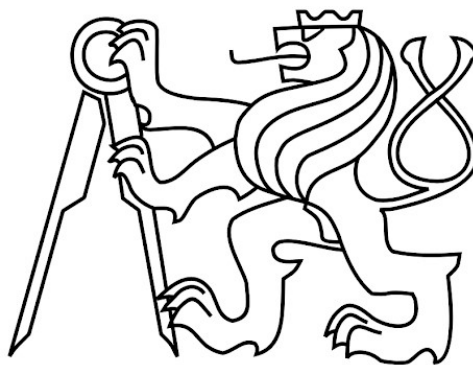


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra zdravotního a ekologického inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Posouzení srážko-odtokových vztahů stokového systému
obce Luštěnice**

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

LEDEN 2022

Bc. Jana SMOLAŘOVÁ

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Smolařová Jméno: Jana Bc. Osobní číslo: 468483
Zadávací katedra: Katedra zdravotního a ekologického inženýrství
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posouzení srážko-odtokových vztahů stokového systému obce Luštěnice
Název diplomové práce anglicky: Assessment of rainfall-runoff processes in Luštěnice 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 (monitoring a modelování). Praktická část bude obsahovat tvorbu a kalibraci jednoduchého srážko-odtokového modelu a posouzení přečerpávání odpadních vod do jiné lokality.

Seznam doporučené literatury:

Krejčí a kol. Odvodnění urbanizovaných území: Koncepční přístup, NOEL 2000
Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1
Butler D. et al. Urban Drainage, 4th edition, 2018

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

Datum zadání diplomové práce: 21.9.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

21.9.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

.....

Bc. Jana Smolařová

v Praze ledna 2022

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala panu doc. Ing. Davidu Stránskému, Ph.D. za odborné vedení při zpracování mé diplomové práce a cenné rady. Poděkování patří i mé rodině za podporu.

.

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je posouzení srážko-odtokových vztahů stokového systému obce Luštěnice a možnosti přečerpávání odpadních vod ze zájmového území do jiné lokality. Tímto zásahem do stávajícího režimu odvodnění by bylo umožněno ukončení provozu objektu ČOV Zelená. Teoretická část diplomové práce byla zaměřena na městské odvodnění a na různé metody monitoringu a modelování odtoku z urbanizovaných povodí. V praktické části byla analyzována data a sestaven simulační model v softwaru SWMM popisující srážko-odtokové procesy. Kalibrace a verifikace modelu byla provedena na podkladu dat získaných monitorovací kampaní. Sestavený model slouží k získání informací o množství přečerpávaných odpadních vod. Ke kvantifikaci množství přečerpávaných odpadních vod byla použita historická časová řada srážkových úhrnů o délce 10 let pocházející z nedaleké lokality. Výstupy modelu ukázaly, že záměr přečerpávání odpadních vod do jiné lokality je technicky možný, ale poukázaly na velmi nízké množství doteklé srážkové vody na ČOV. V závěru jsou stručně doporučena opatření k efektivnějšímu hospodaření s dešťovou vodou.

Klíčová slova

městské odvodnění, monitoring, simulační model, SWMM, kalibrace, verifikace, přečerpávání odpadních vod, obec Luštěnice

ABSTRACT

The diploma's thesis is focused on the assessment of the rainfall-runoff relations of the sewer system of the Luštěnice municipality and the possibility of pumping wastewater from the area of interest to another location. This adjustment of the existing drainage regime would enable the closure of the Zelená Waste Water Treatment Plant. The theoretical part of the thesis was focused on urban drainage and on different methods of monitoring and modelling runoff from urbanised catchments. In the practical part, data was analysed and a simulation model was built in SWMM software describing the rainfall-runoff processes. Calibration and verification of the model was performed on the basis of data obtained by the monitoring campaign. The constructed model is used to obtain information on the amount of pumped wastewater. A 10-year historical rainfall time series from a nearby site was used to quantify the amount of pumped wastewater. The model outputs showed that the intention of pumping the wastewater to another location is technically feasible, but pointed out the very low amount of inflow of rainwater to the WWTP. In conclusion, measures to manage stormwater more efficiently are briefly recommended.

Keywords

urban drainage, monitoring, simulation model, SWMM, calibration, verification, wastewater pumping, Municipality Luštenice

OBSAH

1	ÚVOD.....	8
2	TEORETICKÝ ZÁKLAD.....	9
2.1	MĚSTSKÉ ODVODNĚNÍ.....	9
2.1.1	DRUHY ODPADNÍCH VOD.....	9
2.1.2	STOKOVÁ SÍŤ.....	10
2.2	DEŠŤOVÝ ODTOK Z POVODÍ.....	17
2.3	DEŠŤOVÝ ODTOK Z URBANIZOVANÝCH PLOCH.....	18
2.3.1	TVORBA DEŠŤOVÉHO ODTOKU.....	18
2.3.2	KONCENTRACE DEŠŤOVÉHO ODTOKU.....	22
2.3.3	TRANSPORT VODY VE STOKOVÉM SYSTÉMU.....	25
2.4	MONITORING V MĚSTSKÉM ODVODNĚNÍ.....	28
2.4.1	MĚŘENÍ SRÁŽEK.....	29
2.4.2	MĚŘENÍ PRŮTOKOVÝCH CHARAKTERISTIK.....	34
2.5	MODELOVÁNÍ V MĚSTSKÉM ODVODNĚNÍ.....	38
2.5.1	POTŘEBNÁ DATA KE STAVBĚ MODELU.....	39
2.5.2	KALIBRACE A VERIFIKACE MODELU.....	40
2.5.3	POUŽITÍ MODELU.....	40
2.6	STORM WATER MANAGEMENT MODEL.....	41
3	CÍLE.....	43
4	PRAKTICKÁ ČÁST.....	44
4.1	METODICKÝ POSTUP.....	44
4.1.1	ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ.....	44
4.1.2	MONITOROVACÍ KAMPAŇ.....	44
4.1.3	ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ.....	44
4.1.4	TVORBA MODELU.....	45
4.1.5	KALIBRACE A VERIFIKACE MODELU.....	46
4.1.6	VÝPOČET OBJEMU SRÁŽKOVÉ VODY.....	46
4.1.7	POSOUZENÍ PŘEČERPÁVÁNÍ VOD.....	47
4.2	ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ.....	47
4.2.1	INFORMACE O OBCI.....	47

4.2.2	ODKANALIZOVÁNÍ OBCE	49
4.3	MONITOROVACÍ KAMPAŇ	50
4.4	ZPRACOVÁNÍ DAT	50
4.5	TVORBA MODELU	53
4.5.1	SESTAVENÍ MODELU.....	53
4.5.2	NADEFINOVÁNÍ PRVKŮ MODELU	55
4.5.3	SPUŠTĚNÍ MODELU.....	58
4.6	KALIBRACE A VERIFIKACE MODELU	59
4.6.1	KALIBRACE MODELU	59
4.6.2	VERIFIKACE MODELU.....	62
4.7	VÝPOČET OBJEMU SRÁŽKOVÉ VODY	63
4.8	POSOUZENÍ PŘEČERPÁVÁNÍ VOD.....	65
5	ZÁVĚR	67
	SEZNAM LITERATURY	69
	SEZNAM TABULEK	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

1 ÚVOD

Předmětem diplomové práce je posouzení záměru společnosti provozující vodovody a kanalizace v Mladé Boleslavi spočívající v přepojení stávající čistírny odpadních vod v obci Luštěnice na čistírnu odpadních vod v Mladé Boleslavi, což je v souladu se současným trendem přepojování malých a nekapacitních čistíren odpadních vod na větší, kapacitnější a často spolehlivější čistírny odpadních vod. Tento trend přichází z důvodu nárustu obyvatel a také z ochrany životního prostředí.

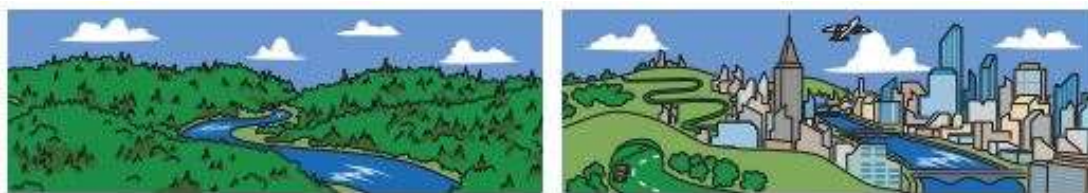
Součástí práce je porozumění a posouzení srážko-odtokových vztahů v zájmovém území pro získání dat k vyhodnocení potencionálního množství přečerpávaných odpadních vod do jiné lokality. Z objednaného krátkodobého monitoringu jsou zpracována data a sestaven model v softwaru Storm Water Management Model (SWMM). V neposlední řadě proběhne posouzení přečerpávání odpadních vod na podkladu historické časové řady srážkových úhrnů délky 10 let z reprezentativní srážkoměrné stanice.

2 TEORETICKÝ ZÁKLAD

2.1 MĚSTSKÉ ODVODNĚNÍ

Městské odvodnění patří mezi velmi důležitý obor, který se zabývá úlohou zabezpečení ochrany zdraví lidí, ochrany jejich komfortu bydlení a ochrany nemovitostí před záplavami s ohledem na minimalizaci vlivu na životní prostředí. Odvádí se z území především dva druhy vod, odpadní vody a srážkové vody. Tradiční městské odvodnění je vytvořeno tak, aby co nejrychleji a nejspolehlivěji odvádělo splaškové a zároveň i dešťové vody z území. Zabezpečuje tak hygienické problémy a ochranu nemovitostí před záplavami, ale nepřihlíží ke vzrůstající urbanizaci a vznikajícímu problému úbytku vody v krajině (1) (2).

Mezi novou koncepcí městského odvodnění patří dosáhnout co nejpomalejšího transportu vody (zejména vody srážkové) do recipientu. Tato koncepce se snaží reagovat na zvyšování urbanizace ve městech a na klimatické změny na zemi. Jejím hlavním cílem je zmírnit negativní důsledky zvyšující se urbanizace tím, že se snaží o přirozený způsob odvodnění, který se vyskytuje v nezastavěných povodích (1).



Obrázek 1 Neovlivněná přírodní krajina (vlevo) a městská krajina (vpravo) (38)

2.1.1 Druhy odpadních vod

Odpadní vodou se stávají dle **Zákona č. 254/2001 Sb., zákon o vodách a změně některých zákonů (vodní zákon)** vody „použité v obytných, zemědělských, zdravotnických a jiných stavbách, zařízeních nebo dopravních prostředcích, pokud mají po použití změněnou jakost 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.“ (3).

Norma **ČSN 75 6101** rozděluje odpadní vody podle původu a způsobu znečištění na (4):

- splaškové odpadní vody,
- infekční odpadní vody,
- průmyslové odpadní vody,
- odpadní vody ze zemědělství a zemědělské výroby,

- znečištěné srážkové vody z extrémně znečištěných ploch,
- městské odpadní vody, které obecně tvoří směs splaškových odpadních vod, průmyslových odpadních vod a případně srážkových vod,
- ostatní odpadní vody.

Mezi splaškové odpadní vody patří například vody vyprodukované z koupelen, kuchyní, prádelen, WC apod. Jsou to odpadní vody z bytů, obytných domů, městské vybavenosti jako škol, restaurací, hotelů ad. Lze je rozdělit podle vzniku na hnědé, žluté a šedé vody. Hnědé vody se skládají převážně z fekálií. Žluté vody obsahují moč. Šedé vody vznikají v koupelnách a kuchyních (5) (4).

Infekční odpadní voda vzniká ve zdravotnických zařízeních jako jsou infekční oddělení nemocnic, mikrobiologické laboratoře, kliniky medicínské i veterinární, lékárny apod. Tyto vody se řídí normou **ČSN 75 6406**, která udává přípustné hodnoty znečištění, které lze vypustit do kanalizace. Při překročení přípustných hodnot je nutné zvolit vhodné předčištění odpadní vody tak, aby dále nepředstavovala riziko pro člověka a životní prostředí (4) (6).

Mezi průmyslové odpadní vody se řadí vody vypouštěné z průmyslu potravinářského, strojírenského, stavebního apod. Znečištění odpadní vody závisí na technologii výroby a limity, které jsou přípustné vypouštět do kanalizace jsou stanoveny ve **Vyhlášce č. 428/2001 Sb., příloha č. 15** (4).

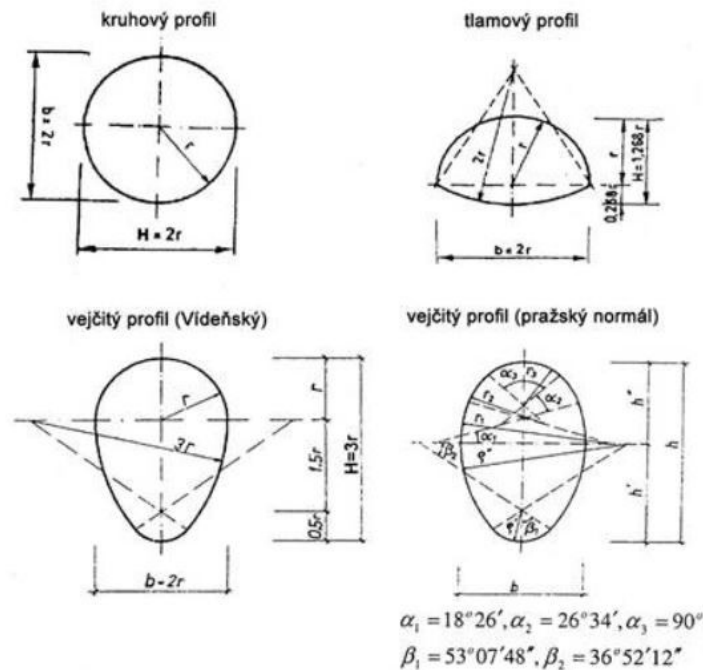
Voda srážková není dle **Zákona č. 254/2001 Sb., zákon o vodách a změně některých zákonů (vodní zákon)** vodou odpadní. Technicky se vodou odpadní stává až po vtoku do jednotné kanalizace smísením se splaškovou odpadní vodou (3).

2.1.2 Stoková síť

Stoková síť patří mezi prvky městského odvodnění a její hlavní úkol spočívá v transportu odpadní vody na čistírnu odpadních vod (dále jako ČOV) a do recipientu. Na stokové síti se mohou vyskytovat objekty jako jsou retenční nádrže, odlehčovací komory, kanalizační šachty, výusti apod. Síť stok a objektů tvoří stokovou soustavu (7).

Při volbě profilu stoky závisí na mnoha aspektech, jako jsou například hydraulické podmínky, provozní, stavební, ekonomické a další požadavky. Pro odvodnění urbanizovaného území se používají zejména tyto profily (8):

- kruhový,
- vejčitý,
- tlamový.



Obrázek 2 Profily pro navrhování stok (8)

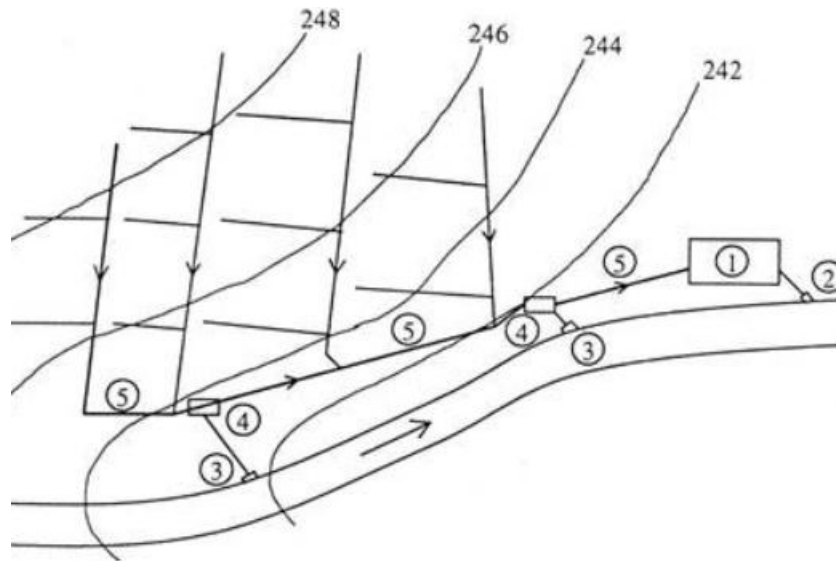
Základní dělení stokové sítě dle způsobu odvádění odpadních vod (9):

- jednotná soustava,
- oddílná soustava,
- modifikovaná soustava.

Jednotná stoková soustava

Jednotná stoková síť se na našem území vyskytuje převážně u velkých měst a vyznačuje se tím, že odvádí všechny druhy odpadní vody společně s dešťovou vodou v jedné trubní síti na ČOV. Do soustavy jsou přidány odlehčovací komory, které pomáhají odlehčit odpadní vodu při dešťové události. Naředené vody z kanalizace jsou přes odlehčovací komory převedeny do recipientu bez jakéhokoliv předčištění, anebo s použitím předčištění ve formě česlí (10) (9).

Obrázek 3 představuje schéma jednotné stokové soustavy, kde číslo 1 je ČOV, číslo 2 výpusť vyčištěné odpadní vody do recipientu, číslo 3 výpusť odlehčené odpadní vody, číslo 4 odlehčovací komora a číslo 5 jednotná stoka (9).

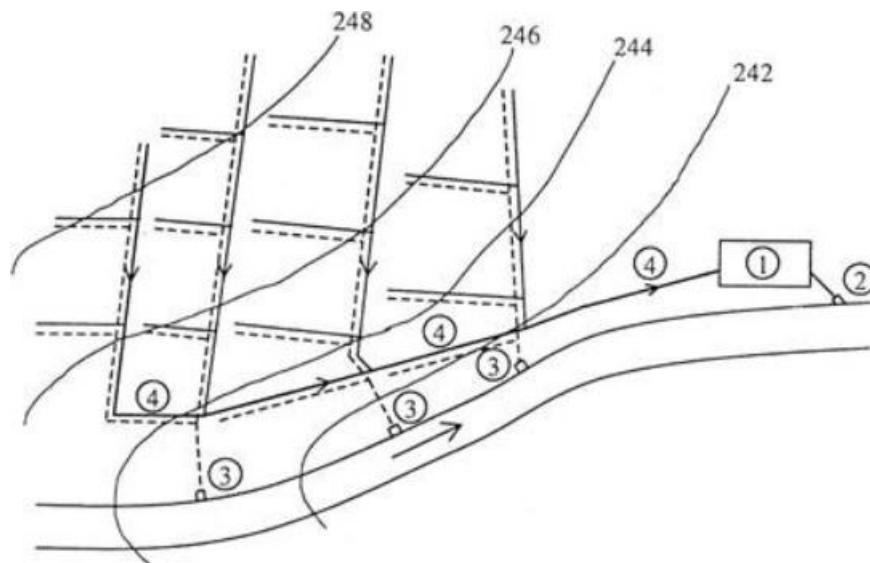


Obrázek 3 Jednotná stoková soustava (9)

Oddílná stoková soustava

Hlavním úkolem oddílné stokové sítě je zamezit smísení splaškové odpadní vody s vodou dešťovou. Z tohoto důvodu se navrhuje dvě trasy kanalizace, kde jedna odvádí pouze splaškové odpadní vody k vyčištění na ČOV a druhá pouze srážkové vody samostatnou dešťovou sítí do vhodného vodního toku. Tento systém se uplatňuje při navrhování odvodnění například malých obcí a také příměstských sídlišť. U malých obcí lze využít převládající propustné povrchy a navrhnout jednu kanalizaci, která bude odvádět pouze splaškové vody. Dešťové vody jsou poté odváděny příkopy, po terénu a zadržovány v krajině na propustných plochách. U příměstských sídlišť se může naskytnout problém s hydraulickou spolehlivostí při napojení na stávající jednotnou stokovou síť města, ve které se při návrhu nepočítalo s rozšiřováním sítě. Jsou pak na stávající síť napojeny pouze znečištěné odpadní vody z oddílné splaškové kanalizace (10).

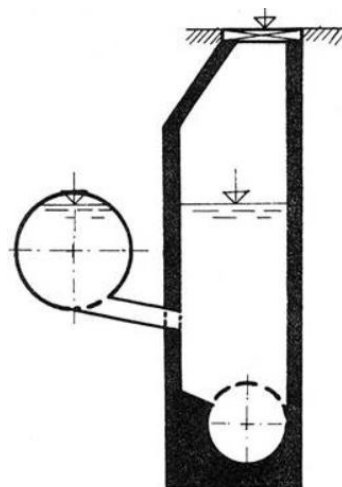
Obrázek 4 představuje schéma oddílné stokové soustavy, kde číslo 1 je opět ČOV, číslo 2 výust' vyčištěné odpadní vody, číslo 3 výust' dešťové vody a číslo 4 oddílná stoka. Čárkovanou čarou je znázorněna kanalizace pro odvod dešťové vody a plnou čarou je kanalizace pro odvod ostatní odpadní vody (9).



Obrázek 4 Oddílná stoková soustava (9)

Modifikovaná stoková soustava

Tato soustava může vzniknout kombinací jednotné a oddílné kanalizace. Princip této soustavy spočívá v tom, že dešťová kanalizace je umístěna mělce pod terénem a je určena k odvádění pouze srážkových vod přímo do vodního toku, a splašková kanalizace je naopak uložena hluboko pod terénem a odvádí zbývající podíl srážek společně se splaškovou odpadní vodou na ČOV. Kanalizace jsou propojeny propojovacím potrubím ze dna dešťové kanalizace do šachet na splaškové kanalizaci. Při dešťové události se nejvíce znečištěné dešťové vody dostanou do splaškové kanalizace a při následném zahlcení šachet jsou dešťovou kanalizací odváděny pouze dešťové odpadní vody. Tím se dosáhne toho, že relativně čistá voda je odvedena do recipientu a výrazně znečištěná voda na vyčištění do ČOV (9).



