



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

OVĚŘENÍ ZÁVISLOSTI MEZI INTENZITOU DEŠTĚ A N- LETÝM PRŮTOKEM PRO VYBRANÉ POVODÍ S MĚŘENÍM

VERIFICATION OF THE DEPENDENCE BETWEEN RAIN INTENSITY AND N-YEAR FLOW FOR SELECTED RIVER BASINS WITH MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Tomášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav vodního hospodářství krajiny
Student: **Bc. Lukáš Tomášek**
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: N0732A260025 Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby

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

Ověření závislosti mezi intenzitou deště a N-letým průtokem pro vybrané povodí s měřením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se zabývá ověřením různých srážkových událostí ve vybraném povodí s měřením. Při práci bude využito sestavení a následná kalibrace srážko-odtokového modelu. Následně budou testovány různé intenzity deště. Zavěrem proběhne vyhodnocení dosažených výsledků.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Diplomová práce se zabývá ověřením různých srážkových událostí vybraném povodí. V rámci práce bude povodí schematizováno a bude vytvořen srážko-odtokový model, který bude kalibrován na základě měření v závěrovém profilu povodí. Na kalibrovaném srážko-odtokovém modelu budou testovány náhradní intenzity dešťů. Výsledkem by měl být průtok, který odpovídá přibližně návrhovému průtoku Q20 .

Seznam doporučené literatury a podklady:

Starý, M: Nádrže a vodohospodářské soustavy, skriptum, FAST VUT Brno, 2006.

Starý, M: Hydrologie, skriptum, FAST VUT Brno, 2005.

Starý, M: Nádrže a vodohospodářské soustavy, m. návody do cvičení 1. vyd. Brno, skriptum, VUT Brno, 1986.

Scharffenberg B. et al., Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual, U.S . Army Corps of Engineer 2018.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2022

L. S.

doc. Ing. Daniel Marton, Ph.D.
vedoucí ústavu

Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá ověřením různých srážkových událostí na vybraném povodí s měřeními. V rámci práce je pro řešené povodí provedena schematizace a vytvořen srážko-odtokový model, který je kalibrován na základě měření určených hodnot v závěrovém profilu pro dvě varianty výpočtů. Na kalibrovaném srážko-odtokovém modelu jsou pak testovány náhradní intenzity dešťů o různé periodicitě a době trvání tak, aby bylo dosaženo požadovaného průtoku Q_{20} . Na závěr jsou výše zmíněné výsledky vyhodnoceny a jsou z nich stanovena doporučení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Povodí, srážko-odtokový proces, srážko-odtokový model, náhradní intenzita dešťů.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the verification of various precipitation events in the selected river basins with measurements. As part of the work, schematization is for a given river basin made and a precipitation-runoff model is created and calibrated based on measurements in the final profile for two variants of calculations. Alternative rain intensities with different periodicity and duration are then tested on the calibrated precipitation-runoff model to achieve the required flow rate Q_{20} . Finally, the aforementioned results are evaluated and recommendations are made from them.

KEYWORDS

River basin, Precipitation-runoff process, Precipitation-runoff model, alternative rain intensity.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMÁŠEK, Lukáš. *Ověření závislosti mezi intenzitou deště a N-letým průtokem pro vybrané povodí s měřením*. Brno, 2023. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí Ing. Tomáš Kozel, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Ověření závislosti mezi intenzitou deště a N-letým průtokem pro vybrané povodí s měřením* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2023

Bc. Lukáš Tomášek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Ověření závislosti mezi intenzitou deště a N-letým průtokem pro vybrané povodí s měřením* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2023

Bc. Lukáš Tomášek
autor

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Kozlovi, Ph.D. za jeho užitečné rady a čas, který mi věnoval při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíl	10
3	Metodika.....	11
3.1	Povodí	11
3.2	Srážko-odtokový proces.....	11
3.3	Klimatičtí činitelé.....	13
3.3.1	Vlhkost ovzduší	13
3.3.2	Výpar	13
3.3.3	Srážky	14
3.4	Geografičtí činitelé.....	18
3.5	Měření průtoků.....	18
3.6	Srážko-odtokové modely	20
3.7	Metoda CN křivek.....	20
3.8	Truplovy tabulky	20
3.9	Rain	20
4	Aplikace.....	22
4.1	Zájmové území.....	35
4.2	Výsledky	43
4.2.1	Povodí Malá Haná	46
4.2.2	Povodí Rakovec	50
4.2.3	Povodí Krásensko	54
4.2.4	Shrnutí výsledků	58
5	Závěr.....	65
6	Seznamy	68
6.1	Seznam použité literatury.....	68
6.2	Seznam použitých obrázků	69
6.3	Seznam tabulek	70
6.4	Seznam zkratek	71

1 Úvod

V současné době se na našem území vlivem klimatických změn čím dál tím více objevují přívalové srážky. Vyskytují se zpravidla na menších územích a jsou charakterizovány vysokou intenzitou a kratší dobou trvání. Vzhledem k rychlosti vývoje jsou navíc velmi obtížně predikovány s dostatečným předstihem.

Následkem extrémních dešťů bývají přívalové povodně, které se projevují rychlým vzestupem vodní hladiny a po její kulminaci následně i rychlým poklesem. Pro zabránění vzniku přívalové povodně je potřeba zajistit dostatečnou kapacitu odtokových cest a pokud je to možné, tak zasáknout nebo zadržet většinu vody v krajině. K zajištění ochrany odtokových poměrů se velmi často používá náhradní dešť, který vytváří na povodích průtok přibližně Q_{20} .

Pro zajištění dostatečné kapacity odtokových cest je potřeba mít podrobné informace o řešeném území. Nesprávným určením kulminačních průtoků mohou vzniknout katastrofální následky, jako jsou škody na majetku, ekologické škody či oběti na lidských životech.

K zajištění dostatečné kapacity odtokových cest lze využít více přístupů. Při návrhu vlastních opatření je potřeba mít na paměti vliv jednotlivých opatření na celkový průběh průchodu povodně v rámci většího celku (povodí), kdy některá opatření mohou paradoxně v rámci celku zhoršit průběh povodně (setkání kulminací na soutoku). V praxi nejčastěji projektanti pracují s náhradní intenzitou deště o periodicitě 0,01 a dobou trvání 15 minut. Povodí Odry zase využívá na základě svých zkušeností dešť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut. Oba návrhové stavy vychází bakalářské práce Tomášek L. (2021), kde dosahovaly v závislosti na nasycení obdobných hodnot.

Proto je potřeba ověřit, zda jsou tyto návrhové stavy vhodné i v jiných podmínkách, než s jakými bylo počítáno v bakalářské práci. K tomu bude využito větší povodí rozdílného charakteru a sklonitosti, které je ukončeno měrným profilem k ověření dosažených hodnot. Na řešeném povodí se navíc nachází dvě dílčí povodí, které budou součástí vyhodnocení.

Pro účely diplomové práce bude pro řešené povodí zhotoven srážko-odtokový model, na kterém budou testovány náhradní intenzity dešťů pro dvě varianty výpočtu využívající různé metody výpočtu srážko-odtokového procesu. Zvláštní pozornost bude věnována návrhovým stavům z bakalářské práce. Dále budou k simulaci využity blokové deště o různé periodicitě na základě jejich doby trvání, aby bylo dosaženo požadovaného průtoku. K simulaci budou využity náhradní intenzity dešťů z webové aplikace Rain a z Truplových tabulek.

2 Cíl

Cílem diplomové práce je vytvořit pro vybrané povodí s měřením v závěrovém profilu srážko-odtokový model, na kterém budou testovány náhradní intenzity dešťů.

Primárně budou testovány dva návrhové stavy z bakalářské práce, které jsou doporučovány a používány v praxi.

- Déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut.
- Déšť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut.

Výsledný průtok by měl co nejvíce odpovídat návrhovému průtoku Q_{20} , získanému na základě měření v závěrovém profilu povodí.

Pro ověření závislosti mezi intenzitou deště a N-letým průtokem budou testovány další návrhové stavy využívající deště o různé periodicitě a době trvání tak, aby byla získána potřebná doba k dosažení průtoku Q_{20} .

Simulace všech návrhových stavů proběhne pro dvě varianty použitých metod.

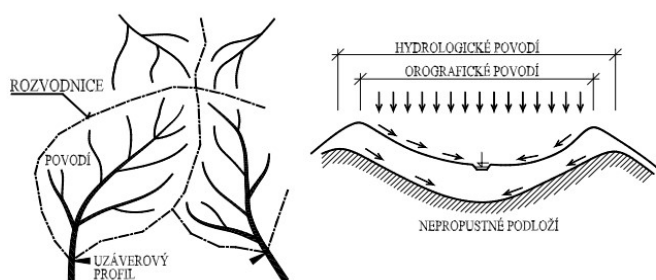
- Varianta 1 – Metoda bez ovlivnění průtoku hypodermickým odtokem a transformací odtoku říční sítí.
- Varianta 2 – Metoda zahrnující zjednodušený hypodermický odtok pro stanovení průtoku a transformaci odtoku říční sítí.

3 Metodika

Kapitola podrobněji specifikuje povodí a jeho rozdělení, charakterizuje srážko-odtokové modely a srážko-odtokový proces včetně faktorů, které ho ovlivňují. Mimo jiné zde bude popsáno měření srážek a průtoků.

3.1 Povodí

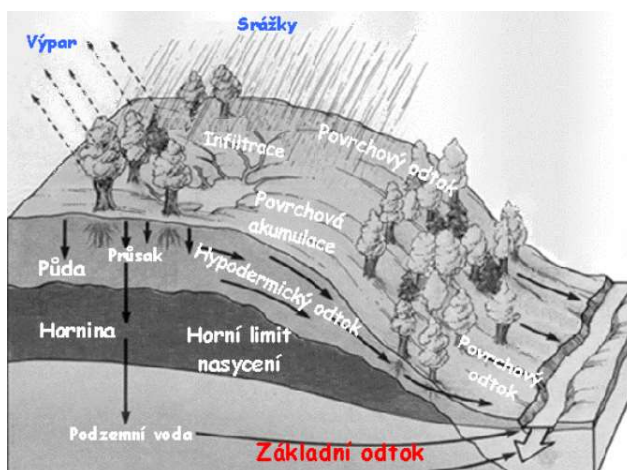
Povodí je oblast, ze které voda odtéká do závěrového profilu. Hranici mezi dvěma povodími tvoří rozvodnice. Povodí se podle způsobu vymezení rozděluje na orografické a hydrologické. Orografické povodí je vymezeno rozvodnicí, která probíhá přes nejvyšší kóty, mezi ležící hřebeny a sedla v bezprostřední blízkosti sledovaného vodního toku. Rozsah povodí s povrchovým odtokem zpravidla souhlasí s rozsahem povodí s podpovrchovým odtokem. Povodí je popsáno na Obr. 1. [1]



Obr. 1 Orografické a hydrologické povodí. [2]

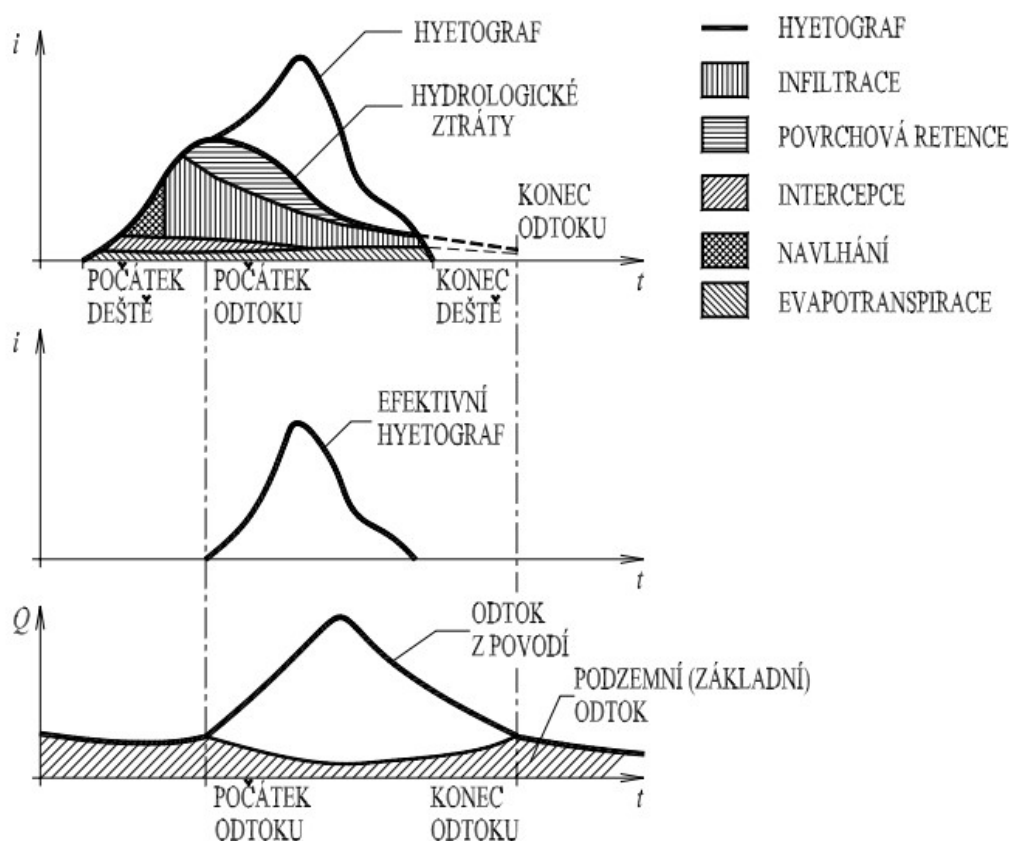
3.2 Srážko-odtokový proces

Srážko-odtokový proces v povodí představuje postupnou transformaci srážky dopadající na povodí až na odtok vody závěrovým profilem povodí. Jedná se o složitý proces, který je ovlivněný řadou klimatických a geografických činitelů. První skupinu tvoří mimo srážky hlavně meteorologické veličiny, které ovlivňují primárně celkový výpar vody z povodí. Druhá skupina charakterizuje prostředí, ve kterém se srážko-odtokový proces odehrává. Určuje vlastnosti povodí, které jsou rozhodující pro způsob, jakým se bude časový průběh srážky v povodí transformovat na časový průběh odtoku vody závěrovým profilem. Schéma srážko-odtokového procesu je znázorněno na Obr. 2. [2]



