky uvedené v kapitole 5.2.1. Dosažené objemy zachycené člunkem před překlopením jsou zaneseny v Tab. 3, kde jsou zároveň uvedeny průměrné hodnoty objemu pro každou stranu i jejich součet. Průměrné hodnoty pro jednotlivé strany spadají do intervalu $\langle 4,7;5,3 \rangle$ a zároveň celkový průměr spadá do intervalu $\langle 9,7;10,3 \rangle$. Nastavení člunku tak bylo vyhodnoceno jako vyhovující a dále bylo přistoupeno k dynamické kalibraci.

Tab. 3: Vyhodnocení statické kalibrace provedené před dynamickou kalibrací

		levá strana	pravá strana
		V_L [ml]	V_P [ml]
překlopení č.	1	5,1	4,9
	2	4,9	4,9
	3	4,8	5,0
	4	5,0	4,9
	5	5,0	4,8
průměr (V_L a V_P)		4,96	4,90
součet ($V_L + V_P$)		9,86	

Po provedení a vyhodnocení dynamické kalibrace byla pro kontrolu nastavení člunku po dynamické zátěži zopakována statická kalibrace. Hodnoty získané při měření jsou zaznamenány v Tab. 4. Hodnoty průměrů byly sice vypočteny nižší, avšak i tak spadají do patřičných intervalů a nastavení tak bylo považováno za vyhovující.

Tab. 4: Vyhodnocení statické kalibrace provedené po dynamické kalibraci

		levá strana	pravá strana
		V_L [ml]	V_P [ml]
překlopení č.	1	4,8	4,9
	2	4,8	4,9
	3	4,8	5,0
	4	4,8	4,9
	5	4,9	4,8
průměr (V_L a V_P)		4,82	4,90
součet ($V_L + V_P$)		9,72	

Dynamická kalibrace

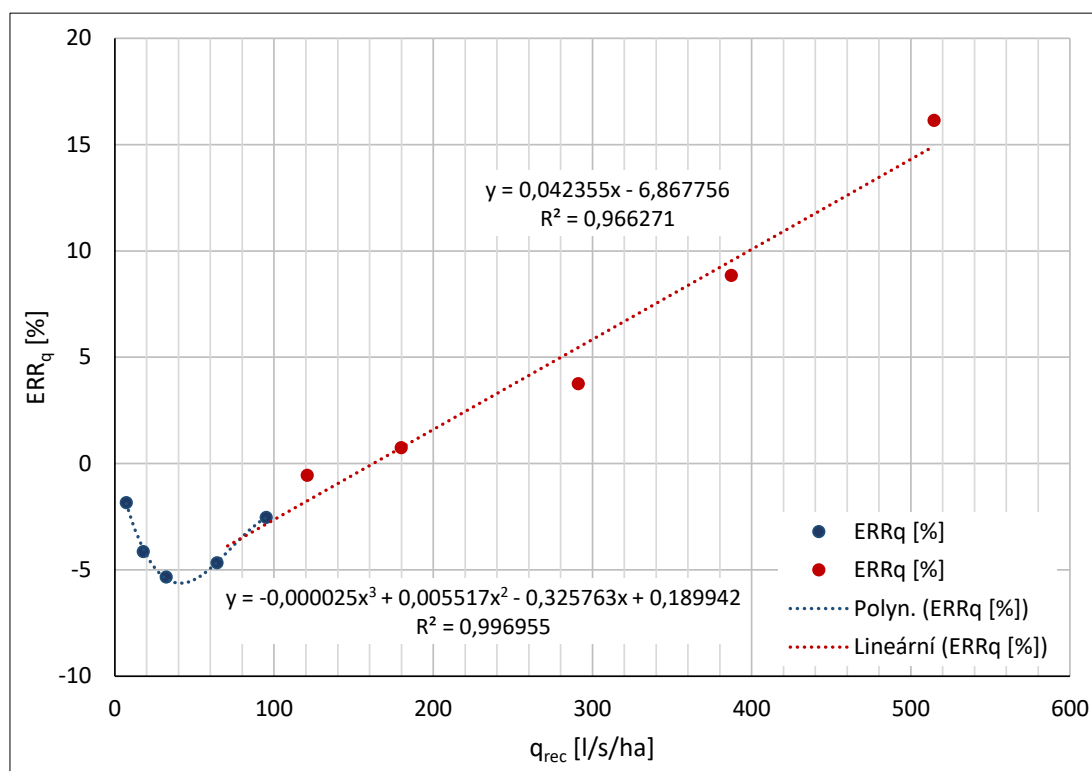
Po první statické kalibraci následovala dynamická kalibrace. Celkem proběhlo deset testů s různým nastavením otáček peristaltického čerpadla. Po sedmém měření, a po každém dalším, byla doplněna voda do odběrné nádoby umístěné na váze.

Během testu byla sledována doba trvání, váha využití vody, jejímž převodem $1 \text{ g} = 1 \text{ ml}$ byl stanoven objem V_{real} , a počet překlopení. Na základě těchto hodnot byly následně pomocí rovnic (9) až (11) vyhodnoceny hodnoty veličin V_{rec} , q_{rec} a ERR_q podle Tab. 5.

Tab. 5: Vyhodnocení dynamické kalibrace

[ot./min]	trvání [s]	váha [g]	překlopení	V_{real} [ml]	V_{rec} [ml]	q_{rec} [l/s/ha]	ERR_q [%]
2	1663	58,9	12	58,9	60	7,22	-1,83
5	781	67,1	14	67,1	70	17,93	-4,14
9	464	71,0	15	71,0	75	32,33	-5,33
18	467	143,0	30	143,0	150	64,24	-4,67
27	473	219,3	45	219,3	225	95,14	-2,53
35	480	288,4	58	288,4	290	120,83	-0,55
53	478	433,2	86	433,2	430	179,92	0,74
88	601	907,9	175	907,9	875	291,18	3,76
123	599	1262,6	232	1262,6	1160	387,31	8,84
176	719	2148,5	370	2148,5	1850	514,60	16,14

Vypočtené hodnoty chyby měření byly vyneseny do grafu v závislosti na vydatnosti. Takto vzniklý graf byl proložen dvěma závislostmi podle grafu na Obr. 27. Pro chyby měření při vydatnostech 78 l/s/ha a vyšší bylo zvoleno proložení lineární funkcí, která ačkoli má mírně menší těsnost než proložení polynomickou funkcí, lépe vystihuje podstatu nárůstu chybovosti při zvyšování vydatností.



Obr. 27: Graf chyby ERR_q jako funkce vydatnosti q_{rec} a jeho proložení vhodnými závislostmi

6.2.2 Kalibrace měrných profilů pomocí stopovače

Pro kalibraci měrných profilů bylo předem naváženo celkem 12 dávek soli dle Tab. 6, 6 s označením A pro měrný profil Bukovno a 6 s označením B pro měrný profil Líny.

Tab. 6: Přehled všech předem připravených navážek

navážka NaCl [g]			
Bukovno		Líny	
A1	39,55	B1	37,85
A2	44,65	B2	39,35
A3	58,50	B3	58,30
A4	59,10	B4	59,45
A5	77,30	B5	81,70
A6	78,30	B6	77,90

Po příjezdu cisterny na místo měření bylo zjištěno, že výtok z cisterny nelze významně regulovat a na základě této skutečnosti došlo ke změnám v plánovaném dávkování stopovače. Navážky 1 a 2 byly jednotlivě dávkovány do proudu vody v kanalizaci bez nadlepšení průtoku vodou z cisterny. Navážky 3 a 4 nakonec nebyly využity vůbec, a to právě kvůli neumožnění regulace prázdnění cisterny. Měření za pomoci cisterny proběhla nakonec pouze dvě, a to jedno pro každý měrný profil. Jelikož vypouštění cisterny odpovídalo průtoku asi 11 l/s, byly navážky 5 a 6 sloučeny do jedné a injektaž roztoku probíhala do proudu o takto nadlepšeném průtoku. Použité navážky byly uvedeny též v kapitole 5.2.2, Tab. 2.

Pro měrný profil Líny proběhla, stejně jako v profilu Bukovno, tři měření, a to s navážkami B1, B2 a B5 + B6. Vyhodnoceno však bylo pouze měření s navážkou B2, jelikož průběh odezvy u B1 a B5 + B6 nebyl reprezentativní povahy. Pro vyšší přesnost by bylo vhodné kalibraci měrného profilu Líny zopakovat, k tomu ale z časových důvodů nedošlo.

Grafy s průběhem odezvy stopovače pro jednotlivé navážky jsou k dispozici k nahlédnutí na Obr. 50 až Obr. 53 v příloze 12.3. Vyhodnocené průtoky jednotlivých testů reprezentuje Tab. 7.

Tab. 7: Vyhodnocení průtoků z měření pomocí stopovačů

	A1	A2	A5 + A6	B2
Q [l/s]	0,77	0,89	11,57	0,32

Výsledky kalibrace jsou uvedeny v Tab. 8. Vyhodnocení bylo převzato. [58]

Tab. 8: Porovnání hodnot průtoků v měrných profilech Bukovno a Líny; upraveno z [58]

měrný profil	kalibrační měření	měření přístroji			korekce
	Q [l/s]	h [mm]	v [m/s]	Q [l/s]	
Bukovno	0,81	18	-	-	korekce offsetu ultrazvukového senzoru o -4 mm ¹
	11,15	45	-	-	
Q _{Bukovno} ²	11,15	41	1,61	12,32	korekce rychlosti o -10 %
Líny	0,45	9	-	-	korekce offsetu ultrazvukového senzoru o +3 mm ³

¹Při příliš malé hloubce proudění je měření hloubky výsuvným metrem relativně nepřesné. Určení offsetu vycházelo z aplikace Manningovy rovnice při známém sklonu potrubí a Manningově drsnostním součiniteli $n = 0,015$.

²Kalibrace byla provedena jen pro zvýšený průtok, při bezdeštném průtoku byl rychlostní senzor nedostatečně kryt vodou.

³Při příliš malé hloubce proudění je měření hloubky výsuvným metrem relativně nepřesné. Určení offsetu vycházelo z aplikace Manningovy rovnice při známém sklonu potrubí a Manningově drsnostním součiniteli $n = 0,012$.

Měření hladin a rychlostí použitými měřicími přístroji bylo na základě kalibrace vyhodnoceno jako dostatečně přesné. Kalibrací byla prokázána dostatečná přesnost měření hladin a rychlostí použitou měřicí technikou. Drobné odchylky spočívaly především v nastavení offsetů ultrazvukových a tlakových čidel a korekci měřeného rychlostního pole. [58]

6.2.3 Výsledky monitoringu

Období monitorovací kampaně bylo typicky podzimní, srážkových událostí tedy bylo dostatek, ovšem všechny byly charakteristické nízkou intenzitou a v datech tak chybí jejich různorodost. Za dobu průběhu monitorovací kampaně došlo k celkovému úhrnu srážek 47,99 mm. Tato hodnota nemusí být reprezentativní pro celé sledované povodí, jelikož použitím pouze jednoho srážkoměru nebylo možné pokrýt prostorové rozložení deště v povodí. Vzhledem k poměrně malé ploše zájmového území však není vzniklá chyba velkého významu. Pro získání přesnějších dat by bylo vhodnější použít sadu tří srážkoměrů umístěných do rovnostranného trojúhelníku.

Grafy zachycující monitorované průtoky v síti jsou k nahlédnutí v příloze 12.2 na Obr. 48 a Obr. 49. Významné dešťové události jsou zaznamenány v Tab. 9. Tyto události byly použity pro kalibraci a verifikaci simulačního modelu.

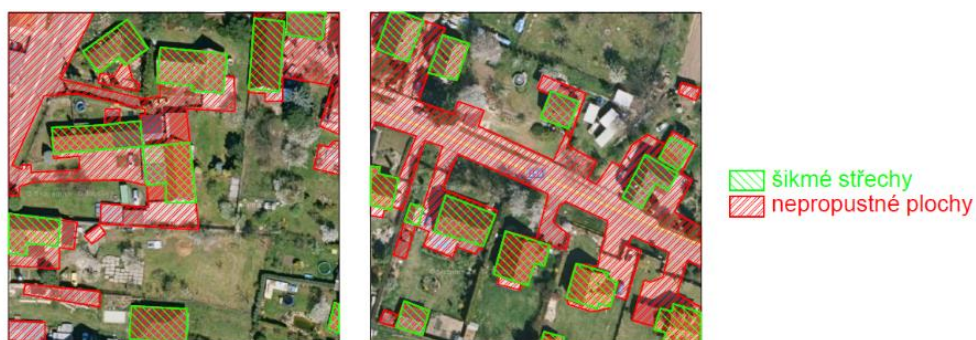
Tab. 9: Hlavní dešťové události v monitorovaném období

dešťová událost	začátek	konec	$T_{\text{srážky}}$	$h_{\text{celk.}}$	$q_{\text{prům.}}$	q_{max}
			[min]	[mm]	[l/s/ha]	[l/s/ha]
1	10.10.2020 6:00	10.10.2020 20:20	574	4,16	1,34	16,03
2	14.10.2020 0:00	15.10.2020 3:55	1466	4,52	0,51	16,03
3	22.10.2020 13:00	26.10.2020 7:50	3536	4,14	0,19	16,03
4	29.10.2020 3:05	01.11.2020 3:00	2869	14,04	0,82	16,03
5	01.11.2020 3:00	03.11.2020 12:35	1601	4,62	0,48	16,03

6.3 Tvorba modelu

Zájmové území bylo rozděleno na dvě dílčí povodí, Bukovno a Líny, kde došlo k zanedbání stokové sítě. Z obou dílčích povodí je vedeno kanalizační potrubí, které se spojuje v odlehčovací komoře. Ta byla v simulačním modelu nahrazena běžnou kanalizační šachtou. Její chování nebylo v zadané úloze relevantní, jelikož měření probíhalo výše proti proudu, a proto nejsou naměřené hodnoty jejím chováním ovlivněny. Před spojovacím uzlem byla v modelu na každém potrubí osazena první šachta proti proudu, a to v reálné vzdálenosti odečtené z GIS. Za spojovací uzel byl vložen výtokový bod a do povodí Bukovno byl umístěn srážkoměr.

Parametry hydrologického modelu, jako je plocha, šířka, nebo sklon povodí, byly stanoveny pomocí map včetně ortofotografických. Podíl nepropustných ploch a šikmých střech byl určen pro obě dílčí povodí metodou vzorového hektaru. Vzorový hektar pro povodí Bukovno, resp. Líny, je na Obr. 28.

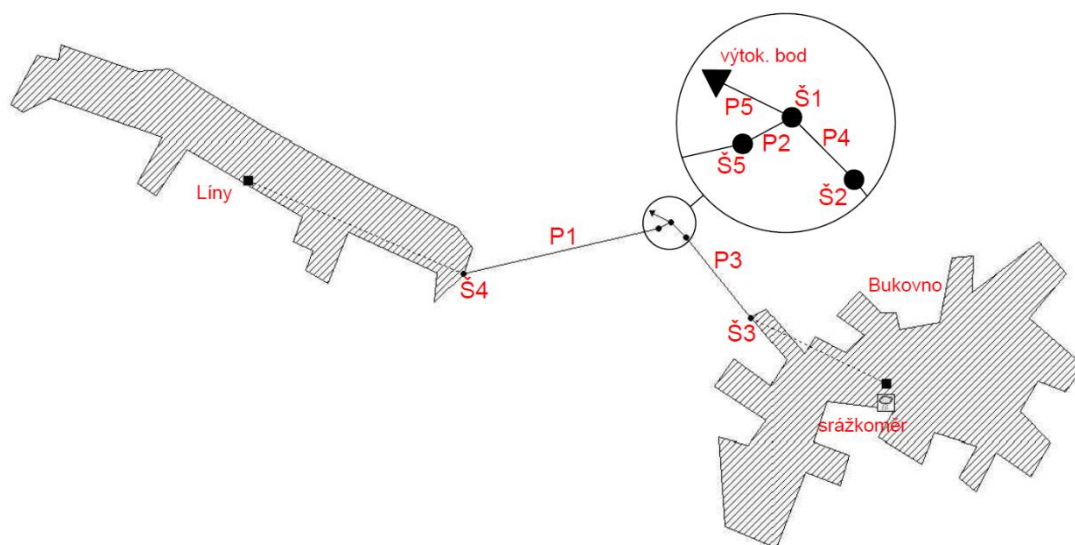


Obr. 28: Vzorový hektar – povodí Bukovno (vlevo) a povodí Líny (vpravo)

Délka potrubí a jeho průměr, stejně tak parametry kanalizačních šachet, byly odečteny z GIS oblasti a kanalizačního řádu. Ostatní parametry, tedy například drsnost potrubí, byly odhadnuty při osobní prohlídce sítě. Výpis prvků a jejich systémová data jsou uvedeny v Tab. 10. Sestavený model s označením jednotlivých prvků připravený ke kalibraci je k nahlédnutí na Obr. 29.

