VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

HYDROLOGICKO-HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ STOKOVÝCH SÍTÍ

HYDROLOGICAL-HYDRAULIC MODELING OF SEWER NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — Adam Filip

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Tomáš Macsek, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2026

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav vodního hospodářství obcí
Student:	**Adam Filip**
Vedoucí práce:	**Ing. Tomáš Macsek, Ph.D.**
Akademický rok:	2025/26
Studijní program:	B0732A260005 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Vodní hospodářství a vodní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student v teoretické části vypracuje rešerši zaměřenou na hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí. V ní objasní účel těchto modelů, představí základní principy fungování a popíše potřebné vstupní podklady pro vytvoření modelu a jeho kalibraci. V rešeršní části student dále popíše základní prvky modelu, které využívá software EPA SWMM.
V praktické části student vytvoří nekalibrovaný model stokové sítě vybrané oblasti urbanizovaného území v softwaru EPA SWMM.

Cíle a výstupy bakalářské práce:

1) Rešerše tématu hydrologicko-hydraulického modelování stokových systémů v urbanizovaných územích, popis principů a potřebných vstupních dat.
2) Popis programu EPA SWMM a jeho jednotlivých prvků.
3) Vytvoření nekalibrovaného hydrologicko-hydraulického modelu urbanizovaného území.

Seznam doporučené literatury a podklady:

[1] Rossman, L. A., & Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model: Reference manual. Volume I – Hydrology (Revised). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory. https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm

[2] Rossman, L. A. (2017, May). Storm Water Management Model: Reference manual. Volume II – Hydraulics. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Laboratory. https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm

[3] SUCHÁNEK, Milan, Petr SÝKORA a David STRÁNSKÝ, [2012]. Monitoring v městském odvodnění, Část I. Dešťové srážky. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR. ISBN 978-80-87140-25-3.

[4] ŽOUŽELA, M.; SÝKORA, P.; SUCHÁNEK, M.; STRÁNSKÝ, D. Monitoring v městském odvodnění, Část II. - Měření úrovně hladiny a průtoku. Praha: Sdružení vodovodů a kanalizací ČR, z.s. (SOVAK ČR), 2024. 116 s. ISBN: 978-80-907303-5-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 12. 11. 2025

L. S.

doc. Ing. Petr Hluštík, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Tomáš Macsek, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou hydrologicko-hydraulického modelování stokových systémů v urbanizovaných územích jako moderního nástroje pro analýzu a posuzování městského odvodnění. Teoretická část práce obsahuje rešerši základních principů transformace srážky na odtok, vlivu urbanizace na odtokové poměry a popis klíčových procesů. Dále je v práci představen matematický popis proudění a provedeno srovnání dostupných softwarových nástrojů s hlavním důrazem na program EPA SWMM. Praktická část je zaměřena na vytvoření nekalibrovaného hydrologicko-hydraulického modelu stokové sítě pro vybranou část města Hulín v prostředí softwaru EPA SWMM. Na základě dostupných geografických a technických podkladů byl sestaven dynamický model a provedena simulace srážko-odtokové situace. Výsledky modelování jsou vyhodnoceny z hlediska hydraulického zatížení potrubní sítě, přičemž jsou identifikována potenciálně kritická a kapacitně přetížená místa systému. Práce slouží jako ucelený metodický přehled a podklad pro případný další rozvoj.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stoková síť, hydrologicko-hydraulické modelování, srážko-odtokový proces, nekalibrovaný model.

ABSTRACT

This bachelor's thesis addresses the issue of hydrological and hydraulic modeling of sewer systems in urbanized areas as a modern tool for the analysis and assessment of urban drainage. The theoretical part presents a literature review of the fundamental principles of rainfall-runoff transformation, the impact of urbanization on runoff patterns, and a description of key processes. Furthermore, the thesis introduces the mathematical description of fluid flow and compares available software tools, focusing primarily on the EPA SWMM software. The practical part is dedicated to creating an uncalibrated hydrological-hydraulic model of a sewer network for a selected part of the town of Hulín using the EPA SWMM environment. Based on available geographical and technical data, a dynamic model was compiled, and a simulation of a rainfall-runoff event was performed. The modeling results are evaluated from the perspective of the hydraulic loading of the pipe network, identifying potentially critical and capacity-overloaded nodes within the system. The thesis serves as a comprehensive methodological overview and a baseline for future development.

KEYWORDS

Sewer network, hydrological-hydraulic modeling, rainfall-runoff process, uncalibrated model.

BIBLIOFGRAFICKÁ CITACE

FILIP, Adam. *Hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí*. Online, bakalářská práce. Tomáš MACSEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2026. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/174681. [cit. 2026-05-25].

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2026

Adam Filip
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2026

Adam Filip
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Tomáši Macsekovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, věcné připomínky a čas, který mi v průběhu zpracování práce věnoval. A poděkování patří i provozovateli kanalizace VaK Kroměříž za poskytnutá data.

V Brně dne 25. 5. 2026

Adam Filip
autor práce

OBSAH

1 ÚVOD 12

2 HYDROLOGICKO-HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ STOKOVÝCH SÍTÍ 14

2.1 ÚČEL A VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ V MĚSTSKÉM ODVODNĚNÍ 14

2.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY HYDROLOGICKÉHO MODELOVÁNÍ 15

2.2.1 INFILTRACE 17

2.2.2 RETENCE POVRCHOVÉHO ODTOKU 19

2.2.3 MORFOLOGIE POVODÍ 19

2.3 TYPY HYDRAULICKÝCH MODELŮ A PŘÍSTUPY K MODELOVÁNÍ 20

2.3.1 STEADY FLOW (USTÁLENÉ PROUDĚNÍ) 21

2.3.2 KINEMATIC WAVE (KINEMATICKÁ VLNA) 21

2.3.3 DYNAMIC WAVE (DYNAMICKÁ VLNA) 21

2.4 VSTUPNÍ PODKLADY PRO VYTVOŘENÍ MODELU A KVALITA DAT 22

2.4.1 GEOMETRIE STOKOVÉ SÍTĚ 23

2.4.2 PARAMETRY ÚZEMÍ (POVODÍ) 24

2.4.3 SRÁŽKOVÁ DATA 25

2.4.4 KVALITA VSTUPNÍCH DAT 27

2.5 KALIBRACE A VALIDACE MODELU 27

2.5.1 MONITOROVACÍ DATA A POŽADAVKY NA MĚŘENÍ 27

2.5.2 PRŮBĚH KALIBRACE MODELU 29

2.5.3 HODNOCENÍ SHODY MODELU S MĚŘENÍM 30

2.5.4 VALIDACE MODELU 30

2.6 OMEZENÍ NEKALIBROVANÉHO MODELU 30

2.7 REŠERŠE DOSTUPNÉHO SOFTWARU 31

2.7.1 EPA SWMM 31

2.7.2 MIKE (DHI) 32

2.7.3 INNOVYZE (INFOWORKS ICM) 32

2.7.4 QGIS A PLUGINY PRO MODELOVÁNÍ 32

2.7.5 SHRNUTÍ A VOLBA SOFTWARU 33

3 SOFTWARE EPA SWMM 34

3.1 CHARAKTERISTIKA PROGRAMU 34

3.2 HISTORIE A VÝVOJ PROGRAMU 34

3.3 OBLASTI VYUŽITÍ PROGRAMU EPA SWMM 35

3.4 STRUKTURA MODELU V SWMM 38
3.4.1 STOKOVÁ SÍŤ (NODES + LINKS) 38
3.4.2 POVODÍ (SUBCATCHMENS) 41
3.4.3 SRÁŽKOVÁ DATA 43

3.5 HYDROLOGICKÉ PROCESY V PROGRAMU EPA SWMM 44

3.6 HYDRAULICKÉ VÝPOČTY V PROGRAMU EPA SWMM 45

4 TVORBA NEKALIBROVANÉHO MODELU V EPA SWMM 46

4.1 POPIS STOKOVÉ SÍTĚ A ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ 46

4.2 DOSTUPNÉ PODKLADY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ 47

4.3 DOPLŇUJÍCÍ DATA Z EXTERNÍCH ZDROJŮ 49
4.3.1 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU 49
4.3.2 PŮDNÍ POMĚRY A GEOLOGICKÉ POMĚRY 50
4.3.3 ODHAD A INTERPOLACE NEZNÁMÝCH PARAMETRŮ 51

4.4 PŘÍPRAVA DAT V PROSTŘEDÍ GIS 51

4.5 SESTAVENÍ MODELU V EPA SWMM 54

4.6 PARAMETRY DÍLČÍCH POVODÍ 58

4.7 SPECIFIKA STOKOVÉ SÍTĚ V ŘEŠENÉM ÚZEMÍ 61

4.8 NEJISTOTY A OMEZENÍ VSTUPNÍCH DAT 61

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE 62

5.1 PRŮBĚHY PRŮTOKŮ A HLADIN 62

5.2 IDENTIFIKACE KRITICKÝCH MÍST 64
5.2.1 VYSOKÉ HYDRAULICKÉ ZATÍŽENÍ ÚSEKŮ 64
5.2.2 KMENOVÝ SBĚRAČ PŘED KŘÍŽENÍM ŽELEZNIČNÍ TRATĚ 66
5.2.3 ODLEHČOVACÍ KOMORA DO TOKU RUSAVA 68

6 ZÁVĚR 69

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 70

8 SEZNAM OBRÁZKŮ 73

9 SEZNAM TABULEK 76

10 SEZNAM GRAFŮ 77

11 PŘÍLOHY 78

1 ÚVOD

Městské odvodnění představuje nedílnou součást technické infrastruktury urbanizovaných území a hraje zásadní roli v oblasti vodního hospodářství obcí [1][2]. Jeho hlavním úkolem je bezpečný a spolehlivý odvod odpadních a srážkových vod tak, aby nedocházelo k ohrožení obyvatelstva, poškození majetku ani negativním dopadům na životní prostředí [2]. Funkční a kapacitně vyhovující stokové systémy jsou základním předpokladem udržitelného rozvoje sídel a ochrany vodních zdrojů [1].

V současné době dochází v důsledku urbanizace a klimatických změn k významným změnám v odtokových poměrech urbanizovaných území [1]. Zvyšuje se podíl nepropustných ploch, jako jsou komunikace, střechy a zpevněné plochy, které výrazně omezují infiltraci srážkových vod do půdy [3]. Současně dochází k častějšímu výskytu krátkodobých intenzivních srážek, které představují značné hydraulické zatížení stokových systémů [1]. Tyto faktory vedou ke zvyšování rizika hydraulického přetížení kanalizačních sítí, lokálních záplav a zatopení objektů [2].

Obr. 1 Hydraulické přetížení městské kanalizační sítě během přívalových srážek projevující se vytékáním vody z šachty na povrch vozovky [4]

S ohledem na tyto skutečnosti je nezbytné využívat moderní nástroje, které umožňují analyzovat chování stokových systémů při různých srážkových situacích a provozních stavech [3]. Hydrologicko-hydraulické modelování představuje jeden z nejvýznamnějších nástrojů současného vodního hospodářství, který umožňuje simulovat transformaci srážky na odtok, proudění vody ve stokové síti a vzájemnou interakci jednotlivých prvků systému [3][5]. Pomocí matematických modelů lze posuzovat kapacitu stokových sítí, identifikovat kritická místa a navrhovat vhodná technická opatření [5].

Hydrologicko-hydraulické modely se v současnosti běžně využívají při návrhu nových kanalizačních systémů, rozšiřování stávajících sítí, rekonstrukcích stávajících sítí, hodnocení vlivu klimatické změny i při optimalizaci provozu městského odvodnění [1][6]. Význam modelování dále roste s rozvojem výpočetní techniky a dostupností digitálních dat o území, stokových sítích a srážkových událostech [3]. Modelování umožňuje provádět analýzu různých scénářů zatížení systému bez nutnosti fyzických zásahů do infrastruktury a představuje tak efektivní nástroj pro rozhodovací procesy v oblasti vodního hospodářství [5].

Jedním z nejrozšířenějších programů pro hydrologicko-hydraulické modelování městského odvodnění je software EPA SWMM (Storm Water Management Model) [3][5][7]. Tento program, vyvinutý Agenturou pro ochranu životního prostředí Spojených států amerických, umožňuje dynamickou simulaci srážko-odtokových procesů a proudění vody ve stokových systémech [5]. Program je využíván jak v inženýrské praxi, tak ve výzkumu a výuce na technických vysokých školách [3].

Cílem této bakalářské práce je zpracování rešerše problematiky hydrologicko-hydraulického modelování stokových systémů v urbanizovaných územích, popis základních principů fungování modelů a potřebných vstupních podkladů pro jejich tvorbu [3]. Dalším cílem je charakterizovat software EPA SWMM a jeho základní prvky využívané při modelování stokových sítí [5]. Praktická část práce je zaměřena na vytvoření nekalibrovaného hydrologicko-hydraulického modelu stokové sítě vybrané části urbanizovaného území v prostředí programu EPA SWMM [3][5].

Zpracování práce vychází ze studia odborné literatury, technických norem a manuálů programu EPA SWMM [3][5]. Na základě dostupných podkladů o zájmovém území je následně vytvořen model stokové sítě a provedena simulace srážko-odtokové situace [3]. Výsledky modelování jsou vyhodnoceny z hlediska hydraulického zatížení stokové sítě a identifikace potenciálně kritických míst [5].

Výsledkem práce je ucelený přehled problematiky hydrologicko-hydraulického modelování městského odvodnění a praktická ukázka využití programu EPA SWMM pro tvorbu modelu stokové sítě části města Hulín [3][5]. Práce může sloužit jako podklad pro další rozvoj modelu, jeho kalibraci a využití při návrhu opatření ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti odvodnění urbanizovaných území [8].

2 HYDROLOGICKO-HYDRAULICKÉ MODELOVÁNÍ STOKOVÝCH SÍTÍ

2.1 ÚČEL A VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ V MĚSTSKÉM ODVODNĚNÍ

Městské odvodnění představuje komplexní systém technických opatření, jehož hlavním cílem je zajištění bezpečného odvádění odpadních a srážkových vod z urbanizovaných území [1]. Návrh, provoz a posuzování stokových sítí se v České republice řídí zejména normou ČSN EN 752 – Odvodňovací a stokové sítě vně budov [9], ČSN 75 6101 – Stokové sítě a kanalizační přípojky [10], ČSN 75 9010 – Vsakovací zařízení srážkových vod [11], ČSN 75 6262 – Odlehčovací komory [12], ČSN 75 6261 – Dešťové nádrže [13], ČSN EN 1671 – Venkovní tlakové systémy stokových sítí [14]. Stanovují obecné požadavky na navrhování, výstavbu a provoz stokových sítí a kanalizačních přípojek. Normy zdůrazňují nutnost zajistit odpovídající hydraulickou kapacitu systému, ochranu před zaplavováním a minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí [9].

V praxi se však stále častěji ukazuje, že pouhé návrhové výpočty založené na zjednodušených metodách již nejsou dostatečné [6]. Urbanizace, zvyšující se podíl nepropustných ploch a změny charakteru srážek vedou k situacím, které nelze spolehlivě popsat pouze statickými návrhovými postupy [1]. Z tohoto důvodu se hydrologicko-hydraulické modelování stalo standardním nástrojem při posuzování stokových sítí [3].

Účel modelování lze rozdělit do několika hlavních oblastí.

První oblastí je návrh a dimenzování nových stokových sítí [5]. Model umožňuje ověřit, zda navržené profily potrubí, sklony a retenční objemy zajistí bezpečný odvod návrhových průtoků [6]. Oproti klasickým výpočtům poskytuje dynamický model detailní informace o časovém průběhu průtoků, zaplnění profilů a případném vzniku tlakových stavů [5].

Druhou oblastí je posouzení kapacity stávajících stokových systémů. V mnoha obcích byly kanalizační sítě budovány v době, kdy intenzita zástavby i charakter srážek byly odlišné od současného stavu [1]. Modelování umožňuje identifikovat úseky, které jsou hydraulicky přetížené, a navrhnout vhodná technická opatření, například zvětšení profilu, doplnění retenční nádrže nebo změnu provozního režimu [2][6].

Třetí významnou oblastí je analýza zaplavování a zpětného vzdutí. Norma ČSN EN 752 klade důraz na ochranu objektů před zatopením a na omezení rizika výstupu vody na povrch [9]. Hydraulický model umožňuje simulovat extrémní srážkové události a určit, při jakých podmínkách dochází k překročení kapacity stok nebo k zatopení uzlů [5].

Modelování se rovněž využívá při hodnocení dopadů klimatické změny [6]. Zvýšená četnost krátkodobých intenzivních srážek představuje nové zatížení kanalizačních systémů [1]. Pomocí modelu lze testovat scénáře s vyšší intenzitou deště a posoudit odolnost systému vůči budoucím podmínkám [6].

V neposlední řadě slouží modelování k optimalizaci provozu kanalizačních systémů [5]. To se týká zejména systémů s retenčními objekty, přelivy nebo čerpacími stanicemi, kde je možné řízením provozu ovlivnit hydraulické zatížení sítě [8].

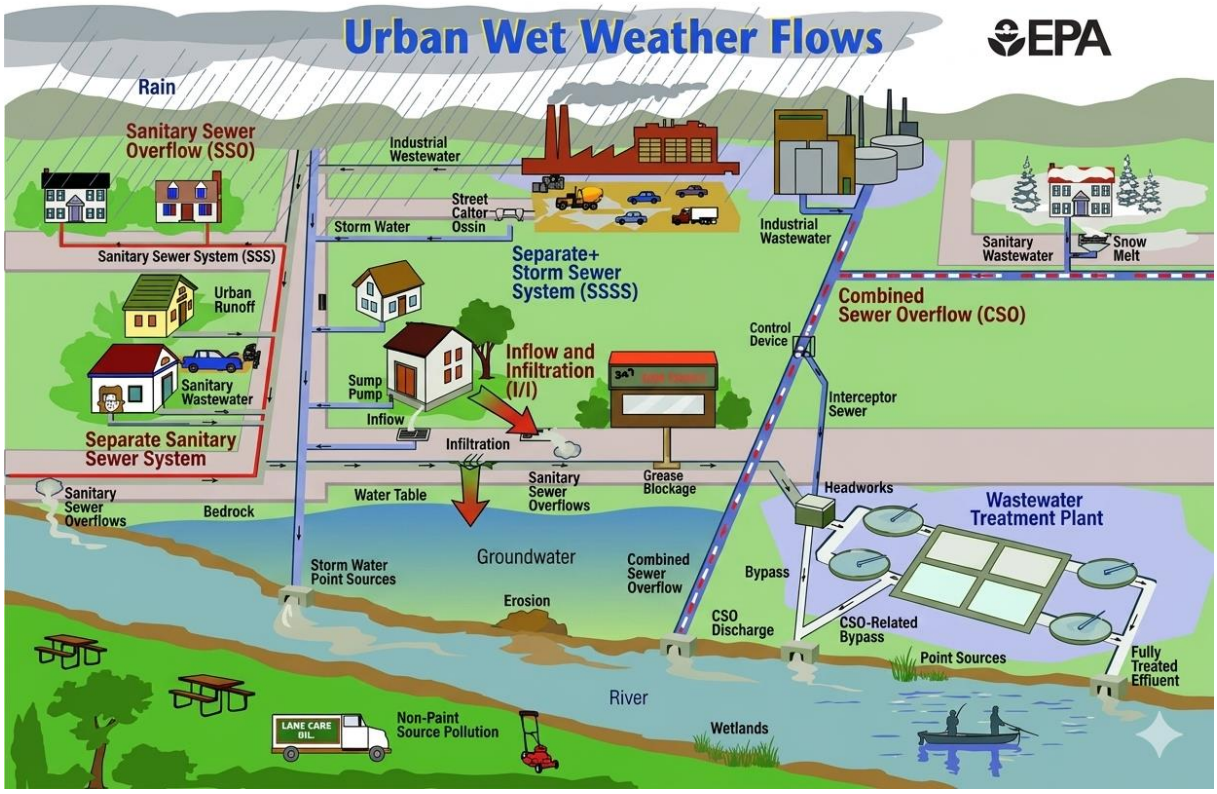
Hydrologicko-hydraulické modelování tedy nepředstavuje pouze nástroj návrhu, ale komplexní prostředek pro analýzu, řízení a plánování rozvoje městského odvodnění [3].

V současnosti se význam modelování dále rozšiřuje v souvislosti s konceptem digitálního dvojčete. Digitální dvojče kanalizační sítě představuje virtuální model reálného systému, který je propojen s aktuálními daty z monitorovacích zařízení, jako jsou srážkoměry, hladinoměry nebo průtokoměry. Na rozdíl od klasického modelu, který je využíván převážně pro scénářové výpočty, digitální dvojče umožňuje průběžnou aktualizaci stavu systému a jeho chování v reálném čase. To otevírá možnosti pro operativní řízení stokové sítě, včasné varování před vznikem kritických stavů nebo efektivnější využívání retenčních objemů. Digitální dvojče tak představuje významný krok směrem k tzv. chytrému městskému odvodnění (smart drainage), kde je důraz kladen na integraci dat, automatizaci a adaptivní řízení infrastruktury [8].

Dalším důležitým nástrojem plánování je generel odvodnění, který představuje koncepční dokument řešící dlouhodobý rozvoj stokového systému na území obce nebo města. Generel vychází z podrobné analýzy stávající infrastruktury, demografického vývoje, územního plánování a očekávaných změn klimatu [1]. Součástí generelu bývá právě i hydrologicko-hydraulický model, který slouží jako podklad pro posouzení kapacity systému a návrh potřebných opatření. Na základě výsledků modelování jsou definovány investiční priority, návrh rekonstrukcí, rozšíření sítě nebo budování nových retenčních a akumulačních objektů. Generel tak představuje strategický dokument, který propojuje technické, ekonomické i environmentální aspekty rozvoje městského odvodnění a umožňuje systematické a udržitelné plánování infrastruktury [9].

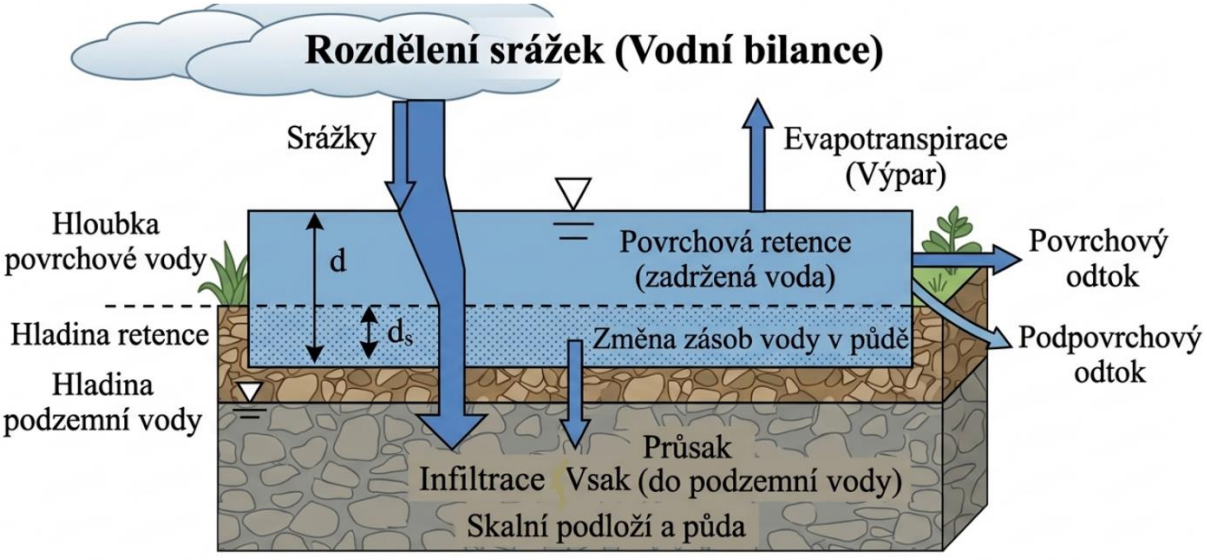
2.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY HYDROLOGICKÉHO MODELOVÁNÍ

Hydrologická část modelu popisuje proces transformace srážky na povrchový odtok [3]. Tento proces je v urbanizovaném území zásadně odlišný od přirozeného povodí [6]. Zatímco v nezastavěném území je značná část srážky zachycena vegetací, infiltruje do půdy nebo se postupně odpaří, v městském prostředí dochází k rychlému soustředění vody do kanalizační sítě [3][6].



Obr. 2 Schéma znázorňující jednotlivé prvky typického městského odvodňovacího systému [3]

Transformace srážky na odtok je základním hydrologickým procesem modelování. Při dopadu srážky na povrch se voda nejprve akumuluje v povrchových nerovnostech a částečně infiltruje do půdy. Teprve po překročení retenční kapacity povrchu dochází ke vzniku povrchového odtoku [3].



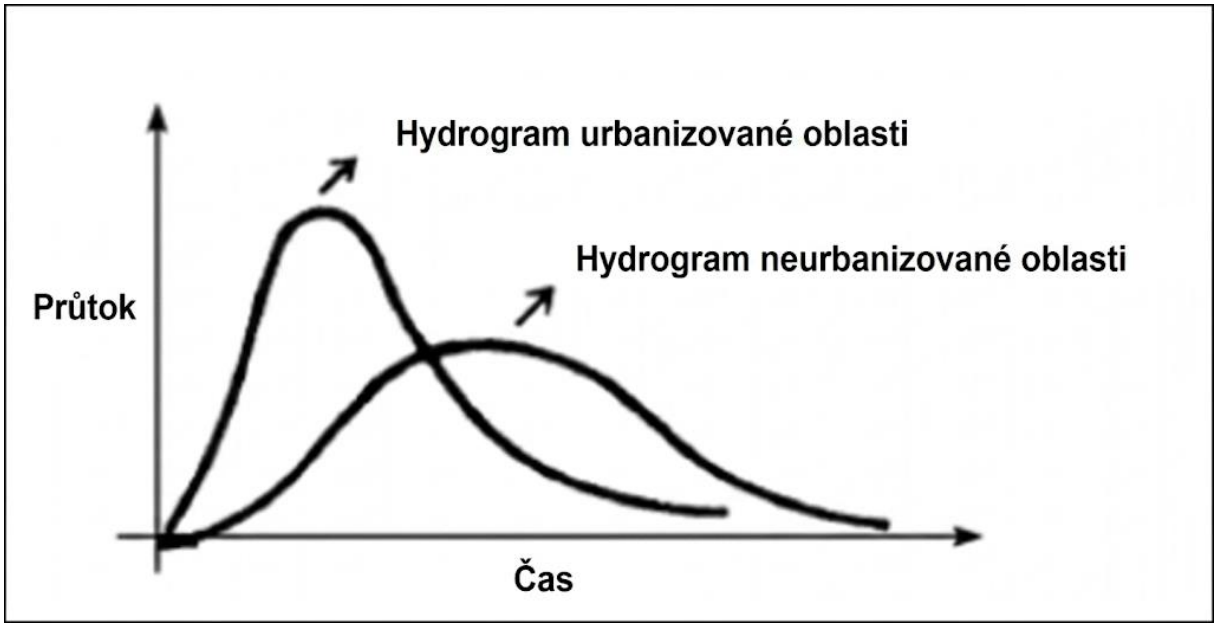
Obr. 3 Schematické rozdělení srážek po dopadu na povrch (Vodní bilance) [3], přeloženo do češtiny a upraveno [15]

V městských oblastech je tento proces výrazně ovlivněn podílem nepropustných ploch [6]. Střechy, asfaltové komunikace a betonové plochy prakticky neumožňují infiltraci, což vede k rychlému nástupu odtoku a zvýšení kulminačních průtoků. Doba koncentrace povodí se tím výrazně zkracuje [3].

Hydrologické modely proto musí zohlednit:

- velikost dílčího povodí,
- jeho tvar,
- sklon povrchu,
- podíl nepropustných ploch,
- charakter povrchu [3].

Výsledkem výpočtu je hydrogram odtoku z jednotlivých povodí, který vstupuje do hydraulické části modelu [3].