Obrázek 5 Modifikovaná stoková soustava (9)

Při návrhu stokové soustavy se zaměřuje na uspořádání stok v daném území. Každé území má rozdílný styl i uspořádání zástavby a je nutné tento fakt při návrhu zohlednit. Hlavní cílem při návrhu uspořádání stokové sítě je co nejrychleji, provozně nejspolehlivěji a pokud možno gravitačně dopravit odpadní vodu na ČOV. Stokové soustavy můžeme rozdělit na čtyři základní typy, které lze mezi sebou kombinovat (7):

- úchytný systém,
- větevový systém,
- radiální systém,
- pásmový systém.

Úchytný systém

Do území s jednotným sklonem a s pravidelným uspořádáním zástavby se používá úchytný systém. Do hlavní úchytné stoky, která je situována podél vodního toku, jsou zaústěny sběrače s uličními stokami, které vedou v pravidelné zástavbě, viz Obrázek 6 (7).

Větevový systém

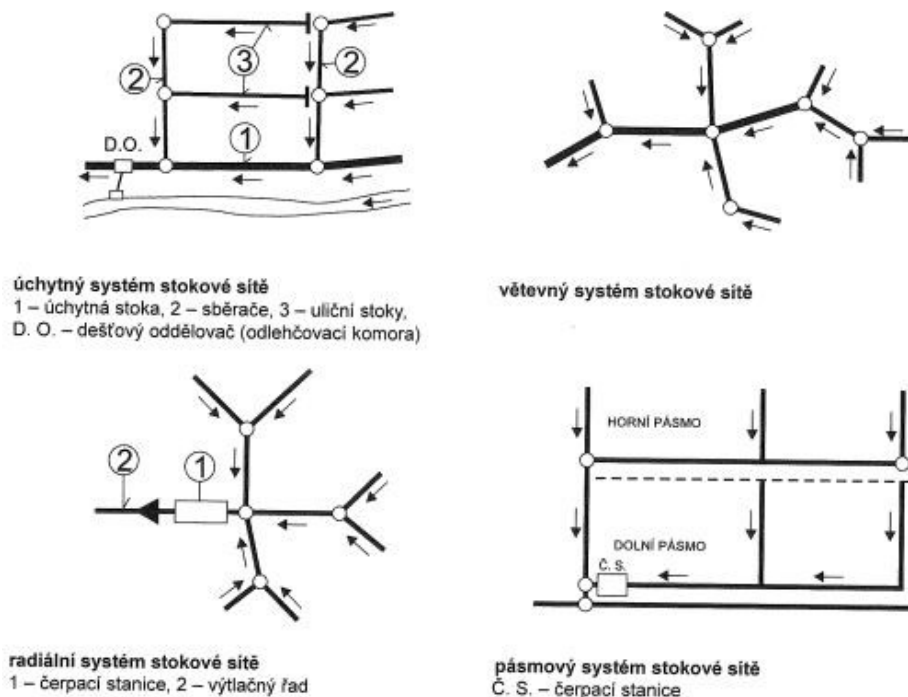
Do členitého území se převážně používá větevový systém. Hlavní stoka je vedena nejnižšími místy území a do ní jsou svedeny sběrače, viz Obrázek 6 (7)

Radiální systém

Tento systém se převážně vyskytuje v území ve tvaru kotliny. V kotlině se uplatňuje větevový systém, který přivede odpadní vodu do nejnižšího místa a odtud je gravitací nebo přečerpáváním odpadní voda dopravována na ČOV nebo do nejbližšího objektu gravitační kanalizace (7).

Pásmový systém

Pásmový systém se využívá v území, které je nutné rozdělit do několika výškových pásem. Například když odvodňované území přechází z vysokého sklonu terénu do plochého, poté je horní pásmo odvodňováno gravitačně a druhé pásmo je nutné přečerpávat (7).



Obrázek 6 Základní systémy stokových sítí (7)

Dalším rozdělením stokové sítě při navrhování je rozdělení dle dopravy odpadní vody. Možnosti dopravy jsou (11):

- gravitační,
- tlaková,
- podtlaková,
- pneumatická,
- jejich kombinace.

Gravitační kanalizace

Gravitační doprava odpadní vody patří mezi tradiční způsob dopravy, který je zaměřen na jednoduchost a spolehlivost provozování. Odpadní voda je dopravována od nátoků do kanalizace až po ČOV pouze díky zemské gravitační tízi a v kanalizaci probíhá beztlakové proudění s volnou hladinou (7) (11)

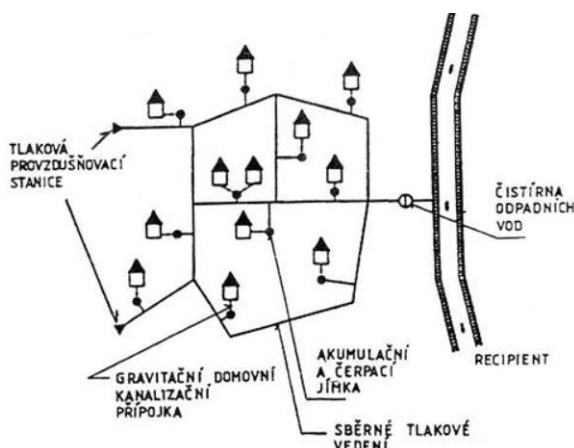
Tlaková kanalizace

Tlakové odvedení odpadní vody je založeno na principu přetlaku uvnitř stokového systému. V zájmovém území je u každého odvodňovaného objektu umístěna domovní čerpací jímka s čerpadly a pracovním tlakem v rozmezí 20 – 50 m v. sl. Odpadní voda přitéká do domovní čerpací jímky gravitačně a z jímky je následně čerpána do systému, kde se vytvoří

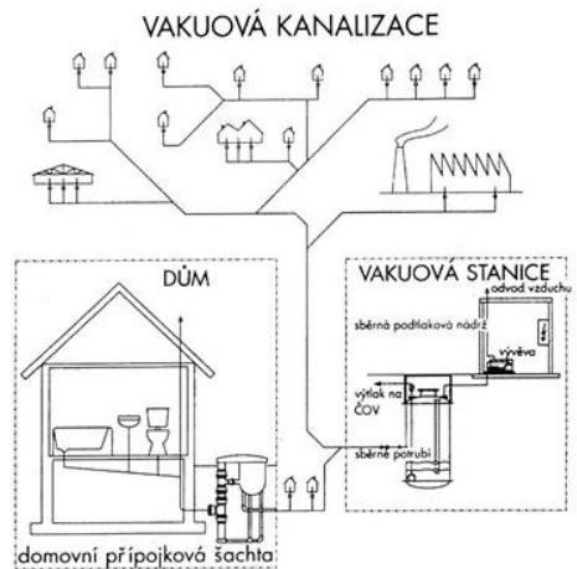
přetlak a je dále odváděna na ČOV. Systém se tedy skládá z gravitační přípojky do domovní čerpací jímky, čerpací jímky s ponorným čerpadlem s elektrickou přípojkou, výtlačným potrubím do sběrného potrubí a sběrném tlakovém potrubí, viz Obrázek 7. Tento systém je spíše vhodný do plochých území, kde nelze navrhnout gravitační dopravu odpadní vody (10) (11).

Podtlaková kanalizace

Ve stokovém systému je při podtlakovém proudění odpadní voda odváděna po porcích, které tvoří směs kapek unášených proudícím vzduchem. Směr proudění je vždy ve směru většího podtlaku a transportní rychlost cca 6 – 8 m/s. U odvodňovaného objektu je nainstalována sběrná šachta, ve které je osazen sací ventil. Na ventil působí z podtlakové stanice s podtlakem 60 – 70 kPa sací podtlak přes podtlakové potrubí. Při naplnění objemu sběrné šachty se sací ventil otevře a odpadní voda je nasáta do kanalizace a následně dopravena do podtlakových nádob. Z podtlakových nádob se gravitací nebo přečerpáním odpadní voda odvede na ČOV. Schéma podtlakové kanalizace viz Obrázek 8 (10) (11).



Obrázek 7 Schéma tlakové stokové sítě (11)



Obrázek 8 Schéma podtlakové kanalizace (11)

Pneumatická kanalizace

Pneumatické odvádění odpadní vody dokáže díky tlakovému vzduchu dopravovat odpadní vodu i na velké vzdálenosti. Díky kompresoru, který vyvolá přetlak vzduchu v pracovní nádrži, je odpadní voda dopravována do výtlaku a dále na ČOV (7) (11).

2.2 DEŠŤOVÝ ODTOK Z POVODÍ

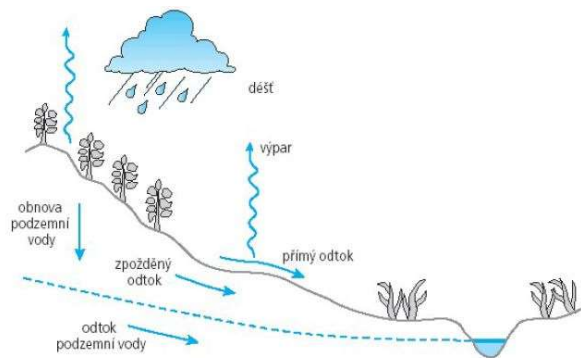
Dešťový odtok nazýváme srážko-odtokovým procesem, který lze rozdělit na tři složky (1):

- 1) přímý odtok,
- 2) zpožděný odtok,
- 3) odtok podzemní vody.

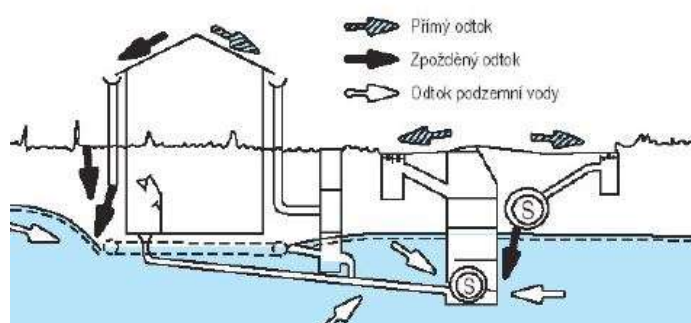
Velikost odtoku a jeho průběh je ovlivněn (1):

- hydrologickými srážkami,
- charakterem prostředí (roční období, klima),
- charakterem povrchu území (vegetace, spád, zpevnění),
- charakterem podloží daného území (jeho propustnost, výška hladiny podzemní vody),
- parametry koryta (drsnost, tvar koryt, spád ad.).

Odtok z urbanizovaného povodí se výrazně liší od odtoku z přirozeného povodí. Rozdělení odtoku i probíhající procesy se v obou povodí podstatně shodují, ale díky velkým zastavěným plochám a vybudovanému městskému odvodnění v urbanizovaném povodí, je rozdíl odtoku opravdu značný. Příklad odtoku z přirozeného povodí a z urbanizovaného povodí viz Obrázek 10 a Obrázek 9 (1).

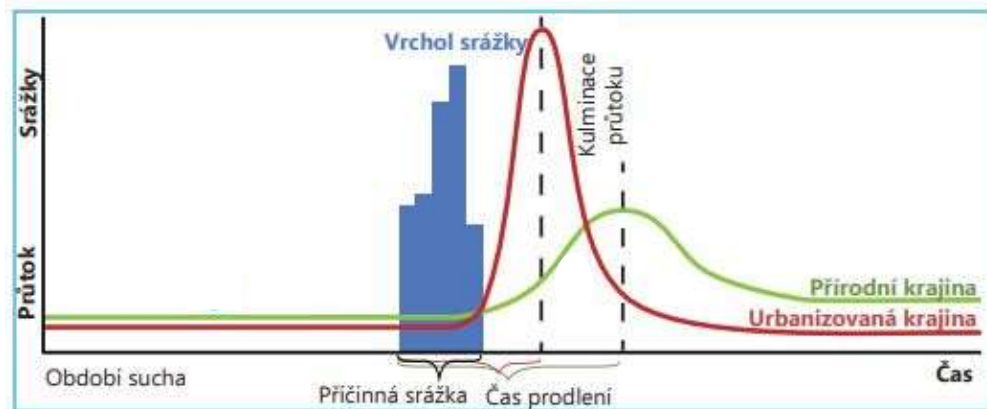


Obrázek 10 Dešťový odtok z přirozeného povodí



Obrázek 9 Dešťový odtok z urbanizovaného povodí (1)

Rozdíl je patrný i na hyetogramu průtokové vlny, viz Obrázek 11, kde v urbanizovaném území nastává kulminační průtok dříve a s poměrně vyšší maximální hodnotou. V přirozeném prostředí je kulminační průtok nejen menší, ale i odtok po dosažení kulminačního průtoku probíhá pozvolněji.



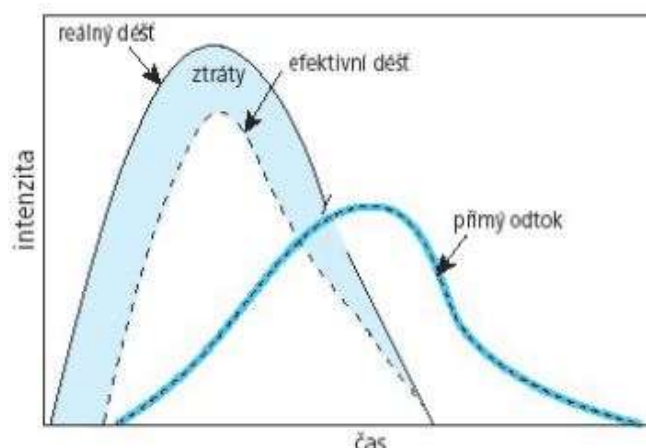
Obrázek 11 Hyetogram průtokové vlny, upraveno z (38)

2.3 DEŠŤOVÝ ODTOK Z URBANIZOVANÝCH PLOCH

V urbanizovaném povodí převládá při dešťové události složka přímého dešťového odtoku, a proto je na ní kladen velký důraz, jak při navrhování odvodnění, tak při řešení různých hydrologických úloh. Složka se skládá ze tří částí: tvorbě odtoku, koncentrací odtoku a transportu odpadní vody (1) (12).

2.3.1 Tvorba dešťového odtoku

Při tvorbě dešťového odtoku jsou zjištěny ztráty v povodí, které vzniknou omočením povrchu, infiltrací, povrchovou retencí, výparem a dalšími vlivy. Tyto ztráty nezačínají ani nekončí ve stejném časovém okamžiku. Po odečtení celkových ztrát od reálného deště vzniká tzv. *efektivní dešť* (13).



Obrázek 12 Tvorba a koncentrace přímého dešťového odtoku (1)

HYDROLOGICKÉ PROCESY TVORBY ODTOKU

Intercepce

Omočení povrchu, jinak intercepce, nastává na začátku dešťové události, když je část dešťových srážek zachycena na povrchu terénu a rostlin. Průběh a velikost ztráty omočením závisí na mnoha faktorech, například na rostlinném pokryvu, na druhu omočeného materiálu nebo také na intenzitě probíhající srážky. Každý povrch je od začátku deště smáčen do dosažení tzv. *kapacity intercepce* C_B , která se v praxi pohybuje od 0,5 – 1,0 mm. Příklady hodnot C_B pro různé povrchy viz Tabulka 1 (1) (13).

Tabulka 1 Kapacita omočení C_B pro různé povrchy, upraveno z (1)

Typ povrchu	C_B (mm)
Silnice	0.75
Šikmé střechy	0.30
Hrubý beton	0.55
Asfalt se splitem	0.52
Středně hrubý beton	0.35
Hladký asfalt	0.18
Jílový písek s podílem 25 % travního porostu	1.50
Jílový písek s podílem 45 % travního porostu	2.00
Udusaná půda	0.2 - 0.25

Povrchová retence

Ztráta povrchovou retencí nastává společně se vsakováním po dosažení kapacity omočení (C_B). Vzniká v důsledku plnění prohlubní v urbanizovaném prostředí a udává, kolik bylo zachyceno objemu vody za daný čas. Rovnici pro aktuální plnění prohlubní lze zjednodušit na tzv. *kapacitu povrchové retence* C_M , pro kterou byly zjištěny empirické hodnoty a pohybují se v rozmezí 0,6 – 2 mm. Příklad hodnot C_M pro větší heterogenní plochy viz Tabulka 2 (1).

Tabulka 2 Hodnoty kapacity povrchové retence, upraveno z (1)

Typ zástavby	C_M (mm)
Vnitřní město	0.6 - 1.5
Sídliště	cca 1.5
Řídká zástavba	1.5 - 2.0

Infiltrace

Infiltrace dešťové vody je nejdůležitějším procesem zejména při odtoku z propustných a polopropustných ploch. V urbanizovaném povodí tedy není tak významný, ale ztráta může dosáhnout vysokých hodnot a výrazně přispět do celkových ztrát (1).

Pro výpočet infiltrovaného množství v urbanizovaném povodí lze použít Hortonův model. Horton předpokládal, že infiltrace začíná s počátečním množstvím, které exponenciálně

klesá až na hodnotu koncové infiltrace. Model tedy zahrnuje rovnovážné (konečné) infiltrační množství různých druhů půd ($h_{I,c}$), maximální nebo počáteční infiltrované množství v čase 0 ($h_{I,0}$), redukční konstantu, která má vliv na časový průběh infiltrace (K_I) a čas od začátku dešťové události (t) (1) (13).

Základní výsledný vztah podle Hortona (1):

$$h_{I,t} = h_{I,c} + (h_{I,0} - h_{I,c})e^{-K_I t} \quad [1]$$

Tabulka 3 Rovnovážné infiltrační množství různých druhů půd, upraveno z (1)

Druh půdy	$h_{I,c}$ (mm/h)
Jíl, jíl s hlínou	0.04 - $4 \cdot 10^{-5}$
Hlína s jílem	0.4 - $4 \cdot 10^{-4}$
Hlína	36 - 0.04
Hlína s pískem	36 - 4
Písek	360 - 40
Písek se šterkem	3600 - 40
Šterk	36000 - 360

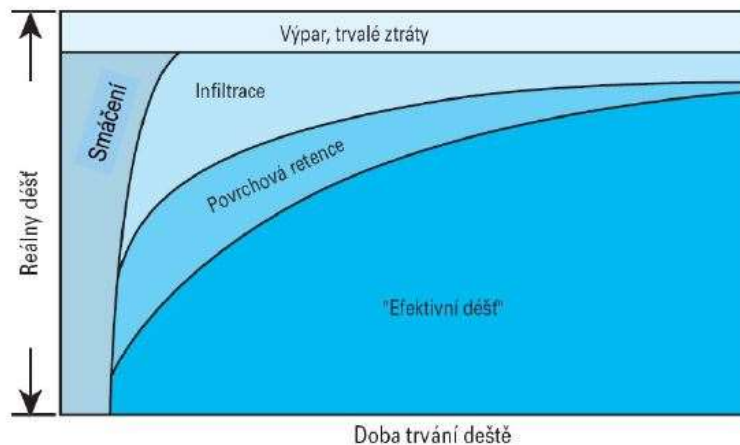
Výpar

Výpar probíhá během celé dešťové události. Nemá žádný vliv na povrchový odtok až do doby, kdy skončí jedna dešťová událost a nastane přestávka před deštěm dalším. V tuto dobu výpar výrazně ovlivňuje počáteční podmínky dalšího deště, které musí být následně správně nadefinované. Pro výpočet výparu je sestaveno plno empirických vzorců. V městském odvodnění lze brát pro zjednodušení hodnotu výparu za den. Pro Střední Evropu se jedná o hodnotu výparu v rozmezí 1 – 3 mm/den (1).

Ostatní ztráty

Ostatní ztráty, také „trvalé ztráty“, mají často největší význam při tvorbě povrchového odtoku. Jedná se o ztráty, které vzniknou na zpevněných plochách, ale vlivem větru, dopravy apod. Jsou vsakovány do přilehlých propustných ploch a nejsou tak odvedeny do kanalizace. Tyto ztráty nelze fyzikálně popsat, ale díky jejich množství jsou velmi důležité pro kalibraci a verifikaci modelů (1).

Průběh ztrát v čase



Obrázek 13 Časový průběh ztrát (1)

JEDNODUCHÉ MODELY TVORBY DEŠŤOVÉHO ODTOKU

Metoda počátečních ztrát

Tato metoda zohledňuje pouze počáteční ztráty, a proto se jedná o nejjednodušší metodu tvorby dešťového odtoku. Metoda vychází z předpokladu, že po dovršení určité počáteční ztráty zbylá dešťová voda odtéká po povrchu. Vhodné použití této metody je pro území s velkým podílem vegetace, kde je důležitá počáteční ztráta a to omočením a povrchovou retencí (1).

Metoda konstantních ztrát

Metoda konstantních ztrát nejdříve zohlední počáteční ztráty omočením a poté předpokládá, že dešťovou událost ovlivňují hlavně ztráty trvalé, které jsou v každém časovém kroku definovány jako konstantní (1).

Procentová metoda

Pro urbanizovaná povodí je vhodná procentová metoda. Ta nejdříve přihlédne k počátečním ztrátám a po dokončení smáčení je každý časový interval přenásoben tzv. *redukčním faktorem*. Redukční faktor, a tedy celý dešťový odtok, je závislý na aktuální intenzitě deště (1).

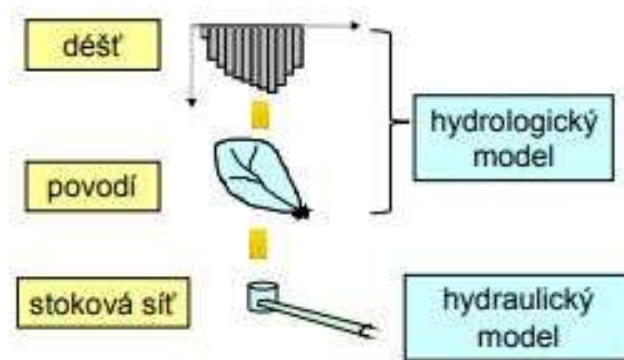
Hraniční metoda

Hraniční metoda je nejpřesnější metoda pro výpočet dešťového odtoku. V této metodě jsou zohledněny počáteční ztráty, ztráty povrchovou retencí i trvalé ztráty, které jsou vyjádřeny redukčním faktorem, který je získán na základě maximálního odtokového koeficientu (1).