Tab. 10: Výpis prvků modelu a jejich systémová data

	povodí			potrubí				
	Bukovno	Líny		P1	P2	P3	P4	P5
plocha [ha]	30,62	18,96	průřez	kruh	kruh	kruh	kruh	kruh
šířka [m]	285	144	průměr [m]	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5
sklon [%]	5,5	2,8	délka [m]	397,21	13,67	298,81	60,4	20
zpevněné plochy [%]	38	40	materiál	PVC	PVC	beton	beton	beton
šikmé střechy [%]	15	14	drsnost	0,012	0,012	0,015	0,015	0,015
ostatní prvky			šachty					
umístění			Š1	Š2	Š3	Š4	Š5	
srážkoměr	těžiště povodí Bukovno		dno [m n. m.]	270	274,8	293,7	280,97	271,86
	dno [m n. m.]	hloubka [m]	hloubka [m]	2	2,29	2,07	1,54	1,02
výtokový bod	269	0						



Obr. 29: Sestavený model s označením prvků připravený ke kalibraci

Délky úseků potrubí byly změřeny programem SWMM a nebyly měněny, jelikož se se od reálných příliš neliší. Materiál potrubí je uveden v souvislosti se stanovením jeho drsnosti. Dno šachty Š1 a její hloubka byly odhadnuty. Š1 nahrazuje odlehčovací komoru a jak již bylo zmíněno, její chování v modelu není zohledněno.

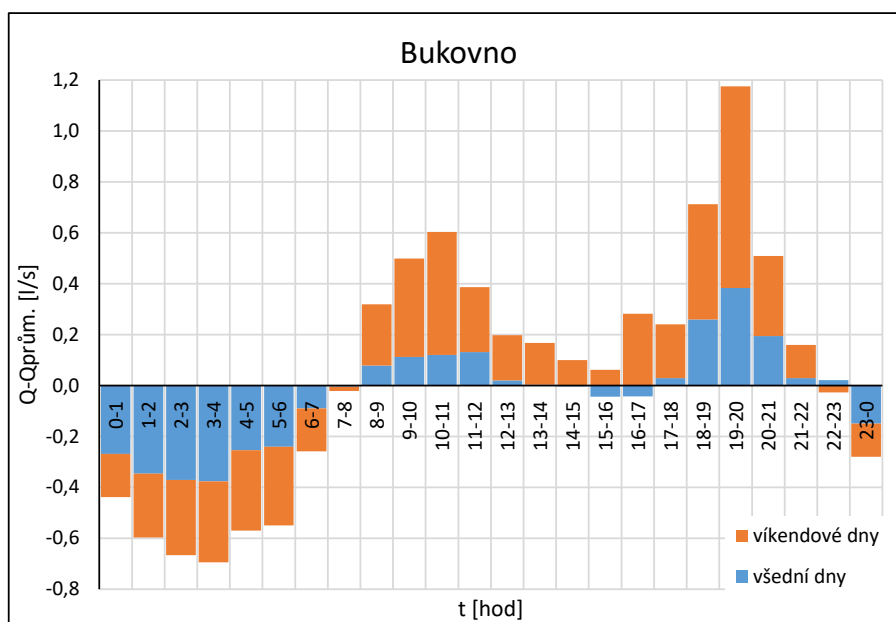
Data naměřená srážkoměrem byla v textovém souboru připojena k modelovému srážkoměru.

Z dat získaných pomocí monitoringu bylo vybráno pět bezdeštných všedních dní a tři bezdeštné dny víkendové podle Tab. 11. Hodnoty hodinových průtoků, denních průměrů a získaných koeficientů jsou pro Bukovno zachyceny v Tab. 19, pro Líny potom v Tab. 20, které jsou k nalezení v příloze 12.4.

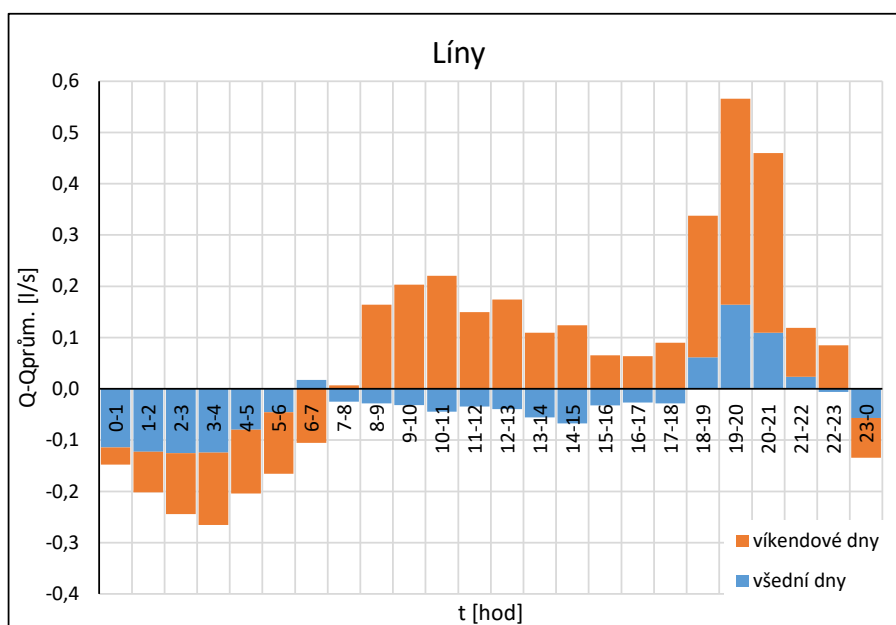
Tab. 11: Vybrané bezdeštné dny

všední dny	víkendové dny
16.10.2020	17.10.2020
19.10.2020	18.10.2020
20.10.2020	29.11.2020
21.10.2020	
22.10.2020	

Hodinové průtoky znormalizované k hodnotě $Q_{24,prům.}$ jsou zobrazeny pro Bukovno v grafu na Obr. 30 a pro Líny v grafu na Obr. 31.



Obr. 30: Hodinové bezdeštné průtoky znormalizované k celkovému dennímu průměru $Q_{24,prům.}$ – Bukovno



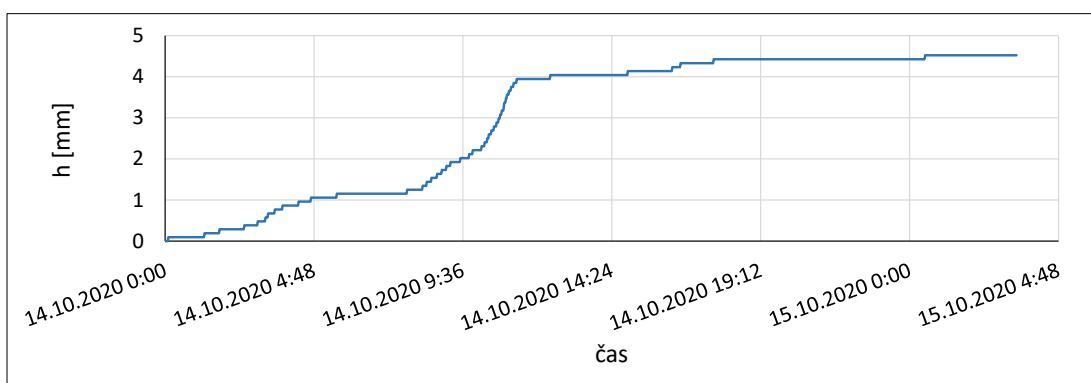
Obr. 31: Hodinové bezdeštné průtoky znormalizované k celkovému dennímu průměru $Q_{24,prům.}$ – Líny

6.4 Kalibrace a verifikace modelu

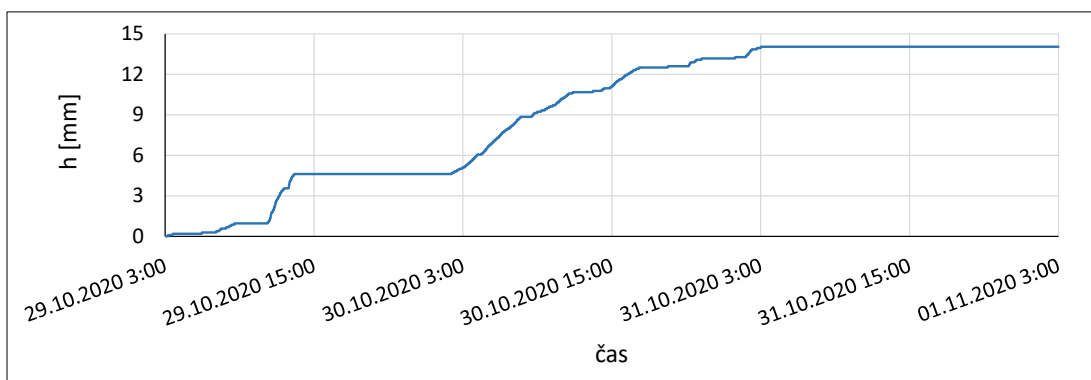
Z Tab. 9 v kapitole 6.2 byly pro kalibraci vybrány dešťové události dle Tab. 12, na kterých byly sledovány změny v průběhu modelované řady průtoků při změnách vybraných parametrů. Průběhy dešťových událostí znázorněné součtovými čarami srážkových úhrnů zobrazují Obr. 32 až Obr. 34. Kalibrační grafy jednotlivých dešťových událostí jsou k nahlédnutí v příloze 12.3.

Tab. 12: Dešťové události vybrané pro kalibraci modelu

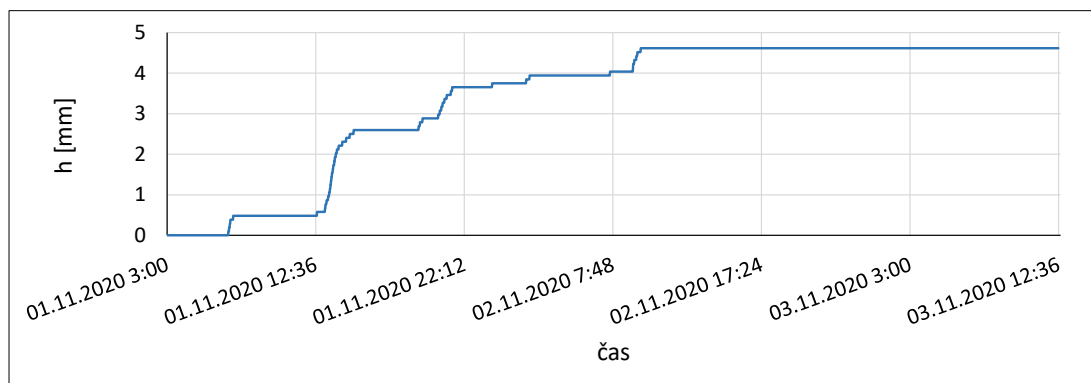
BUKOVNO			LÍNY		
dešťová událost	od	do	dešťová událost	od	do
1	14.10.2020 0:00	15.10.2020 3:51	1	14.10.2020 0:00	15.10.2020 3:55
2	29.10.2020 3:03	01.11.2020 3:00	2	29.10.2020 3:05	01.11.2020 3:00
3	01.11.2020 3:00	03.11.2020 12:36	3	01.11.2020 3:00	03.11.2020 12:35



Obr. 32: Součtová čára srážkového úhrnu kalibrační dešťové události 1



Obr. 33: Součtová čára srážkového úhrnu kalibrační dešťové události 2



Obr. 34: Součtová čára srážkového úhrnu kalibrační dešťové události 3

Měněnými parametry hydrologického modelu byly šířka a sklon povodí, podíl nepropustných ploch a hodnota počátečních ztrát. Šířka povodí byla při kalibraci snížena, čímž vzniklo prodloužení doby dotoku vody do stokového systému. Sklon byl však při kalibraci o desetiny jednotek navýšen a tím došlo naopak ke zkrácení doby dotoku. Tyto zdánlivě protichůdné kroky však vedly k optimalizaci sady parametrů modelu.

Při kalibraci dále došlo k zásadnímu snížení procentuálního zastoupení nepropustných ploch. Původní procento z plochy povodí udávalo reálné zastoupení nepropustných ploch. Snížením tohoto podílu vznikla redukovaná nepropustná plocha lépe odpovídající reálné tvorbě odtoku. K výraznějšímu snížení podílu nepropustných ploch došlo u povodí Líny, které je odvodňováno oddílnou splaškovou kanalizací.

Jelikož mohla simulace díky vysoké připravenosti povodí k odtoku po celou dobu sledovaného období probíhat kontinuálně, nehrálo nastavení počátečních ztrát v kalibraci významnou roli. Pro verifikaci byla ale jedna událost zvolena z počátku monitoringu, kde se počáteční ztráty projevovaly, proto byla jejich hodnota optimalizována a u povodí Bukovno došlo k jejímu snížení na 1 mm.

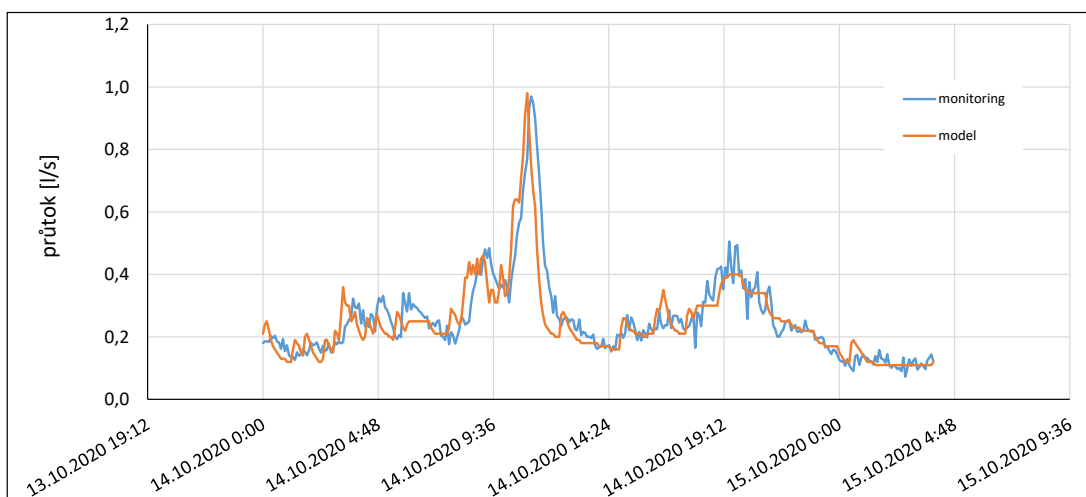
Jediným měněným parametrem hydraulického modelu byla drsnost potrubí, která byla navýšena. Tím došlo ke zpomalení průtoku odpadních vod stokovým systémem, tedy ke zdržení doby dotoku k měrnému profilu.

Původní a kalibrované sady parametrů lze shlédnout v Tab. 13.

Tab. 13: Porovnání sad parametrů modelu před kalibrací a po kalibraci.

		potrubí	povodí			
		drsnost [-]	šířka [m]	sklon [%]	nepropustné plochy [%]	počáteční ztráty [mm]
Bukovno	před kalibrací	0,015	285	5,5	38	2
	po kalibraci	0,019	250	4,5	8	1
Líny	před kalibrací	0,012	144	2,8	40	2
	po kalibraci	0,015	120	2	0,7	2

I po optimalizaci parametrů je z Obr. 35 první dešťové události kalibrace pro povodí Bukovno zřetelný časový rozdíl dotoku mezi modelem a monitoringem. Šířka povodí zohledňuje délku dotoku po povrchu povodí ke stokové síti, ale stoková síť byla v takto schematizovaném povodí zanedbána, tudíž nebyla doba dotoku v modelu zohledněna, a proto voda v modelu dotéká oproti monitoringu s předstihem.



Obr. 35: Graf pro kalibraci parametrů modelu se zřetelným časovým rozdílem dotoku vody z povodí mezi modelem a monitoringem – událost 1 pro obec Líny

Z toho důvodu byl zaveden dodatečný kalibrační parametr ΔT . Pro Bukovno byla s ohledem na časový krok výstupů modelu hodnota ΔT stanovena na 18 minut, pro Líny potom 15 minut.

Po kalibraci byly vyhodnoceny objektivní funkce pro zhodnocení přesnosti modelu Tab. 14. Všechny odchylky vyhovovaly stanoveným mezím, pouze hodnota NSE byla v povodí Bukovno lehce podlimitní. Koeficient Nash Sutcliffe Eficiency je velmi citlivý na časový posun monitorovaných a simulovaných dat, a proto byla tato odchylka vyhodnocena jako nevýznamná.