Graf 1: Srovnání odtoku vody v urbanizované a přírodní krajině. Graf demonstruje, jak nepropustné povrchy ve městech zrychlují odtok a zvyšují riziko bleskových povodní oproti přirozenému prostředí, které vodu přirozeně tlumí [16]

2.2.1 INFILTRACE

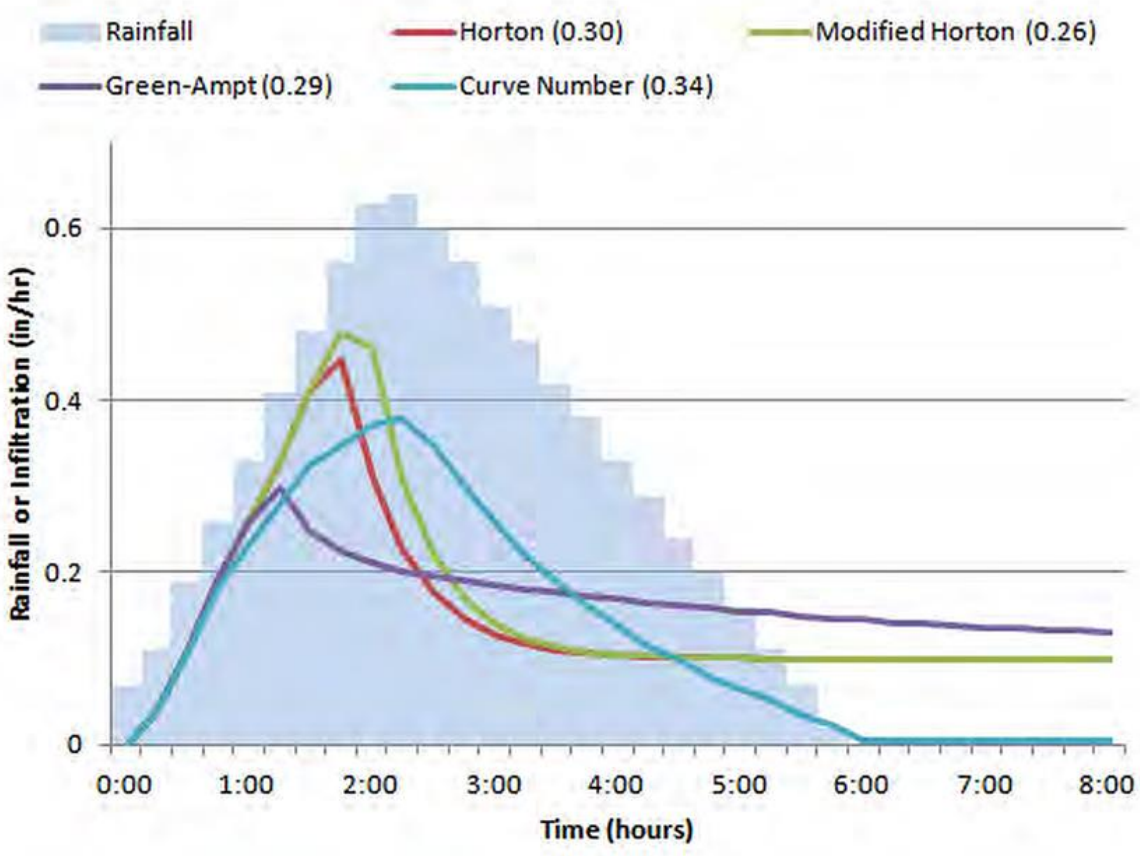
Infiltrace představuje proces vsakování vody do půdy. Její velikost závisí na vlastnostech půdy, počáteční vlhkosti a intenzitě srážky [3]. V urbanizovaných územích je infiltrace omezena především na zelené plochy, parky a zahrady. Významnou roli v podpoře infiltrace zde však hraje modrozelená infrastruktura, která zahrnuje opatření jako vsakovací pásy, průlehy, dešťové zahrady, zelené střechy nebo propustné povrchy. Tato opatření umožňují zvýšit podíl vsakování srážkové vody přímo v místě dopadu, čímž

dochází ke snížení povrchového odtoku a zatížení kanalizační sítě a zároveň k částečnému obnovení přirozeného vodního režimu v urbanizovaném prostředí [6].

V hydrologických modelech se nejčastěji používají tři přístupy [3]:

- Hortonova metoda popisuje exponenciální pokles infiltrační kapacity v čase. Je vhodná pro dynamické modelování krátkodobých srážkových událostí [3].
- Green-Amptova metoda vychází z fyzikálního popisu infiltrační fronty a zohledňuje sací tlak půdy a její hydraulickou vodivost. Je přesnější, avšak vyžaduje detailní vstupní údaje [3].
- Metoda Curve Number (SCS-CN) je empirický přístup, který je často využíván v jednodušších modelech. V městských podmínkách je její použití omezené, neboť nezohledňuje časový průběh infiltrace [3].

Správná volba infiltrační metody má významný vliv na výsledky modelování, zejména na velikost kulminačních průtoků [3].



Graf 2: Průběh infiltrace a srážkového hyetogramu modelovaný různými metodami (Horton, modifikovaný Horton, Green-Ampt, Curve Number). Hodnoty v závorkách v legendě značí podíl srážek, který se transformuje na povrchový odtok [3]

2.2.2 RETENCE POVRCHOVÉHO ODTOKU

Retence představuje dočasné zadržení vody v povodí před jejím odtokem do kanalizační sítě. V urbanizovaném prostředí má retence významný vliv na průběh odtoku, zejména na velikost kulminačního průtoku a dobu jeho nástupu. Čím větší je schopnost území vodu zadržet, tím více dochází ke zpomalení odtokového procesu a snížení hydraulického zatížení stokové sítě. V určitých případech může dojít i k zadržení vody bez následného odtoku (vzniku louží), s postupnou infiltrací do podloží nebo se odpaří [6].

V městském prostředí je retence ovlivněna především charakterem povrchu a způsobem využití území. Významnou roli hrají zejména nerovnosti povrchu, ve kterých se voda dočasně akumuluje, dále zelené plochy, které umožňují částečnou infiltraci, a v neposlední řadě také technická opatření, jako jsou retenční nádrže, vsakovací objekty nebo prvky modrozelené infrastruktury. Tyto prvky napomáhají ke snížení objemu i rychlosti odtoku a přispívají k stabilizaci odtokových poměrů [6].

V hydrologických modelech je retence obvykle vyjadřována pomocí parametrů, jako je retenční výška povrchových depresí nebo charakteristika povrchové drsnosti. Tyto parametry ovlivňují okamžik vzniku odtoku i jeho další průběh. Správné stanovení retenčních vlastností povodí je proto důležité pro realistické modelování srážko-odtokových procesů [3].

Z hlediska městského odvodnění má retence zásadní význam především při návrhu opatření hospodaření se srážkovými vodami. Snahou současného přístupu je co nejvíce přiblížit odtokové poměry urbanizovaného území přirozenému stavu, což zahrnuje podporu zadržení vody v místě jejího dopadu a omezení jejího rychlého odvádění kanalizační sítí [3].

2.2.3 MORFOLOGIE POVODÍ

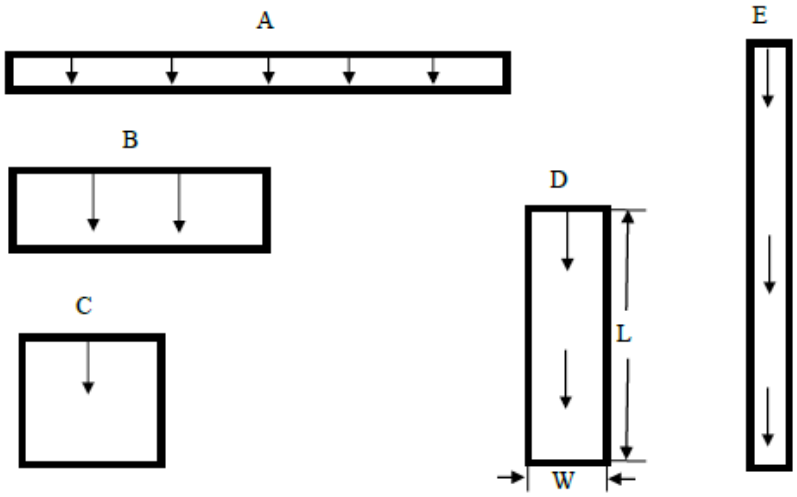
Morfologie povodí představuje soubor vlastností území, které ovlivňují vznik a průběh odtoku srážkových vod. Mezi základní morfologické charakteristiky patří především sklon povrchu, tvar povodí, délka odtokových drah a členitost terénu. Tyto faktory mají zásadní vliv na rychlost odtoku, dobu koncentrace a výsledný tvar hydrogramu [3].

Sklon povrchu ovlivňuje rychlost proudění vody po povrchu. Na strmějších plochách dochází k rychlejšímu odtoku a kratší době zdržení vody, což vede ke zvýšení kulminačního průtoku. Naopak při menších sklonech se voda pohybuje pomaleji, což umožňuje její částečné zadržení a snižuje zatížení stokové sítě [3].

Tvar povodí ovlivňuje souběh odtoků z jednotlivých částí území. Kompaktní povodí s krátkými odtokovými drahami způsobuje rychlé soustředění odtoku v jednom časovém okamžiku, což vede k vyšším kulminačním průtokům. Protáhlé povodí naopak umožňuje postupné přitékání vody do odtokového profilu a tím dochází k rozložení odtoku v čase [6].

Dalším důležitým faktorem je členitost terénu, která určuje množství přirozených depresí a nerovností schopných zadržet vodu. V přirozeném prostředí tyto prvky významně přispívají k retenci a zpomalují odtok. V urbanizovaných územích je však přirozená morfologie často upravena, což vede ke snížení retenční schopnosti území a ke zrychlení odtokových procesů [6].

V hydrologicko-hydraulických modelech jsou morfologické vlastnosti povodí zohledňovány prostřednictvím parametrů, jako je sklon, plocha nebo šířka povodí. Tyto parametry mají přímý vliv na výpočet odtoku a jejich správné stanovení je nezbytné pro dosažení realistických výsledků modelování [3].



Obr. 4 Schematické znázornění obdélníkových dílčích povodí pro demonstraci vlivu tvaru a šířky povodí na odtok [3]

2.3 TYPY HYDRAULICKÝCH MODELŮ A PŘÍSTUPY K MODELOVÁNÍ

Hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí lze realizovat různými přístupy, které se liší zejména úrovní detailu, matematickým popisem proudění a nároky na vstupní data. Volba konkrétního přístupu závisí především na účelu modelování, dostupnosti podkladů a požadované přesnosti výsledků [5].

V hydraulickém modelování stokových sítí se nejčastěji rozlišují tři základní přístupy, a to modelování ustáleného proudění (steady flow), modelování pomocí kinematické vlny (kinematic wave) a modelování pomocí dynamické vlny (dynamic wave). Tyto přístupy se liší především mírou zjednodušení fyzikálního popisu proudění a schopností zachytit jednotlivé hydraulické jevy [5].

2.3.1 STEADY FLOW (USTÁLENÉ PROUDĚNÍ)

Modelování ustáleného proudění vychází z předpokladu, že průtok a hydraulické poměry v systému se v čase nemění. Tento přístup je založen na řešení rovnic pro ustálené proudění, kdy se neuvažuje časová proměnnost srážky ani odtoku [5].

V praxi se steady flow využívá především pro návrhové výpočty jednotlivých úseků stokové sítě, například při dimenzování potrubí nebo posuzování jeho kapacity. Výhodou tohoto přístupu je jeho jednoduchost a nízká výpočetní náročnost [5].

Nevýhodou je naopak neschopnost zachytit dynamické jevy, které jsou pro městské odvodnění typické. Jedná se zejména o časový průběh srážky, postupné zaplňování potrubí, zpětné vzdutí nebo přechod do tlakového proudění. Z tohoto důvodu je použití ustáleného proudění v hydrologicko-hydraulickém modelování omezené a slouží spíše pro orientační nebo dílčí výpočty [5].

2.3.2 KINEMATIC WAVE (KINEMATICKÁ VLNA)

Modelování pomocí kinematické vlny představuje zjednodušený dynamický přístup, který zohledňuje časovou proměnnost odtoku, avšak zanedbává některé hydraulické jevy. Tento přístup vychází ze zjednodušené formy rovnice hybnosti, ve které nejsou uvažovány tlakové síly ani setrvačné účinky [5].

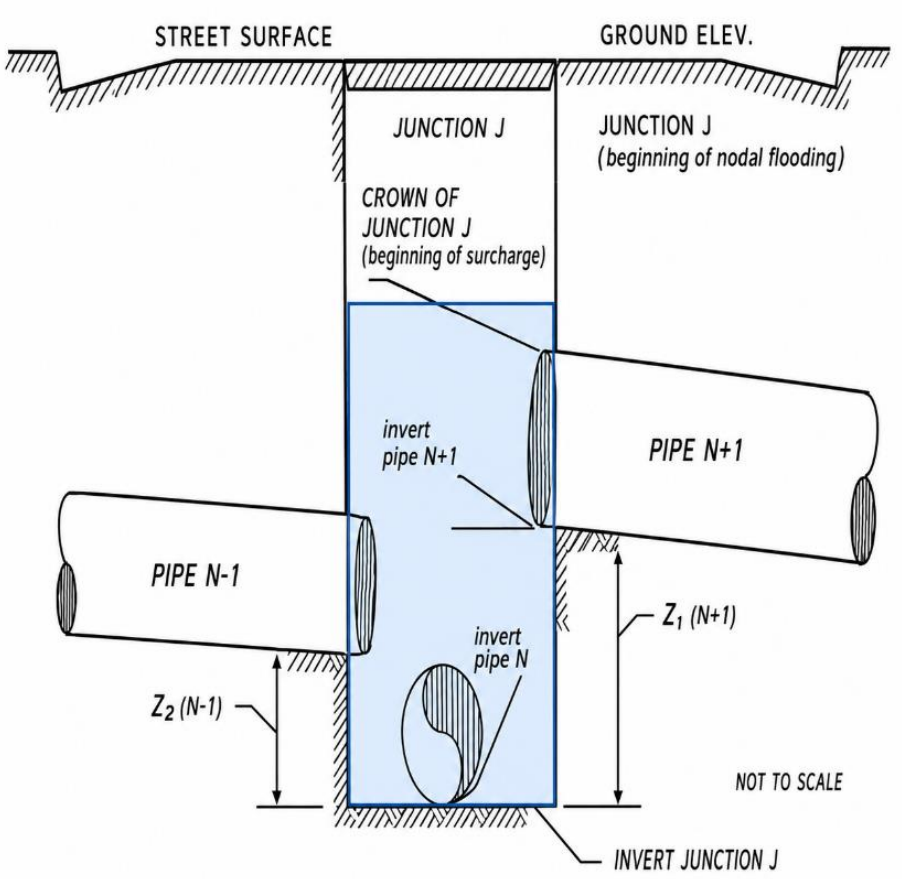
Kinematická vlna předpokládá, že proudění je řízeno především sklonem dna a třením, což je vhodné zejména pro případy, kdy nedochází k významnému vzdutí. Tento přístup je často využíván pro modelování odtoku na povrchu povodí nebo v jednodušších stokových systémech [5].

Výhodou kinematické vlny je nižší výpočetní náročnost a stabilita výpočtu. Nevýhodou je omezená schopnost popsat složitější hydraulické situace, jako je zpětné vzdutí, zaplavování uzlů nebo tlakové proudění. V urbanizovaných územích, kde jsou tyto jevy běžné, proto nemusí poskytovat dostatečně přesné výsledky [5].

2.3.3 DYNAMIC WAVE (DYNAMICKÁ VLNA)

Modelování pomocí dynamické vlny představuje nejpokročilejší a nejpřesnější přístup k hydraulickému modelování stokových sítí. Tento přístup je založen na řešení úplných Saint-Venantových rovnic, které popisují nestacionární proudění s ohledem na změny průtoku, tlaku a energie v čase i prostoru [5].

Dynamická vlna umožňuje zachytit všechny důležité hydraulické jevy, které se v kanalizačních systémech vyskytují. Patří mezi ně zejména zpětné vzdutí, přechod z proudění s volnou hladinou do tlakového režimu, zaplavování uzlů a interakce mezi jednotlivými částmi stokové sítě [5].



Obr. 5 Schematické znázornění hydraulického stavu zahlcení uzlového bodu (šachty) stokové sítě [5]

Tento přístup je standardně využíván v moderních hydrologicko-hydraulických modelech, včetně programu EPA SWMM. Umožňuje realistickou simulaci chování stokové sítě při různých srážkových situacích a poskytuje detailní informace o průběhu průtoků a hladin [7].

Nevýhodou dynamické vlny je vyšší výpočetní náročnost a citlivost na kvalitu vstupních dat. Pro správnou funkci modelu je nutné mít k dispozici přesné geometrické a hydraulické údaje. Přesto je tento přístup v současnosti považován za nejvhodnější pro detailní analýzu městského odvodnění [5].

2.4 VSTUPNÍ PODKLADY PRO VYTVOŘENÍ MODELU A KVALITA DAT

Kvalita hydrologicko-hydraulického modelu je zásadně ovlivněna kvalitou a úplností vstupních dat [3]. Nepřesné nebo neúplné podklady mohou vést k významným odchylkám mezi simulovaným a skutečným chováním systému. Při tvorbě modelu je proto nutné věnovat velkou pozornost sběru, kontrole a zpracování vstupních dat [8].

2.4.1 GEOMETRIE STOKOVÉ SÍTĚ

Základním vstupem pro hydraulickou část modelu jsou údaje o geometrii stokové sítě. Tyto údaje popisují reálné uspořádání kanalizačního systému a určují způsob proudění vody v jednotlivých úsecích [5].

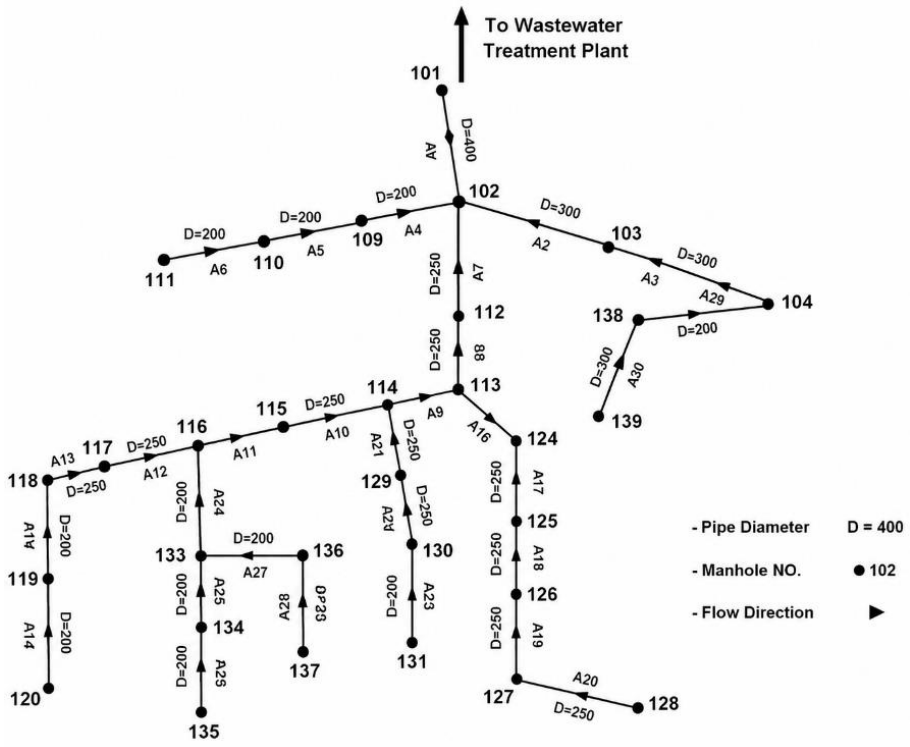
Mezi hlavní podklady patří:

- trasování stok,
- délky jednotlivých úseků,
- tvary a rozměry profilů,
- materiál potrubí,
- polohy a typy šachet,
- umístění hydraulických objektů [5].

Tyto informace jsou zpravidla získávány z projektové dokumentace, digitálních technických map nebo databází správců kanalizace. Důležitým zdrojem jsou také provozní řády kanalizačních systémů, které mohou obsahovat doplňující informace o funkci jednotlivých objektů, například čerpacích stanic nebo odlehčovacích komor [5].

Při zpracování podkladů je nutné ověřit jejich vzájemnou návaznost a správnost výškových údajů. Nepřesnosti v kótách dna nebo sklonu potrubí mohou výrazně ovlivnit výsledky hydraulického výpočtu [5].

Data o stokové síti jsou často dostupná v digitální podobě, ve specifické struktuře dat, například ve formátech CAD nebo GIS. Pro použití v modelu je nutné tato data převést do vhodného formátu, což může být časově náročné a může vést k chybám způsobeným převodem nebo neúplností podkladů [5].



Obr. 6 Výpočtové schéma reálné oddílné splaškové stokové sítě v městě Ámol (Írán) použité pro hydraulickou analýzu [17]

2.4.2 PARAMETRY ÚZEMÍ (POVODÍ)

Hydrologická část modelu vyžaduje definování parametrů povodí, ze kterých je generován povrchový odtok [3]. Tyto parametry popisují vlastnosti území a mají zásadní vliv na průběh srážko-odtokového procesu [6].

Mezi základní parametry patří:

- plocha povodí,
- podíl nepropustných ploch,
- sklon povrchu,
- tvar povodí,
- délka odtokových drah,
- typ povrchů,
- retenční vlastnosti,
- infiltrační parametry [3].

Podklady pro stanovení těchto parametrů jsou získávány zejména z ortofoto map, digitálního modelu terénu, mapy využití území a územně plánovací dokumentace. V některých případech je nutné využít také výkresovou dokumentaci nebo terénní průzkum [6].

Významnou roli hraje morfologie území, která ovlivňuje rychlost odtoku a dobu koncentrace. Správné stanovení těchto parametrů je důležité pro realistickou simulaci odtoku [6].

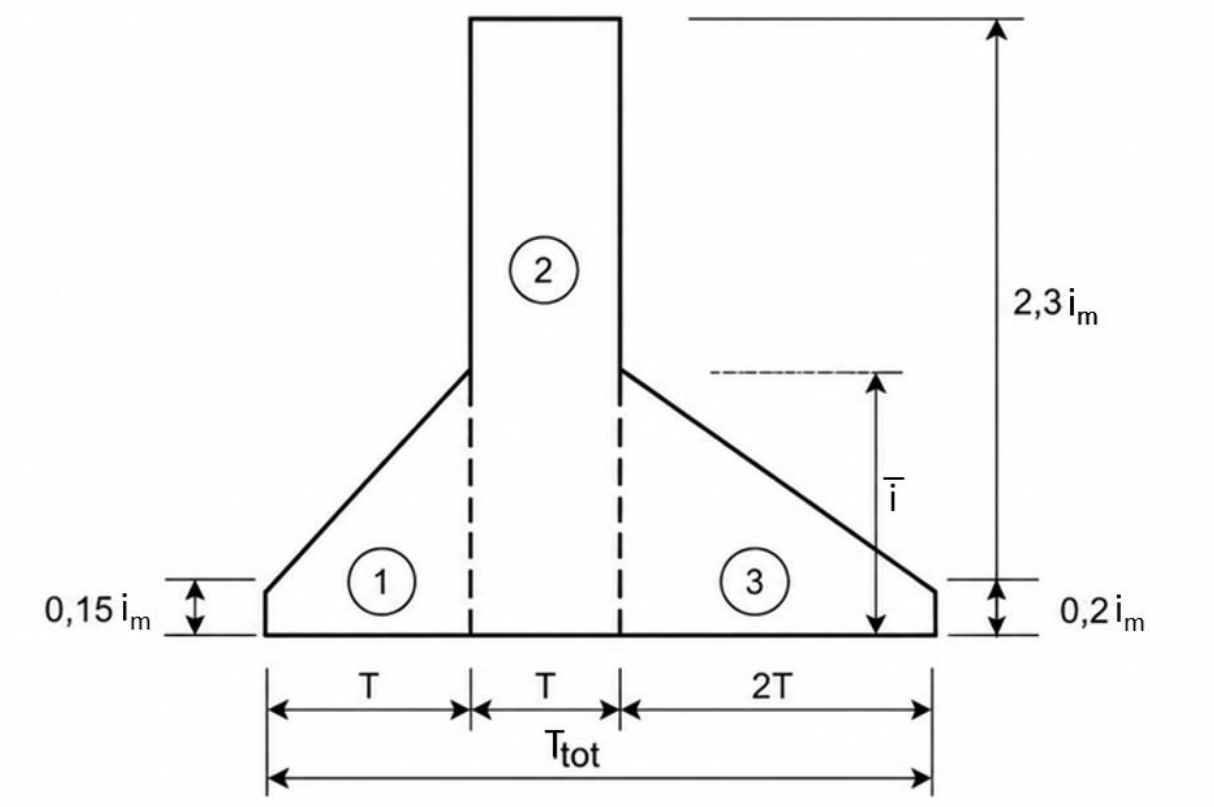
Data o území bývají dostupná v různých formátech, nejčastěji ve formě GIS vrstev. Pro jejich využití v modelu je nutné provést jejich zpracování a převod do databázové nebo tabulkové podoby. Tento proces může být časově náročný a může obsahovat určitou míru nejistoty, zejména při odhadu některých parametrů [6].

2.4.3 SRÁŽKOVÁ DATA

Srážková data představují klíčový vstup hydrologické části modelu. Jejich kvalita a časové rozlišení mají zásadní vliv na výsledky modelování, zejména na velikost kulminačních průtoků a časový průběh odtoku [1].

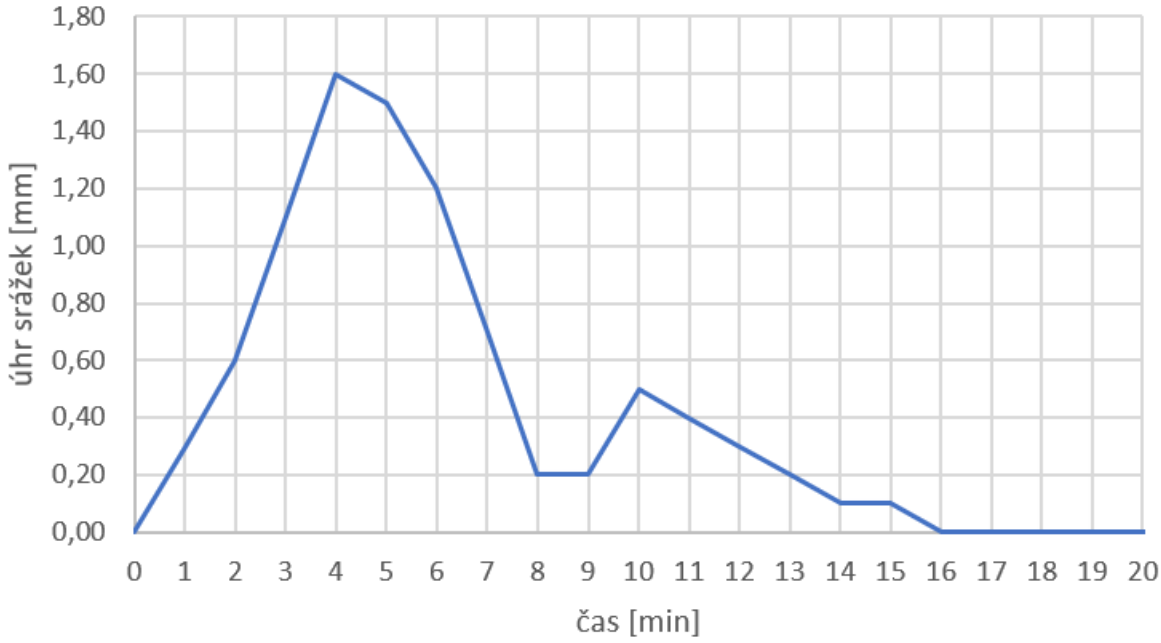
Pro modelování lze využít dva základní typy srážek, a to srážky syntetické a reálné [1].

Syntetické deště jsou uměle vytvořené návrhové srážky, které vycházejí ze statistického zpracování dlouhodobých měření. Používají se zejména pro návrhové výpočty a posouzení kapacity stokových sítí. Mezi nejčastěji používané typy patří blokové deště nebo časově proměnné návrhové deště s definovaným průběhem intenzity. Výhodou syntetických dešťů je jejich jednoduché použití a možnost porovnání výsledků různých modelů [1].



Obr. 7 Šifaldův syntetický déšť [1]

Reálné deště představují skutečně naměřené srážkové události. Jejich výhodou je realistický průběh, který zahrnuje proměnlivou intenzitu v čase. Délka reálných srážek může být velmi různá, od krátkodobých intenzivních přeháněk až po dlouhodobé srážkové epizody trvající několik hodin nebo dní [1].



Graf 3: Časový průběh srážkových úhrnů reálné dešťové události

Důležitým parametrem srážkových dat je jejich časové rozlišení, které se obvykle pohybuje v řádu minut. Při modelování menších urbanizovaných povodí je nutné použít dostatečně jemné časové rozlišení, jinak může dojít k podhodnocení kulminačních průtoků. S tím souvisí také hustota měření, tedy počet srážkoměrných stanic v daném území. Nedostatečná hustota může vést k nepřesnému zachycení prostorového rozložení srážek [18].

Srážková data jsou nejčastěji získávána ze srážkoměrných stanic, které mohou být buď klasické, nebo automatické. V současnosti se stále více využívají také meteorologické radary, které umožňují sledovat prostorové rozložení srážek v reálném čase. Radarová data však mohou obsahovat určitou míru nepřesnosti a je nutné je kalibrovat pomocí bodových měření [18].

Z hlediska zpracování jsou srážková data ukládána v digitální podobě, nejčastěji jako časové řady ve formě textových nebo databázových souborů. Pro použití v modelu je nutné tato data převést do formátu kompatibilního s daným softwarem, například do textových souborů typu .dat nebo .txt. Tento proces může být časově náročný a může být zatížen chybami, zejména při práci s velkým objemem dat [18].

2.4.4 KVALITA VSTUPNÍCH DAT

Kvalita vstupních dat představuje jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících spolehlivost modelu. Obecně platí, že nepřesná data nelze kompenzovat ani použitím pokročilého modelu. Je proto nutné věnovat maximální pozornost jejich kontrole a případnému doplnění [8].

