

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



DYNAMIKA ODTOKU Z NEPROPUSTNÝCH PLOCH

Diplomová práce

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Evžen Zeman, CSc.**

Konzultant: **Ing. Tomáš Metelka, PhD.**

Autor: **Bc. Ivana Dubová**

2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Ivana Dubová

Environmentální modelování

Název práce

Dynamika odtoku z nepropustných ploch

Název anglicky

Dynamics of Runoff from Impermeable Surfaces

Cíle práce

Cílem diplomové práce je předložit, otestovat a kvantifikovat možnosti adaptace stávajícího řešení srážko-odtokových procesů (metodou Time-Area) v městském intravilánu na srážky větší než silné (10letý déšť). Tím nabídnout pro praktické použití robustnější nástroj plánování odvodnění měst a obcí v kontextu současných a budoucích klimatických změn. Pro tento účel bude navržen, postaven a posouzen alternativní simulační model, který bude využívat možnosti plného odtoku z celé plochy zájmového povodí. Simulace alternativního simulačního modelu budou porovnány s výsledky standardního modelu srážkového odtoku (metoda Time-Area) a bude vyhodnocena a posouzena míra rozdílu výstupů při posouzení přívalových srážek.

Metodika

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část práce se zabývá shrnutím dosavadních poznatků dané problematiky formou literární rešerše. V druhé části je zpracována stavba a kalibrace alternativního simulačního modelu zájmového území, včetně analýzy nepropustných ploch. Následné porovnání s klasickým modelovacím přístupem umožní identifikovat klíčové rozdíly v předpovědích odtoku, zejména při silných a extrémních srážkových událostech. K tomuto účelu jsou na oba modely aplikovány simulace blokových dešťů různé intenzity (N10, N20, N50 a N100), což umožňuje posoudit, jak se modely chovají pod zatížením intenzivních srážek.

Doporučený rozsah práce

standardní

Klíčová slova

městské odvodnění, simulační modely, Time-Area metoda, silné a extrémní srážky, počáteční ztráta

Doporučené zdroje informací

C. Axelsson, S. Soriani, P. Culligan, and P. Marcotullio. Urban policy adaptation toward managing increasing pluvial flooding events under climate change. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64:1408 – 1427, 2020. doi: 10.1080/09640568.2020.1823346.

DHI. Mouse. runoff. reference manual. 2019

KREJČÍ, Vladimír; GUJER, Willi. *Odvodnění urbanizovaných území – koncepční přístup*. Brno: NOEL 2000, 2002. ISBN 80-86020-39-8.



Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

doc. Ing. Evžen Zeman, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Ing. Tomáš Metelka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 27. 3. 2024

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 3. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2024

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Dynamika odtoku z nepropustných ploch* vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze 28. března 2024

.....
jméno a příjmení

Poděkování:

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu doc. Ing. Evženovi Zemanovi, CSc. za jeho ochotu a hodnotné připomínky, stejně tak svému konzultantovi Ing. Tomášovi Metelkovi, PhD. za věnovaný čas a cenné rady. Rovněž bych chtěla poděkovat holčákům z Hangáru. Velký dík patří mému partnerovi Filipovi za jeho bezvýhradnou oporu.

Diplomová práce vznikla za podpory společnosti AQUA PROCON s.r.o. Data byla poskytnuta společností Pražská vodohospodářská společnost a.s., za která tímto také děkuji.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá dynamikou odtoku z nepropustných ploch v městských oblastech, jež jsou stále více ovlivněny změnou klimatu vedoucí k intenzivnějším srážkovým událostem. Cílem práce je představit, otestovat a kvantifikovat možnosti adaptace stávajícího řešení srážko-odtokových procesů pro silné a extrémní srážkové události, využívající Time-Area metodu, v urbanizovaných zónách. Pro tento účel byl navržen a postaven alternativní simulační model, který byl porovnán s tradiční Time-Area metodou. Výsledky práce naznačují, že alternativní model by mohl nabízet výraznější adaptabilitu na silné a extrémní srážky a poskytnout tak robustnější nástroj pro plánování městského odvodnění. Tato práce tak přispívá k lepšímu pochopení dynamiky odtoku v městských oblastech a nabízí inovativní přístupy pro jejich řešení v současných a budoucích klimatických podmínkách.

Klíčová slova: městské odvodnění, simulační modely, Time-Area metoda, silné a extrémní srážky, počáteční ztráta

ABSTRACT

The thesis addresses the dynamics of runoff from impermeable surfaces in urban areas, which are increasingly affected by climate change leading to more intense precipitation events. The goal of the work is to introduce, test, and quantify adaptation options for existing solutions to precipitation-runoff processes for heavy and extreme precipitation events, utilizing the Time-Area method, in urbanized zones. For this purpose, an alternative simulation model was designed and built, which was compared with the traditional Time-Area approach. The results of the work suggest that the alternative model offers significantly greater adaptability to heavy and extreme precipitation and provides a more robust tool for urban drainage planning. Thus, this work contributes to a better understanding of runoff dynamics in urban areas and offers innovative approaches for their resolution in current and future climatic conditions.

Key words: urban drainage, simulation models, Time-Area method, heavy and extreme precipitation, initial loss

Seznam obrázků

1	Vymezení zájmového území - Areál výzkumných ústavů Běchovice	26
2	Rekognoskace terénu ze dne 17.července 2023	27
3	Simulační model KÚ Běchovic	29
4	Simulační model zájmového území	29
5	Umístění srážkoměru D23 vzhledem k zájmovému území	30
6	Průběh intenzity srážek na srážkoměru D23	30
7	Automatická kategorizace	33
8	Základní kategorizace areálu Výzkumné ústavy (VÚ) Běchovice .	34
9	Podrobná kategorizace areálu VÚ Běchovice	34
10	Klasifikace ploch z hlediska jejich charakteru	37
11	Nepropustnost klasického modelu	39
12	Schéma povodí jednotlivých měrných profilů	40
13	Intravilánová povodí	43
14	Extravilánová povodí	43
15	Povodí alternativního modelu	44
16	Vliv parametru doby dotoku (ToC) na hydrogram odtoku	48
17	Vliv parametru počáteční ztráty střech na hydrogram odtoku . . .	49
18	Porovnání průtoků nekalibrovaných modelů	50
19	První milník kalibrace alternativního modelu	51
20	Druhý milník kalibrace alternativního modelu	52
21	Proces kalibrace alternativního modelu	52
22	Výsledný průběh kalibrace alternativního modelu	54
23	Porovnání průtoků kalibrovaných modelů	55
24	Porovnání modelů: MP01 Běchovice - přítok	58
25	Porovnání modelů: MP02 Běchovice - odtok	58
26	Podélné profily při N10	60
27	Podélné profily při N100	61
28	Závislosti celkového objemu na úhrnu srážky	62

Seznam tabulek

1	Vstupní data modelu A	19
2	Přehled ploch dle povrchu	35
3	Přehled ploch dle materiálu	36
4	Charakteristiky kalibračních dešťů	41
5	Parametry klasického modelu	41
6	Počáteční ztráty nekalibrovaného alternativního modelu	45
7	Charakteristiky zátěžových dešťů	47
8	Parametry nekalibrovaných modelů	49
9	Počáteční ztráty iterací kalibrace alternativního modelu	53
10	Parametry kalibrovaných modelů	54
11	Počáteční ztráty kalibrovaného alternativního modelu	55
12	Objektivní funkce - přítok	56
13	Objektivní funkce - odtok	57
14	Objemy a průtoky: MP01 Běchovice - přítok	59
15	Objemy a průtoky: MP02 Běchovice - odtok	59

Seznam Zkratek

ALT Alternativní model	47
DHI Dánský hydraulický institut a.s.	17
HRU Hydrological Response Unit	10
GIS Geografický informační systém	15
IL Initial Loss	41
KLAS Klasický (Time-Area) model	47
KGE Kling-Gupta Efficiency	13
LID Low-Impact Development	5
MAE Mean Absolute Error	12
ME Mean Error	12
MSE Mean Square Error	12
MZI Modrozelená infrastruktura	5
NSE Nash-Sutcliffe Efficiency	13
NDVI Normalized Difference Vegetation Index	33
PVS a.s. Pražská vodohospodářská společnost a.s.	30
RF Redukční faktor	41
TA Time-Area	19
ToC Time of Concentration	41
UHM Unit Hydrograph Surface Runoff Model	21
VÚ Výzkumné ústavy	8
ZABAGED Základní báze geografických dat	31

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	2
3	Literární řešerše	3
3.1	Městské odvodnění	3
3.1.1	Vývoj městského odvodnění v Evropě do 19. století	3
3.1.2	Moderní principy městského odvodnění	5
3.1.3	Struktura městského odvodnění v České republice	6
3.2	Simulační modely v hydrologickém modelování	8
3.2.1	Klasifikace simulačních modelů	9
3.2.2	Optimalizace simulačního modelu	11
3.2.3	Objektivní funkce	12
3.3	Simulační modely v městského odvodnění	14
3.3.1	Srážky a srážková data	15
3.3.2	Příklady existujících simulačních modelů v kontextu městského odvodnění	16
3.3.3	Modelování povrchového odtoku	17
3.3.4	Modelování proudění ve stokové síti v MOUSE	21
4	Charakteristika zájmového území	25
4.1	Zájmová oblast	26
5	Metodika	28
5.1	Podkladová data	28
5.2	Mapové podklady	31
5.3	Použité nástroje	31
5.4	Řešení na zájmové oblasti	32
5.4.1	Analýza povrchů zájmového území	32
5.4.2	Koncept stavby a recalibrace klasického simulačního modelu	37
5.4.3	Alternativní simulační model	41
5.4.4	Analýza zatížení modelů extrémními srážkami	47
6	Výsledky	48
6.1	Vliv parametru doby dotoku a počáteční ztráty střech na hydro- gram odtoku	48
6.2	Porovnání nekalibrovaných modelů z hlediska průtoků na stokové síti	49
6.3	Kalibrace alternativního modelu	50

6.4	Porovnání kalibrovaných modelů z hlediska průtoků na stokové síti	54
6.5	Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami . . .	57
7	Diskuze	63
8	Závěr	66
A	Mapové výstupy	
B	Porovnání průtoků nekalibrovaných modelů	
C	Kalibrace alternativního modelu	
D	Porovnání průtoků kalibrovaných modelů	
E	Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami	

1 Úvod

Narůstající četnost a extrémní srážkových událostí, která se projevuje v důsledku změny klimatu i v poměrech České republiky, vede k otázkám, jak připravit společnost na dopady těchto jevů. Zřetelně je tato snaha vidět v oblasti odvodnění měst a obcí, kde přívalové srážky působí značné škody již v současnosti.

Jednou z vhodných cest pro řešení adaptace urbanizovaných oblastí na přívalové srážky je aplikace prvků hydroinformatiky do plánování a spravování jejich infrastruktury. Takovou technologií může být využití simulačních modelů, která je v současnosti standardně používána při řešení generelů odvodnění, studií srážko-odtokových poměrů a dalších analýz komplexního srážko-odtokového procesu.

Simulační model zpracovávaný v rámci řešení generelů odvodnění představuje silný nástroj i pro analýzy budoucího chování systému odvodnění. Tento nástroj nicméně není ve své stávající podobě zcela použitelný pro simulace přívalových srážek, a to s ohledem na způsob výpočtu srážkového odtoku pomocí jednoduché (Time-Area) metody. Tato metoda plně nepostihuje odtok povodí za podmínek přívalových dešťů, kdy se na odtoku podílí postupně celé povodí, a nejen část jeho nepropustných ploch. Přestože je metoda Time-Area široce využívána v praxi, její adaptace pro řešení extrémních srážkových událostí se jeví jako klíčový krok k dosažení vyšší přesnosti a spolehlivosti výsledků. V této práci je předveden alternativní přístup, který by měl lépe reflektovat reálné podmínky, zejména v kontextu silných a extrémních srážkových událostí.

2 Cíle práce

CÍLE PRÁCE: Cílem diplomové práce je předložit, otestovat a kvantifikovat možnosti adaptace stávajícího řešení srážko-odtokových procesů (metodou Time-Area) v městském intravilánu na srážky větší než silné (10letý déšť). Tím nabídnout pro praktické použití robustnější nástroj plánování odvodnění měst a obcí v kontextu současných a budoucích klimatických změn. Pro tento účel bude navržen, postaven a posouzen alternativní simulační model, který bude využívat možnosti plného odtoku z celé plochy zájmového povodí. Simulace alternativního simulačního modelu budou porovnány s výsledky standardního modelu srážkového odtoku (metoda Time-Area) a bude vyhodnocena a posouzena míra rozdílu výstupů při posouzení přívalových srážek.

METODIKA PRÁCE: Diplomová práce je rozdělena na dvě části. První část práce se zabývá shrnutím dosavadních poznatků dané problematiky formou literární rešerše. V druhé části je zpracována stavba a kalibrace alternativního simulačního modelu zájmového území, včetně analýzy nepropustných ploch. Následné porovnání s klasickým modelovacím přístupem umožní identifikovat klíčové rozdíly v předpovědích odtoku, zejména při silných a extrémních srážkových událostech. K tomuto účelu jsou na oba modely aplikovány simulace blokových dešťů různé intenzity (N10, N20, N50 a N100), což umožňuje posoudit, jak se modely chovají pod zatížením intenzivních srážek.

3 Literární rešerše

3.1 Městské odvodnění

Městské odvodnění je klíčovou součástí městské infrastruktury, která se zaměřuje na odvádění odpadních a srážkových vod z urbanizovaných oblastí. Spojuje znalosti městské hydrologie, stavebního inženýrství, hydroinformatiky a dalších oborů, což umožňuje efektivní řízení transportu a čištění odpadních vod, spolu se zajištěním ochrany vodních zdrojů (Krejčí, 2002). Nejcennějším přínosem městského odvodnění ovšem zůstává ochrana veřejného zdraví (Butler et al., 2018; Krejčí, 2002). Městské odvodnění zároveň řeší prevenci povodní, eroze půdy nebo kontaminace vodních toků (Krejčí, 2002).

Otázka problematiky městského odvodnění se v kontextu rostoucí urbanizace a změn klimatu stává stále aktuálnější. Procesy urbanizace a klimatické změny zvyšují nároky na odvodňovací systémy měst, což vyžaduje jejich adaptaci na zvládnutí negativních dopadů akumulace vody.

3.1.1 Vývoj městského odvodnění v Evropě do 19. století

Počátky moderního odvodnění se datují do druhé poloviny 20. století (Krejčí, 2002), nicméně prvky městského odvodnění jsou nedílnou součástí městské infrastruktury od věků dávných civilizací (Burian and Edwards, 2002; De Feo et al., 2014; Marsalek, 2005). K městskému odvodnění civilizace přistupovaly různorodými a pokročilými technikami, což dokládá jejich sofistikovaný přístup k řešení problémů s vodou v městských oblastech. Přestože tehdejší možnosti byly omezené a existovalo jen malé množství numerických standardů pro městské odvodnění, tyto civilizace využívaly pokročilé techniky bez tradičního využití inženýrských výpočtů (Burian and Edwards, 2002).

Harappská civilizace, existující na počátku třetího tisíciletí př. n. l. v údolí řeky Indus, měla komplexní systém městského odvodnění (De Feo et al., 2014) spočívající ve svádění odpadních vod centrálními uličními kanály, na které již byly připojeny domy. Odpadní voda nebyla vypuštěna do ulic přímo, nýbrž existoval jednoduchý systém mechanického předčištění. Zároveň součástí uličního kanálu byly kynety, které již tehdy nejspíše odváděly menší průtoky související s každodenním vypouštěním odpadních vod, zatímco samotný kanál sloužil k odvedení velkých průtoků během dešťových událostí. Rovněž Mezopotámie měla dobře vyvinutý systém pro ochranu měst před velkými dešti (Burian and Edwards, 2002; De Feo et al., 2014). Minojská civilizace (2800 – 1100 př.n.l.) a Etruskové používali pokročilé odvodňovací systémy, včetně kamenných kanálů a terakotových trubek, s důrazem na využití přirozeného sklonu pro efektivní od-

vodnění (Angelakis et al., 2005; Burian and Edwards, 2002; De Feo et al., 2014).

Revoluční přelom nastal v období římské říše; Římané nejenže jako první vybudovali důmyslný silniční systém, ale vytvořili i komplexní systém podzemních stok, z nichž největší byla Cloaca Maxima (Burian and Edwards, 2002). Cloaca Maxima byla postavená v Římě okolo roku 510 př. n. l. a její funkce byla odvádět odpadní vody do řeky Tibery a odvodňovat tamější bažiny (Hodge, 1995; Marsalek, 2005). Římský systém městského odvodnění kladl důraz nejen na prevenci záplav a likvidaci městského odpadu a zároveň disponoval systémem na zachytávání a využívání dešťové vody. Tyto inovace a přístupy měly zásadní vliv na další vývoj městského odvodnění a zůstávají dodnes klíčovými principy v moderním plánování odvodnění (Burian and Edwards, 2002).

Po pádu římské říše došlo k úpadku nejen řešení městského odvodnění. V Evropských městech významně klesl počet obyvatel a panovala obecná lhostejnost doprovázená nedostatkem technologického pokroku (Burian and Edwards, 2002). To mělo za důsledek zhoršení hygienických podmínek. Omezené možnosti středověkého odvodňování byly centralizovány do církevních staveb (Galanaki, 2014). Situace ve středověkých městech byla tristní. Stoky byly vedeny prostředkem ulic, které byly současně využívány k přepravě (Burian and Edwards, 2002; Marsalek, 2005). Městské odpadní vody byly povrchově sváděny do vodních toků a byly tak přímým znečišťovatelem (Burian and Edwards, 2002). V podstatě jediný způsob čištění ulic, a s tím i kanalizací, byl v podobě prudších dešťů (Jásek and Almerová, 2022). Města si na svá odvodnění musela počkat. První zákon řešící otázku odvádění odpadních vod z měst v Evropě pochází z Anglie první poloviny 15. století (Burian and Edwards, 2002), nicméně většího pokroku v oblasti městského odvodnění začalo docházet až ve století šestnáctém (Marsalek, 2005). Středověká Praha se moc nelišila od ostatních evropských měst. První zmínky o městském odvodnění pochází z 16. století, kdy bylo vytvořeno odvodnění strahovského kláštera. Další rozvoj nastal v druhé polovině 17. století systémem odvodnění Klementina do řeky Vltavy. První kanalizace se pražané dočkali až v první polovině 19. století, kterou nechal zrealizovat nejvyšší purkrabí Karel hrabě Chotek (Jásek and Almerová, 2022).

K rozvoji městského odvodnění, jak jej známe dnes, došlo během 19. století v evropských městech. Velká města si začala uvědomovat, že je otázku městského odvodnění nutno neodkladně řešit. Jedním z prvních evropských měst, které modernizovali svůj kanalizační systém, byla Paříž. Díky práci inženýra P. E. Brune-seaua byly otevřené kanály nahrazeny podzemními stokami (Burian and Edwards, 2002). Významným impulzem v oblasti vývoje byla série epidemií cholery a tyfu, ke které došlo mezi 30. a 70. lety 19. století (Krejčí, 2002; Marsalek, 2005). Potřeba prevence podobných událostí iniciovala výzkumy zaměřené na souvislosti

mezi městským odpadem a chorobami (Burian and Edwards, 2002). Počátek moderního pojetí městského odvodnění je možné datovat do poloviny 19. století, kdy inženýr Roe navrhl v Anglii první systematickou splaškovou kanalizaci (Krejčí, 2002).

Posléze německý Hamburk vystavěl komplexní kanalizační systém rukou britského inženýra W. Lindleyho, který dále vytvářel koncepty městského odvodnění ve Frankfurtu nad Mohanem, Varšavě a dalších evropských městech. Rodina Lindleyů je spjata i s pražským odvodněním. Sir W. H. Lindley na konci 19. století navrhl komplexní systém odvodnění pro tehdejší Prahu, jehož hlavní stoková síť je dodnes užívána (Dolejš, 2016).

Významným milníkem ve vývoji městského odvodnění bylo vyvinutí racionální metody odhadu odtoku E. Kuichlingem v roce 1889 (Thompson, 2006). Tato metoda výpočtu byla převládající technikou v oblasti projektování odvodňovacích systémů až do konce 60. let a je užívána dodnes (Marsalek, 2005).

3.1.2 Moderní principy městského odvodnění

Tradiční přístup k městskému odvodnění, který byl v praxi více než 150 let, zdůrazňoval rychlé odvádění odpadních a srážkových vod z obytných oblastí, čímž řešil hygienické problémy a chránil majetek před povodněmi (Krejčí, 2002). S rostoucí urbanizací a narušením přirozených odtokových poměrů urbanizovaných oblastí však přicházely nové výzvy. Městské odvodnění se tak stalo stále více komplexním tématem, které zahrnuje nejen technické řešení oddílného odvádění odpadních vod, ale také otázky správy vodních zdrojů, adaptace na klimatické změny a zlepšování kvality života ve městech. Změna klimatu, se zvýšeným výskytem extrémních srážek a s nimi spojených povodní, spolu s rychlou urbanizací, vyžaduje inovativní přístupy k městskému odvodnění, které jsou schopné zvládat tyto výzvy. Od 60. let 20. století se městské odvodnění začalo rychle vyvíjet, především v oblasti návrhových metod. Vznikly různé metody pro modelování odtokových hydrografů, například model Stormwater Management Model (Rossman et al., 2010) a řada dalších (Marsalek, 2005).

Zakomponování přírodě blízkých opatření v rámci technik s nízkým dopadem na prostředí (z ang. *Low-Impact Development (LID)*), v českém prostředí známé jako *Modrozelená infrastruktura (MZI)*) do urbanistických řešení se stává čím dál častější. Díky těmto nástrojům dochází ke kompenzaci negativních důsledků urbanizace, jako například zvyšování povrchového odtoku, které vede k záplavám a vodní erozi (Saraswat et al., 2016). Zlepšení odolnosti infrastruktury vůči extrémním srážkovým událostem je možné docílit decentralizovanými retenčními nádržemi v urbanistickém území (Lee and Kim, 2017). Přístupy zahrnující zelené střechy, propustné povrchy, využití dešťové vody a vytváření retenčních nádrží

nejenže pomáhají snižovat množství odtoku, ale také přispívají k zlepšení kvality městského prostředí a biodiverzity (Saraswat et al., 2016).

Rozmach výpočetní techniky umožnil vývoj softwaru, který zpřístupnil provádění složité analýzy návrhy systémů městského odvodnění, včetně matematického modelování hydrologických a hydraulických procesů. Takové technologie umožňují přesnější predikce a efektivnější plánování (Axelsson et al., 2020; Lee and Kim, 2017). S tím dále souvisí rozvoj pokročilejších technologií v oblasti čištění odpadních vod a tím i významný posun v ochraně vodních zdrojů.

Inovace v oblasti monitoringu, v kombinaci s uvažováním ekologických a sociálních faktorů, je klíčová pro dnešní plánování a řízení městského odvodnění (Alasali et al., 2021; Hague et al., 2022; Veiga et al., 2021). V kontextu klimatické změny je rovněž důležitá aktualizace intenzity srážek a frekvence povodňových událostí, z důvodu jejich nárůstu a změny rozložení tak, aby bylo možné adaptovat vodohospodářské systémy (Hague et al., 2022; Lee and Kim, 2017). Stejně tak efektivita simulačního modelování městského odvodnění závisí na predikcích klimatických změn, které reflektují nejnovější poznatky.

3.1.3 Struktura městského odvodnění v České republice

Obdobně jako v přirozených podmínkách voda koluje i v osídlených oblastech, nicméně urbanizovaná povodí ztratila, v důsledku stavební činnosti, své přirozené odtokové poměry (ČSN 756101). Shromažďování, distribuce a užívání vody, spolu s jejím čištěním a recyklací, tvoří základní složky urbanistického vodního cyklu. Proces začíná shromažďováním vody, kdy města sbírají povrchovou vodu z řek a jezer, stejně jako podzemní vodu z vrtů a jiných podzemních zdrojů, což jsou klíčové kroky pro zajištění zásobování měst vodou. Po shromáždění je voda distribuována do domácností, průmyslových objektů a dalších městských zařízení pomocí komplexních distribučních systémů, které zahrnují potrubí, čerpadla a nádrže. Po použití je odpadní a dešťová voda odváděna do kanalizačního systému, kde se může smíchat s průmyslovými odpady. Následně je odpadní voda transportována do čistíren odpadních vod, kde prochází různými stupni čištění. Po dokončení tohoto procesu je voda buď bezpečně vypuštěna zpět do přírodních vodních toků, nebo recyklována pro další užití.

Odpadní vody se dle normy ČSN 756101 dělí z hlediska původu a způsobu znečištění na:

- splaškové odpadní vody,
- infekční odpadní vody,
- průmyslové odpadní vody,

- odpadní vody ze zemědělství a zemědělské výroby,
- znečištěné srážkové vody,
- městské odpadní vody,
- ostatní odpadní vody.

Splaškové odpadní vody pocházejí převážně z domácností a veřejných budov, jako jsou školy, nemocnice a kanceláře. Obsahují fekálie, moč, papír a další odpady z koupelen, kuchyní a toalet. Tyto vody mohou obsahovat různé organické látky, patogeny a nutrienty, jako jsou dusík a fosfor, které mohou způsobit eutrofizaci vodních toků. Infekční odpadní vody jsou typem odpadních vod, které mohou obsahovat patogenní mikroorganismy, jako jsou viry, bakterie a parazity. Tyto odpadní vody jsou obvykle generovány v zdravotnických zařízeních, jako jsou nemocnice, laboratoře a kliniky, a vyžadují speciální ošetření a likvidaci, aby se zabránilo šíření infekčních onemocnění. Průmyslové odpadní vody pocházejí z průmyslových procesů a mohou obsahovat širokou škálu znečišťujících látek v závislosti na typu průmyslu. Tyto látky zahrnují chemikálie, těžké kovy, toxické látky a další nebezpečné komponenty, které mohou mít negativní dopad na životní prostředí a zdraví lidí, pokud nejsou správně ošetřeny. Odpadní vody ze zemědělství a zemědělské výroby zahrnují vody z činností, jako je chov dobytka, zpracování potravin a pěstování plodin. Tyto vody mohou být kontaminovány hnojivy, pesticidy, fekálními látkami a dalšími znečišťujícími látkami, které mohou vést k znečištění podzemních a povrchových vod. Znečištěné srážkové vody vznikají ve chvíli, kdy dešťová voda stéká z povrchů, jako jsou parkoviště nebo areály průmyslových provozů, a sbírá nečistoty, oleje, těžké kovy a další znečišťující látky. Tyto vody mohou přispívat k znečištění vodních toků a vyžadují předčištění než budou vypuštěny do recipientu. Městské odpadní vody jsou kombinací splaškových a průmyslových odpadních vod spolu se znečištěnými srážkovými vodami, které jsou shromažďovány v městských kanalizačních systémech. Tyto vody obsahují širokou škálu organických a anorganických znečišťujících látek a vyžadují komplexní čištění. Ostatní odpadní vody mohou zahrnovat specifické typy odpadních vod, které nejsou zahrnuty v předchozích kategoriích (Groda et al., 2007; Schütze et al., 2002; Synáčková, 1994).

Srážkové vody se rozlišují dle míry znečištění na znečištěné (popsané výše) a neznečištěné, které mohou pocházet z povrchů, jako jsou zahrady, parky, pěší zóny, ale i střechy, pokud jsou tyto vody svedeny dříve než přijdou do kontaktu se znečištěnými povrchy. V této práci se odpadními vodami rozumí veškeré odpadní vody definované dle normy (ČSN 756101). Řešení odvodnění neznečištěných srážkových vod je uvažováno samostatně.

Základní infrastrukturu pro odvádění odpadních a dešťových vod z urbanizovaných oblastí jsou stokové sítě. Existují tři hlavní typy stokových sítí, které se liší podle způsobu, jakým zpracovávají a odvádějí vodu:

- jednotná soustava
- oddílná soustava
- modifikovaná soustava

Jednotná (kombinovaná) soustava shromažďuje a odvádí veškerou odpadní vodu (domácí, průmyslovou) a srážkovou vodu společným potrubím do čistírny odpadních vod nebo přímo do přijímacího vodního toku. Bývá dimenzována na větší průtoky, aby byla schopna pojmout i dešťové vody. Při silnějších srážkových událostech ovšem může dojít k jejímu přetížení a odpadní voda může být vypuštěna do recipientu bez vyčištění. Oproti tomu oddílná soustava je rozdělena na nezávislé systémy potrubí, přičemž splašková kanalizace odvádí odpadní vodu z domácností a průmyslu do čistírny odpadních vod, zatímco srážková voda je svedena do blízkého recipientu. Díky tomu je minimalizováno množství odpadních vod čistěných na čistírně odpadních vod, ovšem za cenu vyšších investičních nákladů. Modifikovaná soustava pak obsahuje kombinaci prvků obou zmíněných systémů (Schütze et al., 2002; Synáčková, 1994).