Obr. 2 Schéma srážko-odtokového procesu. [2]

Srážko-odtokový proces tvoří dvě dílčí transformace. V průběhu první – hydrologické transformace – jsou od srážky dopadající na povodí postupně odečítány hydrologické ztráty. Patří sem ztráta výparem, ztráta vlivem intercepce, ztráta navlháním, ztráta infiltrací vody do půdy a ztráta povrchovou retencí. Postupným oddělováním hydrologických ztrát od časového průběhu intenzity srážky získáme efektivní intenzitu srážky. Objem vody takto spadlé na povrch terénu odtéká z povodí ve formě plošného povrchového odtoku. Tím startuje druhá transformace – hydraulická. Plošný povrchový odtok se postupně transformuje v ronových a erozních rýhách a následně v říční síti až na odtok závěrovým profilem. Z celkového odtoku tvoří část podzemní odtok vody. Z podzemí odtéká buďto z nenasycené zóny nad hladinou podzemní vody, nebo z nasycené zóny pod souvislou hladinou podzemní vody ve formě podzemního odtoku do říční sítě. Průběh hydrologické a hydraulické transformace je zobrazen na Obr. 3. [2]



Obr. 3 Hydrologická a hydraulická transformace. [2]

Hypodermický odtok:

Hypodermický (podpovrchový) odtok je poměrně rychlá část z celkového odtoku, která probíhá ve svrchní vrstvě terénu bez toho, anižby dosáhla úrovně hladiny podzemní vody. Do vodního toku se dostává později než povrchový odtok, avšak rychleji než odtok základní. Vyskytuje se zejména v oblastech s mocnou, dobře propustnou půdou a vlhkým klimatem, ale může se vyskytovat i v suchých oblastech, kde v mělkém podloží zabraňuje infiltraci do podloží nepropustná nebo málo propustná vrstva. V některých oblastech může dokonce tvořit dominantní složku povodňových průtoků. [3]

3.3 Klimatičtí činitelé

Klimatičtí činitelé výrazně ovlivňují celkový průběh srážko-odtokového procesu. Mezi nejvýznamnější klimatické činitele patří srážky a jejich průběh, výpar, vlhkost ovzduší a další.

3.3.1 Vlhkost ovzduší

Vlhkost ovzduší je dána množstvím vodních par, které silně kolísá. Obsah vodních par charakterizujeme hlavně absolutní vlhkostí vzduchu. Okamžitá skutečná vlhkost vyjadřuje množství vodních par obsažených při dané teplotě a vzduchu. Značí se buď q a vyjadřuje hmotnost vodních par v gramech na 1 m^3 vzduchu, nebo se značí e a vyjadřuje tlak vodních par v kPa. Vlhkost vzduchu se měří povocí vlhkoměrů (Assmanův, Augustův, kondenzační, vlasový). [2]

Při určité teplotě může ovzduší obsahovat maximálně množství par, které udává maximální vlhkost E (Q_{\max}). Poměr mezi absolutní vlhkostí e a maximální vlhkostí E při dané teplotě je relativní vlhkost r [%]. [2]

Rce. 1: Výpočet relativní vlhkosti r . [2]

$$r = \frac{e}{E} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Množství vodních par, které může za určité teploty přijmout, se označuje jako sytostní doplněk d [kPa]. [2]

Rce. 2: Výpočet sytostního doplňku d . [2]

$$d = E - e \text{ [kPa]}$$

3.3.2 Výpar

Výpar se projevuje přeměnou kapalného skupenství na plynné v závislosti na povrchu a teplotě. Rozlišujeme výpar z vodní hladiny, výpar z půdy a výpar rostlinami.

- **Výpar z vodní hladiny**

Nejvýznamnější složka ztrát vody v případě vodních nádrží. V našich podmínkách se ztráty vody výparem pohybují okolo 1 až 3 mm za den a 200 až 800 mm za rok. Množství vypařené vody se odvíjí primárně podle teploty nadmořské výšky. Pro měření výparu z volné hladiny se standardně používá Šermerův výparoměr. [2]

- **Výpar z půdy**

Závisí na vlastnostech půdního profilu a meteorologických podmínkách. Z nasycené půdy se odpařuje až 15 mm vody denně. Obecně by mělo platit, že výpar je tím menší, čím silnější je povrchová vrstva vysušené půdy a čím pomaleji se vlhkost doplňuje ze spodních vrstev. Větší výpar mají tmavší půdy a značný vliv má také poloha. Zmenšení výparu také ovlivňuje zastínění půdy, což při zastínění půdy rostlinami může snížit výpar až o 20 %. Výpar z půdy se měří pomocí lyzometrů. [2]

- **Transpirace rostlin**

Označuje základní životní proces rostlin. Kořeny rostlin nasávají podzemní vodu, která se pak listy částečně vypařuje. [2]

3.3.3 Srážky

Vznik srážek souvisí s kondenzací vodní páry obsažené ve vzduchu, nejčastěji při jejím ochlazování během výstupných pohybů vzduchu. Vznikají vodní kapky a ledové krystalky tvořící oblaka. Ledové krystalky narůstají tak, že na nich namrzají drobné kapky přechlazené vody. Tím rychle narůstají na úkor vodních kapek, dokud nejsou natolik velké, že ve formě ledových vloček začnou padat. Při svém pádu od určité výšky, kde je okolní vzduch dostatečně teplý, tají a vznikají z nich dešťové kapky. [4]

Padající srážky představují déšť, mrznoucí déšť, mrholení, mrznoucí mrholení, sníh, sněhové krupky, sněhová zrna, zmrzlý déšť, kroupy, ledové jehličky apod. Jako usazené označujeme rosu, zmrzlou rosu, jinovatku, námrazu, ledovku. Pokud srážky vypadávají z oblaků, ale nedopadají k zemskému povrchu, označujeme je jako srážkové pruhy. [5]

Pokud srážky trvají delší dobu s víceméně stálou intenzitou, označují se jako trvalé. Jestliže na určitou dobu ustávají, označují se jako občasně. Přehánky mají náhlý začátek a konec, rychlé kolísání intenzity, obvykle krátké trvání. Trvalé srážky zasahují větší plochu, zatímco přehánky mají spíše místní charakter. [5]

Rozlišujeme konvekční, cyklonální a orografické srážky.

Konvekční srážky mají přehánkový charakter, krátkou dobu trvání a větší intenzitu. Jsou často provázeny bouřkou. V létě jsou obvykle tvořeny velkými dešťovými kapkami, někdy i s kroupami, v ostatních částech roku jsou tvořeny zpravidla mokrým sněhem nebo sněhovými krupkami. [5]

Cyklonální srážky vypadávají v oblasti tlakové níže, považují se za ně frontální srážky v oblasti atmosférické fronty. V chladném období mají zpravidla trvalý charakter a jejich intenzita závisí na vlhkosti vzduchu. V teplém období se vyskytují frontální srážky ve formě přeháněk. [5]

Orografické srážky se vytvářejí díky terénním překážkám především při výstupu vzduchu po svazích, v závětrí horských překážek pak vypadávají srážky. [5]

Extrémní srážky

Deště popisujeme dobou trvání v minutách nebo hodinách a intenzitou, což je množství vody, které spadne za jednotku času. Podle doby trvání a intenzity rozdělujeme deště na regionální a přívalové. [2]

Regionální deště jsou dlouhodobé deště s velkou rozlohou a obvykle i menší intenzitou. Regionální deště způsobují povodně v rámci velkých povodí, zatímco přívalové deště (lijáky) jsou vydatné krátkodobé deště, které zasahují poměrně malé plochy. Způsobují prudké rozvodnění malých toků a nejsilněji se u nich projevuje splavování ornice (vodní eroze). [2]

Přívalové deště nemají v meteorologické praxi přesnou definici. Podle Hellmana jsou to deště s dobou trvání do 180 minut a s výškou srážek 10–80 mm. Intenzita deště během jeho trvání značně kolísá. Pro hydrotechnické výpočty se průběh skutečného deště zjednodušuje a nahrazuje modelovým deštěm konstantní intenzity, různé doby trvání, ale tak aby měl stejný účinek jako déšť původní. Takový modelový déšť se nazývá náhradním deštěm a určuje se z ombrografických záznamů. [2]

Pozorování dešťů prokázala některé závislosti. Zejména že intenzita deště bývá nejsilnější brzy po začátku deště a při jeho delším trvání klesá. Čím větší je intenzita deště, tím menší je zasažená plocha. [2]

Přivalové deště charakterizujeme periodicitou neboli průměrnou roční frekvencí p' . Toto číslo udává, kolikrát je v průměru dešť o určité intenzitě v rámci jednoho roku dosažen nebo překročen. Převrácenou hodnotou periodicity je průměrná doba opakování N . Udává průměrný počet let, ve kterých je dešť určité intenzity dosažen nebo překročen. [2]

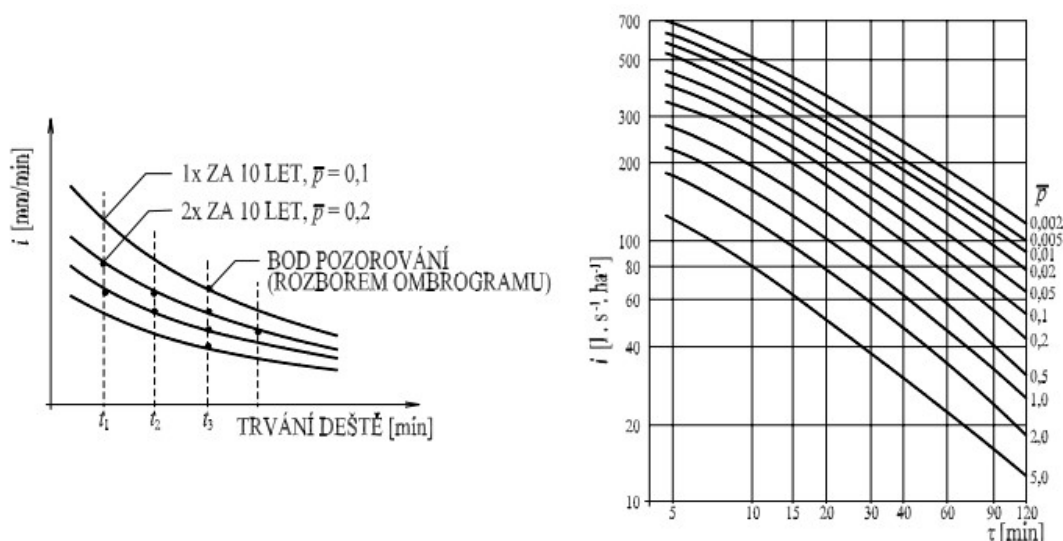
Rce. 3 – Periodicita p' . [2]

$$p' = \frac{m}{M}$$

Rce. 4 – Průměrná doba opakování. [2]

$$N = \frac{1}{p'} = \frac{M}{m}$$

Kde: m – počet výskytů daného jevu za sledované období
 M – počet roků pozorování



Obr. 4 Vztah mezi trváním, intenzitou a periodicitou deště. [2]

Indikátor přivalových povodní

Jedná se o aplikaci, jejíchž hlavním úkolem je detekce potenciálního rizika vzniku přivalové povodně. Skládá se ze tří základních částí:

- Odhad aktuální nasycenosti území v denním kroku.
- Odvození potenciálně rizikových srážek o době trvání 1, 3 a 6 hodin, které mohou za aktuálních podmínek nasycenosti území vyvolat plošný povrchový odtok povodňového charakteru.
- Stanovení rizika vzniku přivalové povodně na konkrétním území na základě aktuálních údajů o spadlých srážkách a jejich krátkodobé předpovědi.

Aplikace je provozována v období s výskytem významné konvektivní oblačnosti (duben–říjen). Výstupy jsou zobrazovány v mapové aplikaci. [6]

Závislost intenzity deště na velikosti zasažené plochy

Přívalové deště zasahují zejména malá území. Jejich intenzita na ploše není rovnoměrně rozložena. U jádra deště je intenzita největší a směrem k jeho okrajům se snižuje. Čím je dešť intenzivnější, tím menší území zasáhne. S rostoucí plochou povodí je třeba zjištěnou intenzitu redukovat. Řešení tohoto problému poskytuje Frühlingův vzorec: [2]

Rce. 5 – Frühlingův vzorec. [2]

$$i_{pr} = i_b(1 - 0,005 L^{0,5})$$

Kde: i_{pr} – plošně průměrná intenzita v kruhu o poloměru L

i_b – maximální bodová intenzita v jádru deště

Frühling zjednodušeně uvádí, že intenzita přívalového deště klesá se vzdáleností od jádra, a to tak, že ve vzdálenosti tři kilometry od jádra klesá na polovinu. Pro ČR je možné použít Reinholdova závěru, že vypočítanou intenzitu je možné pro povodí do 10 km² snížit o 5 % a povodí do 25 km² o 10 %. [2]

Měření srážek

Pro klasické měření srážek mohou složit srážkoměry neboli ombrometry. Dokonalejší údaje mohou být získány zapisujícím srážkoměrem, ombrografem. Na těžko přístupných místech pak může být využit totalizátor. [2]

V současné době se pro měření srážek na pozemních stanicích používají spíše srážkoměry impulsní, váhové a optické.

Mimo jiné se také pro měření a předpovědi srážek čím dál více využívají služby meteorologických družic a radarů.