Mezi nejčastější problémy patří:

- neúplná dokumentace stokové sítě,
- nepřesné výškové údaje,
- nedostatek srážkových dat,
- neznámé parametry povrchů,
- chybějící údaje o infiltračních parametrech řešeného území [8].

V takových případech je nutné využít odborný odhad nebo literární hodnoty parametrů a při interpretaci výsledků zohlednit zvýšenou míru nejistoty [8].

2.5 KALIBRACE A VALIDACE MODELU

Kalibrace hydrologicko-hydraulického modelu představuje proces úpravy modelových parametrů tak, aby simulované výsledky co nejlépe odpovídaly skutečnému chování stokového systému. Cílem kalibrace je dosažení shody mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami průtoků, výšek hladin nebo objemů odtoku. Na kalibraci navazuje validace modelu, která ověřuje jeho schopnost reprodukovat chování systému i při odlišných srážkových událostech [8].

2.5.1 MONITOROVACÍ DATA A POŽADAVKY NA MĚŘENÍ

Pro správnou kalibraci a validaci hydrologicko-hydraulického modelu je nezbytné zajistit kvalitní monitorovací data, která co nejvěrněji reprezentují reálné chování systému při srážko-odtokových událostech. Bez odpovídajících měřených dat není možné objektivně posoudit přesnost modelu ani vhodně nastavit jeho parametry. Monitorovací data tak představují klíčový podklad pro ověření funkčnosti modelu a jeho následné využití v praxi [3][5].

Základními sledovanými veličinami jsou zejména srážkové údaje a průtoky ve stokové síti. Tyto veličiny představují vstup a výstup modelu a jejich vzájemný vztah je zásadní pro správné nastavení hydrologických i hydraulických parametrů [3]. V některých případech mohou být doplněny také o měření hladin, rychlosti proudění nebo kvality vody, avšak pro základní kalibraci modelu jsou rozhodující především srážky a průtoky [5].

V případě měření srážek je nutné zajistit dostatečnou prostorovou i časovou reprezentativnost dat. Hustota srážkoměrné sítě by měla odpovídat velikosti a charakteru

řešeného území. V urbanizovaných oblastech se doporučuje umístění alespoň jednoho srážkoměru na jeden km², přičemž v případě výrazné prostorové variability srážek je vhodné hustotu měření dále zvýšit a umístit do pravidelné sítě. Nedostatečná hustota sítě může vést k nepřesnému zachycení srážkové události a následně ke zkreslení výsledků modelování [5].

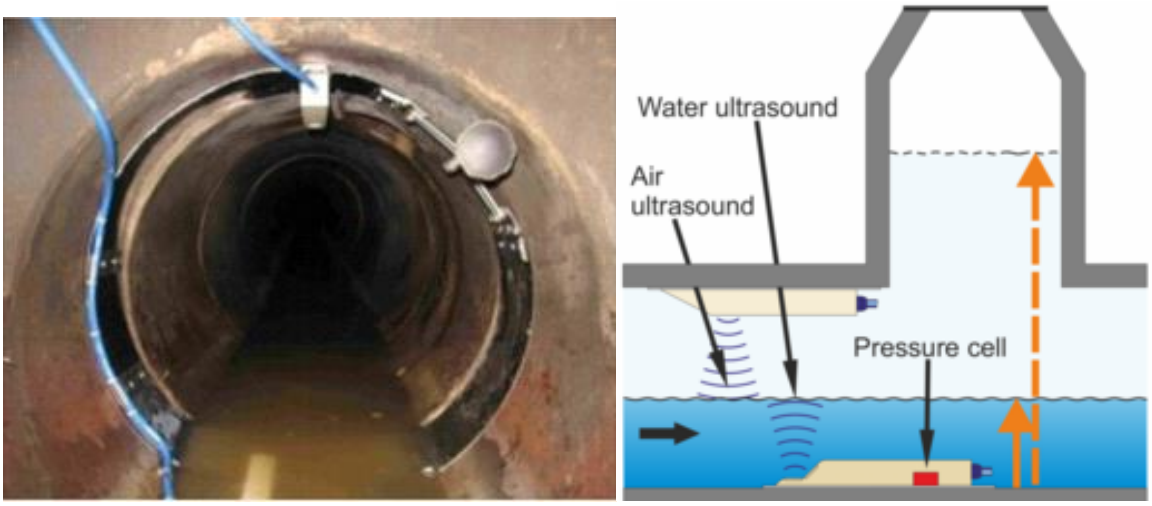
Velmi důležitým parametrem je časové rozlišení srážkových dat. Pro účely hydrologicko-hydraulického modelování městského odvodnění je nutné zachytit krátkodobé intenzivní srážky, které mají zásadní vliv na vznik povrchového odtoku a zatížení stokové sítě. V praxi se proto běžně používá časový krok záznamu na 1 minutu. Jemnější časové rozlišení umožňuje přesnější popis hyetogramu a lepší zachycení dynamiky srážkové události. Rozlišení samotného měření se obvykle pohybuje v řádu desetin milimetru srážky na jednotlivý záznam, což odpovídá přesnosti běžně používaných srážkoměrů [3].

Neméně důležitou složkou monitoringu jsou měření průtoků ve stokové síti. Průtokoměry by měly být umístěny na hydraulicky významných profilech, aby bylo možné zachytit charakteristické průběhy odtoku. Vhodná jsou zejména místa na hlavních stokách v přímých úsecích v dostatečné vzdálenosti od změny směru nebo sklonu potrubí. Na vtoku do odlehčovacích komor a na jejich výtocích, u čerpacích stanic nebo na výustích z řešeného území. Umístění měření by mělo rovněž odpovídat dílčím povodím, aby bylo možné porovnat simulované a skutečné průtoky z konkrétních částí systému [5].

Při návrhu umístění průtokoměrů je nutné respektovat hydraulické podmínky v daném profilu. Měřicí zařízení by měla být instalována v úsecích s ustáleným prouděním, kde nedochází k výraznému vzdutí, zpětnému proudění nebo turbulenci, které by mohly negativně ovlivnit přesnost měření. Nevhodně zvolené umístění může vést k významným chybám v naměřených datech a tím i ke zkreslení kalibrace modelu [5].

Z hlediska časového rozlišení by měla být data z průtokoměrů zaznamenávána v obdobném kroku jako srážková data, tedy v řádu minut. Tento požadavek je důležitý pro správné zachycení dynamiky odtoku, zejména rychlého nárůstu průtoku při nástupu srážky a následného poklesu na klesající větvi hydrogramu. Nedostatečné časové rozlišení může vést ke ztrátě informací o průběhu odtokové vlny a ke snížení přesnosti modelu [3].

V současnosti se pro měření průtoků využívá moderní technika založená na kontinuálním záznamu hydraulických veličin. Nejčastěji se jedná o ultrazvukové nebo radarové průtokoměry, které měří výšku hladiny a rychlost proudění. Na základě těchto veličin je následně stanoven průtok v daném profilu. Výhodou těchto zařízení je možnost dlouhodobého automatického měření s vysokým časovým rozlišením a relativně dobrou přesností [7].



Obr. 8 Mobilní systém pro kontinuální měření průtoku za účelem tvorby generelu stokové sítě: a) osazení kombinovaného měřicího prstence s kabeláží v potrubí; b) schéma principu kombinovaného měření hladiny a rychlosti pomocí ultrazvuku šířeného vzduchem (Air *ultrasound*), vodou (*Water ultrasound*) a tlakové sondy (*Pressure cell*) [19]

Moderní monitorovací systémy jsou často vybaveny možností dálkového přenosu dat, což umožňuje jejich okamžité zpracování a využití nejen pro kalibraci modelu, ale i pro operativní řízení stokové sítě. Tato data mohou být integrována do hydrologicko-hydraulického modelu v reálném čase, což je princip tzv. digitálního dvojčete kanalizační sítě. Tento přístup umožňuje průběžnou aktualizaci modelu a jeho využití pro predikci chování systému při aktuálních nebo očekávaných srážkových událostech [7].

Kvalita a dostupnost monitorovacích dat tak zásadním způsobem ovlivňuje výslednou spolehlivost hydrologicko-hydraulického modelu. Nedostatečná přesnost nebo nevhodné časové či prostorové rozlišení dat může vést k nesprávné interpretaci výsledků a chybným závěrům při návrhu opatření. Z tohoto důvodu je nutné věnovat návrhu a realizaci měření odpovídající pozornost a zajistit, aby získaná data byla reprezentativní, přesná a vhodná pro účely modelování [3][5].

2.5.2 PRŮBĚH KALIBRACE MODELU

Kalibrace modelu probíhá obvykle iterativním způsobem. Nejprve je model sestaven na základě dostupných podkladů a odhadnutých parametrů. Následně se simulují vybrané srážkové události, pro které jsou k dispozici měřená data [3].

Výsledky simulace jsou porovnávány s měřením a modelové parametry jsou postupně upravovány. Mezi nejčastěji kalibrované parametry patří:

- podíl nepropustných ploch,
- infiltrační parametry,
- retenční vlastnosti povodí,
- Manningův součinitel drsnosti stokové sítě [3].

Cílem je dosáhnout co nejlepší shody mezi simulovaným a skutečným průběhem odtoku. Je však nutné zachovat fyzikální smysl parametrů a vyvarovat se jejich nerealistickým hodnotám [3].

2.5.3 HODNOCENÍ SHODY MODELU S MĚŘENÍM

Hodnocení kvality modelu lze provádět jak graficky, tak pomocí statistických ukazatelů. Grafické porovnání spočívá zejména v porovnání průběhu hydrogramů, kde se sleduje shoda tvaru křivky, velikost kulminačního průtoku a čas jeho dosažení [3].

Pro kvantitativní hodnocení se využívají statistické ukazatele, které umožňují objektivně posoudit míru shody mezi simulovanými a měřenými daty [3].

Jedním z nejčastěji používaných ukazatelů je Nash–Sutcliffeho koeficient účinnosti. Tento koeficient vyjadřuje, jak dobře model reprodukuje časový průběh měřených dat. Jeho hodnota se pohybuje v intervalu od minus nekonečna do jedné, přičemž hodnota blízká jedné znamená velmi dobrou shodu modelu s měřením. Hodnota rovná nule odpovídá situaci, kdy model poskytuje stejně dobré výsledky jako průměrná hodnota měřených dat [3].

Dalším používaným ukazatelem je střední kvadratická chyba, která vyjadřuje průměrnou velikost odchylky mezi simulovanými a měřenými hodnotami. Tento ukazatel je citlivý na velké odchylky, a proto dobře identifikuje případy, kdy model nedokáže správně zachytit kulminační průtoky [3].

Korelační koeficient hodnotí míru závislosti mezi simulovanými a měřenými hodnotami. Vyjadřuje, jak dobře model zachycuje tvar průběhu hydrogramu, nikoliv však jeho absolutní velikost. Hodnota blízká jedné znamená silnou shodu v průběhu dat [3].

Kombinací těchto ukazatelů lze získat komplexní přehled o kvalitě modelu a jeho schopnosti popsat reálné chování stokového systému [3].

2.5.4 VALIDACE MODELU

Po provedení kalibrace následuje validace modelu. Ta spočívá v ověření modelu na jiných datech, než byla použita při kalibraci. Cílem je ověřit, zda model dokáže správně simulovat chování systému i při odlišných srážkových podmínkách [8].

Úspěšná validace zvyšuje důvěryhodnost modelu a jeho využitelnost v praxi. Pokud model vykazuje výrazné odchylky i při validaci, je nutné znovu prověřit vstupní data nebo nastavení modelových parametrů [8].

2.6 OMEZENÍ NEKALIBROVANÉHO MODELU

V mnoha případech, zejména při zpracování studií a počátečních návrhů, není možné provést plnohodnotnou kalibraci modelu z důvodu nedostatku monitorovacích dat [8].

K tomuto přístupu se přistupuje také u neexistujících stokových systémů, které jsou teprve ve fázi plánování. Model je pak vytvořen jako nekalibrovaný a jeho parametry vycházejí z podkladů a kvalifikovaného odhadu [3].

Nekalibrovaný model může i přesto poskytovat cenné informace o hydraulickém chování stokové sítě. Umožňuje identifikovat potenciálně kritická místa, posoudit orientační kapacitu systému a analyzovat vliv změn vstupních parametrů [3]. Je však nutné si uvědomit jeho omezení a interpretovat výsledky s odpovídající opatrností [8].

Mezi hlavní omezení nekalibrovaného modelu patří:

- nejistota vstupních parametrů,
- absence ověření výsledků měřením,
- zjednodušený popis skutečného stavu stokové sítě,
- neuvažování některých provozních jevů, například zanesení potrubí [8].

Nepřesnost vstupních dat může vést k odchylkám mezi simulovanými a skutečnými hodnotami průtoků a hladin. Tyto odchylky se mohou projevit zejména při simulaci extrémních srážkových událostí, kdy je systém vystaven maximálnímu zatížení [8].

Přesto má nekalibrovaný model význam jako nástroj pro orientační posouzení stokové sítě a pro přípravu podkladů pro budoucí detailnější modelování. V případě dostupnosti monitorovacích dat lze model v budoucnu doplnit o kalibraci a validaci, čímž se zvýší jeho přesnost a využitelnost [8].

2.7 REŠERŠE DOSTUPNÉHO SOFTWARU

Hydrologicko-hydraulické modelování stokových sítí je v současnosti podporováno celou řadou specializovaných softwarových nástrojů. Tyto programy se liší zejména rozsahem funkcí, úrovní detailu modelování, nároky na vstupní data i licenční politikou. Volba vhodného softwaru závisí především na účelu modelování, dostupnosti podkladů a požadované přesnosti výsledků [6].

V této kapitole jsou stručně představeny vybrané programy, které se v praxi využívají pro modelování městského odvodnění [6].

2.7.1 EPA SWMM

Software EPA SWMM (Storm Water Management Model) patří mezi nejrozšířenější nástroje pro hydrologicko-hydraulické modelování městského odvodnění. Program umožňuje simulaci srážko-odtokových procesů a proudění vody ve stokových sítích s využitím dynamické vlny [3][5][7].

Mezi hlavní výhody programu patří jeho volná dostupnost, relativně jednoduché uživatelské prostředí a dostatečný rozsah funkcí pro většinu úloh v oblasti městského

odvodnění. Program umožňuje modelovat jak jednotlivé srážkové události, tak dlouhodobé časové řady, a je vhodný jak pro výuku, tak pro inženýrskou praxi [3].

Nevýhodou může být omezenější práce s prostorovými daty a nutnost externího zpracování podkladů v GIS prostředí [7].

2.7.2 MIKE (DHI)

Software MIKE, vyvíjený společností DHI, představuje pokročilý nástroj pro hydrologické a hydraulické modelování. V oblasti městského odvodnění se využívají především moduly MIKE URBAN nebo MIKE+ [6].

Výhodou těchto nástrojů je vysoká úroveň detailu modelování, možnost kombinace 1D a 2D modelů a pokročilé funkce pro simulaci proudění na povrchu i v kanalizační síti. Program umožňuje detailní analýzu zaplavování území a je často využíván u rozsáhlých projektů nebo generelů odvodnění [6].

Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a větší náročnost na vstupní data i obsluhu programu [6].

2.7.3 INNOVYZE (INFOWORKS ICM)

Software společnosti Innovyze, zejména program InfoWorks ICM, patří mezi nejpokročilejší nástroje pro modelování městského odvodnění. Program umožňuje detailní simulaci stokových sítí včetně interakce s povrchovým odtokem a využívá kombinované 1D/2D modelování [6].

Mezi hlavní výhody patří vysoká přesnost výpočtů, pokročilé možnosti práce s databázemi a integrace s GIS systémy. Program je vhodný pro komplexní analýzy rozsáhlých městských oblastí a je často využíván ve velkých projektech nebo při tvorbě digitálních dvojčat [6].

Nevýhodou je opět vysoká finanční náročnost a složitější implementace [6].

2.7.4 QGIS A PLUGINY PRO MODELOVÁNÍ

QGIS je open-source geografický informační systém, který sám o sobě neslouží jako hydraulický model, ale je často využíván jako nástroj pro přípravu vstupních dat a prostorovou analýzu [1].

Pomocí specializovaných pluginů, například pro tvorbu modelů SWMM, lze QGIS využít i pro částečné modelování nebo pro propojení GIS dat s hydrologicko-hydraulickým modelem. Výhodou je jeho volná dostupnost a široké možnosti práce s prostorovými daty [1].

Nevýhodou je omezená funkcionalita ve srovnání s plnohodnotnými modelovacími nástroji a nutnost kombinace s dalším softwarem [1].

2.7.5 SHRNUTÍ A VOLBA SOFTWARU

Výběr vhodného softwaru pro hydrologicko-hydraulické modelování závisí především na požadované úrovni detailu, dostupnosti vstupních dat a finančních možnostech. Pokročilé komerční nástroje, jako jsou MIKE nebo InfoWorks ICM, umožňují velmi detailní modelování, avšak za cenu vyšších nákladů a nároků na zpracování dat [6].

Pro účely této bakalářské práce byl zvolen software EPA SWMM, který představuje vhodný kompromis mezi jednoduchostí, dostupností a schopností realisticky simulovat chování stokové sítě. Program umožňuje provést hydrologicko-hydraulickou analýzu s dostatečnou přesností a je zároveň běžně využíván ve výuce i praxi [1].

Jelikož výpočetní prostředí EPA SWMM disponuje pouze omezenými nástroji pro pokročilou prostorovou analýzu a přímou editaci geografických dat, byla tato chybějící GIS funkcionalita v rámci přípravy a parametrizace modelu plnohodnotně nahrazena implementací open-source softwaru QGIS [20].

3 SOFTWARE EPA SWMM

3.1 CHARAKTERISTIKA PROGRAMU

Software EPA SWMM (Storm Water Management Model) patří mezi nejrozšířenější nástroje pro hydrologicko-hydraulické modelování městského odvodnění [3][5][7]. Jedná se o výpočetní model vyvinutý Agenturou pro ochranu životního prostředí Spojených států amerických (U.S. Environmental Protection Agency), který je určen pro simulaci srážko-odtokových procesů a proudění vody ve stokových systémech urbanizovaných území [3].

Program umožňuje dynamické modelování odtoku srážkových vod z povrchů, jejich transformaci v kanalizační síti a následné odvádění do recipientu. V rámci simulace lze zohlednit širokou škálu hydrologických i hydraulických procesů, včetně infiltrace, akumulace vody na povrchu, proudění s volnou hladinou i tlakových stavů v potrubí. Díky tomu představuje komplexní nástroj pro analýzu funkce městských odvodňovacích systémů [5].

EPA SWMM je distribuován jako volně dostupný software, což významně přispívá k jeho rozšíření v odborné i akademické sféře. Program je využíván při projektování kanalizačních systémů, při posuzování jejich kapacity, při návrhu retenčních opatření i při výuce na technických vysokých školách. Jeho otevřenost a dlouhodobý vývoj zajišťují, že je pravidelně aktualizován a doplňován o nové funkce [3].

Jednou z hlavních výhod programu je jeho schopnost modelovat nestacionární proudění. To umožňuje simulovat časově proměnné srážkové události a jejich dopad na hydraulické zatížení stokové sítě [5]. Program rovněž umožňuje dlouhodobé simulace zahrnující více srážkových epizod, což je důležité například při hodnocení účinnosti retenčních opatření nebo při analýze provozu kanalizačního systému [3].

Z hlediska uživatelského prostředí je EPA SWMM vybaven grafickým rozhraním, které umožňuje zadávání vstupních dat, správu modelu a vizualizaci výsledků. Současně lze model definovat pomocí textového vstupního souboru, což umožňuje detailní kontrolu parametrů a snadnou úpravu modelu [3].

Program je koncipován jako modulární nástroj, který umožňuje kombinovat hydrologické a hydraulické výpočty v rámci jednoho modelu. Díky tomu je možné simulovat celý proces od dopadu srážky na povrch až po odtok vody z kanalizační sítě do recipientu [3].

3.2 HISTORIE A VÝVOJ PROGRAMU

Vývoj programu EPA SWMM byl zahájen na počátku 70. let 20. století v reakci na rostoucí potřebu analyzovat vliv urbanizace na odtokové poměry a kvalitu povrchových vod. První verze programu byla zaměřena především na modelování odtoku srážkových vod a transportu znečištění v městských povodích [3].

Postupně byl program rozšiřován o další funkce a výpočetní moduly [7]. Významným krokem bylo zavedení dynamického hydraulického výpočtu, který umožnil simulovat nestacionární proudění ve stokových sítích. Tento přístup vychází z řešení Saint-Venantových rovnic a umožňuje realistické modelování hydraulických jevů, jako je zpětné vzdutí nebo přechod do tlakového proudění [5].

V průběhu vývoje byly rovněž doplněny moduly pro modelování infiltrace, retence, činnosti regulačních objektů a akumulace vody v retenčních nádržích. Moderní verze programu umožňují také simulaci dlouhodobých časových řad srážek a hodnocení účinnosti opatření hospodaření se srážkovými vodami [7].

Významným milníkem bylo uvolnění programu jako open-source softwaru, což umožnilo jeho další rozvoj odbornou komunitou. Díky tomu je dnes EPA SWMM jedním z nejpoužívanějších nástrojů pro modelování městského odvodnění na světě [7].

Program je průběžně aktualizován a jeho vývoj reaguje na aktuální potřeby praxe i výzkumu. V současnosti je využíván nejen pro hydraulické modelování stokových sítí, ale také pro analýzu kvality vody, návrh zelené infrastruktury a hodnocení dopadů klimatické změny [7].

3.3 OBLASTI VYUŽITÍ PROGRAMU EPA SWMM

EPA SWMM nachází uplatnění v široké škále úloh spojených s městským odvodněním. V projektové praxi je využíván především při návrhu nových kanalizačních systémů a při rekonstrukcích stávajících sítí. Pomocí modelu lze ověřit hydraulickou kapacitu navržených profilů a posoudit jejich chování při návrhových srážkách [3][5][7].

Další významnou oblastí je posuzování funkce stávajících stokových systémů. Modelování umožňuje analyzovat aktuální hydraulické zatížení sítě, identifikovat úseky s nedostatečnou kapacitou a vyhodnotit riziko zaplavování nebo zpětného vzdutí. Na základě výsledků lze navrhnout vhodná technická opatření, například rekonstrukci potrubí, doplnění retenčních objektů nebo úpravu provozního režimu [5].

Program je rovněž využíván při návrhu a hodnocení retenčních opatření, jako jsou retenční nádrže, vsakovací objekty nebo prvky modrozelené infrastruktury. Simulace umožňuje posoudit vliv těchto opatření na snížení kulminačních průtoků a zatížení stokové sítě [6].

Významnou funkcí programu je také možnost simulace transportu znečištění. SWMM umožňuje modelovat přenos látek ve stokové síti, včetně jejich akumulace na povrchu, splachu během srážkové události a následného transportu potrubím. Tato funkcionalita je využívána zejména při hodnocení kvality odtoku, návrhu opatření ke snížení znečištění a posuzování vlivu kanalizačních systémů na recipienty [3].

Tab. 1 Klasifikace simulačních prvků v prostředí SWMM rozdělená na objekty hydrologické (Hydrology) a hydraulické (Hydraulics) s popisem jejich funkčního významu v systému [5], přeloženo do češtiny [15]

Kategorie	Typ objektu	Popis
Hydrologie	Srážkoměr	Zdroj údajů o srážkách pro jedno nebo více dílčích povodí.
	Dílčí povodí	Plocha území, která přijímá srážky spojené se srážkoměrem a vytváří odtok, který odtéká do uzlu kanalizační sítě nebo do jiného dílčího povodí.
	Podzemní voda	Podpovrchová oblast, která přijímá infiltraci z výše položeného dílčího povodí a vyměňuje si podzemní vodu s uzlem systému dopravních cest.
	Sněhová pokrývka	Nahromaděný sníh, který pokrývá dílčí povodí.
	Jednotkový hydrogram	Odezvová funkce, která popisuje množství odtoku ze srážek/infiltrace (RDII) vznikající v čase na jednotku okamžitého deště.
Hydraulika	Uzlový bod	Bod v systému dopravních cest, kde se potrubí propojují navzájem s zanedbatelným objemem zadržení (např. šachty, tvarovky potrubí nebo spojky s přírodními toky).
	Výust	Koncový bod systému dopravních cest, kde je voda vypouštěna do recipientu (např. do vodního toku nebo čistírny odpadních vod) s danou hladinou vody.
	Dělící objekt	Bod v systému dopravních cest, kde se přítok dělí do dvou odtokových potrubí podle známého vztahu.
	Akumulační objekt	Rybník, jezero, nádrž nebo komora, které slouží k akumulaci vody.
	Potrubí	Kanál nebo potrubí, které odvádí vodu z jednoho uzlu systému dopravních cest do jiného.
	Čerpadlo	Zařízení, které zvyšuje hydraulickou hladinu vody.
	Regulační objekt	Přeliv, škrticí otvor nebo výtokový objekt používaný k usměrnění a regulaci průtoku mezi dvěma uzly systému dopravních cest.

Tab. 2 Klasifikace simulačních prvků v prostředí SWMM; dokončení přehledu s objekty kvality vody (Water Quality), čištění (Treatment) a datovými objekty (Data Object) [5], přeloženo do češtiny [15]

Kategorie	Typ objektu	Popis
Kvalita vody	Znečišťující látka	Látka znečišťující vodu, která se může hromadit na povrchu území a být splavena nebo může být zanesena přímo do systému dopravních cest.
	Využití území	Klasifikace používaná k charakterizaci funkcí, které popisují hromadění znečišťujících látek a jejich splach.
Opatření	Kontrola LID	Opatření pro řízení nízkého dopadu, jako je bioretenční prvek, propustný povrch nebo vegetační průleh, které se používá ke snížení povrchového odtoku prostřednictvím zvýšené infiltrace.
	Funkce opatření	Uživatelem definovaná funkce, která popisuje, jak jsou koncentrace znečišťujících látek snižovány v uzlu systému dopravních cest v závislosti na určitých proměnných, jako je koncentrace, průtok, hloubka vody atd.
Datový objekt	Křivka	Tabulková funkce, která definuje vztah mezi dvěma veličinami (např. průtok a dopravní výška pro čerpadlo, plocha hladiny a hloubka pro akumulační objekt atd.).
	Časová řada	Tabulková funkce, která popisuje, jak se určitá veličina mění v čase (např. srážky, kóta hladiny ve výusti atd.).
	Časový vzor	Sada faktorů, která se opakuje v určitém časovém období (např. hodinový průběh během dne, denní průběh během týdne atd.).
	Řídicí pravidla	Podmínky IF-THEN-ELSE, které určují, kdy se mají provést konkrétní řídicí akce (např. zapnutí nebo vypnutí čerpadla, když je hloubka průtoku v daném uzlu nad nebo pod určitou hodnotou).

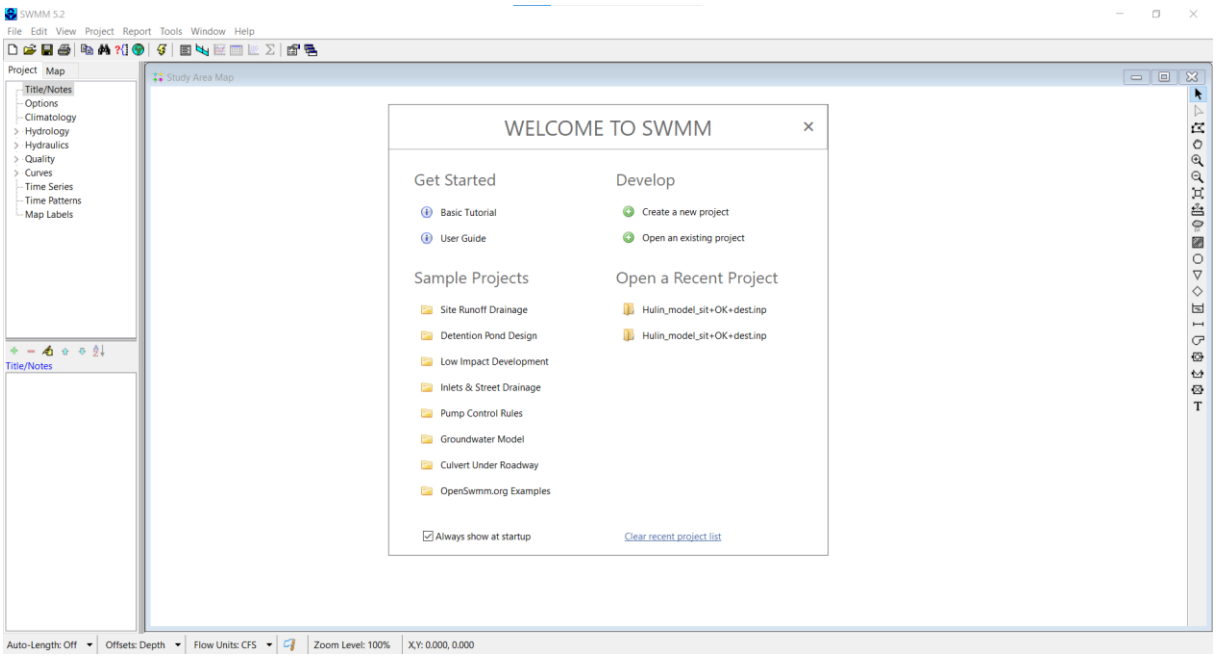
V posledních letech roste význam využití modelu při hodnocení dopadů klimatické změny. Pomocí scénářů s vyšší intenzitou srážek lze analyzovat odolnost kanalizačních systémů a navrhovat adaptační opatření [3].