3.2 Simulační modely v hydrologickém modelování

Procesem modelování je vytvářen zjednodušený odraz reálného systému, označovaný jako model. Tento model může mít fyzikální rozměr, tedy být hmotný, pak se jedná o fyzický model. Matematický model je nehmotný a je reprezentován souborem matematických rovnic, v nichž vyjadřují vztahy mezi proměnnými a parametry modelu (Krejčí, 2002; Xu, 2002). Proměnnou se rozumí charakteristika modelovaného systému, která je proměnná v čase a kterou je zároveň možné měřit. Mezi základní veličiny patří srážky, odtok, teplota, evapotranspirace, infiltrace, vlhkost půdy apod. Parametr rovněž charakterizuje modelovaný systém. Může být proměnný v čase, ve většině případů je ale považován za konstantní (Xu, 2002). Simulační model pak představuje vyjádření pozorovaného systému pomocí matematického popisu, při kterém jsou prováděny simulace hypotetického děje za účelem zkoumání tohoto systému (Krejčí, 2002).

V hydrologii se jako jeden ze základních pojmů používá hydrologický cyklus, charakterizovaný jako systém uzavřený, v němž dochází k oběhu vody vlivem nadbytečné solární energie (Dingmann, 2002; Dooge, 1973). Tento cyklus lze rovněž chápat jako model popisující procesy, jimiž voda cirkuluje mezi zemskými sférami

– atmosférou, biosférou, litosférou a hydrosférou, ilustrující její pohyb a akumulaci napříč těmito oblastmi (Marsalek, 2005). Hydrologický systém se tedy skládá z procesů zajišťujících přísun a odvod vody a prostorů, kde dochází k její akumulaci. Současně je nezbytné, aby byly dodrženy zákony zachování hmoty, hybnosti a energie (Dingmann, 2002; Máca, 2014).

Hydrologický cyklus představuje dynamický a proměnlivý systém, který se vyvíjí v čase a prostoru. Pro hlubší pochopení hydrologických fenoménů je nutné nejdříve provádět pozorování a následně tyto procesy modelovat. Vzhledem k tomu, že hydrologický cyklus a jeho součásti tvoří komplexní a složitý systém, je pro studium hydrologických jevů nezbytné tento systém zjednodušit pomocí hydrologického modelu.

Hydrologický model je definován jako zjednodušená reprezentace daného systému, která je vytvářena s cílem umožnit podrobnější zkoumání modelovaných jevů (Xu, 2002). V hydrologii se často jako příklad takového systému uvádí povodí (Beven, 2001). Proces modelování lze podle Beven (2001) rozdělit do pěti etap. Začíná se sestavením preceptuálního modelu, který na základě zkušeností hydrologa popisuje, jak povodí reaguje na srážky, a představuje klíčový první krok celého procesu. Následuje konceptuální model, který dále zjednodušuje a explicitně formuluje předpoklady učiněné v preceptuálním modelu. Tyto předpoklady jsou vyjádřeny pomocí rovnic, jež mohou být od jednoduchých bilancí hmoty až po složitější nelineární parciální diferenciální rovnice, řešené buď analyticky, nebo numericky v případě, že analytické řešení není možné. Numerické formule, často vytvořené v programovacím kódu, představují procedurální model. Posledními kroky stavby modelu jsou kalibrace a validace modelu. S postupem procesu modelování zároveň roste míra aproximace modelovaného systému.

3.2.1 Klasifikace simulačních modelů

Matematické hydrologické modely je možné dělit dle kauzality na deterministické a stochastické. V případě deterministických modelů existuje jednoznačný vztah mezi vstupními a výstupními daty. Jinými slovy, pro stejný soubor dat existuje právě jeden výsledný datový set. Oproti tomu ve stochastickém modelu se projeví vliv náhodné složky vstupních dat, tím pádem při opakování modelu se stejnými vstupními daty bude obdrženo pokaždé jiný výsledek. Po dostatečném počtu iterací je tato variabilita minimalizována a rozdíl mezi deterministickým modelem a stochastickým modelem se asymptoticky blíží nule. Zároveň jsou stochastické modely násobně rychlejší a méně náročné na výpočet ve srovnání s deterministickými modely. Deterministické modely je dále možné dělit dle povahy vnitřních vazeb na empirické (black-box), konceptuální (gray-box) a fyzikální (white-box).

Empirické modely, známé také jako black-box modely, se zakládají na převodu

vstupních dat na výstupy pomocí statistických metod, aniž by byla potřeba znalost o tom, co se děje uvnitř modelu. Díky své výpočetní nenáročnosti jsou často využívány v hydrologickém modelování pro rozsáhlou analýzu hydrologických jevů, vyžadují ale jasné definice procesů a vstupů. Typické aplikace zahrnují předpovědi na malé škále, jako jsou například povodně. Mezi tyto modely patří například Time-Area model (Haloun, 1993).

Fyzikální modely (white-box) jsou v podstatě opakem empirických modelů. Jedná se o transparentní modely, u kterých jsou vnitřní mechanismy, například parametry, otevřené a je možné je upravovat. Oproti black-box modelům jsou méně výkonné, ale naopak jejich spolehlivost je vyšší.

Mezi empirickými a fyzikálními modely stojí široká škála konceptuálních modelů (gray-box). Koneptuální modely již zachovávají určité fyzikální procesy, např. hydrologickou bilanci, složitější skutečnost ovšem stále zjednodušují statickými metodami obdobně jako black-box modely (Krejčí, 2002).

V neposlední řadě je možné na hydrologické modely nahlížet z pohledu prostorové diskretizace. Nejjednodušším způsobem reprezentují povodí celistvé modely (z ang. *lumped models*), které předpokládají, že se celé povodí chová jako homogenní celek. Jinými slovy povodí je zastoupeno jednou sadou parametrů pro celé povodí. Celistvý model tak počítá hydrologickou bilanci pro celé povodí a neuvažuje prostorovou variabilitu uvnitř povodí. Vhodné jsou zejména tam, kde je nízká prostorová variabilita povodí, popřípadě není dostatek dílčích dat. Celistvé modely nejsou náročné na vstupní data, nicméně značné úskalí může nastat při stanovování dostatečně reprezentující sady parametrů.

Distribuované modely oproti celistvým modelům uvažují rozdílné prostorové charakteristiky modelovaného povodí. Povodí je rozděleno pomocí gridované sítě. Měřítko gridu je voleno v závislosti na modelovaném jevu. Každá buňka má pak svoji sadu parametrů, na jejichž základě model počítá hydrologickou bilanci. Náročnost modelu na vstupní data je poměrně vysoká a je zapotřebí detailní plošné měření fyzikálních charakteristik povodí. Díky tomu ale dokáží vystihnout prostorovou variabilitu hydrologických procesů. Jejich využití je vhodné především v povodí menších měřítek v důsledku vysoké náročnosti na vstupní data.

Semi-distribuovaný model uvažuje řadu dílčích povodí v rámci modelovaného povodí, které jsou reprezentovány vlastní sadou parametrů. Dílčí povodí jsou nazývány Hydrological Response Unit (HRU) a stojí na předpokladu, že hydrologické vlastnosti jsou v rámci této jednotky konstantní a je možné je popsat danou sadou parametrů (Máca, 2015). Modely jednotlivých jednotek se v podstatě chovají jako celistvé, dohromady však v rámci celkového povodí zachovávají jeho prostorovou variabilitu. Hydrologická bilance je počítána pro každou jednot-

ku zvlášť a následně je agregována pro celé povodí. Semi-distribované modely jsou jakýmsi kompromisem mezi celistvými a distribuovanými modely. Nedokáží sice dostatečně vystihnout prostorovou variabilitu povodí tak, jako je tomu v případě distribuovaných modelů, nicméně nižší náročnost na vstupní data z nich činí dostupné modely pro široké využití v hydrologické praxi.

3.2.2 Optimalizace simulačního modelu

Primární výstupy ze simulačních modelů jsou v různé míře odlišné oproti pozorovaným charakteristikám, což vyplývá z definice hydrologického modelu jakožto zjednodušeného popisu komplexního systému. Tato rezidua (rozdíl mezi pozorovanou a modelovanou řadou) jsou způsobena nejistotami modelu, které mohou mít různé příčiny vzniku. Datová nejistota vzniká v důsledku nepřesných vstupních dat, nepřesným měřením hydrologických měření, nevhodně zvoleného prostorového a časového měřítka atd. Strukturální nejistota je spojena s předpoklady, které byly uváženy při tvorbě modelu a které nemusí plně odpovídat skutečnému stavu hydrologických procesů probíhajících v systému. Parametrická nejistota vzniká v souvislosti s volbou nejvhodnější sady parametrů, jelikož ve většině případů vyhovuje více sad parametrů (Beven, 2001). Nejistoty hydrologického modelu jsou kvantifikovány hodnotami reziduí, které jsou minimalizovány procesem kalibrace modelu.

Cílem kalibrace hydrologického modelu je optimalizace jeho parametrů tak, aby modelované hodnoty odpovídaly co nejpřesněji hodnotám skutečným, resp. naměřeným. Kalibrace modelu spočívá ve výběru

1. vhodné optimalizační metody,
2. vhodné objektivní funkce (popř. objektivních funkcí)

Pomocí optimalizační metody jsou iteračním procesem odhadovány sady parametrů modelu. Tento proces může být manuální a nebo automatický. Objektivní funkce kvantifikuje rozdíly (rezidua) mezi modelovanými a pozorovanými daty. Tato funkce je v rámci optimalizačního procesu zpravidla minimalizována. Hledá se taková sada parametrů modelu, která vykazuje minimální hodnoty reziduí.

Každý hydrologický model je definován právě jednou sadou parametrů. Při manuální optimalizaci jsou jednotlivé parametry nastavovány ručně na základě znalostí modelovaného systému a zkušeností modeláře. Jde o jednoduchou metodu, která ovšem bývá zpravidla časově náročná a nemusí nutně vést k nejvhodnější sadě parametrů. V případě automatické optimalizace je cílem identifikovat extrém objektivní funkce bez subjektivního přičinění uživatele.

Z hlediska přístupu k prohledávání parametrického prostoru je možné rozlišovat lokální a globální algoritmy optimalizačních metod (Máca, 2015). V případě lokálních algoritmů je výchozí znalost gradientu funkce. Příkladem může být metoda největšího spádu, metoda sdružených gradientů, Newtonova metoda a Levenberg-Marquardtův algoritmus. Výhodou těchto algoritmů je jednoduchost a rychlost, ovšem ve většině případů naleznou pouze lokální minimum (eventuálně maximum). Globální algoritmy jsou časově a výpočetně náročnější, na druhou stranu představují spolehlivější prohledávání parametrického prostoru, kdy jsou schopny nalézt globální minimum (ev. maximum). Metod vycházejících z globálních optimalizačních algoritmů je celá řada. Patří sem například evoluční metody (Duman et al., 2021; Price, 2013; Storn and Price, 1997), metody kolektivní inteligence, pravděpodobnostní metody (Máca, 2015). Výběr vhodného typu algoritmu záleží na specifickém optimalizačním problému a na požadavcích týkajících se rychlosti a kvality nalezeného řešení.

3.2.3 Objektivní funkce

Objektivní funkce jsou vhodným nástrojem pro kvantitativní vyhodnocení simulačních modelů. Slouží jako jakési měřítko úspěšnosti daného modelu tím, že kvantifikují rezidua mezi simulovanými a měřenými hodnotami daných veličin. Existuje řada typů objektivních funkcí. V kontextu simulačního modelování hydrologických procesů jsou uvažovány následující příklady optimalizačních funkcí.

Střední chyba (Mean Error (ME)) – rovnice 1 – je používána k odhadu systematické chyby při nadhodnocování nebo podhodnocování modelu. Pro dobrý model by měla být hodnota ME blízko k nule, existuje ale riziko, že kladné a záporné chyby se mohou vzájemně vyrušit.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i). \quad (1)$$

Střední absolutní chyba (Mean Absolute Error (MAE)) – rovnice 2 – odhaduje střední hodnotu absolutních velikostí reziduí a zahrnuje všechny rezidua v modelu.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_i - O_i|. \quad (2)$$

Střední kvadratická chyba (Mean Square Error (MSE)) – rovnice 3 – poskytuje odhad variability chyb v modelu.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2. \quad (3)$$

Pro posouzení účinnosti hydrologického modelu je uvažován rozptyl reziduí, který je možné stanovit řadou kritérií. Kritéria ve většině případů uvažují druhou mocninu reziduí, aby tak bylo eliminováno možné podhodnocení hodnoty rozptylu reziduí vlivem záporných hodnot reziduí.

Odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE) – rovnice 4 – je ze střední kvadratické chyby (MSE) a vyjadřuje se tak ve stejných jednotkách jako pozorované veličiny. RMSE udává, jak moc se simulované hodnoty modelu liší od měřených hodnot. Nabývá kladných hodnot, přičemž čím nižší je hodnota RMSE, tím je model přesnější.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}. \quad (4)$$

Nash-Sutclifův koeficient, také nazýván koeficient determinace, (Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE))(rovnice 5) porovnává shodu simulovaných a měřených hodnot s použitím aritmetického průměru měřených dat. Pohybuje se v intervalu od $(-\infty; 1)$, přičemž $NSE < 0$ znamená, že aritmetický průměr měřených dat má vyšší přesnost než model, zatímco $NSE = 1$ indikuje dokonalou shodu mezi simulovanými a měřenými daty. Obecně se hodnota NSE vyšší než 0,5 považuje za přijatelnou pro hydrologické modely.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}. \quad (5)$$

Kling-Gupta koeficient(Kling-Gupta Efficiency (KGE)) – rovnice 6 – poskytuje komplexnější pohled na schopnost modelu replikovat měřená data. Kombinuje tři hlavní komponenty, tj. korelaci mezi pozorovanými a simulovanými daty, relativní variabilitu zachycující rozptyl měřených dat a relativní chybu střední hodnoty, která reflektuje celkový objem nebo intenzitu proměnné. Stejně jako koeficient NSE nabývá intervalu od $(-\infty; 1)$, kdy je snahou se hodnotou KGE blížit 1.

$$\begin{aligned}
KGE &= 1 - ED, \\
ED &= \sqrt{(s[1](r-1))^2 + (s[2](vr-1))^2 + (s[3](\beta-1))^2}, \\
r &= PCC, \\
vr &= \begin{cases} \alpha & , \text{metoda} = \text{Gupta et al. (2009)}, \\ \gamma & , \text{metoda} = \text{Kling et al. (2012)}, \end{cases} \quad (6) \\
\beta &= \mu_s / \mu_o, \\
\alpha &= \sigma_s / \sigma_o, \\
\gamma &= \frac{CV_s}{CV_o} = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}.
\end{aligned}$$

kde PCC je Pearsonovů korelační koeficient, a α , β a γ jsou poměry momentů rozdělení pozorovaných ($*_o$) a simulovaných ($*_s$) řad.

3.3 Simulační modely v městského odvodnění

Simulační modelování městského odvodnění staví na principech hydroinformatiky, neboli oboru, jež propojuje znalosti z vodního inženýrství s informačními technologiemi a umělou inteligencí. Kombinací takových nástrojů je možné docílit efektivního zpracování velkého množství různorodých dat, díky čemu je umožněno přesnější modelování nejen v oblasti městského odvodnění. Aplikace hydroinformatiky umožňují vývoj nových softwarů pro pokročilejší simulace procesů městského odvodnění. Vývoj simulačních modelů popsal Abbot a rozdělil je do pěti generací (Abbot, 1991).

V **První generaci** (60.léta 20. století) zatím nebylo modelování městského odvodnění prioritou. V této oblasti byla využívána racionální metoda pro hydraulický návrh stokové sítě. První modely simulující městské odvodnění se tak zabývali automatizací výpočtu dle této metody.

Druhá generace (60 - 70. léta) představovala rozvoj výpočetní techniky a numerických metod. V důsledku toho začaly vznikat první programy které řešily hydraulické a hydrologické úlohy. Tyto programy byly ovšem primárně využívány svými autory, jelikož neexistovala ucelená koncepce těchto prvních modelů, zároveň kvůli jejich nestabilitě bylo třeba ovládat schopnosti k jejich opravám.

Třetí generace (70. léta) souvisí s průmyslovým rozvojem výpočetní techniky, díky kterému roste počet uživatelů. To vedlo ke vzniku prvních standardů matematických modelů. Zároveň začínají být více užívány databázové systémy. Stále je ovšem limitující stav vývoje výpočetní techniky (Krejčí, 2002; Makropoulos and Savić, 2019).

Čtvrtá generace (přelom tisíciletí) představovala rozmach využívání simulačních modelů v důsledku příchodu osobních počítačů, snížení počátečních nákladů a spuštění internetu. Tyto možnosti přinesly klíčové propojení simulačních modelů s prostorovými informačními systémy (Geografický informační systém (GIS)) a inženýrskými technologiemi (CAD) (Abbot, 1991; Krejčí, 2002).

Pátá generace (současnost) přináší inovativní přístupy v simulačním modelování městského odvodnění s využitím umělé inteligence a strojového učení (Kwon and Kim, 2021; Zaherpour et al., 2018)). Zároveň je kladen důraz na vývoj modelů, které umožňují zpracování velkých dat reálném čase (García et al., 2015; Li and Jia, 2022)), což umožňuje predikovat budoucí vývoj na základě historických trendů a reagovat na změny ve vodním cyklu nebo urbanizaci (Makropoulos and Savić, 2019).

3.3.1 Srážky a srážková data

Atmosférické srážky, klíčový fenomén hydrologického cyklu, se vyskytují v různých formách, jako je déšť, sníh, mrholení, nebo například krupobití. Pro modelování městského odtoku jsou zvláště významné dešťové srážky, neboť jsou primárním zdrojem vody, který spouští odtokové procesy v urbanizovaných oblastech. V kontextu klimatické změny a modelování srážkoodtokového procesu v urbanizovaném prostředí je možné uvažovat tři typy srážkových událostí na základě jejich intenzity (Stránský et al., neuváděno):

- Běžné srážky jsou charakterizovány jako srážky s dobou opakování do 5 let, tvořící asi 65–80 % celkového srážkového úhrnu. Tato kategorie zahrnuje nejčastější srážkové události, které jsou typické pro danou oblast a mají zásadní vliv na běžné hospodaření s vodou.
- Silné srážky mají frekvenci opakování v rozmezí od 5 do 50 let, v závislosti na specifických lokálních podmínkách. Tyto srážky představují přibližně 19–34 % celkového srážkového úhrnu a jsou významné z hlediska plánování odolnosti infrastruktury vůči vyššímu riziku povodní.
- Extrémní srážky jsou definovány jako srážky s dobou opakování 50 let a více, tvořící zhruba 1–5 % celkového srážkového úhrnu. Tyto vzácné a intenzivní srážkové události představují nejvyšší riziko, co se týče povodní a jiných extrémních hydrologických jevů, a vyžadují specifické způsoby řízení a plánování.

Srážková data

Srážková data jsou považována za stěžejní vstupní data modelů městského odvodnění. Tato data mohou mít formu historických záznamů nebo mohou být uměle vytvořena (modelové deště).

Historické deště představují základní podobu srážkových dat. Jedná se o záznamy reálných průběhů dešťových intenzit v čase i jejich plošné rozložení. Tyto údaje jsou důležitým podkladem pro modelování, jelikož odrážejí lokální podmínky a umožňují přímé porovnání mezi očekávanými a skutečnými odtokovými charakteristikami. Pro komplexní informaci o srážkových podmínkách je ovšem zapotřebí mít dostatečně hustou síť srážkoměrů a dostatečně dlouhou časovou řadu srážkových úhrnů, resp. intenzit (Haloun, 1993; Krejčí, 2002).

V době, kdy srážková data nesplňovala dostatečně tyto požadavky, byly vyvinuty modelové deště. Tyto deště, odvozené z historických údajů, poskytují reprezentativní soubor dat primárně určených k hydraulickému navrhování stokových sítí (Krejčí, 2002). Přestože jsou dnes k dispozici rozsáhlé a kvalitní historické datové sady, syntetické deště stále nacházejí uplatnění v určitých typech aplikací, zejména pro řešení koncepčních úloh.

Blokový dešť byl vytvořen paralelně s vývojem racionálních metod. Jedná se o jednoduchý dešť, který je odvozený z čar náhradních intenzit, kdy objem blokového deště byl stanoven statistickým vyhodnocením skutečných srážkových událostí. Jeho hlavním omezením je využití při simulačním modelování, jelikož je prakticky využitelný pouze v úlohách, které se soustředí na stanovení objemů (Haloun, 1993). V České republice je všeobecně užíváný koncept dle Trumpla (Krejčí, 2002). Pro Prahu byly historicky používány čáry náhradních intenzity dle Ing. Másla (PVS a.s., 2023). Dalšími příklady syntetických dešťů je Šifaldův dešť, který byl odvozen v důsledku potřeby zohlednit variabilitu srážkových intenzit v čase nebo dešťové katalogy, jež představovaly historické deště kategorizované dle jejich četnosti výskytu za určité časové období.

3.3.2 Příklady existujících simulačních modelů v kontextu městského odvodnění

Jedním z nejvíce rozšířených modelů, z oblasti městského modelování, je Storm Water Management Model - **SWMM** vyvinutý americkou agenturou *Environmental Protection Agency* (EPA). SWMM je model vhodný pro simulaci množství a kvality povrchového odtoku z primárně urbanizovaných oblastí (Rossman et al., 2010). Funkce modelu je možné klasifikovat do tří oblastí; hydrologické modelování, hydraulické modelování a kvalita vody.

Hydraulické modelování zahrnuje definování a charakteristiky povodí, jako

například nepropustnost, sklonitost, zastavěnost či typy půd. Součástí SWMM je několik modelů infiltrace (*Horton*, *Green-Ampt*, *Curve Number*). Dále je možné uvažovat procesy jako evapotranspirace a akumulace a tání sněhu. Hydraulické modelování spočívá v simulaci proudění vody v systému stokové sítě (případně síť potrubí). Podporuje různé typy toků, včetně laminárního, turbulentního a tlakového. Dále je umožněno modelování toku vody pomocí kinematické vlnové metody pro jednodušší analýzy a plně dynamické vlnové metody pro komplexní systémy s interakcemi zpětného toku a proměnnými tlaky. Kvalita vody obsahuje komponenty pro modelování procesů akumulace znečišťujících látek na povrchu během suchých období a jejich vymývání během dešťových událostí. Simuluje transport, rozklad a odstranění znečišťujících látek během jejich pohybu skrze systém. Zároveň zahrnuje modelování LID (*Low Impact Development*) prvků, jako jsou zelené střechy, průsakové jímky a dešťové zahrady, které pomáhají snižovat odtok a zlepšovat kvalitu vody (Rossman et al., 2010).

Simulační model **MOUSE** je hydrodynamický, vyvinutý dánskou společností Dánský hydraulický institut a.s. (DHI) DHI (2019b); Krejčí (2002). Jedná se o komplexní nástroj pro hydraulické i hydrologické modelování městského odvodnění složený ze dvou základních modulů:

- Modul povrchového odtoku
- Hydrodynamický modul

Výsledkem modulu povrchového odtoku jsou odtokové hydrogramy. Hydrodynamický modul představuje jednorozměrné neustálené proudění, které jsou řešeny aproximací Saint-Venantových pohybových rovnic spolu s rovnicí kontinuity. Výstupem tohoto modulu jsou průběhy průtoků, výšek hladin a rychlostí (DHI, 2019b). Způsob výpočtu programu MOUSE bude představen v následujících kapitolách.

MIKE URBAN je simulační prostředí určené pro řešení vodohospodářských úloh v urbanizovaných oblastech. Jedná se o nadstavbu simulačních programů zahrnující grafické uživatelské rozhraní, které umožňuje komplexní inženýrskou činnost od stavby modelu, přes spouštění simulací až po grafické znázornění výsledků. Distribuci vody se věnuje oblast *Water Distribution*, systémům odvodnění pak oblast *Collection System*. Výpočetním jádrem jsou zejména simulační programy MOUSE a SWMM (DHI, 2019a).

3.3.3 Modelování povrchového odtoku

Povrchový odtok je možné popsat pomocí hydrologických (infiltrace, evapotranspirace atp.) a hydraulických procesů (proudění vody). Ústředním pojmem v

modelování povrchového odtoku je efektivní dešť, tedy ta část celkových srážek, která se skutečně podílí na povrchovém odtoku po odečtení všech ztrát. Ztráty na povodí představují souhrnné označení procesů jako je infiltrace, povrchová retence, intercepce, evapotranspirace a ostatní ztráty (Haloun, 1993).

Dalším z hlavních faktorů ovlivňujících povrchový odtok je nepropustnost povrchu, která se týká schopnosti povrchu zabránit infiltrace vody. Povrchy lze klasifikovat dle míry jejich nepropustnosti. Míra klasifikace může být různá; od rozlišování propustných, polopropustných a nepropustných ploch až po uvažování jednotlivých materiálů. Zejména pro modelování povrchového odtoku v urbanizovaném území je tato klasifikace důležitá, neboť tato území vykazují vysoký podíl nepropustných ploch (Elliott and Trowsdale, 2007).

Snížená infiltrace sebou nese změnu kvality vody. Povrchový odtok z urbanizovaných oblastí totiž často nese různé kontaminanty, které mohou negativně ovlivnit kvalitu vodních zdrojů. Důsledkem snížení infiltrace je omezení přirozených procesů filtrace a čištění, které půda a vegetace poskytují (Putri et al., 2023). V dnešní době je zároveň trendem začleňování více typů LID do srážkoodtokových modelů (Dougahneh et al., 2023; Elliott and Trowsdale, 2007; Putri et al., 2023). Prvky LID se snaží napodobovat nebo obnovit přirozené hydrologické procesy, které byly narušeny urbanizací. To zahrnuje zvýšení propustnosti povrchů, zadržování a zpomalování odtoku, podporu infiltrace a používání vegetace pro zlepšení kvality vody (Elliott and Trowsdale, 2007; Putri et al., 2023).

Příklady modelů povrchového odtoku budou prezentovány v rámci popisu funkcí programu MOUSE, pomocí kterého byla vypracována praktická část této práce.

MOUSE – Modul povrchového odtoku

Součástí modulu povrchového odtoku jsou čtyři samostatné modely odtoku, jež jsou založeny na rozdílných výpočetních přístupech:

- Model A: Metoda Time-Area
- Model B: Metoda nelineárního rezervoáru (kinematická vlna)
- Model C: Metoda lineárního rezervoáru
- UHM: Model jednotkového hydrogramu

MOUSE uvažuje tři typy vstupních dat (DHI, 2019b):

- Obecná data povodí představují charakteristiky povodí a jsou nezávislá na následné volbě odtokového modelu.

- Modelová data rovněž popisují povodí, zároveň jsou již specifická a jsou relevantní pro zvolený typ odtokového modelu.
- Parametry modelu jsou shromažďovány v sadách parametrů (Parametr set), které je možné nadefinovat libovolným způsobem buď pro každé povodí zvlášť nebo pro vybrané skupiny povodí.

Model A: Metoda Time-Area

Model A, založený na metodě Time-Area (TA), představuje koncepční popis rychlosti reakce a tvaru povodí, přičemž tvar odtokového hydrografu je definován dobou dotoku (*time of concentration*) a Time-Area křivkou. Odtok je pak stanoven na základě počáteční ztráty, redukčního faktoru a velikostí nepropustných ploch (DHI, 2019b). Jedná se o základní model povrchového odtoku (black box) s minimálními požadavky na vstupní data (DHI, 2019a). V důsledku toho se jedná o prakticky využívaný model, který je historicky spjatý s modelováním v České republice. Mezi obecná vstupní data patří základní informace o povodí, jakými je například ID, souřadnice povodí nebo plocha povodí. Specifickou charakteristikou v rámci modelových dat je uvažována nepropustnost povrchu vyjádřena procentem nepropustnosti. Hydrologické parametry jsou uvažovány čtyři: počáteční ztráta, redukční faktor, TA Curve a TA Coeficient. Počáteční ztráta představuje výšku srážky, která je zadržena na povodí před samotným povrchovým odtokem. Redukční faktor zahrnuje evapotranspiraci, nedokonalou nepropustnost a podobné efekty, čímž reflektuje kontinuální ztráty vody. Time-Area křivka charakterizuje tvar povodí. Rozlišují se tři tvary – obdélníkové, divergentní a konvergentní povodí. Pro nepravidelná povodí může být Time-Area křivka vytvořena uživatelem, k čemuž slouží parametr Time-Area Coefficient. (DHI, 2019a,b). Přehled vstupních dat modelu A je znázorněn v tabulce (1).

Tabulka 1: Vstupní data modelu A

Obecná data	ID, souřadnice, plocha povodí, počet obyvatel, přídatný průtok
Modelová data	nepropustné plochy
Parametry modelu	počáteční ztráta, redukční faktor, TA křivka, TA koeficient

Model B: Metoda nelineárního rezervoáru (kinematická vlna)

Model B, založený na metodě kinetické vlny, počítá povrchový odtok v otevřeném korytě, přičemž jsou uvažovány pouze gravitační a třecí síly. Zároveň má, v porovnání s modelem A vyšší požadavky na vstupní data. Modelová data jsou délka

a sklon povodí spolu s nepropustným povrchem. Mezi parametry modelu patří například začátek a konec infiltrace, Hortonův exponent a další. Výpočet modelu B je založený na rovnici kinematické vlny a bilanci objemů vody (z ang. *volume continuity*). Nejprve je spočítán efektivní déšť dle rovnice 7:

$$I_{\text{eff}}(t) = I(t) - I_E(t) - I_W(t) - I_I(t) - I_S(t). \quad (7)$$

kde $l(t)$ je aktuální srážka v čase t , $I_{\text{eff}}(t)$ je efektivní intenzita srážek v čase t , $I(t)$ je aktuální intenzita srážek v čase t , $I_E(t)$ je ztráta vypařováním v čase t , (poznámka: vypařování je zohledněno pouze pokud je aktivována součást RDI běhu modelu), $I_W(t)$ je ztráta způsobená zvlhčením povrchu v čase t , $I_I(t)$ je infiltrační ztráta v čase t , $I_S(t)$ je ztráta způsobená naplněním povrchových depresí (povrchová retence) v čase t .