2.3.2 Koncentrace dešťového odtoku

Koncentrace dešťového odtoku nastává po tvorbě povrchového odtoku. Z povodí odtéká efektivní dešť po povrchu do stokové sítě. Při odtoku po povrchu dochází k časovému zpoždění efektivního deště, a proto je nutné pro získání přímého odtoku efektivní dešť vyjádřit transformačními funkcemi do odtokového hydrogramu. Modely pro popis k získání přímého deště lze rozdělit na (1):

- hydrologický model:
 - translační model,
 - retenční model (lineární rezervoár, kaskáda lineárních rezervoárů),
- fyzikální popis:
 - model nelineárního rezervoárů (kinematická vlna).

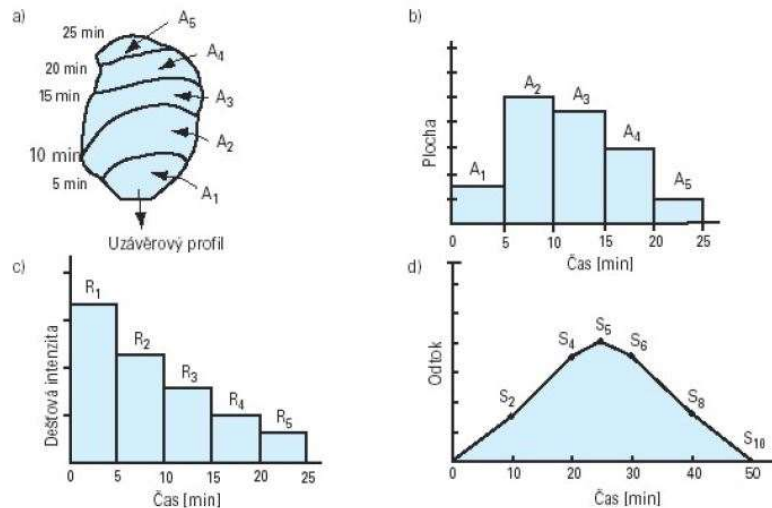


Obrázek 14 Simulační srážko-odtokové modely (25)

HYDROLOGICKÉ MODELY

Translační model

Translační model předpokládá, že doba koncentrace dešťového odtoku závisí zejména na délce trasy a sklonu. Jednou z metod, která se využívá, je tzv. *metoda izochron*. U této metody je hlavním úkolem stanovit elementární plochy v povodí, ze kterých voda z výše položených ploch přitéká do níže položených ploch za stejný časový interval. Hranice elementárních ploch jsou definovány izochronami, které spojují body se stejnou dobou dotoku. Prvním krokem pro získání koncentrace povrchového odtoku je tedy stanovit velikosti dílčích ploch a z nich následně vytvořit křivku relativního rozdělení v čase A_i/A . Tyto hodnoty v časových jednotkách a přenásobené pořadnicemi efektivního deště vytvoří tzv. *diagram času a plochy*. Tento výsledný tvar udává, v jakém časovém sledu a jakým podílem přispívají vytvořené dílčí plochy A_i povodí k odtoku v uzávěrovém profilu. Jednotlivé kroky jsou graficky znázorněny, viz. Obrázek 15 (1) (13).



Obrázek 15 Jednotlivé kroky při výpočtu metodou izochron (1)

Retenční model

Retenci dešťového odtoku v povodí si lze představit pomocí nádrže neboli rezervoáru. Pro vyjádření retence probíhající v rezervoáru se používají nelineární vztahy a v praxi více používané lineární vztahy. Právě lineární vztahy používá model *lineárního rezervoáru*, který je založen na myšlence, že odtokový hydrogram krátkého deště, který má během svého trvání přibližně stejnou intenzitu, má průběh křivky se strmým stoupáním a pozvolnějším klesáním a tento tvar se shoduje s křivkou výtoku z nádrže, která byla naplněna a opět vypuštěna (1) (13).

Rovnice lineárního rezervoáru (1):

$$Q(t) = \frac{1}{K_{Sp}} * V_{Sp}(t) \quad [2]$$

kde: $Q(t)$ výtok z rezervoáru v čase t (m^3/s),
 K_{Sp} konstanta lineárního rezervoáru (min),
 V_{Sp} objem rezervoáru (m^3).

V metodě musí platit podmínka kontinuity a ta vede k bilanční rovnici (1):

$$\frac{dV_{Sp}}{dt} = Q_{zu} - Q_{ab} = r_{eff}(t) * A - Q \quad [3]$$

kde: r_{eff} intenzita efektivního deště (mm/min),
 A plocha povodí (m^2).

Po dosazení rovnice [3] do rovnice [2] vznikne diferenciální rovnice lineárního rezervoáru, která má analytické řešení (1):

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

Nevýhodou této metody je, že nepřihlíží k translaci. Tuto nevýhodu lze obejít dvěma způsoby. První způsob nabízí možnost použití hydrogramu z diagramu času a plochy a druhý způsob je vytvořit model *kaskády lineárních rezervoárů*. Tímto modelem se dosáhne přesnějšího popisu retenčního procesu. Jedná se o n stejných lineárních rezervoárů po sobě jdoucích, které mají nadefinovanou stejnou hodnotu retenční konstanty K_{Sp} . Odtok z jednoho rezervoáru je přítokem do dalšího níže postaveného rezervoáru. Do prvního rezervoáru je přítok tvořen hyetogramem efektivního deště $h_{ef}(1)$ (13).

FYZIKÁLNÍ POPIS

Model nelineárního rezervoáru

Model nelineárního rezervoáru pro výpočet koncentrace povrchového odtoku spočívá v tom, že předpokládá odtok z homogenních šikmých ploch jako průtok v obdélníkovém korytě s nepatrnou hloubkou. Pro tento průtok lze definovat rovnici kontinuity a rovnici hybnosti. Jako neznámé jsou v rovnicích hloubka y a průtok Q . Díky nepatrné hloubce a malé rychlosti nehraje setrvačnost při povrchovém odtoku, ve srovnání s třením, velkou roli. Z tohoto důvodu je možné rovnici hybnosti zjednodušit a sklon čáry energie považovat za shodný se sklonem dna neboli povodí. Toto zjednodušení vede k modelování povrchového odtoku pomocí *kinematické vlny* (1) (13).

Rovnice kontinuity (13):

$$\frac{dV}{dt} = A * h_{eff,t} - Q_t \quad [5]$$

Pro rychlost odtoku lze použít Manningovu rovnici, kde za hydraulický poloměr jednotkové šířky je možno použít hloubku vody y (1):

$$v = \frac{1}{n} * y^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \quad [6]$$

kde: v rychlost průtoku (m/s),
 n Manningova drsnost ($m^{1/3}/s$),
 y hloubka vody (m),
 I sklon čáry energie (-).

Výsledná rovnice pro odtok z povodí o šířce B má následně tvar (1):

$$Q_t = B * v_t * y_t = \frac{1}{n} * B * y_t^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \quad [7]$$

2.3.3 Transport vody ve stokovém systému

Pro výpočet proudění, které probíhá během transportu, je nutné rozdělit prvky stokové sítě na tzv. *úseky* a *uzly*. Důvodem rozdělení je odlišný matematický popis proudění v prvcích (14).

Prvky stokové sítě (1):

- úseky,
 - transportní prvky (otevřené a uzavřené kanály, potrubí atd.),
- uzly,
 - spojovací prvky (šachty),
 - prvky s retenční funkcí (nádrže),
 - rozdělovací prvky (odlehčovací komory),
 - regulační prvky (klapky, ventily atd.).

PROUDĚNÍ V ÚSEKU STOKOVÉ SÍTĚ

Proudění lze rozdělit na (14):

- stacionární rovnoměrné proudění,
- stacionární nerovnoměrné proudění,
- nestacionární proudění.

Pro výpočet proudění v úseku stokové sítě odvodil **Barré de Saint-Venant** základní řídicí rovnice, které lze použít za předpokladu, že platí následující body (14):

- 1) V průtočném profilu se vyskytuje vodorovná hladina. Osa kanálu je přímka, podél které se mění závisle proměnné.
- 2) Tlak je rozdělen podle zákonů hydrostatiky, proudnice mají malé zakřivení a zrychlení, které působí ve vertikálním směru, je zanedbatelné.
- 3) Dno má malý sklon a předpokládá se nepohyblivé.
- 4) Proudící kapalina má konstantní hustotu a je nestlačitelná.
- 5) Vliv tření se uvažuje jako při ustáleném rovnoměrném proudění.

Hlavní řídicí rovnice tvoří *rovnice kontinuity* a *pohybová rovnice*. Rovnice je možno uvést v konzervativním tvaru, kdy je závislou proměnnou průtok, který se při proudění nemění. Druhou možností je tzv. nekonzervativní tvar, který obsahuje závisle proměnné hloubku a rychlost, které se mohou naopak při proudění měnit (1).

Řídící rovnice v konzervativním tvaru

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad [8]$$

kde: Q průtok (m^3/s),
 A průtočná plocha (m^2),
 t čas (s).

Pohybová rovnice:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + g * A \frac{\partial h}{\partial x} + q * A * i_E = g * A * i_0 \quad [9]$$

kde: Q průtok (m^3/s),
 A průtočná plocha (m^2),
 h výška proudu (m),
 β Boussinesqův součinitel hybnosti (-),
 i_E sklon čáry energie (-),
 i_0 sklon dna (-),
 g gravitační konstanta (m/s^2),
 t čas (s).

Řídící rovnice v nekonzervativním tvaru

Rovnice kontinuity:

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad [10]$$

kde: v rychlost proudění (m/s),
 h výška proudu (m),
 t čas (s).

Pohybová rovnice:

$$i_E = i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad [11]$$

kde: v rychlost proudění (m/s),
 h výška proudu (m),
 i_E sklon čáry energie (-),
 i_0 sklon dna (-),
 g gravitační konstanta (m/s^2),
 t čas (s).

Stacionární rovnoměrné proudění

Pohybová rovnice má tvar:

$$i_E = i_0 \quad [12]$$

Po dosazení do rovnice dle Chezyho:

$$v = f(i_e) = C\sqrt{Ri_0} \quad [13]$$

kde: C Chezyho koeficient ($m^{0.5}/s$),
 R hydraulický poloměr (m).

Stacionární nerovnoměrné proudění

Pohybová rovnice má tvar:

$$i_E = i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{v}{g} \quad [14]$$

Po dosazení:

$$v = f(i_e) = C \sqrt{R \left(i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{v}{g} \right)} \quad [15]$$

Nestacionární proudění

Pohybová rovnice má základní tvar:

$$i_E = i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{v}{g} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad [16]$$

Po dosazení:

$$v = f(i_e) = C \sqrt{R \left(i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \frac{v}{g} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \right)} \quad [17]$$

Při nestacionárním proudění je možné zjednodušit pouze pohybovou rovnici. Rovnice kontinuity zůstává v základním tvaru. Dle míry zjednodušení dělíme rovnice na tři modely proudění (14):

- model dynamické vlny (základní tvar rovnice [11]),
- model difúzní vlny (zanedbání vlivu setrvačných sil),
- model kinematické vlny (zanedbání vlivu setrvačných a tlakových sil).

Model difúzní vlny:

$$i_E = i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} \quad [18]$$

Model kinematické vlny:

$$i_E = i_0 \quad [19]$$

PROUDĚNÍ V UZLECH STOKOVÉ SÍTĚ

V uzlech neplatí De Saint Venantovy rovnice. Nesplňují předpoklady pro jejich použití. Například tím, že se v nich rychle mění geometrické a hydraulické charakteristiky proudění. Pro řešení proudění v uzlech se sestavují *rovnice kontinuity, rovnice zachování mechanické energie a rovnice popisující regulační funkci prvku*. Okrajové podmínky v uzlech jsou dány hydraulickými podmínkami v uzlech (14).

2.4 MONITORING V MĚSTSKÉM ODVODNĚNÍ

Monitoring v městském odvodnění slouží zpravidla ke sledování systému odvodnění. Jak se systém chová, zda plní svou funkci, k posouzení účelu provedených změn a také je důležitou částí ke kalibraci a verifikaci modelů. Nástrojem monitoringu k získání odpovědí je měření. Při volbě způsobu měření je nutné položit si pár základních otázek, které pomohou při výběru a určí i volbu měřicího přístroje. Mezi první otázky patří, jaké veličiny budou měřeny, kdy a jak dlouho bude v plánu měřit, jaká bude požadovaná přesnost, kdy mají být data k dispozici apod. (1) (15).

Rozdělení monitoringu v městském odvodnění dle měřené veličiny (15):

- **kvantitativní měření,**
 - popis srážko-odtokových vztahů (měření srážek, hladin, rychlostí a průtoků v kanalizaci),
- **kvalitativní měření,**
 - jakost bezdeštného odtoku (v kanalizaci, ČOV, recipientu),
 - jakost povrchového odtoku,
 - jakost odlehčené vody,
 - balastní vody (metodou hmotnostního toku polutantu),
- **měření biologických ukazatelů,**
 - množství zastoupení organismů,
 - pohyb organismů,
 - indexy diverzity, citlivosti na znečištění ad.

Rozdělení monitoringu dle časového hlediska (15):

- **dlouhodobý monitoring,**
 - trvalé měření,
 - k získání informací pro návrh a dimenzování nových staveb (1), stanovení poplatků, správnému řízení procesů ad.,
- **střednědobý monitoring,**
 - měření převážně několik týdnů,
 - k získání podkladů pro simulační modely, pro řešení provozních problémů, pro kontrolu stavu objektů v systému ad.,
- **krátkodobý monitoring,**
 - jednorázové měření k zachycení informací zvolené události,
 - nejvhodnější podklady pro kalibraci a verifikaci simulačního modelu, výsledky vlivu odvodnění na vodní tok ad.

2.4.1 Měření srážek

NÁROKY NA SRÁŽKOVÁ DATA

Městští hydrologové považují za ideální dešťová data taková data, která splňují v dešťové databance požadavky uvedené níže, viz Tabulka 4 (13).

Tabulka 4 Požadavky na dešťová data (13)

Doba záznamu	20 let a více
Časový krok záznamu	1 min
Hustota stanic	1/1 km ²
Časová synchronizace stanic	1 min (nebo méně)
Objemová chyba	méně než 3 %
Mezery v záznamech	žádné

Doba záznamu

Doba záznamu se nyní ohlíží na to, za jakým účelem jsou data zpracovávána. Časová řada by pak následně měla být minimálně dvojnásobná ke zkoumané četnosti efektu. To znamená, pokud je potřeba mít 10letý efekt, je nutné mít minimálně 20letou časovou řadu ke zpracování (16).

$$L \Rightarrow 2 \frac{1}{p} \quad [20]$$

kde: L délka historické dešťové série (rok),
 p požadovaná periodičita výskytu charakteristiky přetížení (-).

Časový krok záznamu

Časový krok měření by měl být co nejmenší. Pro měření srážek je nejvhodnější časový krok jedna minuta, což už udává Tabulka 4. Hodnot v těchto krocích lze dosáhnout za použití moderních přístrojů. Přístroje zaznamenávají ekvidistantní srážkové výšky a zaznamenávají měření kontinuálně (17).

Hustota stanic

Hustota stanic je dána plošným rozdělením deště nad zájmovým územím. Plošné rozdělení deště má významný vliv na povrchový odtok, naopak při výpočtu extrémních hodnot ve stokové síti nemá vliv žádný. Při volbě vzdálenosti a počtu dešťoměrných stanic pro výpočet slouží zatím pouze zkušenosti vodohospodářů (17).

Metody, kterými jsme schopni zjistit srážkovou výšku na povodí ze sítě dešťoměrných stanic, jsou (17):

- metoda aritmetického průměru,
- Thiessenova metoda,
- metoda izohyet.

Časová synchronizace stanic

Správná časová synchronizace stanic je velmi důležitá pro věrohodnost výsledků. Bohužel nejde časová synchronizace zpětně zkontrolovat, a proto se na ní musí klást velký důraz. Data jsou důležitá například při kalibraci simulačních modelů. Časové kritérium, které by neměla synchronizace překročit, je jedna minuta (16).

Objemová chyba

Objemová chyba by neměla překročit 3 %. Aby se co nejvíce zabránilo vyšším procentům objemové chyby, musí být srážkoměry před i po měření zkalibrovány (17).

Při kalibraci člunkových srážkoměrů se nejdříve provádí statická kalibrace a poté dynamická kalibrace. Statická kalibrace se skládá z nastavení překlopného člunku stavěcími šrouby tak, aby se obě sběrné nádoby při naplnění překlopily. V laboratoři je do sběrných nádob poté dávkováno množství vody a po překlopení člunku je změřen jeho objem. Tento proces se opakuje pětkrát a po skončení se vypočítá průměr objemu ze všech získaných objemů. Tento objem by pak měl být v rozmezí odchylky $\pm 6\%$ pro správné nastavení člunku. Statická kalibrace ale neposkytuje informaci o odchylkách při jednotlivých měřených vydatnostech, proto se následně musí provést dynamická kalibrace. Při této kalibraci se srážkoměr zatěžuje definovanými vydatnostmi deště po definovaný čas. Výsledkem kalibrace je kalibrační křivka

srážkoměru, která zaznamenává vydatnost deště, kterým byl srážkoměr zatížen a chybu měření srážkoměru (16).

Mezery v záznamech

Podle dešťové databanky by neměly být mezery v záznamech žádné. Toto kritérium není lehké splnit, ale pravidelnou údržbou během i mimo sezónu a opravami, lze mezery v záznamech aspoň minimalizovat (17).

PŘÍSTROJE K MĚŘENÍ SRÁŽKOVÝCH ÚHRNŮ

Ombrografy

Tento přístroj slouží k zachycení časového průběhu dešťových srážek a k určení jejich úhrnu. Srážky jsou zachycovány záchytnou plochou, odkud stékají do malé komory s plovákem, který ovládá registrační pero. Tímto perem jsou na registrační papír zaznamenávány úhrny srážek za 24 hodin. Ombrograf byl nejčastěji využíván v České republice v 90. let 20. století. Od té doby byl vynalezen modernější typ, který zaznamenává data elektronickou formou a je spolehlivější než plovákový princip (16).



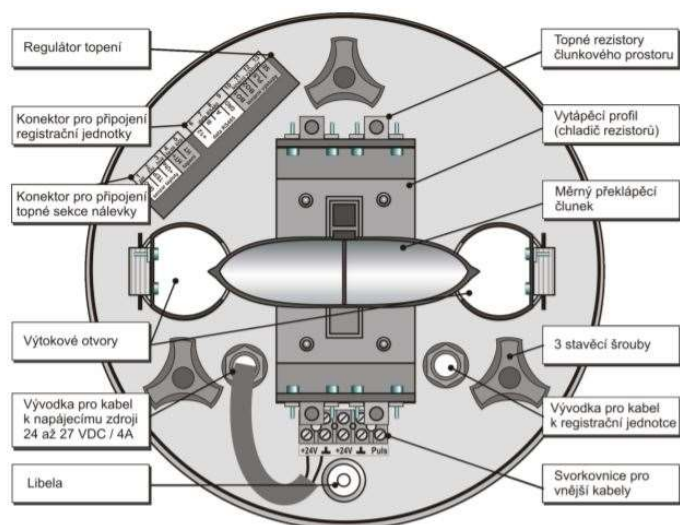
Obrázek 16 Ombrograf (32)

Překlopné člunkové srážkoměry

Člunkové srážkoměry slouží k měření množství a intenzity dešťových srážek. Jejich princip spočívá v počítání frekvence překlopení vahadla se dvěma nádobkami tzv. překlopného člunku. Nejdříve se naplní výše položená nádobka a po naplnění se překlopí a vyprázdní. Dešťovou vodu nyní zachytává druhá nádobka. Jedna nádobka zachytává určitý objem vody, který po přepočítání přes záchytnou plochu srážkoměru (200–500 cm²) udává srážkový úhrn 0,2 mm, resp. 0,1 mm. Člunkové srážkoměry mohou zachycovat i pevné skupenství srážek, ale musí být vybaveny vyhříváním na změnu skupenství z pevného na kapalné (16) (18).

Tento srážkoměr je nejvíce používán v praxi. Například se používá pro monitorování odvodnění městských povodí. Má ale nutné provozní zásady, které se musí dodržovat. Jednou ze zásad je pravidelné čištění srážkoměru. Nálevka může být znečištěna spadaným jehličím, listím apod. Dále musí být při měření pravidelně kontrolovány, jestli není nutné vyměnit baterie. V neposlední řadě musí být u srážkoměrů provedena kalibrace. Ta se provádí před umístěním od terénu i po ukončení měření a demontáží přístroje (16) (18).

Člunkový srážkoměr od společnosti *FIEDLER* viz Obrázek 17 a Obrázek 18.



Obrázek 17 Základna vytápěného srážkoměru SR03/V (18)



Obrázek 18 Člunkový srážkoměr SR03/V (18)

Váhové srážkoměry

Váhové srážkoměry měří na principu elektronických vah. Ty zaznamenávají změnu hmotnosti v nádobce a dosahují přesnosti měření úhrnu až 0,01 mm. Mezi nevýhody tohoto měření patří nejen investiční náklady, vysoká citlivost na otřesy, ale také výskyt jevů ovlivňujících samotné vážení jako například nečistoty v zachytném válci, působení větru nebo výpar (16).

Ukázka váhového srážkoměru od společnosti *METEOSERVIS v.o.s.* viz Obrázek 19.

Optické srážkoměry

Optické srážkoměry, jinak disdrometry, pracují na principu zaznamenávání laserovým paprskem tvar, velikost a rychlost vodních částic větších než 0,16 mm. Je schopen změřit vydatnost deště v rozsahu 0,1 až 700 l/s/ha. Výhodou disdrometru je schopnost rozlišit, zda se jedná o mrholení, déšť, sníh apod. Naopak nevýhodou tohoto měření jsou například problémy s hmyzem, který může proletět skrz laser nebo s prachem (16).