EPA SWMM je rovněž využíván ve výzkumu a výuce. Na technických vysokých školách slouží jako nástroj pro výuku hydrologického a hydraulického modelování a umožňuje studentům získat praktické zkušenosti s tvorbou modelu stokové sítě [3].

3.4 STRUKTURA MODELU V SWMM

Model v programu EPA SWMM je tvořen soustavou vzájemně propojených objektů, které reprezentují jednotlivé části systému městského odvodnění. Struktura modelu vychází z reálného uspořádání stokové sítě a odvodňovaného území. Každý prvek modelu má definované hydraulické a hydrologické vlastnosti, které ovlivňují výsledné chování systému při simulaci [5].

Při tvorbě modelu je vhodné postupovat od definice stokové sítě, přes vymezení povodí až po zadání srážkových dat, která představují základní vstup simulace [5].

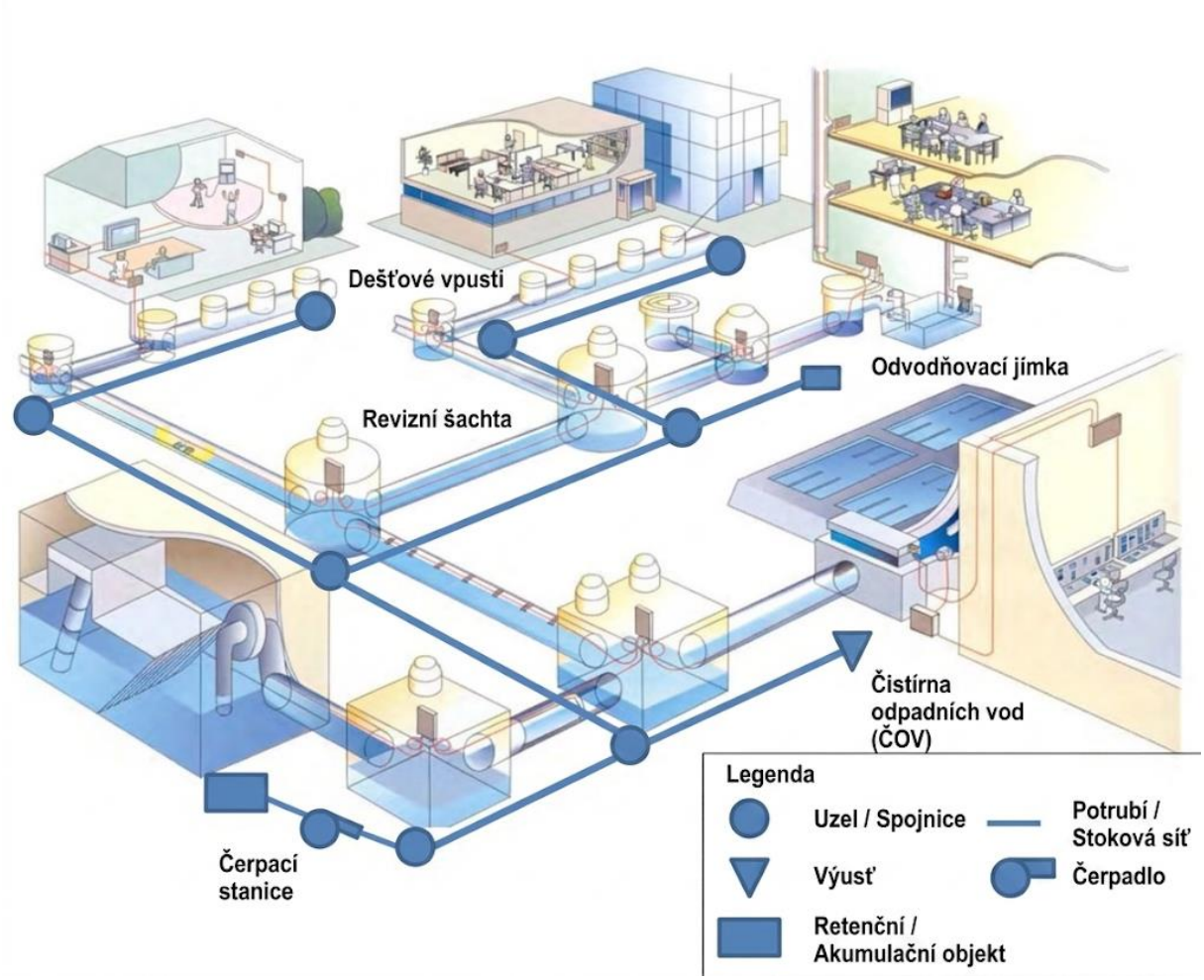


Obr. 9 Grafické uživatelské rozhraní programu EPA SWMM 5.2 bezprostředně po spuštění s aktivním uvítacím oknem (Welcome to SWMM) [21]

3.4.1 STOKOVÁ SÍŤ (NODES + LINKS)

Stoková síť tvoří základní kostru modelu a je reprezentována soustavou uzlů a spojovacích prvků. Uzly představují body, ve kterých dochází ke spojování nebo rozdělování proudů vody, což jsou typicky revizní šachty nebo větvení sítě. Specifickým případem rozdělování proudů jsou odlehčovací komory, které za deště oddělují část průtoku do recipientu, a regulační prvky (stavidla, clony), které usměrňují tok vody [5].

Kromě uzlových bodů model zahrnuje prvky pro akumulaci vody, jako jsou retenční nádrže nebo šachty se zvětšeným objemem, které tlumí průtokové špičky. Další důležitou součástí jsou čerpací stanice, které zajišťují překonání výškových rozdílů a transport vody v úsecích, kde není možný gravitační odtok. Spojovací prvky (Links) pak reprezentují samotné stoky, které propojují jednotlivé uzly a umožňují lineární proudění vody v systému [5].



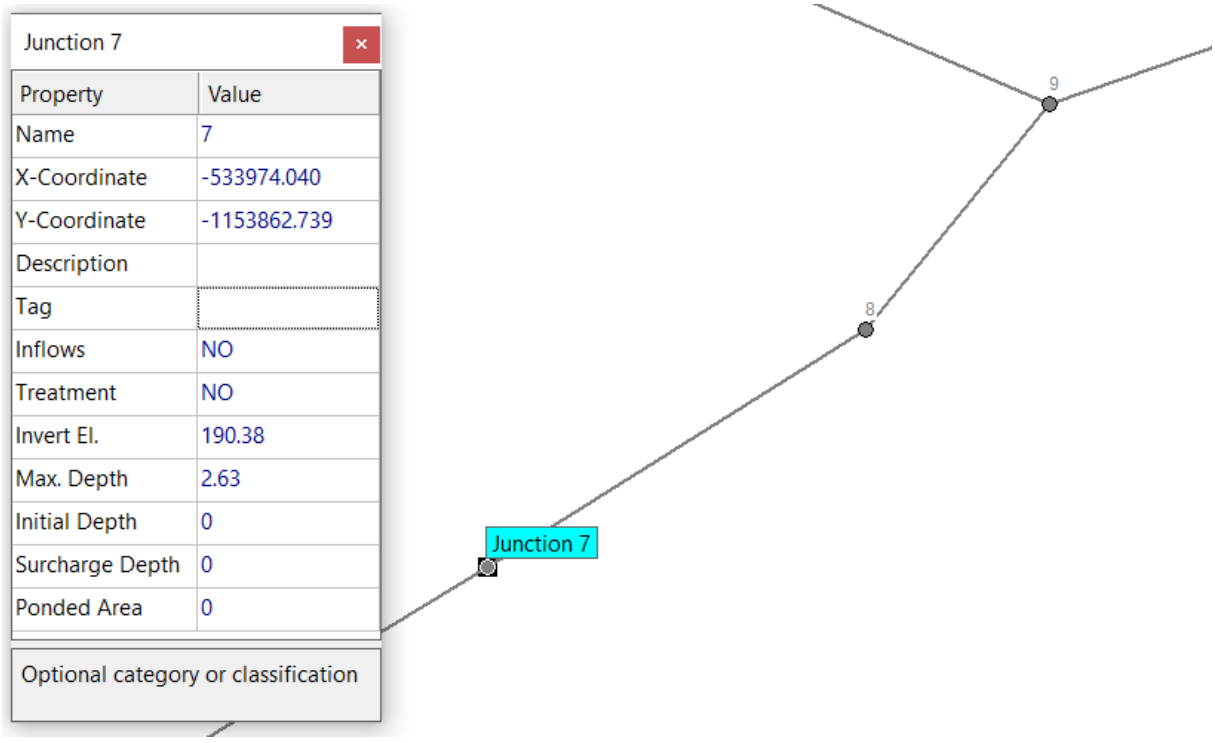
Obr. 10 Schéma prvků modelu stokové sítě v prostředí EPA SWMM – Grafické znázornění vztahu mezi reálnými objekty (šachty, čerpací stanice, retenční prostory) a jejich modelovou reprezentací pomocí uzlů (Junctions) a spojovacích prvků (Conduits, Pumps) [5], přeloženo do češtiny [15]

Každý úsek stoky je definován délkou, sklonem, profilem a hydraulickými vlastnostmi. Jedním z nejdůležitějších parametrů je součinitel drsnosti, který ovlivňuje hydraulické ztráty a rychlost proudění. V programu SWMM se nejčastěji používá Manningův součinitel drsnosti, který vychází z empirického vztahu pro proudění v otevřených korytech a potrubích. Jeho hodnota závisí na materiálu potrubí a jeho stavu, například na míře zanesení nebo opotřebení [5].

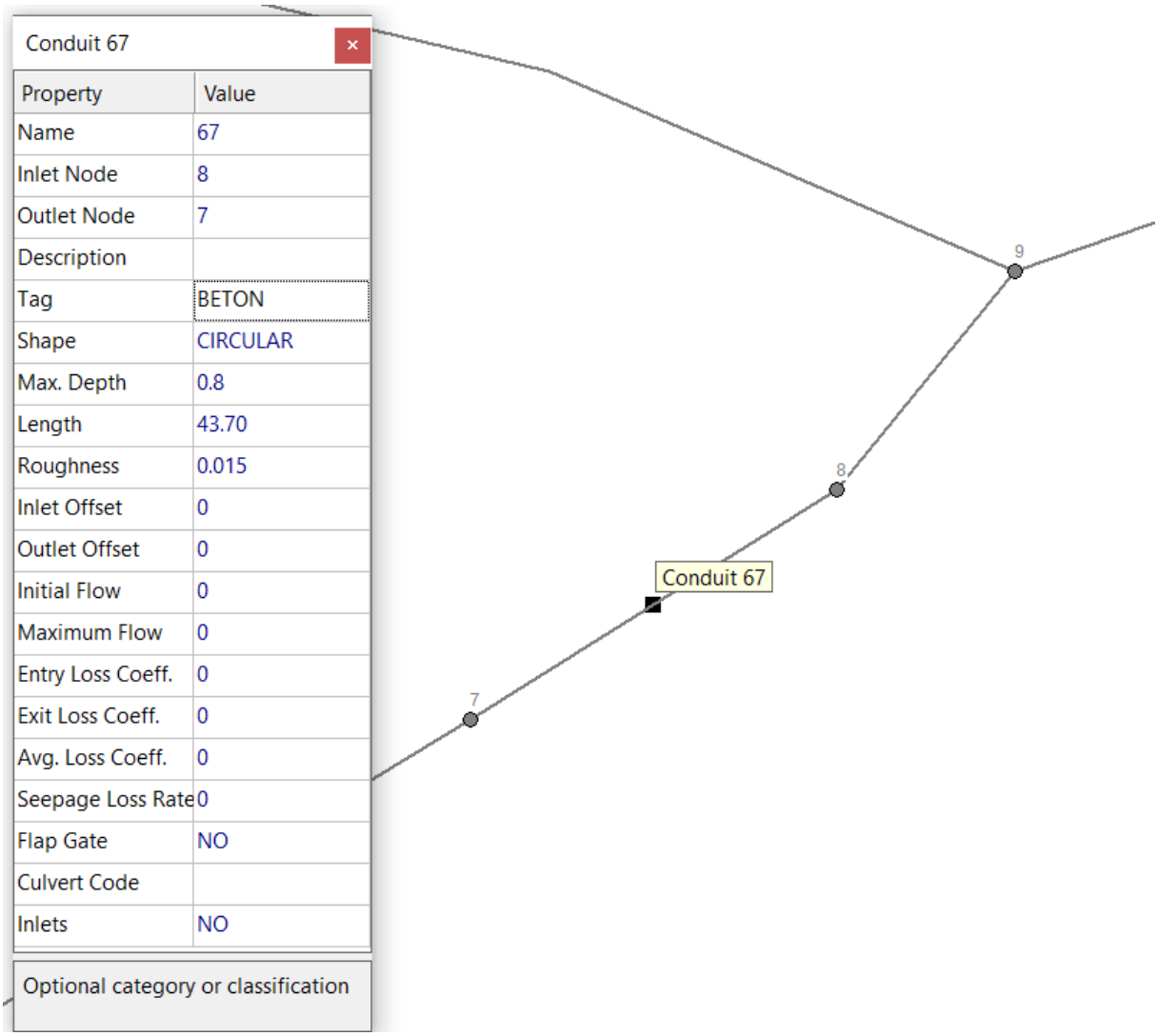
Tab. 3 Typické hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro různé materiály stokových potrubí [10]

Materiál potrubí / povrchu	Manningův součinitel n [-]
Hladký plast (PVC, PE)	0,009 – 0,011
Beton (nový)	0,011 – 0,013
Beton (starší, drsný)	0,013 – 0,017
Kamenina	0,010 – 0,013
Litina	0,011 – 0,015
Ocel	0,012 – 0,015
Zděné stoky	0,015 – 0,020
Silně zanesené potrubí	0,020 – 0,030

Alternativně lze v některých případech využít také vztah Hazen–Williams, který je používán především pro tlakové proudění ve vodovodních systémech. V oblasti stokových sítí je však jeho využití omezené a standardně se preferuje Manningův vztah, který lépe odpovídá podmínkám proudění s volnou hladinou [5].



Obr. 11 Ukázka zadávání atributů uzlového bodu stokové sítě v prostředí SWMM; dialogové okno Junction 7 zobrazuje souřadnice polohy, dnovou kvótu (Invert El.) a maximální konstrukční hloubku šachty (Max. Depth)

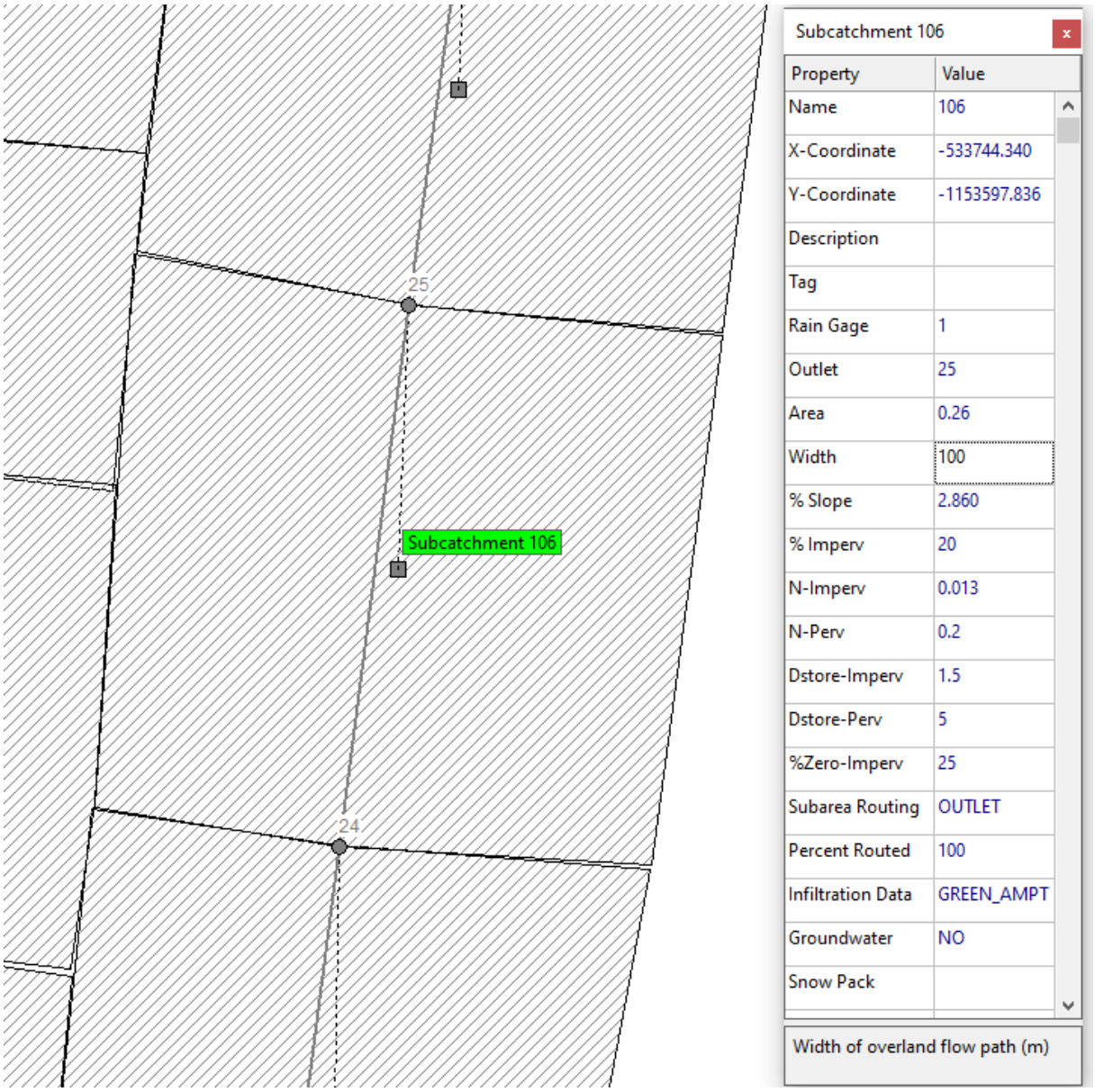


Obr. 12 Ukázka zadávání atributů potrubí stokové sítě v prostředí SWMM; dialogové okno Conduit 67 zobrazuje propojení uzlů, kruhový profil (CIRCULAR), délku úseku (Length) a drsnostní součinitel (Roughness)

3.4.2 POVODÍ (SUBCATCHMENS)

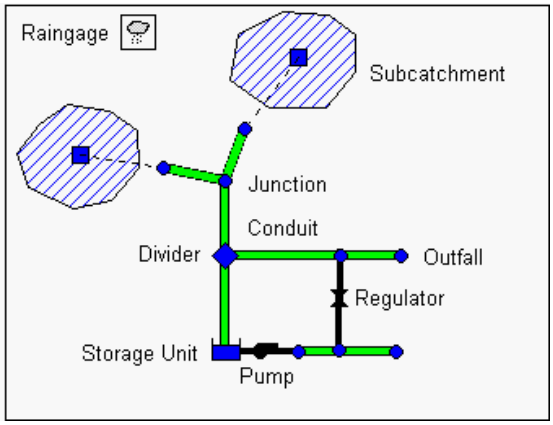
Povodí představují základní hydrologické jednotky modelu, ze kterých je generován povrchový odtok. Každé povodí je přiřazeno ke konkrétnímu uzlu stokové sítě, do kterého je odtok odváděn [3].

Povodí je definováno řadou parametrů, které ovlivňují vznik a průběh odtoku. Mezi nejdůležitější patří plocha, sklon, šířka, podíl nepropustných ploch a charakter povrchu. Dále se zadávají infiltrační parametry a retenční vlastnosti, které určují množství vody zadržené na povrchu nebo vsáknuté do půdy [3].



Obr. 13 Ukázka zadávání atributů plošných prvků v prostředí SWMM; dialogové okno Subcatchment 106 zobrazuje přiřazení ke srážkoměru, celkovou rozlohu (Area), průměrný sklon (% Slope), podíl nepropustných povrchů (% Imperv) a zvolenou metodu infiltrace

Program umožňuje rozdělit povodí na propustnou a nepropustnou část, což je důležité zejména v urbanizovaných oblastech s různorodým charakterem povrchů. Správné stanovení parametrů povodí má zásadní vliv na výsledný hydrogram odtoku a tím i na zatížení stokové sítě [3].

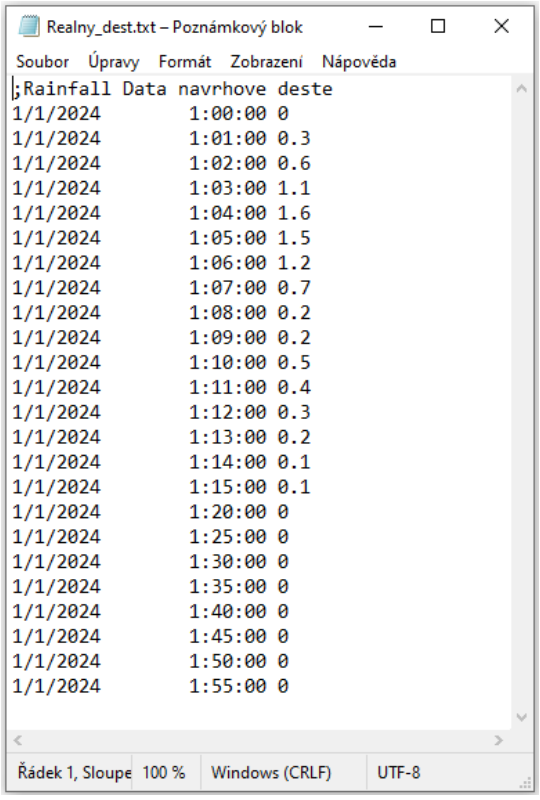


Obr. 14 Schématické znázornění odtoku z dílčích povodí (Subcatchments) v rámci sítě [5]

3.4.3 SRÁŽKOVÁ DATA

Srážková data představují hlavní vstup hydrologické části modelu a určují množství vody vstupující do systému. V programu SWMM jsou zadávána ve formě časových řad, které popisují průběh intenzity srážky v čase [1].

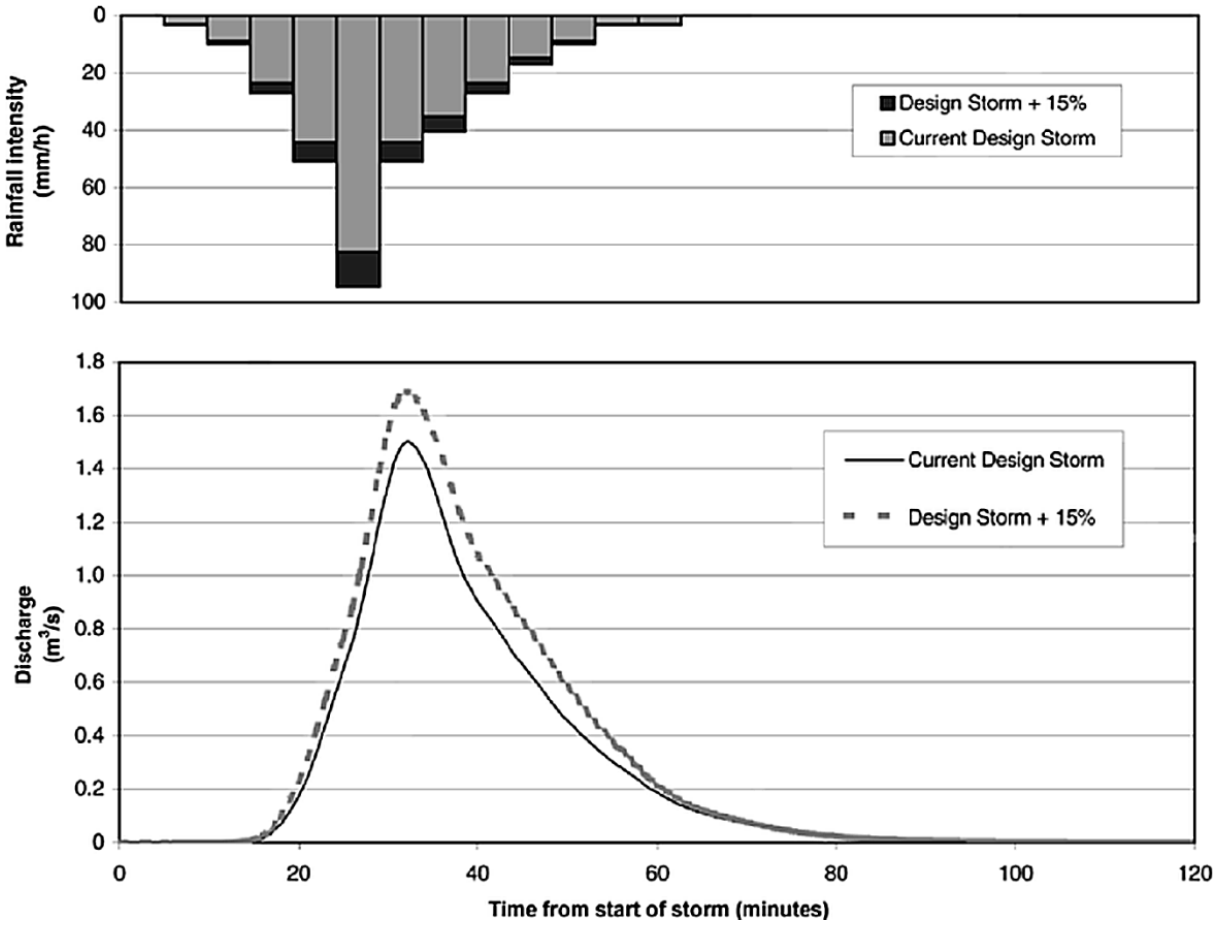
Pro modelování lze využít jak syntetické návrhové deště, tak reálné srážkové události. Syntetické deště se používají především pro návrhové výpočty a umožňují jednotné posouzení kapacity systému. Reálné srážky naopak poskytují detailnější informace o skutečném chování systému, včetně proměnlivosti intenzity v čase [1].



Obr. 15 Příklad formátování srážkových dat v textovém editoru; soubor Realny_dest.txt obsahuje chronologický záznam s minutovým krokem definující datum, přesný čas a srážkový úhrn v daném intervalu

Důležitým parametrem srážkových dat je jejich časové rozlišení, které by mělo odpovídat charakteru modelovaného území. V případě menších urbanizovaných povodí je nutné použít dostatečně jemné časové kroky, aby bylo možné zachytit rychlý nástup odtoku [1].

Správné zadání srážkových dat je klíčové pro realistickou simulaci, protože významně ovlivňuje výsledný průběh průtoků a hydraulické zatížení stokové sítě [1].



Graf 4: Porovnání průběhu návrhového deště a odpovídajících hydrogramů odtoku pro současný stav a variantu se zvýšenou intenzitou srážky o 15 % [16]

3.5 HYDROLOGICKÉ PROCESY V PROGRAMU EPA SWMM

Hydrologická část programu simuluje procesy, které probíhají od dopadu srážky na povrch až po vznik odtoku do kanalizační sítě. Základním vstupem jsou srážková data, která jsou zadávána ve formě časové řady [3].

Program umožňuje modelovat různé procesy, které ovlivňují množství odtoku. Patří mezi ně infiltrace, retence na povrchu a postupné soustřeďování odtoku do kanalizační sítě. Pro výpočet infiltrace lze využít několik metod, například Hortonovu metodu, Green-Amptovu metodu nebo metodu Curve Number [3].

Povrchový odtok je modelován jako plošné proudění po povrchu povodí. Program zohledňuje sklon povrchu, drsnost a retenční vlastnosti. Voda je postupně soustřeďována do odtokového bodu povodí a následně přiváděna do kanalizační sítě [3].

Hydrologická část modelu umožňuje simulovat jak jednotlivé srážkové události, tak dlouhodobé časové řady srážek. To je důležité například při hodnocení účinnosti retenčních opatření nebo při analýze zatížení stokové sítě v delším časovém období [3].

3.6 HYDRAULICKÉ VÝPOČTY V PROGRAMU EPA SWMM

Hydraulická část programu slouží k simulaci proudění vody ve stokové síti. Program nabízí několik výpočetních metod, které se liší přesností a náročností [5].

Nejpřesnější metodou je dynamická vlna, která řeší úplné Saint-Venantovy rovnice. Tato metoda umožňuje simulovat nestacionární proudění, zpětné vzdutí, přechod do tlakového proudění i zaplavování uzlů. Je proto vhodná pro detailní analýzu chování stokových systémů [5].