Poté se počítá povrchový odtok dle rovnice (8), který začíná v okamžik, kdy je efektivní intenzita srážek větší než nula (DHI, 2019b).

$$Q(t) = \frac{1}{n} A_r^{2/3} S^{1/2}. \quad (8)$$

$Q(t)$ je průtok (m^3/s) v čase t , n je Manningův součinitel drsnosti, A_r je průtočná plocha (m^2), S je sklon energetické čáry (bezrozměrný).

Model C: Metoda lineární nádrže

Model C, založený na metodě lineárních nádrží, stojí na předpokladu, že závislost povrchového odtoku je úměrná aktuální hloubce vody v povodí. MOUSE uvažuje dvě varianty modelu lineární nádrže; nizozemský model odtoku (C1) a francouzský model odtoku (C2). Modelová data a parametry se liší v závislosti na použité variantě. Jsou uvažovány nepropustné plochy, počáteční ztráta, délka a sklon povodí a další. Obdobně jako u modelu B je nejdříve napočítána efektivní srážka dle rovnice (9). Následně je počítán povrchový odtok dle rovnice lineární nádrže (rovnice 11):

$$P_{\text{eff}} = P - (I_a + I_e + I_i + S). \quad (9)$$

P_{eff} je efektivní srážka (mm), P je celková srážka (mm), I_a je počáteční ztráta absorpcí (mm), I_e je evaporační ztráta (mm), I_i je infiltrační ztráta (mm), S je ztráta způsobená zásobováním (mm).

$$Q(t) = C \cdot y_R(t) \quad (10)$$

$$\frac{dy_R}{dt} = \frac{I_{\text{eff}}(t) \cdot A - Q(t)}{A}. \quad (11)$$

$Q(t)$ je průtok v čase t (m^3/s), $y_R(t)$ je hloubka odtoku v čase t (mm), $I_{\text{eff}}(t)$ je efektivní intenzita srážky v čase t (mm/h), A je plocha povodí (m^2) a kde C je koeficient lineární nádrže, který je odlišný pro zmíněné varianty modelu (rovnice 12 a 13).

$$C = \frac{A}{T_C}. \quad (12)$$

$$C = \frac{A}{T_L}. \quad (13)$$

C je konstanta lineárního rezervoáru, A je celková plocha povodí (m^2), T_C je časová konstanta povodí ($1/\text{min}$) pro model C1, T_L je časové zpoždění povodí (min) pro model C2.

UHM: Model jednotkového hydrogramu

Model jednotkového hydrogramu (Unit Hydrograph Surface Runoff Model (UHM)) je vhodný pro simulaci ojedinělé srážkové (bouřkové) události pro jakýkoliv počet povodí. V rámci modelu MOUSE se jedná o alternativu modelování odtokového procesu, k již zmíněným modelům. Je vhodný pro oblasti, kde nejsou k dispozici záznamy o průtocích, případně oblasti, ve kterých již byla technika jednotkového hydrogramu zavedena (DHI, 2019b). Předpokladem modelu UHM je že srážková voda infiltrovaná do půdy se z velké části bude následně vypařovat, čímž se do stokové sítě dostane relativně malá část této vody. Z toho důvodu MOUSE popisuje značnou část infiltrace jako ztrátu. V rámci výpočtu jsou nejprve modelovány srážky, pro které je v MOUSE možné volit ze čtyř metod: proporcionální ztrátou (racionální metoda), fixní počáteční a konstantní ztrátou nebo metodou SCS (*Soil Conservation Service*), která rozlišuje model ztrát (*Generalised Loss Model*). V druhém kroku je počítán odtok jednotkového hydrogramu (DHI, 2019b).

3.3.4 Modelování proudění ve stokové síti v MOUSE

Při modelování stokových sítí se uvažují dva primární typy proudění; proudění s volnou hladinou a tlakové proudění. Proudění s volnou hladinou je definováno atmosférickým tlakem na hladině. Tlakové proudění nastává v případě, kdy je

voda v systému pod tlakem K domu může dojít v důsledku zaplnění potrubí vodou nebo v případě vzniku zpětné vzduť v systému.

MOUSE – Hydrodynamický modul

Hydrodynamický modul je nástroj pro výpočet neustáleného proudění v potrubí se střídavým přechodem mezi prouděním s otevřenou hladinou a tlakovým prouděním. Model je schopen simulovat různé hydraulické jevy a režimy toku, včetně subkritických a superkritických toků, a umožňuje hladký přechod mezi prouděním s otevřenou hladinou a tlakovým prouděním. Hydrodynamický modul je možné rozdělit do několika sekcí, které na sebe různě navazují:

- Modelování fyzikálního systému
- Popis neustáleného proudění v potrubí
- Numerické řešení rovnic proudění v potrubí

V rámci modelování fyzikálního systému jsou definovány prvky, které mohou mít liniovou nebo bodovou (šachty) podobu. Liniové prvky představují potrubí nebo otevřená koryta; mohou mít libovolný průřez a jsou charakterizovány neměnnou geometrií a konstantním sklonem dna a třením. Bodové prvky jsou trojího typu a reprezentují šachty, výpusti potrubí, retenční nádrže a další. Pomocí bodových prvků jsou propojovány prvky liniové. Rovněž jsou v této fázi definovány funkce pro simulaci specifických fyzikálních procesů nebo komponent, jako jsou přelivy, otvory a čerpadla.

Popis neustáleného proudění v potrubí je založen na numerickém řešení metodou konečných diferencí základních 1-D rovnic volného povrchu, neboli Saint-Venantovy rovnice. Tyto rovnice reflektují zákon zachování hmoty (rovnice 14) a zákon zachování hybnosti (rovnice 15).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_0 - I_T). \quad (15)$$

kde Q je průtok [$m^3 s^{-1}$], A je plocha průtočného průřezu [m^2], y je hloubka toku [m], g je gravitační zrychlení [$m s^{-2}$], x je vzdálenost ve směru toku [m], t je čas [s], I_0 je spád dna, I_T je spád tření.

Platnost těchto rovnic je ovšem omezena na proudění s volnou hladinou. Pro tlakové proudění je nutné Saint-Venantovy zobecnit tak, aby bylo původně

proudění s volnou hladinou uzavřeno. Toho je docíleno pomocí Priessmannovy štěrbině, kterou je možné si představit jako fiktivní velmi úzkou vertikální štěrbinu, která se přidává na vrcholu uzavřeného průřezu potrubí v matematickém modelu. Přestože fyzicky neexistuje, umožňuje matematickému modelu zachytit chování tlakového toku uvnitř úplně naplněného potrubí, aniž by došlo k porušení základních hydraulických rovnic. Hydrodynamický modul uvažuje tři stupně zjednodušení Saint-Venantových rovnic:

- Kinematická vlna
- Difuzní vlna
- Dynamická vlnová aproximace

Proudění v potrubí, které je možné popsat výhradně jako s vysokým sklonem je charakterizováno gravitačními a třecími silami, zatímco setrvačné a tlakové síly jsou upozaděny. Tento typ proudění je možné modelovat aproximací kinematické vlny, která vychází ze zjednodušení plných Saint-Venantových rovnic tím, že se zanedbává člen hybnosti. To znamená, že tok je modelován pouze na základě rovnice kontinuity (zachování hmoty) a empirického vztahu mezi rychlostí toku a hydraulickým spádem. Ačkoli je kinematická vlnová aproximace užitečná pro určité aplikace, nemůže adekvátně popsat složitější hydraulické jevy, jako jsou rychlé změny vodní hladiny, tlakové vlny nebo složité interakce mezi tokem a strukturami v toku.

Aproximace difuzní vlnou stále významně zjednodušuje modelování neustáleného proudění v potrubí, zároveň je složitější než aproximace kinematickou vlnou. Oproti kinematické vlně, difuzní vlna zohledňuje nejen gravitační složku toku, ale i vliv advekce a difuze vody v systému. Advekce odkazuje na pohyb vody a rozptýlených látek v proudu, zatímco difuze představuje rozptyl vody a rozptýlených látek v důsledku změny koncentrace. Difuzní vlnová aproximace tak lépe zachycuje pomalé změny v hloubce a rychlosti toku.

Nejkomplexnější přístup k simulaci neustáleného proudění v otevřených korytech i proudění v potrubí představuje aproximace dynamické vlny. Na rozdíl od kinematické a difuzní vlny neprovádí zjednodušení hybnosti. Jedná se tak o plné řešení Saint-Venantových rovnic.

Numerické řešení rovnic proudění v potrubí je nezávislé na volbě výpočtu (kinematický, difuzní nebo dynamický). Základem pro aplikaci numerických metod je vytvoření výpočetní mřížky, neboli souborů diskrétních bodů které reprezentují fyzikální prostor modelovaného systému. MOUSE používá speciální typ výpočetní mřížky (tzv. *staggered grid*), kde výpočetní body pro průtok a vodní hladinu jsou umístěny střídavě. Tento přístup zlepšuje numerickou stabilitu a přesnost tím,

že minimalizuje numerickou disperzi a zvyšuje schopnost modelu zachytit různé hydraulické jevy, jako jsou rychlé změny hladiny vody.

MOUSE jako numerické schéma uvažuje Abbotovo šestibodové schéma (DHI, 2019c). Rovnice proudění jsou aproximovány metodou konečných diferencí. Pro modelování složitých hydraulických systémů (například rozvětvená síť potrubí) je zaměřen numerický algoritmus *Double Sweep*, který je založen na principu dvou průchodů přes celou výpočetní mřížku modelu – jeden průchod směřuje od začátku do konce potrubní sítě a druhý v opačném směru (DHI, 2019c).

Pro úpravu textu a stylistiky této kapitoly byla použita AI technologie OpenAI (2024).

4 Charakteristika zájmového území

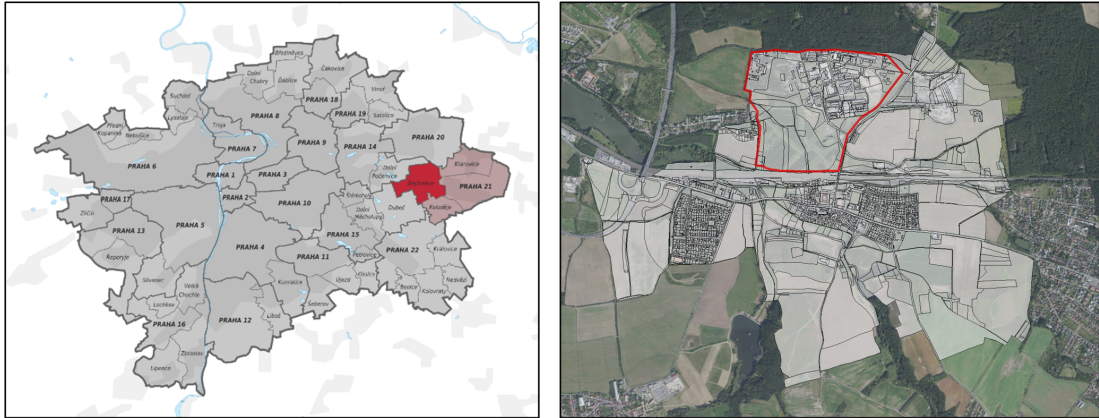
Běchovice, situované na severovýchodní hranici hlavního města Prahy, jsou protnuty významnými dopravními cestami vedoucími směrem na Český Brod a Kolín, zahrnující jak silniční, tak železniční spojení. V severní části této oblasti se rozkládá komplex původně určený pro výzkumné účely, který v současné době prochází transformací na multifunkční areál skládající se z průmyslových a výzkumných zařízení (obr.1). Tento areál je umístěn nad dopravním koridorem, přičemž běchovický háj tvoří přirozenou hranici na severu.

Historické odvodňování celé oblasti areálu se řídilo jednotným systémem kanalizace směřujícím odpadní vody k místní čistírně odpadních vod. Plány do budoucna však předpokládají přesměrování odvodnění oblasti do centrální čistírny odpadních vod v Praze-Bubenči prostřednictvím nově vybudovaného sběrače. S tím souvisí i přestavba stávající kanalizace na systém s odděleným odváděním splaškových a dešťových vod. Dešťová voda by měla být podle nových plánů řešena s ohledem na legislativní požadavky a principy udržitelného hospodaření, zahrnující lokální zasakování či zpožděné odvádění do přírodních toků, mezi které v Běchovicích patří řeka Rokytky a s ní spojené dočasné vodní toky.

Tato rekonfigurace odvodňovacího systému areálu výzkumných ústavů v Běchovicích odráží snahu o integraci moderních principů správy vodních zdrojů, včetně využití modrozelené infrastruktury pro efektivnější a ekologičtější řešení odvádění dešťové vody, zatímco splaškové vody budou efektivněji čistěny v centralizovaném zařízení.

V roce 2023 byla vypracována studie zaměřená na optimalizaci odvodňovacího systému v areálu Výzkumných ústavů Běchovic (Metelka et al., 2023) (dále jen *Studie*), která přechází z tradičního jednotného systému na moderní oddílný kanalizační systém. Tato studie měla za úkol navrhnout ucelený plán pro odvodnění oblasti, stanovit nezbytné vodohospodářské parametry a vytyčit fáze budoucí transformace infrastruktury.

Diplomová práce je přímo inspirována výsledky této studie, která slouží jako výchozí bod pro další výzkum. Metodika této práce se opírá o simulaci zájmového území, která byla v rámci studie vytvořena. Tento existující model, osvědčený dlouholetou praxí a považovaný za robustní, poslouží jako základ pro srovnání s nově vytvořeným alternativním modelem v rámci této práce.



Obrázek 1: Vymezení zájmového území - Areál výzkumných ústavů Běchovice

4.1 Zájmová oblast

Areál výzkumných ústavů v Běchovicích, se rozprostírá na ploše 102 hektarů na severním okraji městské části Praha - Běchovice. Severní část obklopuje běchovický háj, zatímco na jihu se rozkládá veřejně přístupný park s naučnou stezkou. Terén v celé oblasti se postupně sklání od severu k jihu, přičemž v zastavěném území je terén vyrovnaný. Trasa kanalizačního systému sleduje tento přirozený sklon a končí na čistírně odpadních vod Běchovice, nacházející se v jihovýchodním rohu zájmové oblasti.

V roce 2022 došlo k převodu vlastnictví kanalizačního systému v areálu z FRAMAKA s.r.o. na nového majitele, společnost MU Běchovice, a zároveň byla změněna správa kanalizace na společnost PTP Water s.r.o. Součástí areálu jsou také dvě dešťové nádrže, které nejsou aktuálně využívány.

Oblast se vyznačuje průmyslovým charakterem s dominantní přítomností rozsáhlých budov, které hostí jak domácí, tak mezinárodní společnosti. Přidružené zelené plochy nejsou příliš udržovány. V důsledku industriálního charakteru zde žije jen málo stálých obyvatel. Přístup do celého komplexu je možný pouze z dvou směrů, od jihu a od východu, což podtrhuje jeho izolovanost.

Pro seznámení se s lokalitou a zjištění místních podmínek byla provedena rekognoskace terénu dne 17. července 2023 (obr. 2).



Obrázek 2: Rekognoskace terénu ze dne 17.července 2023

5 Metodika

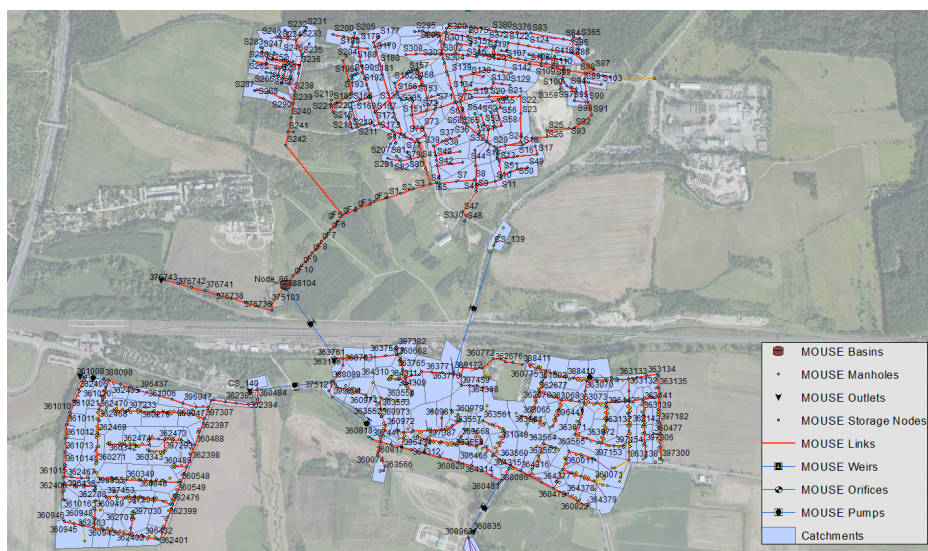
V České republice je modelování srážko-odtokového procesu historicky založené na metodě Time-Area (TA). Tato metoda představuje robustní nástroj nejen při řešení generelů odvodnění, ale i pro simulaci budoucího chování systému. V souvislosti s klimatickými změnami je však důležité věnovat pozornost schopnosti metody Time Area reflektovat odtokové poměry během srážek o vysokých intenzitách. Předpokladem této práce je, že standardní využití metody Time Area (popsáno v kapitole 3.3.3) bude podhodnocovat odtokové poměry povodí při zatížení silnými a extrémními srážkami. Cílem práce je tedy prozkoumat, jakým způsobem bude klasický model, založený na metodě Time Area, skutečně reagovat na zatížení intenzivními srážkami a dále navrhnout alternativní přístup, který by adaptoval tuto metodu tak, aby intenzivní srážkové události zachytila lépe.

Tato kapitola popisuje komplexní proces, počínající stavbou a kalibrací alternativního modelu. Alternativní model vychází z metody Time Area, odlišuje se ovšem v jejím standardním použití. Je přistoupeno k rozdílnému definování nepropustných ploch, stejně jako k uchopení parametru počáteční ztráty, která v alternativním modelu představuje výhradní parametr kalibrace modelu. Následně je provedeno testování obou modelů, klasického i alternativního, v podmínkách silných a extrémních srážek. K tomuto účelu jsou na oba modely aplikovány simulace blokových dešťů různé intenzity (N10, N20, N50 a N100).

5.1 Podkladová data

Simulační model

Výchozím podkladem pro zpracování praktické části diplomové práce je 1D simulační model zájmového území (popsaného v kapitole 4). Model vytvořen v prostředí Mike Urban (DHI) byl poskytnut Pražskou vodohospodářskou společností a. s., prostřednictvím společnosti Aqua Procon s. r. o.



Obrázek 3: Simulační model katastrálního území Běchovic

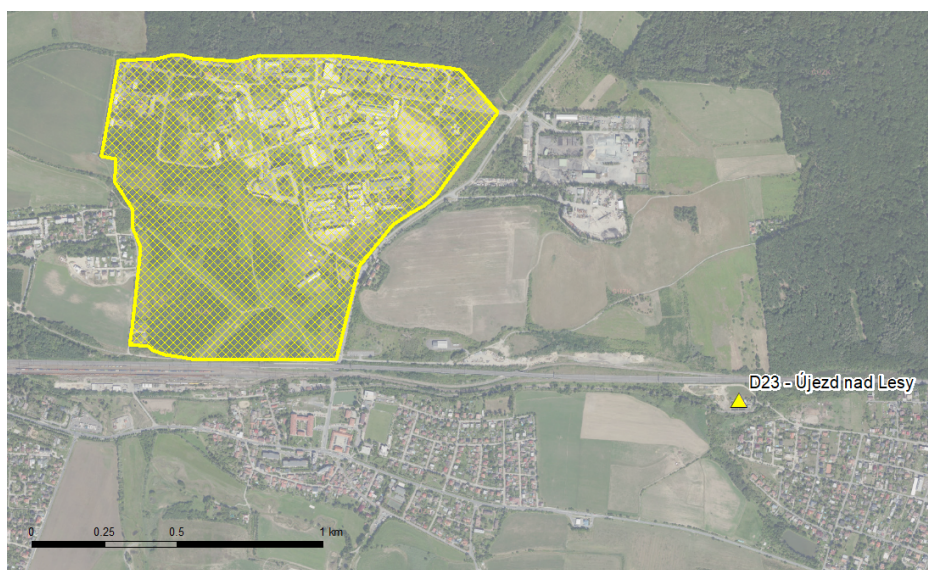
Simulační model pokrývající celé katastrální území Běchovice (obr. 3) je možno rozdělit na dvě části; jižní část (obytná oblast Běchovic a Nová Dubeč) a severní část (areál Výzkumných ústavů Běchovice), která je zároveň shodná s vymezeným zájmovým územím. Jižní část modelu nebyla v průběhu studie nijak upravována a byla při práci použita jen s ohledem na čerpání odpadních vod z této oblasti na ČOV Běchovice. Následné úpravy simulačního modelu se tedy týkají pouze severní části. Povodí simulačního modelu zájmového území (obr 4) má rozlohu 40 ha. Model obsahuje 412 šachet, 3 výústní objekty a 409 úseků stok o celkové délce 13 576 metrů.



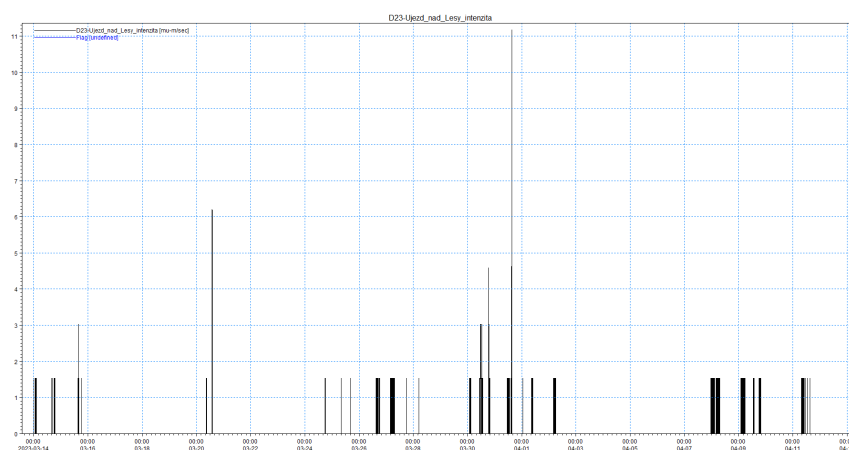
Obrázek 4: Simulační model zájmového území

Srážková data

Pro kalibraci simulačního modelu stokové sítě byla použita časová řada srážek z období 14.03.2023 – 13.04.2023, získaná ze srážkoměrné stanice D23 - Újezd nad Lesy (X=-727639, Y=-1045431), umístěné v blízkosti zkoumaného území (obr. 5). Tato stanice je ve vlastnictví společnosti Pražská vodohospodářská společnost a.s. (PVS a.s.), která je rovněž poskytovatelem srážkových dat pro potřeby kalibrace modelu. Záznam ze srážkoměrné stanice D23 - Újezd nad Lesy je zobrazen na obrázku 6.



Obrázek 5: Umístění srážkoměru D23 - Újezd nad Lesy vzhledem k zájmovému území



Obrázek 6: Průběh intenzity srážek v období 14.03.2023 – 13.04.2023 na srážkoměru D23-Újezd nad Lesy

Monitorovaná data

Monitorovaná data pro potřeby kalibrace modelu vychází z monitorovací kampaně „Měření hydraulických veličin na stokové síti v Praze – Běchovicích“. Jedná se o měřené hodnoty průtoků, hloubek a rychlostí na dvou měrných profilech (MP01 Běchovice-přítok a MP02 Běchovice-odtok) během období 14.03.2023 – 13.04.2023. Zpracovatelem monitorovací kampaně je společnost Pražské vodovody a kanalizace, a. s. Pro stanovení srážkových úhrnů během monitorovací kampaně byly využity záznamy ze srážkoměrné stanice D23 – Újezd nad Lesy.

5.2 Mapové podklady

Pro analýzu povrchů zájmové oblasti byla využita řada mapových podkladů.

Základní mapy představují obecný přehled území s důrazem na geografické a administrativní vymezení, cesty, vodní toky a další prvky. Byly využity jako primární mapový zdroj pro vytvoření základní představy o geografickém uspořádání zájmové oblasti. Konkrétní základní mapy využitě v této práci jsou z databáze Základní báze geografických dat (ZABAGED) (ČUZK, 2023c).

Ortofoto mapy nabízejí letecké snímky území, které umožňují detailní vizuální analýzu krajinných prvků a urbanizovaných ploch. Verze dostupné přes platformy jako Google Maps, Mapy.cz nebo ČUZK byly využity pro detailní analýzu kategorizace ploch zájmového území.

Katastrální mapa (ČUZK, 2023b) je klíčová pro porozumění majetkovým vztahům a administrativním hranicím v rámci zkoumané oblasti. Poskytuje mimo jiné informace o parcelách a budovách, které byly výchozím podkladem pro analýzu povrchů v zájmové oblasti.

Digitální technická mapa Prahy (ČUZK, 2023a) nabízí detailní technické informace o infrastruktuře, včetně polohy stok, veřejného osvětlení, dopravních značení a dalších prvků. Je důležitým zdrojem informací pro plánování, údržbu a rozvoj městské infrastruktury. Pro analýzu ploch zájmového území byla stěžejní informace o dopravní infrastruktuře oblasti.

5.3 Použité nástroje

V diplomové práci byly pro různé účely použity následující softwarové nástroje. Tato kombinace softwaru umožnila komplexní přístup k řešení problematiky, od podkladových dat, přes modelování a simulace, až po analýzu a prezentaci výsledků.

MIKE URBAN (DHI), software pro modelování městského odvodnění, byl popsán v kapitole 3.3.2 V rámci této práce byl Mike Urban využit pro vytvoření

simulačních modelů zájmového území a následné spuštění simulací srážkových událostí. Výhodou programu je kompatibilita s programy společnosti ESRI, jež byly rovněž hojně využívány.

ArcGIS (ESRI) od společnosti ESRI je komplexní GIS, který slouží k vizualizaci, správě a analýze geoprostorových dat. Zejména aplikace ArcMap byla klíčová pro zpracování mapových podkladů, analýzu povrchů zájmové oblasti a tvorbu modelových povodí.

GONEW je interní software vyvíjený firmou AQUA PROCON, s. r. o, se širokým polem zaměření v oblasti projektantské a inženýrské činnosti ve vodním hospodářství. V této práci byla využita zejména funkce kategorizace ploch z hlediska jejich povrchu.

Programovací jazyk R (R Core Team, 2024) byl využit pro výpočty a vyhodnocení simulací, včetně určení objektivních funkcí a tvorbu grafických výstupů.

5.4 Řešení na zájmové oblasti

V rámci této kapitoly je prezentováno komplexní zpracování praktické části práce, které zahrnuje proces od počáteční analýzy povrchů zájmového území, přes stavbu a kalibraci alternativního modelu, až po zatížení obou modelů - klasického i alternativního - silnými a extrémními srážkovými událostmi. Úvodní analýza povrchů byla klíčová pro pochopení dynamiky odtoku v zájmovém území. Následně byl vypracován alternativní model s inovativním přístupem, kde nepropustnost povrchů není pevně stanovena, ale dynamicky se mění. Tento proměnlivý charakter nepropustnosti je integrován do parametru počáteční ztráty, který podléhá optimalizaci během procesu kalibrace. Takovýto přístup umožňuje přizpůsobení modelu skutečným hydrologickým podmínkám a zvyšuje jeho schopnost přesněji simulovat odtok v rámci extrémních srážkových událostí.

5.4.1 Analýza povrchů zájmového území

Proces analyzování povrchů zájmového území zahrnoval sérii prostorových analýz, které se zaměřily na mapování a kategorizaci povrchů, jež byla nezbytná pro identifikaci nepropustných ploch. Současně bylo území rozděleno na intravilánové a extravilánové oblasti, což umožnilo odlišit hydrologické a hydraulické charakteristiky těchto dvou odlišných zón. Takové rozdělení umožnilo přesnější modelování odtoku s ohledem na skutečnost, že extravilánové plochy nejsou přímo napojeny na kanalizační síť. Výsledkem těchto analýz byla vytvořena komplexní vrstva, která sloužila jako základ pro definici povodí simulačního modelu.