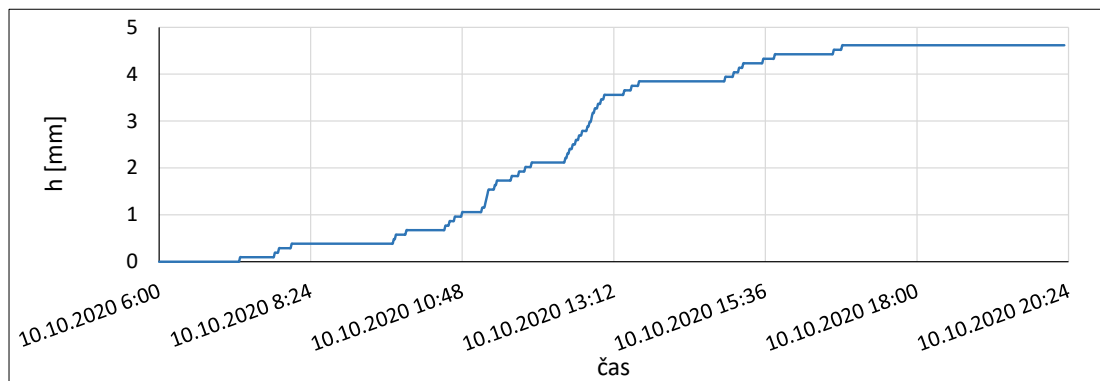
Tab. 14: Vyhodnocení objektivních funkcí pro kalibraci

	kalibrace			
	$\Delta V_{\text{celk.}} [\text{m}^3]$	$\Delta Q_{\text{max.}} [\text{l/s}]$	$\Delta T_{Q_{\text{max}}} [\text{min}]$	NSE [-]
Bukovno	7,78	6,15	0:02:00	0,78
	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	NEVYHOVUJE
Líny	-2,28	2,37	0:03:20	0,90
	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

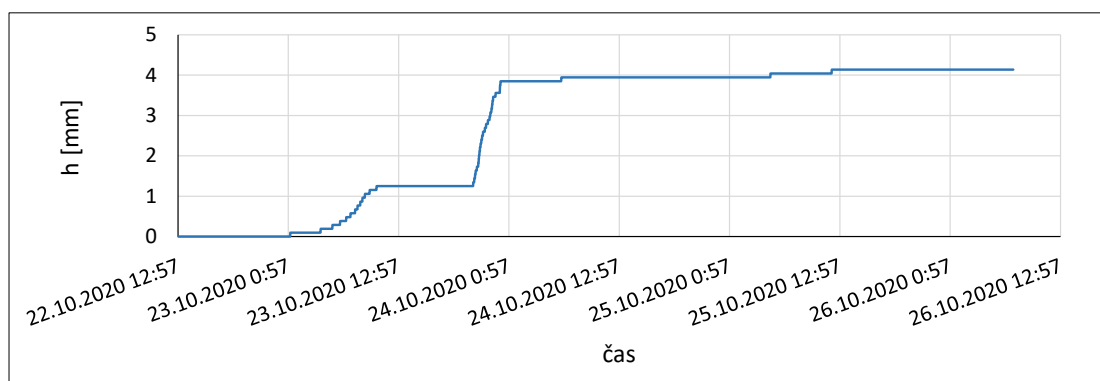
Pro verifikaci modelu byly vybrány dvě další dešťové události (Tab. 15). Průběhy dešťových událostí jsou, obdobně jako u kalibračních událostí, zachyceny na Obr. 36 a Obr. 37.

Tab. 15: Dešťové události vybrané pro verifikaci modelu

BUKOVNO			LÍNY		
dešťová událost	od	do	dešťová událost	od	do
1	10.10.2020 6:00	10.10.2020 20:21	1	10.10.2020 6:00	10.10.2020 20:20
2	22.10.2020 13:00	26.10.2020 7:54	2	22.10.2020 13:00	26.10.2020 7:50



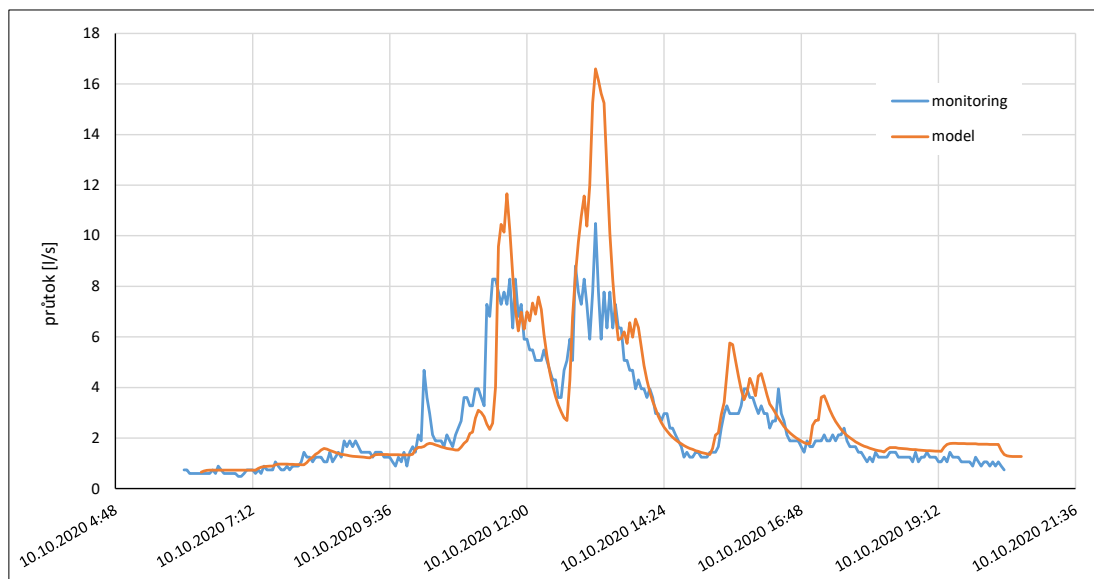
Obr. 36: Součtová čára srážkového úhrnu verifikační dešťové události 1



Obr. 37: Součtová čára srážkového úhrnu verifikační dešťové události 2

Jak je vidět na Obr. 38, první verifikační událost v povodí Bukovno nemá typický tvar hydrogramu. Tyto nesrovnalosti v kulminaci průtoků pravděpodobně vznikly chybou v měření. Právě tato skutečnost způsobila zásadní chybu při výpočtu odchylky

maximálních průtoků, jak lze vidět v Tab. 16. Ze stejného důvodu není vyhovující hodnota *NSE*. Všechny verifikační grafy jsou k nahlédnutí v příloze 12.6.



Obr. 38: Verifikační graf události 1 povodí Bukovno

Tab. 16: Vyhodnocení objektivních funkcí pro verifikaci

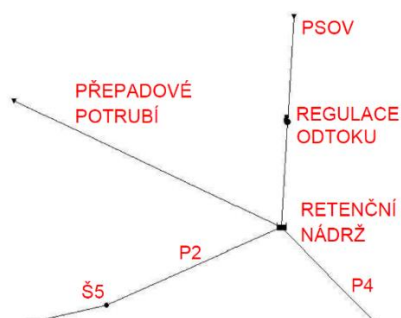
	verifikace			
	$\Delta V_{\text{celk.}} [\text{m}^3]$	$\Delta Q_{\text{max.}} [\text{l/s}]$	$\Delta T_{Q_{\text{max}}} [\text{min}]$	<i>NSE</i> [-]
Bukovno	15,40	30,82	0:01:30	0,67
	VYHOVUJE	NEVYHOVUJE	VYHOVUJE	NEVYHOVUJE
Líny	-4,21	7,67	0:02:30	0,81
	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE	VYHOVUJE

Vyhodnocení objektivních funkcí pro kalibraci i verifikaci obou povodí je k nahlédnutí v Tab. 21 v příloze 12.7.

Kalibrace a verifikace byly vyhodnoceny jako úspěšné. Veškeré nejasnosti a odchylky byly objasněny a model bylo možné využít pro další výpočty.

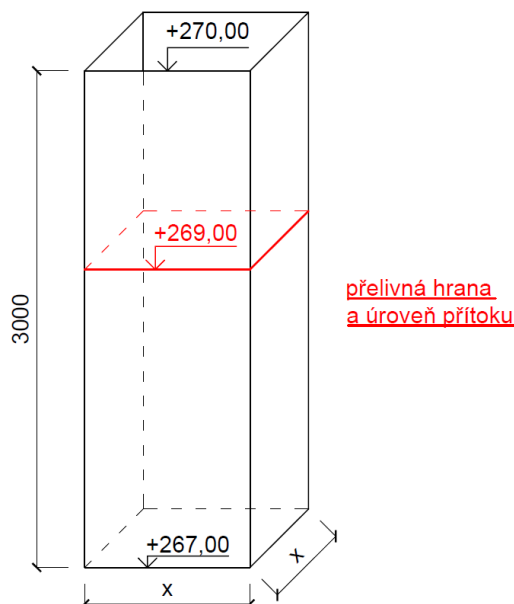
6.5 Návrh přečerpávací stanice

Přečerpávací stanici v modelu reprezentují tři prvky viditelné na detailu modelu na Obr. 39, a to retenční nádrž, odtokové potrubí se škrcením na $2Q_{h,max}$ a potrubí odvádějící vodu z bezpečnostního přelivu.



Obr. 39: Detail úpravy modelu

Výkon čerpání odpadních vod reprezentovaný škrcením průtoku byl výpočtem stanoven na 4,7 l/s, což odpovídá $2Q_{h,max}$. Na tuto hodnotu jsou běžně navrhovány ČOV. Místní biologická ČOV v Močidlech byla navržena na maximální průtok 5 l/s. Hodnota 4,7 l/s je přesnější, neboť lépe odpovídá skutečnosti, a proto s ní bylo počítáno pro výkon čerpání a byla tak zadána jako maximální průtok vedený na ČOV Mladá Boleslav, kam budou vody přepojeny. Bezpečnostní přeliv, resp. vtok do přepadového potrubí, byl navržen 2 m nade dnem retenční nádrže, které bylo umístěno ve výšce 267 m n. m. Přítok do nádrže byl rovněž nastaven do úrovně 2 m nade dnem. Navýšení retenčního objemu retencí v potrubí bylo zanedbáno. Výchozí nastavení uvažovalo půdorysnou plochu 0 m², což odpovídalo variantě bez umístění retenční nádrže. Schematické znázornění výchozího nastavení přečerpávací stanice je na Obr. 40.



Obr. 40: Schéma výchozího nastavení PSOV

Místo srážkové řady získané při monitoringu byla do modelu nahrána desetiletá řada srážkových úhrnů s časovým krokem $\Delta t = 1$ min z blízké meteorologické stanice.

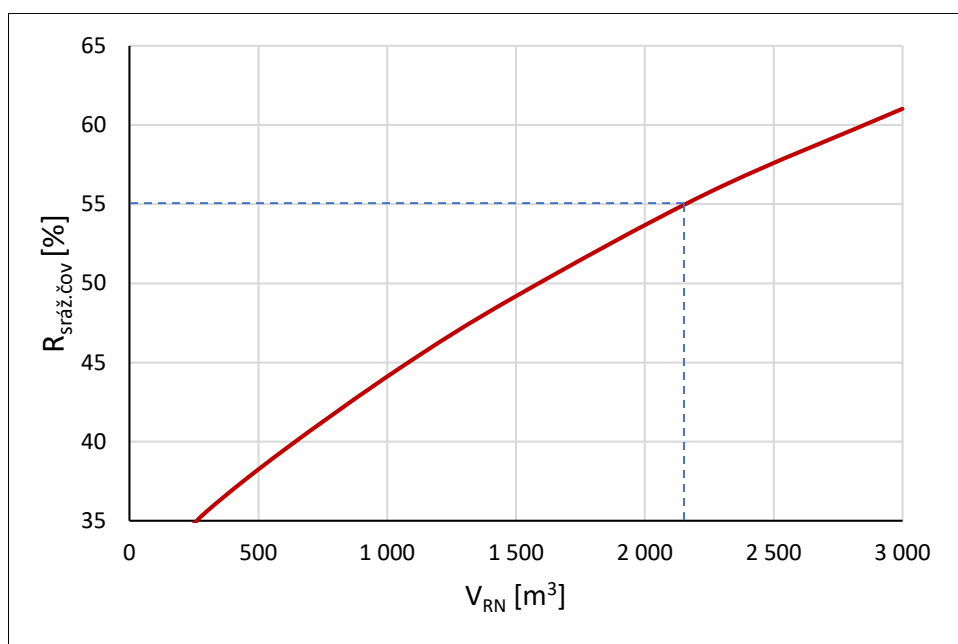
6.6 Citlivostní analýza efektivity přečerpávací stanice

Při citlivostní analýze efektivity byla v modelu měněna půdorysná plocha $A_{pūdorys}$ retenční nádrže, a tedy i její objem V_{RN} . Všechny stanovované veličiny byly pro jednotlivé půdorysné plochy vyhodnoceny v každém roce aplikované desetileté srážkové řady, tedy v letech 1999 až 2008. Tabulky vyhodnocení pro jednotlivé roky jsou k nahlédnutí v příloze 12.8 v Tab. 22 až Tab. 31. Z hodnot v těchto tabulkách byly s přihlédnutím k přestupným rokům vypočteny roční průměry, které jsou k vidění v Tab. 17.

Tab. 17: Citlivostní analýza efektivity PSOV

$A_{pūdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	82 285,22	50 262,86	32 022,35	13	14 406,43	31,0
5	15	82 285,12	50 445,17	31 839,95	12	14 588,74	31,4
10	30	82 284,78	50 528,76	31 756,02	12	14 672,33	31,6
55	165	82 284,95	51 316,86	30 968,09	12	15 460,42	33,3
100	300	82 284,74	52 385,52	29 899,22	11	16 529,09	35,6
200	600	82 284,98	54 185,38	28 099,60	10	18 328,95	39,5
350	1 050	82 286,12	56 588,98	25 697,14	9	20 732,55	44,7
500	1 500	82 287,73	58 694,21	23 593,52	8	22 837,78	49,2
750	2 250	82 289,58	61 740,07	20 549,51	7	25 883,64	55,7
1 000	3 000	82 291,21	64 190,50	18 100,72	6	28 334,06	61,0

Do grafu byla vynesena závislost podílu čištěných srážkových vod $R_{sráž.čov}$ na retenčním objemu V_{RN} (Obr. 41).



Obr. 41: Závislost podílu čištěných srážkových vod na retenčním objemu

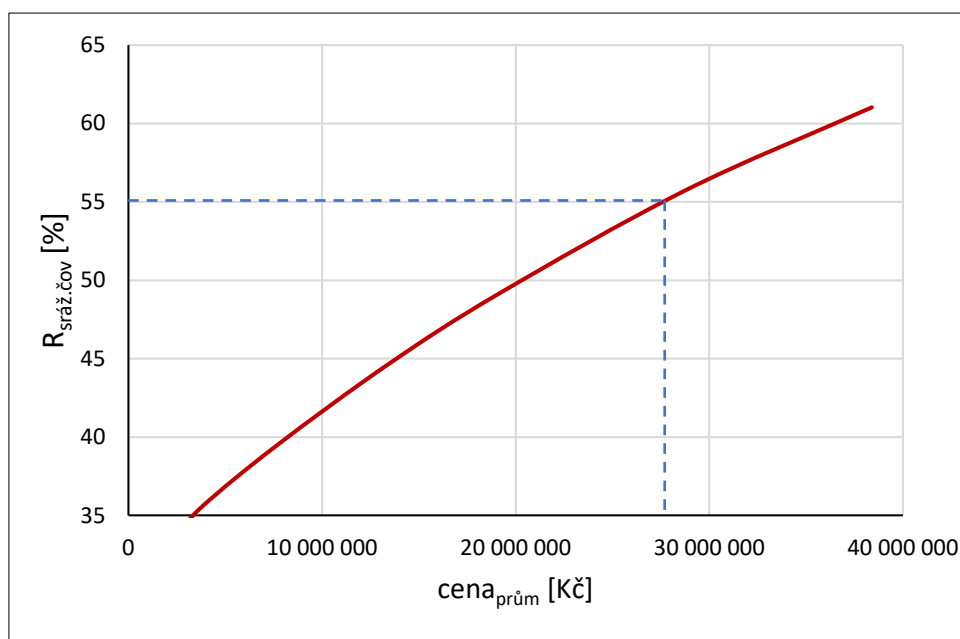
K dosažení srážkového odtoku 55 % udávaného normou ČSN 75 6262 by byl potřebný retenční objem PSOV větší než 2 000 m³.

V Tab. 18 je k výsledkům analýzy zaveden parametr hodnocení z hlediska ceny.