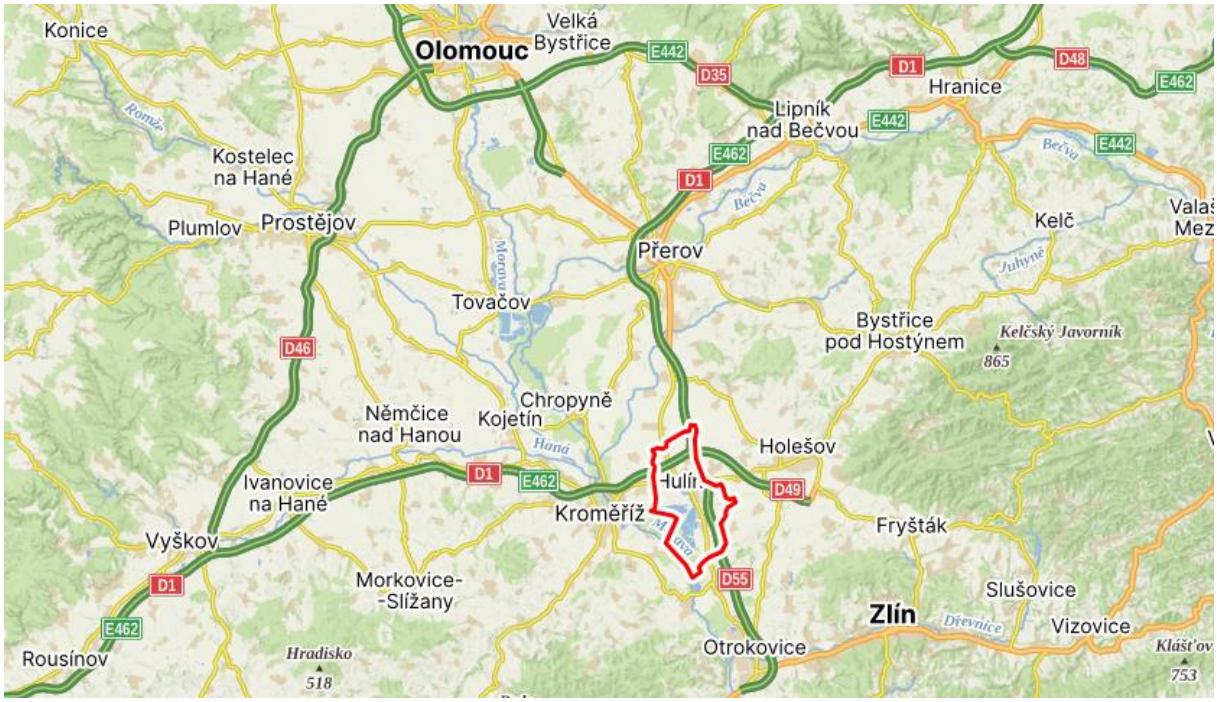
Jednodušší alternativou je kinematická vlna, která zanedbává některé dynamické jevy a je vhodná pro jednodušší modely nebo pro případy, kdy nedochází k významnému vzdutí. Program umožňuje také výpočet ustáleného proudění, který je však využíván pouze omezeně [5].

Při hydraulickém výpočtu program zohledňuje geometrii potrubí, jeho drsnost, sklon a hydraulické ztráty. Výsledkem jsou časové průběhy průtoků, rychlostí a výšek hladin v jednotlivých prvcích sítě [5].

4 TVORBA NEKALIBROVANÉHO MODELU V EPA SWMM

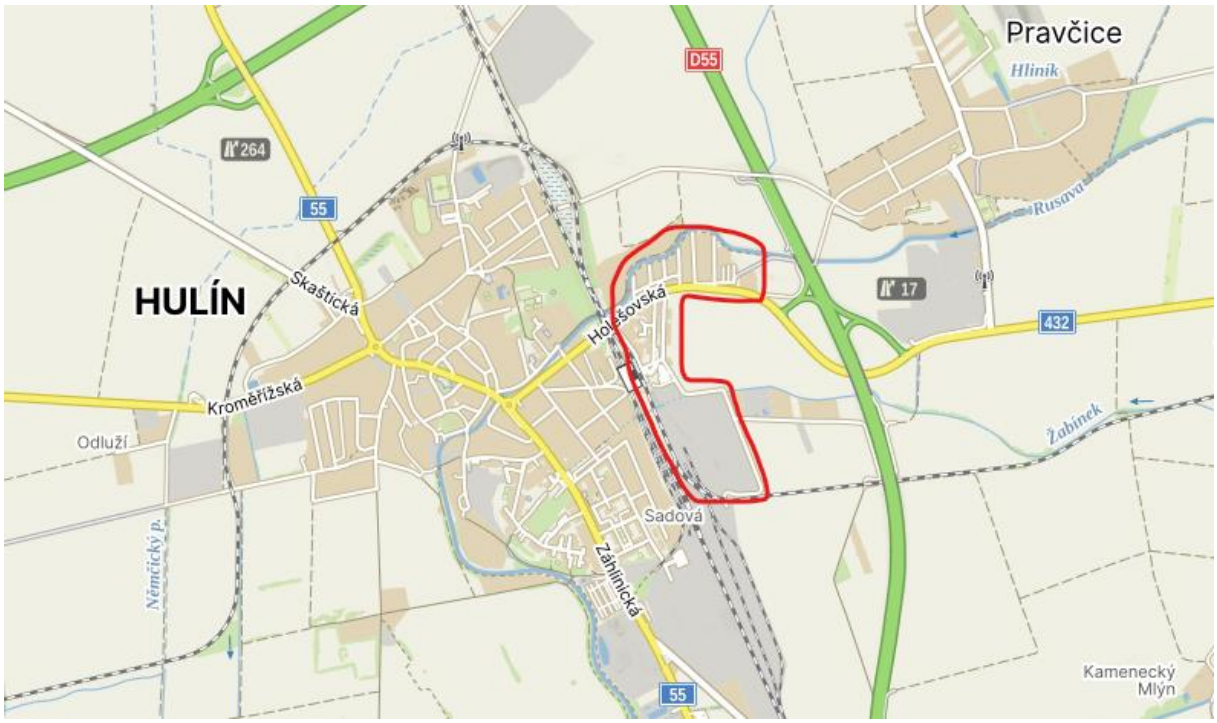
4.1 POPIS STOKOVÉ SÍTĚ A ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Zájmové území řešené v rámci této bakalářské práce se nachází ve východní části města Hulín (okres Kroměříž, Zlínský kraj), které se rozkládá v údolní nivě řeky Moravy. Z geomorfologického hlediska je oblast charakteristická malou členitostí terénu a rovinatým charakterem. Sklony terénu se v řešeném území pohybují přibližně v rozmezí 1,0–5,0 %. Tato konfigurace ovlivňuje jak povrchové srážko-odtokové vztahy, tak hydraulické poměry ve stokové síti, kde nízké podélné sklony zpomalují gravitační proudění a zvyšují riziko sedimentace a zpětného vzdutí.



Obr. 16 Umístění města Hulín v rámci regionální mapové sítě; červeně vyznačená hranice katastrálního území definuje polohu řešené oblasti vůči sousedním městským aglomeracím Kroměříž a Přerov [22]

Modelovaná městská zóna zaujímá prostor ohraničený ulicemi Nádražní, Višňovice, U Stavu I a U Stavu II včetně přilehlého průmyslového areálu. Jedná se o urbanizované území smíšeného charakteru. Nachází se zde obytná zástavba rodinných domů, komunikace, zpevněné parkovací plochy i rozsáhlé střechy průmyslových objektů. Z hydrologického hlediska vykazuje území značnou heterogenitu v zastoupení nepropustných ploch, jejichž podíl se pohybuje přibližně v rozmezí 20–70 % podle konkrétní části území. Tento parametr významně ovlivňuje transformaci srážky na odtok a velikost průtoků odváděných stokovou sítí během srážkových událostí.



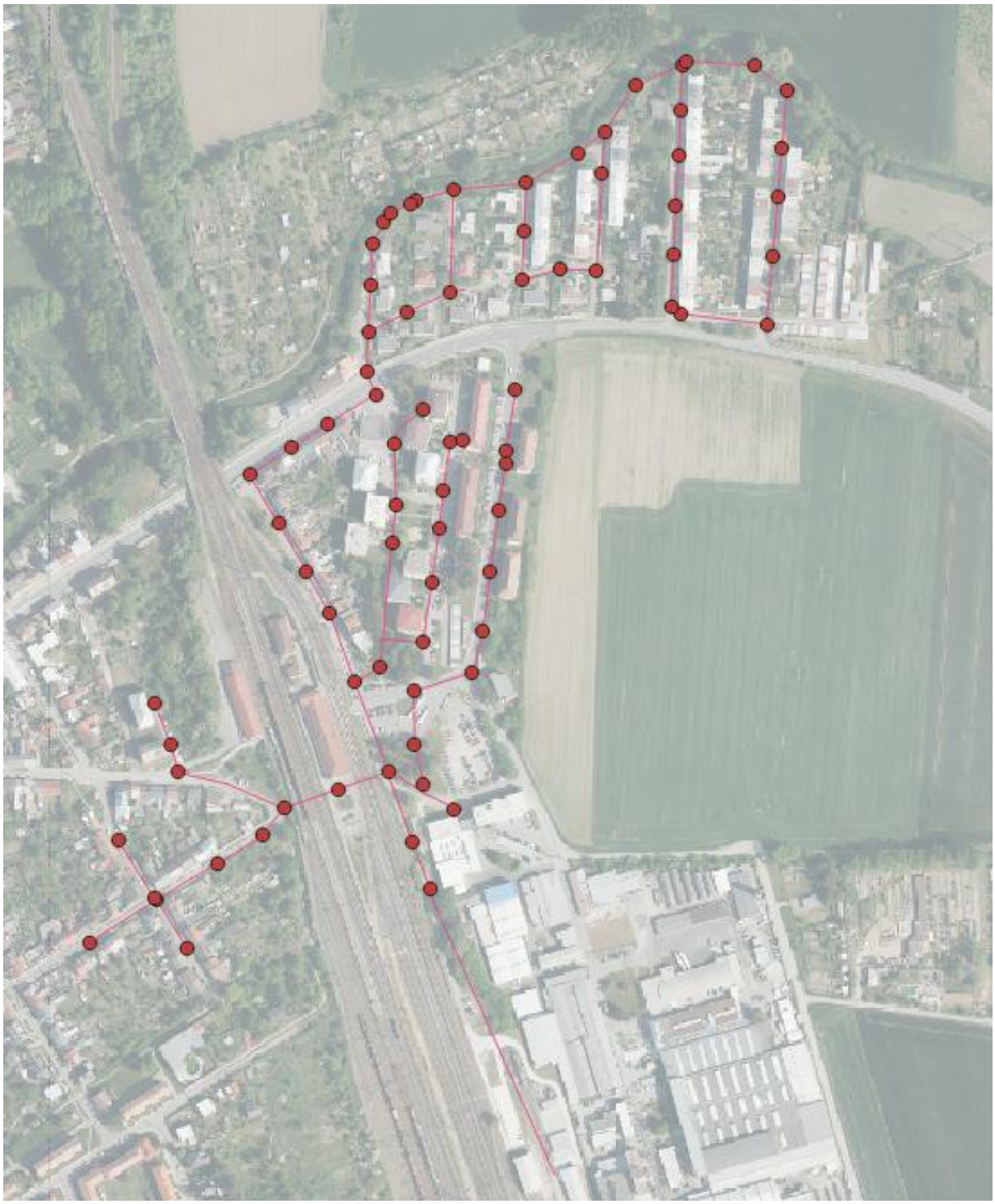
Obr. 17 Topografický plán města Hulín s červeným vyznačením modelované oblasti; patrná je blízkost železniční tratě a silnice II/432 směr Pravčice [22]

Odvodnění této oblasti je řešeno jednotnou stokovou soustavou, jejíž důležitou součástí je odlehčovací komora situovaná v severní části území. Během intenzivních nebo dlouhotrvajících srážek dochází při překročení kapacity kmenové stoky k přepadu části dešťových vod přes přelivnou hranu do recipientu, kterým je vodní tok Rusava. Funkcí odlehčovací komory je snížení hydraulického zatížení stokové sítě a ochrana navazujících úseků i čistírny odpadních vod před přetížením.

4.2 DOSTUPNÉ PODKLADY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

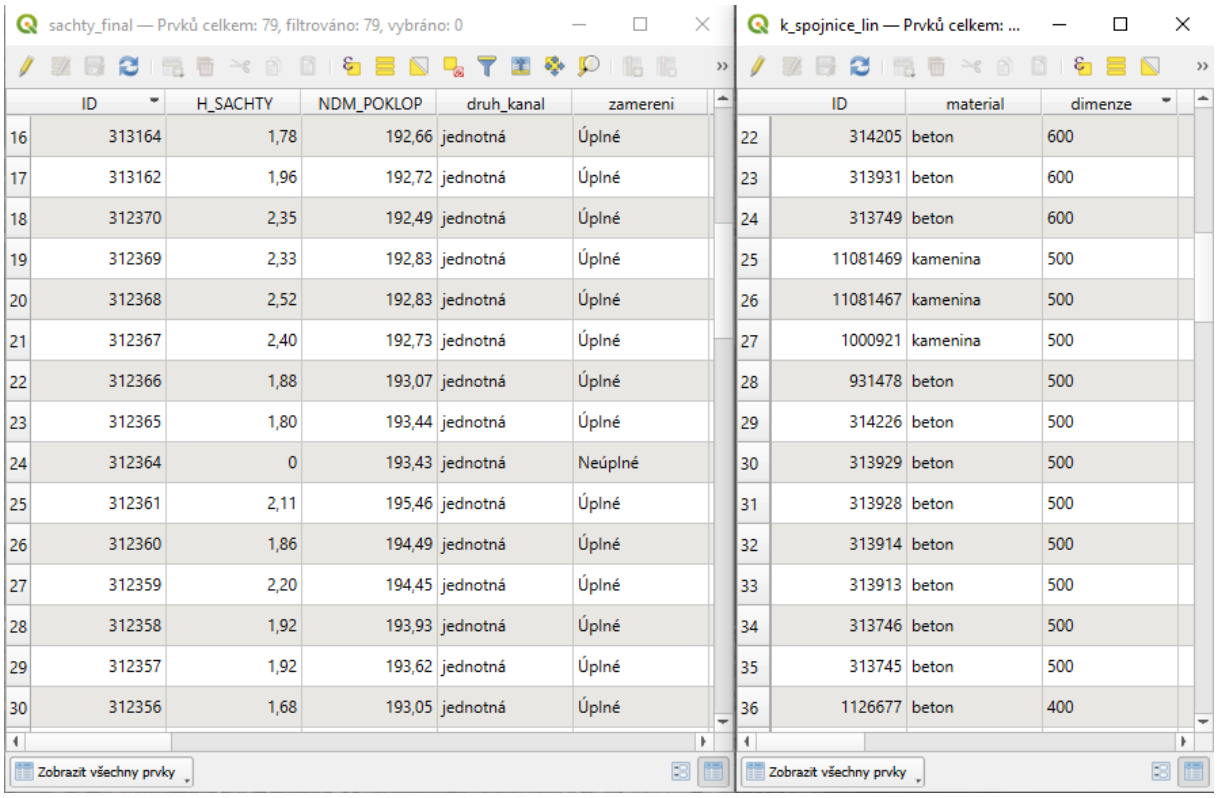
Základním vstupem pro sestavení matematického modelu stokové sítě byla digitální data poskytnutá provozovatelem vodohospodářské infrastruktury ve formátu Esri Shapefile (.shp) v souřadnicovém systému S-JTSK. GIS databáze obsahovala prostorové a atributové informace o geometrii a topologii stokové sítě, konkrétně:

- Bodovou vrstvu šachet obsahující polohy uzlů, nadmořské výšky poklopů a konstrukční hloubky šachet. Nejvýše položená šachta v řešeném povodí dosahuje hodnoty 196,51 m n. m., zatímco nejníže položená koncová šachta leží ve výšce 190,61 m n. m.
- Liniovou vrstvu potrubí definující trasování stok, jejich délky, materiál a jmenovité průměry. Rozsah profilů v zájmovém území se pohybuje od DN 150 po DN 800. Síť je tvořena kombinací betonových, kameninových a plastových potrubí z PVC.



Obr. 18 Vizualizace a topologická kontrola vektorové vrstvy kanalizačních šachet a potrubí nad leteckým snímkem zájmového území v programu QGIS

Před importem dat do prostředí EPA SWMM byla provedena kontrola topologie a atributových tabulek. Jelikož původní GIS podklady obsahovaly dílčí nesrovnalosti a chybějící údaje, bylo nutné provést jejich úpravu a doplnění. V prostředí QGIS byly identifikovány a opraveny topologické chyby, například nepropojené uzly nebo duplicitní geometrie.



Obr. 19 Náhled na vstupní databázové sady v QGIS; levá tabulka reprezentuje uzlové body s určenými kótami hloubky a terénu, pravá tabulka definuje geometrické vlastnosti úseků, délky a typ materiálu

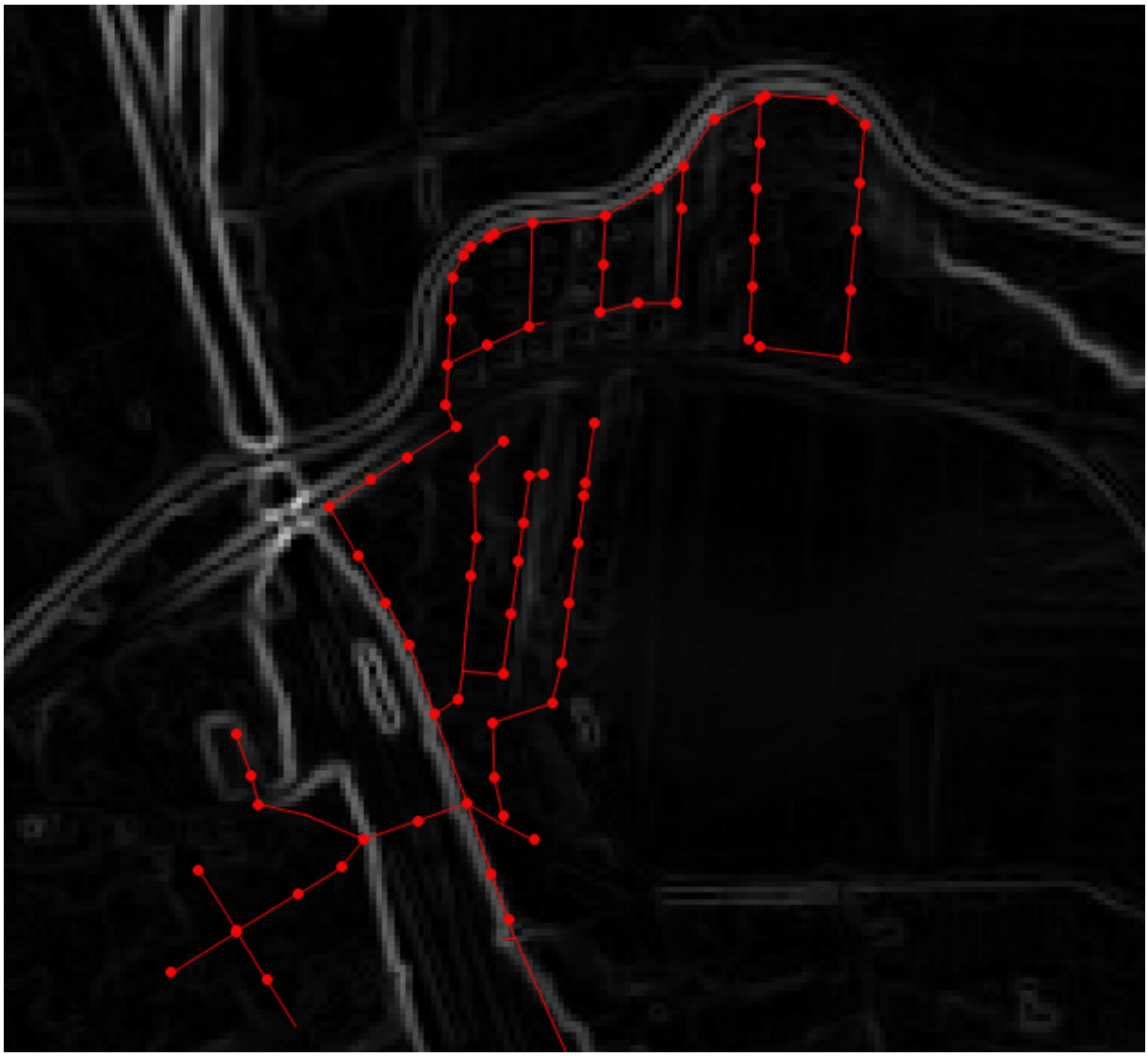
Chybějící výšková data, zejména kóty dna šachet, byla dopočtena na základě známých hloubek šachet a sklonů sousedních úseků tak, aby byla zachována gravitační kontinuita proudění směrem k recipientu. Zvýšená pozornost byla věnována odlehčovací komoře, kde bylo nutné rekonstruovat geometrii průtočného žlabu a výšku přelivné hrany.

4.3 DOPLŇUJÍCÍ DATA Z EXTERNÍCH ZDROJŮ

4.3.1 DIGITÁLNÍ MODEL TERÉNU

Pro vymezení dílčího hydrologického povodí a určení morfologických charakteristik území byl využit Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G), poskytovaný Zeměměřickým úřadem. Model vychází z dat leteckého laserového skenování a vykazuje vysokou výškovou přesnost [23].

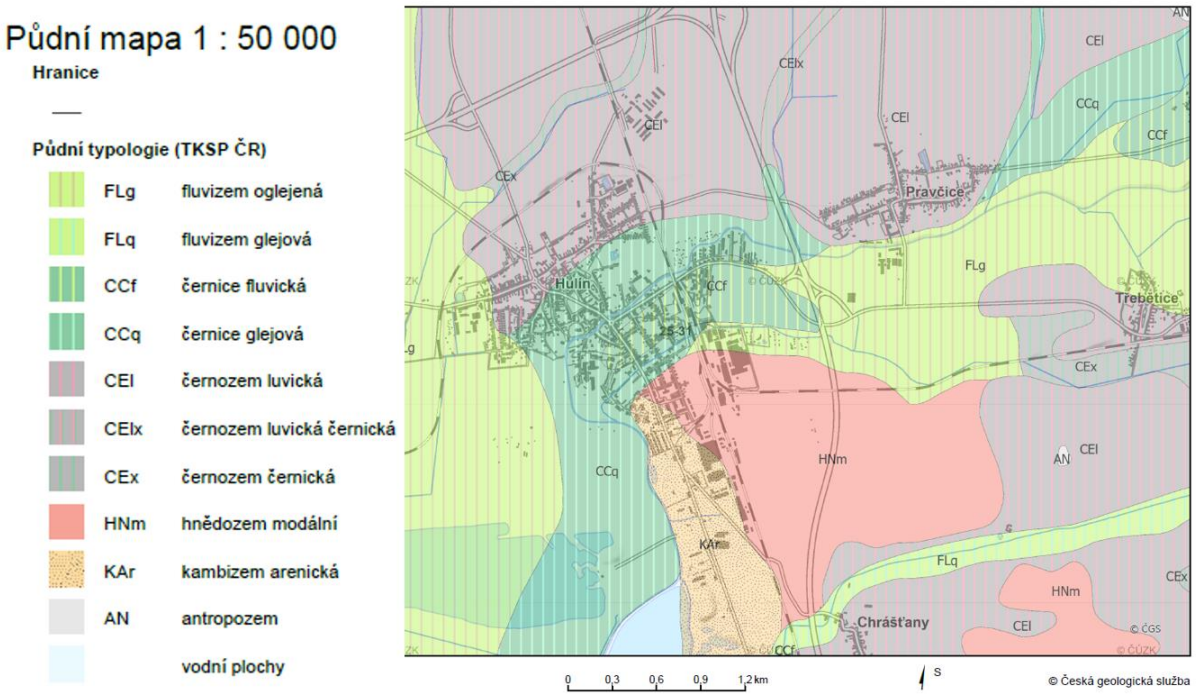
V prostředí QGIS byl z těchto dat vytvořen rastr sklonů a provedena analýza směru toku a akumulace odtoku. Na základě těchto kroků bylo možné určit průměrný sklon jednotlivých dílčích povodí a stanovit pravděpodobné trasy povrchového odtoku směrem k uličním vpustem.



Obr. 20 Výsledný rastr sklonů zemského povrchu generovaný z DMR 5G jako podklad pro stanovení sklonitosti subpovodí; červené linie reprezentují trasování modelované stokové sítě

4.3.2 PŮDNÍ POMĚRY A GEOLOGICKÉ POMĚRY

Fyzikální a infiltrační vlastnosti propustných povrchů byly stanoveny na základě mapových podkladů České geologické služby a Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy [24]. Geologické podloží řešeného území tvoří převážně kvartérní fluviální sedimenty s převahou hlinitých, písčitých a štěrkovitých vrstev. Půdní typy jsou reprezentovány především fluvizeměmi a oglejenými půdami s hlinitým až jílovitohlinitým charakterem.



Obr. 21 Půdní mapa města Hulín a přilehlého okolí s vymezením půdních typů dle TKSP ČR [24]

Z hlediska hydrologických vlastností půd podle klasifikace SCS spadá území převážně do hydrologické skupiny C až D. Tyto půdy vykazují nižší infiltrační schopnost a vyšší potenciál povrchového odtoku, což bylo zohledněno při volbě infiltračního modelu [3].

4.3.3 ODHAD A INTERPOLACE NEZNÁMÝCH PARAMETRŮ

V případech, kdy nebylo možné dohledat přesné technické parametry z archivní dokumentace provozovatele, byly některé hodnoty stanoveny na základě odborné literatury, doporučení manuálu EPA SWMM a technických norem.

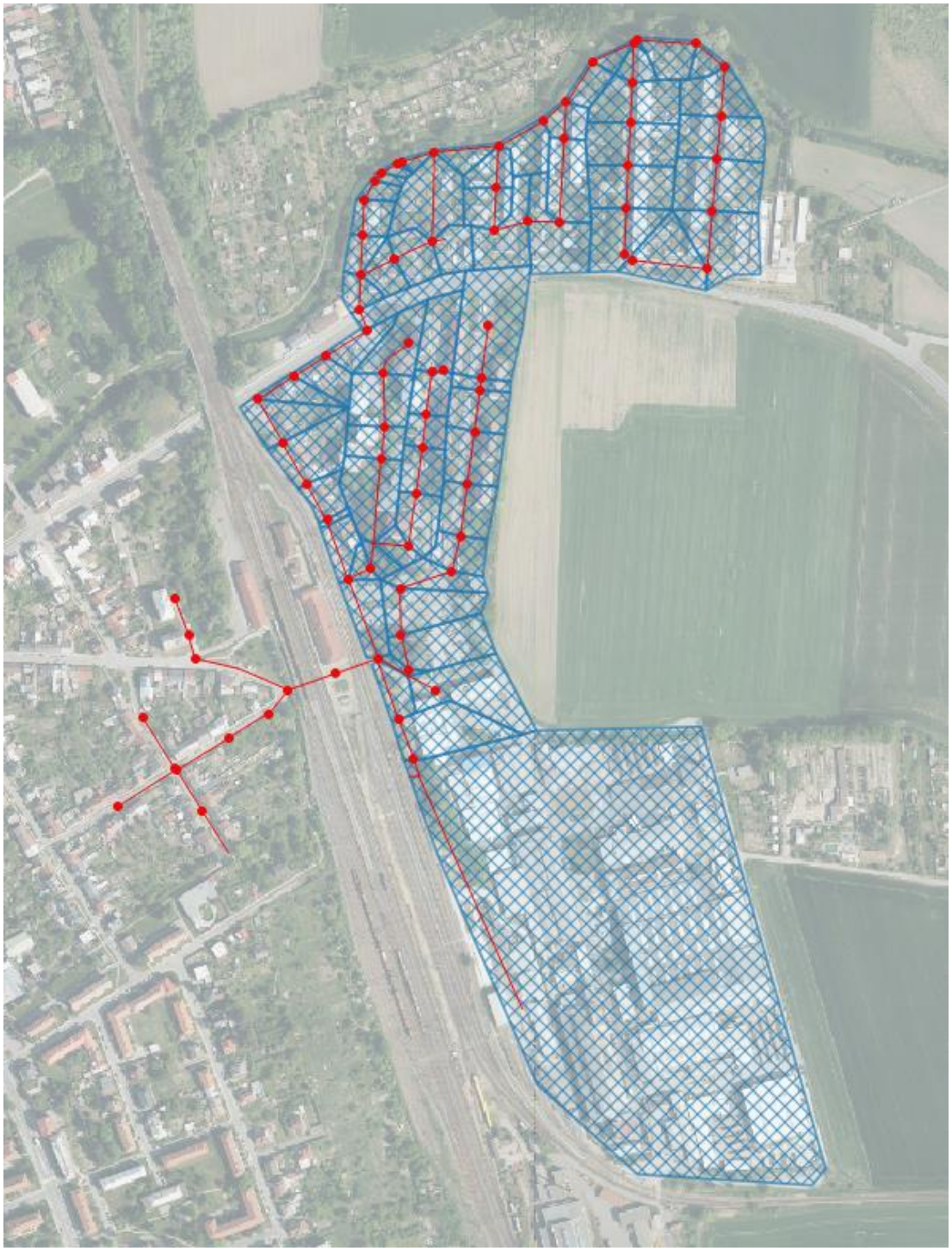
- Manningův součinitel drsnosti potrubí byl zvolen s ohledem na materiál a předpokládaný stav potrubí podle tabulek z ČSN 75 6101 – Stokové sítě a kanalizační přípojky [10]. Pro PVC byla použita hodnota n = 0,011, pro kameninové stoky n = 0,013 a pro betonové stoky n = 0,015.
- Pro povrchový odtok byl součinitel nastaven na n = 0,013 pro nepropustné plochy a n = 0,2 pro propustné plochy [7].