Ukázka optického srážkoměru od společnosti *FIEDLER* viz Obrázek 20.



Obrázek 19 Váhový srážkoměr (33)



Obrázek 20 Optický srážkoměr RG-11 (34)

Akustické srážkoměry

Princip tohoto typu měření srážek je založen na „bubnování“ dešťových kapek na membránu nebo vodní hladinu. Pod membránou je umístěn mikrofon a z naměřené intenzity hluku lze získat intenzitu a správnou integrací i úhrn srážek. Tato metoda je velmi citlivá na okolní hluk, a proto i nevhodná pro účely městského odvodnění (16).

Meteorologické radary

Meteorologické radary vysílají do atmosféry krátké elektromagnetické vlny ve formě úzkého svazku a využijí schopnost odrazu radiové vlny od srážkových částic (vodních kapek, sněhových vloček apod.) V atmosféře dojde k odrazu energie, která je následně přijata anténou a zpracována radarem (16) (19).

Radary poskytují tyto informace (16):

- odhad velikosti srážek,
- rychlost postupu srážek,
- směr postupu srážek,
- plošné rozložení srážek.



Obrázek 21
Meteorologický radar
v Brdech (19)

V České republice provozuje Český hydrometeorologický ústav dva meteorologické radary. Jeden je instalován na stanovišti Skalka u Protivanova a druhý na vrchu Praha v Brdech (Obrázek 21). Radary slouží k detekci výrazné srážkové oblačnosti do cca 250 km od radarů a pro odhad okamžitých intenzit srážek do cca 150 km od radarů. Měření probíhá z cca 15-20 otáček antény v azimutu s proměnným výškovým úhlem a jsou opakována každých 5-15 minut (16) (19).

Mikrovlnné spoje

Mikrovlnné spoje z telekomunikačních sítí se stávají novou metodou pro získání kvantitativní informace o plošné srážkové události. Metoda využívá propojení telekomunikační sítě o dané vlnové délce, kdy při srážkové události dochází k útlumu signálu díky dešťovým kapkám. Tato metoda má do budoucna velký potenciál k získání přesnějších informací o odtoku z intravilánu díky velmi dobrému zachycování prostorově-časového rozložení srážek (20).

2.4.2 Měření průtokových charakteristik

Monitoring v městském odvodnění obnáší i měření průtokových charakteristik ve stokové síti. Měření lze rozdělit na přímé metody zaměřené na objem proteklé vody a nepřímé metody, které jsou zaměřené na měření hladiny a rychlost proudění. Hodnoty veličin se zaznamenávají a následně lze dopočítat průtok ve stokové síti (21).

V přímé metodě se měří objemové množství proteklé vody za vymezený časový interval. Pomocí měřicí nádoby (např. kbelíku) a stopek se získají veličiny, které se použijí v rovnici [21] pro výpočet průtoku. Při měření malého množství je metoda velmi přesná (21).

$$Q = \frac{V}{t} \quad [21]$$

kde: Q průtok (m^3/s),
 V objem proteklé vody (m^3),
 t čas (s).

V nepřímých metodách se využívá rovnice kontinuity [22]. Měří se pouze výška hladiny nebo výška hladiny a rychlost proudění.

Rovnice kontinuity:

$$Q = v * S \quad [22]$$

kde: v rychlost proudění (m/s),
 S plocha průtočného profilu (m^2).

Při měření pouze veličiny výšky hladiny v potrubí se musí rychlost proudění dopočítat. Přes známou geometrii potrubí se získá plocha průtočného potrubí a omočený obvod. Po dosazení do rovnice [23] lze spočítat hydraulický poloměr. Následně se určí Manningova drsnost a dopočítá se dle rovnice [24] Manningův rychlostní součinitel. Rovnice [25] je výsledná rovnice pro získání rychlosti proudění ve stokové síti.

$$R = \frac{S}{O} \quad [23]$$

kde: R hydraulický poloměr (m),
 S plocha průtočného profilu (m²),
 O omočený obvod (m).

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad [24]$$

kde: C Manningův rychlostní součinitel (m^{0,5}/s),
 n Manningova drsnost (-),
 R hydraulický poloměr (m).

$$v = C\sqrt{Ri} \quad [25]$$

kde: v rychlost proudění (m/s),
 C Manningův rychlostní součinitel (m^{0,5}/s),
 R hydraulický poloměr (m),
 i sklon (-).

Při měření obou veličin se pouze dopočítá průtočná plocha a dosadí do rovnice kontinuity [22].

TYPY MĚŘENÍ

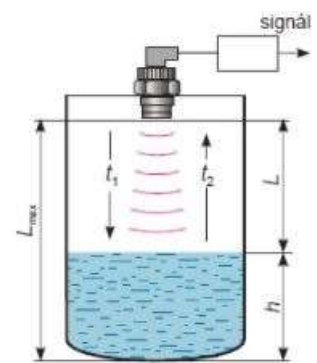
Kontinuální měření hladiny

Mezi způsoby stálého měření hladiny patří měření pomocí (17):

- skládacího nebo výsuvného metru,
- vodočetné latě,
- ultrazvukového snímače,
- laserového snímače ad.

Ultrazvuková metoda

Ultrazvukovou metodou lze měřit úroveň hladiny na principu vysílání ultrazvukových pulzů z vysílače k hladině. Od hladiny se pulzy odraží zpět a jsou přístrojem opět zachycovány. Měří se doba průchodu vlny a při známé hodnotě rychlosti šíření ultrazvuku v daném prostředí lze vypočítat výška hladiny. Schéma ultrazvukového hladinoměru viz Obrázek 22 (21) (22).



Obrázek 22 Schéma ultrazvukového hladinoměru, upraveno z (22)

Rovnice pro výpočet úrovně hladiny (22):

$$L = c \frac{t_1 + t_2}{2} \quad [26]$$

$$h = L_{max} - c \frac{t_1 + t_2}{2} \quad [27]$$

kde: L vzdálenost hladiny od přístroje (m),
 t_1, t_2 naměřený čas (s),
 c rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí (m/s),
 L_{max} vzdálenost přístroje od dna nádrže (m),
 h výška hladiny (m).

Kontinuální měření rychlosti

Mezi způsoby měření rychlosti patří měření pomocí (17):

- hydrometrických vrtul,
- ultrazvuku na principu Dopplerova efektu,
- magneticko-indukčního principu.

Ultrazvuková metoda – Dopplerův efekt

Ultrazvukovou metodou lze také měřit rychlost proudění a to na principu Dopplerova efektu. Z vysílače jsou vysílány ultrazvukové vlny o definovaném kmitočtu, které se následně odrážejí od částičky nebo bublinky vyskytující se v proudícím médiu a jsou přijímány zpět do přijímače. Ultrazvukové vlny se k přijímači odrazí s posunutou frekvencí. Rychlost pohybu je pak přímo úměrná rozdílu vysílané a přijímané frekvence. Tato metoda je jednou z nejpoužívanějších metod měření rychlosti proudění (21).

Magneticko-indukční princip

Měření touto metodou spočívá ve vytvoření homogenního magnetického pole kolem potrubí, kterým protéká elektricky vodivá tekutina, která následně indukuje napětí. Napětí je měřeno na elektrodách a je přímo úměrné střední průtokové rychlosti (21).

Stopovače

Metoda stopovače neboli stopovací látky spočívá v tom, že do vodního proudu je v určitém místě dávkována a následně v jiném místě sledována koncentrace zvolené stopovací látky. Tato metoda se hlavně používá ke kalibraci měřících přístrojů. (21). Vhodný stopovač by měl splňovat následující body (23):

- snadné stanovení výskytu ve vodě,
- není nebezpečný pro člověka, faunu i floru,

- je rozpustný ve vodě,
- je chemicky stabilní, chemicky nereaguje s ostatními látkami,
- je možné ho analyzovat i při nízké koncentraci,
- při měření nepřímou metodou musí být vztah mezi koncentrací a měřenou veličinou správně definovaný.

Ve stokových sítích se nejběžněji jako stopovač používá kuchyňská sůl NaCl. Dále se využívají barviva jako metylmodř nebo fluorescein, selektivní ionty jako je lithium nebo bromid a také teplo. Měření lze provádět ve dvou variantách, metodou integrální nebo metodou kontinuálního dávkování stopovače (21).

Integrální metoda

Při této metodě se stopovací látka nejprve dobře smísí v nádobě s vodou a změří se její koncentrace, tzv. pozadřová koncentrace. Následně je celý obsah nádoby vylit do vodního proudu. V druhém místě směrem po toku je pak měřen časový průběh koncentrace odezvy stopovače. Měření probíhá po celou dobu, co je koncentrace větší než pozadřová. Hodnota průtoku poté vychází ze zákona zachování hmotnosti, to znamená, že hmotnost stopovače musí být shodná v obou místech (21).

$$Q = \frac{m_A}{\int_{t_1}^{t_2} (c_t - c_p) dt} \quad [28]$$

kde: m_A hmotnost stopovače vlitá do vodního proudu (mg),
 c_t měřené koncentrace stopovače v druhém místě v čase t (mg/l),
 c_p pozadřová koncentrace (mg/l),
 t_1, t_2 čas začátku (konce) odezvy stopovače (s).

Kontinuální dávkování stopovače

Metoda kontinuálního dávkování stopovače obnáší dávkování konstantního průtoku roztoku se známou koncentrací stopovače do vodního proudu. V druhém místě, které je v dostatečné vzdálenosti po toku, aby se stopovač mohl smísit, se měří koncentrace stopovače. Měří se do doby, dokud se měřená koncentrace stopovače neustálí (21).

$$Q = Q_d \frac{c_d - c_m}{c_m - c_p} \quad [29]$$

kde: Q_d průtok dávkovaného roztoku stopovače do vodního proudu (l/s),
 c_d koncentrace stopovače v místě dávkování (mg/l),
 c_m ustálená koncentrace v měřeném místě (mg/l),
 c_p pozadřová koncentrace stopovače ve vodě (mg/l).

Metody využívající Q-H charakteristiku vzdouvacího objektu

Měrné přelivy

Měrné přelivy se instalují do kanálu kolmo na směr proudění. Jedná se tedy o příčné malé stavby, které hydraulicky nadefinují přechod z říčního proudění na bystřinné. Stavby mají jednoduchý tvar a vysokou přesnost měření. Mezi nevýhody měrných přelivů patří vysoký hydraulický spád nebo možnost podtékání a zanášení žlabů (21) (24).

Měrné přelivy lze rozdělit na (24):

- ostrohranné přelivy,
 - trojúhelníkový přeliv,
 - obdélníkový přeliv,
 - lichoběžníkový přeliv,
- přelivy s krátkou nebo širokou korunou.

Měrné žlaby

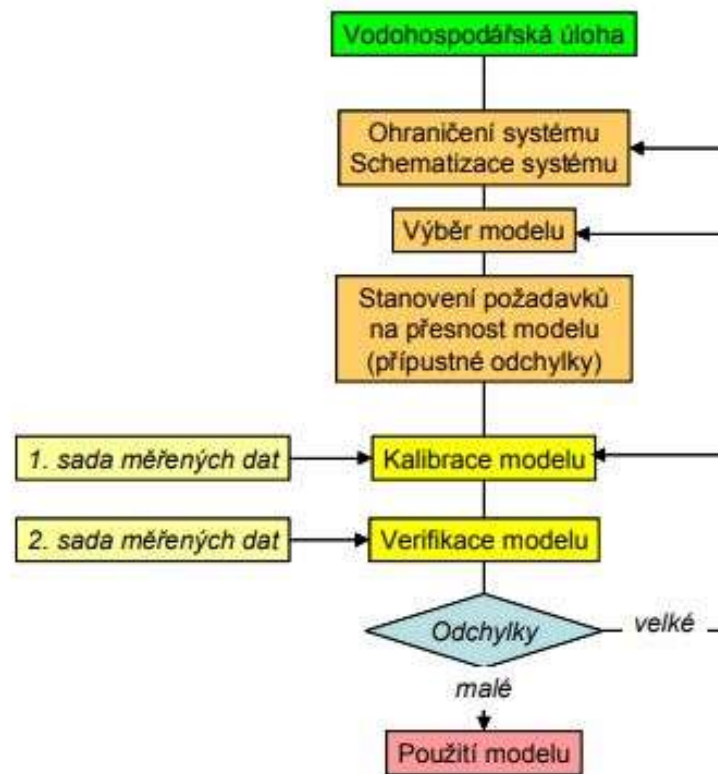
Měrné žlaby jsou stavby na kanalizaci, které zužují průtočný profil. Proudění se v tomto místě hydraulicky nadefinuje jako změna z říčního na bystřinné proudění. Instalace do kanalizace je s malými stavebními úpravami a kontrola přesnosti měření je jednoduchá. Mezi nejrozšířenější žlaby patří Parshallovy a Venturiho žlaby (24).



Obrázek 23 Parshallův žlab (35)

2.5 MODELOVÁNÍ V MĚSTSKÉM ODVODNĚNÍ

Modelováním se rozumí proces, který vodohospodářské úloze nebo jakémukoliv jinému reálnému systému, přiřadí jiný systém, tzv. model. Tento model může sloužit například k posouzení chování stokového systému. V první řadě je nutné vodohospodářskou úlohu jak časově, tak prostorově ohraničit a schematizovat. Tímto se získají veličiny, které je nutné stanovit pro další postup modelování. Další krokem je výběr modelu a jeho tvorba. Druhy srážko-odtokových modelů jsou detailněji popsány v kapitole 2.3.2. Model je následně nutný zkalibrovat a verifikovat, viz kapitola 2.5.2. Pokud tyto dvě akce nejsou úspěšné, je nutné získat více informací, anebo použít jiný model (1) (25).



Obrázek 24 Schéma postupu při matematickém modelování (25)

2.5.1 Potřebná data ke stavbě modelu

Druhy dat potřebných k matematické simulaci v městském odvodnění jsou (25):

- **vstupní data,**
 - meteorologická data (dešťová data, teploty, měsíční hodnoty výparu ad.),
 - bezdeštné průtoky,
 - významné přítoky průmyslových odpadních vod,
- **systémová data,**
 - data k popisu odvodňovaného systému (plocha povodí, počet trvale žijících obyvatel, nepropustné, polopropustné a propustné plochy atd.)
- **hodnoty modelových konstant a parametrů,**
 - konstanty a parametry, které se vyskytují v řídicích rovnicích procesů matematických modelů,
- **data pro kalibraci a verifikaci modelů,**
 - měřená data v odvodňovaném systému (bezdeštné průtoky, výšky vodní hladiny ad).

2.5.2 Kalibrace a verifikace modelu

Kalibrace modelu

Kalibrace simulačního modelu slouží k úpravě vybraných parametrů modelu tak, aby výsledky simulace co nejvíce odpovídaly naměřeným datům. Proto kalibrace probíhá tak dlouho, dokud není dosažena nejmenší, a hlavně uspokojivá, odchylka. Kalibrované parametry jsou většinou hodnoty, které nelze přesně v povodí nadefinovat (25).

Verifikace modelu

Verifikace simulačního modelu spočívá opět v porovnání výsledků simulace a naměřených hodnot, ale tentokrát s kalibrovanými parametry a v jiném časovém období než při kalibraci. Až výsledek verifikace ukáže, zda je model vhodný k použití (25).

Objektivní funkce

Při kalibraci a verifikaci se porovnávají odchylky mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami. Odchylky, které se zpravidla porovnávají jsou (25):

- objem proteklé vody,
- maximální průtok Q_{\max} ,
- časový posun výskytu maximálního průtoku ΔT_{\max} ,
- Nash-Sutcliffe koeficient účinnosti modelu.

Kalibraci, ev. verifikaci, lze považovat za splněnou, pokud odchylka objemu proteklé vody a maximálního průtoku je menší než 10 %. Zároveň musí být odchylka časového posunu výskytu průtoku menší než 5 minut a koeficient účinnosti větší než 0,8 (1) (25).

2.5.3 Použití modelu

Při posouzení chování stokového systému je možné zvolit typ srážkových dat, kterým se model zatíží. Jednou z možností jsou *syntetické deště*, které jsou uměle vytvořené z čar náhradních vydatností. Při konstruování deště je snaha o co nejtypičtější průběh deště zachováním celkového úhrnu i periodicity. Typickým příkladem je Šifaldův syntetický déšť. Tento typ deště není vhodný pro posouzení dlouhodobé funkce systému. Dalším typem je *reálný déšť*. Tento typ představuje změřenou a časově ohraničenou srážkovou událost, která v modelu vytvoří reálný výsledek daného deště. Tento typ opět není vhodný k posouzení dlouhodobé funkce systému, ale je to jediný možný typ ke kalibraci a verifikaci modelu. Nejvhodnější data k posouzení dlouhodobé funkce systému jsou *historická srážková data*. Jedná se o reálně zaznamenaná data všech srážek, které se vyskytly na daném území. Pomocí těchto dat lze v modelu i statisticky vyhodnotit efekty v síti (četnost výskytu hladin, průtoků, rychlostí) (16).

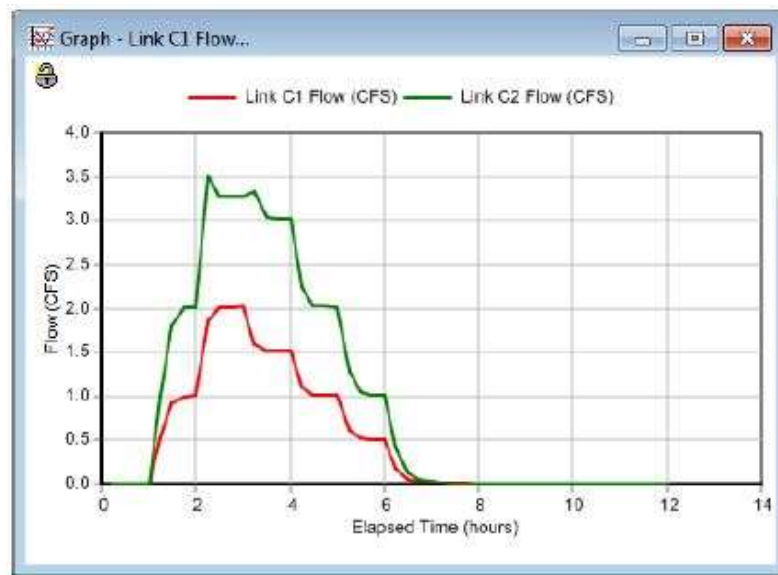
2.6 STORM WATER MANAGEMENT MODEL

Storm Water Management Model (dále SWMM) byl vyvinut agenturou *Environmental Protection Agency (EPA)* zabývající se ochranou životního prostředí. Od první verze modelu roku 1971 existuje už pátá verze a obsahuje i mnohá rozšíření. Jedná se tedy o dynamický model, který nasimuluje srážko-odtokový proces, a to převážně v městských oblastech. SWMM dokáže namodelovat tvorbu odtoku v zájmové oblasti, koncentraci odtoku, transport odpadní vody a také množství znečišťujících látek v odtoku (26). Z tohoto důvodu patří mezi nejčastější aplikace modelu (26):

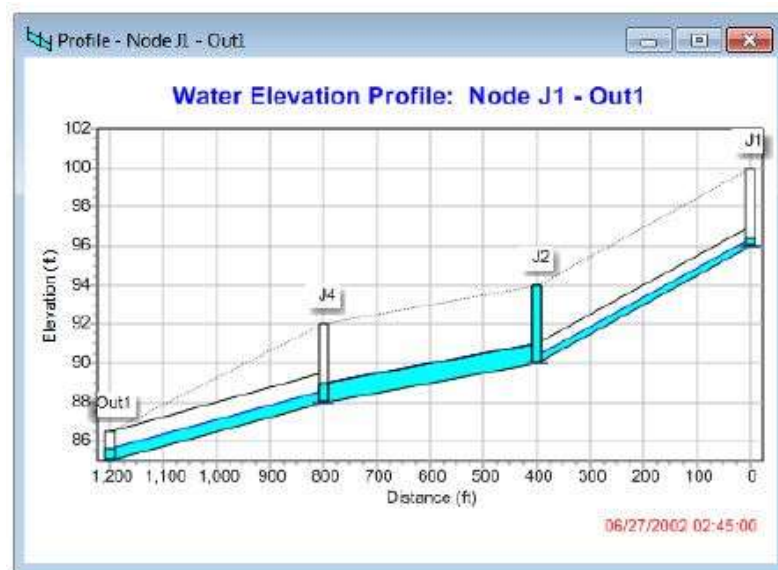
- návrh a dimenzování prvků systému,
- dimenzování záchytných zařízení,
- navrhování strategie na minimalizování množství odpadní vody na případech,
- posuzování navrhovaných opatření,
- ad.

V prvním kroku modelování srážko-odtokových procesů v modelu, tedy při tvorbě povrchového odtoku, se nadefinují hydrologické procesy. Například počáteční ztráty se zadávají nadefinováním retenční kapacity povodí (*Dstore-Imperv*) a podílem ploch bez retence (*%Zero-Imperv*). K získání dalších hodnot ztrát je nutné také zadat procento nepropustných ploch (*%Imperv*). Infiltraci program počítá Hortonovou metodou (rovnice [1]), Green-Amptovou metodou, anebo jejich modifikací. Při modelování koncentrace povrchového odtoku SWMM každé povodí uvažuje jako nelineární rezervoár (viz kapitola 2.3.2). Poslední část modelování je transport odpadní vody. Pro proudění ve stokové síti model používá Saint - Venantovy pohybové rovnice (viz kapitola 2.3.3). Konkrétně využívá nestacionární proudění v potrubí a model dynamické vlny (viz rovnice[11]) (26).

Výsledky simulace lze prohlížet pomocí grafů, tabulek, ale i mapou celého povodí.