- **Impulsní srážkoměry:**

Impulsní srážkoměr je asi nejznámější, funguje u něj měření na základě počtu překlopení dvoudílného člunku vlivem srážkové vody přitékající do přístroje. Vstupní nálevka zachycuje srážky a nasměruje je na jednu z lopatek překlopného mechanismu, čímž je vyslán mechanický impuls a začíná se plnit další lopatka mechanismu. Srážkoměr bývá vytápěn pro celoroční funkci. Počet překlopení určuje množství srážek za daný čas a jejich intenzitu. [2],[6]



Obr. 5 Impulsní srážkoměr (elektronika a měřicí část). [7]

- **Váhové srážkoměry:**

Srážkoměry s periodickým vážením jsou obdobou totalizátorů, jejich součástí je však mechanismus, který v určitých časových intervalech váží hmotnost vody. Srážkoměr může být ovládán na dálku a lze měnit periodu vážení srážkové vody. Ze získaných dat lze získat informace o celkovém objemu srážek za určitý čas a také informace o intenzitě deště. [2]



Obr. 6 Automatický váhový srážkoměr. [7]

- **Optické srážkoměry:**

Optické srážkoměry měří srážky pomocí infračerveného paprsku. Skládají se z vysílače paprsku a přijímače, mezi nimiž je volný prostor. Charakter prostředí v tomto prostoru má vliv na infračervený paprsek, po příjmu a vyhodnocení paprsku jsou zpětně vypočteny charakteristiky prostředí. Přístroje jsou závislé na správné kalibraci. [2]



Obr. 7 Optický srážkoměr. [8]

3.4 Geografičtí činitelé

Výrazně ovlivňují průběh srážko-odtokového procesu a transformaci srážky dopadající na povodí.

Fyzikálně-geometričtí činitelé

Parametry ovlivňující zejména rychlost odtoku, a tím pádem i celkový průběh odtoku vody z povodí.

Mezi fyzikálně-geometrické činitele lze zařadit:

- Poloha povodí
- Velikost povodí
- Tvar povodí
- Sklonitost povodí

Geologické vlastnosti povodí

Značně ovlivňují povrchový a podpovrchový odtok. Propustné zeminy zajišťují vyvážené průtoky a dostatečné množství podzemní vody, zatímco nepropustné horniny způsobují rychlý povrchový odtok a nedostatečné množství podzemní vody.

- **Infiltrace**

Proces vsakování vody, který nastává při srážkách nebo při zavlažování. Vsakování dešťové vody závisí na velikosti a intenzitě srážek. Do suché půdy je vsakování nejvyšší, ale až po navlhnutí půdy. Méně intenzivní srážky se pak mohou do půdy téměř úplně vsáknout, zatímco při přívalových srážkách odtéká podstatná část po povrchu. Počáteční vlhkost půdy má zásadní vliv na infiltraci, která v čase klesá. [2]

Vegetační pokryv

Půda zakrytá vegetací je odolnější vůči erozi, a tím pádem je tento kryt i vodohospodářsky výhodný. Tráva zdršňuje povrch, zmenšuje rychlost odtoku a zvyšuje infiltraci. Nejdůležitější z vegetačních činitelů je les. Příznivé účinky jsou však podmíněné správnou skladbou a polohou lesa. Nejlépe působí smíšený les, ve kterém je půda chráněna dobrým zapojením porostu a dostatečnou vrstvou humusu. Nejméně vhodný účinek na odtok má les jehličnatý, který v našich krajinách převládá. [2]

3.5 Měření průtoků

Průtok udává množství vody, které proteče měrným profilem za jednotku času. Hodnotu průtoku lze určit několika způsoby.

- **Přímé měření průtoků:**

Používá se pro měření na velmi malých tocích nebo v blízkosti pramene vodního toku. Měří se doba, za kterou se naplní nádoba o známém objemu. [9]

- **Měření průtoků přepady:**

Pro měření v korytech řek širokých do 2 metrů a s malými hloubkami, kdy není možné využít hydrometrování. K měření se používají dřevěné nebo kovové stěny,

kterými se koryto přepaží. Za stěnou přepadu dojde ke vzduť hladiny a voda přetéká výřezem ve stěně dokonalým paprskem. K měření v přirozených korytech se nejčastěji používají ostrohranné přepady s výřezem obdélníku (Ponceletův) a pravouhlého rovnoramenného trojúhelníku (Thomsonův). [9]

- **Měření průtoků hydrometrickou vrtulí:**

Metoda spočívá v měření rychlosti proudění vody a zjištění plochy průtočného profilu. Průměrná rychlost se měří pomocí hydrometrické vrtule. Jedná se o zařízení, které se skládá z pevné části – těla vrtule, z pohyblivé části – vrtule, z kontaktního, převodního a směrového zařízení – kormidla. Rychlost proudění se stanovuje pomocí počtu otáček vrtule za určitý čas. Počet otáček je přímo úměrný rychlosti proudění vody. Pro stanovení průměrné rychlosti proudění v průtočném profilu je potřeba zvolit dostatečný počet měření a měrných bodů, aby bylo co nejvíce vystiženo rozdělení rychlostí. [9]

- **Měření průtoků pomocí indikátorů:**

Metoda využívá chemických roztoků nebo radionuklidů, které se přidávají do proudící vody. Koncentrace chemického roztoku je známa a měří se míra zředění v kontrolním profilu. Používá se hlavně na horských bystřinách s velkými nerovnostmi dna.

- **Měření průtoků pomocí moderních metod:**

Používají se metody měření průtoků pomocí ultrazvuku. Pro měření slouží přístroj označovaný ADCP (Acoustics Doppler Current Profiler), který je umístěn na člunu a snímá vodní těleso pod sebou ultrazvukovou sondou. [9]

Dále je používána metoda elektromagnetické indukce, která využívá proud vody jako vodiče. V uměle vytvořeném magnetickém poli naměřená velikost indukovaného napětí je přímo úměrná rychlosti proudící vody. [9]

Měrná křivka průtoků

Měrná křivka průtoků neboli konsumpční křivka vyjadřuje závislost mezi vodním stavem a průtokem. Měrná křivka průtoků se zhotovuje podle výsledků hydrometrických měření v měrném profilu nebo pomocí hydraulických výpočtů. Vynesené body jsou proloženy regresní křivkou.

Vzhledem k stále se měnícím průtokovým poměrům je potřeba vykreslenou měrnou křivku stále upřesňovat novým měřením. V případě průchodu povodňové vlny příčným profilem nastává nejdříve největší sklon hladiny, potom největší rychlost, následně největší průtok a nakonec nejvyšší vodní stav. [2]

Při absenci hydrometrických měření lze měrnou křivku odhadnout na základě vztahů pro ustálené rovnoměrné proudění (Chézyho rovnice). V případě přirozených koryt však nastává problém při odhadu drsnosti koryta, kdy mohou být využity tabulkové hodnoty, které nemusí odpovídat skutečnému stavu. Proto je vhodné teoreticky stanovenou konsumpční křivku alespoň částečně ověřit hydrometrováním. [2]

3.6 Srážko-odtokové modely

Matematický model srážko-odtokového procesu je zjednodušenou představou složitého hydrologického systému. Hydrologický matematický model představuje algoritmus řešení soustavy rovnic, kterými je popsána struktura a chování povodí během srážko-odtokového procesu. [10]

Při výběru vhodného modelu se zohledňuje dostupnost, prakticky přípustná míra zjednodušení hydrologicko-hydraulických vztahů, náročnost na vstupní data a citlivost výstupních parametrů na nepřesnosti vstupních parametrů. [10]

Existuje velké množství softwarů pro simulaci srážko-odtokového procesu. Mezi nejvyužívanější patří programy HEC-HMS, HYDROG, MIKE SHE, AQUALOG a další. V diplomové práci byl využit program HEC-HMS, jelikož se jedná o program, který je volně dostupný. Použité metody v tomto programu jsou popsány v části Aplikace.

3.7 Metoda CN křivek

Metoda CN křivek je založena na experimentálním výzkumu. Používá se ke stanovení přímého odtoku na základě znalosti intenzity srážek a typu povrchu. Výpočet podle metody CN křivek lze použít pro stanovení objemu přímého odtoku způsobeného návrhovým přívalovým deštěm dané pravděpodobnosti výskytu. [11]

Metoda byla odvozena na zemědělsky využívaných povodích, jejichž plocha není větší než 10 km². U velkých povodí je potřeba u výsledků počítat s nepřesností. Velká povodí nelze řešit dohromady. Je potřeba je rozdělit na dílčí povodí. Nevýhodou metody je vysoká citlivost na zvolené hodnoty CN. [11]

Čísla CN se podle typu povrchu teoreticky pohybují mezi hodnotami od CN = 0, kdy se vše vsákne, do CN = 100, kdy vše oteče. Hodnota závisí na typu povrchu, způsobu jeho využití, případném uplatnění protierozních opatření a propustnosti půdy vodou. [11]

Postup pro stanovení průměrného čísla odtokových křivek CN je detailněji popsán v kapitole Aplikace.

3.8 Truplovy tabulky

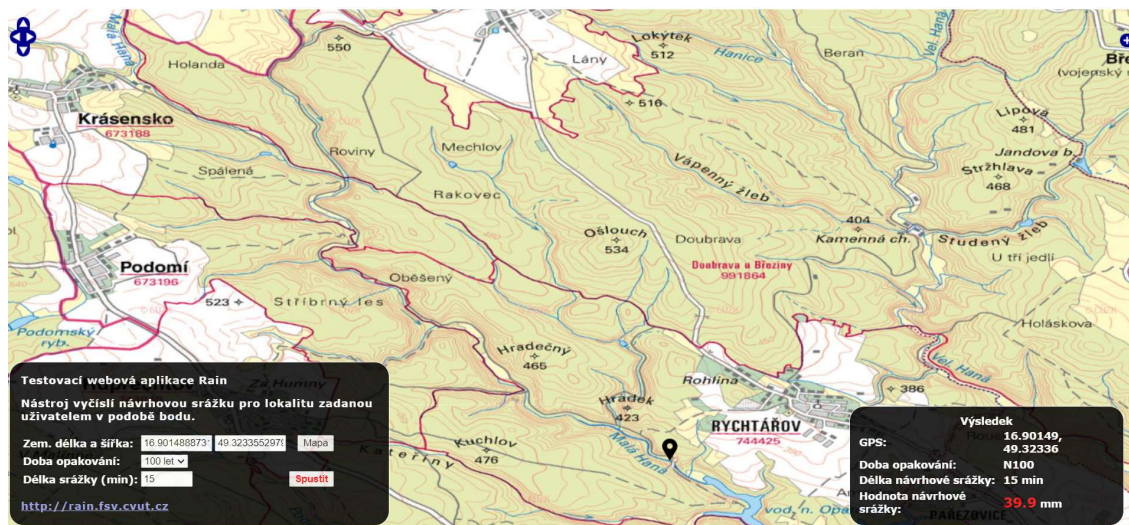
Hlavní a dodnes nejpoužívanější datový soubor, který poskytuje podklady pro vykreslení intenzitních křivek pro 96 stanic na území České republiky, sestavil v roce 1958 Ing. Josef Trupl – tzv. Truplovy tabulky. Zde je také uveden popis metodiky zpracování srážkových dat. Truplovy tabulky dodnes slouží jako relevantní podklad pro projekční praxi v oblasti vodního hospodářství. [12]

3.9 Rain

Webová aplikace Rain slouží pro rychlý a jednoduchý přístup k podkladům pro odvození návrhové srážky v libovolném místě na území České republiky. Jedná se zejména o průběhy intenzit a pravděpodobností výskytu šestihodinových návrhových srážek a odhady návrhových úhrnů s různou délkou trvání deště a dobou opakování 2-100 let. [13]

Aplikace umožňuje pro daný bod při zvolené době opakování a zadané délce trvání srážky odečítat hodnoty úhrnu návrhové srážky v milimetrech. Polohu bodu lze

zadat posunem bodu na mapě, nebo přímým zadáním souřadnic zeměpisné délky a šířky do webového formuláře. Na Obr. 8 je zobrazen výpočet návrhové srážky pro zvolený bod, dobu opakování a délku trvání. [13]



Obr. 8 Výpočet návrhové srážky. [13]

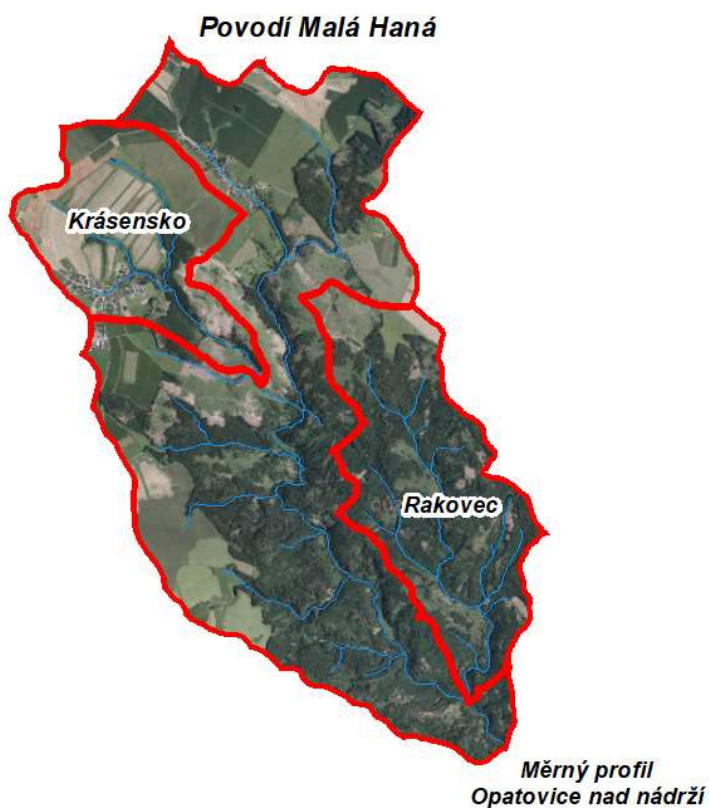
4 Aplikace

Pro účely ověření vlivu srážkových událostí s různou periodicitou a délkou trvání bylo vybráno povodí s měřením v závěrovém profilu (povodí Malá Haná). Pro toto povodí byly od ČHMÚ poskytnuty N-leté vody (kulminační průtoky, které byly odvozeny na základě měření v závěrovém profilu povodí). V rámci schematizace bylo uvažováno území od pramene (VT Malá Haná) po měrný profil (stanice Opatovice nad nádrží).