Tab. 18: Citlivostní analýza efektivity PSOV s parametrem ceny

$A_{\text{půdorys}}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	cena _{min} [Kč]	cena _{max} [Kč]	cena _{prům.} [Kč]	$R_{\text{sráž.čov}}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	3 840	31,0
5	15	114 000	270 000	192 000	31,4
10	30	228 000	540 000	384 000	31,6
55	165	1 254 000	2 970 000	2 112 000	33,3
100	300	2 280 000	5 400 000	3 840 000	35,6
200	600	4 560 000	10 800 000	7 680 000	39,5
350	1 050	7 980 000	18 900 000	13 440 000	44,7
500	1 500	11 400 000	27 000 000	19 200 000	49,2
750	2 250	17 100 000	40 500 000	28 800 000	55,7
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	38 400 000	61,0

Do grafu (Obr. 42) byl vynesena vývoj $R_{\text{sráž.out}}$ při sledování ceny PSOV. Aby procento srážkového odtoku odpovídalo požadované hodnotě 55 % dle ČSN 75 6262, byla by cena PSOV asi 28 mil. Kč.



Obr. 42: Závislost podílu čišťených srážkových vod na ceně PSOV

Při retenčním objemu PSOV vyšším než 300 m³ sice dochází k významnému snižování objemu přepadající odpadní vody, rovněž však dochází k výraznému navýšení ceny a retenčního objemu.

Při výběru menšího retenčního objemu, resp. do $A_{přidorys} = 5 \text{ m}^2$, dochází k nárůstu počtu přepadů o jednu událost. Například v roce 2001 se při navýšení objemu retenční nádrže navýšil i počet přepadů, což může být způsobeno prodlužováním intervalu mezi přepadovými událostmi, které při byly při menším retenčním objemu vyhodnoceny jako jeden přepad. Procento srážkového odtoku je pro tyto varianty nevyhovující.

Varianta s objemem 600 m^3 , se zdá být z hlediska množství srážkového odtoku i z hlediska snížení množství přepadů rovněž vhodná. Přečerpávací stanice s takovým retenčním objemem v průměru za téměř 10 mil. Kč je však obtížně uskutečnitelná.

Ačkoli je procento srážkového odtoku na ČOV při variantě o kubatuře 300 m^3 jen necelých 36 %, jako nejvhodnější řešení se jeví právě tato varianta.

7 Závěr

Ačkoli se zpracování zadání neobešlo bez neočekávaných překážek, podařilo se je překonat a byly naplněny všechny dílčí cíle. Tím bylo dosaženo i splnění hlavního cíle, tedy zjištění srážko-odtokových poměrů v obcích Bukovno a Líny a vytvoření srážko-odtokového simulačního modelu za účelem návrhu přečerpávací stanice odpadních vod.

Závěrečné shrnutí a zhodnocení dílčích cílů je popsáno dále:

→ orientace v zájmovém území

I přes to, že dokonalý monitorovací profil neexistuje, podařilo se najít místa, kde bylo možné uskutečnit dostatečně reprezentativní měření.

→ monitoring srážek a průtoků v dílčích stokách

Monitorovací kampaň proběhla bez závažnějších potíží a bez výpadků v měření. Srážkoměr i měření průtoků byly kalibrovány. Období monitorovací kampaně bylo srážkově bohaté, ale nevyskytla se dostatečná variabilita srážkových událostí. Monitorovací kampaň probíhala v době pandemie viru COVID-19, proto se průběh bezdeštných průtoků může lišit od běžného stavu.

→ tvorba modelu, jeho kalibrace a verifikace

Model v programu SWMM byl vytvořen jako hrubě schematizovaný se zanedbáním objektu odlehčovací komory a kalibrace jeho parametrů probíhala metodou „pokus omyl“. Tato metoda hledání vhodné kombinace parametrů se může jevit jako obtížnější, přispívá ale k plnému pochopení chování simulačního modelu a vzhledem k relativně malé ploše zájmového území se snížila i její náročnost. Kvůli zanedbání části stokové sítě v povodí, a tím zanedbání doby dotoku k uzlovému bodu povodí, musel být zaveden dodatečný kalibrační parametr ΔT upravující časové odchylky kulminací průtoků v síti.

Vzhledem k období průběhu monitoringu byly zachycené dešťové události podobného charakteru, což může zapříčinit snížení věrohodnosti modelu při výpočtu typově odlišných srážek, než na které byl model kalibrován. U verifikační události 1 v povodí Bukovno vznikla chyba měření při kulminaci průtoků u monitorovaných dat, což se následně projevilo v objektivních

funkcích odchylek. Z toho důvodu by bylo vhodnější vybrat pro verifikaci jinou událost, těch je ale vzhledem k době trvání monitoringu a jeho období nedostatek.

→ návrh přečerpávací stanice a čerpaného množství na ČOV Mladá Boleslav

Model byl upraven tak, aby bylo možné v dalším kroku provést citlivostní analýzu efektivity retenčního objemu PSOV. Výkon čerpání byl stanoven na $2Q_{h,max}$ odpovídající 4,7 l/s.

→ citlivostní analýza efektivity přečerpávací stanice

Vzhledem k výsledkům citlivostní analýzy efektivity přečerpávací stanice bych jako vhodnou variantu doporučila retenční objem PSOV minimálně 300 m³. Limitu procenta srážkového odtoku na ČOV udávaného normou ČSN 75 6262 je dosaženo až při objemu stanice 2 000 m³, vybrané řešení tak neodpovídá požadavkům normy. Konečné slovo bude mít výsledné povolení o nakládání s odpadními vodami, které stanoví dovolené množství odpadních vod vypouštěných přímo do recipientu.

Výstavba PSOV o takovém retenčním objemu, aby procento srážkového odtoku odpovídalo normě ČSN 75 6262, se zdá být nereálná. Do budoucna by bylo na místě uvažovat o možném odpojení některých zpevněných ploch od jednotné kanalizace a odvádění vod z těchto ploch například do vsakovacích průlehubů v městské zeleni.

8 Seznam použité literatury

- [1] *Hilarious Jokes & Videos on Statistics and Data Science* [online]. Analytics Vidhya, 2015 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2015/12/hilarious-jokes-videos-statistics-data-science/>
- [2] KREJČÍ, Vladimír. *Odvodnění urbanizovaných území – koncepční přístup*. Brno: Noel 2000, [2003?]. ISBN 80-86020-39-8.
- [3] YAZDANFAR, Zeinab, Ashok SHARMA. Urban drainage system planning and challenges with climate change and urbanization: a review. *Water Science & Technology* [online]. 2015, **72**(2), 165–338 [cit. 2021-02-21]. ISSN 0273-1223. Dostupné z: <https://iwaponline.com/wst/article/72/2/165/14899/Urban-drainage-system-planning-and-design>
- [4] VÍTEK, Jiří. Odvodňování urbanizovaných území podle principů udržitelného rozvoje [online]. *Urbanismus a územní rozvoj*. 2008, **11**(4), 1–12 [cit. 2021-02-21]. ISSN 1212-0855. Dostupné z: http://www.jvprojektvh.cz/photo/sekce/file/2008-06-09_JVPVH.pdf
- [5] STRÁNSKÝ, David. *Přírodně blízké hospodaření se srážkovými vodami na stavebním pozemku a jeho důsledky pro územní plánování* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013 [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: http://cvut.mapovyportal.cz/OPPA_Stransky.pdf
- [6] Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). In: *Sbírka zákonů*. 28. 6. 2001. ISSN 1211-1244.
- [7] ČSN 75 6101 *Stokové sítě a kanalizační přípojky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [8] ŠENKALOUPOVÁ, Jana, et al. *Příručka provozovatele stokové sítě*. Druhé aktualizované a doplněné vydání. Líbeznice: Medim, spol s r.o. pro SOVAK ČR, 2018. ISBN 978-80-87140-52-9.
- [9] *Vodohospodářská zařízení II* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta hornicko-geologická [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ2/3_odpadni_vody.html
- [10] ČSN 75 6406 *Nakládání s odpadními vodami ze zdravotnických zařízení (ZZ) vypouštěnými do stokové sítě pro veřejnou potřebu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [11] ČSN 75 0161 *Vodní hospodářství – Terminologie v inženýrství odpadních vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [12] ČSN 75 6401 *Čistírny odpadních vod pro ekvivalentní počet obyvatel (EO) větší než 500*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [13] STRÁNSKÝ, David. *Vodní hospodářství obcí 1: přednáška 1* [přednáška]. Praha, České vysoké učení technické v Praze, 2020.
- [14] *Vody vypouštěné do kanalizace, čištěné vody* [online]. Český statistický úřad [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/123243252/2800212007.pdf/16c3334d-4304-4e33-9828-58775037468a?version=1.1>
- [15] Zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích). In: *Sbírka zákonů*. 10. 7. 2001. ISSN 1211-1244.
- [16] ČSN EN 60529 *Stupně ochrany krytem (krytí – IP kód)*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [17] JÁGLOVÁ, Veronika, et al. *Zneškodňování odpadních vod v obcích do 2 000 ekvivalentních obyvatel: metodická příručka* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2009 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/0989B086A5D140A7C1257589003ACE96/\\$file/Metodicka%20prirucka_zneskodnovani%20odpadnich%20vod.pdf](https://www.mzp.cz/web/edice.nsf/0989B086A5D140A7C1257589003ACE96/$file/Metodicka%20prirucka_zneskodnovani%20odpadnich%20vod.pdf)
- [18] POTERA, Carol. After the Fall: Gastrointestinal Illness following Downpours. *Environmental health perspectives* [online]. 2015, **123**(9), 243 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.123-a243>
- [19] VÍTEK, Jiří, et al. *Hospodaření s dešťovou vodou v ČR*. Praha: 01/71 ZO ČSOP Koniklec, 2015. ISBN 978-80-260-7815-9.
- [20] HIDROLOGIA SOSTENIBLE. *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible – SUDS* [online]. Hidrologia Sostenible [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://www.hidrologiasostenible.com/sustainable-urban-drainage-systems-suds/>
- [21] HALOUN, Radovan. *Modelování odtoku z intravilánu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1993. ISBN 80-01-00974-2.

- [22] STRÁNSKÝ, David, et al. *Metodická příručka: Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí* [online]. Praha: Státní fond životního prostředí, 2009 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z:
<http://www.forumochranyprirody.cz/sites/default/files/35.pdf>
- [23] SUCHÁNEK, Milan, Petr SÝKORA a David STRÁNSKÝ. *Monitoring v městském odvodnění*. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, 2012. ISBN 978-80-87140-25-3.
- [24] *Srážkoměr SR03 500 cm²* [online]. FIEDLER AMS, s.r.o. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.fiedler.company/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/destove-srazky/srazkomer-sr03>
- [25] *Člunkové srážkoměry 500 cm²: Návod k obsluze – verze 1.4* [online]. FIEDLER AMS, s.r.o., 2015 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.fiedler-magr.cz/sites/default/files/dokumenty/sr03-v1.pdf>
- [26] *Radarová síť CZRAD* [online]. ČHMÚ [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/
- [27] *Radary a družice* [online]. ČHMÚ – Meteorologický kroužek [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://metmladez.wz.cz/metdeti/i17.htm>
- [28] *Ombrograf* [online]. Leporelo.cz [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://leporelo.info/ombrograf>
- [29] KULHÁNEK, Petr. Využití mobilních sítí k mapování srážek. *Aldebaran Bulletin* [online]. 2013, **11**(6) [cit. 2021-04-28]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_06_bts.php
- [30] FENCL, Martin, et al. Commercial microwave links instead of rain gauges: Fiction or reality? *Water Science & Technology* [online]. 2015, **71**(1), 31–37 [cit. 2021-04-28]. ISSN 0273-1223. Dostupné z: <https://iwaponline.com/wst/article/71/1/31/18694/Commercial-microwave-links-instead-of-rain-gauges>
- [31] SUCHÁNEK, Milan, Karel PRYL, Ivana KABELKOVÁ. *Základní přístupy k monitoringu v městském odvodnění*. *Vodní hospodářství* [online]. 2013, **63**(7), 216–220 [2021-03-26]. ISSN 1211-0760. Dostupné z: <https://www.vodnihospodarstvi.cz/ArchivPDF/vh2013/vh07-2013.pdf>

- [32] *Odborný článek o měření průtoku* [online]. PARS Aqua, s.r.o., 2004 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://pars-aqua.cz/odborny-clanek-o-mereni-prutoku.html>
- [33] *M4016-G (-CS, -KDO): uživatelská příručka verze 1.19* [online]. FIEDLER AMS s.r.o., 2017 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://www.fiedler.company/sites/default/files/dokumenty/m4016_manual-v119.pdf
- [34] HORKÝ, Filip. *Kontrola jakosti vody ve vodovodní síti* [přednáška]. Praha, České vysoké učení technické v Praze, 2020.
- [35] *Model 801 EM Flow Meter* [online]. Valeport Ltd [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.valeport.co.uk/products/model-801-em-flow-meter/>
- [36] *Monitoring v městském odvodnění, část II. Průtoky*. SOVAK ČR, v přípravě.
- [37] KÄSS, Werner et. al. *Tracers technique in geohydrology*. Rotterdam: Balkema, 1998. ISBN 9789054104445.
- [38] PEDERSEN, John T., John C. PETERS, Otto J. HELWEG. *Hydrographs by Single Linear Reservoir Model* [online]. Davis: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 1980 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TechnicalPapers/TP-74.pdf>
- [39] ROSSMAN, Lewis A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1* [online]. Washington, D.C.: Environmental Protection Agency, Water Quality Office, 20015 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf
- [40] BUTLER David, John W. DAVIES. *Urban drainage* [online]. 2. vydání. Londýn: Spon Press, 2004 [cit. 2021-03-30]. ISBN: 0-203-34190-2. Dostupné z: <https://vannpiseth.files.wordpress.com/2015/07/urban-drainage-butler.pdf>
- [41] JAMES, William, Lewis A. ROSSMAN, W. Robert C. JAMES. *User's guide to SWMM* [online]. 13. vydání. Ontario: Computation Hydraulics International, 2010 [cit. 2021-04-11]. ISBN 978-0-9808853-5-4. Dostupné z: <https://www.chiwater.com/Files/UsersGuideToSWMM5Edn13.pdf>

- [42] ŠPAČKOVÁ, Anna. *Modelování srážko-odtokových procesů v povodí stokové sítě města Čelákovice* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-04-19]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce David Stránský. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/86445>
- [43] Vyhláška č. 178/2012 Sb., kterou se stanoví seznam významných vodních toků a způsob provádění činností souvisejících se správou vodních toků. In: *Sbírka zákonů*. 23. 5. 2012. ISSN 1211-1244.
- [44] *Soustava České tabule* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: https://geography.upol.cz/soubory/lide/smolova/GCR1/text_ceska%20tabule.pdf
- [45] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz, 2021 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- [46] *Plán rozvoje vodovodů a kanalizace Středočeského kraje* [online]. Hydroprojekt CZ a.s., 2004 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://gis.kr-strecoesky.cz/js/ozp_prvkuk/
- [47] *Důlní díla a poddolování* [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/dulni_dila_poddolovani/
- [48] TOLASZ, Radim a kol. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2007. ISBN 978-80-86690-26-1.
- [49] *Půdní mapa 1:50 000* [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/pudy/>
- [50] *Informativní počet občanů v České republice ve všech obcích, v obcích 3. typu a v městských částech* [online]. Ministerstvo vnitra České republiky, 2021 [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/clanek/informativni-pocty-obyvatel-v-obcich.aspx>
- [51] OTTA, Pavel. *Kanalizační řád Bukovno–Líny*. Mladá Boleslav: Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav a.s., 2015.

- [52] STRÁNSKÝ, David, Vojtěch BAREŠ, Pavel FATKA. The effect of rainfall measurement uncertainties on rainfall-runoff processes modelling. *Water Science & Technology*. **55**(4), 103–111. ISSN 0273-1223. Dostupné z: <https://iwaponline.com/wst/article/55/4/103/11998/The-effect-of-rainfall-measurement-uncertainties>
- [53] ISO 9555-3 *Measurement of liquid flow in open channels – Tracer dilution methods for the measurement of steady flow – Part 3: Chemical tracers*. Ženeva: International organization for standardization, 1992.
- [54] ČSN 75 6560 *Čerpací stanice odpadních vod na kanalizační síti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [55] Ústav územního rozvoje. *Průměrné ceny dopravní a technické infrastruktury obcí: Odvádění a čištění odpadních vod* [online]. Praha: Ministerstvo místního rozvoje ČR, 2019 [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <http://www.uur.cz/images/5-publikacni-cinnost-a-knihovna/internetove-prezentace/prumerne-ceny-TI/2019/03-kanalizace-ceny-ti-2019.pdf>
- [56] ČOV Mladá Boleslav [online]. Centroprojekt, a.s. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://centroprojekt.cz/reference/cov-mlada-boleslav/>
- [57] ČSN 75 6262 *Odlehčovací komory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [58] STRÁNSKÝ, David, Vojtěch BAREŠ. *Monitoring v povodí a ve stokové síti obcí Bukovno a Líny: závěrečná zpráva*. Praha: České vysoké učení technické, 2020.