Obrázek 25 Ilustrativní graf průtoků (26)



Obrázek 26 Ilustrativní podélný profil (26)

3 CÍLE

Cílem závěrečné práce je posoudit srážko-odtokové procesy v obci Luštěnice a její sídlištní části Zelená nedaleko města Mladá Boleslav. Dílčí cíle jsou:

- seznámení se zájmovým územím,
- popsání monitorovací kampaně,
- zpracování dat získaných během měření,
- stavba modelu zájmového území v programu SWMM,
- kalibrace a verifikace modelu,
- výpočet objemu srážkové vody v kanalizaci a posouzení stupně odvádění srážkových vod na ČOV,
- posouzení přečerpávání odpadních vod do jiné lokality.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část této závěrečné práce se zabývá posouzením srážko-odtokových vztahů stokového systému obce Luštěnice. Práce vznikla z důvodu plánovaného přepojení stávající ČOV v sídlištní části Zelná na ČOV ve městě Mladá Boleslav.

4.1 METODICKÝ POSTUP

4.1.1 Zájmové území

Seznámení se zájmovým územím proběhlo jednak formou nastudováním leteckých snímků oblasti, tak i osobní návštěvou lokality při instalování měřících přístrojů. Detailnější informace o obci byly získány na stránkách spravované obcí a informace o odkanalizování obce z kanalizačního řádu.

4.1.2 Monitorovací kampaň

Monitoring probíhal od 2.7.2021 do 28.9.2021. Na měření srážkových událostí byl instalován srážkoměr typu SR03 se zachytnou plochou 500 cm². Srážkoměr byl instalován do okolí ČOV v Zelené. Pro měření úrovně hladiny byly osazeny, pro přesnější měření, dva ultrazvukové hladinoměry US1200 do nátokového žlabu na ČOV. Oba byly umístěné za česlemi ve žlabu pouze s jinou vzdáleností od česlí. Během monitorovací kampaně probíhala každé dva týdny kontrola přístrojů.

4.1.3 Zpracování dat z měření

Zpracování srážkových událostí

Při zpracování dat ze srážkoměru se hledaly takové srážkové události, které během měřeného období měly úhrn nad 4 mm. Tyto deště jsou důležité tím, že způsobují významný odtok z povodí. Bylo vyhodnoceno, kdy nastaly a jak dlouho trvaly, jakou měly maximální a průměrnou intenzitu a v neposlední řadě jaký byl celkový úhrn deště. Kromě jednotlivých dešťů se z hodnot získala informace o celkovém úhrn za měřené období a jednotlivé denní úhrny.

Zpracování bezdeštných průtoků

Průtoky, které přitékaly na ČOV, byly vypočteny z dat získaných měřením ultrazvukovými hladinoměry pomocí Manningovy rovnice (27). Z těchto dat jsou následně zjištěny průtoky během vybraných bezdeštných dnů.

Zjištění bezdeštného průtoku během měření je důležité pro namodelování území v programu. Z měřeného období byl zvolen bezdeštný týden, konkrétně od 4. 9. 2021 do 10. 9. 2021. Během tohoto týdne se vypočítal denní průměrný průtok ve všední

den a víkendový den. Z těchto dvou hodnot byl dopočítán váženým průměrem (rovnice [30]) průměrný průtok za den $Q_{24,prům}$. Z důvodu přítoku odpadní vody z obou částí obce, byl průtok rozdělen dle počtu obyvatel a v modelu přiřazen k dané části obce. Následně byl vypočten koeficient pro každou hodinu všedního i víkendového dne podle rovnic [31] a [32] a koeficienty zadány do *Time Patterns*. Pro lepší výsledky z modelu byly stejným způsobem vypočteny i měsíční koeficienty pro měsíc červenec, srpen a září.

$$Q_{24,prům} = \frac{5 * Q_{24,všed} + 2 * Q_{24,vík}}{7} \quad [30]$$

$$k_{všed} = \frac{Q_{h,všed}}{Q_{24,prům}} \quad [31]$$

$$k_{vík} = \frac{Q_{h,vík}}{Q_{24,prům}} \quad [32]$$

kde: $Q_{24,prům}$ průměrný průtok za den (l/s),
 $Q_{24,všed}$ průměrný průtok ve všední den (l/s),
 $Q_{24,vík}$ průměrný průtok o víkendu (l/s),
 $k_{všed}$ koeficient pro všední den (-),
 $k_{vík}$ koeficient pro víkendový den (-).

$$k_{mēs,1} = \frac{Q_{mēs,1}}{Q_{mēs,prům}} \quad [33]$$

kde: $Q_{mēs,1}$ průtok za daný měsíc (l/s),
 $Q_{mēs,prům}$ průměrný průtok za 3 měsíce (l/s),
 $k_{mēs,1}$ koeficient pro daný měsíc (-).

4.1.4 Tvorba modelu

Pro získání informací o srážko-odtokových procesech v obci, byl v programu SWMM vytvořen model. Postup tvorby modelu byl následující:

- 1) nahrání podkladové mapy na správná souřadnice,
- 2) vytvoření povodí a zadání důležitých prvků do modelu,
 - zadávaly se šachty, potrubí, čerpací stanice, čerpadla, srážkoměr, přepad na ČSOV1 a měrný žlab,
- 3) nadefinování zadaných prvků,
 - definovaly se důležité parametry každého prvku modelu,
- 4) nahrání naměřených dat do modelu,
 - připojovaly se hodnoty ze srážkoměru v textovém formátu,
- 5) spuštění výpočtu modelu.

4.1.5 Kalibrace a verifikace modelu

Při kalibraci bylo hlavním cílem dosáhnout takového průtoku ve žlabu před nátokem na ČOV, který by se co nejvíce podobal průtoku naměřenému. Zaměřilo se na četnost čerpání a proteklý objem odpadní vody žlabem. V modelu byly měněny hlavně takové parametry, které jsou těžko stanovitelné. Jednalo se o parametr procenta nepropustných ploch, šířky a sklonu povodí a parametr pro kapacitu povrchové retence.

Verifikace modelu by měla ověřit správnost kalibrovaného modelu. Byly vybrány jiné dešťové události než pro kalibraci a posouzeny na objem proteklé odpadní vody žlabem.

Pro úspěšnou kalibraci a verifikaci modelu musela být odchylka menší než 10 %.

4.1.6 Výpočet objemu srážkové vody

Dle normy ČSN 75 6262 je minimální hodnota odváděného množství srážkové vody na ČOV z povodí jednotnou kanalizací 55 % (28). Úkolem závěrečné práce proto bylo odhadnout, jak velké množství srážek se dostane do kanalizace a kolik z toho doteče na ČOV v našem zájmovém území a zda hodnota splňuje kritérium.

Z nedalekého srážkoměru byly použity hodnoty po dobu 10 let a nahrány do zkalibrovaného modelu. Po proběhnutí výpočtu se z modelu získal objem celkového odtoku na ČOV (V_{odtok}), objem dešťového odtoku z povodí Luštěnice ($V_{odtok,L}$) a z povodí Zelená ($V_{odtok,Z}$). Pro získání objemu srážkové vody, která odtéká modelem ($V_{dest,model}$) bylo nutné dále zjistit objem splaškové vody (V_{splas}). Tato hodnota byla vypočtena z Q_{24} s přihlédnutím k přestupným dnům a přesnému času simulace. Následně se dosadilo do rovnice:

$$V_{dest,model} = V_{odtok} - V_{splas} \quad [34]$$

Dalším krokem, k získání procenta srážkové vody doteklé na ČOV, bylo nutné zjistit celkový objem srážkových vod (V_{cel}). Při výpočtu se bralo v úvahu, že v části Zelená je navržena pouze splašková kanalizace, a proto nebyl počítán žádný objem odtoku srážkové vody. V rovnicích je ale pro přehlednost uveden. Pro povodí Luštěnice se naopak do výpočtu zahrnuje procento nepropustných ploch, které bylo zjištěno vzorovým hektarem. Rovnice pro výpočet objemu srážkové vody z Luštěnic:

$$V_L = \frac{V_{odtok,L}}{NP_{model,L}} * NP_L * TZ \quad [35]$$

kde: V_L objem srážkové vody z Luštěnic (m^3),
 $V_{odtok,L}$ objem odtoku srážkové vody z Luštěnic v modelu (m^3),
 $NP_{model,L}$ procento nepropust. ploch v Luštěnicích v kalibrovaném modelu (%),
 NP_L procento nepropust. ploch v Luštěnicích vzorovým hektarem (%),
 TZ trvalé ztráty (%).

$$V_{cel} = V_L + V_Z \quad [36]$$

kde: V_L objem srážkové vody z Luštěnic (m³),
 V_Z objem srážkové vody ze Zelené (m³)
 V_{cel} celkový objem srážkové vody (m³).

Rovnice pro získání procenta odtoku srážkové vody na ČOV:

$$k = \frac{V_{model} - V_{odtok,Z}}{V_{cel}} * 100 \quad [37]$$

4.1.7 Posouzení přečerpávání vod

Z důvodu plánovaného přepojení ČOV v Zelené je nutné posoudit přečerpávané množství odpadních vod ze zájmového území a to hlavně srážkových vod, které se dostanou do kanalizace a následně až na ČOV.

Pro výpočet bylo nutné upravit vytvořený model. Čerpání z části Luštěnice bylo zaústěno do čerpací stanice v Zelené, odkud se už přečerpávaly veškeré odpadní vody do jiné lokality. Do čerpací stanice byl přidán z důvodu připojení velkého množství vod bezpečnostní případ. Následoval shodný výpočet objemu odtoku srážkových vod jako za současné situace. Pouze objem srážkové vody, která protéká modelem, byl ponížěn o přepadlé množství na přidaném bezpečnostním případě.

4.2 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

4.2.1 Informace o obci

Obec Luštěnice se nachází ve Středočeském kraji v okrese Mladá Boleslav. Od Mladé Boleslavi je vzdálená jižně cca 15 km. Součástí obce jsou další dvě části, Zelená a Voděrady. K roku 2021 má obec 2 235 obyvatel (29). Z občanské vybavenosti se v obci nachází například škola, obecní úřad, dětská ordinace nebo penzion-domov důchodců. V obci se dále nachází budovy Zemědělského družstva Luštěnice, ROLLYX s.r.o. či podnik AGRO (30) (31).

Obcí neprotéká žádná velká řeka, ale východně od obce protéká významný vodní tok Vlkava (1-04-07-016), který je ve správě Povodí Labe, s. p. – Hradec Králové. Do Vlkavy se vlévá Stružský potok, který pramení pod obecní částí Zelená a jeho správcem jsou Lesy České republiky, s. p. – Lesní správa Nymburk (31).



Obrázek 27 Umístění obce na mapě ČR (37)



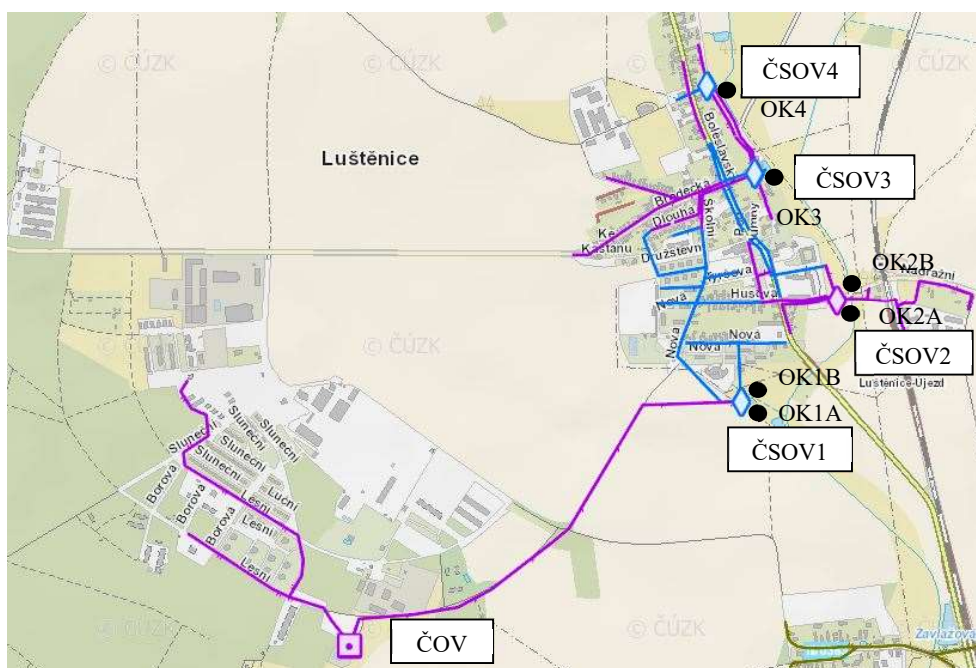
Obrázek 28 Obec Luštěnice (37)

4.2.2 Odkanalizování obce

V obci Luštěnice je vybudovaná jednotná kanalizace, která slouží k odvádění dešťových i splaškových odpadních vod. Kanalizace je převážně gravitační. Na stoce se vyskytují 4 úseky s výtlačným potrubím, kde každý úsek začíná na vybudované čerpací stanici odpadních vod (dále ČSOV). Na stoce se dále vyskytuje šest odlehčovacích komor (dále OK). Rozmístění objektů na stoce demonstruje Obrázek 29. ČSOV1 byla dříve čistírna odpadních vod pro část Luštěnice, po rekonstrukci se stala hlavní přečerpávací stanicí, která dopravuje odpadní vody z Luštěnic na ČOV v části obce Zelená (31).

V části Zelená je vybudovaná gravitační splašková kanalizace. Veškeré odpadní vody jsou dopravovány na ČOV v části Zelená, viz Obrázek 29. Z ČOV jsou vyčištěné odpadní vody vypouštěné do Stružského potoka. Část Voděrady není odkanalizována (31).

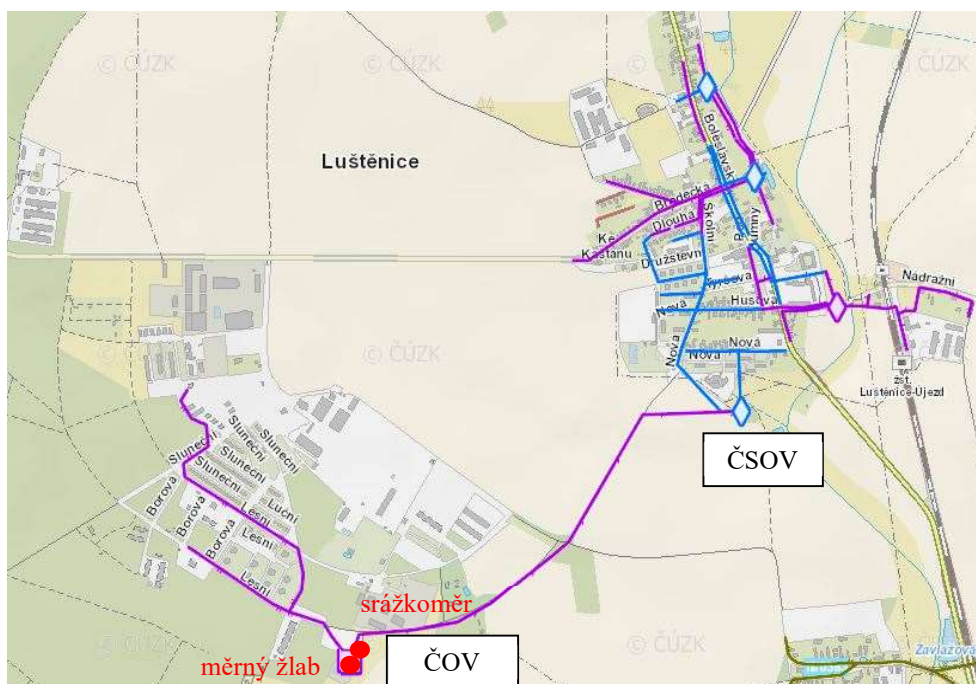
Správcem kanalizace jsou *Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a.s.*



Obrázek 29 Stoková síť v obci, upraveno z (36) (31)

4.3 MONITOROVACÍ KAMPAŇ

Měření v obci probíhalo převážně během léta roku 2021. Konkrétně se uskutečnilo od 2.7.2021 do 28.9.2021. Hlavním cílem monitoringu bylo získat data a informace ze srážkových událostí a také množství doteklé vody na ČOV. Umístění měřících přístrojů je vyznačeno, viz Obrázek 30 a jejich charakteristika se nachází v Příloze 0 (27).

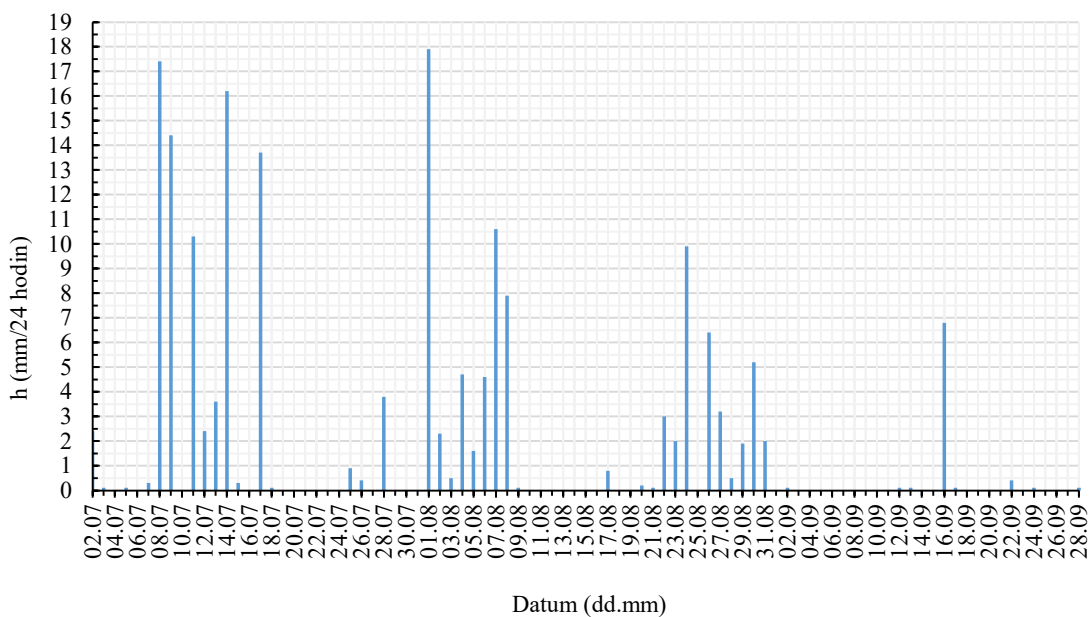


Obrázek 30 Umístění měřících přístrojů, upraveno z (36)

4.4 ZPRACOVÁNÍ DAT

Zpracování srážkových událostí

Z hodnot ze srážkoměru byl zjištěn celkový úhrn za měřené období 179,6 mm a úhrny za jednotlivé dny. Denní úhrny jsou vyznačeny na grafu níže, viz Obrázek 31. Dešťových událostí s úhrnem nad 4 mm bylo zjištěno celkem 12. Deště odpovídají letním přeháňkám a oproti minulým sušším letům přšlo více. Seznam událostí jednotlivých dešťů demonstruje Tabulka 5, kde je ke každému dešti přiřazena jeho délka trvání, celkový úhrn, maximální intenzita a průměrná intenzita. Z dešťů byly následně vybrány tři různé typy dešťové události pro kalibraci modelu a dva další pro verifikaci modelu, podrobněji dále viz kapitola 4.6.



Obrázek 31 Graf s denními srážkovými úhrny

Tabulka 5 Významné dešťové události za měřené období

	Začátek deště	Konec deště	Doba trvání	Úhrn h_c (mm)	Max. intenzita r_{max} (l/s/ha)	Průměrná intenzita $r_{prům}$ (l/s/ha)
			h:mm			
1	08.07.2021 18:01	08.07.2021 23:23	5:22	17.3	150.0	9.0
2	09.07.2021 2:23	09.07.2021 5:46	3:23	14.4	216.7	11.8
3	11.07.2021 21:01	12.07.2021 3:24	6:23	12.7	33.3	5.5
4	14.07.2021 20:46	14.07.2021 21:24	0:38	12.6	216.7	55.3
5	17.07.2021 13:14	17.07.2021 15:17	2:03	13.3	350.0	18.0
6	01.08.2021 6:18	01.08.2021 13:44	7:26	17.9	50.0	6.7
7	07.08.2021 22:16	08.08.2021 1:30	3:14	14.1	83.3	12.1
8	08.08.2021 21:17	08.08.2021 22:18	1:01	4.3	150.0	11.7
9	22.08.2021 19:14	24.08.2021 8:51	13:37	14.5	83.3	1.1
10	26.08.2021 4:14	26.08.2021 8:23	4:09	5.5	33.3	3.7
11	30.08.2021 4:24	30.08.2021 13:33	0:17	4.0	133.3	39.2
12	16.09.2021 16:45	16.09.2021 20:43	3:58	6.8	50.0	4.8

Zpracování bezdeštných průtoků

Pro získání bezdeštného průtoky byl vybrán týden od 4.9.2021 do 10.9.2021. V tomto týdnu byly vyhodnoceny průměrné hodinové průtoky a průměrný průtok za týden. Průběžné hodnoty výsledků se nachází v Příloze B. Dále byl zjištěn průměrný průtok ze tří měsíců, tedy července, srpna a září, pro získání koeficientu do modelu.