4.4 PŘÍPRAVA DAT V PROSTŘEDÍ GIS

Transformace vstupních dat do podoby kompatibilní s programem EPA SWMM probíhala v několika krocích v prostředí QGIS:

- Topologická úprava dat – původní vrstvy byly podrobeny kontrole geometrických chyb. Pomocí nástroje „Snap geometries to layer“ byly konce linií potrubí napojeny na bodové vrstvy šachet.

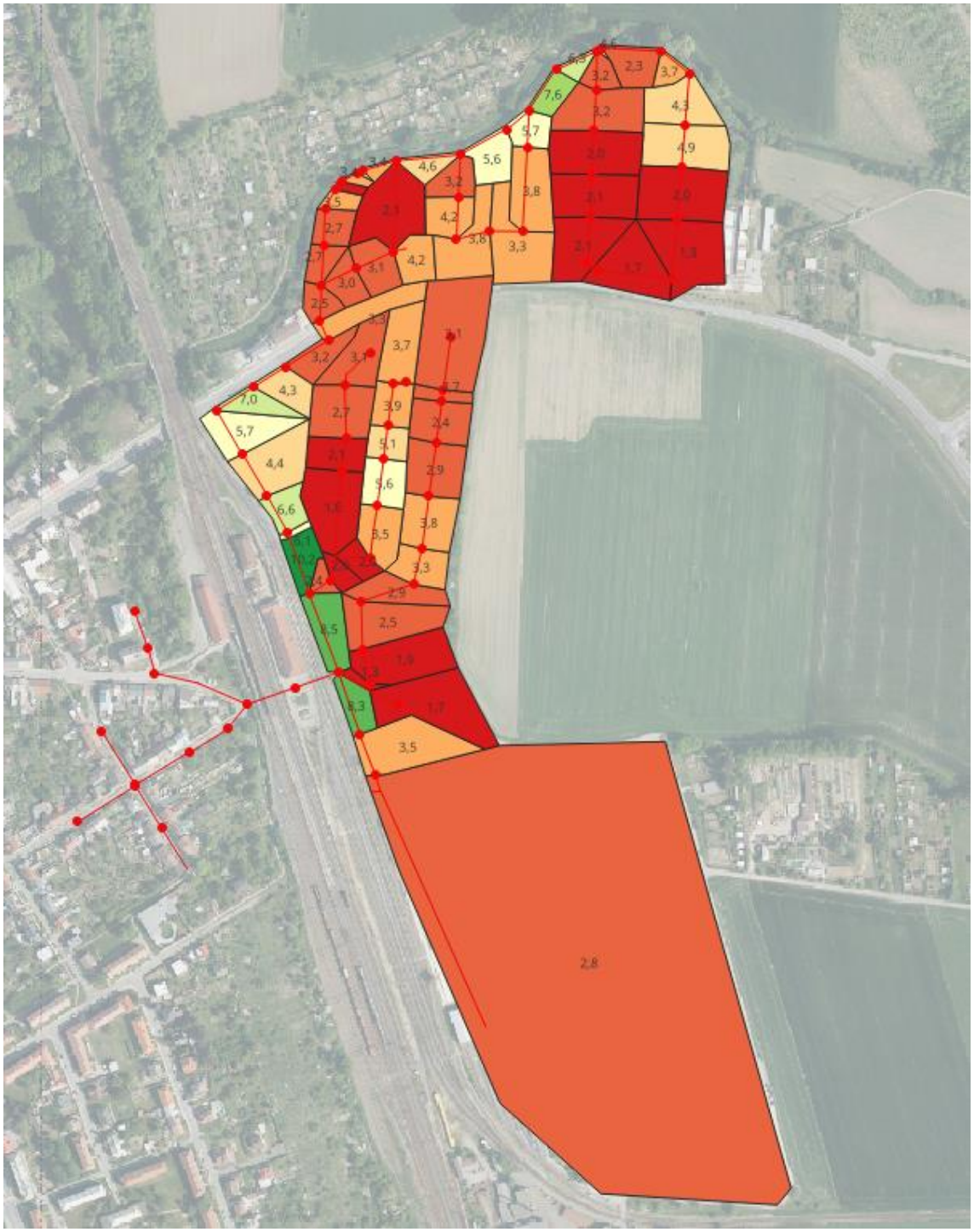
- Rozdělení území na dílčí povodí – zájmové území bylo rozděleno na jednotlivá subpovodí příslušející k jednotlivým šachtám. Vymezení bylo provedeno kombinací analýzy terénu a manuální úpravy hranic podle skutečných podmínek odtoku.



Obr. 22 Rozdělení zájmového území na dílčí povodí

- Výpočet plošných charakteristik – pro každé subpovodí byly vypočteny základní geometrické parametry, zejména plocha, průměrný sklon a charakteristická šířka odtoku.

- Export dat – výsledné vrstvy uzlů a linií byly z prostředí QGIS transformovány do vstupního formátu .inp s využitím specializovaného open-source zásuvného modulu QgisSWMM. Tento plugin umožňuje exaktní mapování atributových tabulek QGIS (obsahujících geometrické a výškové parametry sítě) na datové struktury simulačního jádra EPA SWMM, čímž byla zajištěna absolutní topologická shoda mezi GIS projektem a výsledným hydrodynamickým modelem bez rizika vzniku manuálních chyb při přepisu dat.



Obr. 23 Vizualizace sklonů terénu dílčích povodí v prostředí QGIS

4.5 SESTAVENÍ MODELU V EPA SWMM

Sestavení nekalibrovaného modelu v programu EPA SWMM 5.2 probíhalo v několika krocích:

- Krok 1: Nastavení projektu

V programu byly nejprve nastaveny globální parametry simulace a výpočetní jednotky (metrická soustava – průtoky v l/s). Jako výpočetní metoda pro hydraulické proudění v síti byla zvolena Dynamická vlna (Dynamic Wave). Tato volba je pro dané rovinaté území nezbytná, neboť korektně řeší Saint-Venantovy rovnice a dokáže simulovat stavy tlakového proudění, zpětného vzdutí (backwater effect) a zatápění uzlů při kapacitním přetížení. Pro výpočet ztrát infiltrací byla zvolena fyzikálně podložená Green-Amptova metoda.

- Krok 2: Definice uzlů

Do modelu byly importovány šachty jako objekty typu Junction. U každého uzlu byla definována kóta dna (Invert Elev.) a maximální hloubka šachty (Max. Depth) na základě vyčištěných dat z GIS. Koncové místo celého systému bylo definováno jako okrajová podmínka typu Outfall s volným výtokem.

Obr. 24 Zadávání atributů šachty a potrubí stokové sítě v prostředí SWMM

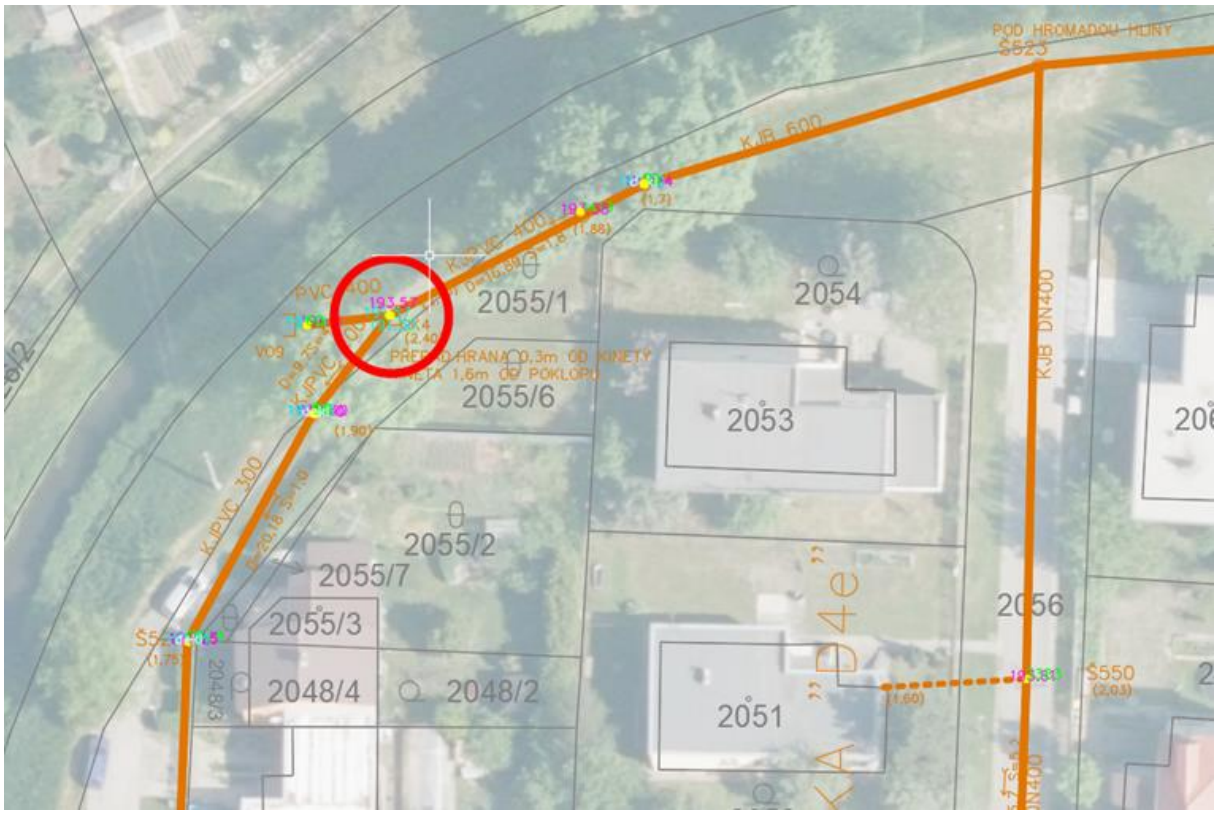
- Krok 3: Definice stok

Potrubní úseky byly zavedeny jako prvky Conduit. Každému úseku byly přiřazeny geometrické parametry: délka, tvar příčného průřezu (kruhový – Circular), jmenovitý průměr (od DN 150 do DN 800) a Manningův součinitel drsnosti podle materiálu potrubí. Kóty vtoků a výtoků byly navázány na dno příslušných šachet.

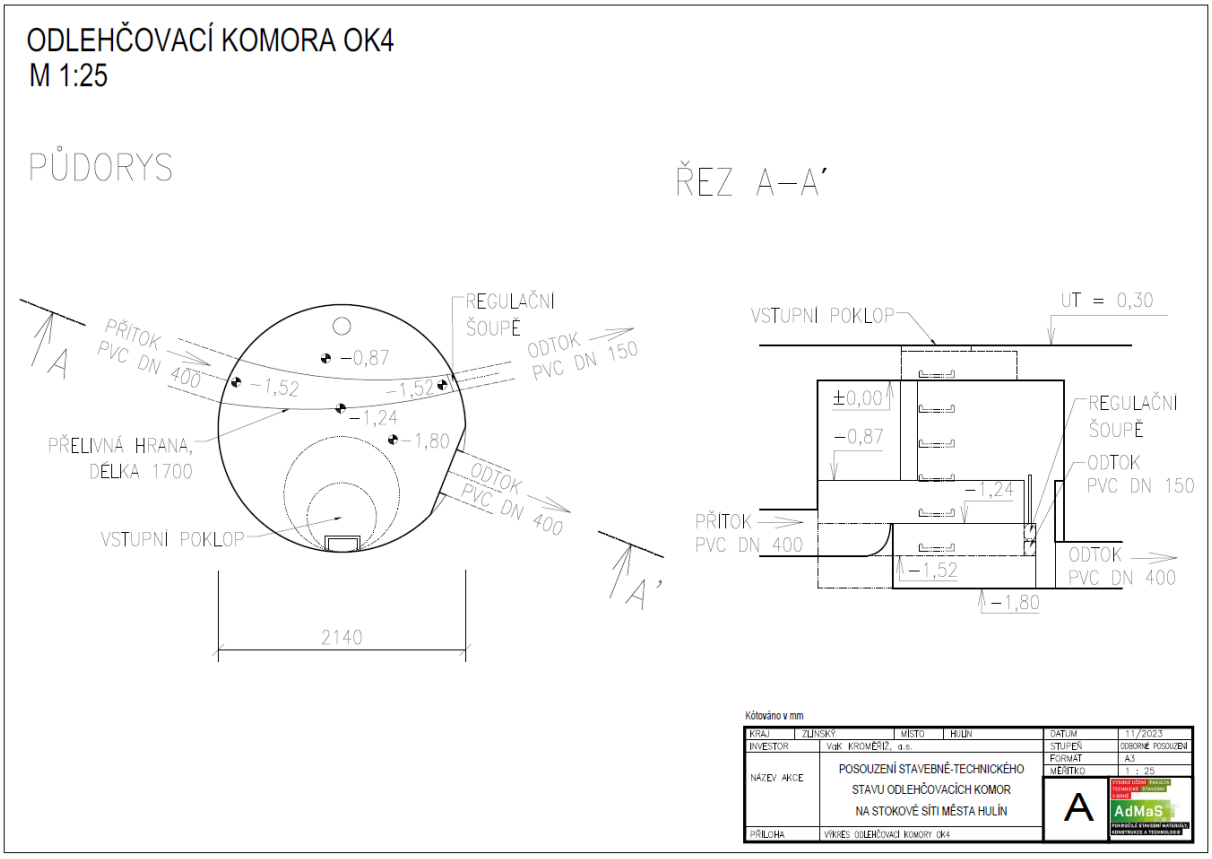
- Krok 4: Modelování odlehčovací komory

Odlehčovací komora byla modelována jako specifický uzel, z něhož vystupují dvě větve: hlavní průtočný korytový žlab jednotné sítě vedoucí dále k čistírně a odlehčovací větev. Průtočný žlab byl nadefinován jako otevřené koryto s půlkruhovým dnem (vtokový segment o průměru 0,4 m přecházející do výtokového průměru 0,15 m, celková délka koryta v tělese komory činí 2,0 m). Transport splaškových vod zde probíhá gravitačně u dna. Přepadový mechanismus dešťových vod byl nadefinován pomocí objektu Přeliv (Weir) typu Ostrohranný boční přeliv (Sideflow Weir). Výška přelivné hrany nad dnem komory byla nastavena na hodnotu 0,28 m. Při stoupnutí hladiny nad tuto úroveň začíná docházet k bočnímu přepadu do odlehčovací stoky vyúsťující do recipientu. Pro ostrohranný nerezový přeliv byl z publikace [25] převzat základní bezrozměrný koeficient přepadu m = 0,41. Program SWMM však v definici přelivu vyžaduje zadání rozměrného koeficientu přepadu C_w = 1.816 (Discharge Coefficient), který vychází z přepočtu:

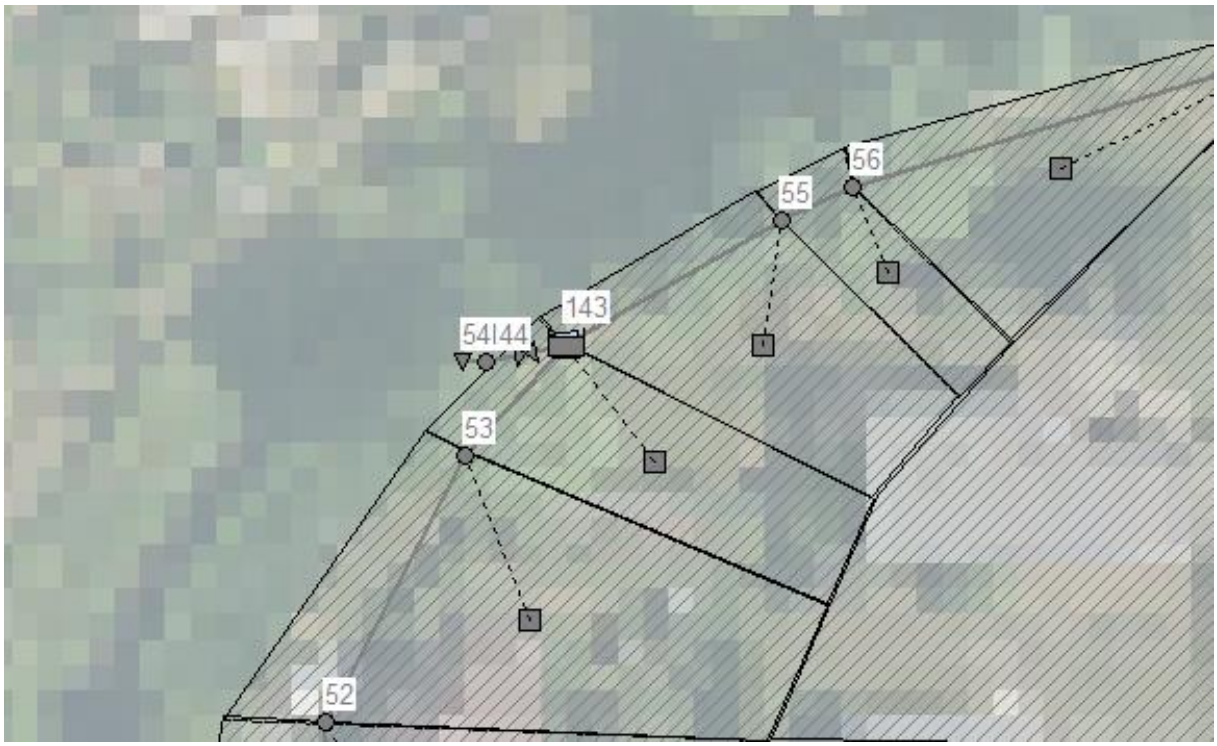
$$C_w = m \cdot \sqrt{2g} = 0,41 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} = 1,816 \ \mathrm{m}^{1/2} \cdot \mathrm{s}^{-1}$$



Obr. 25 Situace lokality odlehčovací komory



Obr. 26 Výkresová dokumentace řešené odlehčovací komory; podklad pro stanovení geometrických parametrů modelu (délka koryta, výška přelivné stěny) a trasování odlehčovací větve do recipientu [26]



Obr. 27 Schéma namodelované odlehčovací komory v prostředí EPA SWMM s definovaným bočním přelivem a připojením dílčích povodí k odtokovým uzlům

- Krok 5: Definice subcatchmentů

Na základě GIS analýzy byla vložena vrstva dílčích povodí. Každému subpovodí byl přiřazen konkrétní odtokový uzel (Outlet Junction), do kterého se transformovaný povrchový odtok vlévá.

- Krok 6: Definice srážkového vstupu

Do modelu byl vložen objekt Rain Gage. Pro simulaci byl použit syntetický blokový déšť odvozený z regionálních Truplových intenzitních tabulek pro nejbližší reprezentativní srážkoměrnou stanici, kterou je Přerov. Zvolen byl dvouletý déšť s dobou trvání 15 minut (p = 0,5) o intenzitě q = 162 l/s/ha.

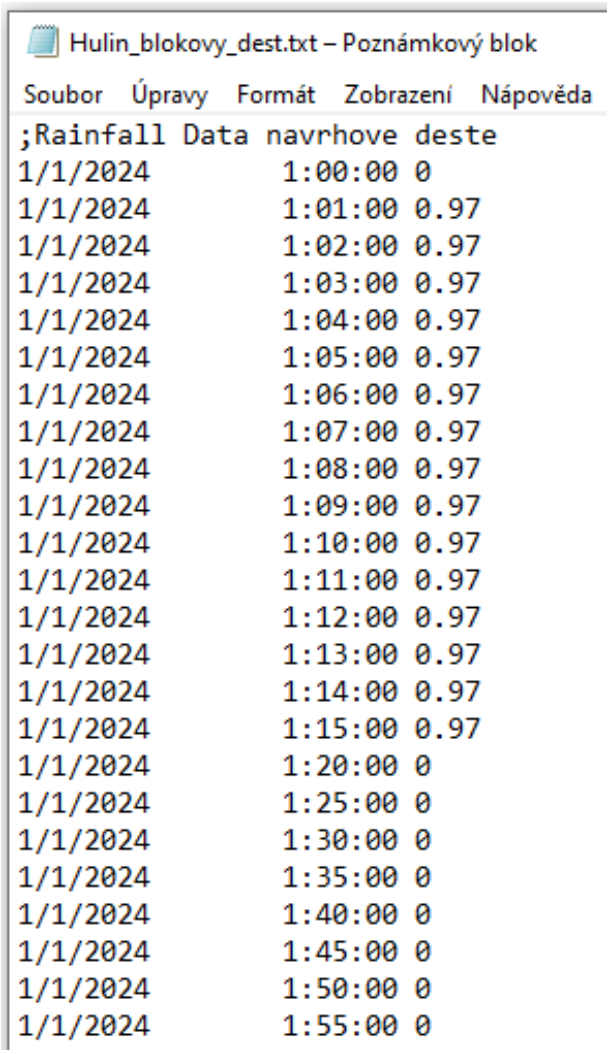
Tab. 4 Vydatnosti náhradního blokového deště pro Přerov [27]

doba trvání deště *t [min]*	vydatnost deště [l/(s.ha)] za dobu *t* při periodicitě *n*							
	5	2	1	0,5	0,2	0,1	0,05	0,033
5	130,0	188,0	240,0	298,0	382,0	447,0	512,0	550,0
10	80,8	124,0	163,0	208,0	271,0	319,0	370,0	400,0
15	58,9	93,9	127,0	162,0	213,0	253,0	293,0	317,0
20	47,9	76,7	104,0	134,0	177,0	210,0	244,0	263,0
30	34,5	55,5	76,0	97,3	128,0	152,0	176,0	190,0
40	27,5	44,6	60,8	78,0	102,0	120,0	139,0	150,0
60	19,7	32,2	43,5	55,7	73,1	86,1	99,7	108,0
90	14,1	23,1	31,3	40,0	52,2	61,5	71,0	76,5
120	11,1	18,3	24,7	31,5	41,1	48,4	55,7	59,9

Volba periodicity p = 0,5 (jednou za dva roky) a doby trvání srážky t = 15 min striktně vychází z normativních požadavků ČSN EN 752 [9] pro posuzování stávajících jednotných stokových sítí v běžné městské zástavbě s rodinnou a smíšenou zástavbou, kde je limitní četnost výskytu kritických stavů (zaplavení povrchu) legislativně stanovena právě na hodnotu 0,5 rok^{-1}. Patnáctiminutová doba trvání syntetického bloku představuje kritický čas koncentrace povrchového odtoku pro takto prostorově limitovaná a morfologicky rovinatá povodí. Při této délce srážky dochází k plnému hydraulickému zapojení všech nepropustných ploch (střech a komunikací) do systému a k dosažení maximálních špičkových průtoků v uzlu odlehčovací komory předtím, než se začne projevovat přirozená transformace a tlumení povodňové vlny v síti. Použití blokového deště s konstantní intenzitou představuje standardní inženýrský přístup pro nekalibrované modely, neboť eliminuje nejistoty spojené s vnitřní strukturou srážky a testuje systém na maximální možný hydrotechnický nápor.

Celkový úhrn srážky za 15 minut simulace odpovídá hodnotě 14,55 mm. Pro simulaci reálného náběhu srážkové události byla v externím textovém editoru (Poznámkový blok) vytvořena časová řada s minutovým krokem, kde srážka v první minutě dosáhla k maximu

a následně v šestnácté minutě odezněla (se špičkovým úhrnem v minutovém kroku 0,97 mm). Tento soubor ve formátu .txt byl následně importován do datového objektu Time Series v SWMM.



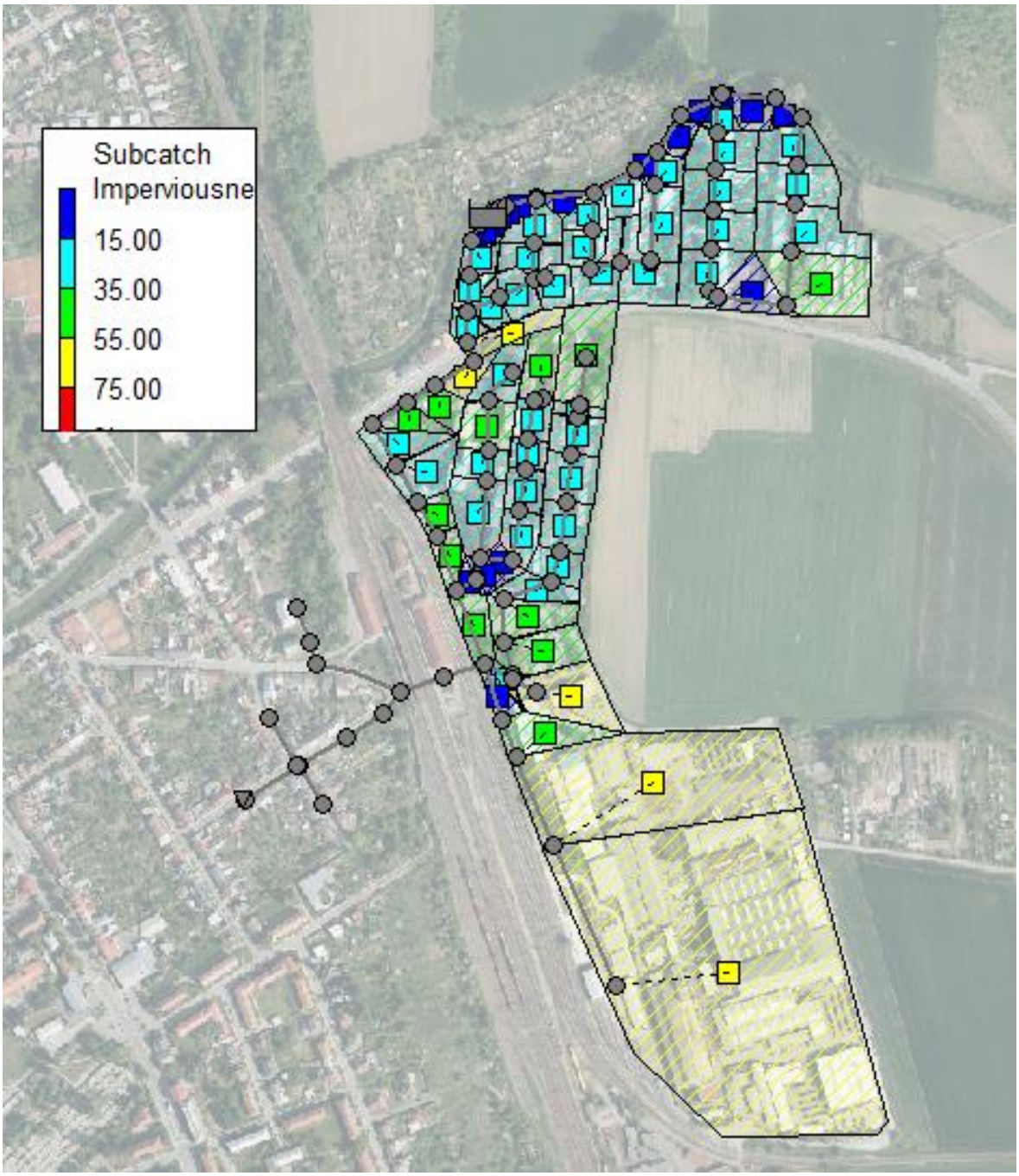
Obr. 28 Časová řada návrhového deště vytvořená pro import do programu EPA SWMM s celkovým úhrnem srážky 14,55 mm a maximální intenzitou 0,97 mm/min

4.6 PARAMETRY DÍLČÍCH POVODÍ

Správné nastavení hydrologických parametrů dílčích povodí je klíčové pro věrohodnost simulace. Vzhledem k nekalibrovanému charakteru modelu byly tyto hodnoty stanoveny na základě fyzických podkladů a inženýrské rešerše literatury:

- Area (Rozloha): Celková plocha byla pro každé subpovodí stanovena automatickým výpočtem v QGIS v hektarech.
- Width (Charakteristická šířka odtoku): Tento geometrický parametr řídí transformaci odtoku pomocí nelineárního rezervoáru a vyjadřuje délku přelivné hrany, přes kterou voda z povodí odtéká. Byla určena jako podíl rozlohy povodí a průměrné délky odtokové dráhy (W = A / L).

- % Slope (Průměrný sklon): Průměrný sklon povrchu povodí získaný z DMT vyjádřený v procentech.
- % Imperv (Podíl nepropustných ploch): Vyjadřuje procentuální zastoupení zcela zpevněných povrchů, které neumožňují infiltraci. Hodnota tohoto hydrologického parametru byla určena a odhadnuta na základě analýzy zemského krytu (střechy, vozovky, zpevněné plochy) podle letecké ortofoto mapy z portálu Mapy.com [22]. U rodinné zástavby činí tento podíl průměrně 20 %, zatímco u průmyslového areálu stoupá až k 70 %.