9 Seznam obrázků

- Obr. 1 Systém městského odvodnění odpovídající novým zásadám; upraveno z [2]
- Obr. 2 Procentuální zastoupení odváděných odpadních vod za rok 2019 podle [14]
- Obr. 3 Jednotná stoková soustava; upraveno z [18]
- Obr. 4 Oddílná stoková soustava; upraveno z [18]
- Obr. 5 Vliv urbanizace na odtok vody z povodí [20]
- Obr. 6 Znázornění tvorby a koncentrace přímého dešťového odtoku [2]
- Obr. 7 Ztráty vody v přirozeném povodí
- Obr. 8 Základna vytápěného srážkoměru SR03/V [25]
- Obr. 9 Schéma meteorologického radaru; upraveno z [27]
- Obr. 10 Schéma váhového srážkoměru
- Obr. 11 Schéma ombrografu; upraveno z [28]
- Obr. 12 Schéma ultrazvukových sond; upraveno z [33]
- Obr. 13 Některé typy ostrohranných přelivů
- Obr. 14 Plochý (vlevo) a cylindrický (vpravo) senzor elektromagnetického průtokoměru modelu 801 od firmy Valeport [35]
- Obr. 15 Záznam měření koncentrace stopovače níže po proudu, c_p udává požadovou koncentraci stopovače, c_m ustálenou koncentraci stopovače [36]
- Obr. 16 Postup při matematickém modelování [22]
- Obr. 17 Simulační srážko-odtokové modely [22]
- Obr. 18 Graf pro stanovení fiktivních délek L a L' ve schematizovaném povodí [2]
- Obr. 19 Různé tvary odvodňovaných oblastí ilustrující efekt délky podpovodí [41]
- Obr. 20 Rozdělení podpovodí hrubě schematizovaného modelu [42]
- Obr. 21 Ortografická mapa obcí Bukovno a Líny [45]
- Obr. 22 Schematické znázornění stávající kanalizace obcí Bukovno a Líny [46]
- Obr. 23 Biologická ČOV v Močidlech, Bukovno
- Obr. 24 Schéma aparatury dynamického testu
- Obr. 25 Záznam měření koncentrace stopovače v níže položeném profilu, c_p udává požadovou koncentraci stopovače; upraveno z [36]
- Obr. 26 Umístění měrných profilů v zájmové oblasti; upraveno z [46]
- Obr. 27 Graf chyby ERR_q jako funkce vydatnosti q_{rec} a jeho proložení vhodnými závislostmi
- Obr. 28 Vzorový hektar – povodí Bukovno (vlevo) a povodí Líny (vpravo)

- Obr. 29 Sestavený model připravený ke kalibraci
- Obr. 30 Hodinové bezdeštné průtoky znormalizované k celkovému dennímu průměru $Q_{24,prům.}$ – Bukovno
- Obr. 31 Hodinové bezdeštné průtoky znormalizované k celkovému dennímu průměru $Q_{24,prům.}$ – Líny
- Obr. 32 Součtová čára srážkového úhrnu kalibrační dešťové události 1
- Obr. 33 Součtová čára srážkového úhrnu kalibrační dešťové události 2
- Obr. 34 Součtová čára srážkového úhrnu kalibrační dešťové události 3
- Obr. 35 Graf pro kalibraci parametrů modelu se zřetelným časovým rozdílem dotoku vody z povodí mezi modelem a monitoringem – událost 1 pro obec Líny
- Obr. 36 Součtová čára srážkového úhrnu verifikační dešťové události 1
- Obr. 37 Součtová čára srážkového úhrnu verifikační dešťové události 2
- Obr. 38 Verifikační graf události 1 povodí Bukovno
- Obr. 39 Detail úpravy modelu
- Obr. 40 Schéma výchozího nastavení PSOV
- Obr. 41 Závislost podílu čištěných srážkových vod na retenčním objemu
- Obr. 42 Závislost podílu čištěných srážkových vod na ceně PSOV
- Obr. 43 Pohled na povrch lokality profilu Bukovno
- Obr. 44 Pohled do šachty s přístroji
- Obr. 45 Pohled na povrch lokality profilu Líny
- Obr. 46 Pohled do šachty se senzorem
- Obr. 47 Pohled na instalovaný srážkoměr bez ustalovacího válce (vlevo) a s válcem (vpravo)
- Obr. 48 Monitorované průtoky v profilu Bukovno
- Obr. 49 Monitorované průtoky v profilu Líny
- Obr. 50 Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce A1
- Obr. 51 Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce A2
- Obr. 52 Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce A5 + A6
- Obr. 53 Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce B2
- Obr. 54 Kalibrační graf události 1 povodí Bukovno
- Obr. 55 Kalibrační graf události 2 povodí Bukovno
- Obr. 56 Kalibrační graf události 3 povodí Bukovno
- Obr. 57 Kalibrační graf události 1 povodí Líny

- Obr. 58 Kalibrační graf události 2 povodí Líny
- Obr. 59 Kalibrační graf události 3 povodí Líny
- Obr. 60 Verifikační graf události 2 povodí Bukovno
- Obr. 61 Verifikační graf události 1 povodí Líny
- Obr. 62 Verifikační graf události 2 povodí Líny
- Obr. 63 Aparatura pro statickou kalibraci srážkoměru
- Obr. 64 Aparatura pro dynamickou kalibraci srážkoměru
- Obr. 65 Jednotlivé prvky aparatury pro dynamickou kalibraci srážkoměru:
peristaltické čerpadlo (vlevo), váha s nádobou na vodu (uprostřed) a
srážkoměr s ustalovacím válcem (vpravo)
- Obr. 66 Instalace přístrojů do měrného profilu Bukovno
- Obr. 67 Vlévání roztoku do kanalizace při kalibraci měrných profilů pomocí
stopovače
- Obr. 68 Multimetr k měření koncentrace stopovače v odpadní vodě
- Obr. 69 Příjezd cisterny k šachtě výše proti proudu, tedy nad profilem,
kde probíhala injektáž stopovače
- Obr. 70 Nadlepšování průtoku upouštěním vody z cisterny – poslední kontrola
před spuštěním testu

10 Seznam tabulek

- Tab. 1 Doby dynamické kalibrace jednotlivých vydatností při aplikaci nové metodiky (číslo v závorce udává počet minut na počátku testu, které jsou vyloučeny z vyhodnocení) a hodnoty čerpání a nastavených otáček odpovídající vydatnostem; upraveno z [23]
- Tab. 2 Jednotlivé navážky NaCl pro kalibraci pomocí stopovače
- Tab. 3 Vyhodnocení statistické kalibrace provedené před dynamickou kalibrací
- Tab. 4 Vyhodnocení statistické kalibrace provedené po dynamické kalibraci
- Tab. 5 Vyhodnocení dynamické kalibrace
- Tab. 6 Přehled všech předem připravených navážek
- Tab. 7 Vyhodnocení průtoků z měření pomocí stopovače
- Tab. 8 Porovnání hodnot průtoků v měrných profilech H01, Q01 a H02; upraveno z [58]
- Tab. 9 Hlavní dešťové události v monitorovaném období
- Tab. 10 Výpis prvků modelu a jejich systémová data
- Tab. 11 Vybrané bezdeštné dny
- Tab. 12 Dešťové události vybrané pro kalibraci modelu
- Tab. 13 Porovnání sad parametrů modelu před kalibrací a po kalibraci.
- Tab. 14 Vyhodnocení objektivních funkcí pro kalibraci
- Tab. 15 Dešťové události vybrané pro verifikaci modelu
- Tab. 16 Vyhodnocení objektivních funkcí pro verifikaci
- Tab. 17 Citlivostní analýza efektivity PSOV
- Tab. 18 Citlivostní analýza efektivity PSOV s parametrem ceny
- Tab. 19 Výpočet koeficientů pro bezdeštné průtoky – Bukovno
- Tab. 20 Výpočet koeficientů pro bezdeštné průtoky – Líny
- Tab. 21 Vyhodnocení objektivních funkcí odchylek pro kalibraci i verifikaci obou povodí
- Tab. 22 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 1999
- Tab. 23 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2000
- Tab. 24 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2001
- Tab. 25 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2002
- Tab. 26 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2003
- Tab. 27 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2004

Tab. 28 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2005

Tab. 29 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2006

Tab. 30 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2007

Tab. 31 Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2008

11 Seznam použitých zkratek

ČOV	čistírna odpadních vod
ČSN	česká technická norma
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
SWMM	Storm Water Management Model
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency
GIS	Geografický informační systém
PSOV	přečerpávací stanice odpadních vod
EO	ekvivalentní obyvatel
BSK₅	biochemická spotřeba kyslíku
NSE	Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient
RN	retenční nádrž
SOVAK	Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR

12 Přílohy

12.1 Karty měrných profilů

Karta měrného profilu Bukovno

Lokalita:	Bukovno
Druh kanalizace:	jednotná
Parametry potrubí	Tvar: kruh
	Průměr: 500 mm
	Materiál: beton
Senzor 1:	US1200
Umístění senzoru:	na stěně šachty nad odtokem ze šachty
Registrační jednotka:	Fiedler M4016
Interval záznamu dat:	3 min
Senzor 2:	CSP wedge
Umístění senzoru:	dno potrubí na přítoku do šachty
Registrační jednotka:	NivuFlow Mobile 750
Interval záznamu dat:	3 min



Obr. 43: Pohled na povrch lokality profilu Bukovno Obr. 44: Pohled do šachty s přístroji

Karta měrného profilu Líny

Lokalita:	Líny
Druh kanalizace:	oddílná splašková
Parametry potrubí	Tvar: kruh
	Průměr: 250 mm
	Materiál: PVC
Senzor:	US1200
Umístění senzoru:	na stěně šachty nad odtokem ze šachty
Registrační jednotka:	Fiedler M4016
Interval záznamu dat:	5 min



Obr. 45: Pohled na povrch lokality Líny



Obr. 46: Pohled do šachty se senzorem

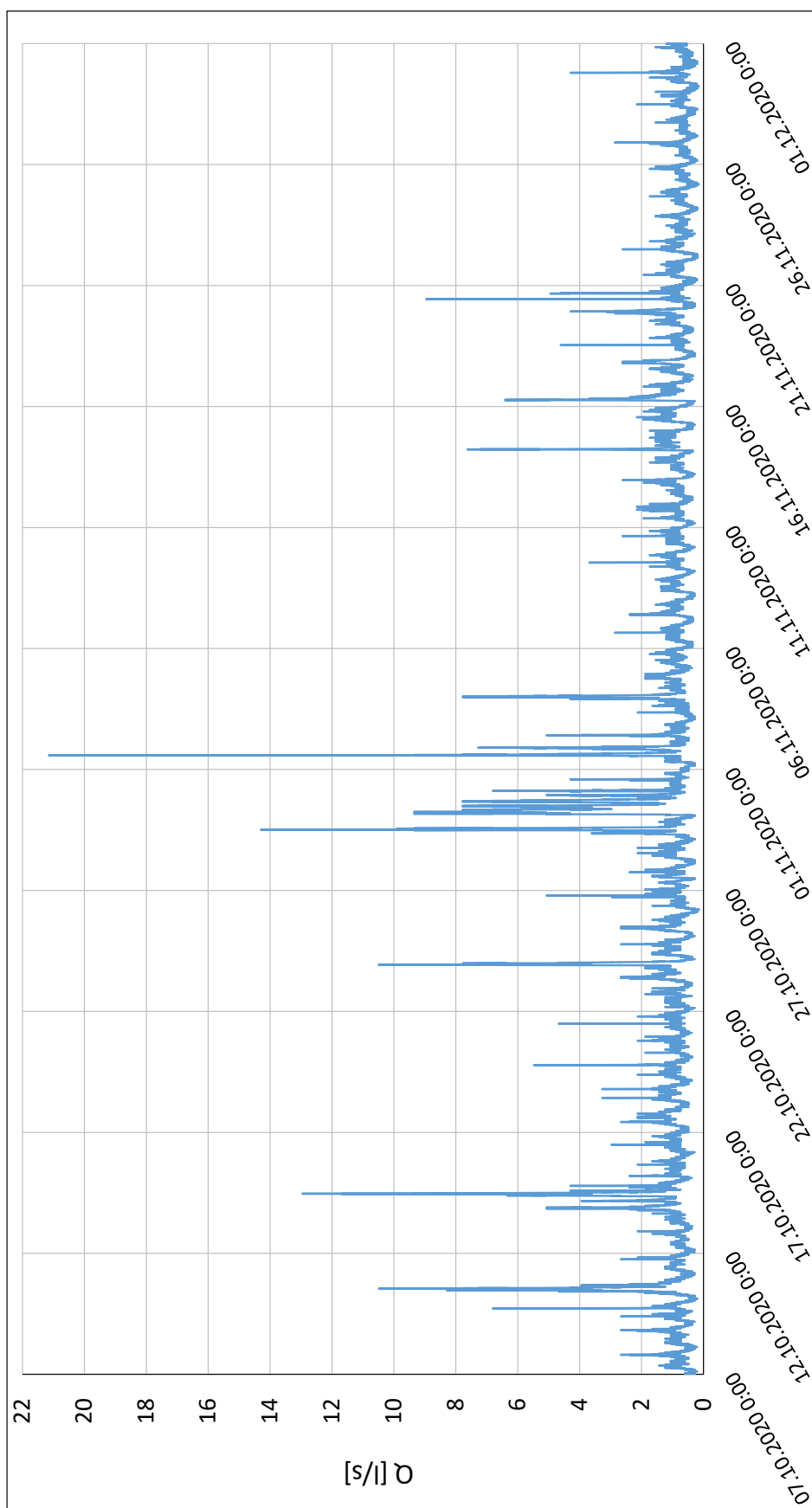
Karta měrného profilu Bukovno – srážkoměr

Lokalita:	Bukovno
Srážkoměr:	SR03
Umístění srážkoměru:	na střeše MŠ Bukovno
Registrační jednotka:	Fiedler M4605

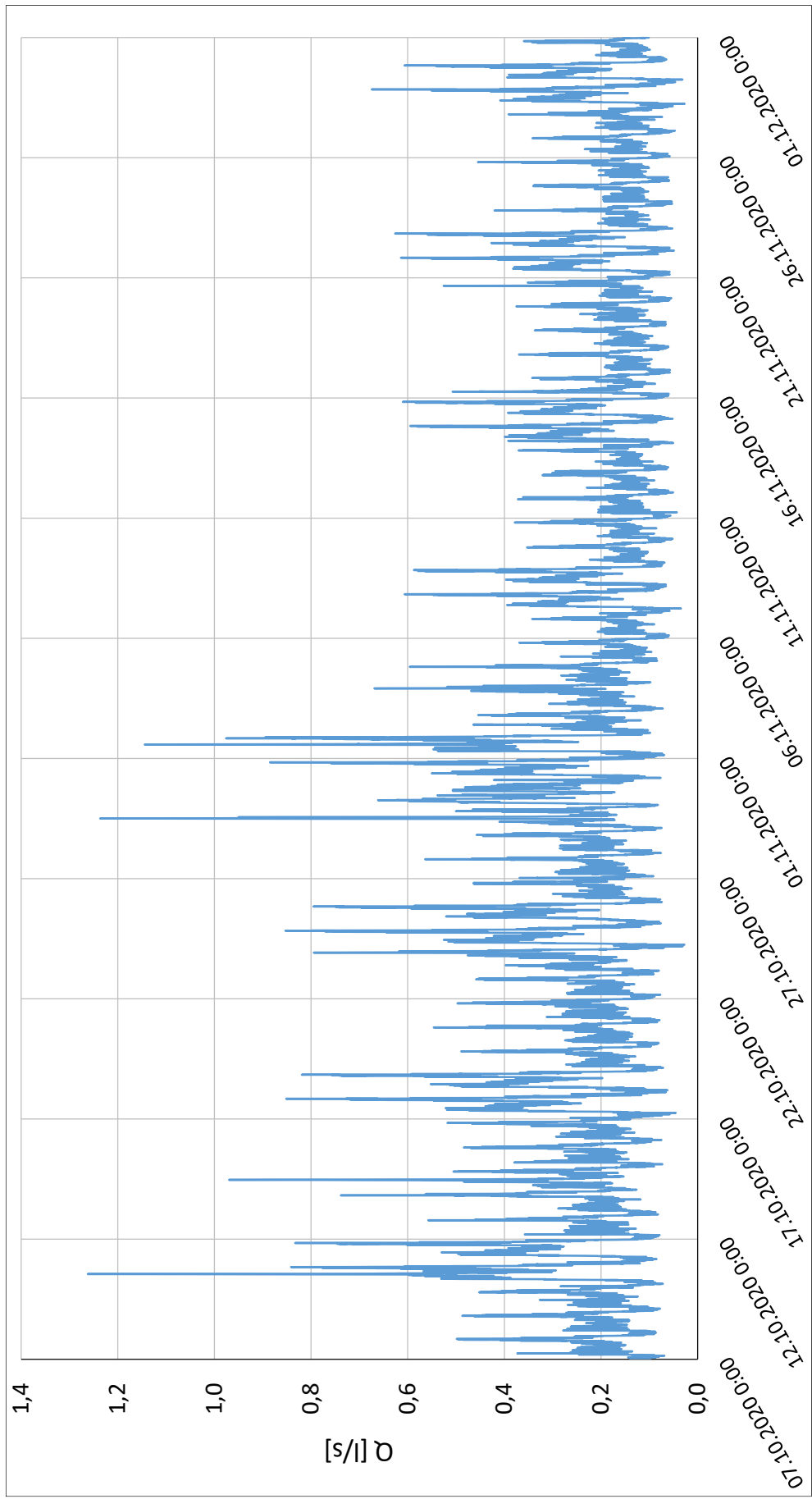


Obr. 47: Pohled na instalovaný srážkoměr bez ustalovacího válce (vlevo) a s válcem (vpravo)