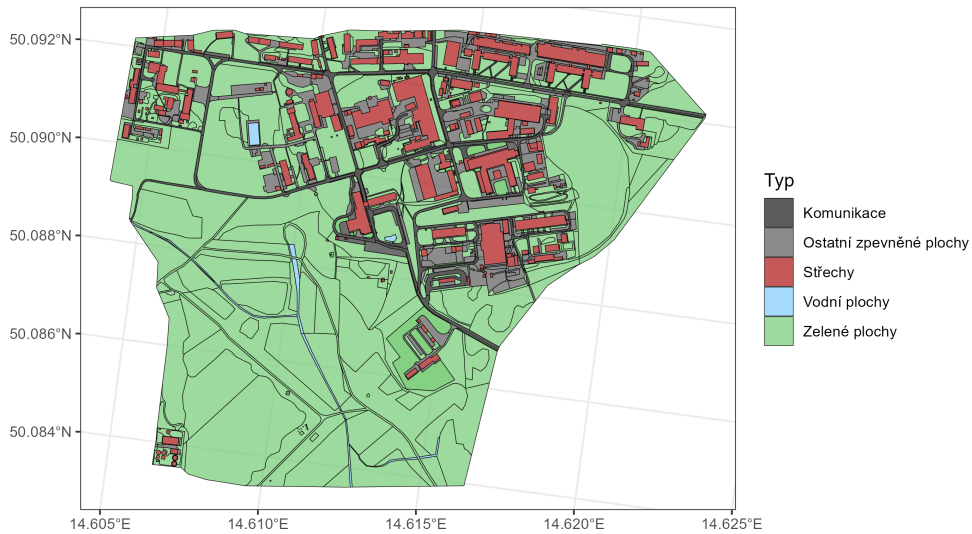
Kategorizace ploch povodí

Pro potřeby identifikace nepropustných ploch byla nezbytná kategorizace ploch z hlediska jejich nepropustnosti. Kategorizace ploch byla vytvořena kombinací automatických a manuálních úprav. Výchozí byla kategorizace vytvořená v prostředí GONEW na základě vegetačního indexu *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Verze automatické kategorizace s různě zvolenými prahovými hodnotami NDVI jsou zobrazeny na obrázku 7. Pro následné praktické využití této verze kategorizace byla provedena manuální úprava ploch jednotlivých vrstev materiálů dle dostupných mapových podkladů a dřívější rekognoskaci lokality.



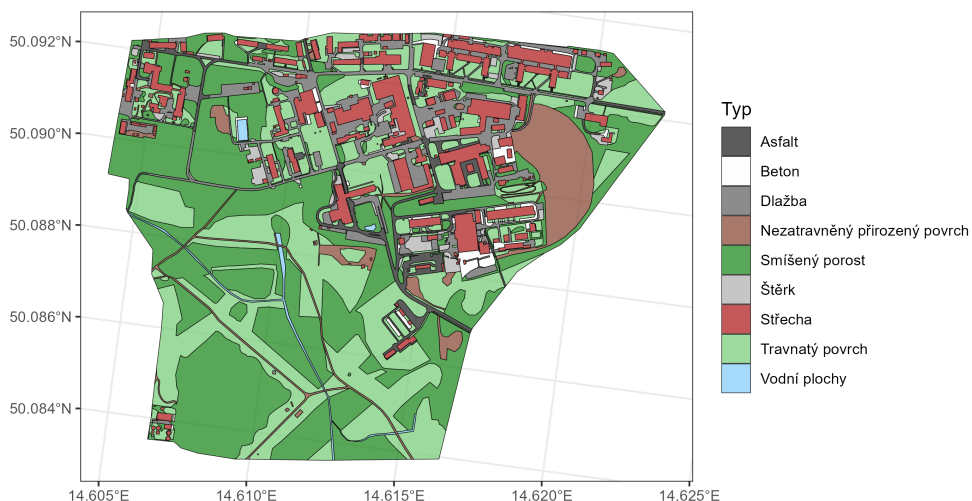
Obrázek 7: Automatická kategorizace s různě volenými prahovými hodnotami NDVI vytvořená v prostředí GONEW

Byly rozlišeny dvě úrovně detailu kategorizace: základní a podrobná. Základní kategorizace rozdělila plochy na střechy, komunikace, ostatní zpevněné plochy, vodní plochy a zelené plochy. Podrobná kategorizace dále rozlišovala některé druhy povrchu dle jejich materiálu, což umožnilo hlubší analýzu charakteristik jednotlivých ploch.



Obrázek 8: Základní kategorizace areálu VÚ Běchovice

Střechy byly uvažovány jako všechny zastavěné plochy vycházející z podkladů katastru nemovitostí. Dále byly mezi střechy zahrnuty objekty, které pro posouzení nepropustnosti vykazují vlastnosti střech, ale v katastru nemovitostí nejsou zahrnuty. Jedná se například o přístavby, přístřešky z různých materiálů – kontejnery, konstrukce stanového typu atp. Na základě dílčích výsledků této práce byla kategorie střech dodatečně rozdělena dle sklonitosti střech na střechy šikmé (v různé míře) a střechy ploché.



Obrázek 9: Podrobná kategorizace areálu VÚ Běchovice

Jako základ pro definování komunikačních ploch byla využita digitální tech-

nická mapa. Za komunikace byly považovány všechny typy silnic a chodníků, stejně jako další zpevněné liniové prvky. Naopak parkovací plochy, dvory průmyslových areálů atp., byly klasifikovány jako ostatní zpevněné plochy. Oba typy ploch se vykazují vysokou mírou nepropustnosti. V podrobné kategorizaci došlo ke sloučení kategorií komunikací a ostatních zpevněných ploch a jejich následnému rozdělení podle typu použitého materiálu. Mezi uvažované materiály patří asfalt, beton, štěrk a dlažba, přičemž dlažba zahrnuje především zámkovou či betonovou dlažbu větších rozměrů.

Zelenými plochami se rozumí přírodě blízké povrchy, u kterých je předpokládána nízká nepropustnost. V případě podrobné kategorizace byly zelené plochy rozděleny na povrchy travnaté a povrchy porostlé smíšenou vegetací. Smíšená vegetace zahrnuje plochy porostlé stromy nebo keři s různou hustotou porostu.

Vodní plochy vycházejí z automatické kategorizace vytvořené v prostředí GONEW. V zájmovém území se nachází dvě uměle vytvořené nádrže a bezejmenná vodoteč se dvěma přítoky. V rámci podrobné kategorizace nebylo uvažováno další dělení.

Výsledná základní kategorizace je zobrazena na obrázku 8, podrobná kategorizace pak na obrázku 9.

Klasifikace ploch zájmové oblasti z hlediska jejich nepropustnosti

Na základě kategorizace ploch, jež byla popsána v předchozí kapitole, je možné klasifikovat plochy zájmové oblasti dle povrchu, v případě podrobné kategorizace dle materiálu. Přehled jednotlivých ploch zájmového území a jejich procentuálního zastoupení vyplývající ze základní kategorizace je sumarizován v tabulce 2. Materiálové rozložení ploch zájmové oblasti je shrnuto v tabulce 3.

Tabulka 2: Přehled ploch dle povrchu

	Plocha [ha]	Podíl ploch [%]
Komunikace	4.9	4.8
Ostatní zpevněné plochy	12.1	11.9
Střechy	9.9	9.7
Zelené plochy	76.7	75
Vodní plochy	0.7	0.6

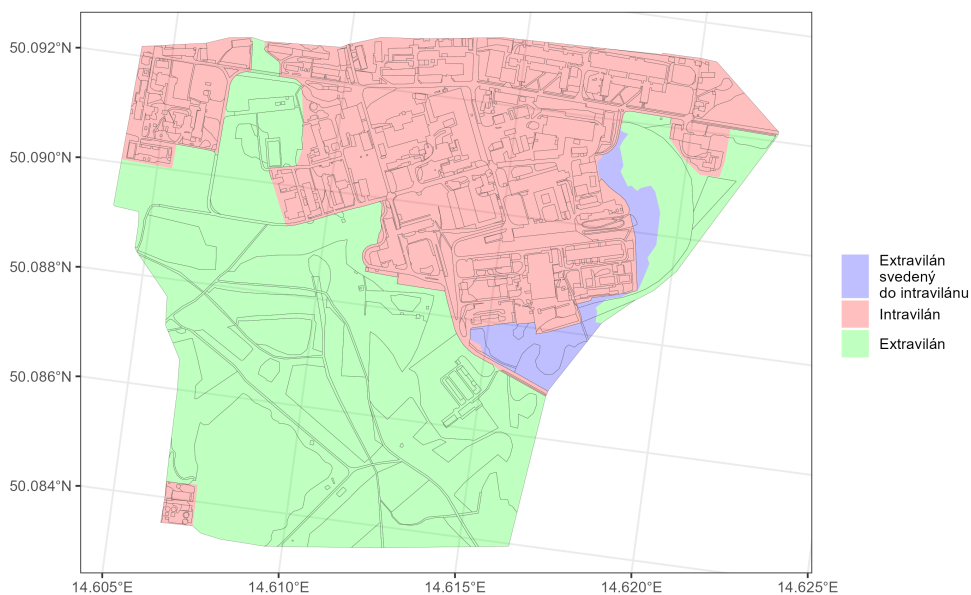
Tabulka 3: Přehled ploch dle materiálu

	Plocha [ha]	Podíl ploch [%]
Asfalt	3.4	3.3
Beton	1.5	1.4
Dlažba	10.1	9.9
Štěrka	2.0	2.0
Střechy	9.9	9.7
Nezatravněný přirozený povrch	6.7	6.5
Travnaté plochy	30.8	30.1
Smíšený porost	37.2	36.4
Vodní plochy	0.7	0.6

Rozloha zájmové oblasti činí 102 hektarů. Podle provedené základní kategorizace dosahuje rozloha nepropustných ploch, zahrnující střechy, komunikace a ostatní zpevněné oblasti, celkem 24,9 hektarů, což tvoří 24,4 % z celkové plochy. V rámci specifikace materiálů bylo identifikováno 26,9 hektarů jako nepropustných, což představuje 26,3 % celkové rozlohy. Mezi nepropustné materiály byly v podrobné kategorizaci zařazeny asfalt, beton, dlažba, štěrka a materiál střeš.

Klasifikace ploch zájmové oblasti z hlediska jejich charakteru

Kanalizační systém se soustředí převážně v severní, průmyslově orientované části, čemuž odpovídá pokrytí povodí klasického simulačního modelu. Zajímavostí zájmového území je jeho dvojitá povaha, kterou tvoří jak průmyslové zóny, tak velké množství zeleně zabírající více než 60% celkové plochy, což bývá pro tento typ areálu netypické. Tato skutečnost vedla k nutnosti rozčlenit zájmové území na základě charakteru jeho povrchu do intravilánních a extravilánních oblastí, přičemž se vycházelo z předem vytvořené kategorizace a z ploch povodí, které uvažuje klasický simulační model. Do analýzy kategorie pro plochy s extravilánním charakterem byly, v důsledku terénních úprav narušeny přirozené svodnice, které tak bylo nutné napojit do kanalizační sítě v intravilánní oblasti. Výsledná klasifikace ploch z hlediska jejich charakteru je zobrazena na obrázku 10.



Obrázek 10: Klasifikace ploch z hlediska jejich charakteru

5.4.2 Koncept stavby a recalibrace klasického simulačního modelu

Simulační model byl pro potřeby diplomové práce přejat v podobě kalibrovaného modelu z výchozí studie (Metelka et al., 2023). Aby bylo možné pochopit a analyzovat celou škálu řešených otázek v praktické části, je nezbytné podrobně popsat, jak byl tento model sestaven a kalibrován.

Stavba simulačního modelu v prostředí Mike Urban

Stavba simulačního modelu v prostředí softwaru Mike Urban je komplexní proces, který obnáší velké množství na sebe navazujících kroků, jež jsou nezbytné pro přesné a efektivní fungování hotového modelu. Tyto kroky shrnuty do následujících bodů:

Analýza podkladových dat: Tento základní krok zahrnuje shromažďování a analýzu všech relevantních dat potřebných pro modelování, tj. vymezení odvodňované plochy, sumarizace dat o stokové síti a objektech, které se na ní nachází, atp. Dále je třeba získat měřena data, mezi které patří časové řady průtoků, výšek hladin a rychlostí z měrných bodů na kanalizační síti, srážkové úhrny z blízkých srážkoměrných stanic nebo data, která poskytují informace o spotřebě vody.

Import dat do Mike Urban: Po analýze a přípravě podkladových dat následuje jejich import do softwaru. V této fázi je potřeba vytvořit vrstvy z podkladových dat, které jsou vhodné pro import (například sjednocení dat do shapelifových vrstev), a následně provést začišťení modelu od přebytečných nebo irelevantních dat.

Tvorba povodí a nepropustných ploch: Po úspěšném importu dat je dalším krokem definování povodí a identifikace nepropustných ploch. Tento krok je zásadní pro modelování, neboť určuje, odkud a jak voda odtéká do stokové sítě. Povodí jsou vytvořena na základě dodaných podkladů, přičemž se ve většině případů jedná o polygonovou vrstvu pokrývající zastavěná území. Nepropustné plochy povodí jsou stanoveny na základě procentuálního zastoupení nepropustných ploch (střechy, komunikace a ostatní zpevněné plochy) v jednotlivých dílčích povodí. Podkladem pro tuto analýzu může být kategorizace ploch popsaná v kapitole 5.4.1.

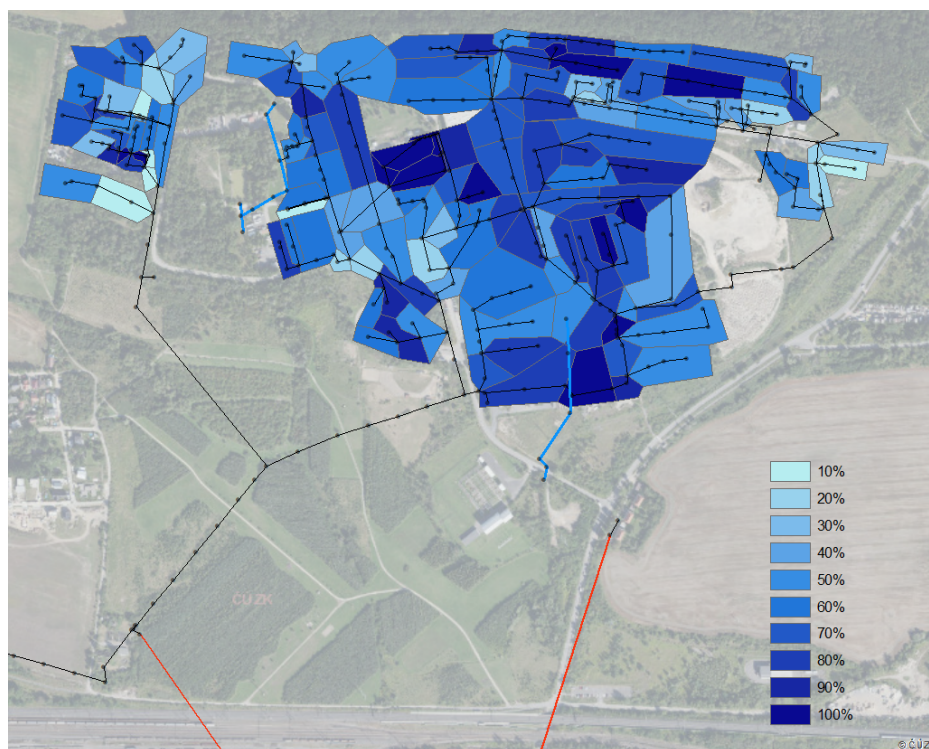
Nahrání dat potřeby vody: Následuje krok, v němž jsou do modelu integrována data o vodném a stočném, které představují roz distribuování potřeby vody po celém modelovaném povodí zájmového území.

Testování stability modelu: Po integraci všech relevantních dat je následujícím krokem prověření stability modelu. Toto je zásadní fáze, která zajišťuje, že model je schopný spolehlivě simulovat reálné podmínky bez technických problémů. Jedná se o poslední krok před samotnou kalibrací modelu. Testování simulačního modelu se zpravidla provádí spuštěním testovací simulace s předem nahranou dešťovou událostí. Pakliže simulace v pořádku dokončena, je simulační model připraven ke kalibraci, které se věnuje jedna z následujících kapitol.

Stavba klasického simulačního modelu

Simulační model jednotné kanalizace v areálu výzkumného ústavu Běchovice byl převzat od zadavatele výchozí studie, tj. PVS a. s., v podobě postaveného modelu. Vzhledem ke skutečnosti, že model byl staršího data a zároveň jeho původní účel byl odlišný, byla provedena aktualizace simulačního modelu následovaná rekalicací modelu na základě měrné kampaně z roku 2023. Simulační model byl dále prověřen z hlediska výskytu náhodných nebo systematických chyb v topologii a atributových datech.

Aktualizace se týkala charakteristik povodí s ohledem na míru jejich nepropustnosti, což bylo založeno na analýze povrchů zájmové oblasti. Použitím základní kategorizace povrchů bylo území rozčleněno na střechy, komunikace, ostatní zpevněné plochy, zelené a vodní plochy. Následně byla pro každý okrsek povodí vypočtena celková plocha nepropustných ploch. Procentuální zastoupení nepropustných ploch ve všech částech povodí je vizualizováno na přiloženém obrázku 11. Míra nepropustnosti je reprezentována různými odstíny modré barvy: čím nižší procento nepropustnosti (tj. menší výskyt nepropustných ploch), tím světlejší odstín modré je použit. Nejsvětější odstín modré reprezentuje oblast s podílem nepropustných ploch nižším než 10 %, zatímco nejtmařejší modrá označuje části povodí s mírou nepropustnosti mezi 91–100 %.



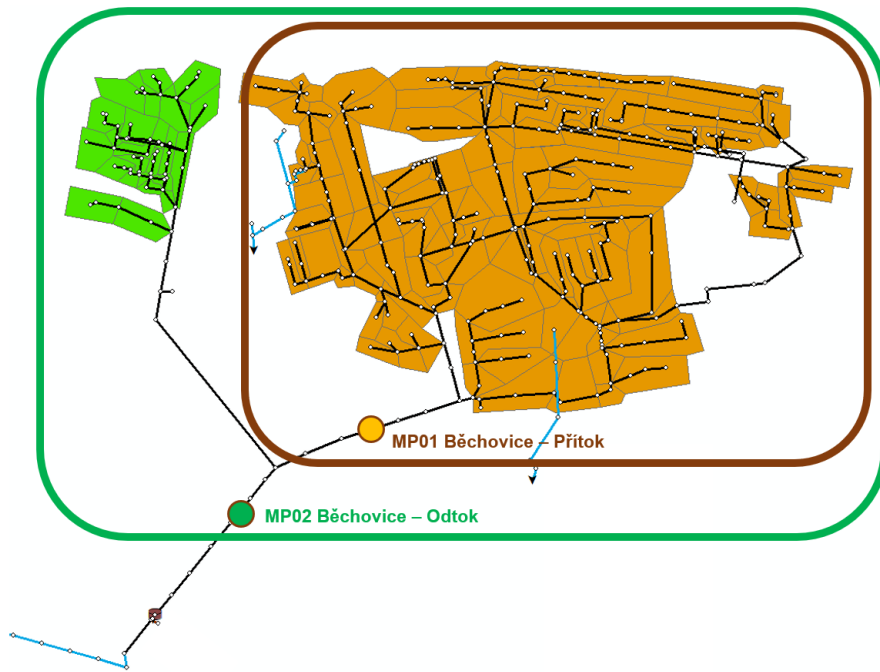
Obrázek 11: Procento nepropustnosti ploch pro jednotlivé okrsky povodí klasického modelu

Rekalibrace klasického simulačního modelu

Proces kalibrace modelu je založen na úpravě jeho parametrů s cílem co nejvěrněji simulovat skutečné odtokové charakteristiky v oblasti. Kalibrace začíná nastavením parametrů pro bezdeštný průtok, což se provádí na základě pozorovaných dat o průtocích, rychlostech a hladinách vody ve vybraném bezdeštném dni. Dalším krokem je kalibrace modelu pro srážkový odtok, která využívá monitorovaná data průtoků, rychlostí, hloubek v kanalizační síti a data měřených srážek z nedaleké meteorologické stanice. Zároveň je podkladem pro kalibraci deštného průtoku kalibrovaný průběh průtoku bezdeštného dne, který je využitý jako tzv. *hot start*, který zaručí minimální průtoky ve stokové síti.

Během kalibrace se upravují nejen hydrologické parametry, jako jsou počáteční ztráty, koeficient odtoku či doba dotoku, ale také hydraulické parametry, například místní ztráty a drsnost potrubí. Toto nastavení parametrů se pak aplikuje na kalibraci jednotlivých částí povodí nad specifickými měrnými profily.

V tomto případě se kalibrace týkala dvou měrných profilů: MP01 Běchovice - přítok a MP02 Běchovice - odtok. Povodí k oběma měrným profilům, včetně lokalizace měrných profilů, jsou zobrazeny na přiloženém obrázku 12.



Obrázek 12: Schéma povodí jednotlivých měrných profilů

Kalibrace modelu při bezdeštném průtoku

Kalibrace bezdeštného průtoku byla založena na analýze monitorovaných dat, přičemž bezdeštný průtok se skládá ze dvou hlavních komponent: balastních vod, které mají konstantní přítok a jsou odhadnuty z nočních minimálních průtoků, a splaškových vod, odhadovaných po odečtení balastních vod z denního průtokového cyklu. Pro kalibraci v obou měrných profilech byly použity hodnoty hodinové nerovnoměrnosti průtoků a koeficient celkové spotřeby vody. Denní nerovnoměrnost průtoků byla odvozena z měření během bezdeštného dne 23.03.2023. Do modelu byly integrovány hodnoty denní nerovnoměrnosti ke všem nátokům splaškových vod, aby simulovaný splaškový průtok odrážel variabilitu měřených průtoků.

Kalibrace modelu během dešťových událostí

Pro potřeby kalibrace modelu pro srážkový odtok byla prověřena data dešťových událostí ze srážkoměru D23 - Újezd nad Lesy, zaznamenaná během období měření na stokové síti. Z této analýzy vyplývá, že ve sledovaném období byl zaznamenán pouze omezený počet srážkových událostí, přičemž tyto události měly nízkou intenzitu. Pro účely kalibrace byly jako reprezentativní vybrány srážkové události z 27.03.2023, 30.03.2023 a 11.04.2023, přičemž srážka ze dne 30.03.2023 byla posouzena jako nejvýznamnější. Charakteristiky kalibračních dešťů jsou sumarizovány v tabulce 4.

Tabulka 4: Charakteristiky kalibračních dešťů

	Doba trvání		Úhrn [mm]	Maximální intenzita [$\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Posouzení Nletosti	
	Začátek	Konec				
27.03.2023	3:43	7:20	217	5.67	1.533	méně než N2
30.03.2023 I.	10:47	13:07	140	11.56	3.033	méně než N2
30.03.2023 II.	18:44	19:40	56	3.20	4.583	méně než N2
11.04.2023	7:37	10:16	159	1.74	1.533	méně než N2

Kalibrace simulačního modelu během srážkových událostí byla provedena na dvou měrných profilech: MP01 Běchovice – přítok a MP02 Běchovice – odtok. Tento proces zahrnoval nastavení parametrů srážko-odtokového modelu, konkrétně dobu dotoku na povodí *Time of Concentration (ToC)*, počáteční ztrátu povodí *Initial Loss (IL)* a *Redukční faktor (RF)*, tak, aby výsledky modelu co nejpřesněji reflektovaly skutečné odtokové podmínky. Optimální nastavení parametrů modelu zájmového území je sumarizováno v tabulce 5. S použitím těchto parametrů byla kalibrace v rámci původní studie hodnocena jako úspěšná. Výsledky kalibrace klasického modelu budou následně zkoumány a porovnány s výsledky kalibrace alternativního modelu.

Tabulka 5: Parametry klasického modelu

	Doba dotoku	Počáteční ztráta	Redukční faktor
	[min]	[mm]	[-]
MP01 Běchovice - přítok	2	0.6	0.4
MP01 Běchovice - přítok	2	0.6	0.4

5.4.3 Alternativní simulační model

V definování alternativního modelu lze identifikovat dva klíčové aspekty, které ho odlišují od klasického přístupu:

- způsob určení nepropustných ploch, s čímž souvisí tvorba povodí
- přístup ke kalibraci (eliminace vlivu redukčního faktoru na kalibraci modelu, kalibrace modelu pomocí parametru počáteční ztráty)

Jak bylo popsáno v předcházející kapitole, míra nepropustnosti v modelu Time Area (klasickém modelu) je konstantní pro všechna povodí, nezávisle na intenzitě srážkové události. Tento přístup je pro návrh a simulaci stokových sítí v

urbanizovaných oblastech adekvátní, jelikož se vychází z normativního deště s dobou opakování dvou let (ČSN 756101). Avšak při modelování silných a extrémních srážek může procentuální vyjádření nepropustnosti vést k nerealisticky nízké odezvě modelu. Předpokladem této práce je, že takto nastavený model bude podhodnocovat odtokové poměry povodí při zatížení srážkami s vysokou intenzitou.

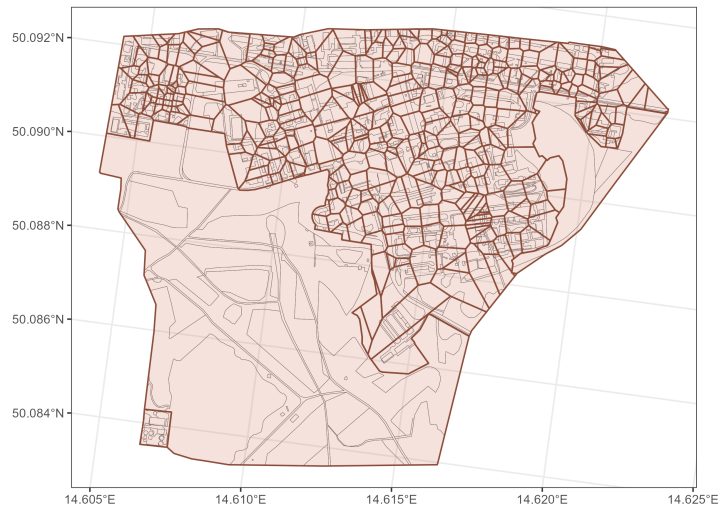
Druhým významným rozdílem je přístup ke kalibraci modelu. Parametry klasického TA modelu se skládají z doby dotoku na povodí, počáteční ztráty (pro celé povodí) a redukčního faktoru. Posledně zmíněný parametr zahrnuje vliv evapotranspirace, nedokonalou nepropustnost atp. (DHI, 2019b). Redukční faktor je tím parametrem, který nemá fyzikální opodstatnění, přesto má na kalibraci simulačního modelu zpravidla vysoký podíl. Alternativní model pro kalibraci uvažuje pouze parametr počáteční ztráty, která je ovšem definována pro každý typ povrchu zvlášť. Tento parametr rovněž zahrnuje míru nepropustnosti, která závisí právě na daném typu povrchu. Zároveň se tímto přístupem při kalibraci alternativního modelu vyvarovalo použití redukčního faktoru.

Tímto přístupem si alternativní model klade za cíl poskytnout realističtější simulaci odtokových procesů při extrémních srážkách, odstraňuje zjednodušující předpoklady o nepropustnosti a redukčním faktoru, které mohou v klasickém TA modelu vést k přílišnému zjednodušení. Eliminací těchto limit a přizpůsobením modelu tak, aby lépe reflektoval skutečné hydrologické chování v extrémních podmínkách, se alternativní model snaží o přesnější předpovědi povrchového odtoku a jeho dynamiky.

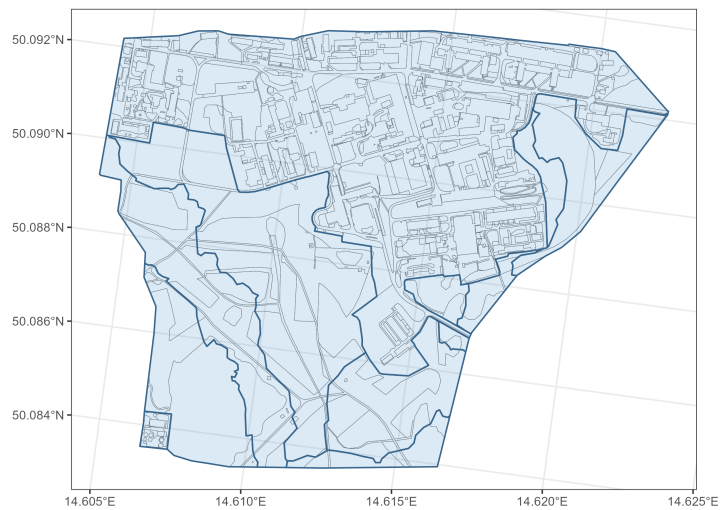
Stavba alternativního simulačního modelu

Alternativní model je odvozen z klasického modelu, přičemž všechny nespécifikované parametry zůstávají v rámci jeho stavby beze změn, díky čemuž nemají vliv na pozdější srovnání obou modelů. Modely jsou tedy totožné až do bodu tvorby povodí a definice nepropustných ploch.

Alternativní model uvažuje jako povodí celé zájmové území, které je dále rozděleno na dílčí povodí. Proces tvorby povodí alternativního modelu zahrnuje kombinaci GIS vrstev a analytických metod. Výchozím bodem je vrstva získaná z analýzy rozdělení na intravilánovou a extravilánovou část (5.4.1). Intravilánová oblast je poté dále rozdělena pomocí Voroniových polygonů k existujícím šachtám kanalizační sítě (obr.13), zatímco extravilánové oblasti jsou segmentovány dle přirozených rozvodnic (obr.14), což reflektuje odtokové charakteristiky v nezastavěných oblastech. Tento přístup umožňuje vytvořit vrstvu dílčích povodí, přičemž každé povodí je přesně definováno podle své specifické hydrologické funkce v krajině.