Obr. 9 Vybrané povodí.

Na vybraném povodí se dále nacházejí dvě dílčí povodí, pro které byly poskytnuty kulminační průtoky na základě výpočtů pomocí statistických metod (povodí Rakovec, povodí Krásensko). Celé řešené zájmové území je znázorněno na Obr. 10.



Obr. 10 Zájmové území.

Úkolem bylo ověřit dopad náhradních intenzit deště a jejich délky trvání na celkovém průběhu srážko-odtokového procesu. Pro tyto účely byl vytvořen srážko-odtokový model v programu HEC-HMS, na kterém byly náhradní intenzity dešťů testovány. Výsledkem by měl být průtok, který odpovídá přibližně návrhovému průtoku Q_{20} .

V rámci diplomové práce byly porovnávány deště s různou periodicitou a dobou trvání. Dále byly zkoumány návrhové stavy z bakalářské práce, které byly doporučeny na základě praktických zkušeností.

Doporučené návrhové stavy:

- Déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut.
- Déšť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut.

První návrhový stav je využíván zejména v projektech posuzující změnu odtoku dotčené plochy stavbou při projektování kanalizačních systémů. Druhý návrhový stav využívá především Povodí Odry. Tento návrhový stav by měl nejlépe vystihovat odtok, který by měl být návrhovým průtokem pro posuzování změny odtokových poměrů budováním zpevněných ploch a stanovení kompenzační akumulace mostků, lávek, propustků a zatrubnění budovaných na silničních příkopech, hlavních odvodňovacích příkopech náhonech a drobných vodních tocích.

Mimo těchto návrhových stavů byly zkoumány i další tak, aby co nejvíce odpovídaly požadovanému průtoku Q_{20} :

- Déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 10 až 30 minut.
- Déšť o periodicitě 0,02 s dobou trvání 10 až 30 minut.
- Déšť o periodicitě 0,05 s dobou trvání 20 až 60 minut.
- Déšť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 až 220 minut.

Pro všechny návrhové stavy byl navíc proveden výpočet průtoku zahrnující zjednodušený hypodermický odtok vody z povodí a transformace odtoku v říční síti. Hypodermický odtok byl uvažován jako zpožděná část odtoku, která se nachází ve svrchní vrstvě zemského povrchu.

Srážko-odtokový model je velmi citlivý na volbu vstupních parametrů. Při simulaci srážko-odtokového procesu je potřeba brát v úvahu mnoho proměnných, které tento proces přímo ovlivňují. Jedná se především o velikost a tvar povodí, sklonitost, hydrografickou síť, geologické a půdní vlastnosti, využití území a vegetace, intenzita a délka trvání srážek, nasycenost povodí a mimo jiné i teplota.

Základní parametry pro tvorbu srážko-odtokového modelu jsou:

Základní parametry povodí:

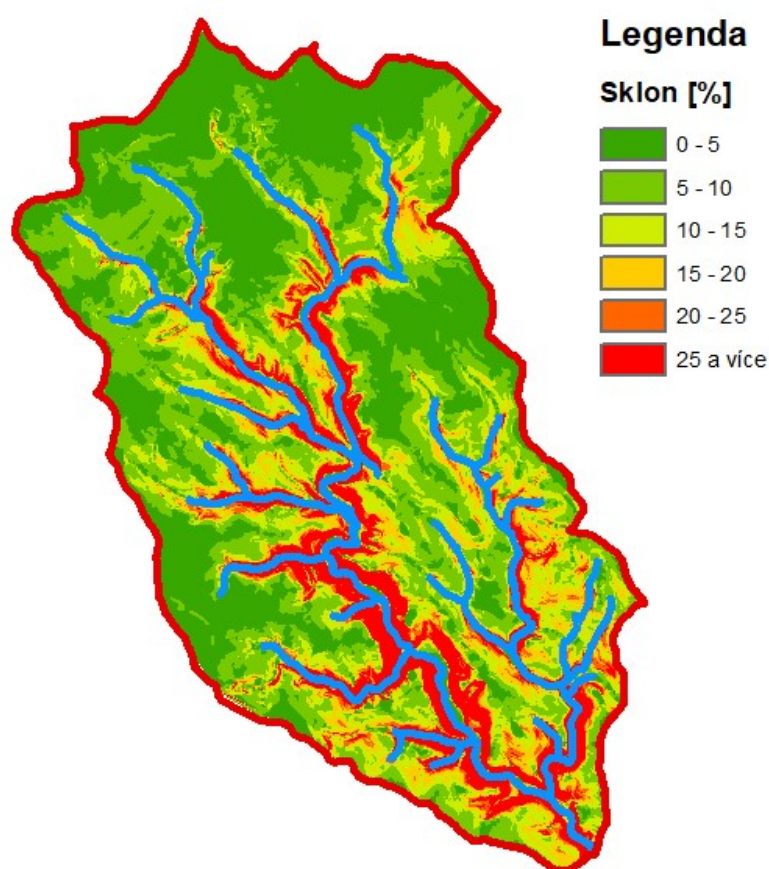
Jedná se o parametry, které přímo ovlivňují srážko-odtokový proces a při tvorbě srážko-odtokového modelu je nelze zanedbat.

- **Velikost povodí** – Výrazně ovlivňuje množství odtoku. Obecně by mělo platit, že s velikostí povodí roste i objem odtoku. Toto ovšem neplatí v případě kulminačních průtoků.

Tab. 1: Plocha jednotlivých povodí.

<i>Povodí</i>	<i>Plocha povodí</i> [km ²]
Malá Haná	30,92
Rakovec	6,67
Krásensko	4,89

- **Sklonitost povodí** – Má zásadní vliv na rychlost odtoku vody z povodí. Vyšší rychlost odtoku vody z povodí vede ke snížení infiltrace, což má za následek zvýšení objemu odtoku.



Obr. 11 Mapa sklonitosti povodí.

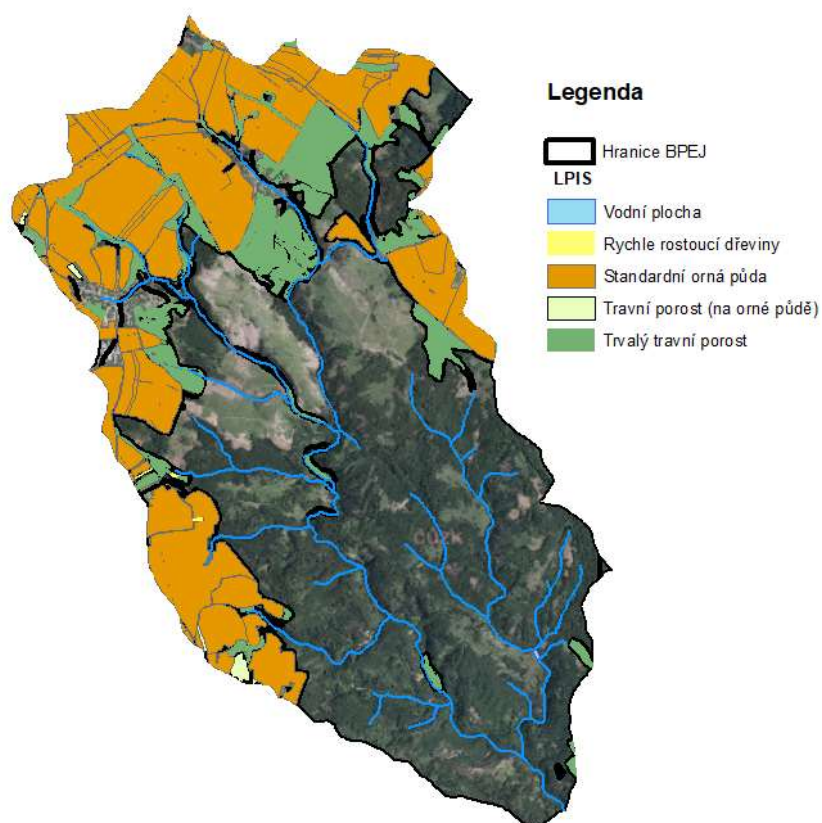
- **Další základní parametry** – Jedná se především o tvar povodí, hustotu říční sítě, délku toku a další. Všechny tyto parametry ovlivňují hlavně rychlost odtoku.

Využití území

Způsob využití území ovlivňuje zejména rychlost odtoku vody z povodí, akumulaci vody v povodí a její následnou infiltraci. Při simulaci srážko-odtokového procesu je nutné brát v úvahu zastoupení a využívání jednotlivých ploch. Z hlediska zadržení vody v krajině mají asi nejvýznamnější roli hlavně lesy díky své velké infiltrační schopnosti.

V rámci diplomové práce byla provedena analýza využití území. Analýza sloužila v první řadě pro určení hodnot čísel CN, která vyjadřují odtokový potenciál jednotlivých ploch. Tyto hodnoty byly použity pro metodu ztrát v programu HEC-HMS, která je popsána níže.

K získání informací o využití území byla použita databáze LPIS, která eviduje primárně využití zemědělské půdy. Dále byla použita databáze BPEJ, která slouží k hodnocení produkční schopnosti zemědělských půd a jejich nejvhodnějšímu využití. Rozdělení jednotlivých ploch charakterizuje mapa využití území, která se nachází na Obr. 12.



Obr. 12 Mapa využití území.

Zájmové území bylo rozděleno podle jednotlivých druhů ploch. Největší část tvoří lesní plochy, dále se zde nachází orná půda, trvalý travní porost, intravilán a další plochy, které nemají tak velké a významné zastoupení. Zastoupení jednotlivých ploch je znázorněno v Tab. 2–4.

Tab. 2: Využití území pro povodí Malá Haná.

Využití území - Malá Haná	Zastoupení jednotlivých ploch [%]
Intravilán	2,0
Trvalý travní porost	17,3
Orná půda	31,5
Les	49,2

Tab. 3: Využití území pro povodí Rakovec.

<i>Využití území - Rakovec</i>	<i>Zastoupení jednotlivých ploch [%]</i>
Orná půda	2,0
Trvalý travní porost	16,7
Les	81,3

Tab. 4: Využití území pro povodí Krásensko.

<i>Využití území - Krásensko</i>	<i>Zastoupení jednotlivých ploch [%]</i>
Intravilán	5,9
Trvalý travní porost	20,3
Les	22,6
Orná půda	51,2

Doba koncentrace

Doba koncentrace udává čas, za který srážka doteče z nejvzdálenějšího místa povodí do závěrového profilu. Pro stanovení doby koncentrace byla použita metoda využívající odhadu rychlostí. Rychlosti byly stanovovány na základě sklonitosti a drsnosti povrchu. V korytě toku se rychlosti pohybovaly v rozmezí 1,02 až 3,69 m/s, zatímco mimo koryto v rozmezí 0,6 – 1,0 m/s.

Výsledná doba koncentrace byla následně ještě upravena na základě kalibrace srážko-odtokového modelu v programu HEC-HMS. Do výpočtu byla použita doba koncentrace pro celé povodí Malá Haná, která byla stanovena na hodnotu 199 minut.

Nasycenost povodí

Při velké nasycenosti území roste i riziko výskytu zvýšeného povrchového odtoku, hlavně v případě přívalových srážek. Naopak při nízké nasycenosti území roste infiltrační schopnost území a tím dochází ke snížení povrchového odtoku.

Na základě druhu povrchu a způsobu jeho využití byly do výpočtu zahrnuty počáteční ztráty povodí. Počáteční ztráty se pohybovaly v rozmezí 5 až 30 mm.

Uvažované počáteční ztráty povodí:

- Intravilán a zpevněné plochy – počáteční ztráta 5 mm.
- Pole – počáteční ztráta 10 až 15 mm.
- Louky, pastviny – počáteční ztráta 15 až 20 mm.
- Lesní plochy – počáteční ztráta 25 až 30 mm.

Veškeré počáteční ztráty byly ještě upraveny při kalibraci srážko-odtokového modelu tak, aby bylo dosaženo požadovaného průtoku.

Intenzita deště

Do výpočtu byl použit blokový déšť s konstantní intenzitou a rozdílnou dobou trvání. Byly použity náhradní intenzity ze dvou rozdílných zdrojů.

V prvním případě byly použity náhradní intenzity dešťů z webové aplikace Rain, která umožňuje rychlé odvození návrhové srážky kdekoliv na území ČR. V druhém případě byly použity náhradní intenzity dešťů z Truplových tabulek, které mohou vzhledem k jejich stáří vykazovat ne úplně aktuální hodnoty.

- **Rain:**

Webová aplikace Rain poskytuje údaje o srážkách s periodicitou 0,5-0,01 (N_2 - N_{100}) kdekoliv na území ČR. (<https://rain1.fsv.cvut.cz/webapp/d-rain-point/>)

Použité náhradní intenzity dešťů z aplikace Rain jsou na základě jejich N -letostí uvedeny v Tab. 5–8.

Tab. 5: Náhradní intenzity pro N_{100} z aplikace Rain.

<i>N_{100} - Rain</i>					
<i>t</i> [min]	10	15	20	25	30
<i>i</i> [mm]	34,2	39,9	44,4	48,3	51,7

Tab. 6: Náhradní intenzity pro N_{50} z aplikace Rain.