12.2 Monitorované průtoky

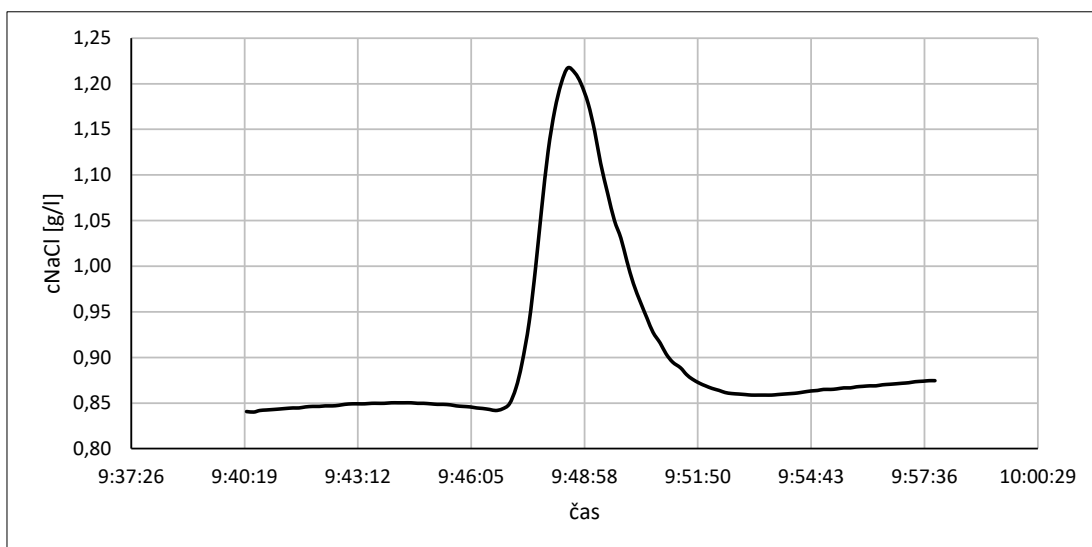


Obr. 48: Monitorované průtoky v profilu Bukovno

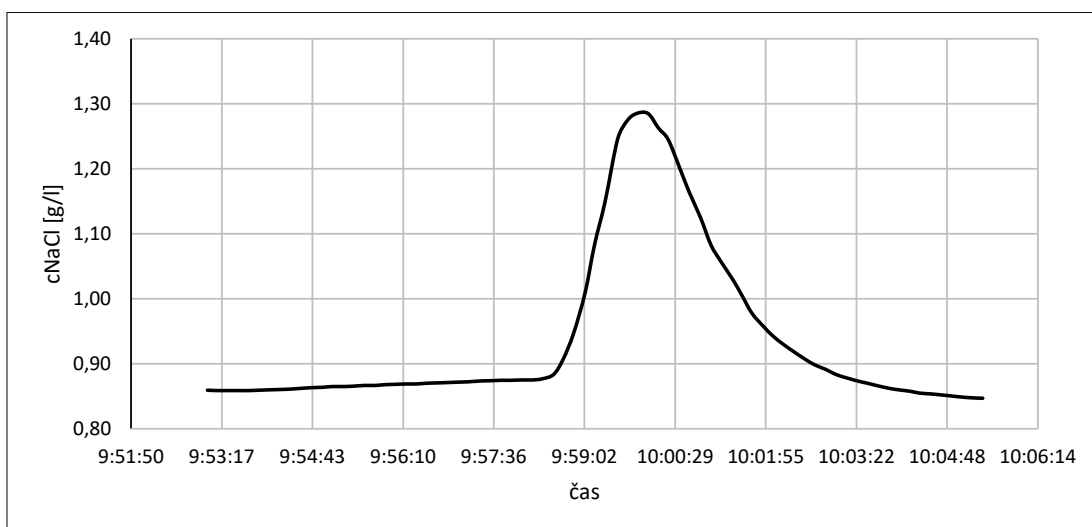


Obr. 49: Monitorované průtoky v profilu Líny

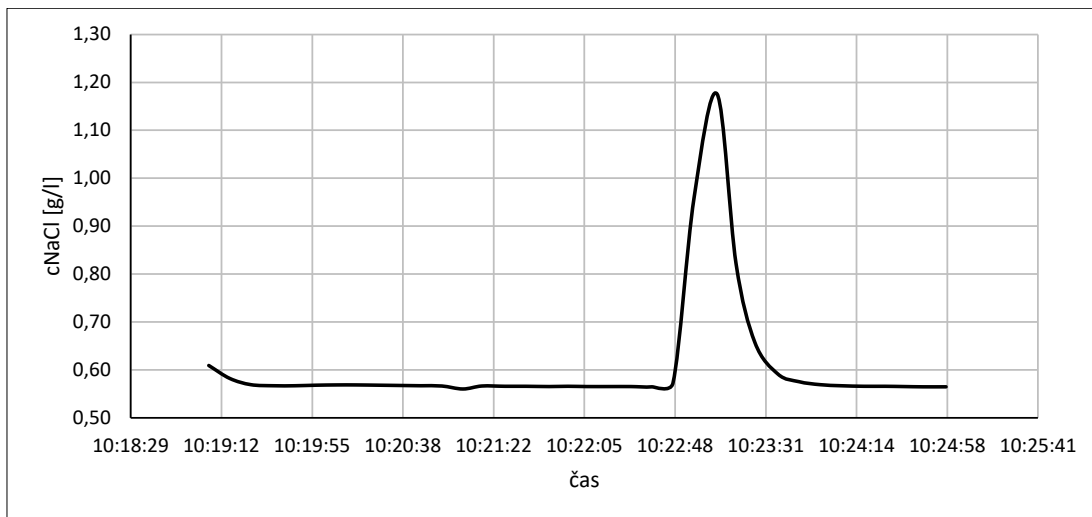
12.3 Průběhy odezvy stopovače



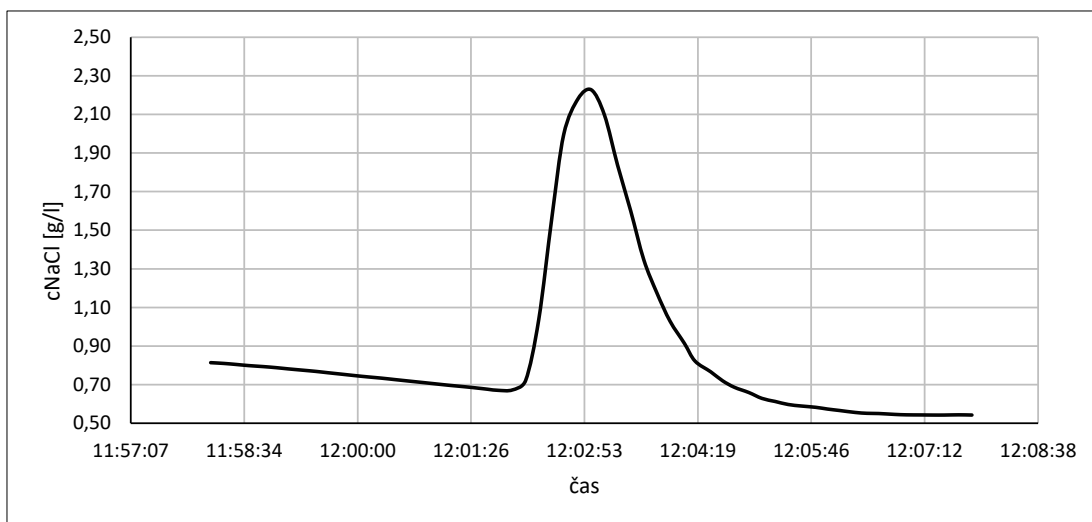
Obr. 50: Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce A1



Obr. 51: Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce A2



Obr. 52: Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce A5 + A6



Obr. 53: Průběh koncentrace NaCl v čase při navážce B2

12.4 Vyhodnocení bezdeštných průtoků

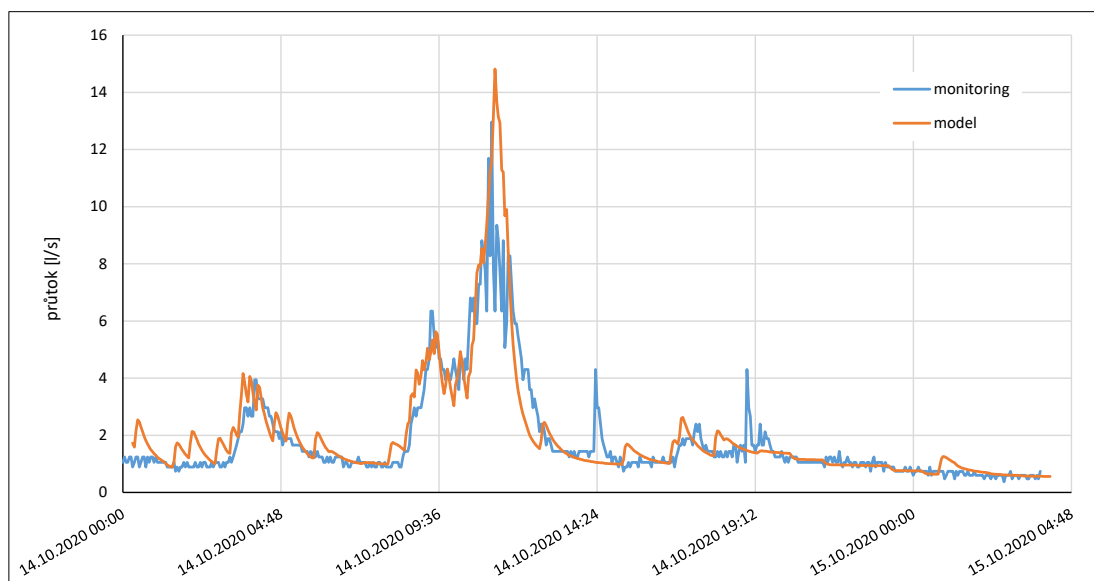
Tab. 19: Výpočet koeficientů pro bezdeštné průtoky – Bukovno

čas		průtoky - Bukovno		koeficienty - Bukovno	
čas	hod. krok	všední dny	víkendové dny	čas	všední dny
hod. krok				hod. krok	koeficient
0-1		0,637	0,737	0-1	0,70
1-2		0,560	0,655	1-2	0,62
2-3		0,535	0,610	2-3	0,59
3-4		0,529	0,588	3-4	0,58
4-5		0,651	0,591	4-5	0,72
5-6		0,665	0,597	5-6	0,73
6-7		0,816	0,737	6-7	0,90
7-8		0,901	0,889	7-8	0,99
8-9		0,984	1,146	8-9	1,09
9-10		1,018	1,292	9-10	1,12
10-11		1,026	1,388	10-11	1,13
11-12		1,037	1,161	11-12	1,14
12-13		0,925	1,083	12-13	1,02
13-14		0,909	1,069	13-14	1,00
14-15		0,902	1,005	14-15	1,00
15-16		0,861	0,967	15-16	0,95
16-17		0,862	1,188	16-17	0,95
17-18		0,935	1,117	17-18	1,03
18-19		1,165	1,358	18-19	1,29
19-20		1,288	1,698	19-20	1,42
20-21		1,100	1,220	20-21	1,21
21-22		0,935	1,036	21-22	1,03
22-23		0,926	0,878	22-23	1,02
23-0		0,756	0,776	23-0	0,83
denní průměr Q₂₄					
		0,872		0,991	
vážený průměr Q_{24,prům.}					
				0,906	

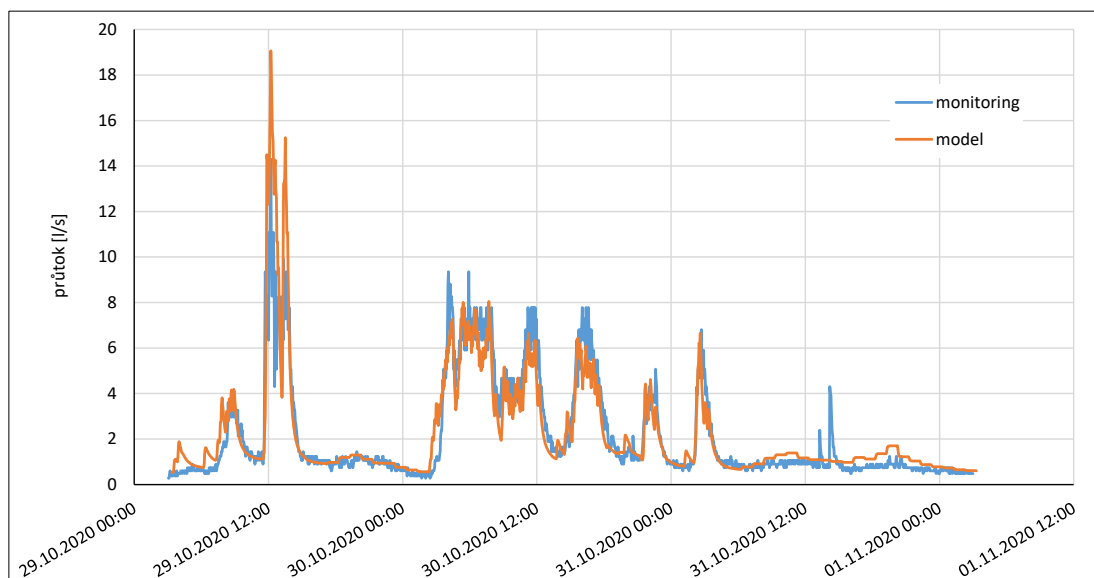
Tab. 20: Výpočet koeficientů pro bezdeštné průtoky – Líny

čas		průtoky - Líny		koeficienty - Líny	
čas	hod. krok	všední dny	víkendové dny	čas	všední dny
hod. krok				hod. krok	koeficient
0-1		0,117	0,198	0-1	0,51
1-2		0,109	0,152	1-2	0,47
2-3		0,106	0,113	2-3	0,46
3-4		0,107	0,090	3-4	0,46
4-5		0,152	0,107	4-5	0,66
5-6		0,186	0,111	5-6	0,80
6-7		0,249	0,126	6-7	1,08
7-8		0,206	0,238	7-8	0,89
8-9		0,203	0,395	8-9	0,88
9-10		0,200	0,434	9-10	0,86
10-11		0,187	0,452	10-11	0,81
11-12		0,197	0,381	11-12	0,85
12-13		0,192	0,406	12-13	0,83
13-14		0,176	0,341	13-14	0,76
14-15		0,164	0,355	14-15	0,71
15-16		0,199	0,297	15-16	0,86
16-17		0,205	0,295	16-17	0,89
17-18		0,203	0,321	17-18	0,88
18-19		0,293	0,507	18-19	1,27
19-20		0,395	0,633	19-20	1,71
20-21		0,341	0,582	20-21	1,47
21-22		0,255	0,327	21-22	1,10
22-23		0,225	0,316	22-23	0,97
23-0		0,175	0,154	23-0	0,75
denní průměr Q₂₄		0,202			
vážený průměr Q_{24,prům.}				0,231	