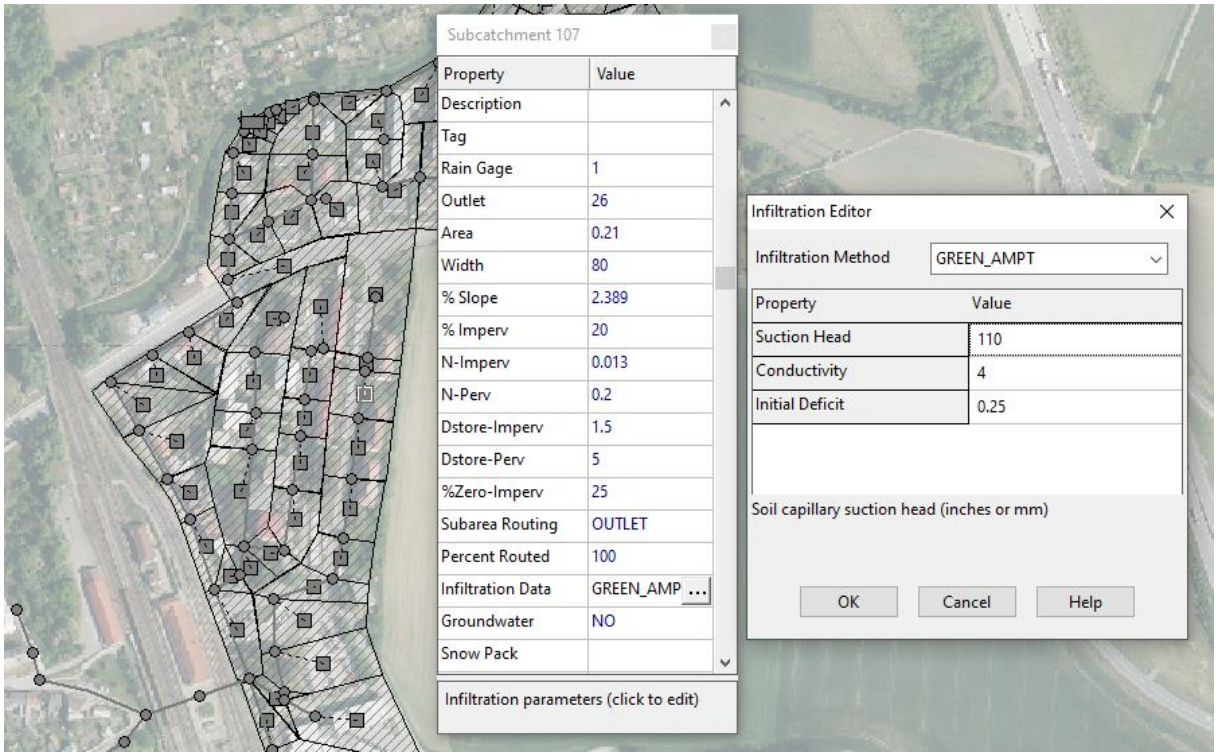


Obr. 29 Podíl nepropustných ploch jednotlivých dílčích povodí v prostředí EPA SWMM, barevně rozlišený podle procentuálního zastoupení nepropustných povrchů

Pro infiltrační model Green-Ampt byly použity následující parametry podle jednotlivých typů půd:

- fluvizem oglejená a černice glejová:
    - hydraulická vodivost Ksat = 3 mm/h
    - sací tlak ψ = 120 mm
    - počáteční deficit IMD = 0,20
- hnědozem modální:
    - Ksat = 6 mm/h
    - ψ = 100 mm
    - IMD = 0,30
- černice fluvická:
    - Ksat = 4 mm/h
    - ψ = 110 mm
    - IMD = 0,25

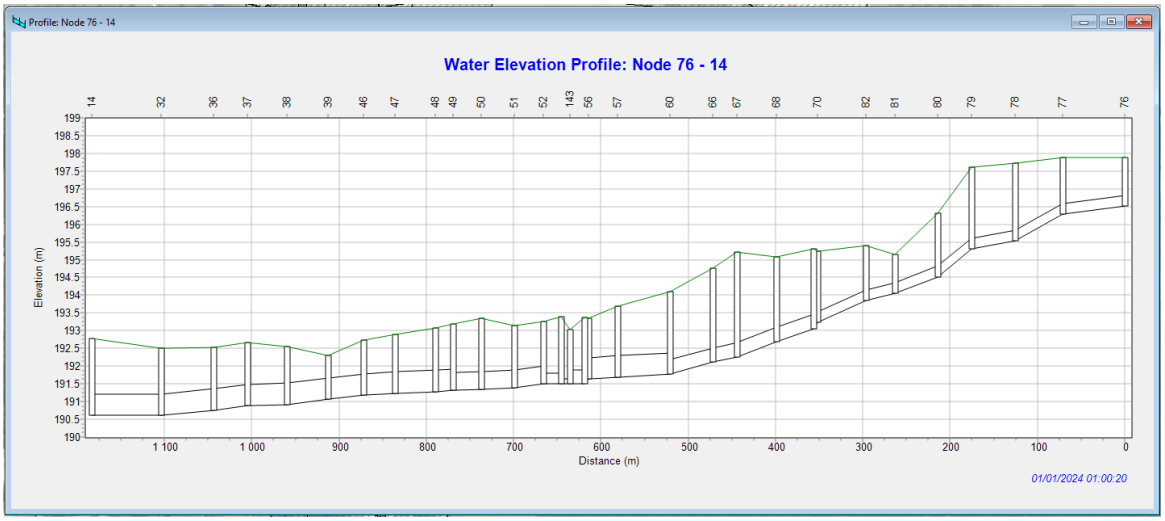
Tyto hodnoty odpovídají reálným podmínkám nivního území a byly použity jako reprezentativní pro celé modelované území [3].



Obr. 30 Nastavení infiltračního modelu Green–Ampt v prostředí EPA SWMM pro vybrané dílčí povodí s parametry odpovídajícími půdnímu typu černice fluvická

4.7 SPECIFIKA STOKOVÉ SÍTĚ V ŘEŠENÉM ÚZEMÍ

Stoková síť v řešeném území vykazuje několik charakteristických vlastností, které ovlivňují hydraulické poměry během intenzivních srážek. Významným faktorem je velmi malý podélný sklon kmenové stoky, který souvisí s rovinatým reliéfem území. Výškový rozdíl mezi nejvyšším bodem sítě a závěrovým profilem z řešeného území činí přibližně 5,9 m.



Obr. 31 Podélný profil kmenové stokové sítě od nejvýše položené šachty po závěrový profil řešeného území, znázorňující velmi malý podélný sklon stoky a celkový výškový rozdíl přibližně 5,9 m

Dalším specifikem je jednotná kanalizační soustava, která odvádí splaškové i dešťové vody společně. Vzhledem k tomu, že je běžný splaškový průtok oproti srážkovému odtoku kapacitně i objemově prakticky zanedbatelný, hydraulické zatížení potrubí je plně diktováno dynamikou povrchového odtoku. Během srážkových událostí proto dochází k výraznému nárůstu průtoků a rychlému vzdouvání hladiny v potrubí. Kombinace nízkých sklonů a vysokého podílu nepropustných ploch vede k častému vzniku tlakových stavů a zpětného vzdutí.

4.8 NEJISTOTY A OMEZENÍ VSTUPNÍCH DAT

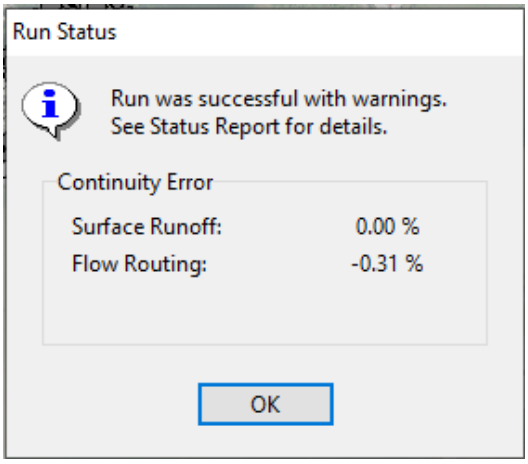
Při interpretaci výsledků je nutné zohlednit, že model byl sestaven jako nekalibrovaný, což představuje určité omezení.

- Absence terénního měření – model nebyl ověřen na základě reálných měření průtoků a hladin v síti.
- Zjednodušení geometrie objektů – geometrie některých objektů byla v modelu zjednodušena. Nebylo možné přesně zohlednit například lokální sedimenty, zanesení potrubí nebo stavební poškození.
- Numerická nejistota – při simulaci dynamické vlny v území s velmi malými sklony může docházet k numerické nestabilitě při střídání zaplavení a vysychání některých částí sítě.

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE

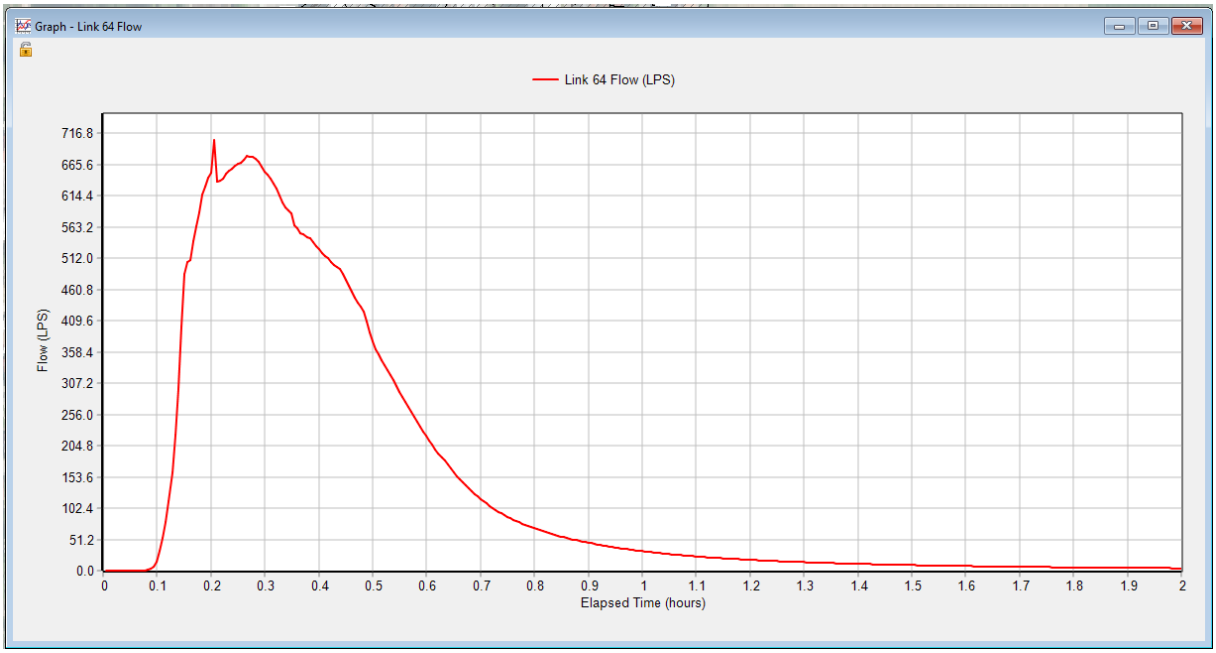
5.1 PRŮBĚHY PRŮTOKŮ A HLADIN

Po provedení dynamické simulace v programu EPA SWMM byla vyhodnocena hydraulická odezva stokové sítě na návrhový 15minutový déšť. Výpočet vykazoval dobrou numerickou stabilitu s nízkou chybou kontinuity.

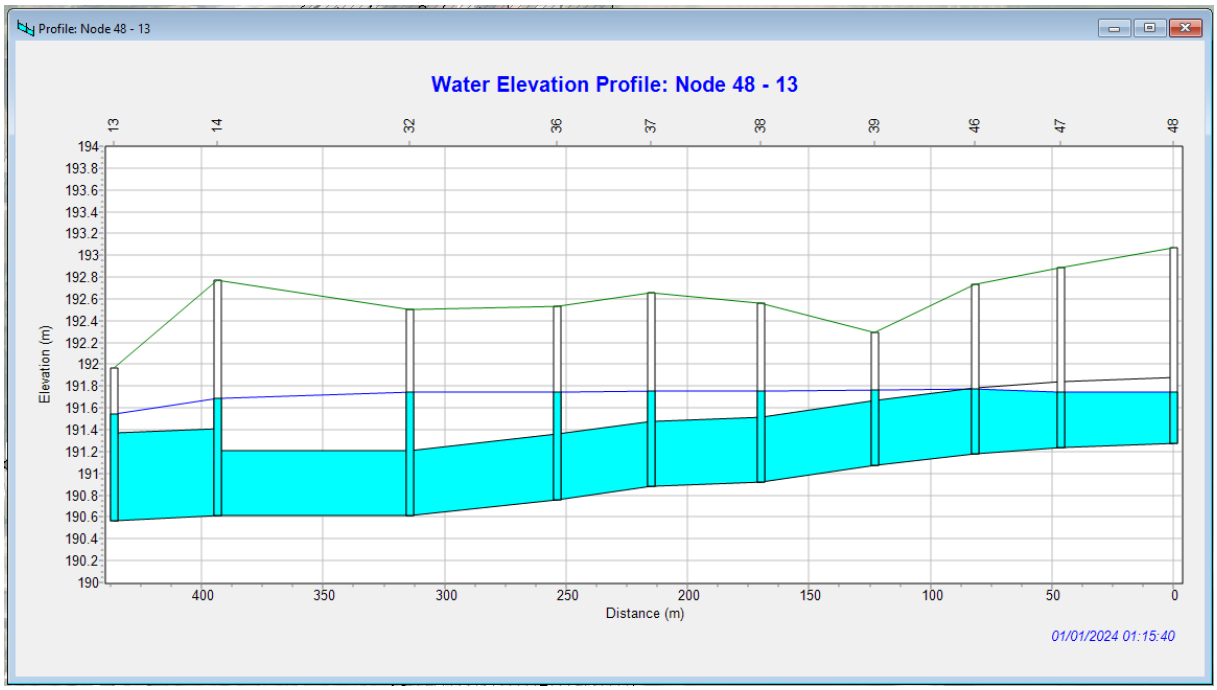


Obr. 32 Výsledek úspěšně provedené dynamické simulace v programu EPA SWMM s nízkou chybou kontinuity, potvrzující dobrou numerickou stabilitu výpočtu

Z hydrogramů odtoku je patrný rychlý nástup odtokové vlny zejména z ploch s vysokým podílem nepropustných povrchů. Nejvyšší průtoky byly zaznamenány přibližně mezi 10. a 20. minutou simulace. V hlavních stokách se začal projevovat efekt hydraulického vzdutí a docházelo ke zvýšení hladiny v šachtách.

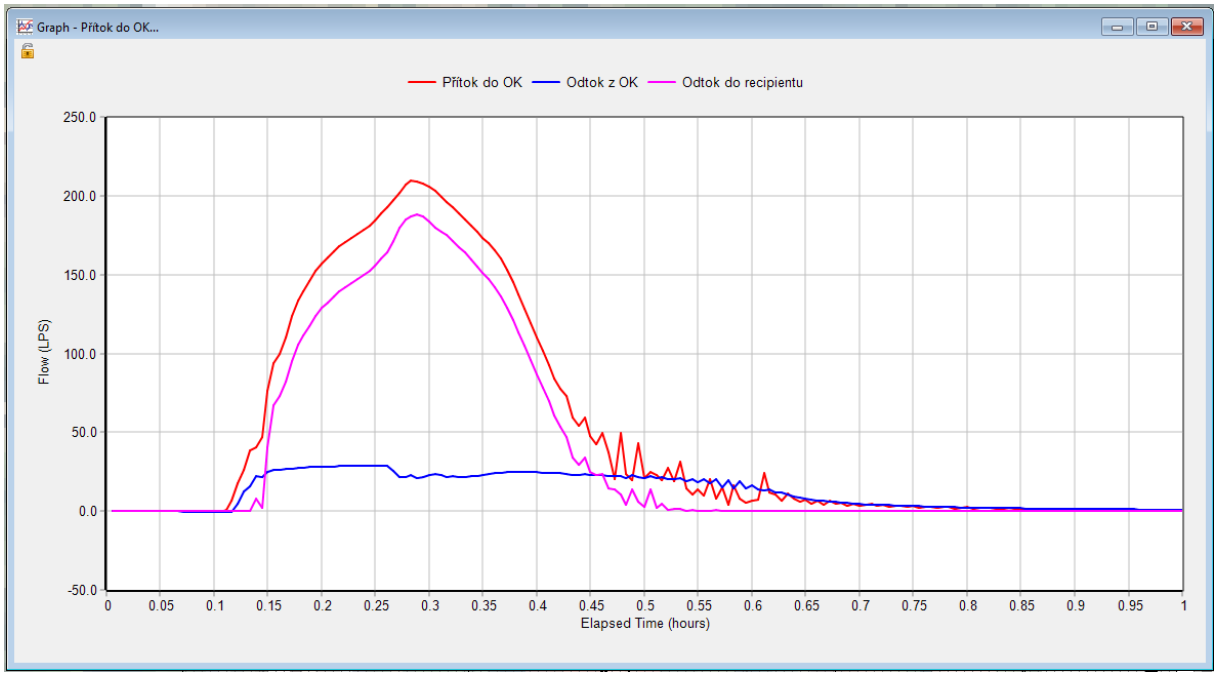


Graf 5: Průběh průtoku v potrubí DN 800 křížícím železniční trať během simulované srážkové události, znázorňující kulminaci průtoku a následný postupný pokles hydraulického zatížení stoky



Obr. 33 Podélný profil stokové sítě na ulici Nádražní v 15. minutě simulace, ve kterém je patrný vznik hydraulického vzdutí a zvýšení hladin vody v jednotlivých šachtách

V oblasti odlehčovací komory byl sledován průběh přepadu. V počáteční fázi srážky odtékala voda hlavním žlabem směrem k čistírně odpadních vod. Po překročení výšky přelivné hrany začalo docházet k přepadu části průtoku do odlehčovací stoky směřující do toku Rusava. Po ukončení srážky hladina postupně poklesla a systém se vrátil do běžného provozního stavu.



Graf 6: Průběh průtoků (l/s) odlehčovací komorou během simulované srážkové události, znázorňující přítok do komory, odtok hlavním žlabem a přepad do recipientu; k aktivaci přepadu dochází přibližně v 9. minutě simulace a jeho ukončení nastává kolem 30. minuty

5.2 IDENTIFIKACE KRITICKÝCH MÍST

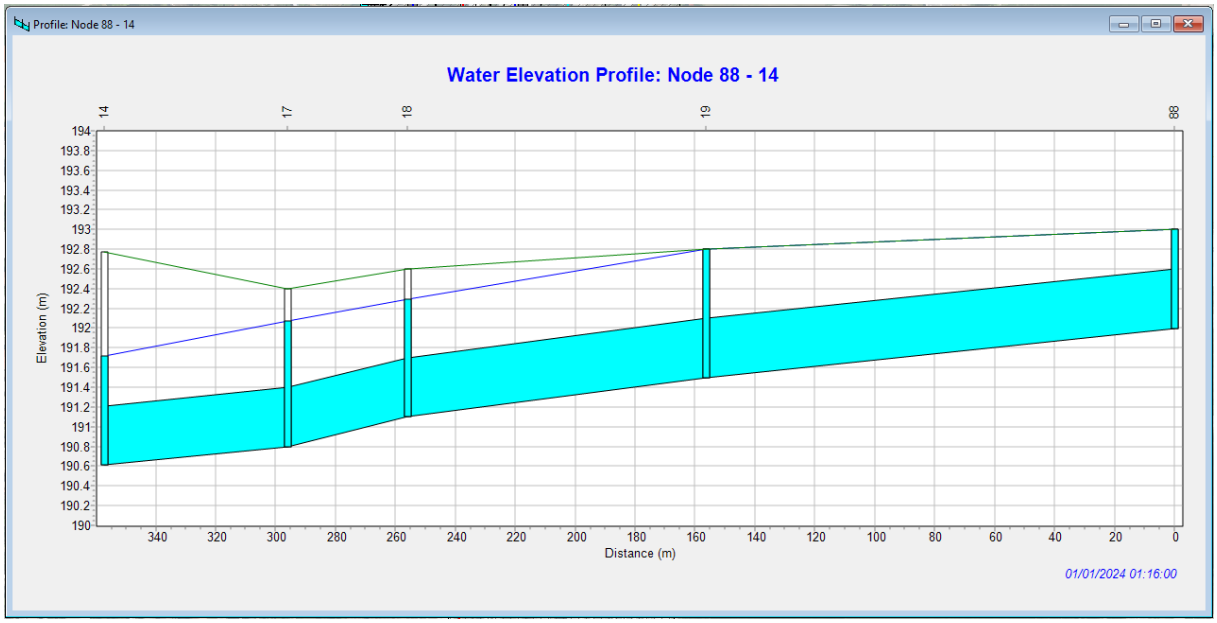
Na základě výsledků dynamické simulace byly ve stokové síti identifikovány tři hlavní kritické úseky, ve kterých docházelo ke zvýšenému hydraulickému zatížení, vzniku vzdutí nebo přechodu proudění do tlakového režimu. Kritická místa byla určena na základě analýzy průběhů hladin v šachtách, využití kapacity potrubí a směrů proudění během simulované srážkové události.

5.2.1 VYSOKÉ HYDRAULICKÉ ZATÍŽENÍ ÚSEKŮ

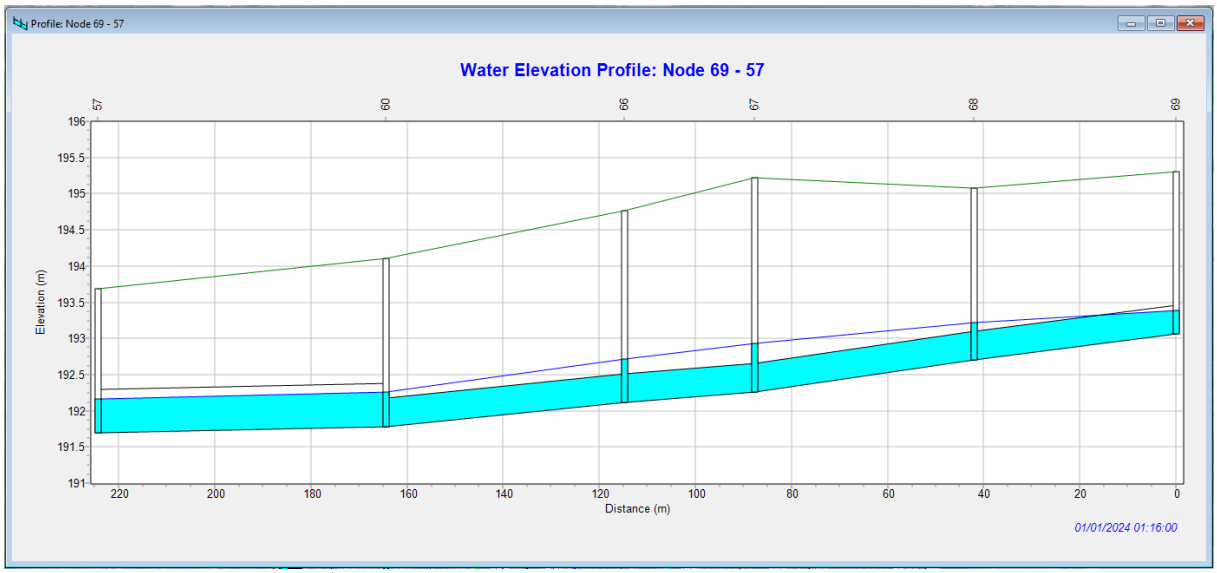
Nejvýznamnější hydraulické zatížení bylo zaznamenáno v úseku stoky vedené z průmyslového areálu, z ulice Nádražní a v částech stoky podél toku Rusava. Do úseků jsou zaústěny rozsáhlé zpevněné plochy. V důsledku vysokého podílu nepropustných povrchů docházelo při intenzivních srážkách k velmi rychlé transformaci srážky na odtok a k prudkému nárůstu průtoků v kanalizační síti.

Hydraulický výpočet prokázal, že potrubí v těchto úsecích během kulminace srážkové události podléhala tlakové režimu. Docházelo k úplnému zaplnění profilů potrubí a hladina vody v některých šachtách se přiblížila k úrovni terénu. Tento stav představuje zvýšené riziko výstupu vody na povrch komunikace při srážkách s vyšší intenzitou nebo delší dobou trvání.

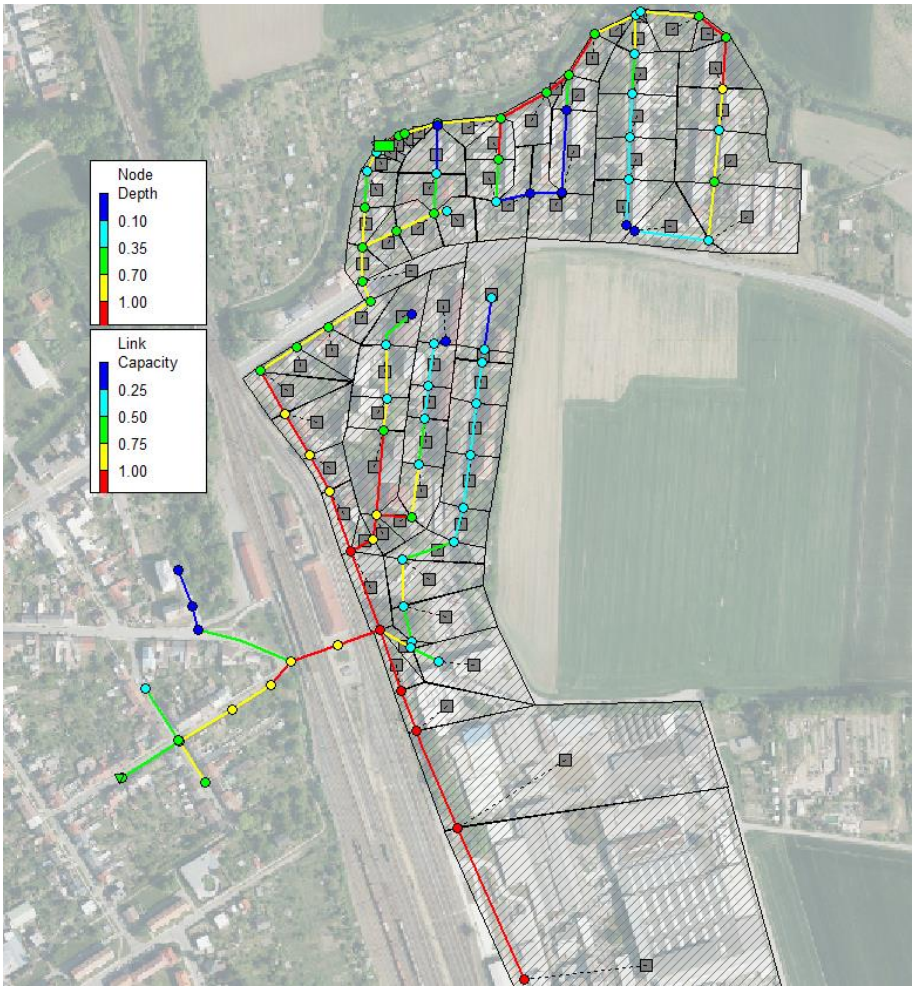
Významným faktorem ovlivňujícím hydraulické poměry je rovněž malý podélný sklon stoky, který omezuje schopnost gravitačního odtoku a podporuje vznik zpětného vzdutí. Podélný profil stoky potvrzuje výrazné hydraulické zatížení a vznik tlakových stavů v celé trase kanalizace.