<i>N_{50} - Rain</i>					
<i>t</i> [min]	10	15	20	25	30
<i>i</i> [mm]	30,6	35,4	39,3	42,6	45,5

Tab. 7: Náhradní intenzity pro N_{20} z aplikace Rain.

<i>N_{20} - Rain</i>					
<i>t</i> [min]	20	30	40	50	60
<i>i</i> [mm]	31,9	36,8	40,4	42,7	44,2

Tab. 8: Náhradní intenzity pro N_{10} z aplikace Rain.

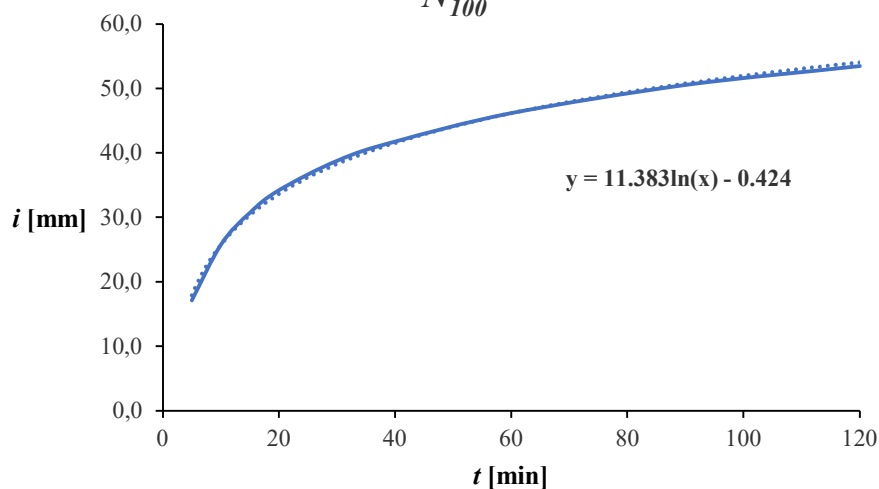
<i>N_{10} - Rain</i>										
<i>t</i> [min]	30	40	60	80	100	120	150	180	200	220
<i>i</i> [mm]	30,1	33,2	35,9	38	39,8	41,2	42,4	43,4	44,1	44,6

- **Truplovy tabulky:**

Truplovy tabulky obsahují data o srážkách s periodicitou do 0,05 (N_{20}) a dobou trvání do 120 minut. Proto bylo pro získání srážek s vyšší periodicitou a dobou trvání nutné provést extrapolaci pomocí logaritmické spojnice trendu. Graf pro výpočet deště o periodicitě 0,01 je zobrazen na Obr. 13.

Vyjádření logaritmické spojnice trendu pro

N_{100}



Obr. 13 Vyjádření logaritmické spojnice trendu.

Pro výpočet byla využita stanice č. 79 – Vyškov – Brňany. Náhradní intenzity deště získané z Truplových tabulek a pomocí jejich extrapolace jsou uvedeny v Tab. 9–12.

Tab. 9: Náhradní intenzity pro N_{100} z Truplových tabulek.

$N_{100} - \text{Trupl}$					
t [min]	10	15	20	25	30
i [mm]	25,8	30,8	34,2	36,2	38,8

Tab. 10: Náhradní intenzity pro N_{50} z Truplových tabulek.

$N_{50} - \text{Trupl}$					
t [min]	10	15	20	25	30
i [mm]	23,1	27,6	30,6	32,3	34,7

Tab. 11: Náhradní intenzity pro N_{20} z Truplových tabulek.

$N_{20} - \text{Trupl}$					
t [min]	20	30	40	50	60
i [mm]	26,2	29,5	31,7	33,3	34,8

Tab. 12: Náhradní intenzity pro N_{10} z Truplových tabulek.

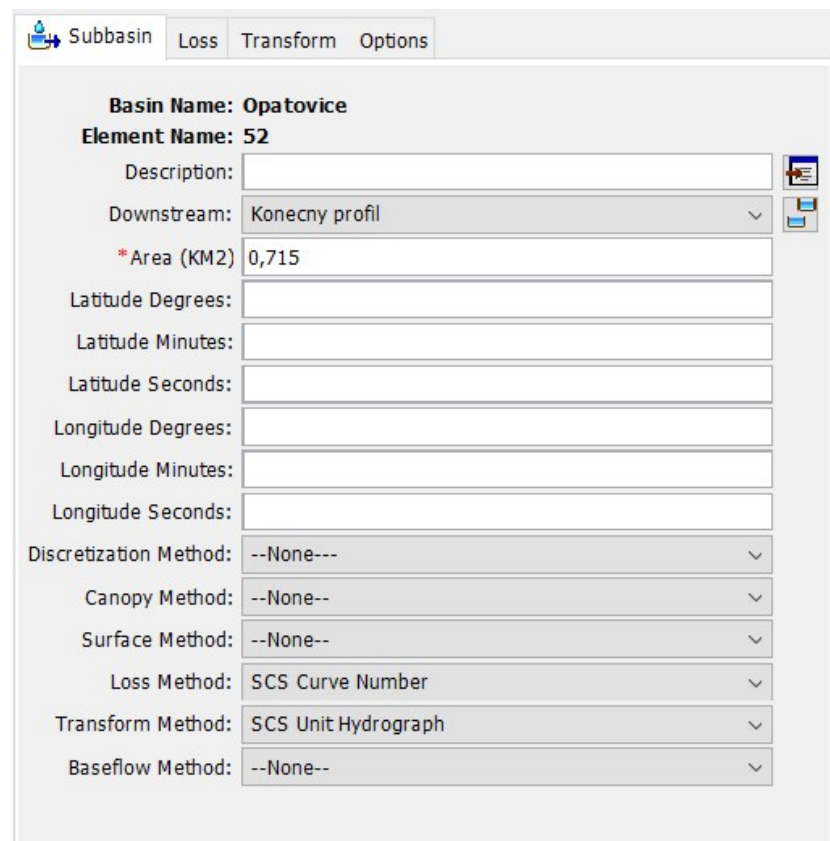
$N_{10} - \text{Trupl}$										
t [min]	30	40	60	80	100	120	150	180	200	220
i [mm]	25,0	26,6	29,2	31,2	32,7	34,3	35,5	36,8	37,5	38,2

Použité metody v HEC-HMS

V programu HEC-HMS bylo uvažováno s dvěma variantami výpočtu:

- **Varianta 1** – Metoda bez ovlivnění průtoku hypodermickým odtokem a transformací odtoku říční sítí.
- **Varianta 2** – Metoda zahrnující zjednodušený hypodermický odtok pro výpočet průtoku a transformaci odtoku říční sítí.

Pro výpočet varianty 1 bylo využito metody ztrát SCS Curve Number a transformační metody SCS Unit Hydrograph, která popisuje proces povrchového odtoku. Pro výpočet transformace v korytě vodního toku byla použita metoda zdržení (Lag). Nastavení použitých metod pro variantu 1 se nachází na Obr. 14.



The screenshot shows the 'Options' tab for a subbasin named 'Opatovice' with element name '52'. The configuration includes:

- Basin Name: Opatovice
- Element Name: 52
- Description: (empty)
- Downstream: Konecny profil
- * Area (KM2): 0,715
- Latitude Degrees: (empty)
- Latitude Minutes: (empty)
- Latitude Seconds: (empty)
- Longitude Degrees: (empty)
- Longitude Minutes: (empty)
- Longitude Seconds: (empty)
- Discretization Method: --None---
- Canopy Method: --None--
- Surface Method: --None--
- Loss Method: SCS Curve Number
- Transform Method: SCS Unit Hydrograph
- Baseflow Method: --None--

Obr. 14 Nastavené metody v HEC-HMS pro variantu 1.

V případě varianty 2 byla využita kromě metody ztrát SCS Curve Number a transformační metody SCS Unit Hydrograph navíc i metoda popisující základní odtok metodou lineární nádrže Linear Reservoir. Pro výpočet transformace v korytě vodního toku byla použita metoda zdržení, která pracuje dále s koeficientem K (Lag&K). Nastavení použitých metod pro variantu 2 se nachází na Obr. 15.

Obr. 15 Nastavené metody v HEC-HMS pro variantu 2.

- **SCS Curve Number (metoda ztrát):**

Metoda pracující se křivkami CN, které vyjadřují odtokový potenciál daného území. Číslo CN se odvíjí podle typu a vlastnosti půdy. Správné určení čísla je velice obtížné a jeho odhad značně ovlivňuje výsledek simulace. Pro každé dílčí povodí bylo zvoleno průměrné číslo CN na základě databáze LPIS a BPEJ.

Hodnoty čísel CN byly určeny na základě hydrologické skupiny půd, která rozděluje půdy do čtyř skupin na základě jejich infiltračních schopností. Tato tabulka je zobrazena na Obr. 16.

Hydrologická Skupina	Charakteristika hydrologických vlastností půd
A	Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ($> 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky nebo šterky
B	Půdy se střední rychlostí infiltrace ($0,06 - 0,12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité
C	Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ($0,02 - 0,06 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité
D	Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ($< 0,02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jily s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jilu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím.

Obr. 16 Hydrologické skupiny půd. [14]

Pro správné určení hydrologické skupiny půd byla použita databáze BPEJ, která obsahuje informace o hlavní půdní jednotce (HPJ). Každé hlavní půdní jednotce byla přiřazena hydrologická skupina půd podle tabulky na Obr. 17.

HPJ (2. a 3. č. BPEJ)	Hydrologická půdní skupina	HPJ (2. a 3. č. BPEJ)	Hydrologická půdní skupina	HPJ (2. a 3. č. BPEJ)	Hydrologická půdní skupina
1	B	27	B	53	D
2	B	28	B	54	D
3	C	29	B	55	A
4	A	30	B	56	B
5	A	31	A	57	C
6	C	32	A	58	C
7	D	33	B	59	D
8	B	34	B	60	B
9	B	35	B	61	D
10	B	36	B	62	C
11	B	37	B	63	D
12	B	38	B	64	C
13	B	39	C	65	C
14	B	40	B	66	D
15	B	41	B	67	D
16	B	42	B	68	D
17	A	43	B	69	D
18	B	44	C	70	D
19	B	45	C	71	D
20	D	46	C	72	D
21	A	47	C	73	D
22	B	48	C	74	D
23	C	49	D	75	C
24	B	50	C	76	D
25	B	51	C	77	C
26	B	52	C	78	C

Obr. 17 Hydrologické skupiny půd podle HPJ. [14]

Následně byla podle způsobu využití půdy a získaných informací o hydrologických vlastnostech půd určena průměrná hodnota čísla CN pro všechny dílčí plochy. Čísla CN byla odhadnuta na základě tabulky, která se nachází na Obr. 18.

Využití půdy	Způsob obdělávání	Hydrologické podmínky	Čísla odtokových křivek – CN podle hydrologických skupin půd			
			A	B	C	D
Úhor, čerstvě kypřený	Pz	Šp	77	86	91	94
		Dp	76	85	90	93
Širokořádkové plodiny (okopaniny)	Pr	Šp	72	81	88	91
	Pr	Db	67	78	85	89
	Pr + Pz	Šp	71	80	87	90
	Pr + Pz	Db	64	75	82	85
	Vř	Šp	70	79	84	88
	Vř	Db	65	75	82	86
	Vř + Pz	Šp	69	78	83	87
	Vř + Pz	Db	64	74	81	85
	Vř + Pr	Sp	66	74	80	82
	Vř + Pr	Db	62	71	78	81
	Vř + Pr + Pz	Šp	65	73	79	81
	Vř + Pr + Pz	Db	61	70	77	80
Úzkořádkové plodiny (obilniny)	Pr	Šp	65	76	84	88
	Pr	Db	63	75	83	87
	Pr + Pz	Šp	64	75	83	86
	Pr + Pz	Db	60	72	80	84
	Vř	Šp	63	74	82	85
	Vř	Db	61	73	81	84
	Vř + Pz	Šp	62	73	81	84
	Vř + Pz	Db	60	72	80	83
	Vř + Pr	Sp	61	72	79	82
	Vř + Pr	Db	59	70	78	81
	Vř + Pr + Pz	Šp	60	71	78	81
	Vř + Pr + Pz	Db	58	69	77	80
Víceleté pícniny, luštěniny	Pr	Šp	66	77	85	89
	Pr	Db	58	72	81	85
	Vř	Šp	64	75	83	85
	Vř	Db	55	69	78	83
	Vř + Pz	Šp	63	73	80	83
	Vř + Pz	Db	51	67	76	80
Pastviny s pokryvem	< 50 %	-	68	79	86	89
	50 - 75 %	-	49	69	79	84
	> 75 %	-	39	61	74	80
Louky	Sklizené	-	30	58	71	78
Křoviny s pokryvem	< 50 %	-	48	67	77	83
	50 - 75 %	-	35	56	70	77
	> 75 %	-	30	48	65	73
Sady se zatravněným meziřadím		Šp	57	73	82	86
		Str.	43	65	76	82
		Db	32	58	72	79
Lesy		Šp	45	66	77	83
		Str.	36	60	73	79
		Db	30	55	70	77
Zemědělské dvory		-	59	74	82	86
Komunikace s příkopy	dlážděné, živičné, makadamové, šterkové,		83	89	92	93
	nezpevněné, hliněné		76	85	89	91
			72	82	87	89
Nepropustné plochy			98	98	98	98

Obr. 18 Průměrná čísla CN. [14]

V rámci schematizace bylo povodí rozděleno na dílčí povodí. Pro každé dílčí povodí byla stanovena hodnota CN, která byla použita při výpočtu v programu HEC-HMS. Hodnoty odtokových křivek CN jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Číslo CN pro dílčí povodí.