Obrázek 13: Intravilánová povodí



Obrázek 14: Extravilánová povodí

Následně se provádí kombinace této nově vytvořené vrstvy dílčích povodí s vrstvou získanou z kategorizace povrchů (obr. 9). Výsledkem je vznik finální polygonové vrstvy povodí pro alternativní model, která přesně mapuje rozložení povodí a typů povrchů v celém zájmovém území. Tato vrstva reprezentuje základ pro modelování odtoku, neboť zohledňuje komplexní strukturu povrchů, od zastavěných oblastí po přirozené zelené plochy, a umožňuje tak přesnější a realističtější simulaci hydrologických procesů v rámci celého modelovaného území. Díky tomuto integrovanému přístupu, kde je každé povodí pečlivě charakterizováno a napojeno buď na existující stokovou síť nebo na přirozené místní vodoteče (v simulačním modelu jsou reprezentovány pomocnou stokovou sítí), poskytuje alternativní model přesnější odrazy skutečného odtoku a jeho distribuce v krajině. Výsledná podoba povodí alternativního modelu je znázorněna na obrázku 15.



Obrázek 15: Povodí alternativního modelu

Nepropustnost ploch není v rámci alternativního modelu implicitně stanovena resp. procento nepropustnosti je pro všechna povodí nastavena na hodnotu 100%. Jinými slovy model uvažuje všechny plochy jako nepropustné. Míra propustnosti v případě alternativního modelu je zahrnuta v parametru počáteční ztráty, který je uvažován pro jednotlivé typy povrchu vycházející z kategorizace. Rovněž parametr počáteční ztráty není definován, nýbrž je iteračním způsobem stanoven v rámci kalibrace alternativního modelu. Takto nastavený simulační model umožňuje detailní analýzu a simulaci odtoků nejen při běžných, ale zejména při extrémních srážkových událostech.

Kalibrace alternativního simulačního modelu

Cílem kalibrace alternativního modelu bylo pomocí úprav parametrů počátečních ztrát dosáhnout simulovaného průběhu, který bude co nejvíce odpovídat měřeným datům, případně simulovaným průběhům kalibrovaného klasického modelu. Pro tento účel byly prováděny iterativní úpravy hodnot počátečních ztrát, přičemž cílem bylo identifikovat optimální rozsah těchto hodnot a následně vybrat sadu parametrů, která by nejlepšími způsobem simulovala skutečný průběh odtoku.

V rámci kalibrace byl předpokládán princip superpozice, podle kterého se rychlost povrchového odtoku liší v závislosti na typu povrchu – rychlý odtok je generován střechami, středně rychlý odtok pochází ze zpevněných ploch a zpožděný odtok je charakteristický pro zelené plochy. Integrací hydrogramů jednotlivých typů povrchů je následně generován celkový povrchový odtok. Ambicí kalibrace

alternativního modelu bylo identifikovat hodnoty počátečních ztrát pro různé typy povrchů tak, aby kombinace těchto hodnot adekvátně reprezentovala skutečný odtokový režim.

Alternativní model byl, stejně jako klasický model, kalibrován na tři dešťové události ke dvěma měrným profilům: MP01 Běchovice - přítok a MP02 Běchovice - odtok. Přehled a charakteristiky kalibračních dešťů byly prezentovány v tabulce 4. Kalibrace alternativního modelu byla zpočátku provedena na dešťové události 30.03.2023 s celkovým úhrnem 14.76 mm a maximální intenzitou $4.583 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento kalibrační dešť byl vybrán, jelikož má největší úhrn ze všech kalibračních dešťů a zároveň má komplexní strukturu skládající se z dvou dešťových vln, což poskytlo základ pro komplexní kalibraci modelu pro všechny zahrnuté události. Po zkušenostech získaných z kalibrace na této srážkové události byla provedena celková kalibrace pro všechny dešťové události.

Výchozí hodnoty parametru počáteční ztráty pro různé typy povrchů v rámci alternativního modelu představuje tabulka 6. Tyto hodnoty byly stanoveny s odvoláním na studii (Metelka et al., 2023) realizovanou společností Aqua Procon s.r.o., za jejíž podpory vznikla tato práce. Před samotným procesem kalibrace byl prověřen vliv doby dotoku na strukturu hydrogramu. Tato analýza sloužila jako doplňující krok k hlavnímu procesu kalibrace, umožňující získat předběžný přehled o dynamice tohoto faktoru. Rovněž byla zkoumána počáteční ztráta střech, které hrají klíčovou roli v rané fázi dešťové události, vzhledem k existenci různých předpokladů ohledně jejího výchozího nastavení.

Tabulka 6: Počáteční ztráty nekalibrovaného alternativního modelu

	Počáteční ztráta [m]
Asfalt	0.0025
Beton	0.0025
Dlažba	0.0065
Štěrka	0.0090
Střechy	0.0006
Nezatravněný přirozený povrch	0.0150
Travnaté plochy	0.0250
Smíšený porost	0.0300

Vyhodnocení kalibrace pomocí objektivních funkcí

Pro vyhodnocení kalibrace obou simulačních modelů byly využity objektivní funkce, které umožňují kvantitativní porovnání mezi simulovanými a měřenými daty.

Objektivní funkce slouží jako nástroj pro určení míry shody, poskytují základ pro systematické a objektivní posouzení modelovaných výstupů. Metodika vyhodnocení zahrnuje výpočet statistických ukazatelů, které poskytují ucelený pohled na přesnost, efektivitu a reliabilitu modelování. Pro porovnání kalibrovaných průběhů klasického a alternativního modelu byly použity následující objektivní funkce:

- Kling-Gupta (KGE)
- Nash-Sutcliffe (NSE)
- Střední absolutní chyba (mae)
- Střední chyba (me)
- Odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE)

Charakteristice objektivních funkcí se věnuje kapitola 3.2.3 v části literární rešerše. Nejprve byly spočítány jednotlivé objektivní funkce, přičemž byly porovnávány jednotlivé modely s měřenými daty. Následně bylo provedeno porovnání těchto výsledků mezi oběma modely.

5.4.4 Analýza zatížení modelů extrémními srážkami

Cílem této práce bylo identifikovat a porovnat, jak oba modely reagují na silné a extrémní srážkové události. Proto byla provedena analýza chování simulačních modelů tj. Klasický (Time-Area) model (KLAS) a Alternativní model (ALT) pod zátěží intenzivními srážkami, k čemuž byly použity návrhové blokové deště s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let.

Pro analýzu byly vytvořeny čtyři blokové deště - N10, N20, N50 a N100 let. Tyto deště byly navrženy na základě tabulek intenzit náhradních zatěžovacích dešťů, které lze dohledat v městských standardech (PVS a.s., 2023). Využity byly srážky s dobou trvání 30 minut, prodloužených na čtyřhodinovou dobu trvání, aby následné průběhy průtoků reflektovali dobu zdržení nejintenzivnějšího z návrhových dešťů. Charakteristiky zátěžových dešťů jsou zaznamenány v tabulce [7].

Tabulka 7: Charakteristiky zátěžových dešťů

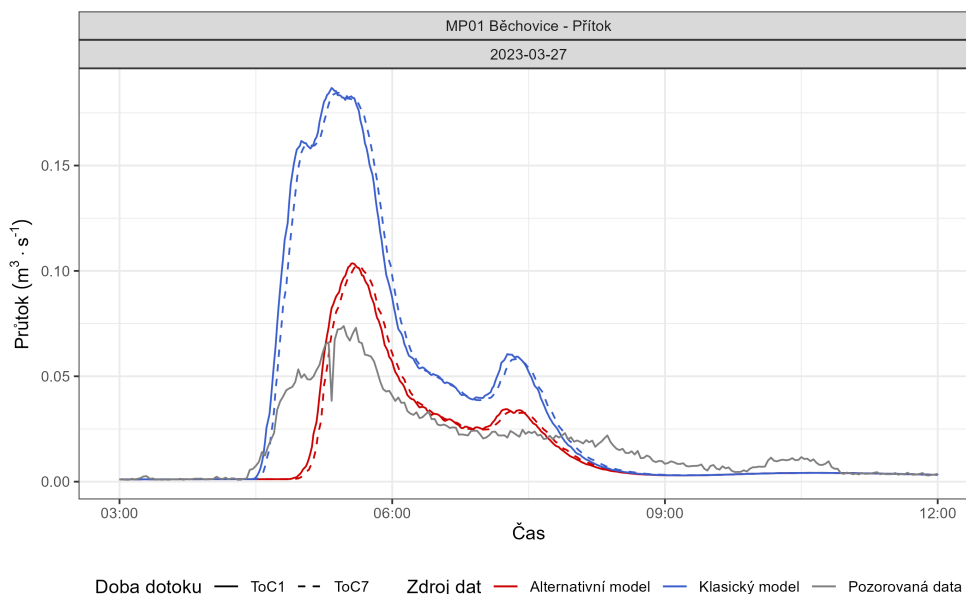
	Periodicita	Doba trvání	Úhrn	Intenzita
	[-]	[min]	[mm]	$[\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
N10	0.10	30	27.54	15.3
N20	0.05	30	32.04	17.8
N50	0.02	30	40.50	22.5
N100	0.01	30	46.08	25.6

Na každý z modelů byly aplikovány vybrané blokové deště prostřednictvím série simulací, které probíhaly na dvou měrných profilech, což vedlo k provedení osmi simulací pro každý model. Z těchto simulací byly získány průběhy průtoků v čase, umožňující podrobné porovnání reakcí klasického a alternativního modelu na extrémní srážky.

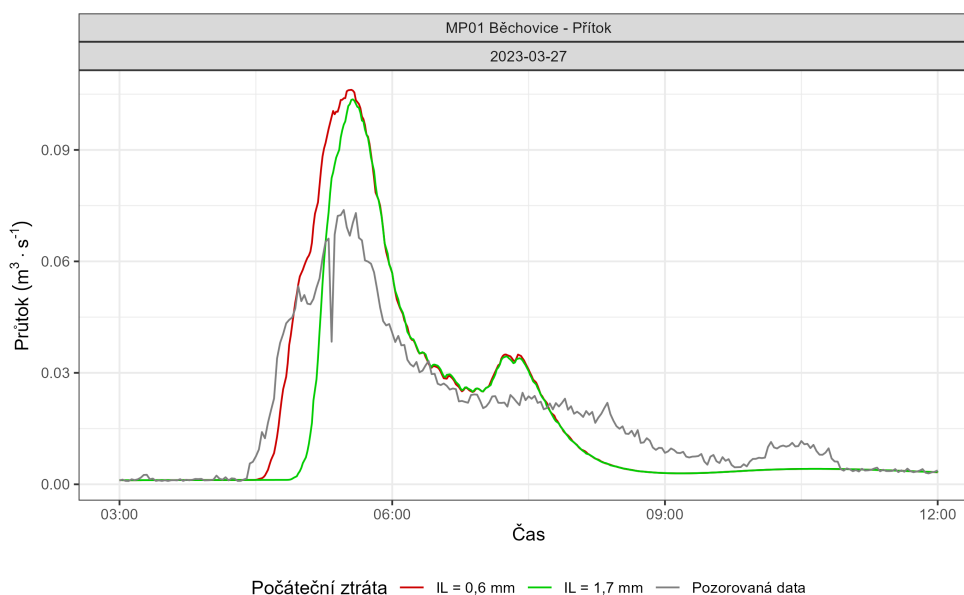
6 Výsledky

6.1 Vliv parametru doby dotoku a počáteční ztráty střech na hydrogram odtoku

Klasický model, založený na metodě Time Area, byl kalibrován pomocí trojice parametrů: doby dotoku (ToC), redukčního faktoru (RF) a počáteční ztráty (IL). Diskuze ohledně limit spojených s redukčním faktorem, zejména v kontextu modelování srážek s vysokou intenzitou, byla podrobněji rozvedena v dřívější kapitole 5.4.3. Z těchto parametrů byl do konceptu alternativního modelu převeden pouze parametr počáteční ztráty. Zbývajícím nepopsaným parametrem je doba dotoku, jež charakterizuje odezvu povodí. V rámci prvotního zkoumání efektivity simulačních modelů bylo provedeno sledování, jak se parametr ToC projevuje v nekalibrovaných verzích obou modelů (obr. 16). Paralelně byla provedena jakási předběžná kalibrace alternativního modelu, zaměřující se na realističnost hodnot počáteční ztráty střech, kde byly porovnávány hodnoty 0,6 mm a 1,7 mm. Výsledek je zobrazen na grafu 17. Pro detailnější zobrazení jsou následující grafické výstupy v příloze.



Obrázek 16: Vliv parametru doby dotoku (ToC) na hydrogram odtoku



Obrázek 17: Vliv parametru počáteční ztráty střech na hydrogram odtoku

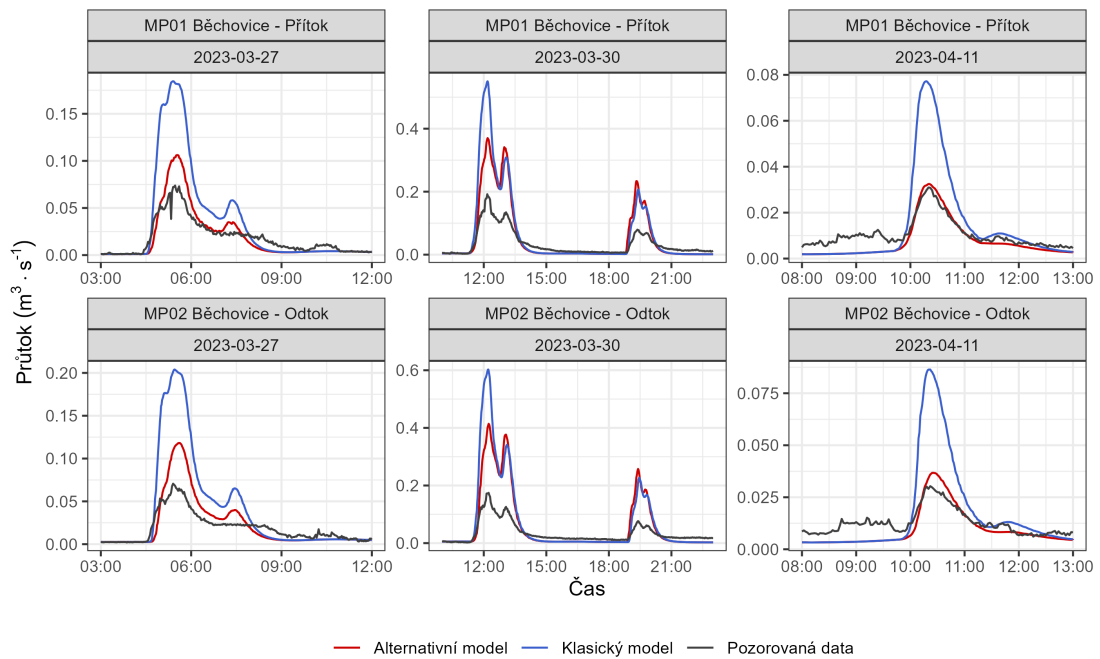
Zjištění ukázalo, že variace v hodnotách doby dotoku (1 minuta oproti 7 minutám) měly minimální dopad na simulovaný průběh odtoku, což může být ovlivněno také velikostí a topografií území, přičemž v urbanizovaných oblastech bývá terén více nivelizovaný. Naopak rozdíl mezi počátečními ztrátami 0,6 mm a 1,7 mm v alternativním modelu se ukázal být signifikantní, přičemž nižší hodnota počáteční ztráty 0,6 mm poskytovala lepší aproximaci začátku dešťové události.

6.2 Porovnání nekalibrovaných modelů z hlediska průtoků na stokové síti

Před zahájením kalibrace alternativního modelu bylo posouzeno srovnání průtoků v stokové síti mezi oběma modely, ještě před jejich kalibrací. Detailní specifikace parametrů obou modelů je prezentována v tabulce[8]. Pro klasický model je pro každé povodí specifikováno procento nepropustnosti (psáno zde 5.4.2), zatímco výchozí počáteční ztráty pro alternativní model byly uvedeny v samostatné tabulce [6].

Tabulka 8: Parametry nekalibrovaných modelů

	ToC [min]	IL [m]	RF [-]	IMP [%]
Klasický model	7	0.0006	1	dle povodí
Alternativní model	1	dle typu povrchu	1	100



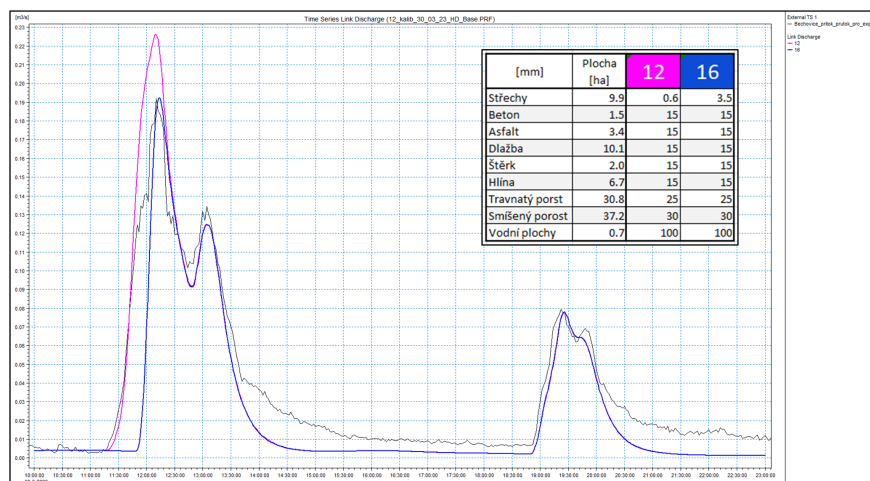
Obrázek 18: Porovnání průtoků nekalibrovaných modelů

Na obrázku jsou zaznamenány průtokové křivky na měrných profilech (MP01 Běchovice - přítok a MP02 Běchovice - odtok) pro oba nekalibrované modely, přičemž klasický model je vyobrazen modrou a alternativní model červenou barvou. Tyto průtokové profily byly analyzovány pro tři dešťové události, které byly selektovány pro účely kalibrace, jak je uvedeno v tabulce [4]. Z porovnání vyplývá, že oba modely poskytují srovnatelné odhady na nástupu a sestupu dešťové vlny a celkového průběhu dešťových událostí. Rozdíly se objevují při odhadu maximálních průtoků, kde alternativní model přináší přesnější odhady.

6.3 Kalibrace alternativního modelu

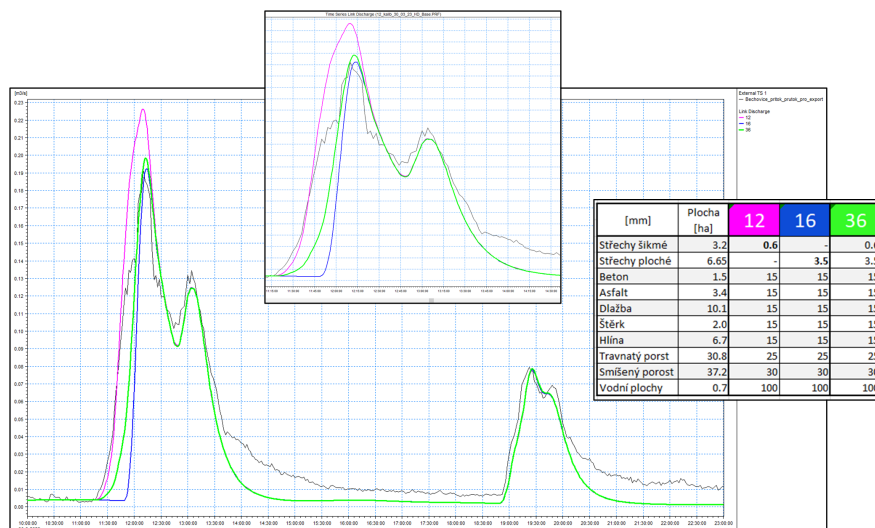
Přístup ke kalibraci alternativního modelu byl popsán v kapitole 5.4.3. Při kalibraci se pro každou iteraci parametrů zkoumalo, jak se daří simulačnímu modelu zachytit nástup dešťové vlny (stoupající větev) a konec dešťové vlny (sestupná větev), její tvar a maximální průtok (bod kulminace) v měrném profilu.

Při kalibraci alternativního modelu se vycházelo z předpokladu, že nejprve začnou povrchový odtok generovat střechy, tudíž první iterace kalibrace předpokládaly parametr střech jako jediný parametr zapojený do kalibrace modelu. Zpevněným plochám byla tedy nastavena počáteční ztráta 15 mm (největší kalibrační déšť měl úhrn 14,76 mm). Výsledkem této úvahy bylo nalezení dvou možných hraničních parametrů počáteční ztráty pro střechy, a to 0,6 mm a 3,5 mm. Tento optimální interval je znázorněn na grafu (obr. 19).



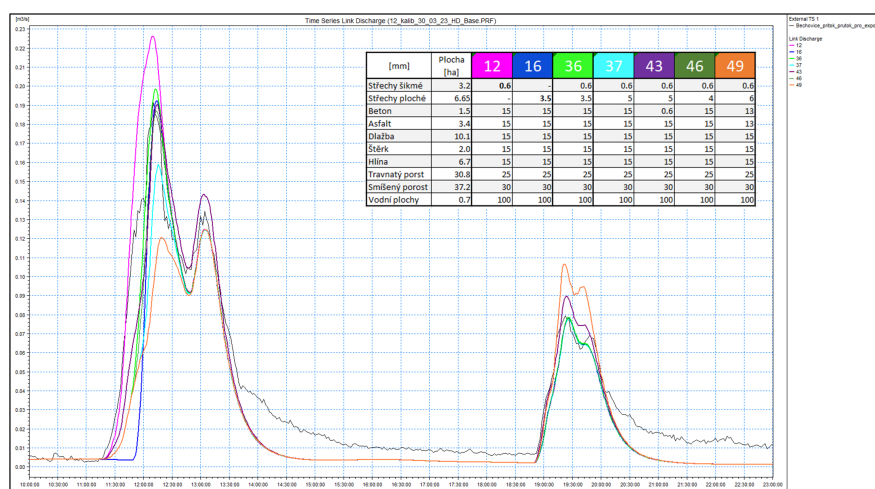
Obrázek 19: První milník kalibrace alternativního modelu

Růžová křivka (ID 12) představuje parametr počáteční ztráty střech 0,6 mm, modrá křivka (ID 16) zase 3,5 mm. Z grafu je patrné, že sada parametrů 12 lépe podchycuje začátek dešťové události, zatímco sada parametrů 16 lépe zachycuje maximální průtok. Ve zbylých částech jsou obě křivky totožné. Z toho vyplývá, že optimální sada parametrů se nachází „někde uprostřed“. Tento výsledek není překvapivý. Jak již bylo zmíněno, zájmové území má průmyslový charakter, což dokládá nezanedbatelný poměr plochých střech, oproti střechám šikmým (sedlovým, klasickým). Ploché střechy budou schopné zachytit větší úhrn srážky, respektive voda z nich nestéče tak rychle jako ze sedlových. Proto byla provedena dodatečná analýza zájmového území z hlediska zastoupení plochých a šikmých střech (popsáno zde 5.4.1). Parametr set střech byl rozdělen na dva samostatné sety – Střechy šikmé a Střechy ploché. Oběma setům byl nastaven parametr počáteční ztráty dle předchozí analýzy, tj pro střechy šikmé 0,6 mm, pro střechy ploché 3,5 mm. Výsledek této úvahy pro kalibrační dešť 30.03.2023 je znázorněn na grafu (20). V malém okně je pak přiblížen detail první dešťové vlny. Od konce prvního deště jsou průběhy všech iterací stejné.



Obrázek 20: Druhý milník kalibrace alternativního modelu

Parametr set 36 vystihuje maximální průtok srovnatelně jako set 16, jeho nástup je ovšem pozvolnější v porovnání se setem 12, nicméně iterace 36 byla v tento okamžik nejlepším odhadem. V tuto chvíli se tedy na povrchovém odtoku podílejí pouze střechy, rozdělené dle tvaru a s různými počátečními ztrátami. Proto bylo dále snahou zapojit do povrchového odtoku i zpevněné plochy za cenu zvyšování počáteční ztráty plochých střech s cílem pojmout objem vody, která byla zanedbána pozvolnějším nástupem iterace 36 (rozdíl mezi křivkami 12 a 36 na začátku dešťové události). Tento záměr je ilustrován na obrázku (21). Z celkového počtu 49 iterací bylo vybráno 7 reprezentativních iterací včetně již zmíněných. Iterace 37 a 46 ověřují maximální počáteční ztrátu plochých střech za předpokladu, že odtéká právě jen ze střech. Iterace 43 předpokládá další složku rychlého odtoku, například vpusti na silnici. Iterace 49 uvažuje odtok ze zpevněných ploch za cenu snížení odtoku z plochých střech.



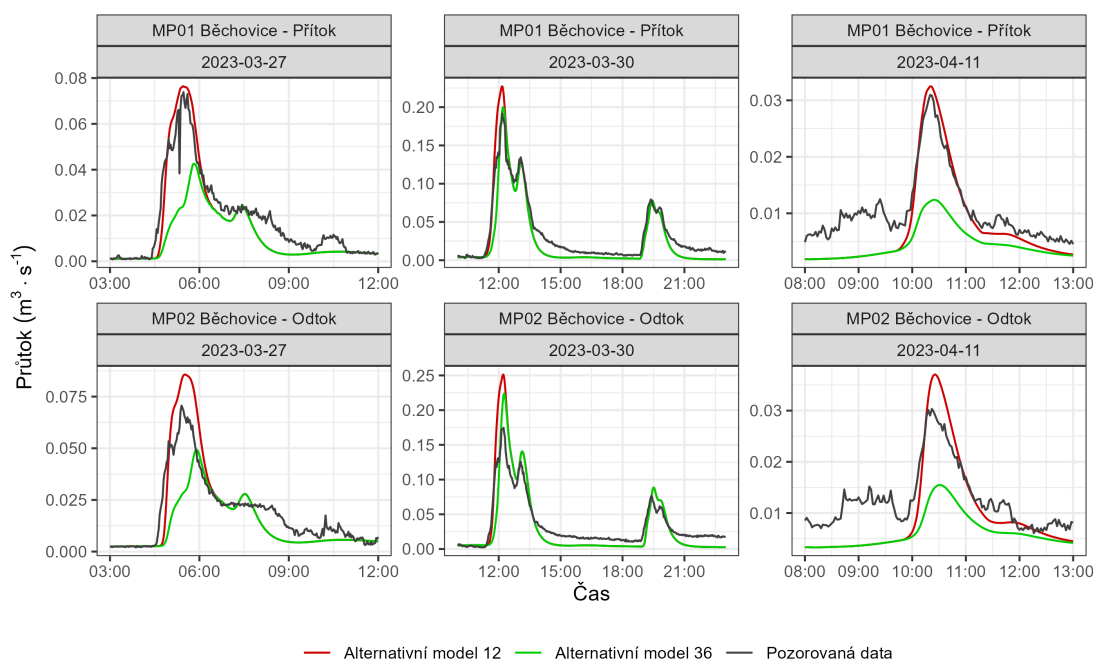
Obrázek 21: Proces kalibrace alternativního modelu

Na první pohled je na obr. (21) patrné, že iterace 43 a 49 nadhodnocují odtok z druhé dešťové vlny, zároveň oba scénáře uvažují odtok ze zpevněných ploch. Iterace 16, 36, 43 a 46 relativně dobře chytají první peak deště, tj. maximální průtok, přičemž jejich počáteční ztráta plochých střech je mezi 3,5 a 5 mm (nejvyšší peak má scénář 16, který má rovněž počáteční ztrátu na nejnižší hranici tohoto intervalu). Nejlepší odhad první vlny (nástup dešťové události, objem vody v počátku deště a maximální průtok) vykazuje scénář 43, nicméně hned druhý peak 1. deště mírně nadhodnocuje, stejně tak celý druhý dešť. Scénáře 37 a 49 mají průměrný náběh, nicméně celkový objem první vlny deště výrazně podhodnocují. Scénář 49 zároveň vykazuje nejvyšší odtok z druhé dešťové vlny.

Tabulka 9: Počáteční ztráty iterací kalibrace alternativního modelu

Iterace [m]	12	16	36	37	43	46	49
Asfalt	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0130
Beton	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0006	0.0150	0.0130
Dlažba	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150
Štěrka	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150
Střechy šikmé	0.0006	-	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
Střechy ploché	-	0.0035	0.0035	0.0050	0.0050	0.0040	0.0060
NPP*	0.0150	0.015	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150
Travnaté plochy	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250	0.0250
Smíšený porost	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300

*Nezatravněný přirozený povrch



Obrázek 22: Výsledný průběh kalibrace alternativního modelu

Na základě těchto informací bylo přistoupeno k celkové kalibraci. Jako nejlepší varianta kalibrace byla zvolena iterace 12, která nejlépe vystihuje začátek dešťové události, a iterace 36, která reprezentuje rozdělení střeš a zároveň uspokojivě vystihuje maximální průtok. Výsledek kalibrace je zobrazen na obrázku (22). Kalibrace byla provedena pro tři kalibrační dešťové události (ve sloupcích) ve dvou měrných bodech – Přítok a Odtok (v řádcích). Pro potřeby této diplomové práce byla kalibrace v tomto bodě ukončena a do další analýzy bude vstupovat iterace 12 alternativního modelu.