Tabulka 6 Průměrné průtoky Q_{24}

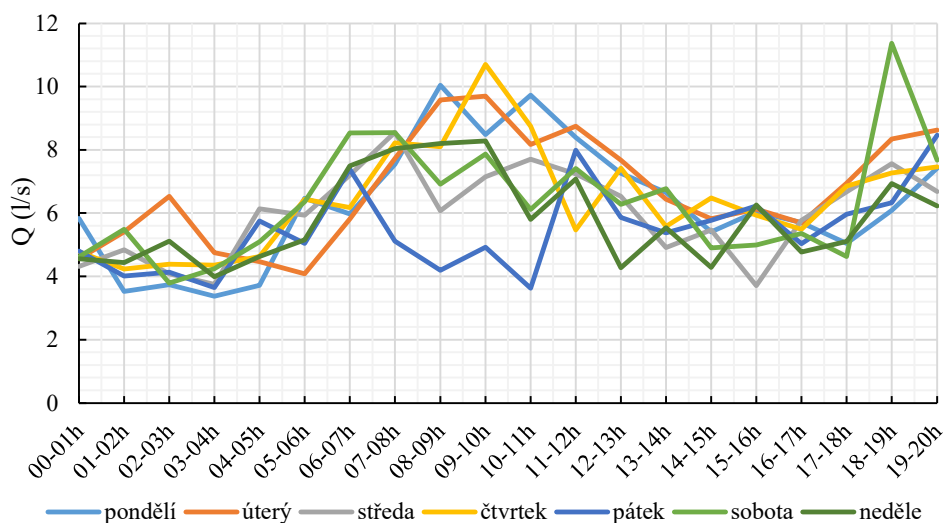
$Q_{24,všed}$	6.21	l/s
$Q_{24,vík}$	5.98	l/s
$Q_{24,prům}$	6.14	l/s

Tabulka 7 Průměrný průtok Q_{24} za měsíc

$Q_{més,1}$	9.03	l/s
$Q_{més,2}$	7.88	l/s
$Q_{més,3}$	5.93	l/s
$Q_{més,prům}$	7.61	l/s

Tabulka 8 Koeficienty všedních a víkendových dní a měsíců

	<i>všední dny</i>	<i>víkend</i>	<i>měsíc</i>	
00-01h	0.79	0.75	leden	1.00
01-02h	0.72	0.81	únor	1.00
02-03h	0.74	0.72	březen	1.00
03-04h	0.65	0.67	duben	1.00
04-05h	0.80	0.79	květen	1.00
05-06h	0.91	0.94	červen	1.00
06-07h	1.06	1.30	červenec	1.18
07-08h	1.21	1.35	srpen	1.03
08-09h	1.24	1.23	září	0.82
09-10h	1.33	1.31	říjen	1.00
10-11h	1.24	0.97	listopad	1.00
11-12h	1.23	1.18	prosinec	1.00
12-13h	1.13	0.86		
13-14h	0.94	1.00		
14-15h	0.94	0.75		
15-16h	0.91	0.91		
16-17h	0.90	0.82		
17-18h	1.02	0.79		
18-19h	1.16	1.49		
19-20h	1.26	1.13		
20-21h	1.19	0.97		
21-22h	1.07	0.90		
22-23h	0.96	0.99		
23-00h	0.86	0.70		



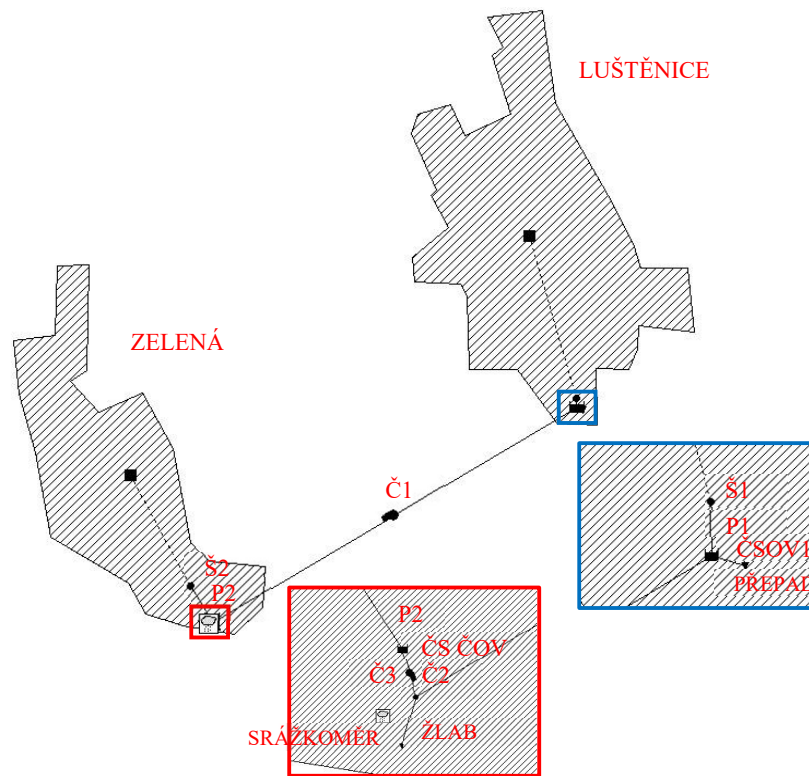
Obrázek 32 Graf průtoků bezdeštný týden

4.5 TVORBA MODELU

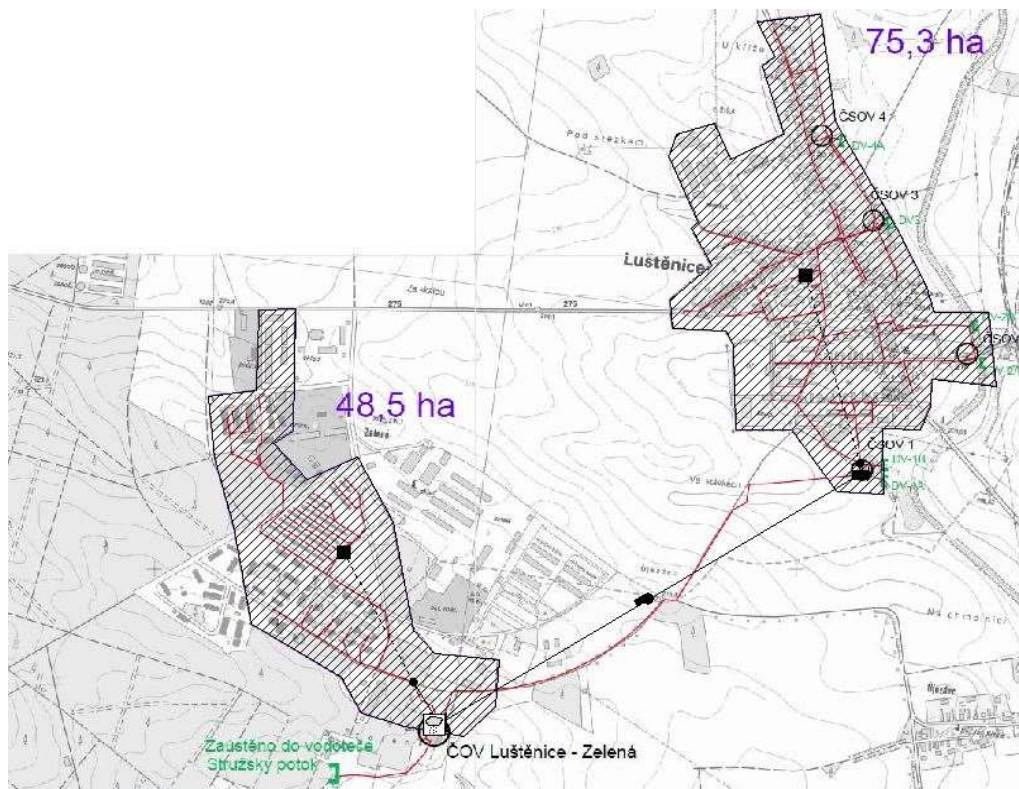
4.5.1 Sestavení modelu

Prvním krokem bylo nahrání podkladové mapy zájmového území. Byla použita mapa z kanalizačního řádu, kde je vyznačena jak stoková síť, důležité prvky na stoce, tak i vyznačené odkanalizované území (31). Při nahrávání bylo nutné dát pozor, aby mapa byla na správných souřadnicích z důvodu následného počítání (například délek) v modelu. Mapa také slouží pro lepší zorientování a namodelování situace.

Následně byla vytvořena dvě povodí. Jedno povodí ohraničovalo část Luštěnice a druhé část Zelená. Tím byla nadefinována plocha zasaženého území srážkou. Dále byla do každého povodí umístěna poslední šachta (Š1, Š2) stokové sítě před nátokem do ČSOV1, ev. ČOV. Každé z šachet byl přiřazen odtok z daného povodí. Ze šachet byl odtok přes potrubí (P1, P2) doveden do čerpacích stanic (ČSOV1, ČS ČOV). Z obou stanic bylo namodelováno čerpání do místa před ČOV. Z části Zelená z důvodu přečerpávání odpadní vody na ČOV a z Luštěnic z důvodu dopravování odpadní vody z ČSOV1 na ČOV. Dále byl namodelován bezpečnostní přepad na ČSOV1. Posledním prvkem modelu byl měrný žlab před nátokem na ČOV, kde probíhalo měření. Sestavení prvků do modelu demonstruje Obrázek 33.



Obrázek 33 Prvky v modelu



Obrázek 34 Model podložený mapou zájmového území, upraveno z (31)

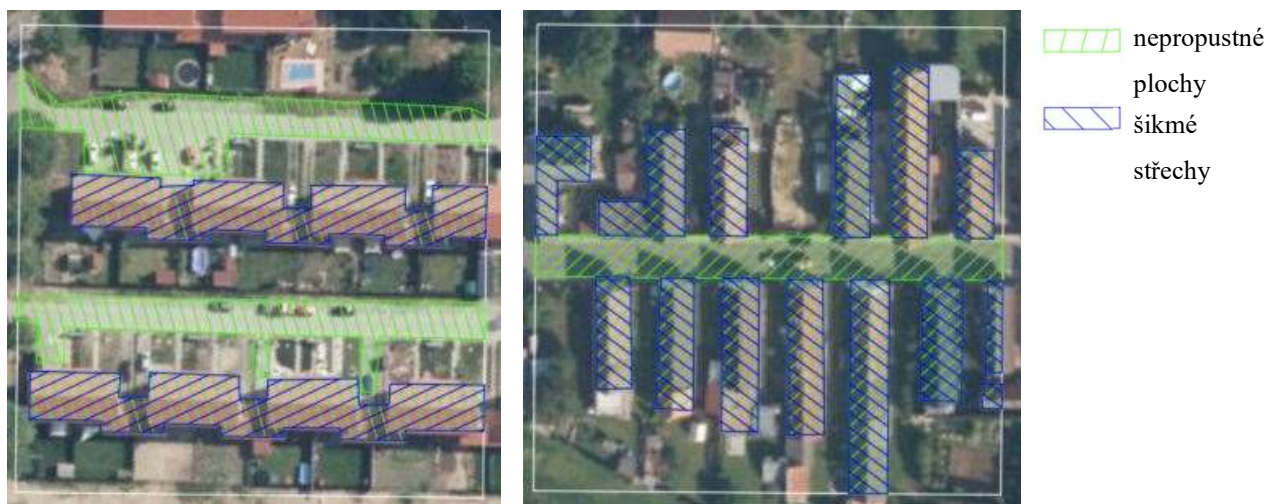
4.5.2 Nadefinování prvků modelu

Povodí

Pro nadefinování dvou vytvořených povodí, bylo zapotřebí do dialogového okna doplnit jeho plochu, šířku, sklon, procento nepropustných ploch a procento šikmých střech neboli podíl ploch bez retence. Při správném zadání souřadnic na začátku modelování program sám vypočítal plochu jednotlivých povodí. Šířka povodí se zadává z důvodu schematizace povodí. Počáteční odhad šířky je dán plochou povodí vydělenou průměrnou vzdáleností od nejvzdálenějšího bodu (26). Díky podobnému typu rozložení budov v obci bylo procento nepropustných ploch a šikmých střech vypočteno pomocí vzorového hektaru. Konkrétně bylo vytvořeno sedm vzorových hektarů v části Luštěnice a čtyři vzorové hektary v části Zelená. Ukázka vzorového hektaru z obou částí viz Obrázek 35. V neposlední řadě bylo v obou povodích navoleno, že z propustných a nepropustných ploch dochází rovnou k odtoku.

Tabulka 9 Definované hodnoty povodí v modelu

Povodí		Luštěnice	Zelená
plocha	(ha)	75.98	48.99
šířka	(m)	560.7	415.2
sklon	(%)	1.5	0.6
nepropustné plochy	(%)	15.7	18.1
šikmé střechy	(%)	61	49



Obrázek 35 Ukázka vzorového hektaru – ul. Luční (vlevo) a ul. Brodecká (vpravo)

Šachty

Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a.s. poskytly hodnoty k nadefinování dna obou šachet. Do modelu byla zapsána kóta dna a jejich hloubka, která byla odhadnuta. Důležitým parametrem bylo také zadání přítoku do šachet v bezdeštném období. Průměrný průtok

v jednotlivých částech obce byl rozdělen a upravován tak, aby model co nejvěrohodněji odpovídal reálné situaci.

Tabulka 10 Definované hodnoty šachet v modelu

Šachty		Š1	Š2
dno	(m n.m.)	205.86	203.54
hloubka	(m)	1.14	7.0
průtok $Q_{24,prům}$	(m^3/s)	0.0020	0.0052

Potrubí

Pro každé potrubí bylo nutné nadefinovat jaký je jeho průměr, délka, drsnost a v jaké výšce je potrubí napojeno do čerpací stanice. Informace o průměru potrubí byla poskytnuta opět provozovatelem *Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a.s.* Délka potrubí byla zadána taková, aby sklon v potrubí byl alespoň 1 % a materiál (tedy drsnost potrubí) byl nadefinován jako kamenina dle kanalizačního řádu (31). Výška napojení je brána ode dna čerpací stanice a hodnota byla odhadnuta tak, aby byl dodržen sklon potrubí.

Tabulka 11 Definované hodnoty potrubí v modelu

Potrubí		P1	P2
průřez	(-)	kruh	kruh
průměr	(m)	0.5	0.35
délka	(m)	37.2	50.0
materiál	(-)	kamenina	kamenina
drsnost	(-)	0.012	0.012
výška zaústění do ČS (ode dna)	(m)	1.54	1.74

Čerpací stanice

Následovalo nadefinování nádrží čerpacích stanic, ze kterých se odpadní voda čerpá na ČOV. Z výkresů čerpacích stanic od provozovatele *Vodovodů a kanalizací Mladá Boleslav, a.s.* byly zjištěny jejich rozměry a kóty dna. Pro každou čerpací stanici byla vytvořena a následně přiřazena křivka, tzv. *Storage Unit*, která definuje prostor v nádrži.

Tabulka 12 Definované hodnoty čerpacích stanic v modelu

Čerpací stanice		ČSOV1	ČS ČOV
dno	(m n.m.)	203.96	201.7
hloubka	(m)	3.0	9.2
šířka	(m)	2.4	4.2
délka	(m)	2.7	5.0
plocha	(m^2)	6.48	21.0

Čerpadla

V Luštěnicích jsou osazena dvě ponorná kalová čerpadla *EMU* typu *FA 08.43 + T 13 – 2/16* s oběžným kolem o průměru 150 mm. Druhé čerpadlo slouží jako stoprocentní rezerva a spouští se pouze při poruše prvního čerpadla. Na čerpací stanici ČOV v Zelené jsou dvě ponorná kalová čerpadla *Sarlin* typu *SV 024 B1*. Čerpadla běží souběžně, ale spínají a vypínají při různé úrovni hladiny v jímce. Informace o charakteristikách čerpadel byly dílčí a částečně rozporuplné, což ovlivnilo přesnost kalibrace.

Pro fungování čerpadel v modelu bylo nutné nadefinovat křivky čerpání, tzv. *Pump Curve*, tak, aby co nejvíce odpovídaly jejich pozorované funkci při provedeném monitoringu. Z výkresů bylo také zjištěno, v jaké výšce ode dna čerpací stanice čerpadla začínají plnit svou funkci, tedy v jaké výšce je jejich spínací hladina, a naopak v jaké výšce se zase vypnou a přestanou čerpat. Tyto informace byly zadány do dialogového okna k jednotlivým čerpadlům.

Tabulka 13 Definované hodnoty čerpadel v modelu

Čerpadla		Č1	Č2	Č3
spínací hladina	(m)	1.04	0.9	1.3
vypínací hladina	(m)	0.49	0.6	0.6

Tabulka 14 Výkon čerpadel v modelu

Výkon čerpadel					
Č1		Č2		Č3	
hloubka	průtok	hloubka	průtok	hloubka	průtok
(m)	(m ³ /s)	(m)	(m ³ /s)	(m)	(m ³ /s)
0	0	0	0	0	0
0.48	0	0.59	0	0.59	0
0.49	0.004	0.6	0.016	0.6	0.007
1.04	0.005	0.9	0.019	1.3	0.008
3.0	0.015	6.9	0.030	6.9	0.018

Přepad

Dalším důležitým prvkem ve stokové síti je bezpečnostní přepad na ČSOV1 v Luštěnicích. Kóta přepadu z čerpací stanice je 205,5 m n. m. Ostatní hodnoty do dialogového okna byly odhadnuty.

Tabulka 15 Definované hodnoty bezpečnostního přepadu v modelu

Bezpečnostní přepad		
kóta přepadu	(m n.m.)	205.5
kóta výtoku	(m n.m.)	205.3
výška přepadu z nádrže (ode dna)	(m)	1.54
průřez	(-)	kruh
průměr	(m)	0.8
délka	(m)	20
sklon	(%)	1.0
materiál	(-)	kamenina
drsnost	(-)	0.012

Žlab

Posledním prvkem k nadefinování byl měrný žlab před nátokem na ČOV, ve kterém probíhalo měření. Hodnoty potřebné do modelu byly změřeny přímo na místě. Pouze hodnota sklonu a kóta dna žlabu na jeho konci byly dopočítány z naměřených hodnot.

Tabulka 16 Definované hodnoty žlabu v modelu

Žlab		
kóta dna na začátku	(m n.m.)	207.68
kóta dna na konci	(m n.m.)	207.50
tvar	(-)	obdélník
hloubka	(m)	1
šířka	(m)	0.6
délka	(m)	10
sklon	(%)	1.8
materiál	(-)	beton
drsnost	(-)	0.013

4.5.3 Spuštění modelu

Před spuštěním modelu se nesmělo zapomenout na přidání dat získaných během monitoringu ze srážkoměru. V modelu se přes *Rain Gages* přidal srážkoměr na místo, kde probíhalo měření. V jeho dialogovém okně byl nastaven formát, ve kterém měřil a v jakém časovém intervalu. Konkrétně tedy byly hodnoty ve formátu intenzity a v časovém kroku jedné minuty. Následovalo nahrání do *Time Series* v textovém formátu hodnoty získané při měření a přiřadit k vytvořenému dešti.

V neposlední řadě se nastavily možnosti simulace v záložce *Options*. Pro výpočet transportu odpadní vody ve stokové síti byla zvolena dynamická vlna, která nezanedbává působící síly a pohybová rovnice má základní tvar, viz kapitola 2.3.3 rovnice [11]. Infiltrace

byla zvolena, aby probíhala podle výpočtů Green-Ampta a nakonec bylo za potřeby nastavit čas, kdy má simulace probíhat.

Takto vytvořený model byl připraven na spuštění a k následné kalibraci.

4.6 KALIBRACE A VERIFIKACE MODELU

4.6.1 Kalibrace modelu

Pro kalibraci modelu byly vybrány tři dešťové události z významných dešťů, viz Tabulka 5, které vykazovaly různý typ srážkové aktivity. Konkrétně se jednalo o deště viz Tabulka 17.

Tabulka 17 Vybrané dešťové události pro kalibraci

	<i>Začátek deště</i>	<i>Konec deště</i>
4	14.07.2021 20:46	14.07.2021 21:14
8	08.08.2021 21:17	08.08.2021 22:18
10	26.08.2021 4:14	26.08.2021 8:23

Nejvýraznějším parametrem, který byl při kalibraci změněn, bylo procento nepropustných ploch. Vzorovým hektarem bylo spočteno reálné zastoupení nepropustných ploch. Parametr ale musel být z logického hlediska v obou povodích významně ponížen. V části Zelená se nachází pouze splašková kanalizace, tzn. že dešťové vody nejsou odváděny a jsou řešeny vsakem, přesto je zde podezření na nátok srážkových vod poklopy, špatné zaústění přípojek nebo špatný technický stav stokové sítě. V části Luštěnice se vyskytují na stokové síti odlehčovací komory, ve kterých přepadají zředěné srážkové vody a nedotečou tak na ČOV. Mezi další změněné parametry patří šířka povodí, sklon povodí a kapacita povrchové retence. Šířka a sklon povodí byly poníženy a tím nastalo nepatrné snížení odtoku z povodí. K získání pozdějšího odtoku z povodí byl zvýšen parametr pro kapacitu povrchové retence.