Povodí	Číslo CN	Povodí	Číslo CN	Povodí	Číslo CN	Povodí	Číslo CN
1	72,6	14	69	27	62	40	60
2	78,1	15	62	28	60	41	60
3	63,5	16	63	29	60	42	60
4	77,0	17	68	30	60	43	60
5	62,1	18	70	31	60	44	60
6	60,0	19	60	32	60	45	61
7	80,4	20	60	33	60	46	59
8	75,7	21	73	34	67	47	49
9	68,5	22	60	35	60	48	61
10	78,4	23	60	36	60	49	60
11	67,9	24	60	37	60	50	60
12	68,8	25	70	38	60	51	60
13	62,5	26	61	39	60	52	61

Nastavení metody ztrát včetně počátečních ztrát povodí je zobrazeno na Obr. 19.

Subbasin Loss Transform Options

Basin Name: Opatovice
Element Name: 52

Initial Abstraction (MM) 25

*Curve Number: 61

*Impervious (%) 0,0

Obr. 19 Nastavení metody ztrát.

- **SCS Unit Hydrograph (transformační metoda):**

Metoda určuje procentuální množství odtoku, které nastane před dosažením kulminace. Pro účely simulace bylo počítáno se standardním jednotkovým hydrogramem (PRF 484), který počítá s hodnotou 37,5 %.

Dalším parametrem transformační metody je doba koncentrace odtoku (Lag time) v minutách. Tato metoda nepředpokládá transformace povodňové vlny v údolní nivě.

Nastavení transformační metody SCS Unit Hydrograph je zobrazeno na Obr. 20.

Subbasin Loss Transform Baseflow Options

Basin Name: Opatovice
Element Name: 52

Graph Type: Standard (PRF 484)

*Lag Time (MIN) 62

Obr. 20 Nastavení transformační metody.

- **Linear reservoir (základní odtok metodou lineární nádrže):**

Metoda zvolená pro zahrnutí hypodermického odtoku. Lineární nádrže slouží k simulaci částečné infiltrace návrhových srážek. Metoda je tvořena ztrátovým koeficientem, který se pohyboval v závislosti na druhu a velikosti území od 0,15 do 0,5, a dobou doběhu hypodermického odtoku, který byl zvolen jako násobek hodnoty Lag time. Nastavení metody Linear reservoir je znázorněno na Obr. 21.

Obr. 21 Nastavení metody Linear reservoir.

- **Routing method (metoda směrování):**

Metoda popisuje transformace v korytě vodního toku. V případě výpočtu varianty bez ovlivnění průtoků hypodermickým odtokem byla zvolena zjednodušující metoda zdržení Lag, která je zobrazena na Obr. 22.

Obr. 22 Nastavení metody Lag.

V případě výpočtu varianty se zahrnutím ovlivnění průtoků hypodermickým odtokem byla zvolena metoda Lag & K. Metoda se skládá z doby zdržení a koeficientu K, který způsobuje posunutí povodňové vlny. Nastavení metody Lag & K se nachází na Obr. 23.

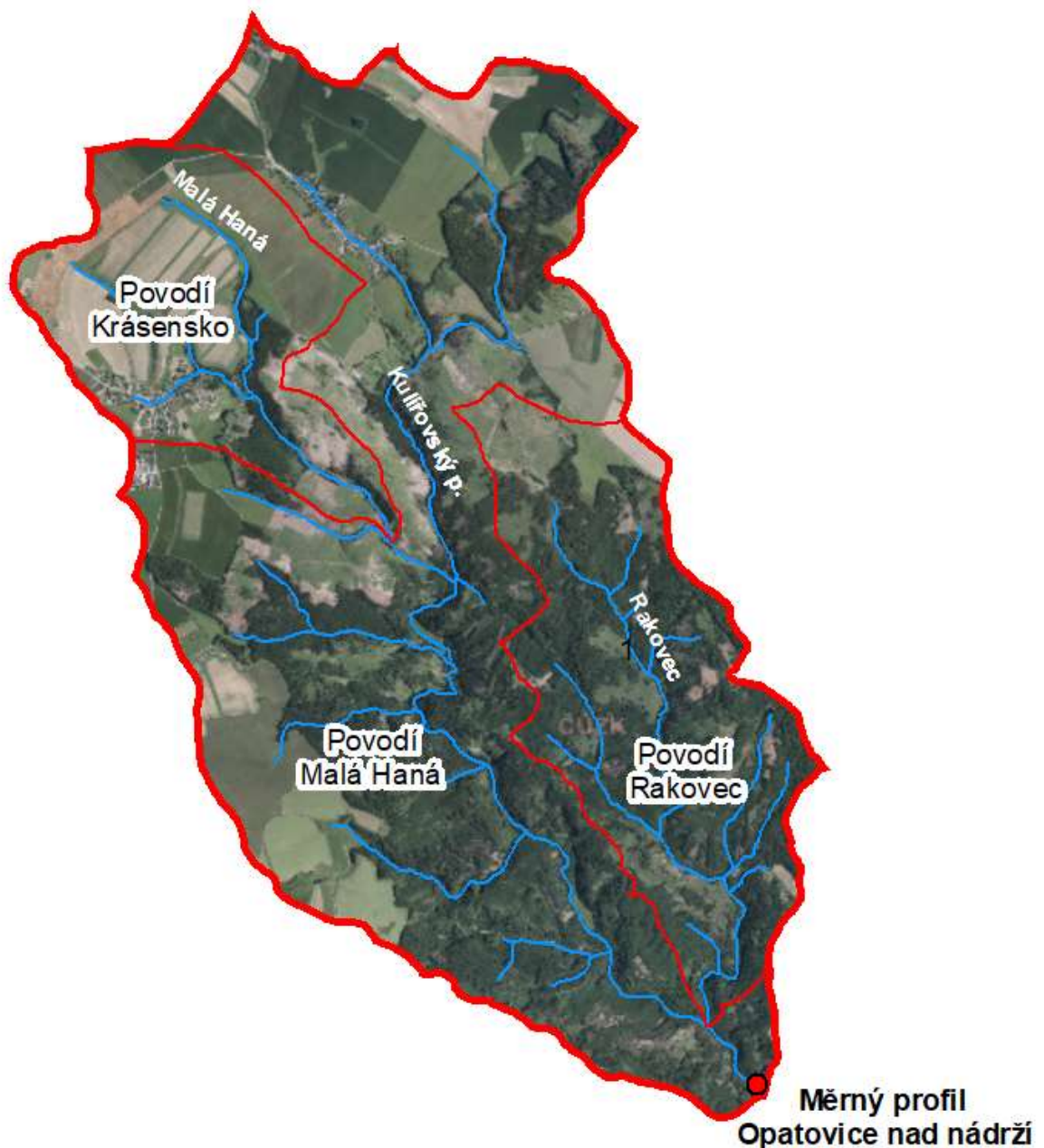
Obr. 23 Nastavení metody Lag & K.

4.1 Zájmové území

Zájmové území se nachází v Jihomoravském kraji v okrese Vyškov nedaleko vodní nádrže Opatovice. Řešené území tvoří povodí Malá Haná, které je uvažováno od pramene vodního toku Malá Haná po měrný profil stanice Opatovice nad nádrží. Pro tento měrný profil byla od ČHMÚ získána data o hodnotách N-letých kulminačních průtoků.

Součástí povodí Malá Haná jsou další dvě menší povodí, které byly součástí simulace srážko-odtokového procesu. Jedná se o povodí Krásensko a povodí Rakovec. Pro tato povodí byly od ČHMÚ získány informace o kulminačních průtocích na základě výpočtů s využitím statistických metod.

Mapa řešeného povodí je zobrazena na Obr.24.



Obr. 24 Zájmové území Malá Haná.

Povodí Malá Haná

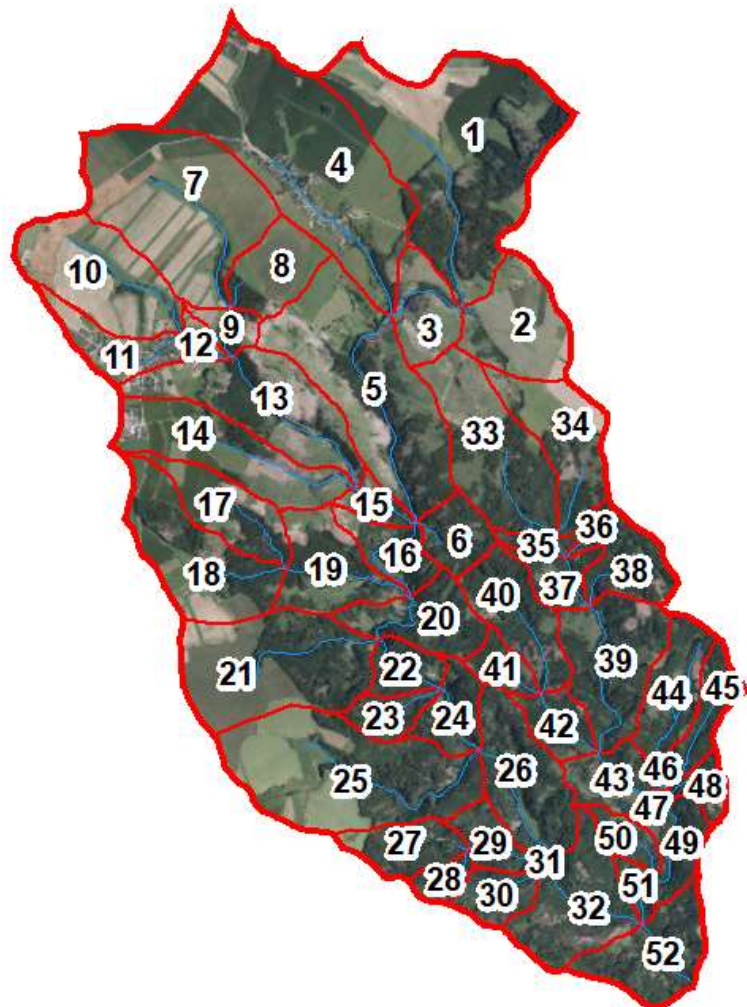
Povodí je tvořeno hlavně vodním tokem Malá Haná, který pramení severně od obce Krásensko u vrchu Kojál. Vodní tok tvoří kromě většího počtu bezjmenných přítoků i potok Rakovec a Kulířovský potok.

Terén v území je převážně členitý nebo svažité. Na velké části území se nachází lesy (49,2 %). Zbytek ploch tvoří orná půda (31,5 %), trvalý travní porost (17,3 %) a okrajově i intravilán obce Krásensko a Kulířov (2 %).

Na Obr. 24 je znázorněné řešené povodí. Jedná se území od pramene vodního toku Malá Haná po měrný profil stanice Opatovice nad nádrží. Tlustá červená čára vymezuje zájmové území Malá Haná a červená tečka označuje měrný profil. Dílčí povodí Krásensko a Rakovec jsou vymezena tenkou červenou čarou.

Schematizace

Nejprve proběhla prvotní schematizace v programu ArcMap, kde byly zjištěny základní vlastnosti a parametry povodí. Následně byla provedena schematizace v programu HEC-HMS. Vzhledem k členitosti celého území bylo povodí rozděleno na 52 menších dílčích povodí. Rozdělení na jednotlivá dílčí povodí je zobrazeno na Obr. 25 a parametry povodí jsou uvedeny v Tab. 14.

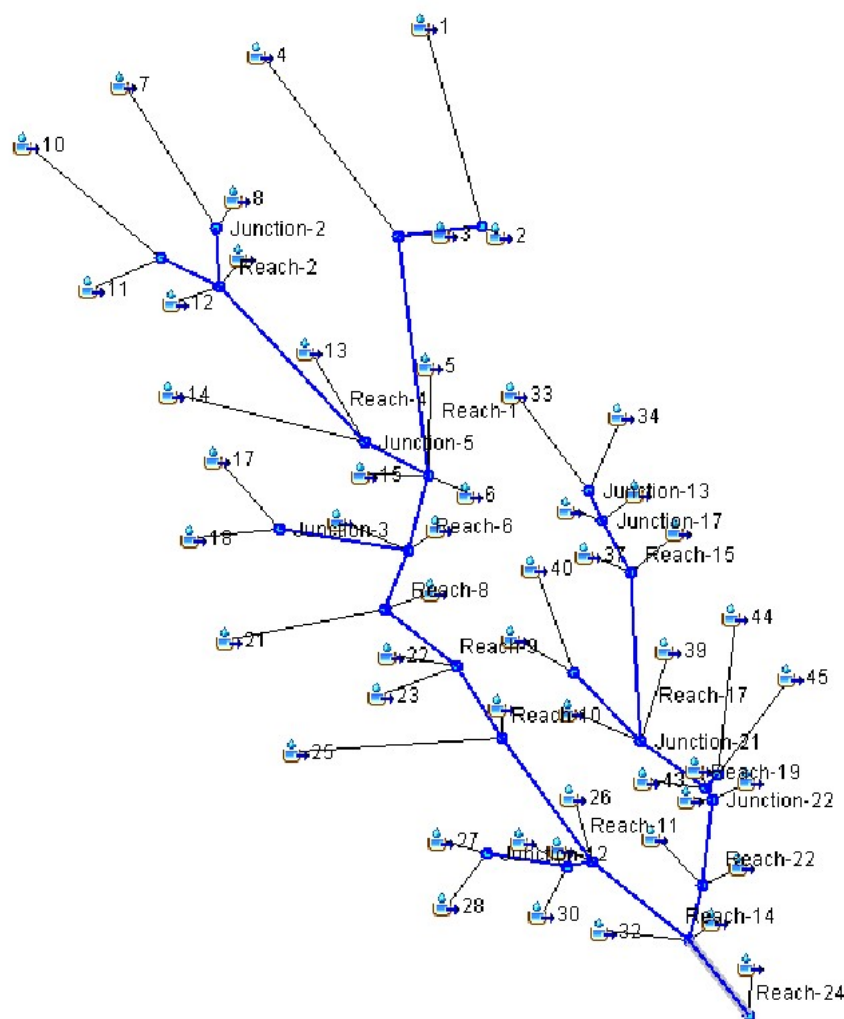


Obr. 25 Schematizace povodí v ArcMap.