6.4 Porovnání kalibrovaných modelů z hlediska průtoků na stokové síti

Parametry, které byly upraveny během kalibrace klasického modelu, jsou uvedeny v tabulce [10]. Alternativní model, po kalibraci, si ponechává tento typ parametrů nezměněný, set parametrů počátečních ztrát pro kalibrovaný alternativní model je dokumentován v samostatné tabulce [11].

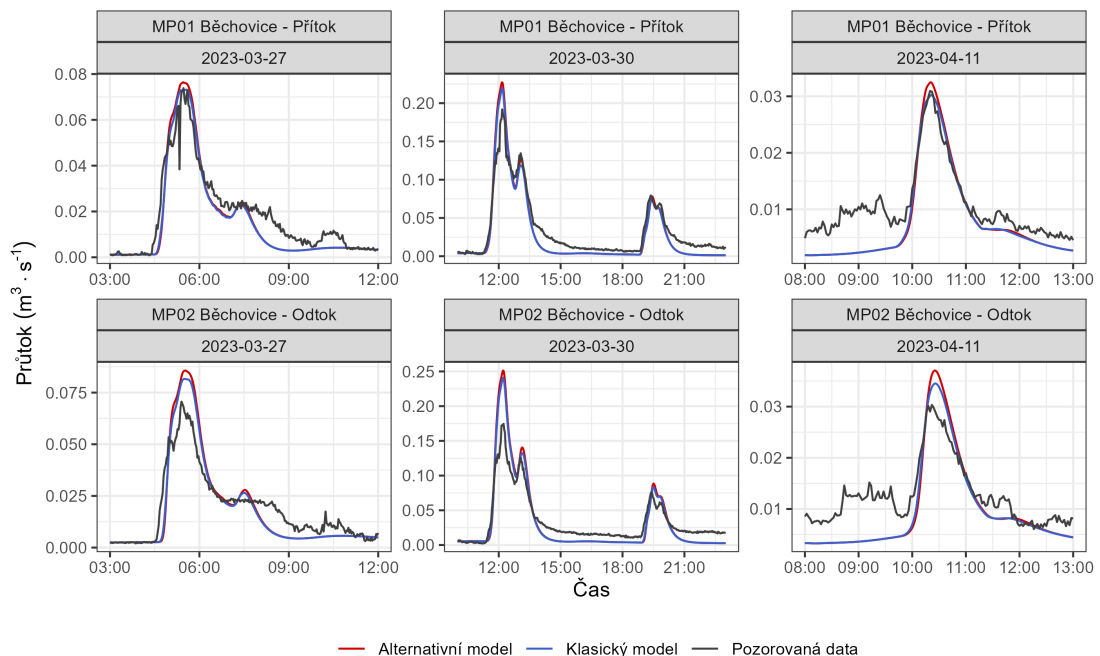
Tabulka 10: Parametry kalibrovaných modelů

	ToC [min]	IL [m]	RF [-]	IMP [%]
Klasický model	2	0.0006	0.4	dle povodí
Alternativní model	1	dle typu povrchu	1	100

Tabulka 11: Počáteční ztráty kalibrovaného alternativního modelu

	Počáteční ztráta [m]
Asfalt	0.0150
Beton	0.0150
Dlažba	0.0150
Štěrk	0.0150
Střechy	0.0006
Nezatravněný přirozený povrch	0.0150
Travnaté plochy	0.0250
Smíšený porost	0.0300

Grafické zobrazení na obrázku 23 demonstruje průtokové profily pro kalibrované verze obou modelů, přičemž klasický model je reprezentován modrou a alternativní model červenou barvou. Výrazně se projevuje rozdíl ve schopnosti zachycení maximálních, případně lokálně maximálních, průtoků. Alternativní model ukazuje ve všech analyzovaných dešťových událostech a na obou měrných profilech (MP01 Běchovice - přítok a MP02 Běchovice - odtok) zvýšené maximální průtokové hodnoty ve srovnání s měřeními daty a klasickým modelem.



Obrázek 23: Porovnání průtoků kalibrovaných modelů

Kontrastně, klasický model manifestuje variabilní odezvu v závislosti na intenzitě srážkové události. Při události z 27. března 2023, charakterizované středním

úhrnem srážek z vybraných kalibračních událostí, klasický model přesně zachycuje maximální průtok na měrném profilu MP01 Běchovice - přítok. V případě události s nižším úhrnem srážek (11. dubna 2023) je maximální průtok mírně podhodnocen, zatímco při intenzivnější události (30. března 2023) dochází k jeho nadhodnocení. Rozdíly mezi modely v období začátku a ukončení srážkové události jsou minimální a v některých fázích mimo intenzivní srážku jsou identické.

Pozoruhodnou anomálií v měřených datech je situace, kdy jsou maximální průtoky na měrném profilu MP02 Běchovice - odtok nižší než na profilu MP01 Běchovice - přítok, přestože se měrný profil na odtoku nachází níže ve směru toku. Tento jev bude s nejvyšší pravděpodobností zapříčiněn vyšším sklonem stokové sítě na profilu MP01 Běchovice - přítok.

Vyhodnocení kalibrace pomocí objektivních funkcí

Pro vyhodnocení výsledků kalibrací klasického a alternativního modelu byly spočítány objektivní funkce pro simulace všech dešťových událostí, na obou měrných profilech. Hodnoty těchto funkcí jsou souhrnně prezentovány v tabulkách [12] pro měrný profil MP01 Běchovice - přítok, [13] pro měrný profil MP02 Běchovice - odtok.

Tabulka 12: Hodnoty objektivních funkcí pro průběhy průtoků klasického (KLAS) a alternativního (ALT) modelu na měrném profilu MP01 Běchovice - přítok

Srážková událost	Model	KGE	NSE	mae	me	rmse
27.03.2023	ALT	0.7841	0.8623	0.0047	-0.0025	0.0067
27.03.2023	KLAS	0.7979	0.8767	0.0045	-0.0029	0.0063
30.03.2023	ALT	0.7296	0.8821	0.0106	-0.0059	0.0141
30.03.2023	KLAS	0.7443	0.8968	0.0104	-0.0069	0.0132
11.04.2023	ALT	0.5818	0.5632	0.0034	-0.0028	0.0041
11.04.2023	KLAS	0.6178	0.5808	0.0032	-0.0029	0.0041

Tabulka 13: Hodnoty objektivních funkcí pro průběhy průtoků klasického (KLAS) a alternativního (ALT) modelu na měrném profilu MP02 Běchovice - odtok

Srážková událost	Model	KGE	NSE	mae	me	rmse
27.03.2023	ALT	0.6284	0.7170	0.0060	-0.0005	0.0090
27.03.2023	KLAS	0.6879	0.7750	0.0055	-0.0011	0.0080
30.03.2023	ALT	0.4842	0.6591	0.0146	-0.0019	0.0211
30.03.2023	KLAS	0.5483	0.7291	0.0136	-0.0031	0.0188
11.04.2023	ALT	0.4564	0.2624	0.0043	-0.0029	0.0053
11.04.2023	KLAS	0.5168	0.3362	0.0041	-0.0031	0.0050

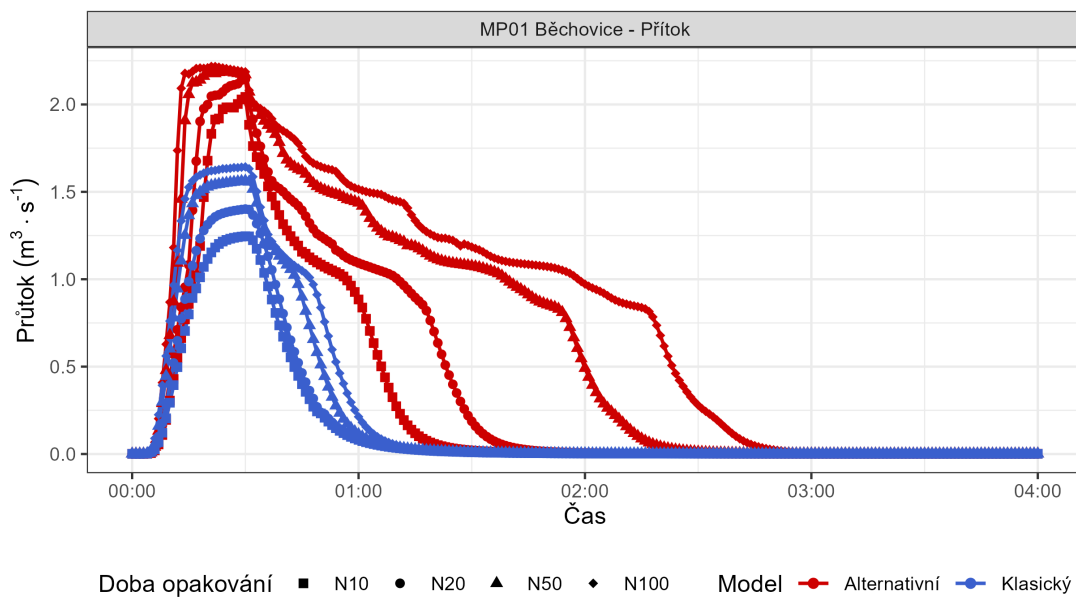
Vyhodnocení pomocí objektivních funkcí ukázalo, že oba modely poskytují srovnatelné výsledky. Příkladem vyhodnocení může být koeficient NSE (Nash-Sutcliffe) na měrném profilu MP01 Běchovice – přítok (tabulka 12). Hodnota tohoto koeficientu se pohybuje v intervalu $(-\infty, -1)$, přičemž modely s hodnotou:

- $NSE < 0$ nejsou věrohodné
- $0 < NSE < 1$ mají různou míru věrohodnosti (pro představu model s $NSE = 0,7$ se již uvažuje jako věrohodný model)
- $NSE = 1$ odpovídá 100 % shodě s měřeními daty

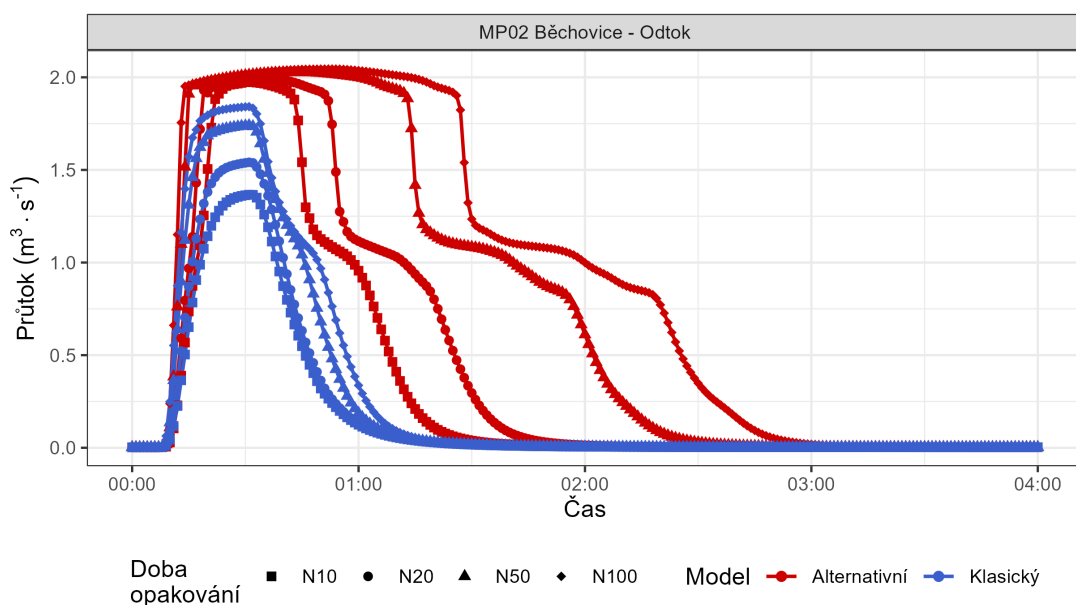
Simulace srážkoodtokového procesu pro srážkovou událost ze dne 30.03.2023 dosáhla hodnoty NSE klasickým modelem (KLAS) hodnoty 0,8968, alternativním modelem (ALT) pak 0,8821. Tyto simulace tedy by tedy byly vyhodnoceny jako věrohodné. Obdobně je tomu tak u simulace srážkoodtokového procesu pro srážkovou událost ze dne 27.03.2023, kdy klasický (KLAS) model má hodnotu NSE rovnou 0,8767 a alternativní model 0,8623. Poněkud nižších hodnot NSE dosahovaly simulace srážkoodtokového procesu pro srážkovou událost ze dne 11.04.2023.

6.5 Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami

Analýza chování klasické metody Time Area a alternativního přístupu, v podmínkách silných a extrémních srážek, byla hlavním cílem této práce. Klasifikace rozdílů byla provedena na klasickém a alternativním modelu, které byly zatíženy intenzivními srážkami v podobě návrhových dešťů různé intenzity (doby opakování) - N10, N20, N50 a N100 (tabulka 7). Tento postup poskytl pohled na chování modelů v podmínkách silných a extrémních srážkových událostí.



Obrázek 24: Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami na MP01 Běchovice - přítok



Obrázek 25: Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami na MP02 Běchovice - odtok

Porovnání obou modelů odhalila klíčové rozdíly v jejich reakcích. Vizuelní srovnání (obr24 a 25), ukazuje, že alternativní model (červeně znázorněný) konzistentně produkuje vyšší průtoky a celkové objemy vody než jeho klasický ekvivalent (modře znázorněný), což potvrzuje předpoklad o limitacích klasického modelu při modelování extrémních srážek. Hodnoty maximálních průtoků a celkových objemů pro jednotlivé návrhové deště jsou pro oba modely zaznamenány v ta-

bulce [14] pro měrný profil MP01 Běchovice - přítok a v tabulce [15] pro měrný profil MP02 Běchovice - odtok.

Tabulka 14: Celkové objemy a maximální průtoky na MP01 Běchovice - přítok

	Objem [m ³]	Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]
N10 alternativní model	4487	2.04
N20 alternativní model	6104	2.14
N50 alternativní model	9468	2.19
N100 alternativní model	11639	2.22
N10 klasický model	2238	1.25
N20 klasický model	2602	1.40
N50 klasický model	3307	1.56
N100 klasický model	3766	1.64

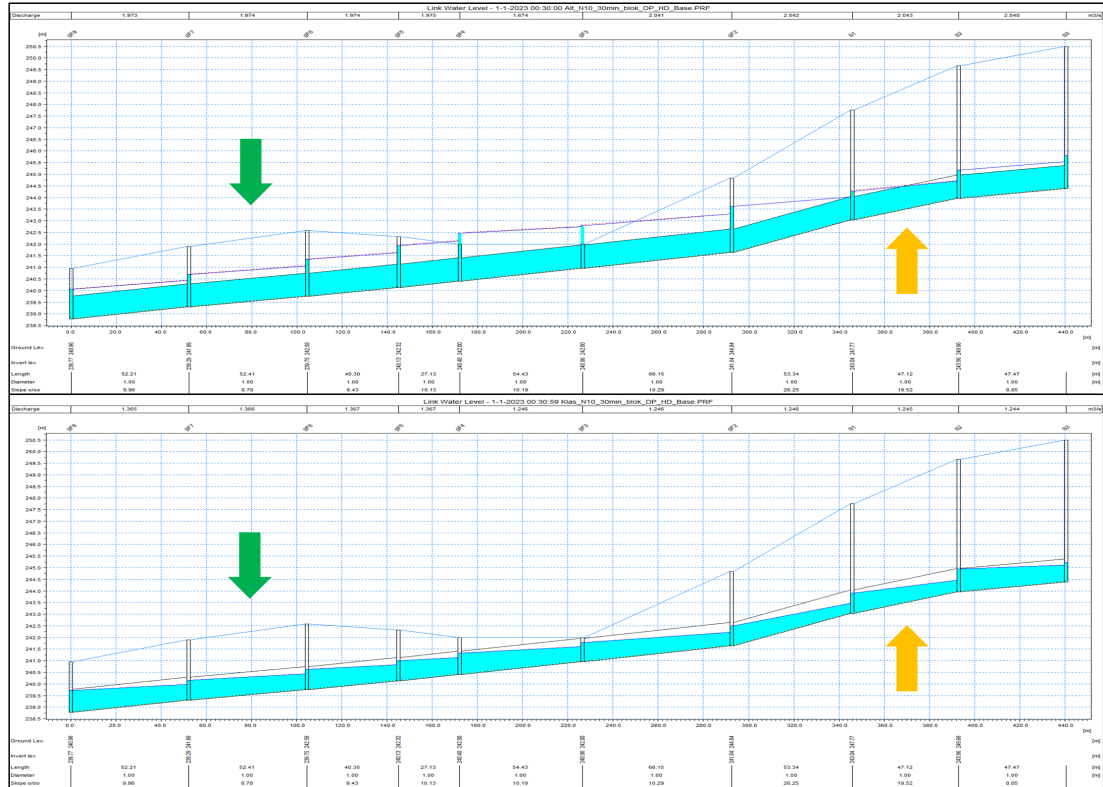
Tabulka 15: Celkové objemy a maximální průtoky na MP02 Běchovice - odtok

	Objem [m ³]	Maximální průtok [m ³ .s ⁻¹]
N10 alternativní model	4947	1.98
N20 alternativní model	6732	2.00
N50 alternativní model	10534	2.03
N100 alternativní model	12971	2.04
N10 klasický model	2472	1.37
N20 klasický model	2872	1.54
N50 klasický model	3642	1.74
N100 klasický model	4145	1.84

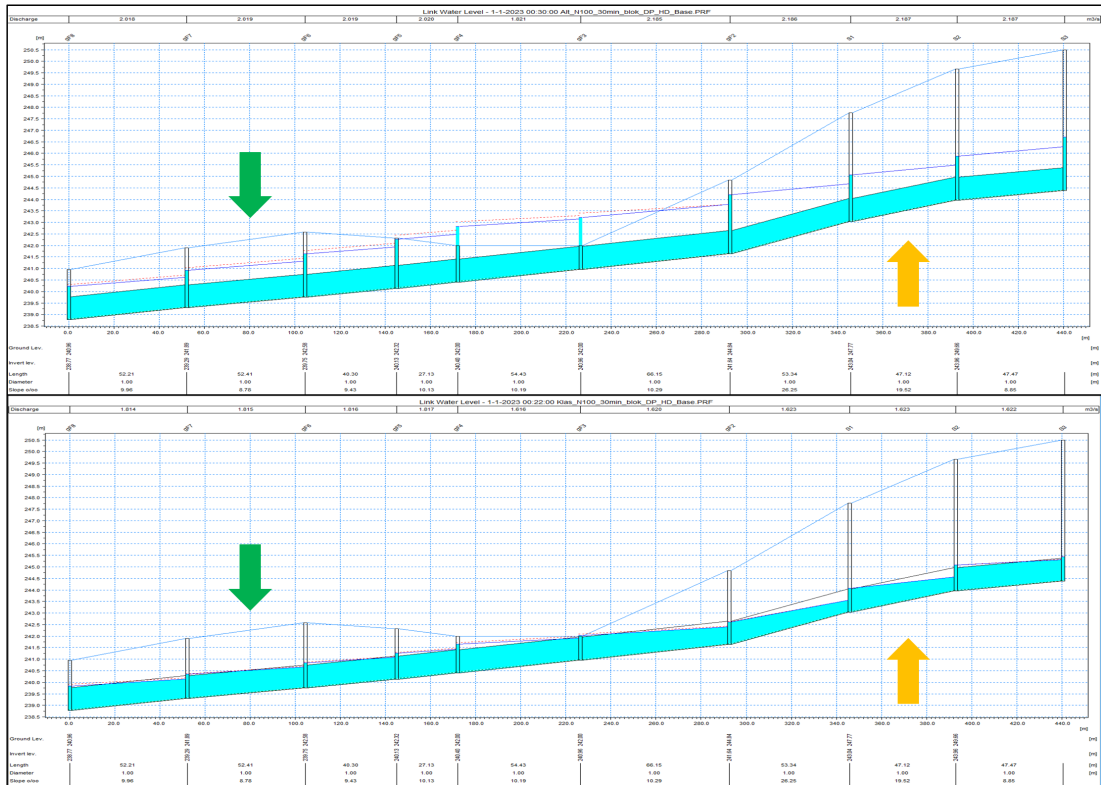
Rozdíly mezi modely jsou zvláště patrné v reakci na dotok dešťové vlny, kde alternativní model projevuje výrazně delší dobu dotoku ve srovnání s klasickým modelem, což ovlivňuje i pomalejší sestup průtoku. Tento jev je ještě umocněn v důsledku stávající kapacity stokové sítě v zájmovém území, která je reflektována jak v původním tak i v alternativním modelu. Z grafů je evidentní, že za těchto podmínek již kapacita sítě nestačí a dochází k výtoku vod na terén.

Problematika kapacity stokové sítě v průběhu průtoků alternativního modelu je výraznější na měrném profilu MP02 Běchovice - odtok (obr. 25). Zde bylo dosaženo kapacitního průtoku 2,1 m³.s⁻¹, což vedlo k přechodu na plně tlakové proudění v dané části stokové sítě. Podobná situace se objevila také na měrném profilu na přítoku, avšak zde kapacitní průtok 3,1 m³.s⁻¹ nebyl překročen. Tento jev byl způsoben zpětným vzdutím na stokové síti v důsledku nedostatečné kapacity pod tímto měrným profilem ve směru toku. Hodnoty kapacitních průtoků byly stanoveny na základě hydraulických tabulek.

Podélné profily stokové sítě, zobrazené na následujících obrázcích, ilustrují reakci části stokové sítě, obsahující oba měrné profily, na blokové deště různé intenzity. Konkrétně byly vybrány blokové deště s dobou opakování 10 let a 100 let. Podélné profily ukazují průtoky a hladiny vody pro dané srážkové situace.



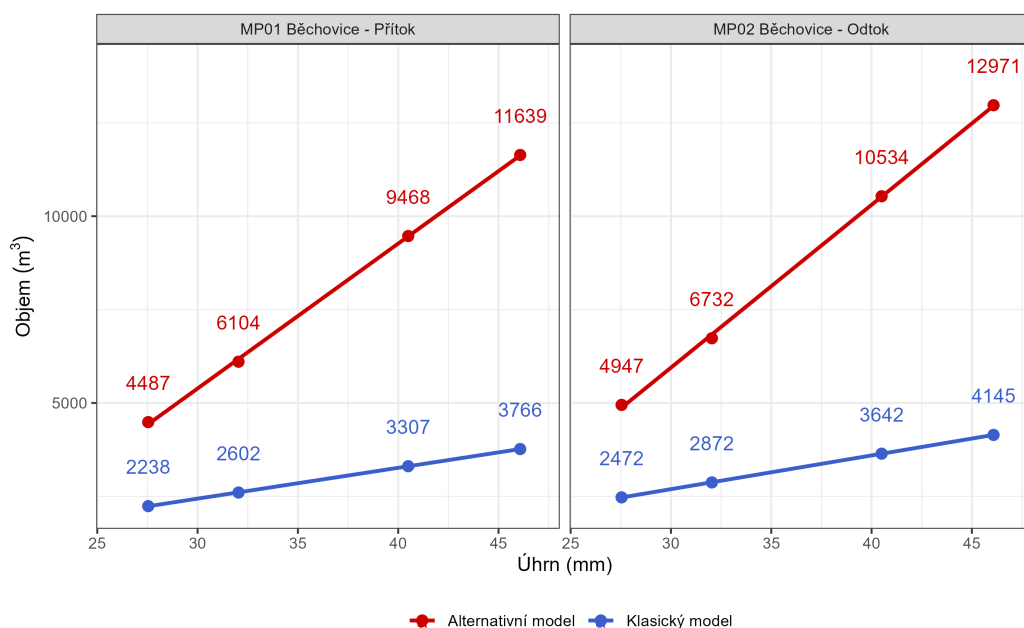
Obrázek 26: Podélné profily části stokové sítě alternativního modelu (nahore) a klasického modelu (dole) při zatížení blokovým deštěm N10. Měrné profily jsou označeny šipkami; MP01 Běchovice - přítok (žlutě), MP01 Běchovice - přítok (zeleně)



Obrázek 27: Podélné profily části stokové sítě alternativního modelu (nahore) a klasického modelu (dole) při zatížení blokovým deštěm N100. Měrné profily jsou označeny šipkami; MP01 Běchovice - přítok (žlutě), MP01 Běchovice - přítok (zeleně)

Na prvním obrázku (26) je zachycena situace při návrhovém dešti N10 s dobou opakování 10 let, délkou trvání 30 minut a intenzitou $15.3 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Již při tomto návrhovém dešti alternativní model vykazuje nedostatečnou kapacitu a v místě mezi měrnými profily dokonce vytéká voda na povrch. Na měrném profilu MP01 Běchovice - přítok je ještě proudění s volnou hladinou, na měrném profilu na odtoku už je ovšem tlakové proudění. Oproti tomu klasický model se při návrhovém dešti N10 jeví jako kapacitní pro oba měrné profily.

Druhý obrázek (27) ilustruje reakci systému při zatížení blokovým deštěm s dobou opakování 100 let, délkou trvání 30 minut a intenzitou $25.6 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, který představuje nejextrémnější ze všech uvažovaných scénářů. Klasický model je schopen zachovat kapacitu na měrném profilu MP01 Běchovice - přítok díky vysokému sklonu terénu, zatímco na měrném profilu na odtoku se pohybuje na hranici kapacitních možností. V případě alternativního modelu je kapacita stokové sítě na obou měrných profilech překročena již při dešťové události s dobou opakování 10 let, což ukazuje na realistickou odezvu modelu.



Obrázek 28: Závislosti celkového objemu na úhrnu srážky

Grafické znázornění závislosti celkového objemu na úhrnu srážky (obr. 28) ukazuje na značně strmější nárůst akumulovaného objemu vody v alternativním modelu ve srovnání s klasickým modelem při všech zvažovaných intenzitách srážek, což dokládá zvýšenou citlivost alternativního modelu na intenzivnější srážkové události, která se s rostoucím úhrnem zvyšuje. Konkrétně, při srážce typu N10 je objem vody generovaný alternativním modelem dvojnásobný ve srovnání s klasickým modelem, zatímco u srážky typu N100 tento rozdíl narůstá až na trojnásobek. To v zásadě potvrzuje zkušenosti se skutečným odtokem z urbanizovaných povodí, kdy u silných a přívalových srážek postupně přispívá k odtoku celé povodí.

7 Diskuze

V praktické části diplomové práce byla provedena řada na sebe navazujících analýz, jejichž cílem bylo porovnat standardní přístup simulačního modelování srážkoodtokového procesu v urbanizovaných oblastech s alternativním přístupem založeným na detailním popisu parametrů povodí. Standardní přístup je založen na metodě Time Area, zatímco alternativní přístup byl založen na předpokladu dynamického odtoku z nepropustných ploch (v čase se měnící velikosti plochy, která přispívá k odtoku). Tato úvaha byla zahrnuta do parametru počáteční ztráty.

Z prvotní analýzy parametrů modelu Time-Area vyplynulo, že parametr doby dotoku (ToC) nemá významný vliv na hydrogram odtoku, což lze odůvodnit malým rozsahem povodí a urbanizovaným charakterem zájmového území. Naopak významný vliv na hydrogram odtoku má v alternativním modelu parametr počáteční ztráty střech, což je v souladu s předpokladem superpozice, kdy srážkový odtok ze střech tvoří rychlou složku celkového odtoku.

Významným zjištěním byl výsledek porovnání modelů před samotnou kalibrací. Ukázalo se, že alternativním přístupem je možné získat lepší odhady hydrogramu odtoku pouze na základě výchozího nastavení modelu. To souvisí s podrobnější analýzou povrchových podmínek zájmového území před stavbou alternativního modelu. Tento fakt sám o sobě naznačuje, že alternativní model lépe reflektuje místní podmínky. Zároveň by tento přístup mohl být užitečný v situacích, kdy nejsou k dispozici vstupní data (například pro kalibraci modelu) v očekávané kvalitě nebo množství.

Z výsledků kalibrace vyplývá, že je možné dosáhnout úspěšné kalibrace pouze pomocí parametru počáteční ztráty, ovšem za předpokladu komplexní analýzy povrchů a vhodně nastavených sad parametrů pro jednotlivé typy povrchů. Z průběhu kalibrace je patrné, že kalibrovat na malé deště je obtížnější než na deště s vyšším úhrnem, což dokládají i hodnoty objektivní funkce NSE. Obecně úhrny srážkových událostí během monitorovací kampaně byly nízké, v důsledku čehož nebylo možné kalibrovat plochy s vyšší propustností. Zajímavým zjištěním byla skutečnost, že dodatečné rozdělení střech, na ploché a šikmé, nemělo pozitivní vliv na výsledky kalibrace. To může rovněž souviset s nedostatečně reprezentativními srážkovými daty. Nabízí se tedy možnost otestovat alternativní model na větším vzorku dat, kde by rozdělení střech dle jejich sklonitosti mohlo mít zásadnější vliv.