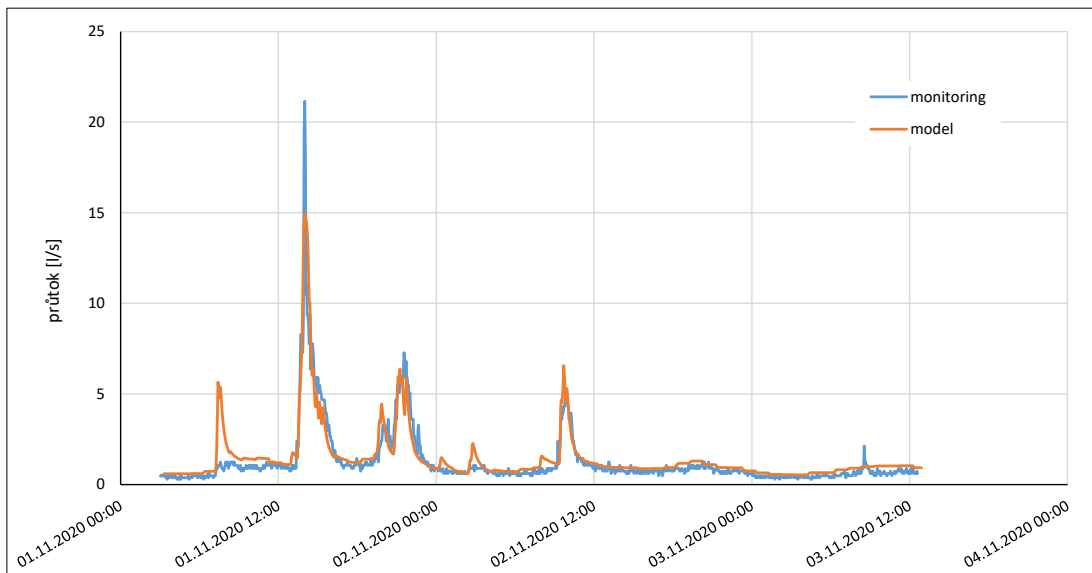
12.5 Kalibrační grafy



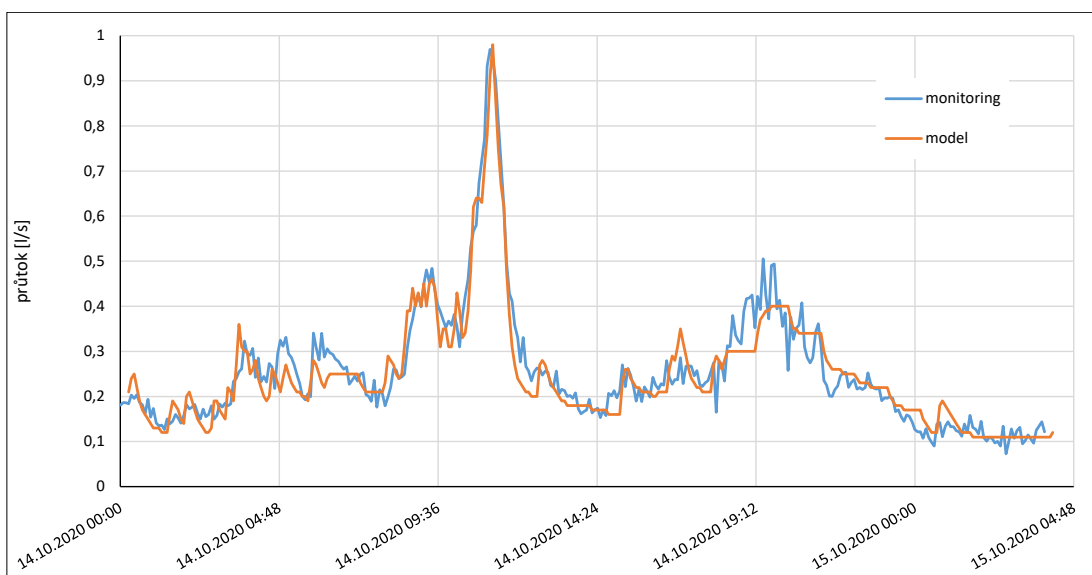
Obr. 54: Kalibrační graf události 1 povodí Bukovno



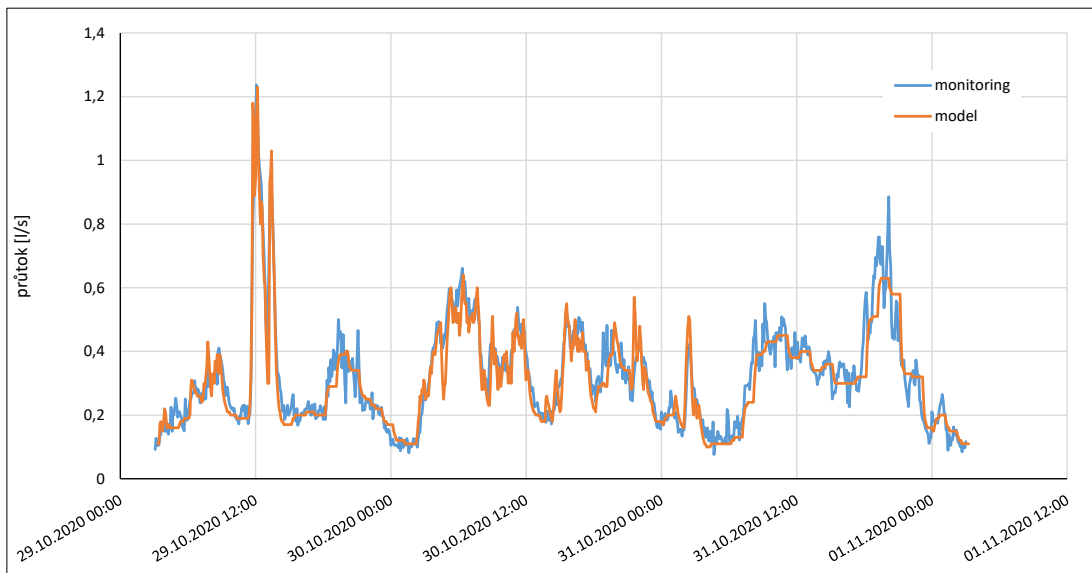
Obr. 55: Kalibrační graf události 2 povodí Bukovno



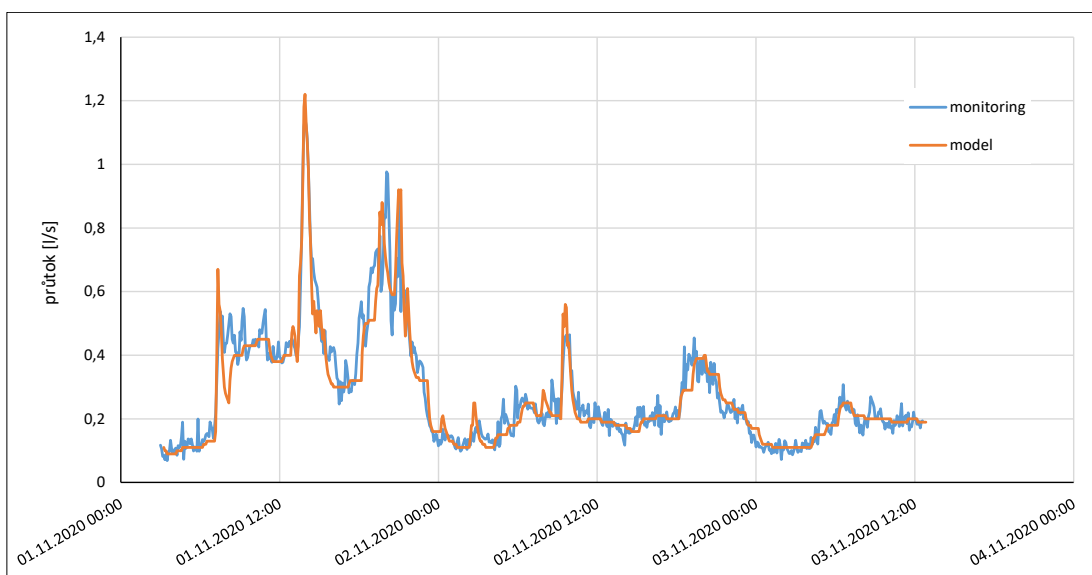
Obr. 56: Kalibrační graf události 3 povodí Bukovno



Obr. 57: Kalibrační graf události 1 povodí Liny

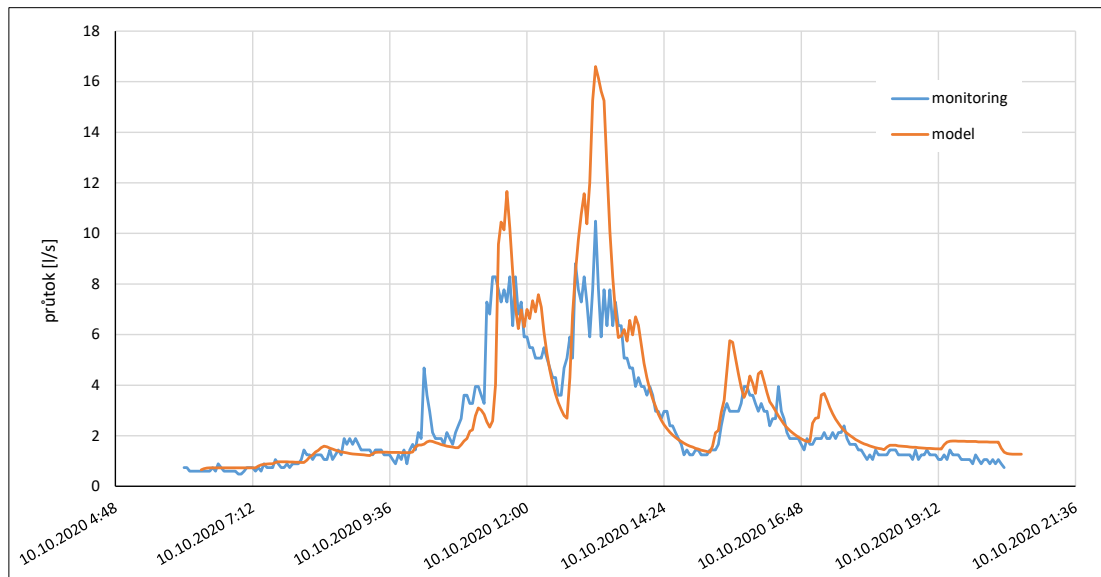


Obr. 58: Kalibrační graf události 2 povodí Líny

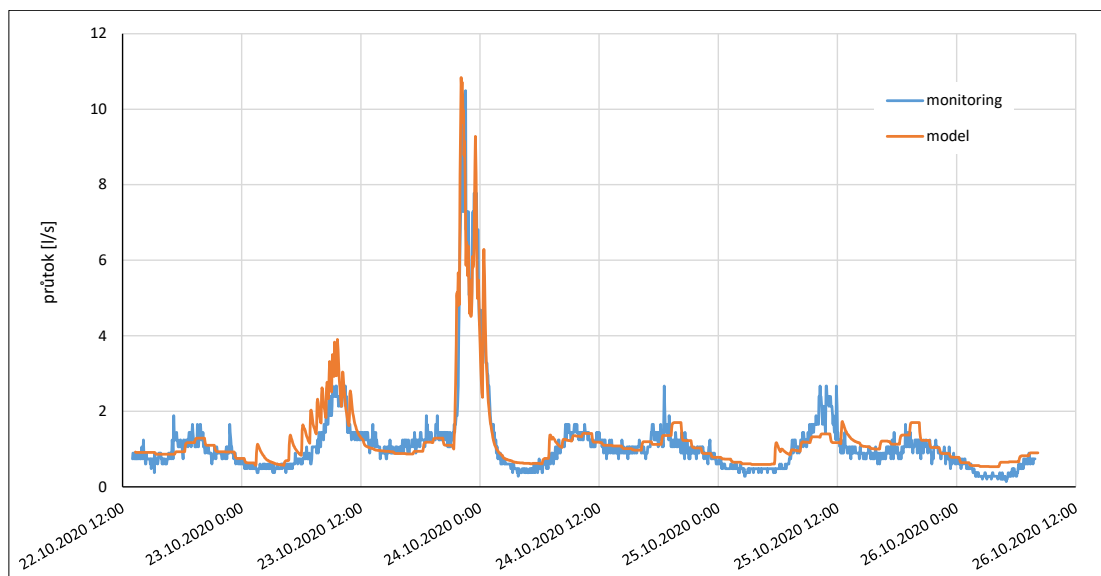


Obr. 59: Kalibrační graf události 3 povodí Líny

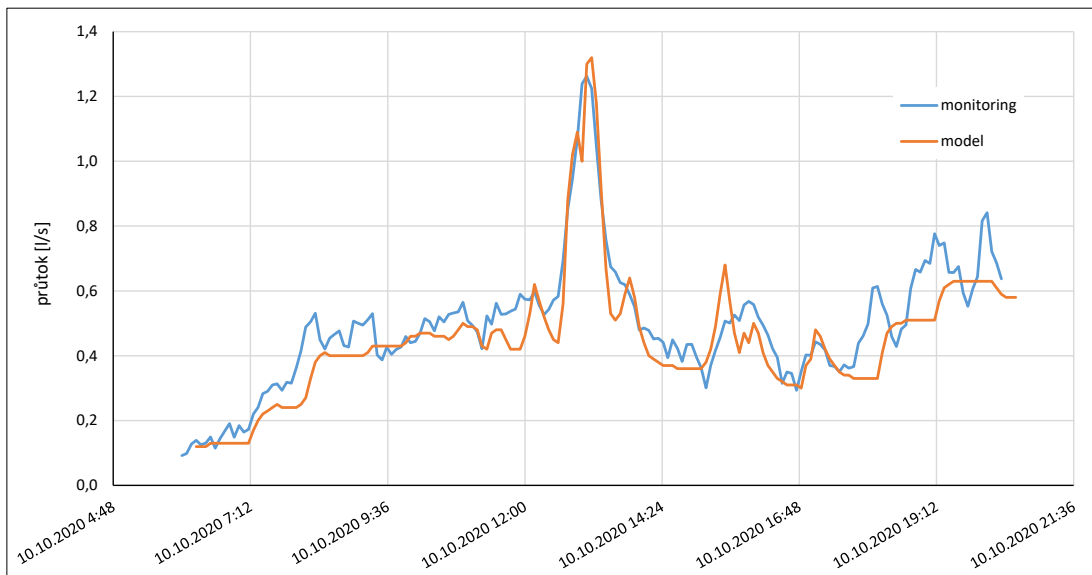
12.6 Verifikační grafy



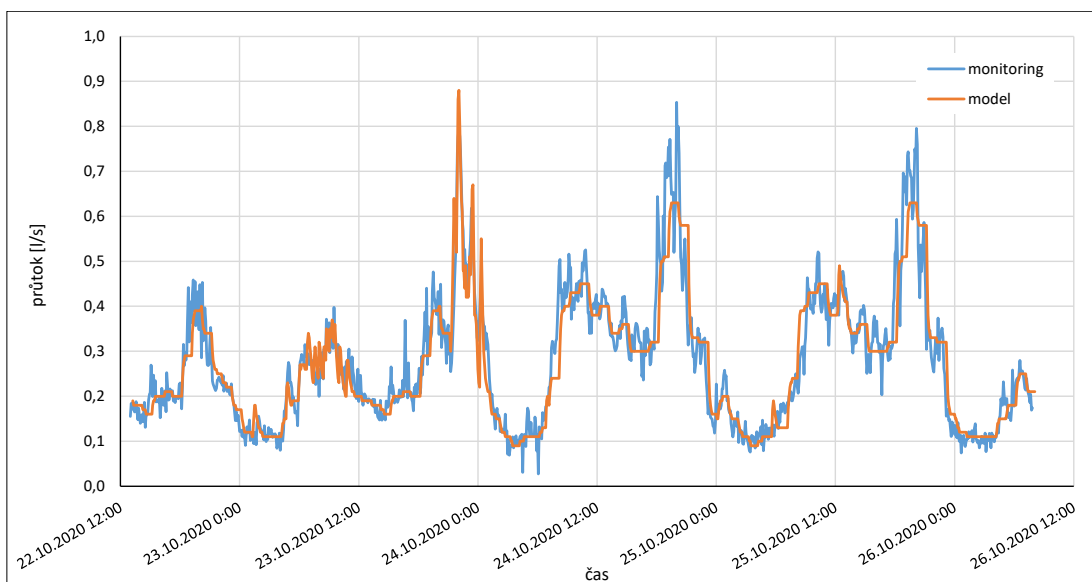
Obr. 38: Verifikační graf události 1 povodí Bukovno



Obr. 60: Verifikační graf události 2 povodí Bukovno



Obr. 61: Verifikační graf události 1 povodí Liny



Obr. 62: Verifikační graf události 2 povodí Liny

12.7 Vyhodnocení objektivních funkcí odchylek

Tab. 21: Vyhodnocení objektivních funkcí odchylek pro kalibraci i verifikaci obou povodí