Tabulka 18 Změněné parametry při kalibraci

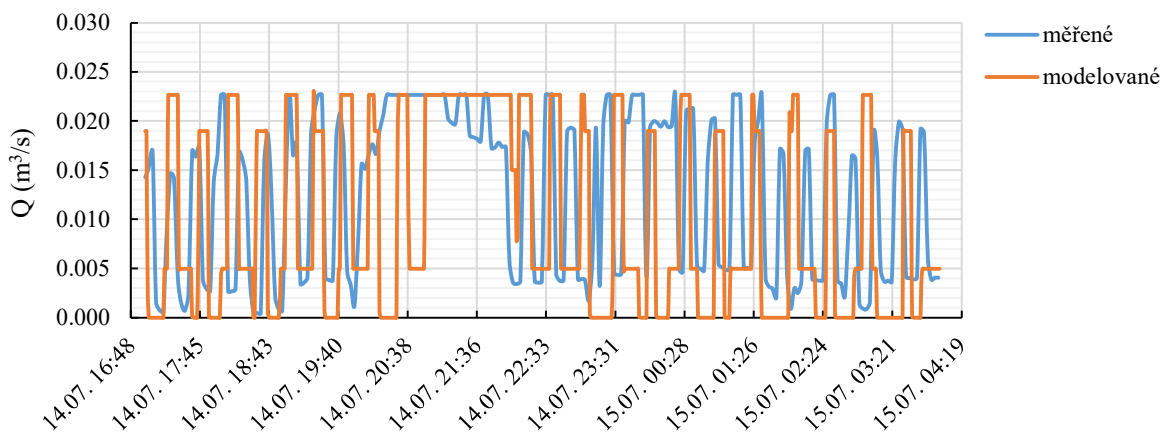
Povodí		Luštěnice		Zelená	
		před kal	po kal	před kal	po kal
šířka	(m)	560.7	400	415.2	300
sklon	(%)	1.5	0.5	0.6	0.6
nepropustné plochy	(%)	15.7	3	18.1	2
kapacita povrchové retence	(mm)	0.05	0.5	0.05	0.5

Při kalibraci modelu bylo zaměřeno hlavně na splnění kritéria objemu proteklé vody. Ostatní tři kritéria pro splnění úspěšné kalibrace, tedy maximální průtok, časový posun výskytu

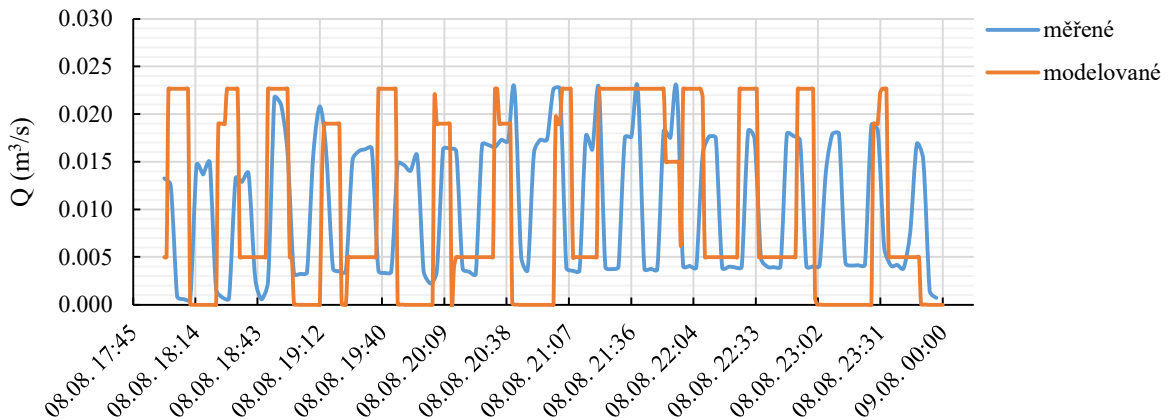
maximálního průtoku a Nash-Sutcliffe koeficient, byly zanedbány, protože díky čerpání a danému maximálnímu průtoku ve žlabu by nevykazovaly logické hodnoty k porovnání.

Za účelem zvýšení věrohodnosti kalibrace se kromě objemu odpadní vody při zvolených dešťových událostech posoudily denní objemy vody proteklé ČOV a celkový objem odpadní vody za celé měřené období. Další porovnání bylo možné provést, v kroku 1 měsíce, na základě indukčního průtokoměru, který se vyskytuje na ČOV.

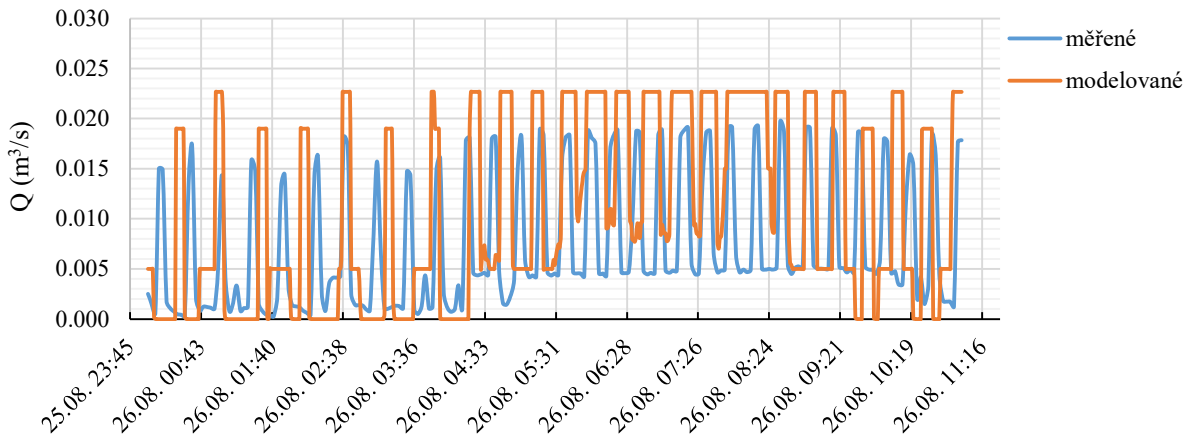
Graf denního objemu vody se nachází v Příloze C. Občasné výkyvy a nesrovnalosti v grafu s denními objemy si lze odůvodnit rozložením deště nad lokalitou. Srážkoměr byl umístěn na ČOV Zelená, která se nachází cca 3 km od Luštěnic. Pro přesnější měření a zachycení by bylo vhodné rozmístit, při dalším měření, více srážkoměrů, aby pokryly rovnoměrně celé území. Kalibrační grafy na první pohled nevykazují stejný průběh měřeného průtoku s modelovaným. Cílem bylo dosáhnout alespoň podobného čerpání s podobným objemem. Na modelované křivce je patrné, jak čerpadla pracují. Nejdříve přitékají odpadní vody z ČSOV1, kde má jímka menší objem, rychleji se plní a dosáhne tak rychleji spínací hladiny. Poté se z ČS ČOV přečerpá výrazně větší objem odpadní vody za krátký časový okamžik, díky velkému výkonu čerpadel. Na grafech níže jsou ukázány průběhy průtoku vody během dešťových událostí a v Příloze D. se nacházejí rozšířené časové úseky kalibračních grafů, ke kterým bylo při kalibrování také přihlíženo, aby namodelovaný průběh odpovídal realitě.



Obrázek 36 Kalibrační graf dešťové události 4



Obrázek 37 Kalibrační graf dešťové události 8



Obrázek 38 Kalibrační graf dešťové události 10

Tabulka 19 Porovnání s indukčním průtokoměrem

Měsíc	Model	Indukční průtokoměr
	(m ³)	(m ³)
červenec	5829	6940
srpen	6898	5364
září	3746	4971
Σ	16473	17275

Vyhodnocení kalibrace, zda byla úspěšná, probíhalo ze součtu objemů odpadní vody změřené a objemů odpadní vody z modelu během stejného časové rozmezí, a to dešťových událostí. Pro tyto hodnoty se vypočítala odchylka, která po zprůměrování musela být menší než 10 %.

Tabulka 20 Vyhodnocení kalibrace

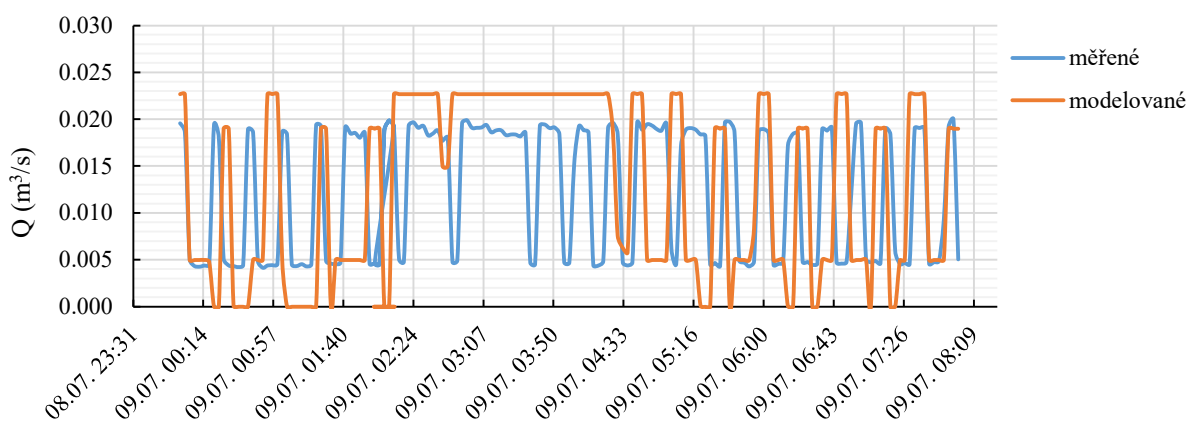
Čas	V		
	měřené	modelované	odchylka
	(m^3)	(m^3)	(%)
2.7.2021-28.9.2021	57790.6	57807.1	0.03
14.07.2021	501.8	392.1	-21.9
08.08.2021	222.0	218.9	-1.4
26.08.2021	296.7	428.5	44.4
Kritérium	10	>	7.05
	Splňuje		

4.6.2 Verifikace modelu

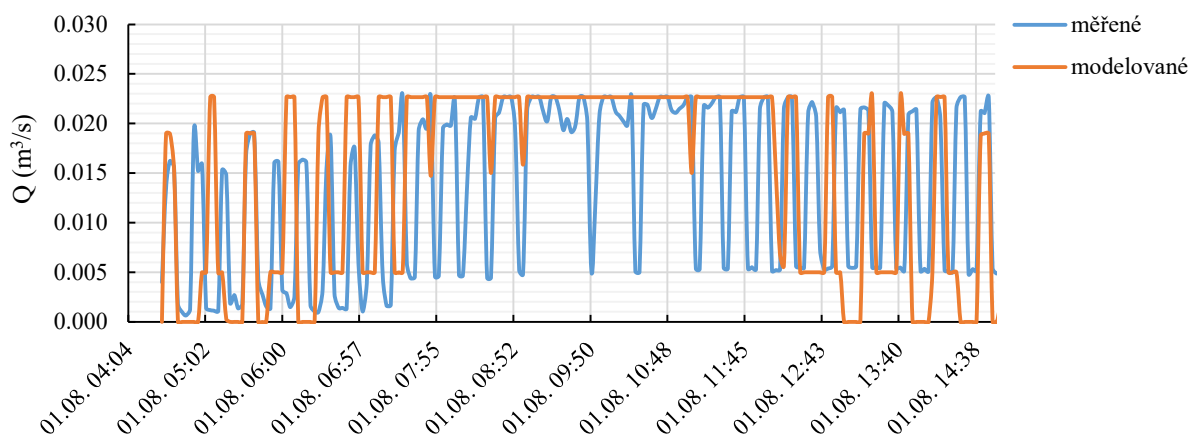
Pro verifikaci byly vybrány další dvě různé dešťové události, viz Tabulka 21. Vyhodnocení probíhalo stejným způsobem jako při kalibraci. Pro správně zkalibrovaný model, muselo být splněno kritérium, že průměr z odchylek od měřených a modelovaných objemů odpadní vody musel být menší než 10 %.

Tabulka 21 Dešťové události pro verifikaci

	Začátek deště	Konec deště
2	09.07.2021 2:23	09.07.2021 5:46
6	01.08.2021 6:18	01.08.2021 13:44



Obrázek 39 Verifikační graf dešťové události 2



Obrázek 40 Verifikační graf dešťové události 6

Tabulka 22 Vyhodnocení verifikace

Čas	V		
	měřené	modelované	odchylka
	(m^3)	(m^3)	(%)
09.07.2021	123.90	126.53	2.12
01.08.2021	173.08	186.54	7.78
Kritérium	10	>	4.95
Splňuje			

4.7 VÝPOČET OBJEMU SRÁŽKOVÉ VODY

Prvním krokem výpočtu bylo získání objemu srážkové vody na odtoku stokového systému do ČOV v modelu ($V_{dest,model}$). Byla použita rovnice [34], kde V_{splas} byl vypočten z Q_{24} a přesného času modelování (3644 dní a 20 minut) a V_{odtok} byl získán výpočtem z modelu.

$$Q_{24} = 7,2 \text{ l/s} = 0,0072 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_{splas} = 0,0072 * [(3644 * 24 * 60) + (20 * 60)] = 2\,266\,868 \text{ m}^3$$

$$V_{odtok} = 2\,363\,766 \text{ m}^3$$

$$V_{dest,model} = 2\,363\,766 - 2\,266\,868 = \mathbf{96\,898 \text{ m}^3}$$

Dalším krokem výpočtu bylo vypočítání celkového objemu srážkové vody z povodí. Při výpočtu objemu srážkové vody z povodí Luštěnice se vycházelo z objemu vypočteného modelem, který byl upraven dle procenta nepropustných ploch získaných vzorovým hektarem tak, aby byl zohledněn vliv odlehčovacích komor. Trvalé ztráty v povodí se pro výpočet braly 15 %. Hodnoty byly dosazeny do rovnice [35].

$$V_{odtok,L} = 124\,210\, m^3$$

$$NP_{model,L} = 3\, \%$$

$$NP_{,L} = 15,7\, \%$$

$$TZ = 15\, \%$$

$$V_L = \frac{124\,210}{3} * 15,7 * 0,85 = 552\,527\, m^3$$

Celkový objem srážkových vod, které dotečou na ČOV, se ve výsledku shoduje s hodnotou objemu srážkových vod z Luštěnic, protože část Zelená má pouze splaškovou oddílnou kanalizaci a nebyla tak hodnocena.

$$V_Z = 0\, m^3$$

$$V_{cel} = 552\,527 + 0 = 552\,527\, m^3$$

Z důvodu nezohledňování sídlištní části Zelená v celkovém objemu, byl ponížěn i $V_{dest,model}$ o objem odtoku srážkových vod ze Zelené, který byl vypočten modelem.

$$V_{odtok,Z} = 53\,410\, m^3$$

$$V_{model,L} = 96\,898 - 53\,410 = 43\,488\, m^3$$

Procento srážkové vody, které se dostane do kanalizace a následně na ČOV, bylo vypočteno dle rovnice [37].

$$k = \frac{43\,488}{552\,527} * 100 = 7,9\, \%$$

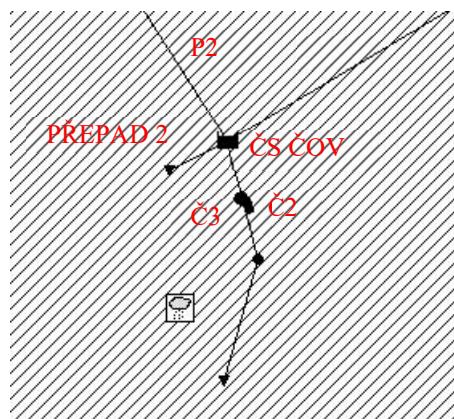
Výsledná hodnota nesplňuje kritérium udávané normou ČSN 75 6262 (28), tedy minimální hodnotu 55 %. Takto nízká hodnota může být důsledkem nepříznivého poměru odlehčování srážkové vody na odlehčovacích komorách v části Luštěnice. Odlehčovacích komor se v této části vyskytuje šest.

Tabulka 23 Souhrnná tabulka výsledků objemu srážkové vody

Část obce	$V_{odtok,sub}$	NP_{model}	NP	TZ	V_i	V_{cel}	$V_{dest,model}$	$V_{model,L}$	% odtoku
	(tis. m^3)	(%)	(%)	(%)	(tis. m^3)	(tis. m^3)	(tis. m^3)	(tis. m^3)	(%)
Luštěnice	124.21	3	15.7	15	552.53	552.53	96.90	43.49	7.9
Zelená	53.41	2	0	-	0				

4.8 POSOUZENÍ PŘEČERPÁVÁNÍ VOD

Pro posouzení přečerpávání vod do jiné lokality bylo nutné poupravit stávající model, který udával současný stav odvodnění, na model s přečerpáváním veškerých odpadních vod do jiné lokality. V modelu byl odtok z Luštěnic přepojen do ČS ČOV a na čerpací stanici přidán bezpečnostní přepad. Hodnoty pro nadefinování nového prvku byly odhadnuty a jsou sepsány viz Tabulka 24.



Obrázek 41 Změna v modelu

Tabulka 24 Definované hodnoty bezpečnostního přepadu 2 v modelu

Bezpečnostní přepad 2		
kóta přepadu	(m n.m.)	207.1
kóta výtoku	(m n.m.)	206.9
výška přepadu z nádrže (ode dna)	(m)	5.4
průřez	(-)	kruh
průměr	(m)	0.8
délka	(m)	20
sklon	(%)	1
materiál	(-)	kamenina
drsnost	(-)	0.012

Následoval stejný postup výpočtu jako při výpočtu procenta odtoku objemu srážkové vody za současného stavu. Jediný rozdíl ve výpočtu byl v objemu srážkové vody, který odtéká z modelu. Tato hodnota byla ponížena o přepadlé množství vody na bezpečnostním přepadu.

$$V_{splas} = 2\,266\,868 \text{ m}^3$$

$$V_{BP,Z} = 806 \text{ m}^3$$

$$V_{odtok} = 2\,363\,766 \text{ m}^3$$

$$V_{dest,model} = 2\,363\,766 - 2\,266\,868 - 806 = 96\,092 \text{ m}^3$$

Procento objemu srážkové vody, které doteče na ČOV, bylo vypočteno dle rovnice [37], opět se snížením objemu odtoku srážkové vody z části Zelená.

$$k_2 = \frac{96\,092 - 53\,410}{552\,527} * 100 = 7,7 \%$$

Při přečerpávání odpadních vod do jiné lokality došlo nejen vlivem bezpečnostního přepadu na ČS ČOV ke snížení podílu srážkového odtoku na celkovém přečerpávaném objemu odpadních vod o 0,2 %. Nový podíl odvádění srážkového odtoku z povodí činí 7,7 %.

Tabulka 25 Souhrnná tabulka výsledků objemu srážkové vody při přečerpávání vod

Část obce	$V_{\text{odtok,sub}}$ (tis.m ³)	NP_{model} (%)	NP (%)	TZ (%)	V_i (tis. m ³)	V_{cel} (tis.m ³)	$V_{\text{dest,model}}$ (tis. m ³)	$V_{\text{model,L}}$ (tis. m ³)	% odtoku (%)
Luštěnice	124.21	3	15.7	15	552.53	552.53	96.10	42.68	7.7
Zelená	53.41	2	0	-	0				

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo posouzení přepojení stávající ČOV v obci Luštěnice na ČOV v Mladé Boleslavi, což zahrnovalo analýzu dat získaných monitorovací kampaní, sestavení simulačního modelu v softwaru SWMM, jeho kalibraci a následné použití k posouzení přečerpávání odpadních vod. Kalibrace byla provedena pomocí reálných dat získaných při monitorovací kampani. Přesnost kalibrace byla ovlivněna nejasnými daty o čerpadlech na čerpacích stanicích. Zkalibrovaný model byl zatížen historickou srážkovou řadou délky 10 let z nedalekého srážkoměru a následně byly vyhodnoceny dvě varianty odvodnění zájmového území - (a) současný stav, (b) přečerpávání do jiné lokality. Vyhodnocení obou variant přihlíželo ke stávajícím typům stokových sítí v jednotlivých částech obce. Konkrétně v části Luštěnice je vybudovaná jednotná stoková kanalizace a v sídlištní části Zelená je pouze splašková oddílná kanalizace.

Výstupy modelu pro obě varianty byly porovnány s požadavkem ČSN 75 6262 na minimální míru odvádění srážkového odtoku z povodí jednotné kanalizace na ČOV, která odpovídá 55 %. Obě varianty po vyhodnocení nespĺňují toto kritérium. Současný stav dosahuje pouze hodnoty 7,9 % srážkových vod doteklých na ČOV. Při variantě přečerpávání do jiné lokality je tato hodnota o 0,2 % nižší a to i přesto, že byla čerpadla na ČS ČOV zatížena odpadní vodou z ČS Luštěnice. Nízké procento srážkových vod na ČOV je možné odůvodnit nepříznivým poměrem ředění srážkových vod na všech šesti odlehčovacích komorách vyskytujících se v části Luštěnice. Z důvodu žádných informací o OK, ani poměru ředění nelze tuto myšlenku nijak podložit, ale lze pouze odhadovat. Posouzení OK nebylo předmětem diplomové práce.

Pokud bude v budoucnosti nezbytné procento odváděných vod na ČOV zvýšit, provozovatel kanalizace by měl usilovat o minimalizaci přepadu zředěných odpadních vod do recipientu, nebo se důkladněji věnovat hospodaření s dešťovými vodami. Na základě této úvahy doporučuji v části Luštěnice přistoupit k průzkumu a posouzení stavu odlehčovacích komor a zavést některá opatření nebo jejich kombinace ke zlepšení stávajícího stavu odvodnění – (a) snížení poměru odvodňovaných ploch v kombinaci s odpojedním dešťových vod od kanalizace dle principů hospodaření se srážkovými vodami (HDV), (b) návrh dešťových nádrží za odlehčením z OK s řízeným odtokem na ČOV za bezdeštných období, (c) zvýšení přelivných hran na OK s nutným posílením čerpání v čerpacích stanicích. Na základě výstupu kalibračního modelu, navrhuji v sídlištní části Zelená provést průzkum stokové sítě z důvodu možného špatného stavu kanalizace, který způsobuje nátok dešťových vod do splaškové kanalizace.

Pomineme-li vybudování výtlaku na ČOV v jiné lokalitě, je záměr provozovatele technicky možný, jelikož čerpací stanice na ČOV v Zelené je vybudovaná a provedení spočívá v přepojení výtlaku z ČSOV1 v Luštěnicích do stávající ČS ČOV.