Tab. 14: Parametry povodí Malá Haná.

<i>Povodí</i>	<i>Plocha [km²]</i>	<i>Délka toku [m]</i>	<i>CN</i>	<i>Doba koncentrace povodí [min]</i>	<i>Doba koncentrace vodního toku [min]</i>	<i>Povodí</i>	<i>Plocha [km²]</i>	<i>Délka toku [m]</i>	<i>CN</i>	<i>Doba koncentrace povodí [min]</i>	<i>Doba průchodu vodním tokem [min]</i>
1	2,521	1731	73	73	22	27	0,389	105	62	61	1
2	0,747	635	78	37	7	28	0,151	343	60	37	2
3	0,427	784	63	27	8	29	0,257	615	60	41	4
4	2,306	1825	77	72	20	30	0,289	419	60	39	2
5	1,696	2109	62	52	25	31	0,015	153	60	13	1
6	0,309	313	60	38	2	32	0,818	1111	60	54	17
7	1,726	1519	80	52	16	33	1,042	963	60	68	9
8	0,457	301	76	39	2	34	0,747	637	67	60	5
9	0,162	481	68	28	5	35	0,109	207	60	35	2
10	0,986	1373	78	41	13	36	0,093	214	60	35	1
11	0,398	604	68	47	4	37	0,242	487	60	40	6
12	0,106	535	69	21	5	38	0,427	607	60	36	4
13	1,054	1628	62	51	18	39	0,855	1501	60	50	16
14	0,922	1455	69	51	12	40	0,579	952	60	43	9
15	0,160	609	62	24	8	41	0,196	479	60	29	4
16	0,320	1021	63	34	14	42	0,281	748	60	27	7
17	0,521	730	68	48	5	43	0,353	657	60	32	8
18	0,985	669	70	61	5	44	0,533	1308	60	39	9
19	0,620	1132	60	51	10	45	0,336	991	61	36	6
20	0,533	737	60	43	11	46	0,012	120	59	9	1
21	1,337	1362	73	47	9	47	0,020	109	49	11	1
22	0,257	761	60	35	12	48	0,190	386	61	39	2
23	0,224	542	60	34	2	49	0,350	865	60	36	9
24	0,329	655	60	28	9	50	0,188	516	60	40	3
25	1,732	2007	70	47	16	51	0,117	530	60	29	6
26	0,782	1278	61	46	18	52	0,715	789	61	62	13

V programu HEC-HMS byla nejprve provedena základní schematizace povodí v části Basin Model Manager. Pro schematizaci byly zvoleny prvky Subbasin, Reach a Junction. Nastavení těchto prvků je popsáno v kapitole Použité metody v HEC-HMS. Schematizace povodí v HEC-HMS je zobrazena na Obr. 26.



Obr. 26 Basin model povodí Malá Haná.

Po dokončení základní schematizace a nastavení metod v Basin Model Manager byla v části Meteorologic Model Manager definována srážka. Byla použita metoda Specified Hyetograph, pro kterou byla vytvořena časová řada intenzit deště. Časová řada je blíže definovaná a nastavená v části Time-Series Data Manager. Náhradní intenzity dešťů použité při simulaci jsou zmíněny v kapitole Intenzita deště.

Pro zaručení funkčnosti simulace modelu bylo ještě potřeba nastavit časové okno v části Control Specifications Manager, které musí souhlasit s daty z části Time-Series Data.

Povodí Rakovec

Území od pramene potoku Rakovec, který je levostranným přítokem řeky Malá Haná. Terén je převážně svažité a převažují zde jehličnaté a místy smíšené lesy (81,3 %). Na zbytku území se nachází trvalý travní porost (16,7 %) a ve velmi malém množství i orná půda (2 %).

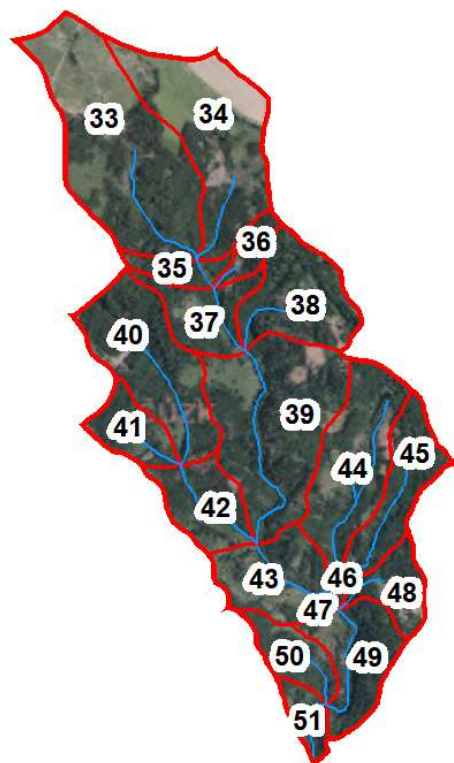
Řešená část povodí je zobrazena na Obr. 27. Jedná se o území od pramene vodního toku Rakovec po soutok s vodním tokem Malá Haná. Tlustá červená čára vymezuje zájmové území.



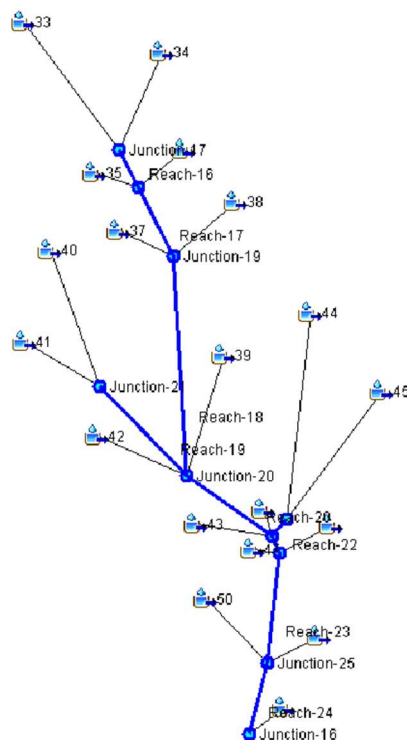
Obr. 27 Povodí Rakovec.

Schematizace

Schematizace byla provedena v rámci řešení povodí Malá Haná jako celek. Veškeré použité srážky a metody byly nastaveny pro celé povodí. Dílčí povodí Rakovec a Krásensko sloužily především pro účely kalibrace a ověření funkčnosti srážko-odtokového modelu. Detailnější rozdělení na dílčí povodí v programu ArcMap se nachází na Obr. 28 a schematizace v programu HEC-HMS na Obr. 29.



Obr. 28 Schematizace povodí Rakovec v ArcMap.



Obr. 29 Schematizace povodí Rakovec v HEC-HMS.

Povodí Krásensko

Jedná se o část území, kde pramenní vodní tok Malá Haná. Většinu území tvoří zemědělské plochy (51,2 %), dále se zde nachází množství zatravněných ploch (20,3 %), lesů (22,6 %) a část území tvoří intravilán obce Krásensko (5,9 %).

Řešená část území je zobrazena na Obr. 30, kde se nachází území od pramene vodního toku Malá Haná po soutok s Kulířovským potokem. Povodí vymezuje tlustá červená čára.



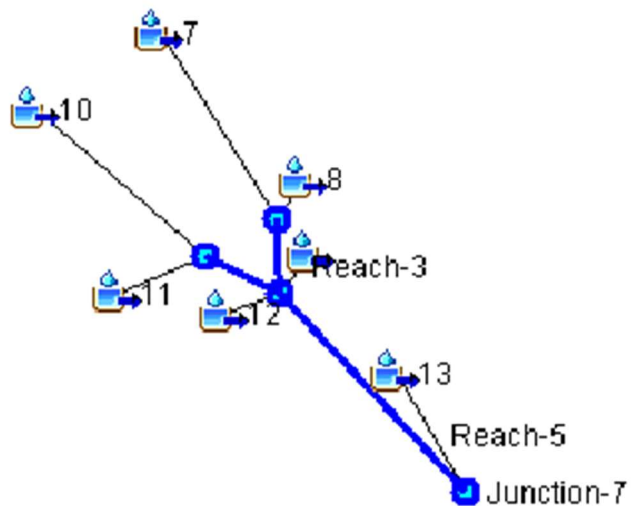
Obr. 30 Povodí Krásensko.

Schematizace

Stejně jako u povodí Rakovec byla schematizace společně s výpočtem provedena v rámci řešení povodí Malá Haná. Rozdělení na dílčí povodí v programu ArcMap se nachází na Obr. 31 a schematizace v programu HEC-HMS na Obr. 32.



Obr. 31 Schematizace v povodí Krásensko v ArcMap.



Obr. 32 Schematizace povodí Krásensko v HEC-HMS.

Kalibrace modelu

Varianta 1

K ověření správného fungování srážko-odtokového modelu bylo nutné provést kalibraci nastavovaných parametrů. Vzhledem k velkým rozdílům v hodnotách náhradních intenzit dešťů byla pro zajištění totožných podmínek simulace provedena kalibrace na blokový déšť z aplikace Rain i Truplových tabulek.

Nejprve byla provedena kalibrace na srážko-odtokový model, který využívá základních metod a nezahrnuje vliv hypodermického odtoku a transformaci odtoku říční sítí. Pro tuto variantu spočívala kalibrace především v nastavení počátečních ztrát povodí vlivem infiltrace a úpravou doby koncentrace. Kalibrované hodnoty zůstaly neměnné i pro variantu se zahrnutím zjednodušeného hypodermického odtoku.

Původně měla být varianta kalibrována na průtok Q_{10} , aby byly ve výpočtu co nejvíce zohledněny rozlivy. Při kalibraci na tento návrhový průtok bylo nutné zadat velmi nereálné hodnoty. Proto byla kalibrace provedena na návrhový průtok Q_5 , kde bylo dosaženo vyšší shody. Výsledky kalibrace pro variantu 1 jsou uvedeny v Tab. 15.

Tab. 15: Výsledky kalibrace pro variantu 1.

Srážkový úhrn [mm]	Rain	Trupl
	36,2	30,2
Povodí Malá Haná		
Návrhový průtok (HEC-HMS) [m^3/s]	7	7,1
Návrhový průtok (Povodí Moravy) [m^3/s]	7	
Povodí Rakovec		
Návrhový průtok (HEC-HMS) [m^3/s]	1,8	1,9
Návrhový průtok (Povodí Moravy) [m^3/s]	1,8	
Povodí Krásensko		
Návrhový průtok (HEC-HMS) [m^3/s]	1,6	1,5
Návrhový průtok (Povodí Moravy) [m^3/s]	1,5	

Varianta 2

Pro kalibraci srážko-odtokového modelu zahrnujícího hypodermický odtok a transformaci odtoku říční sítí bylo využito použitých parametrů z varianty 1. Mimo těchto parametrů spočívala kalibrace ve správném nastavení ztrátového koeficientu GW 1 Fraction a doby doběhu podzemního odtoku GW 1 Coefficient. Dále bylo nutné vhodně nastavit koeficient K (metoda Lag&K), který transformuje povodňovou vlnu.

Na rozdíl od varianty 1 byla provedena kalibrace na návrhový průtok Q_{10} . Přístup obou variant je velmi odlišný, a proto budou porovnávány jen výsledky variant, kde bude skutečnost, že každá z variant byla kalibrována na jinou N-letou vodu, zanedbána. Výsledky kalibrace pro variantu 2 jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 16: Výsledky kalibrace pro variantu 2.

Srážkový úhrn [mm]	Rain	Trupl
		44
<i>Povodí Malá Haná</i>		
Návrhový průtok (HEC-HMS) [m ³ /s]	9,7	9,7
Návrhový průtok (Povodí Moravy) [m ³ /s]	9,7	
<i>Povodí Rakovec</i>		
Návrhový průtok (HEC-HMS) [m ³ /s]	2,8	2,8
Návrhový průtok (Povodí Moravy) [m ³ /s]	2,8	
<i>Povodí Krásensko</i>		
Návrhový průtok (HEC-HMS) [m ³ /s]	2,5	2,5
Návrhový průtok (Povodí Moravy) [m ³ /s]	2,5	

4.2 Výsledky

Po dokončení kalibrace a otestování funkčnosti modelu byla provedena simulace srážko-odtokového procesu v programu HEC-HMS. Simulace byla nastavena pomocí Simulation Run Manager, kde bylo zapotřebí vhodně zvolit Basin model, Meteorologic model a Control specifications.

V rámci práce byly zkoumané dvě varianty výpočtů. Varianta 1 zahrnovala pouze jednoduché metody a nebrala v potaz vliv hypodermického odtoku a transformací odtoku říční sítí, zatímco varianta 2 ano. Dále byly zkoumány návrhové stavy z bakalářské práce, kde byl zkoumán především déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut a déšť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut.