Kalibrace alternativního modelu přinesla srovnatelné výsledky s klasickým modelem, což bylo demonstrováno pomocí objektivních funkcí. Záměr, se kterým byl alternativní model stavěn, tedy dosáhnout přesnosti kalibrace alespoň srov-

natelné s klasickým přístupem, byl splněn.

Díky důkladné analýze povrchu zájmového území, alternativní model lépe reflektuje podmínky odtoku ze zkoumaného povodí. V kombinaci s uchopením počáteční ztráty jako výhradního parametru byla získána lepší představa o tom, co se v původním black box modelu (založeném na Time-Area metodě) odehrává. Určitá míra nejistoty přetrvává; nakolik odpovídají kalibrované hodnoty počáteční ztráty reálným hodnotám, lze je adekvátně měřit, je zachována stejná počáteční ztráta po celou dobu životnosti materiálu, hraje roli ve schopnosti zadržet srážkovou vodu údržba nepropustných materiálů. Bylo by užitečné znát odpovědi na tyto otázky, což by mohlo být předmětem dalšího výzkumu. Nicméně i přes nejistoty spjaté s počátečními ztrátami lze říct, že alternativním přístupem je možné se přiblížit k pochopení, kde a v jakém množství se srážkové vody v simulovaném prostředí vyskytují.

Rovněž je alternativním modelem docíleno rozdělení povodí na plochy s podobnými hydrologickými i hydraulickými vlastnostmi. Klasický přístup uvažuje ke každému měrnému bodu jedno povodí s jednou sadou parametrů. Oproti tomu alternativní model uvažuje povodí na základě typu povrchu a vlastní sada parametrů je přidělena každému takovému typu. Dalo by se říct, že alternativní model je možné uvažovat jako semi-distribuovaný model namísto celistvého (klasický model).

Přínosem alternativního přístupu je jeho relativně snadné využití v praktickém simulačním modelování. Oproti klasickému modelu je nepatrně náročnější na vstupní data v podobě mapových podkladů, nicméně v dnešní době je poměrně snadné taková data získat. Nejistoty alternativního modelu spočívají v kalibrování pomocí parametrů povrchů s vyšší počáteční ztrátou, jelikož v rámci této práce nebylo možné provést kalibraci na větší srážkové události. Nevýhodou alternativního modelu, tak jak byl představen, je vysoký počet povodí oproti klasickému modelu. Konkrétně alternativní model obsahuje 2967 povodí, zatímco klasický model uvažuje 143 povodí. To může být nevýhodou při výpočetních procesech. Na druhou stranu výpočty srážkového odtoku jsou oproti hydrodynamickému výpočtu řádově rychlejší a delší výpočetní čas tak nehraje významnou roli.

Stěžejní úlohou diplomové práce bylo porovnat chování obou modelů, tj. klasického i alternativního, při zatížení silnými a extrémními srážkovými událostmi. K tomuto účelu byly použity blokové deště s dobou opakování 10, 20, 50 a 100 let. Předpokládalo se, že klasický model bude v takových srážkových podmínkách podhodnocovat průtoky z důvodu, jakým způsobem model uvažuje nepropustnost a užití parametru redukčního faktoru. Procentuální vyjádření nepropustnosti, stanovené pro každé povodí, a následné užití redukčního faktoru (též procentuální) vede k redukci objemu srážkového odtoku. Tato skutečnost může být

zanedbána pro navrhování stokové sítě, k čemuž se používá srážka s dvouletou dobou opakování (N02). Pro modelování silných a extrémních srážek (N10 a výš) už ovšem může toto zanedbání mít nezanedbatelné důsledky. Totéž ukázala analýza chování obou modelů při těchto podmínkách. Z analýzy vyplývá, že alternativní model při desetiletém dešti (N10) generuje dvojnásobné množství vody oproti klasickému modelu, v případě stoletého deště (N100) dokonce trojnásobné množství vody. Na základě skutečnosti, že alternativní model neuvažuje nepropustnost jako neměnnou vlastnost povodí nýbrž jako kapacitu, kterou je dané povodí schopné zachytit a zároveň je míra nepropustnosti stanovena pro každé povodí na základě jeho skutečného povrchu, je pravděpodobné, že alternativní model vykazuje realitě bližší hydrogramy odtoku, než je tomu u klasického modelu. Tato myšlenka může být podpořena lepším odhadem průběhu nekalibrovaných modelů, a tím pádem lepším povědomím o podmínkách srážkového odtoku u alternativního modelu. Věrohodnost alternativního modelu mohou rovněž podpořit výšky hladiny v podélných profilech stokové sítě, dle kterých je v alternativním modelu nekapacitní při N10, zatímco klasický model se při N100 pohyboval na hraně své kapacity.

8 Závěr

Diplomová práce si kladla za cíl modifikovat stávající metodu Time-Area tak, aby byla schopná adekvátně simulovat odtok za přívalového deště, na kterém se postupně podílí celá plocha povodí. Za tímto účelem byl postaven alternativní model. Motivací práce byl předpoklad, že standardní přístup, reprezentovaný klasickým modelem, bude v podmínkách silných a extrémních dešťů podhodnocovat průtoky. Výsledky práce potvrzují uvedený předpoklad, přičemž z porovnání modelů vyplynulo, že alternativní model při desetiletém dešti generuje až dvojnásobné množství vody oproti klasickému model (v případě stoletého deště dokonce trojnásobné množství vody). To koresponduje se zkušeností, kdy u silných a přívalových srážek postupně přispívá k odtoku celé povodí. Cíle práce tedy byly splněny.

Pro účely porovnání standardního Time-Area modelu a alternativního přístupu byl vytvořen alternativní model. Kalibrací alternativního modelu, na stejných kalibračních datech jako u klasického modelu, bylo demonstrováno, že je možné jednoduchý Time-Area model kalibrovat bez použití parametru redukčního faktoru. Alternativní model se zdá být vhodnější alternativou pro simulaci srážkoodtokového procesu, s ohledem na realističtější simulace odezvy povodí na silné a extrémní deště, zejména v kontextu klimatické změny. Díky tomu by alternativní přístup mohl představovat užitečný nástroj pro posudkovou i návrhovou činnost v městské hydrologii (např. generely odvodnění) s ohledem na fakt, že simulační modely jsou v současnosti standardní technologií pro řešení takovýchto typů úloh.

Výsledky práce vedou k dalšímu prozkoumání nejistot alternativního modelu, které souvisí s uvažováním počátečních ztrát jako výhradní parametry modelu. Zároveň by bylo vhodné schopnosti alternativního modelu otestovat na robustnějším vzorku dat. Výzkum by se dále mohl věnovat kategorizaci ploch z hlediska jejich nepropustnosti.

Reference

- M B Abbot. Development of urban drainage simulation models: historical review. *Urban Water*, 3(2):105–110, 1991.
- Feras Alasali, R. Tawalbeh, Zahra Ghanem, Fatima Mohammad, and Mohammad Alghazzawi. A sustainable early warning system using rolling forecasts based on ann and golden ratio optimization methods to accurately predict real-time water levels and flash flood. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21:null, 2021. doi: 10.3390/s21134598. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/bb6775126d9df55c5221aa604989395b6129a70d>.
- Andreas N Angelakis, D Koutsoyiannis, and G Tchobanoglous. Urban wastewater and stormwater technologies in ancient greece. *Water research*, 39(1):210–220, 2005.
- C. Axelsson, S. Soriani, P. Culligan, and P. Marcotullio. Urban policy adaptation toward managing increasing pluvial flooding events under climate change. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64:1408 – 1427, 2020. doi: 10.1080/09640568.2020.1823346. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/ffdc49b03af067f27b878849944f21611c9d776>.
- KJ Beven. Rainfall-runoff modeling: The primer west sussex john & wiley, 2001.
- Steven Burian and Findlay Edwards. Historical perspectives of urban drainage. *Global Solutions for Urban Drainage*, 09 2002. doi: 10.1061/40644(2002)284.
- David Butler, Christopher James Digman, Christos Makropoulos, and John W Davies. *Urban drainage*. Crc Press, 2018.
- Giovanni De Feo, George Antoniou, Hilal Franz Fardin, Fatma El-Gohary, Xiaoyun Zheng, Ieva Reklaityte, David Butler, Stavros Yannopoulos, and Andreas N Angelakis. The historical development of sewers worldwide. *Sustainability*, 6(6):3936–3974, 2014.
- DHI. Mike urban. <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban>. [Online; 29.2.2024].
- DHI. Mike urban. collection system. modelling of storm water drainage networks and sewer collection systems. user guide. 2019a.
- DHI. Mouse. runoff. reference manual. 2019b.
- DHI. Mouse. runoff. reference manual. 2019c.

- Dingmann. Physical hydrology, 2nd edition. 2002.
- Michal Dolejš. *Stará čistírna odpadních vod Praha-Bubeneč 1906*. TOVÁRNA, o.p.s., Praha, 2016. ISBN 978-80-260-9446-3.
- Dooge. Linear theory of hydrologic systems. 1973.
- Manizheh Pourali Dougaheh, Parisa-Sadat Ashofteh, and Hugo A Loáiciga. Urban stormwater management using low-impact development control measures considering climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 154(3):1021–1033, 2023.
- Serhat Duman, Mustafa Akbel, and Hamdi Tolga Kahraman. Development of the multi-objective adaptive guided differential evolution and optimization of the mo-acopf for wind/pv/tidal energy sources. *Applied Soft Computing*, 112:107814, 2021. ISSN 1568-4946. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107814>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494621007353>.
- AH Elliott and Sam A Trowsdale. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental modelling & software*, 22(3):394–405, 2007.
- ESRI. Arcgis. <https://www.esri.com/en-us/home>. [Online; 29.2.2024].
- Maria E Galanaki. Waterborne diseases in the hippocratic treatise airs, waters, places. *Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries*, page 419, 2014.
- Luis García, Julian Barreiro-Gomez, Eduardo Escobar, Duván Téllez, Nicanor Quijano Silva, and Carlos A. Ocampo Martínez. Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review. *Advances in Water Resources*, 85:120–132, 2015. doi: 10.1016/j.advwatres.2015.08.007. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.007>.
- Bořivoj Groda, T Vítěz, M Machala, J Foller, D Surýnek, and J Musil. Čištění odpadních vod jako nástroj k ochraně životního prostředí v zemědělské praxi a na venkově. *Brno: Ministerstvo zemědělství České republiky*, 56, 2007.
- Hoshin V Gupta, Harald Kling, Koray K Yilmaz, and Guillermo F Martinez. Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2): 80–91, 2009.

- B. Hague, David Ackley Jones, Doerte Jakob, S. McGregor, and R. Reef. Australian coastal flooding trends and forcing factors. *Earth's Future*, 10:null, 2022. doi: 10.1029/2021EF002483. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/6de502bc00db475a8ad809af68499d62afb13729>.
- Radovan Haloun. *Modelování odtoku z intravilánu*. ČVUT, 1993.
- Alfred Trevor Hodge. *Roman aqueducts & water supply*. Duckworth, 1995.
- J. Jásek and J. Almerová. Historie kanalizace. <https://www.pvs.cz/historie/historie-kanalizace/>, 2022. [Online; 29.2.2024].
- Harald Kling, Martin Fuchs, and Maria Paulin. Runoff conditions in the upper danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of hydrology*, 424:264–277, 2012.
- V. Krejčí. *Odvodnění urbanizovaných území-koncepční přístup*. NOEL 2000, 2002.
- Soon Ho Kwon and Joong Hoon Kim. Machine learning and urban drainage systems: state-of-the-art review. *Water*, 13(24):3545, 2021.
- E. Lee and Joon-Hoon Kim. Design and operation of decentralized reservoirs in urban drainage systems. *Water*, 9:246, 2017. doi: 10.3390/W9040246. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/981065053a2329ece2cd53ea7f00b9c35083a448>.
- Juntao Li and Haifeng Jia. Integrated and control-oriented simulation tool for optimizing urban drainage system operation. *Water*, 14(1):25, 2022. doi: 10.3390/w14010025. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/1/25>.
- C. Makropoulos and D. A. Savić. Urban hydroinformatics: Past, present and future. *Water*, 11(10), 2019. ISSN 2073-4441. doi: 10.3390/w11101959. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/10/1959>.
- Jiri Marsalek. *Evolution of urban drainage: from cloaca maxima to environmental sustainability*. National Water Research Institute Burlington, ON, 2005.
- T. Metelka, T. Janů, I. Dubová, and M. Hričinová. Studie koncepce přestavby odvodnění areálu Výzkumných ústavů Běchovice. Neveřejná studie, vypracována společností Aqua Procon s.r.o., pro společnost Pražská vodohospodářská společnost a.s., 2023.
- Petr Máca. *Hydrologie*. ČZU v Praze, 2014.

- Petr Máca. Hydrologické modely a automatická optimalizace parametrů. *habilitace*, 2015.
- OpenAI. Chatgpt, 2024. URL <https://www.openai.com/>. Online; přístup dne [23.03.2024].
- Kenneth V. Price. *Differential Evolution*, pages 187–214. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-30504-7. doi: 10.1007/978-3-642-30504-7_8. URL https://doi.org/10.1007/978-3-642-30504-7_8.
- Fidyasari Kusuma Putri, Entin Hidayah, and Mokhammad Farid Ma’ruf. Enhancing stormwater management with low impact development (lid): A review of the rain barrel, bioretention, and permeable pavement applicability in indonesia. *Water Science & Technology*, 87(9):2345–2361, 2023.
- PVS a.s. Městské standardy vodovodů a kanalizací na území hl. města pra-hy: Kanalizační část, 2023. URL <https://www.pvs.cz/pro-zakazniky/mestske-standardy/>. Přístup: 29.2.2024.
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. URL <https://www.R-project.org/>.
- Lewis A Rossman et al. *Storm water management model user’s manual, version 5.0*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and . . . , 2010.
- C. Saraswat, Pankaj Kumar, and B. Mishra. Assessment of stormwater runoff management practices and governance under climate change and urbanization: An analysis of bangkok, hanoi and tokyo. *Environmental Science & Policy*, 64:101–117, 2016. doi: 10.1016/J.ENVSCI.2016.06.018. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/46a9b4a78c9435db8c5023709117cc67d32720a0>.
- Manfred Schütze, Bruce Beck, and David Butler. Modelling, simulation and control of urban wastewater systems. 2002. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106716794>.
- Rainer Storn and Kenneth Price. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11(4):341, 1997.

David Stránský, David Hora, Ivana Kabelková, Michaela Vacková, and Jiří Vítek. Standardy hospodaření se srážkovými vodami na území hlavního města Prahy. Technická zpráva, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, ne- uvedeno. Dostupné z: <https://www.pvs.cz/pro-zakazniky/mestske-standardy/>, Datum přístupu: 29.2.2024.

Marcela Synáčková. *Čistota vod*. ČVUT, 1994.

David B Thompson. The rational method. *David B. Thompson Civil Engineering Department Texas Tech University*. pp, pages 1–7, 2006.

M. M. Veiga, Renato Castiglia-Feitosa, and R. Marques. Analyzing barriers for stormwater management utilities. *Water supply*, page null, 2021. doi: 10.2166/WS.2021.024. URL <https://www.semanticscholar.org/paper/3ea7eec41530adcf85a3469e3e149f309d5c8aa0>.

CY Xu. Textbook of hydrological models, department of earth sciences hydrology, 2002.

J. Zaherpour, S. N. Gosling, N. J. Mount, R. Dankers, S. Eisner, D. Gerten, X. Liu, Y. Masaki, H. Müller Schmied, Q. Tang, et al. Exploring the value of machine learning for weighted multi-model combination of an ensemble of global hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 102:251–267, 2018.

ČSN 756101. ČSN 756101 - stokové sítě a kanalizační přípojky. Norma.

ČUZK. Digitální technická mapa Prahy. <https://app.iprpraha.cz/apl/app/dtmp/>, 2023a. [Online; 29.2.2024].

ČUZK. Katastrální mapa. <https://katastralnimapy.cuzk.cz/>, 2023b. [Online; 29.2.2024].

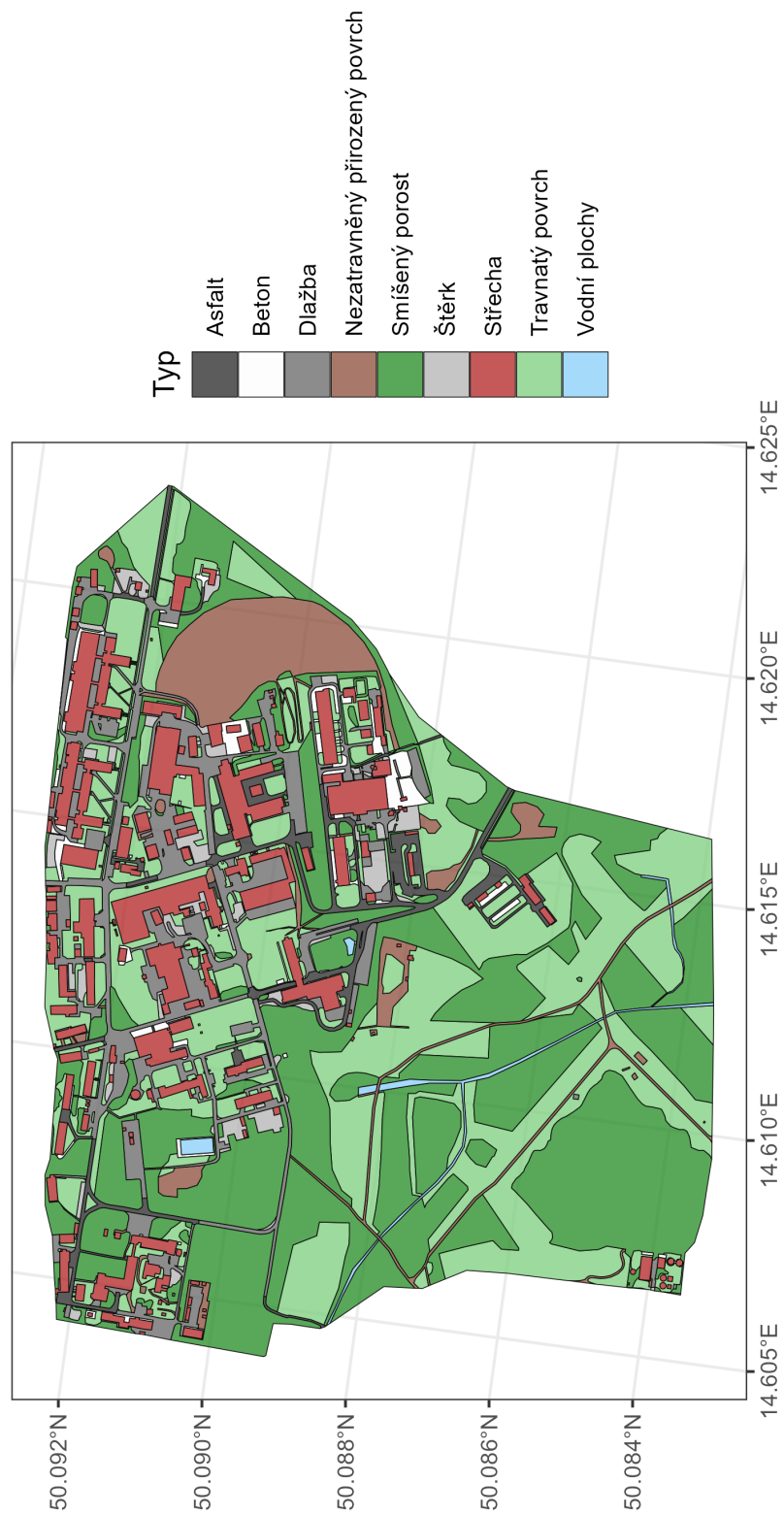
ČUZK. Zabaged. [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(3sprompjlaof3o2e51ur0ufw\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24](https://geoportal.cuzk.cz/(S(3sprompjlaof3o2e51ur0ufw))/Default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24), 2023c. [Online; 29.2.2024].

Přílohy

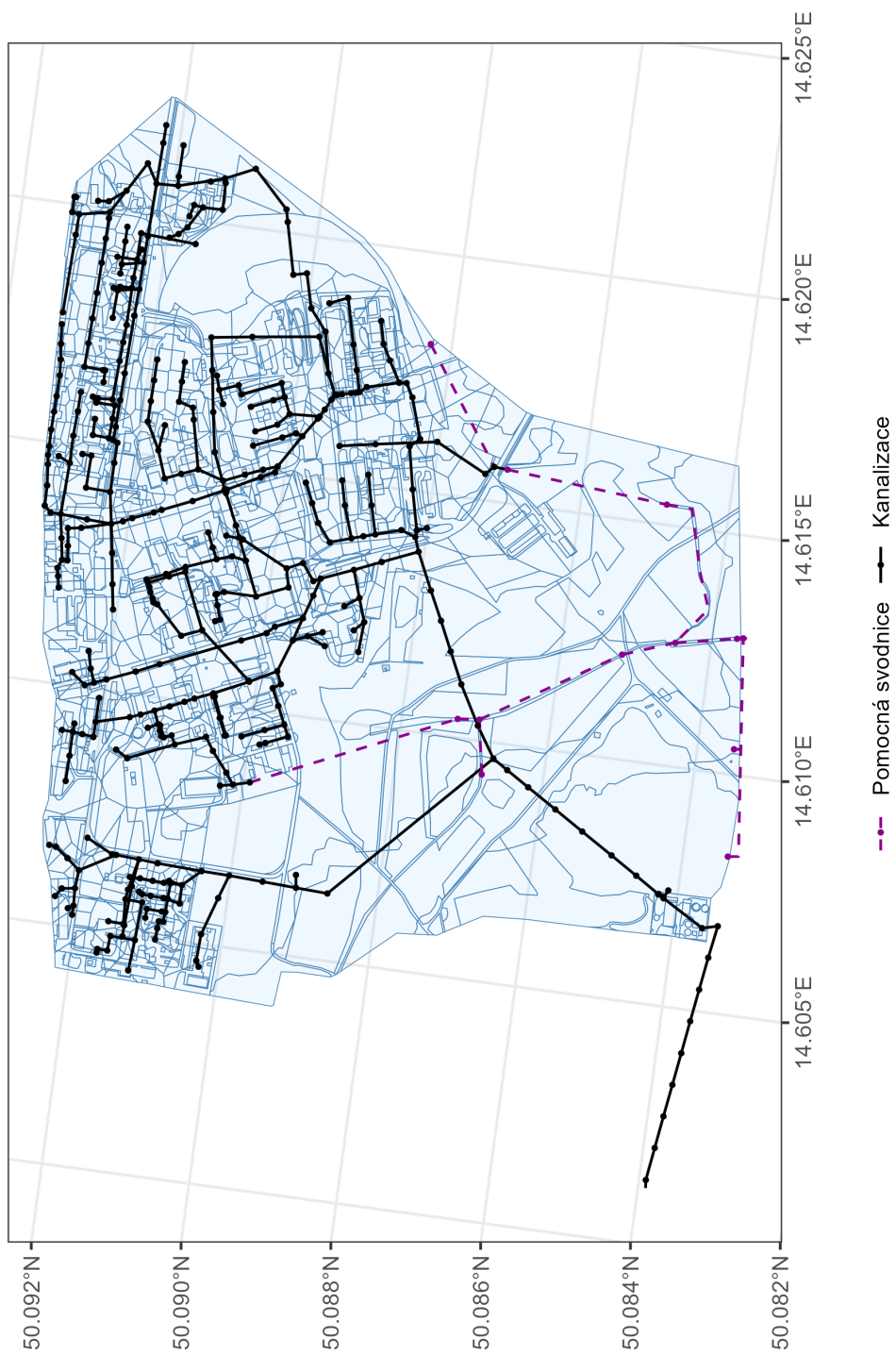
A Mapové výstupy



Obrázek 29: Základní kategorizace areálu VÚ Běchovice

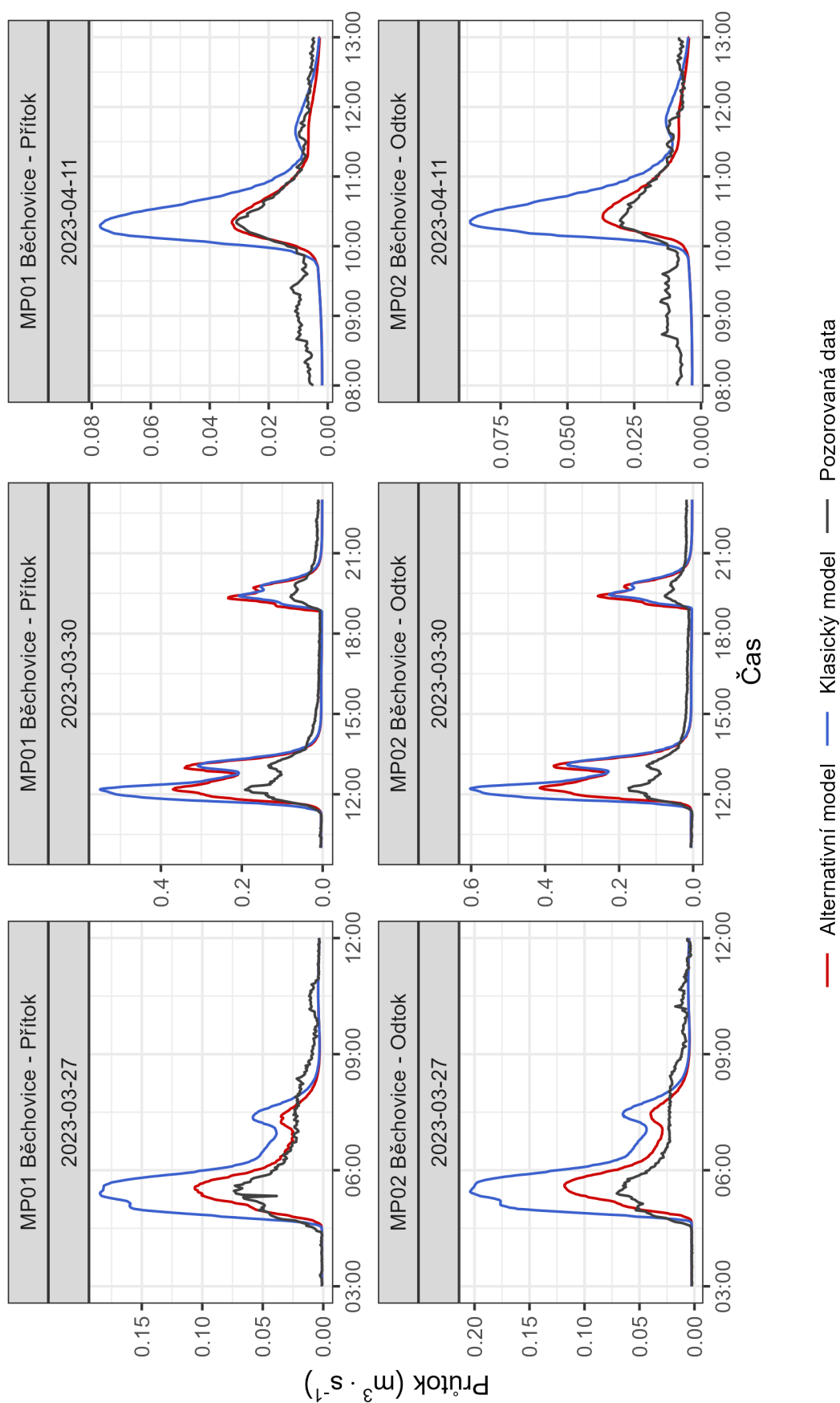


Obrázek 30: Podrobná kategorizace areálu VÚ Běchovice



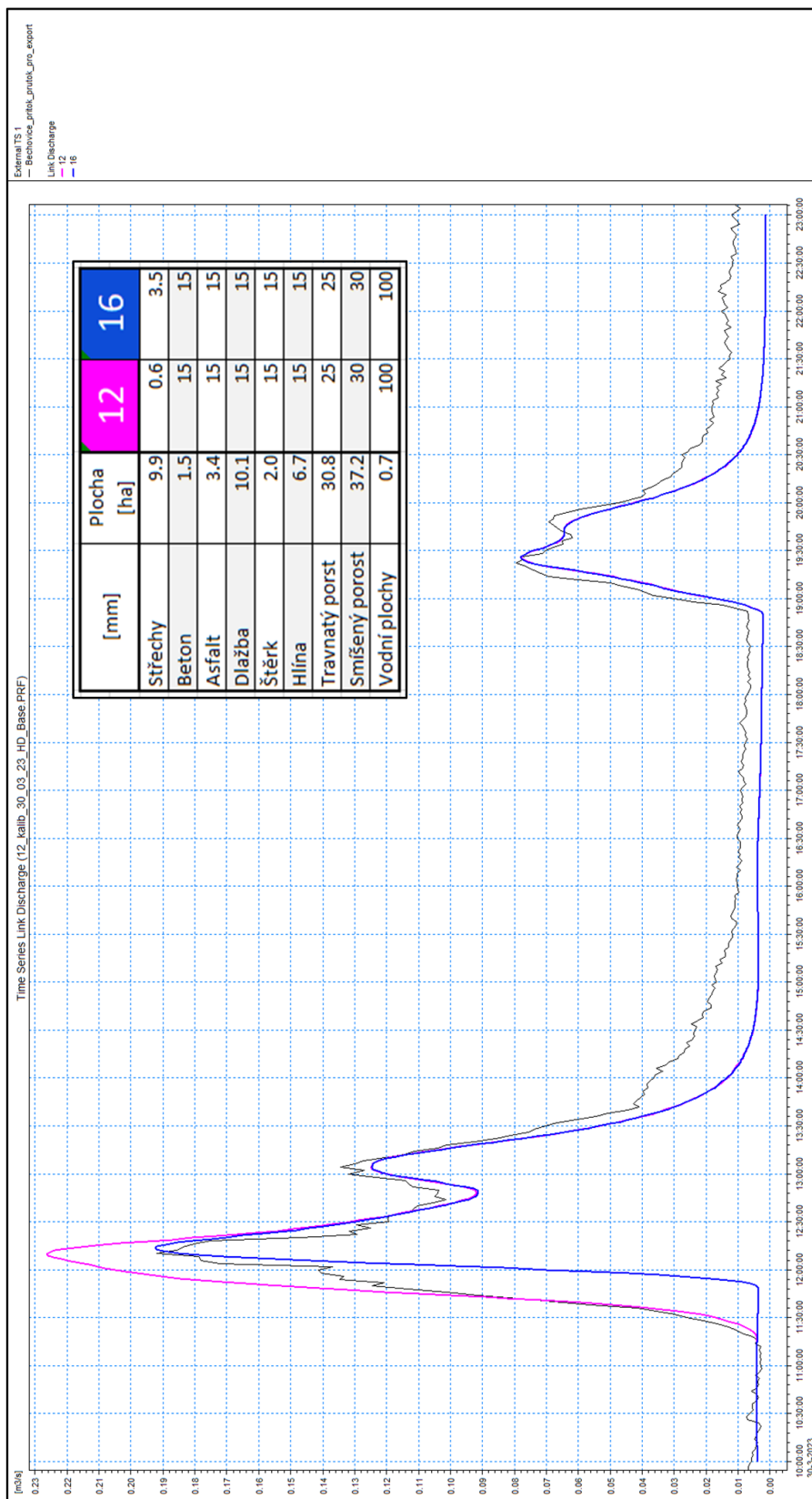
Obrázek 31: Povodí alternativního modelu