Obr. 34 Podélný profil stoky odvádějící vody z průmyslového areálu, znázorňující zvýšené hydraulické zatížení potrubí, tlakové proudění a nárůst hladiny vody v jednotlivých šachtách během simulované srážkové události



Obr. 35 Podélný profil stoky vedené podél toku Rusava, znázorňující zvýšenou hladinu vody v šachtách a hydraulické zatížení potrubí s výskytem tlakového proudění během simulované srážkové události



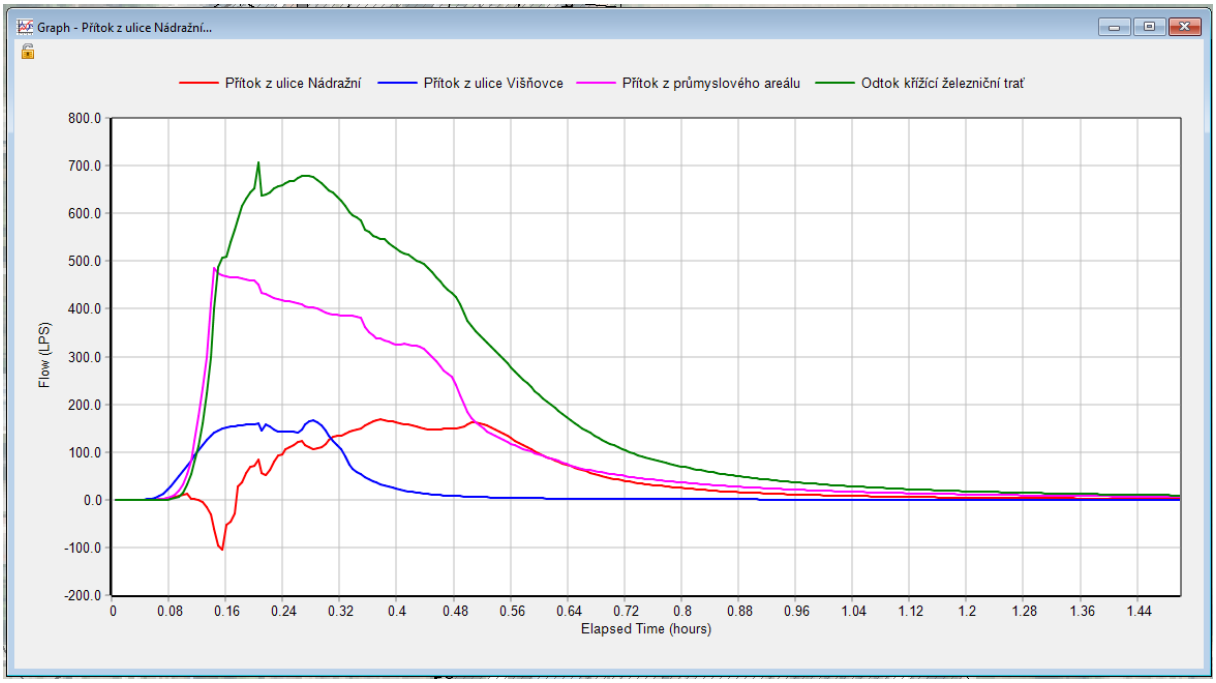
Obr. 36 Barevné znázornění maximálních hloubek vody v šachtách a hydraulického zatížení potrubí během simulace (modrá barva představuje nízké využití kapacity stoky, zatímco červená označuje tlakové proudění a kapacitně přetížené úseky stok)

5.2.2 KMENOVÝ SBĚRAČ PŘED KŘÍŽENÍM ŽELEZNIČNÍ TRATĚ

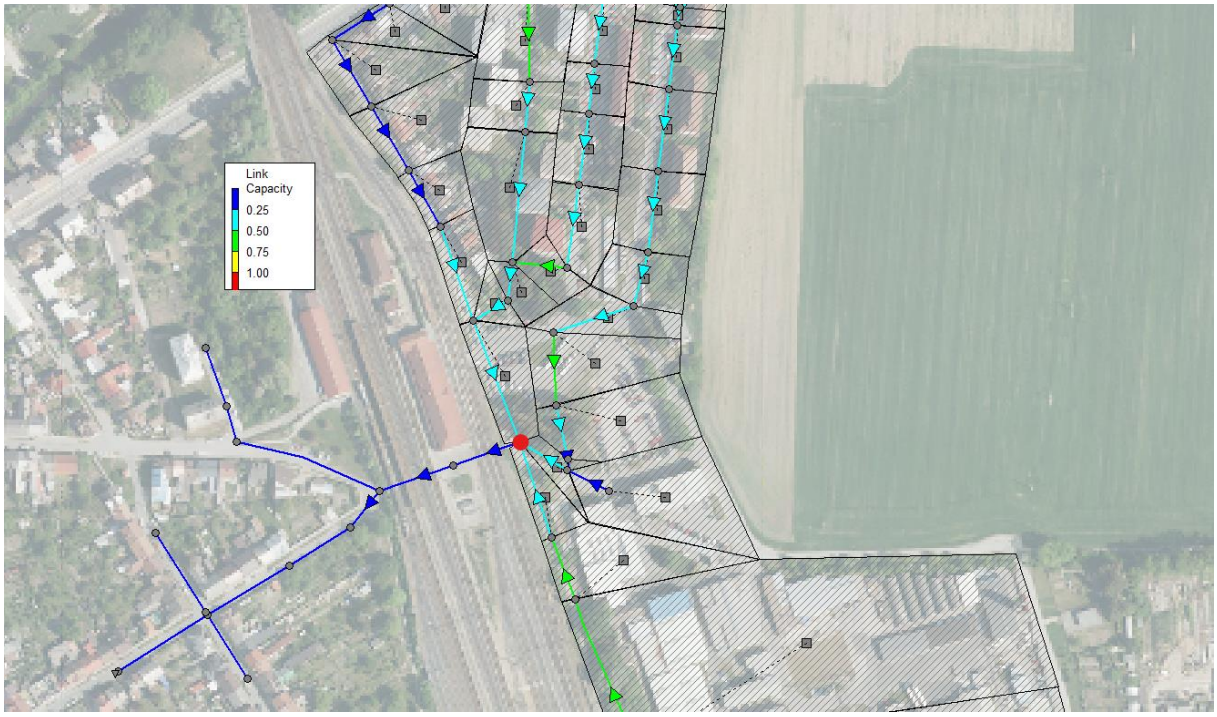
Další kritické místo bylo identifikováno na kmenovém sběrači před odlehčovací komorou. Tento úsek vykazuje velmi malý podélný sklon, v důsledku čehož docházelo během simulace k výraznému zpětnému vzdutí a omezení odtokové kapacity systému.

Hydraulický model prokázal, že vzdutí se šířilo proti směru proudění do navazujících uličních stok. V některých částech systému docházelo ke zpomalení proudění a lokálně i k obrácení směru toku vody. Nejvýrazněji se tento jev projevil v centrální sběrné šachtě před železniční tratí, kde se během kulminace srážkové události voda akumulovala a část průtoku se vracela zpět do stoky v ulici Nádražní.

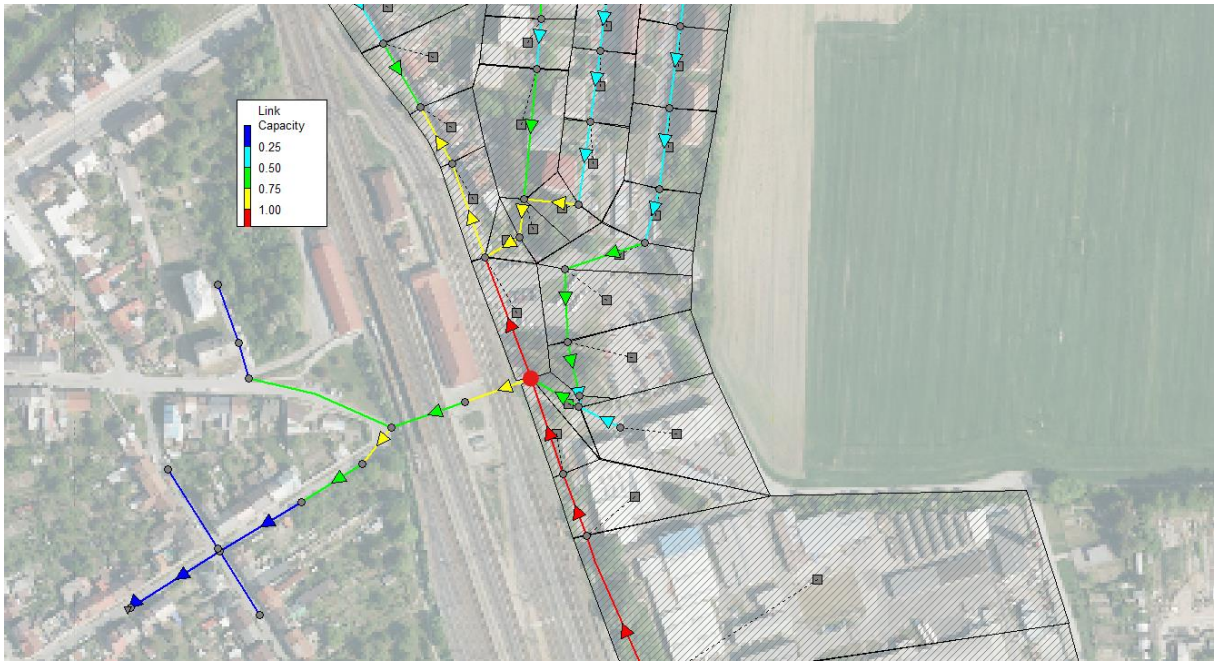
Tento hydraulický stav potvrzuje, že daný úsek představuje významné kapacitní omezení celé stokové sítě. Kombinace nízkého sklonu, vysokých přítoků z urbanizovaného území a omezené kapacity navazujícího potrubí způsobuje vznik tlakových poměrů a zvyšuje riziko hydraulického přetížení systému.



Graf 7: Průběh průtoků (l/s) do spojné šachty před křížením železniční tratě, kde v důsledku nedostatečné kapacity navazující stoky dochází ke zpětnému vzdutí a změně směru proudění do stoky v ulici Nádražní, což se projevuje zápornými hodnotami průtoku



Obr. 37 Situace hydraulického zatížení stokové sítě a směrů proudění v 7. minutě simulace; barevné rozlišení znázorňuje využití kapacity potrubí a šipky znázorňují směr toku, červeným bodem je vyznačena sběrná šachta

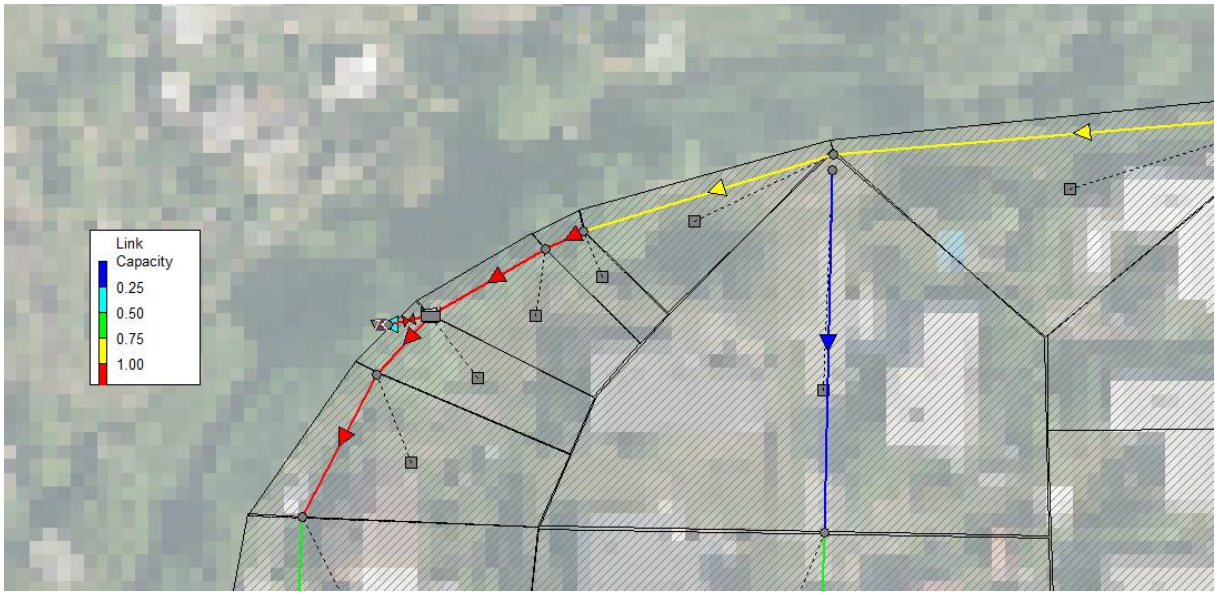


Obr. 38 Situace hydraulického zatížení stokové sítě a směrů proudění v 10. minutě simulace; barevné rozlišení znázorňuje využití kapacity potrubí a šipky směr toku vody, přičemž červeným bodem je vyznačena sběrná šachta, ve které vlivem zpětného vzdutí dochází k obrácení směru proudění do stoky v ulici Nádražní

5.2.3 ODLEHČOVACÍ KOMORA DO TOKU RUSAVA

Simulace potvrdila, že za běžných podmínek odlehčovací komora spolehlivě plní svou hydrotechnickou funkci. Při srážkovém přítoku do 30 l/s je veškerý objem odpadních vod odváděn dále pokračující stokovou sítí směrem k čistírně. Jakmile přítok limitní hodnotu 30 l/s překročí, začíná přebytečná dešťová voda přepadávat přes přelivnou hranu do recipientu.

Během testovaného srážkového maxima přitékalo do odlehčovací komory až 210l/s, přičemž transformovaný špičkový průtok odtékající do řeky Rusavy dosáhl přibližně 190 l/s. Při těchto extrémních průtocích se již naplno projevil vliv kritického hydraulického hrdla na odtoku z komory, kde pokračující potrubí vykazuje profil pouze DN 150. Vzhledem k této minimální odtokové kapacitě docházelo v modelu k výraznému zpětnému vzdutí vody jak v úseku bezprostředně před vtokem do odlehčovací komory, tak i v šachtě za jejím výtokem, což potvrdilo lokální přetížení daného uzlu.



Obr. 39 Situace hydraulického zatížení stokové sítě a směrů proudění v okolí odlehčovací komory; barevné rozlišení znázorňuje využití kapacity potrubí a šipky směr toku vody, přičemž v důsledku omezené kapacity navazujícího potrubí DN 150 dochází ke zpětnému vzdutí před odlehčovací komorou i v navazujících úsecích stokové sítě

6 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce splnila všechny stanovené cíle teoretického i praktického charakteru. V úvodní fázi byla zpracována rešerše zaměřená na moderní trendy v oblasti hydrologicko-hydraulického modelování městského odvodnění, principy transformace srážky na odtok a matematický popis proudění tekutin v kanalizačních systémech. Detailně byl charakterizován simulační program EPA SWMM jako celosvětově uznávaný standard pro hydrotechnické výpočty.

Praktickým přínosem práce bylo sestavení funkčního nekalibrovaného dynamického matematického modelu stokové sítě pro vybranou urbanizovanou zónu města Hulín v prostředí softwaru EPA SWMM 5.2. Do modelu byly integrovány veškeré dostupné geografické a technické podklady poskytnuté provozovatelem sítě ve formátu GIS, které byly doplněny o analýzu digitálního modelu terénu DMR 5G a srážková data odvozená z Truplových intenzitních tabulek pro stanici Přerov.

Dynamická simulace pracující s režimem dynamické vlny odhalila specifické hydraulické chování sítě, které je ovlivněno nepříznivou rovinatou morfologií zájmového území a nízkými podélnými sklony potrubí. Vytvořený model věrně nasimuloval chování bočního přepadu v odlehčovací komoře. Jakmile hladina vody ve žlabu stoupne nad stanovených 28 centimetrů, přebytečná dešťová voda začne přetékat přes ostrou hranu pryč z hlavní sítě. Tento proces brání přetížení kanalizace pod objektem a chrání čistírnu odpadních vod před zaplavením. Simulace ověřila množství a průtok vody, která tímto způsobem z komory odtéká. Tento transformovaný srážkový přítok pak bezpečně směřuje do blízké řeky Rusavy. Zároveň byla identifikována kritická místa sítě vykazující kapacitní poddimenzování a náchylnost k tlakovému proudění a zpětnému vzdutí, zejména v průmyslové zóně a v ulici Nádražní.

Vzhledem k tomu, že model byl sestaven jako nekalibrovaný, jeho výsledky představují prvotní, avšak užitečný inženýrský pohled na stav odvodnění dané lokality. Tento model poskytuje ucelený metodický základ a optimální výchozí platformu pro případný další rozvoj. V navazujících fázích výzkumu či v inženýrské praxi se doporučuje provést osazení sítě zařízeními na měření srážek a hydraulických veličin na stokové síti pro získání reálných hydrogramů, realizovat kalibraci a validaci modelu a následně jej využít jako spolehlivý nástroj pro návrh konkrétních nápravných opatření (např. implementaci prvků modrozelené infrastruktury či zvětšení profilů stok) ke zvýšení hydraulické bezpečnosti a ekologické udržitelnosti odvodnění města Hulín.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SUCHÁNEK, Milan, Petr SÝKORA a David STRÁNSKÝ. *Monitoring v městském odvodnění*. Líbeznice: Medim pro SOVAK ČR, [2012]. ISBN 978-80-87140-25-3.

[2] SUCHÁNEK, Milan, Michal ŽOUŽELA, David STRÁNSKÝ a Petr SÝKORA. *Monitoring v městském odvodnění*. [Praha]: Sdružení oboru vodovodů a kanalizací ČR, z.s. (SOVAK ČR), 2024. ISBN 978-80-907303-5-9.

[3] ROSSMAN, Lewis A. a Wayne C. HUBER. *Storm Water Management Model: Reference Manual. Volume I – Hydrology (Revised)*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2016. Dostupné také z: https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm

[4] Creating a Sanitary Sewer Overflow Response Plan. *Watercolor Management* [online]. 2020. Dostupné také z: https://www.watercolormanagement.com/creating-a-sanitary-sewer-overflow-response-plan/

[5] ROSSMAN, Lewis A. *Storm Water Management Model: Reference Manual. Volume II – Hydraulics*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2017. Dostupné také z: https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm

[6] BUTLER, David a John W. DAVIES. *Urban Drainage*. 3. vydání. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 78-0415455268.

[7] *Storm Water Management Model (SWMM) – Applications Manual*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2015. Dostupné také z: https://www.epa.gov/water-research

[8] SCHÜTZE, Manfred, David BUTLER a Michael BECK. *Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems*. London: Springer, 2004. ISBN 978-1843390480.

[9] ČSN EN 752. *Odvodňovací a stokové systémy vně budov*. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

[10] ČSN 75 6101. *Stokové sítě a kanalizační přípojky*. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

[11] ČSN 75 9010. *Vsakovací zařízení srážkových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Česká technická norma.

[12] ČSN 75 6262. *Odlehčovací komory*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019. Dostupné také z: http://csnonline.agentura-cas.cz/

[13] ČSN 75 6261. *Dešťové nádrže*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[14] ČSN EN 1671. *Venkovní tlakové systémy stokových sítí*. Praha: Český normalizační institut, 1998. Dostupné také z: http://csnonline.agentura-cas.cz/

[15] *Google* [online]. 2026. Dostupné také z: https://gemini.google.com/app. Vytvořeno pomocí nástroje Gemini (AI).

[16] Assessing the Impacts of Climate Change on Urban Drainage Systems. *ResearchGate* [online]. 2010. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/figure/Hyetograph-and-simulated-hydrographs-for-current-and-climate-changed-design-storms_fig1_227619600

[17] Hydraulic performance analysis of sewer systems with uncertain parameters. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA* [online]. 2014. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/figure/Plan-view-of-sewer-system-not-to-scale_fig5_270438469

[18] BERNE, Alexis et al. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*. 2004, 299(3–4), 166–179.

[19] Flow measurement to create a sewage master plan. *NIVUS GmbH* [online]. 2026. Dostupné také z: https://www.nivus.com/en/products-solutions/solutions-applications/our-applications-instrumentation-for-water-industry/channel-networks/portable-measurements/flow-measurement-to-create-a-sewage-master-plan

[20] QGIS – Spatial without Compromise. *QGIS Project* [online]. 2026. Dostupné také z: https://qgis.org/

[21] Storm Water Management Model (SWMM). *United States Environmental Protection Agency (EPA)* [online]. 2026. Dostupné také z: https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm

[22] Mapový podklad. *Mapy.com* [online]. 2026. Dostupné také z: https://mapy.com/cs/zakladni?x=15.6252330&y=49.8022514&z=8

[23] Digitální model terénu České republiky 5. generace (DMR 5G). *Český úřad zeměměřický a katastrální* [online]. 2026. Dostupné také z: https://geoportal.cuzk.gov.cz/(S(1rwethqt03gwsj40l4idjkcw))/Default.aspx?mode=TextMeta&metadataID=CZ-CUZK-DMR5G-V&metadataXSL=Full&side=vyskopis

[24] Půdní mapa 1 : 50 000 (systém TKSP ČR) – výřez Hulín a okolí. *Mapový server ČGS – Půdní mapy* [online]. 2026 [cit. 2026-05-20]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/pudy/#

[25] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika MODUL 01: Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2006.

[26] *Výzkumná zpráva*. VUT v Brně, Fakulta stavební, Centrum AdMaS. 2023.

[27] TRUPL, Josef. *Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský, 1958.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Hydraulické přetížení městské kanalizační sítě během přívalových srážek projevující se vytékáním vody z šachty na povrch vozovky [4] 12

Obr. 2 Schéma znázorňující jednotlivé prvky typického městského odvodňovacího systému [3] 16

Obr. 3 Schematické rozdělení srážek po dopadu na povrch (Vodní bilance) [3], přeloženo do češtiny a upraveno [15] 16

Obr. 4 Schematické znázornění obdélníkových dílčích povodí pro demonstraci vlivu tvaru a šířky povodí na odtok [3] 20

Obr. 5 Schematické znázornění hydraulického stavu zahlcení uzlového bodu (šachty) stokové sítě [5] 22

Obr. 6 Výpočtové schéma reálné oddílné splaškové stokové sítě v městě Ámol (Írán) použité pro hydraulickou analýzu [17] 24

Obr. 7 Šifaldův syntetický déšť [1] 25

Obr. 8 Mobilní systém pro kontinuální měření průtoku za účelem tvorby generelu stokové sítě: a) osazení kombinovaného měřicího prstence s kabeláží v potrubí; b) schéma principu kombinovaného měření hladiny a rychlosti pomocí ultrazvuku šířeného vzduchem (Air *ultrasound*), vodou (*Water ultrasound*) a tlakové sondy (*Pressure cell*) [19] 29

Obr. 9 Grafické uživatelské rozhraní programu EPA SWMM 5.2 bezprostředně po spuštění s aktivním uvítacím oknem (Welcome to SWMM) [21] 38

Obr. 10 Schéma prvků modelu stokové sítě v prostředí EPA SWMM – Grafické znázornění vztahu mezi reálnými objekty (šachty, čerpací stanice, retenční prostory) a jejich modelovou reprezentací pomocí uzlů (Junctions) a spojovacích prvků (Conduits, Pumps) [5], přeloženo do češtiny [15] 39

Obr. 11 Ukázka zadávání atributů uzlového bodu stokové sítě v prostředí SWMM; dialogové okno Junction 7 zobrazuje souřadnice polohy, dnovou kvótu (Invert El.) a maximální konstrukční hloubku šachty (Max. Depth) 40

Obr. 12 Ukázka zadávání atributů potrubí stokové sítě v prostředí SWMM; dialogové okno Conduit 67 zobrazuje propojení uzlů, kruhový profil (CIRCULAR), délku úseku (Length) a drsnostní součinitel (Roughness) 41

Obr. 13 Ukázka zadávání atributů plošných prvků v prostředí SWMM; dialogové okno Subcatchment 106 zobrazuje přiřazení ke srážkoměru, celkovou rozlohu (Area), průměrný sklon (% Slope), podíl nepropustných povrchů (% Imperv) a zvolenou metodu infiltrace 42

Obr. 14 Schématické znázornění odtoku z dílčích povodí (Subcatchments) v rámci sítě [5] 43

Obr. 15 Příklad formátování srážkových dat v textovém editoru; soubor Realny_dest.txt obsahuje chronologický záznam s minutovým krokem definující datum, přesný čas a srážkový úhrn v daném intervalu 43

Obr. 16 Umístění města Hulín v rámci regionální mapové sítě; červeně vyznačená hranice katastrálního území definuje polohu řešené oblasti vůči sousedním městským aglomeracím Kroměříž a Přerov [22] 46

Obr. 17 Topografický plán města Hulín s červeným vyznačením modelované oblasti; patrná je blízkost železniční tratě a silnice II/432 směr Pravčice [22]..... 47

Obr. 18 Vizualizace a topologická kontrola vektorové vrstvy kanalizačních šachet a potrubí nad leteckým snímkem zájmového území v programu QGIS 48

Obr. 19 Náhled na vstupní databázové sady v QGIS; levá tabulka reprezentuje uzlové body s určenými kótami hloubky a terénu, pravá tabulka definuje geometrické vlastnosti úseků, délky a typ materiálu 49

Obr. 20 Výsledný rastr sklonů zemského povrchu generovaný z DMR 5G jako podklad pro stanovení sklonitosti subpovodí; červené linie reprezentují trasování modelované stokové sítě..... 50

Obr. 21 Půdní mapa města Hulín a přilehlého okolí s vymezením půdních typů dle TKSP ČR [24]..... 51

Obr. 22 Rozdělení zájmového území na dílčí povodí 52

Obr. 23 Vizualizace sklonů terénu dílčích povodí v prostředí QGIS..... 53

Obr. 24 Zadávání atributů šachty a potrubí stokové sítě v prostředí SWMM..... 54

Obr. 25 Situace lokality odlehčovací komory..... 55

Obr. 26 Výkresová dokumentace řešené odlehčovací komory; podklad pro stanovení geometrických parametrů modelu (délka koryta, výška přelivné stěny) a trasování odlehčovací větve do recipientu [26] 56

Obr. 27 Schéma namodelované odlehčovací komory v prostředí EPA SWMM s definovaným bočním přelivem a připojením dílčích povodí k odtokovým uzlům 56

Obr. 28 Časová řada návrhového deště vytvořená pro import do programu EPA SWMM s celkovým úhrnem srážky 14,55 mm a maximální intenzitou 0,97 mm/min 58

Obr. 29 Podíl nepropustných ploch jednotlivých dílčích povodí v prostředí EPA SWMM, barevně rozlišený podle procentuálního zastoupení nepropustných povrchů 59

Obr. 30 Nastavení infiltračního modelu Green–Ampt v prostředí EPA SWMM pro vybrané dílčí povodí s parametry odpovídajícími půdnímu typu černice fluvická..... 60

Obr. 31 Podélný profil kmenové stokové sítě od nejvýše položené šachty po závěrový profil řešeného území, znázorňující velmi malý podélný sklon stoky a celkový výškový rozdíl přibližně 5,9 m 61

Obr. 32 Výsledek úspěšně provedené dynamické simulace v programu EPA SWMM s nízkou chybou kontinuity, potvrzující dobrou numerickou stabilitu výpočtu 62

Obr. 33 Podélný profil stokové sítě na ulici Nádražní v 15. minutě simulace, ve kterém je patrný vznik hydraulického vzdutí a zvýšení hladin vody v jednotlivých šachtách 63

Obr. 34 Podélný profil stoky odvádějící vody z průmyslového areálu, znázorňující zvýšené hydraulické zatížení potrubí, tlakové proudění a nárůst hladiny vody v jednotlivých šachtách během simulované srážkové události..... 64

Obr. 35 Podélný profil stoky vedené podél toku Rusava, znázorňující zvýšenou hladinu vody v šachtách a hydraulické zatížení potrubí s výskytem tlakového proudění během simulované srážkové události..... 65

Obr. 36 Barevné znázornění maximálních hloubek vody v šachtách a hydraulického zatížení potrubí během simulace (modrá barva představuje nízké využití kapacity stoky, zatímco červená označuje tlakové proudění a kapacitně přetížené úseky stok) 65

Obr. 37 Situace hydraulického zatížení stokové sítě a směrů proudění v 7. minutě simulace; barevné rozlišení znázorňuje využití kapacity potrubí a šipky znázorňují směr toku, červeným bodem je vyznačena sběrná šachta 67

Obr. 38 Situace hydraulického zatížení stokové sítě a směrů proudění v 10. minutě simulace; barevné rozlišení znázorňuje využití kapacity potrubí a šipky směr toku vody, přičemž červeným bodem je vyznačena sběrná šachta, ve které vlivem zpětného vzdutí dochází k obrácení směru proudění do stoky v ulici Nádražní 67

Obr. 39 Situace hydraulického zatížení stokové sítě a směrů proudění v okolí odlehčovací komory; barevné rozlišení znázorňuje využití kapacity potrubí a šipky směr toku vody, přičemž v důsledku omezené kapacity navazujícího potrubí DN 150 dochází ke zpětnému vzdutí před odlehčovací komorou i v navazujících úsecích stokové sítě..... 68

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Klasifikace simulačních prvků v prostředí SWMM rozdělená na objekty hydrologické (Hydrology) a hydraulické (Hydraulics) s popisem jejich funkčního významu v systému [5], přeloženo do češtiny [15] 36

Tab. 2 Klasifikace simulačních prvků v prostředí SWMM; dokončení přehledu s objekty kvality vody (Water Quality), čištění (Treatment) a datovými objekty (Data Object) [5], přeloženo do češtiny [15] 37

Tab. 3 Typické hodnoty Manningova součinitele drsnosti pro různé materiály stokových potrubí [10] 40

Tab. 4 Vydatnosti náhradního blokového deště pro Přerov [27] 57

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Srovnání odtoku vody v urbanizované a přírodní krajině. Graf demonstruje, jak nepropustné povrchy ve městech zrychlují odtok a zvyšují riziko bleskových povodní oproti přirozenému prostředí, které vodu přirozeně tlumí [16] 17

Graf 2: Průběh infiltrace a srážkového hyetogramu modelovaný různými metodami (Horton, modifikovaný Horton, Green-Ampt, Curve Number). Hodnoty v závorkách v legendě značí podíl srážek, který se transformuje na povrchový odtok [3] 18

Graf 3: Časový průběh srážkových úhrnů reálné dešťové události 26

Graf 4: Porovnání průběhu návrhového deště a odpovídajících hydrogramů odtoku pro současný stav a variantu se zvýšenou intenzitou srážky o 15 % [16] 44

Graf 5: Průběh průtoku v potrubí DN 800 křížícím železniční trať během simulované srážkové události, znázorňující kulminaci průtoku a následný postupný pokles hydraulického zatížení stoky 62

Graf 6: Průběh průtoků (l/s) odlehčovací komorou během simulované srážkové události, znázorňující přítok do komory, odtok hlavním žlabem a přepad do recipientu; k aktivaci přepadu dochází přibližně v 9. minutě simulace a jeho ukončení nastává kolem 30. minuty 63

Graf 7: Průběh průtoků (l/s) do spojné šachty před křížením železniční tratě, kde v důsledku nedostatečné kapacity navazující stoky dochází ke zpětnému vzdutí a změně směru proudění do stoky v ulici Nádražní, což se projevuje zápornými hodnotami průtoku 66

11 PŘÍLOHY

Příloha č.1-Digitální přílohy

- Složka 01_matematicky_model_hulin
- Složka 02_ortofoto_mapa
- Složka 03_databaze_dest