BUKOVNO													
dešťová událost	od	do	V _{celk.} [m ³]		odchylka		Q _{max.} [l/s]		T _{Qmax} [min]		odchylka		NSE [-]
			monitoring	model	monitoring	odchylka	monitoring	model	monitoring	model	monitoring	model	
1	14.10.2020 0:00	15.10.2020 3:51	182,942	196,616	7,47	12,960	14,820	14,35	14.10.2020 11:12	14.10.2020 11:18	0:06:00	0,73	
2	29.10.2020 3:03	01.11.2020 3:00	560,656	581,189	0,04	14,298	19,060	33,31	29.10.2020 12:12	29.10.2020 12:12	0:00:00	0,77	
3	01.11.2020 3:00	03.11.2020 12:36	261,276	302,643	15,83	21,148	14,970	-29,21	01.11.2020 14:00	01.11.2020 14:00	0:00:00	0,85	
			průměry		7,78			6,15			0:02:00	0,78	
					VYHOVUJE			VYHOVUJE			VYHOVUJE	NEVYHOVUJE	
LÍNY													
dešťová událost	od	do	V _{celk.} [m ³]		odchylka		Q _{max.} [l/s]		T _{Qmax} [min]		odchylka		NSE [-]
			monitoring	model	monitoring	odchylka	monitoring	model	monitoring	model	monitoring	model	
1	14.10.2020 0:00	15.10.2020 3:55	25,866	25,140	-2,81	0,970	0,980	1,05	14.10.2020 11:10	14.10.2020 11:15	0:05:00	0,90	
2	29.10.2020 3:05	01.11.2020 3:00	39,927	38,337	-3,98	1,237	1,230	-0,54	29.10.2020 12:05	29.10.2020 12:10	0:05:00	0,92	
3	01.11.2020 3:00	03.11.2020 12:35	40,529	38,742	-0,04	1,144	1,220	6,61	01.11.2020 13:55	01.11.2020 13:55	0:00:00	0,89	
			průměry		-2,28			2,37			0:03:20	0,90	
					VYHOVUJE			VYHOVUJE			VYHOVUJE	VYHOVUJE	
BUKOVNO													
dešťová událost	od	do	V _{celk.} [m ³]		odchylka		Q _{max.} [l/s]		T _{Qmax} [min]		odchylka		NSE [-]
			monitoring	model	monitoring	odchylka	monitoring	model	monitoring	model	monitoring	model	
1	10.10.2020 6:00	10.10.2020 20:20	131,862	153,623	16,50	10,488	16,600	58,28	10.10.2020 13:12	10.10.2020 13:12	0:00:00	0,42	
2	22.10.2020 13:00	26.10.2020 7:50	153,078	174,978	14,31	10,488	10,840	3,36	23.10.2020 22:09	23.10.2020 22:06	0:03:00	0,91	
			průměry		15,40			30,82			0:01:30	0,67	
					VYHOVUJE			NEVYHOVUJE			VYHOVUJE	NEVYHOVUJE	
LÍNY													
dešťová událost	od	do	V _{celk.} [m ³]		odchylka		Q _{max.} [l/s]		T _{Qmax} [min]		odchylka		NSE [-]
			monitoring	model	monitoring	odchylka	monitoring	model	monitoring	model	monitoring	model	
1	10.10.2020 6:00	10.10.2020 20:21	25,469	23,355	-8,30	1,262	1,320	4,57	10.10.2020 13:05	10.10.2020 13:10	0:05:00	0,66	
2	22.10.2020 13:00	26.10.2020 7:54	29,958	29,922	-0,12	0,795	0,880	10,76	23.10.2020 22:05	23.10.2020 22:05	0:00:00	0,95	
			průměry		-4,21			7,67			0:02:30	0,81	
					VYHOVUJE			VYHOVUJE			VYHOVUJE	VYHOVUJE	

12.8 Analýza efektivity retenční nádrže

Tab. 22: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 1999

1999									
A _{pūdorys} [m ²]	V _{RN} [m ³]	cena _{min} [Kč]	cena _{max} [Kč]	V _{přítok} [m ³ /rok]	V _{čerpání} [m ³ /rok]	V _{přepad} [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	V _{čerp.sráž.} [m ³ /rok]	R _{sráž.čov} [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	66 195,86	48 245,76	17 950,10	7	12 389,33	40,8
5	15	114 000	270 000	66 195,48	48 375,06	17 820,41	7	12 518,63	41,3
10	30	228 000	540 000	66 195,09	48 434,38	17 760,71	7	12 577,95	41,5
55	165	1 254 000	2 970 000	66 194,94	48 908,06	17 286,88	7	13 051,62	43,0
100	300	2 280 000	5 400 000	66 195,05	49 373,74	16 821,31	6	13 517,31	44,6
200	600	4 560 000	10 800 000	66 195,36	50 279,19	15 916,17	5	14 422,76	47,5
350	1 050	7 980 000	18 900 000	66 196,09	51 528,85	14 667,24	5	15 672,42	51,7
500	1 500	11 400 000	27 000 000	66 197,00	52 782,31	13 414,69	5	16 925,87	55,8
750	2 250	17 100 000	40 500 000	66 199,00	54 164,93	12 034,07	4	18 308,50	60,3
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	66 199,94	55 214,14	10 985,81	4	19 357,71	63,8

Tab. 23: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2000

2000									
A _{pūdorys} [m ²]	V _{RN} [m ³]	cena _{min} [Kč]	cena _{max} [Kč]	V _{přítok} [m ³ /rok]	V _{čerpání} [m ³ /rok]	V _{přepad} [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	V _{čerp.sráž.} [m ³ /rok]	R _{sráž.čov} [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	76 698,61	49 910,81	26 787,79	8	13 956,15	34,3
5	15	114 000	270 000	76 698,42	50 102,60	26 595,82	8	14 147,93	34,7
10	30	228 000	540 000	76 697,73	50 138,04	26 559,69	8	14 183,37	34,8
55	165	1 254 000	2 970 000	76 697,78	50 883,75	25 814,03	8	14 929,08	36,6
100	300	2 280 000	5 400 000	76 698,21	51 630,45	25 067,76	8	15 675,78	38,5
200	600	4 560 000	10 800 000	76 698,42	53 294,40	23 404,01	8	17 339,73	42,6
350	1 050	7 980 000	18 900 000	76 699,53	55 789,31	20 910,22	8	19 834,64	48,7
500	1 500	11 400 000	27 000 000	76 701,42	57 615,96	19 085,46	5	21 661,29	53,2
750	2 250	17 100 000	40 500 000	76 702,63	60 234,68	16 467,95	6	24 280,01	59,6
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	76 704,88	62 860,13	13 844,75	5	26 905,46	66,0

Tab. 24: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2001

2001									
A _{pūdorys} [m ²]	V _{RN} [m ³]	cena _{min} [Kč]	cena _{max} [Kč]	V _{přítok} [m ³ /rok]	V _{čerpání} [m ³ /rok]	V _{přepad} [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	V _{čerp.sráž.} [m ³ /rok]	R _{sráž.čov} [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	106 172,05	53 313,46	52 858,59	16	17 457,02	24,8
5	15	114 000	270 000	106 171,99	53 576,31	52 595,68	16	17 719,88	25,2
10	30	228 000	540 000	106 171,73	53 684,01	52 487,72	16	17 827,58	25,4
55	165	1 254 000	2 970 000	106 171,58	54 945,51	51 226,07	17	19 089,08	27,1
100	300	2 280 000	5 400 000	106 171,34	56 159,26	50 012,08	17	20 302,83	28,9
200	600	4 560 000	10 800 000	106 171,76	58 861,80	47 309,97	17	23 005,36	32,7
350	1 050	7 980 000	18 900 000	106 173,16	62 632,38	43 540,78	12	26 775,95	38,1
500	1 500	11 400 000	27 000 000	106 176,31	65 847,25	40 329,06	11	29 990,82	42,6
750	2 250	17 100 000	40 500 000	106 180,02	70 545,16	35 634,86	9	34 688,73	49,3
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	106 181,10	74 397,00	31 784,11	7	38 540,56	54,8

Tab. 25: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2002

2002									
$A_{púdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	105 104,01	52 980,38	52 123,63	22	17 123,95	24,7
5	15	114 000	270 000	105 104,24	53 232,15	51 872,09	21	17 375,72	25,1
10	30	228 000	540 000	105 103,58	53 330,18	51 773,41	21	17 473,74	25,2
55	165	1 254 000	2 970 000	105 103,43	54 635,33	50 468,10	20	18 778,90	27,1
100	300	2 280 000	5 400 000	105 103,45	55 942,01	49 161,44	19	20 085,57	29,0
200	600	4 560 000	10 800 000	105 104,86	58 497,15	46 607,71	16	22 640,72	32,7
350	1 050	7 980 000	18 900 000	105 106,01	61 837,46	43 268,55	14	25 981,03	37,5
500	1 500	11 400 000	27 000 000	105 109,78	64 834,18	40 275,60	13	28 977,75	41,8
750	2 250	17 100 000	40 500 000	105 111,47	68 605,69	36 505,78	11	32 749,26	47,3
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	105 115,77	71 427,47	33 688,30	10	35 571,04	51,4

Tab. 26: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2003

2003									
$A_{púdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	88 462,26	46 768,44	41 693,81	11	10 912,01	20,7
5	15	114 000	270 000	88 462,91	46 870,93	41 591,98	11	11 014,50	20,9
10	30	228 000	540 000	88 462,18	46 981,89	41 480,28	11	11 125,46	21,1
55	165	1 254 000	2 970 000	88 460,98	47 914,32	40 546,66	11	12 057,89	22,9
100	300	2 280 000	5 400 000	88 460,84	48 847,63	39 613,20	11	12 991,20	24,7
200	600	4 560 000	10 800 000	88 460,49	50 809,52	37 650,97	11	14 953,09	28,4
350	1 050	7 980 000	18 900 000	88 460,50	53 625,68	34 834,82	11	17 769,25	33,8
500	1 500	11 400 000	27 000 000	88 459,52	56 453,49	32 006,03	11	20 597,06	39,2
750	2 250	17 100 000	40 500 000	88 461,07	60 671,85	27 789,22	11	24 815,42	47,2
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	88 460,54	64 345,96	24 114,58	10	28 489,53	54,2

Tab. 27: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2004

2004									
$A_{púdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	62 276,54	51 013,03	11 263,51	11	15 058,36	57,2
5	15	114 000	270 000	62 276,62	51 119,66	11 156,96	11	15 164,99	57,6
10	30	228 000	540 000	62 276,58	51 238,64	11 037,94	11	15 283,97	58,1
55	165	1 254 000	2 970 000	62 278,68	52 009,64	10 269,04	8	16 054,97	61,0
100	300	2 280 000	5 400 000	62 278,47	52 699,98	9 578,49	7	16 745,31	63,6
200	600	4 560 000	10 800 000	62 278,57	54 014,61	8 263,96	6	18 059,94	68,6
350	1 050	7 980 000	18 900 000	62 279,80	55 889,69	6 390,12	6	19 935,02	75,7
500	1 500	11 400 000	27 000 000	62 282,60	57 771,67	4 510,93	6	21 817,01	82,9
750	2 250	17 100 000	40 500 000	62 284,87	60 383,36	1 901,51	4	24 428,69	92,8
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	62 287,20	61 168,23	1 118,97	1	25 213,56	95,8

Tab. 28: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2005

2005									
$A_{pūdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	75 977,06	49 953,61	26 023,45	14	14 097,18	35,1
5	15	114 000	270 000	75 977,02	50 090,94	25 886,08	14	14 234,50	35,5
10	30	228 000	540 000	75 977,06	50 203,77	25 773,29	14	14 347,34	35,8
55	165	1 254 000	2 970 000	75 976,92	51 256,69	24 720,23	13	15 400,26	38,4
100	300	2 280 000	5 400 000	75 977,14	52 144,14	23 832,99	12	16 287,71	40,6
200	600	4 560 000	10 800 000	75 978,21	53 603,36	22 374,85	8	17 746,92	44,2
350	1 050	7 980 000	18 900 000	75 977,13	55 290,90	20 686,23	7	19 434,47	48,4
500	1 500	11 400 000	27 000 000	75 978,62	56 303,30	19 675,32	6	20 446,86	51,0
750	2 250	17 100 000	40 500 000	75 980,39	57 867,10	18 113,29	6	22 010,67	54,9
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	75 980,15	59 437,18	16 542,97	6	23 580,75	58,8

Tab. 29: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2006

2006									
$A_{pūdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	82 236,49	50 680,04	31 556,45	12	14 823,61	32,0
5	15	114 000	270 000	82 236,28	50 893,77	31 342,51	11	15 037,34	32,4
10	30	228 000	540 000	82 235,65	50 949,28	31 286,38	11	15 092,84	32,5
55	165	1 254 000	2 970 000	82 236,06	51 878,53	30 357,54	11	16 022,09	34,5
100	300	2 280 000	5 400 000	82 236,23	52 722,41	29 513,82	10	16 865,98	36,4
200	600	4 560 000	10 800 000	82 234,79	54 379,53	27 855,26	9	18 523,10	39,9
350	1 050	7 980 000	18 900 000	82 236,13	56 362,78	25 873,36	8	20 506,35	44,2
500	1 500	11 400 000	27 000 000	82 236,54	58 247,87	23 988,67	7	22 391,43	48,3
750	2 250	17 100 000	40 500 000	82 238,80	61 385,88	20 852,92	7	25 529,45	55,0
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	82 239,73	64 443,58	17 796,15	7	28 587,14	61,6

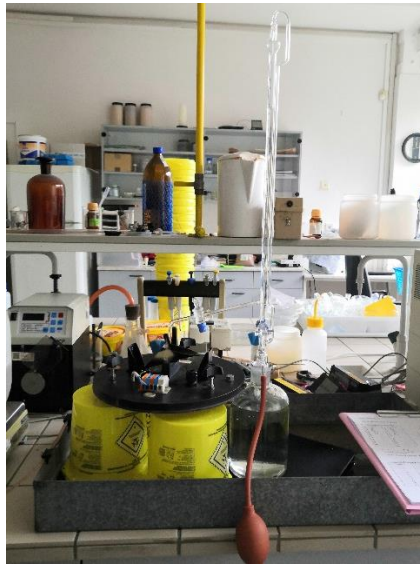
Tab. 30: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2007

2007									
$A_{pūdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.čov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	93 022,76	52 122,55	40 900,20	15	16 266,12	28,5
5	15	114 000	270 000	93 022,24	52 359,23	40 663,01	15	16 502,79	28,9
10	30	228 000	540 000	93 022,10	52 461,92	40 560,18	15	16 605,49	29,0
55	165	1 254 000	2 970 000	93 022,30	52 130,94	40 891,36	15	16 274,51	28,5
100	300	2 280 000	5 400 000	93 020,24	55 046,57	37 973,67	14	19 190,14	33,6
200	600	4 560 000	10 800 000	93 020,68	57 573,10	35 447,58	13	21 716,66	38,0
350	1 050	7 980 000	18 900 000	93 023,76	60 752,94	32 270,83	10	24 896,50	43,6
500	1 500	11 400 000	27 000 000	93 026,35	63 355,25	29 671,09	9	27 498,82	48,1
750	2 250	17 100 000	40 500 000	93 028,26	67 225,41	25 802,86	8	31 368,97	54,9
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	93 030,33	69 785,56	23 244,77	7	33 929,13	59,3

Tab. 31: Citlivostní analýza efektivity PSOV pro rok 2008

2008									
$A_{púdorys}$ [m ²]	V_{RN} [m ³]	$cena_{min}$ [Kč]	$cena_{max}$ [Kč]	$V_{přítok}$ [m ³ /rok]	$V_{čerpání}$ [m ³ /rok]	$V_{přepad}$ [m ³ /rok]	počet přepadů/rok	$V_{čerp.sráž.}$ [m ³ /rok]	$R_{sráž.žov}$ [%]
0,1	0,3	2 280	5 400	67 382,85	48 053,65	19 329,19	11	12 098,99	38,5
5	15	114 000	270 000	67 382,34	48 245,69	19 136,65	11	12 291,02	39,1
10	30	228 000	540 000	67 382,43	48 280,84	19 101,59	11	12 326,18	39,2
55	165	1 254 000	2 970 000	67 383,10	49 027,57	18 355,53	11	13 072,90	41,6
100	300	2 280 000	5 400 000	67 382,70	49 719,56	17 663,14	10	13 764,89	43,8
200	600	4 560 000	10 800 000	67 383,02	50 986,56	16 396,46	8	15 031,89	47,8
350	1 050	7 980 000	18 900 000	67 385,43	52 644,93	14 740,50	7	16 690,26	53,1
500	1 500	11 400 000	27 000 000	67 385,51	54 213,26	13 172,25	6	18 258,60	58,1
750	2 250	17 100 000	40 500 000	67 385,63	56 824,08	10 561,55	5	20 869,41	66,4
1 000	3 000	22 800 000	54 000 000	67 388,84	59 353,31	8 035,54	4	23 398,64	74,4

12.9 Fotografie



Obr. 63: Aparatura pro statickou kalibraci srážkoměru



Obr. 64: Aparatura pro dynamickou kalibraci srážkoměru



Obr. 65: Jednotlivé prvky aparatury pro dynamickou kalibraci srážkoměru: peristaltické čerpadlo (vlevo), váha s nádobou s vodou (uprostřed) a srážkoměr s ustalovacím válcem (vpravo)



Obr. 66: Instalace přístrojů do měrného profilu Bukovno



Obr. 67: Vlévání roztoku do kanalizace
při kalibraci měrných profilů
pomocí stopovače



Obr. 68: Multimetr k měření koncentrace
stopovače v odpadní vodě



Obr. 69: Příjezd cisterny k šachtě výše proti proudu, tedy nad profilem, kde probíhala injektáž stopovače



Obr. 70: Nadlepšování průtoku upouštěním vody z cisterny – poslední kontrola před spuštěním testu