SEZNAM LITERATURY

1. Krejčí, Vladimír a kol. *Odvodnění urbanizovaných území - koncepční přístup*. Brno : Vydavatelství NOEL 2000 s.r.o., 2002. ISBN 80-86020-39-8.
2. Butler, David, a další. *Urban Drainage*. Boca Raton : CRC Press, 2018. ISBN 9781351174305.
3. Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). Praha : Sběrka zákonů, 28.6.2001. ISSN 1211-1244.
4. ČSN 75 6101. *Stokové sítě a kanalizační přípojky*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
5. Color of water - dělení vod. *Asio čištění a úprava vod*. [Online] březen 2013. <https://www.asio.cz/cz/177.color-of-water-deleni-vod>.
6. 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.
7. Šenkapoulová, Jana, a další. *Příručka provozovatele stokové sítě*. Líbeznice : Nakladatelství a vydavatelství Medium, spol. s r.o., 2018. ISBN 978-80-87140-52-9.
8. Technické podmínky navrhování stok. *Vodohospodářská zařízení II*. [Online] 2014. http://hgfl0.vsb.cz/546/VHZ2/8_podminky_navrhovani_stok.html.
9. Soustavy stokových sítí. *Vodohospodářské zařízení II*. [Online] 2014. http://hgfl0.vsb.cz/546/VHZ2/5_soustavy_stokovych_siti.html.
10. Metodická příručka - Zneškodňování odpadních vod v obcích do 2000 ekvivalentních obyvatel. [Online] Březen 2009. [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).
11. Způsob dopravy odpadních vod. *Vodohospodářská zařízení II*. [Online] 2014. http://hgfl0.vsb.cz/546/VHZ2/7_doprava_odpadnich_vod.html.
12. Stránský, David. Dešťový odtok - dešťová data, tvorba povrchového odtoku. [přednáška].
13. Haloun, Radovan. *Modelování odtoku z intravilánu*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00974-2.
14. Stránský, David. Proudění a transport ve stokové síti. [přednáška].

15. *Základní přístupy k monitoringu v městském odvodnění*. Suchánek, Milan, Pryl, Karel a Kabelková, Ivana. 7, Praha : Vodní hospodářství, 2013.
16. Suchánek, Milan, Sýkora, Petr a Stránský, David. *Monitoring v městském odvodnění, část I. - Dešťové srážky*. Líbeznice : Nakladatelství a vydavatelství Medim, spol. s r. o., 2012. ISBN 978-80-87140-25-3.
17. Stránský, David. *Monitoring v městském odvodnění. [přednáška]*.
18. Člunkové srážkoměry 500 cm². *Návod k obsluze - verze 1.04*. [Online] Březen 2015.
<https://www.fiedler.company/sites/default/files/dokumenty/sr03-v1.pdf>.
19. Český hydrometeorologický ústav - Radarová síť CZRAD. [Online]
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html.
20. Fencel, Martin, a další. Commercial microwave links instead of rain gauges: Fiction or reality? *Water Science & Technology*. 2015, Sv. 71, 31.
21. Suchánek, Milan, a další. *Monitoring v městském odvodnění, část II. - Měření úrovně hladiny a průtoku. místo neznámé : Komise metrologie při Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, v přípravě.*
22. *Ultrazvukové hladinoměry - Principy ultrazvukových hladinoměrů*. [Online] JSP, s.r.o. - Měření a regulace.
http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/teorie-hladina/ultrazvukove-hladinomy/principy-ultrazvukovych-hladinomeru.html.
23. Käss, Werner. *Tracers technique in geohydrology*. Rotterdam : Balkema, 1998. ISBN 978-9054104445.
24. Odborný článek o měření průtoku. [Online] PARS aqua, s.r.o. <https://pars-aqua.cz/odborny-clanek-o-mereni-prutoku.html>.
25. Stránský, David. *Metodická příručka - Posouzení stokových systémů urbanizovaných povodí*. [Online] Květen 2009.
<http://www.forumochranyprirody.cz/sites/default/files/35.pdf>.
26. Rossman, Lewis A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. U.S. Environmental Protection Agency*. [Online] Zář 2015.
https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf.

27. Stránský, David a Bareš, Vojtěch. Monitoring v povodí a ve stokové síti obcí Luštěnice a Chotětov - Závěrečná zpráva. Praha : České vysoké učení technické, Fakulta stavební, 15. října 2021.
28. ČSN 75 6262. *Odlehčovací komory*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
29. Počet obyvatel v obcích - k 1. 1. 2021. *Český statistický úřad*. [Online] 30. Duben 2021. <https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-k-112021>.
30. Základní údaje o obci. *Obec Luštěnice*. [Online] Galileo Corporation s.r.o. <https://www.lustenice.cz/obec/zakladni-udaje-o-obci/>.
31. Kanalizační řád stokové sítě skupinové kanalizace obce Luštěnice. Mladá Boleslav : Vodovody a kanalizace Mladá Boleslav, a. s., 2013.
32. Müller, Štefan. Přirozená retenční a akumulace (RaA) vod. [Online] <https://slideplayer.cz/slide/1898840/>.
33. Srážkoměr MRW500. *MeteoServis - výrobce automatických meteorologických systémů*. [Online] <https://www.meteoservis.cz/75-SRAZKOMERY-VAHOVE/75-Srazkometer-MRW500>.
34. Optický srážkoměr RG-11. [Online] <https://www.fiedler.company/cs/produkty/meteorologick-stanice-senzory/de-ov-sr-ky/optick-sr-kom-r-rg-11>.
35. Fotodokumentace. [Online] PARS aqua, s.r.o. <https://pars-aqua.cz/fotodokumentace.html>.
36. Mapový portál Středočeského kraje. *Plán rozvoje vodovodů a kanalizací*. [Online] https://gis.kr-stredocesky.cz/js/ozp_prvkuk/.
37. Mapy.cz. [Online] <https://mapy.cz/zakladni?x=14.9231444&y=50.3262966&z=13&source=muni&id=3979>.
38. Peláková, Martina a kol. *Město a voda*. Praha : Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce, 2020. ISBN 978-80-87402-82-5.

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Kapacita omočení C_B pro různé povrchy, upraveno z (1)</i>	19
<i>Tabulka 2 Hodnoty kapacity povrchové retence, upraveno z (1)</i>	19
<i>Tabulka 3 Rovnovážné infiltrační množství různých druhů půd, upraveno z (1)</i>	20
<i>Tabulka 4 Požadavky na dešťová data (13)</i>	29
<i>Tabulka 5 Významné dešťové události za měřené období</i>	51
<i>Tabulka 6 Průměrné průtoky Q_{24}</i>	52
<i>Tabulka 7 Průměrný průtok Q_{24} za měsíc</i>	52
<i>Tabulka 8 Koeficienty všedních a víkendových dní a měsíců</i>	52
<i>Tabulka 9 Definované hodnoty povodí v modelu</i>	55
<i>Tabulka 10 Definované hodnoty šachet v modelu</i>	56
<i>Tabulka 11 Definované hodnoty potrubí v modelu</i>	56
<i>Tabulka 12 Definované hodnoty čerpacích stanic v modelu</i>	56
<i>Tabulka 13 Definované hodnoty čerpadel v modelu</i>	57
<i>Tabulka 14 Výkon čerpadel v modelu</i>	57
<i>Tabulka 15 Definované hodnoty bezpečnostního přepadu v modelu</i>	58
<i>Tabulka 16 Definované hodnoty žlabu v modelu</i>	58
<i>Tabulka 17 Vybrané dešťové události pro kalibraci</i>	59
<i>Tabulka 18 Změněné parametry při kalibraci</i>	59
<i>Tabulka 19 Porovnání s indukčním průtokoměrem</i>	61
<i>Tabulka 20 Vyhodnocení kalibrace</i>	62
<i>Tabulka 21 Dešťové události pro verifikaci</i>	62
<i>Tabulka 22 Vyhodnocení verifikace</i>	63
<i>Tabulka 23 Souhrnná tabulka výsledků objemu srážkové vody</i>	64
<i>Tabulka 24 Definované hodnoty bezpečnostního přepadu 2 v modelu</i>	65
<i>Tabulka 25 Souhrnná tabulka výsledků objemu srážkové vody při přečerpávání vod</i>	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Neovlivněná přírodní krajina (vlevo) a městská krajina (vpravo) (38)</i>	9
<i>Obrázek 2 Profily pro navrhování stok (8)</i>	11
<i>Obrázek 3 Jednotná stoková soustava (9)</i>	12
<i>Obrázek 4 Oddílná stoková soustava (9)</i>	13
<i>Obrázek 5 Modifikovaná stoková soustava (9)</i>	13
<i>Obrázek 6 Základní systémy stokových sítí (7)</i>	15
<i>Obrázek 7 Schéma tlakové stokové sítě (11)</i>	16
<i>Obrázek 8 Schéma podtlakové kanalizace (11)</i>	16
<i>Obrázek 10 Dešťový odtok z urbanizovaného povodí (1)</i>	17
<i>Obrázek 9 Dešťový odtok z přirozeného povodí (1)</i>	17
<i>Obrázek 11 Hyetogram průtokové vlny, upraveno z (38)</i>	18
<i>Obrázek 12 Tvorba a koncentrace přímého dešťového odtoku (1)</i>	18
<i>Obrázek 13 Časový průběh ztrát (1)</i>	21
<i>Obrázek 14 Simulační srážko-odtokové modely (25)</i>	22
<i>Obrázek 15 Jednotlivé kroky při výpočtu metodou izochron (1)</i>	23
<i>Obrázek 16 Ombrograf (32)</i>	31
<i>Obrázek 17 Základna vytápěného srážkoměru SR03/V (18)</i>	32
<i>Obrázek 18 Člunkový srážkoměr SR03/V (18)</i>	32
<i>Obrázek 19 Váhový srážkoměr (33)</i>	33
<i>Obrázek 20 Optický srážkoměr RG-11 (34)</i>	33
<i>Obrázek 21 Meteorologický radar v Brdech (19)</i>	33
<i>Obrázek 22 Schéma ultrazvukového hladinoměru, upraveno z (22)</i>	35
<i>Obrázek 23 Parshallův žlab (35)</i>	38
<i>Obrázek 24 Schéma postupu při matematickém modelování (25)</i>	39
<i>Obrázek 25 Ilustrativní graf průtoků (26)</i>	42
<i>Obrázek 26 Ilustrativní podélný profil (26)</i>	42
<i>Obrázek 27 Umístění obce na mapě ČR (37)</i>	48
<i>Obrázek 28 Obec Luštěnice (37)</i>	48
<i>Obrázek 29 Stoková síť v obci, upraveno z (36) (31)</i>	49

<i>Obrázek 30 Umístění měřících přístrojů, upraveno z (36)</i>	50
<i>Obrázek 31 Graf s denními srážkovými úhrny</i>	51
<i>Obrázek 32 Graf průtoků bezdeštný týden</i>	53
<i>Obrázek 33 Prvky v modelu</i>	54
<i>Obrázek 34 Model podložený mapou zájmového území, upraveno z (31)</i>	54
<i>Obrázek 35 Ukázka vzorového hektaru – ul. Luční (vlevo) a ul. Brodecká (vpravo)</i>	55
<i>Obrázek 36 Kalibrační graf dešťové události 4</i>	60
<i>Obrázek 37 Kalibrační graf dešťové události 8</i>	61
<i>Obrázek 38 Kalibrační graf dešťové události 10</i>	61
<i>Obrázek 39 Verifikační graf dešťové události 2</i>	62
<i>Obrázek 40 Verifikační graf dešťové události 6</i>	63
<i>Obrázek 41 Změna v modelu</i>	65
<i>Obrázek 42 Měrný profil 1 (27)</i>	76
<i>Obrázek 43 Měrný profil 2 (27)</i>	77
<i>Obrázek 44 Měrný profil 3 (27)</i>	78

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Charakteristika měrných profilů

Příloha B – Vyhodnocení bezdeštného průtoku

Příloha C – Graf denních objemů proteklé odpadní vody

Příloha D – Rozšířené časové úseky kalibračních grafů

Příloha A – Charakteristika měrných profilů

Měrný profil 1

Lokalita	nátokový žlab ČOV, 1.05 m za česlemi
Jednotka	Fidler M4016
Senzor	ultrazvukový hladinový US1200
Umístění senzoru	nad středem žlabu
Interval záznamu dat	3 minuty



Obrázek 42 Měrný profil 1 (27)

Měrný profil 2

Lokalita	nátokový žlab ČOV, 2.32 m za česlemi
Jednotka	Fidler M4016
Senzor	ultrazvukový hladinový US1200
Umístění senzoru	nad středem žlabu
Interval záznamu dat	3 minuty



Obrázek 43 Měrný profil 2 (27)

Měrný profil 3

Lokalita	ČOV Luštěnice, u nátokového žlabu
Jednotka	Fiedler Q2
Senzor	SR03
Umístění senzoru	terén
Interval záznamu dat	1 minuta

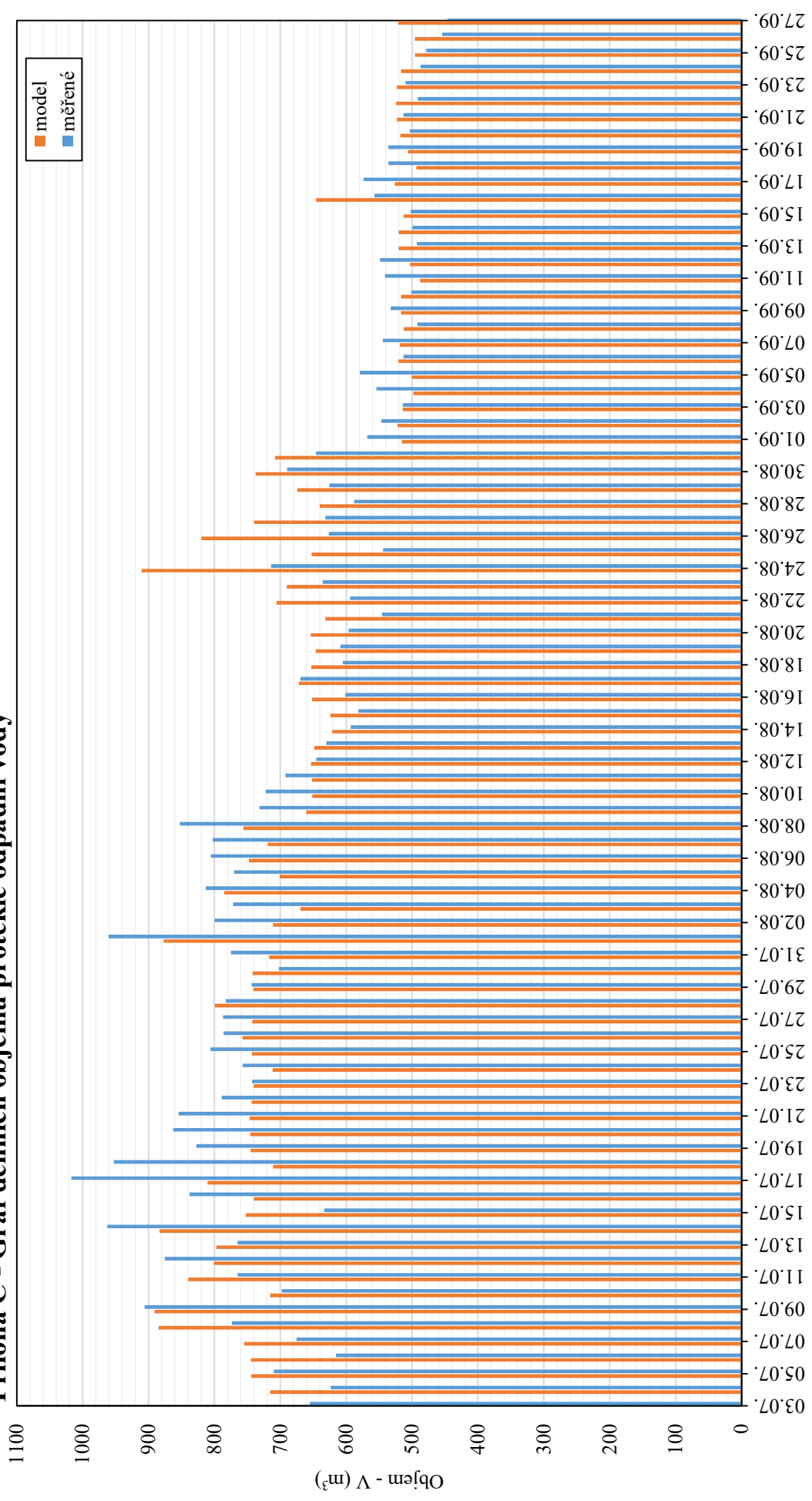


Obrázek 44 Měrný profil 3 (27)

Příloha B - Vyhodnocení bezděšného průtoku

Hodina	04.09.2021		05.09.2021		06.09.2021		07.09.2021		08.09.2021		09.09.2021		10.09.2021		po - pá			so - ne			
	pondělí (l/s)	úterý (l/s)	středa (l/s)	čtvrtek (l/s)	pátek (l/s)	sobota (l/s)	neděle (l/s)	μ (l/s)	σ (l/s)	cv (%)	μ (l/s)	σ (l/s)	cv (%)	μ (l/s)	σ (l/s)	cv (%)	μ (l/s)	σ (l/s)	cv (%)		
00-01h	5.83	4.56	4.31	4.78	4.80	4.61	4.55	4.86	0.58	11.9%	4.86	0.58	11.9%	4.58	0.04	0.9%	4.58	0.04	0.9%		
01-02h	3.52	5.41	4.84	4.24	4.01	5.49	4.43	4.40	0.73	16.7%	4.40	0.73	16.7%	4.96	0.75	15.1%	4.96	0.75	15.1%		
02-03h	3.73	6.53	4.08	4.39	4.13	3.80	5.11	4.57	1.12	24.5%	4.57	1.12	24.5%	4.45	0.93	20.8%	4.45	0.93	20.8%		
03-04h	3.37	4.75	3.75	4.35	3.64	4.24	3.99	3.97	0.56	14.2%	3.97	0.56	14.2%	4.12	0.18	4.3%	4.12	0.18	4.3%		
04-05h	3.72	4.47	6.14	4.63	5.75	5.10	4.63	4.94	0.99	20.0%	4.94	0.99	20.0%	4.86	0.33	6.8%	4.86	0.33	6.8%		
05-06h	6.47	4.09	5.93	6.44	5.04	6.35	5.16	5.59	1.02	18.3%	5.59	1.02	18.3%	5.76	0.85	14.7%	5.76	0.85	14.7%		
06-07h	5.97	5.81	7.20	6.18	7.39	8.53	7.49	6.51	0.73	11.2%	6.51	0.73	11.2%	8.01	0.74	9.2%	8.01	0.74	9.2%		
07-08h	7.54	7.73	8.55	8.22	5.11	8.54	8.04	7.43	1.36	18.3%	7.43	1.36	18.3%	8.29	0.36	4.3%	8.29	0.36	4.3%		
08-09h	10.04	9.58	6.08	8.09	4.19	6.92	8.20	7.60	2.45	32.3%	7.60	2.45	32.3%	7.56	0.91	12.0%	7.56	0.91	12.0%		
09-10h	8.48	9.70	7.15	10.70	4.92	7.87	8.29	8.19	2.26	27.6%	8.19	2.26	27.6%	8.08	0.30	3.7%	8.08	0.30	3.7%		
10-11h	9.72	8.17	7.70	8.75	3.64	6.12	5.80	7.60	2.34	30.8%	7.60	2.34	30.8%	5.96	0.23	3.8%	5.96	0.23	3.8%		
11-12h	8.40	8.74	7.23	5.47	7.99	7.41	7.08	7.57	1.30	17.2%	7.57	1.30	17.2%	7.24	0.24	3.3%	7.24	0.24	3.3%		
12-13h	7.26	7.67	6.53	7.42	5.86	6.28	4.28	6.95	0.74	10.7%	6.95	0.74	10.7%	5.28	1.42	26.8%	5.28	1.42	26.8%		
13-14h	6.65	6.44	4.92	5.58	5.38	6.78	5.53	5.79	0.73	12.6%	5.79	0.73	12.6%	6.16	0.88	14.3%	6.16	0.88	14.3%		
14-15h	5.41	5.82	5.46	6.48	5.77	4.90	4.28	5.79	0.43	7.4%	5.79	0.43	7.4%	4.59	0.44	9.6%	4.59	0.44	9.6%		
15-16h	6.04	6.12	3.71	5.94	6.23	4.99	6.25	5.61	1.07	19.0%	5.61	1.07	19.0%	5.62	0.89	15.9%	5.62	0.89	15.9%		
16-17h	5.70	5.69	5.77	5.49	5.03	5.36	4.77	5.54	0.30	5.5%	5.54	0.30	5.5%	5.06	0.41	8.1%	5.06	0.41	8.1%		
17-18h	5.04	6.95	6.67	6.85	5.97	4.62	5.10	6.30	0.80	12.7%	6.30	0.80	12.7%	4.86	0.34	7.0%	4.86	0.34	7.0%		
18-19h	6.08	8.34	7.56	7.27	6.33	11.38	6.93	7.12	0.92	13.0%	7.12	0.92	13.0%	9.15	3.14	34.3%	9.15	3.14	34.3%		
19-20h	7.42	8.62	6.68	7.46	8.46	7.67	6.23	7.73	0.81	10.4%	7.73	0.81	10.4%	6.95	1.02	14.7%	6.95	1.02	14.7%		
20-21h	8.19	8.74	6.22	6.86	6.62	6.09	5.87	7.33	1.08	14.7%	7.33	1.08	14.7%	5.98	0.16	2.7%	5.98	0.16	2.7%		
21-22h	7.43	5.76	6.70	6.17	6.71	4.81	6.23	6.55	0.63	9.6%	6.55	0.63	9.6%	5.52	1.00	18.2%	5.52	1.00	18.2%		
22-23h	5.26	6.02	4.98	5.29	7.88	6.66	5.54	5.88	1.18	20.0%	5.88	1.18	20.0%	6.10	0.80	13.0%	6.10	0.80	13.0%		
23-00h	6.69	5.10	4.48	4.91	5.11	3.25	5.35	5.26	0.84	15.9%	5.26	0.84	15.9%	4.30	1.48	34.5%	4.30	1.48	34.5%		
	Q_{24,všed}												6.21			Q_{24,vík}			5.98		
													l/s			l/s			l/s		

Příloha C - Graf denních objemů proteklé odpadní vody



Příloha D - Rozšířené časové úseky kalibračních grafů