B Porovnání průtoků nekalibrovaných modelů

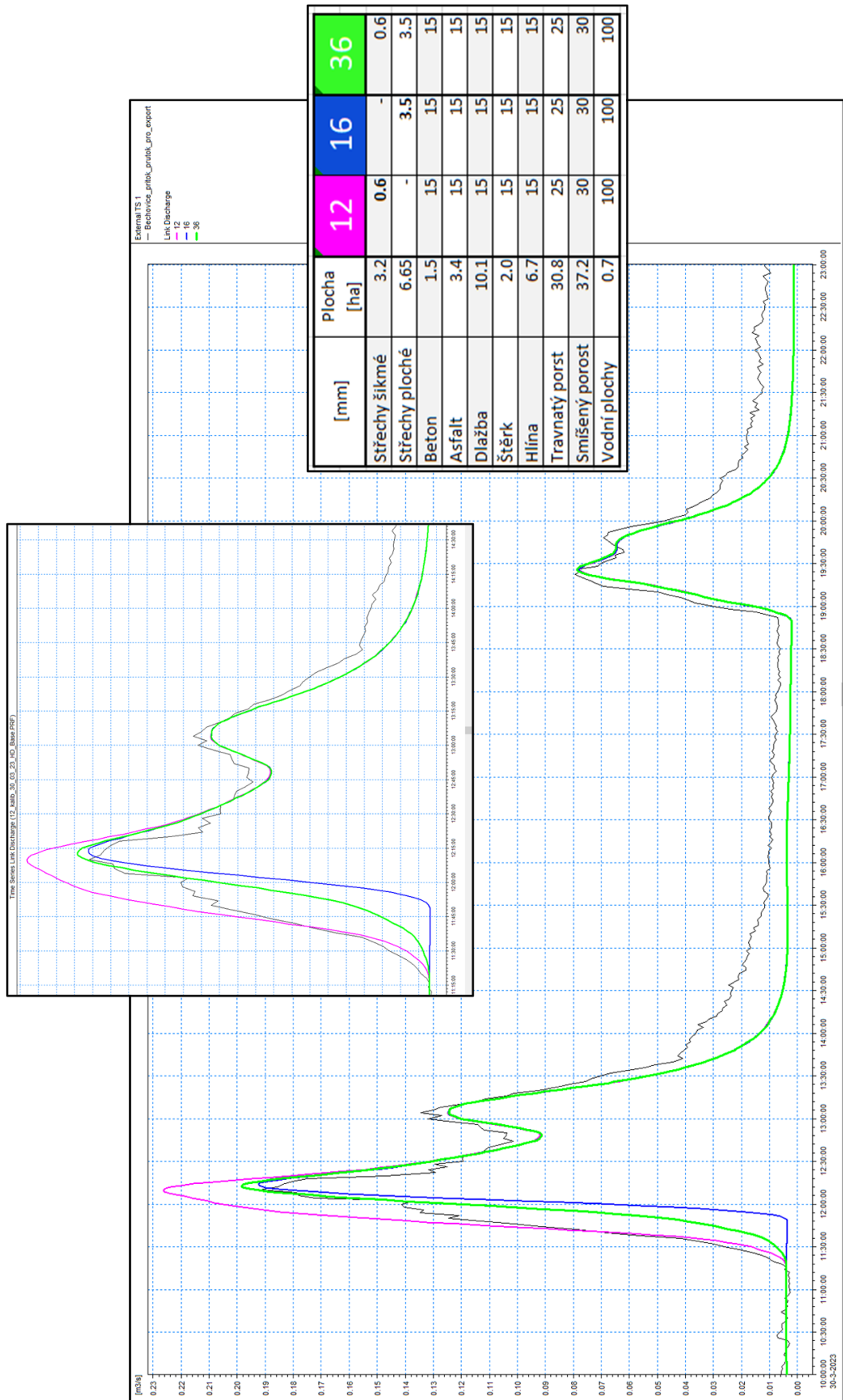


Obrázek 32: Porovnání průtoků nekalibrovaných modelů

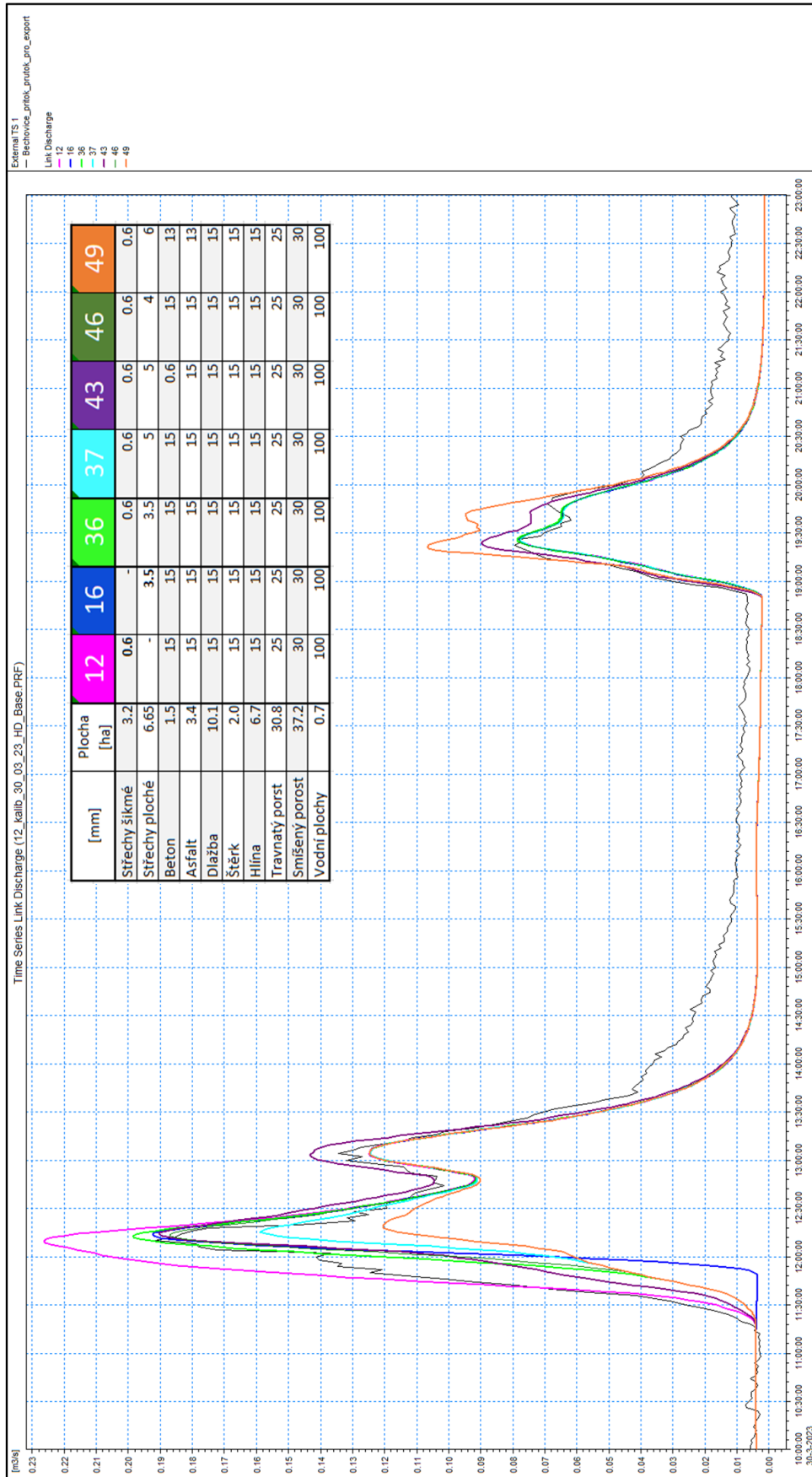
C Kalibrace alternativního modelu



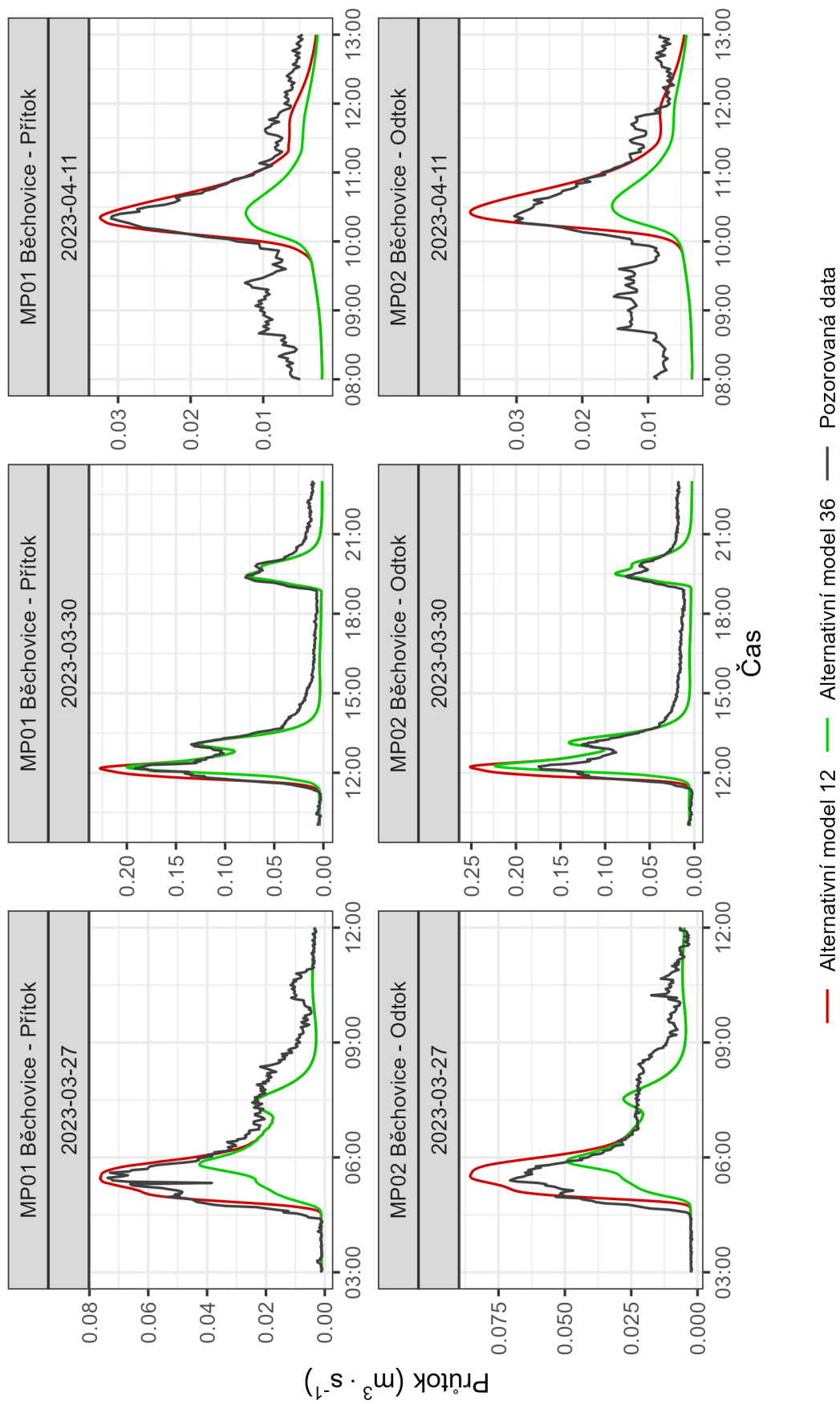
Obrázek 33: První milník kalibrace alternativního modelu



Obrázek 34: Druhý milník kalibrace alternativního modelu

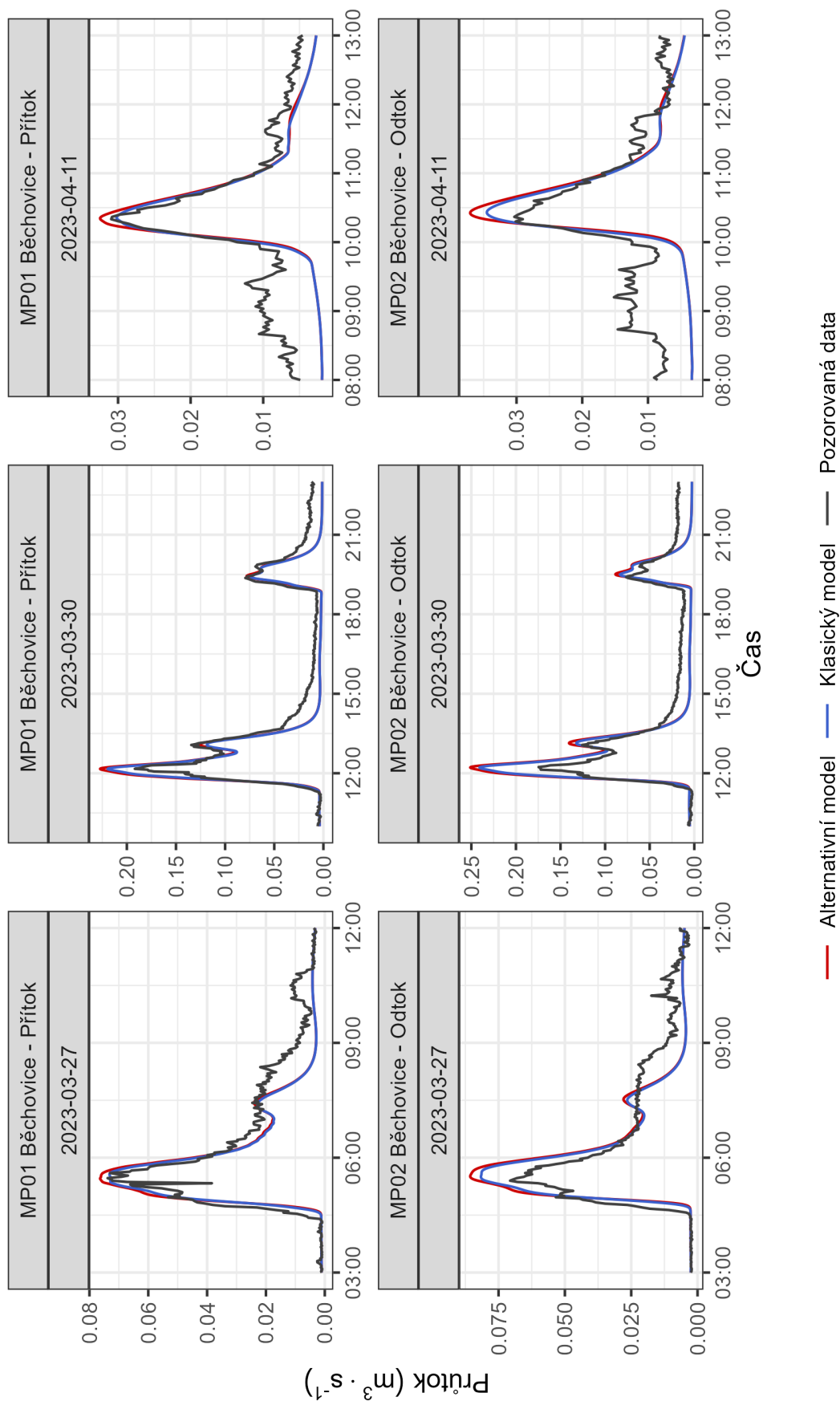


Obrázek 35: Proces kalibrace alternativního modelu



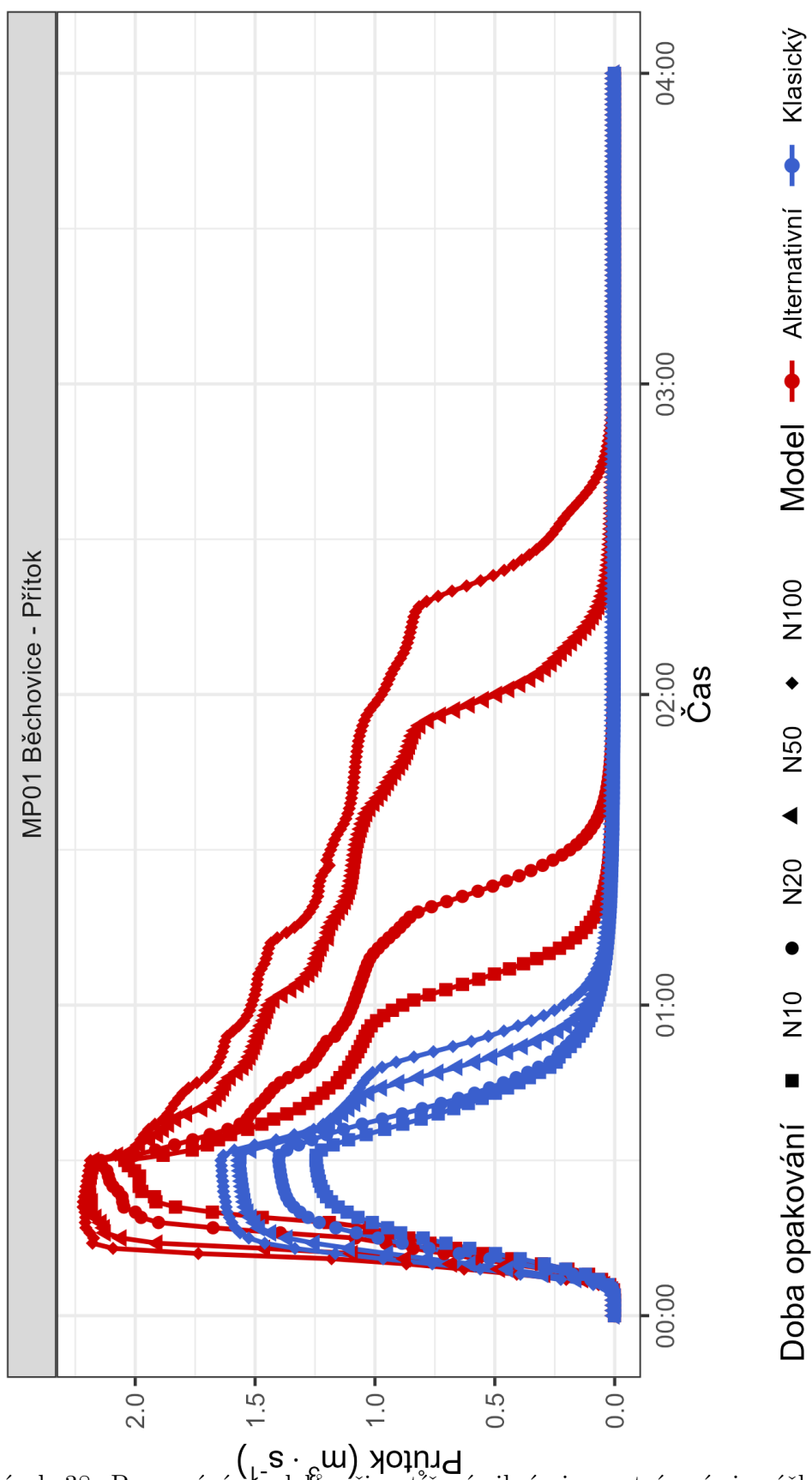
Obrázek 36: Výsledný průběh kalibrace alternativního modelu

D Porovnání průtoků kalibrovaných modelů

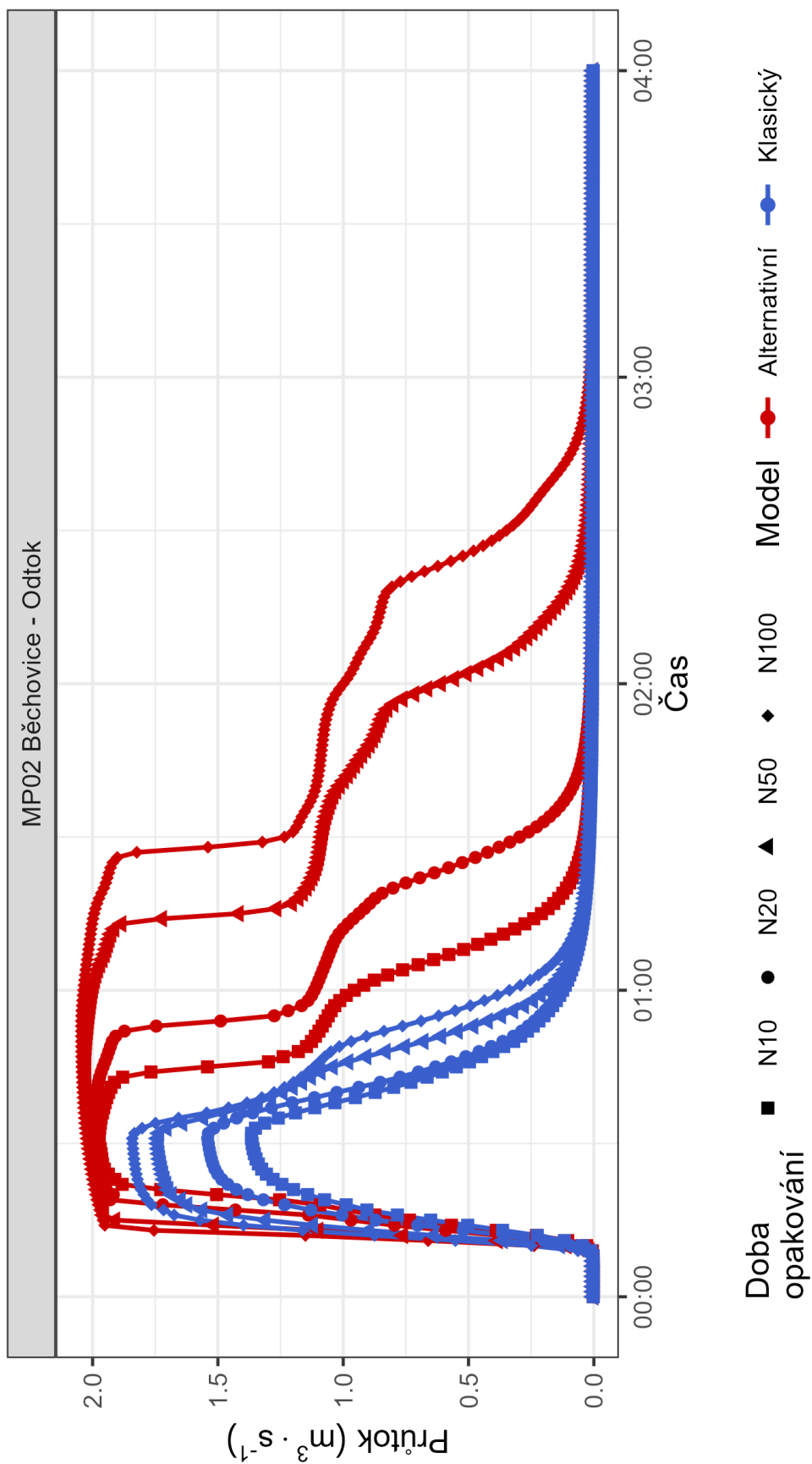


Obrázek 37: Porovnání průtoků neklibrovaných modelů

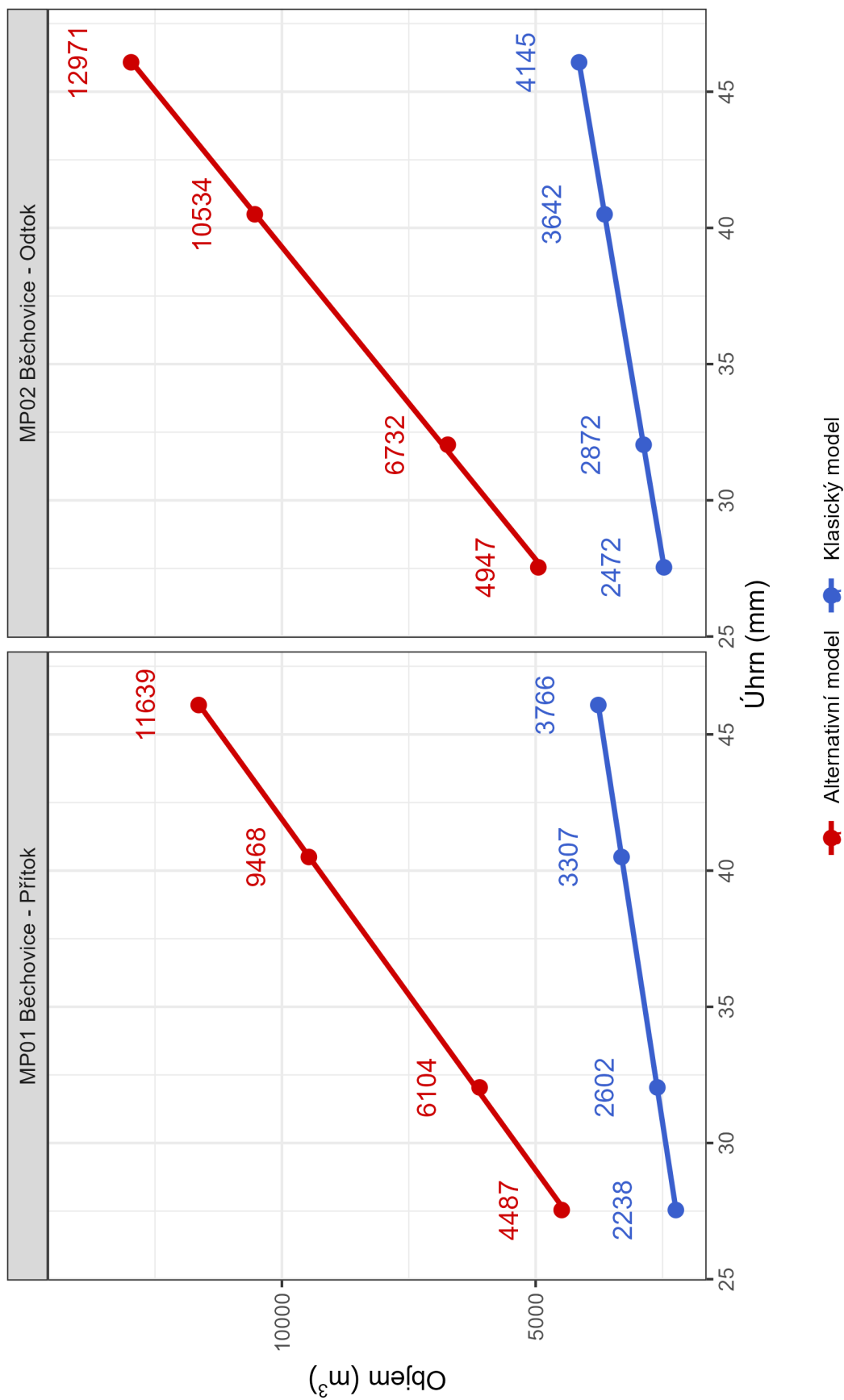
E Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami



Obrázek 38: Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami na MP01 Běchovice - přítok



Obrázek 39: Porovnání modelů při zatížení silnými a extrémními srážkami na MP02 Běchovice - odtok



Obrázek 40: Závislosti celkového objemu na úhrnu srážky