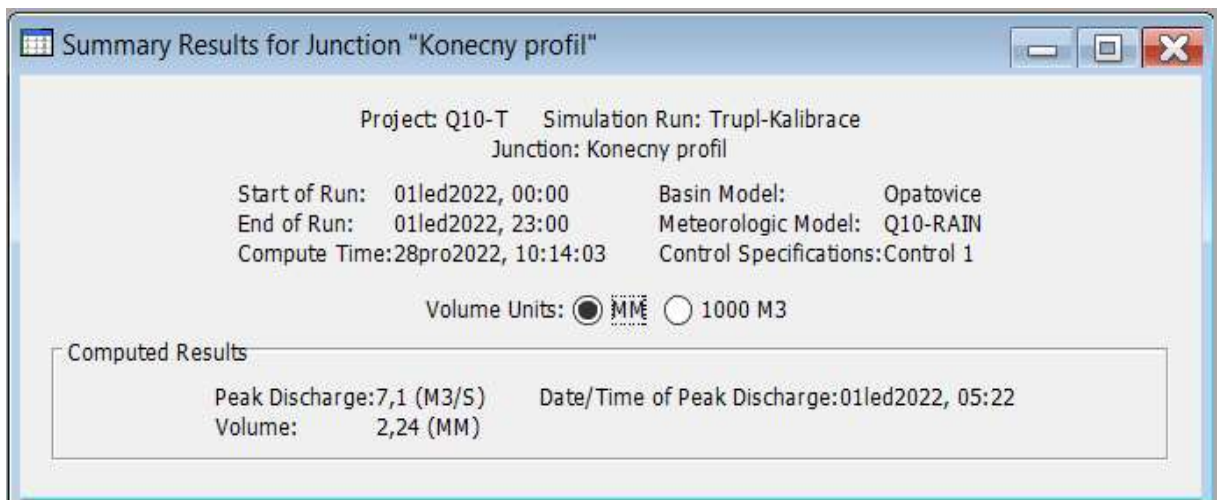
Výstupní data:

- Global Summary – Popisuje řešenou plochu [km²], kulminační průtok [m³/s], čas dosažení kulminace a celkový objem odtoku [m³]. Na Obr. 33 je zobrazeno celkové shrnutí pro kalibraci na blokový déšť z Truplových tabulek.

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
47	0,020	0,0	01led2022, 03:21	0,82
Junction-24	6,015	1,8	01led2022, 03:48	2,17
Reach-23	6,015	1,8	01led2022, 03:57	2,17
49	0,350	0,1	01led2022, 03:36	1,25
Junction-25	6,553	1,9	01led2022, 03:55	2,10
50	0,188	0,0	01led2022, 03:39	1,25
Rakovec	6,553	1,9	01led2022, 04:01	2,10
32	0,818	0,2	01led2022, 03:49	1,25
51	0,117	0,0	01led2022, 03:31	1,25
Junction-16	30,206	7,0	01led2022, 05:10	2,27
Reach-25	30,206	7,0	01led2022, 05:23	2,27
52	0,715	0,1	01led2022, 03:56	1,27
Konecny profil	30,921	7,1	01led2022, 05:22	2,24

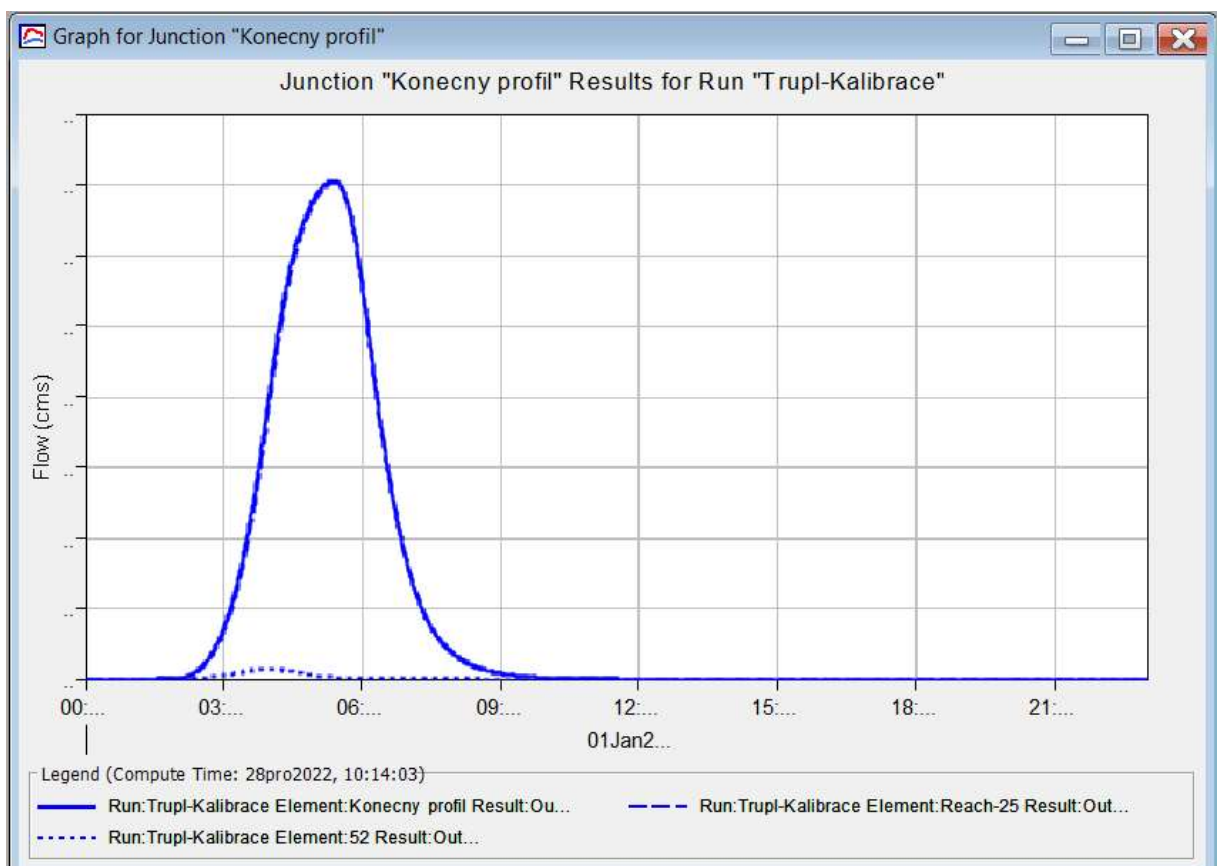
Obr. 33 Global summary pro kalibraci varanty 1 (Trupl).

- Summary table – Charakterizuje základní parametry vybraného povodí nebo prvku. Na Obr. 34 jsou znázorněny parametry pro konečný profil při kalibraci (Trupl).



Obr. 34 Summary table pro kalibraci jednoduchých metod (Trupl).

- Graph – Popisuje výslednou povodňovou vlnu v daném úseku. Graf pro konečný profil povodí při kalibraci varianty 1 (Trupl) se nachází na Obr. 35.



Obr. 35 Graph pro kalibraci varianty 1 (Trupl).

- Time-Series table – V tabulkové podobě poskytuje stejné hodnoty, z kterých je vytvořen graf. Vybrané časové údaje pro graf z Obr. 35 jsou pro představu uvedeny na Obr. 36.

Time-Series Results for Junction "Konecny profil"

Project: Q10-T Simulation Run: Trupl-Kalibrace
Junction: Konecny profil

Start of Run: 01led2022, 00:00 Basin Model: Opatovice
End of Run: 01led2022, 23:00 Meteorologic Model: Q10-RAIN
Compute Time: 28pro2022, 10:14:03 Control Specifications: Control 1

Date	Time	Inflow from ... (M3/S)	Inflow from 52 (M3/S)	Outflow (M3/S)
01led2022	04:36	6,2	0,1	6,2
01led2022	04:37	6,2	0,1	6,3
01led2022	04:38	6,2	0,1	6,3
01led2022	04:39	6,3	0,1	6,3
01led2022	04:40	6,3	0,1	6,4
01led2022	04:41	6,3	0,1	6,4
01led2022	04:42	6,4	0,1	6,4
01led2022	04:43	6,4	0,1	6,5
01led2022	04:44	6,4	0,1	6,5
01led2022	04:45	6,4	0,1	6,5
01led2022	04:46	6,5	0,1	6,5
01led2022	04:47	6,5	0,1	6,6
01led2022	04:48	6,5	0,1	6,6
01led2022	04:49	6,6	0,1	6,6
01led2022	04:50	6,6	0,1	6,6
01led2022	04:51	6,6	0,1	6,7
01led2022	04:52	6,6	0,1	6,7
01led2022	04:53	6,7	0,1	6,7
01led2022	04:54	6,7	0,1	6,7
01led2022	04:55	6,7	0,1	6,8
01led2022	04:56	6,7	0,1	6,8
01led2022	04:57	6,8	0,1	6,8
01led2022	04:58	6,8	0,0	6,8
01led2022	04:59	6,8	0,0	6,8
01led2022	05:00	6,8	0,0	6,9
01led2022	05:01	6,8	0,0	6,9
01led2022	05:02	6,8	0,0	6,9
01led2022	05:03	6,9	0,0	6,9

Obr. 36 Time-Series table pro graf z Obr. 35.

4.2.1 Povodí Malá Haná

Pro povodí byla zkoumána závislost pro získání průtoku $Q_{20}=12,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Hodnoty N-letých průtoků povodí Malá Haná jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17: N-leté průtoky povodí Malá Haná.

<i>Povodí</i>	<i>Plocha povodí [km²]</i>	<i>Q₁ [m³/s]</i>	<i>Q₅ [m³/s]</i>	<i>Q₁₀ [m³/s]</i>	<i>Q₂₀ [m³/s]</i>	<i>Q₅₀ [m³/s]</i>	<i>Q₁₀₀ [m³/s]</i>
Malá Haná	30,92	2,3	7	9,7	12,8	17,6	21,5

Varianta 1 – Metoda bez zahrnutí zjednodušeného hypodermického odtoku a transformací odtoku říční sítí.

- Déšť o periodicitě 0,01.

Tab. 18: Výsledné průtoky pro N_{100} .

<i>N₁₀₀</i>		<i>Q [m³/s]</i>	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
<i>t [min]</i>	10	6,8	5,4
	15	11,9	9,5
	20	16,8	12,8
	25	21,5	14,9
	30	25,9	17,8

- Déšť o periodicitě 0,02.

Tab. 19: Výsledné průtoky pro N_{50} .

<i>N₅₀</i>		<i>Q [m³/s]</i>	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
<i>t [min]</i>	10	4,3	3,6
	15	7,8	6,7
	20	11,3	9,3
	25	14,7	10,8
	30	18	13,2

- Déšť o periodicitě 0,05.

Tab. 20: Výsledné průtoky pro N_{20} .

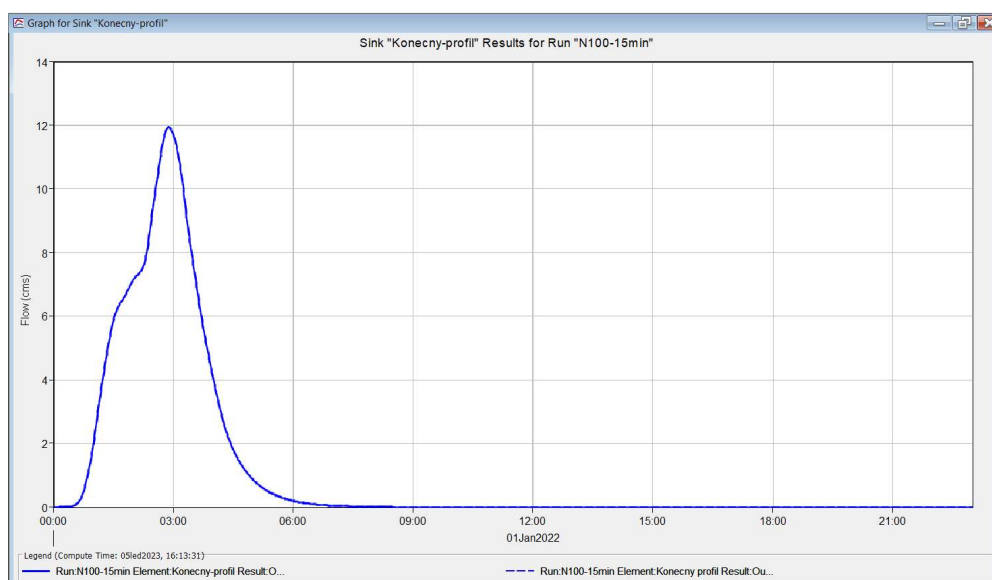
<i>N₂₀</i>		<i>Q [m³/s]</i>	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
<i>t [min]</i>	20	5,1	5,7
	30	8,9	8,3
	40	12,3	10,2
	50	14,6	11,6
	60	16,1	13

- Děšť o periodicitě 0,1.

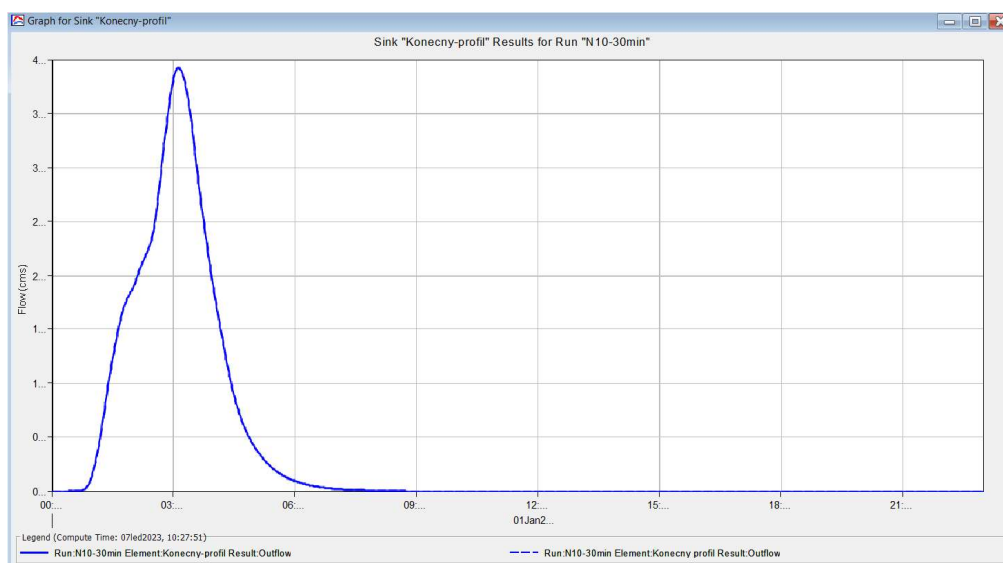
Tab. 21: Výsledné průtoky pro N_{10} .

N_{10}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	3,9	4,8
	60	8	7,8
	120	12	11,4
	180	12,9	12,4
	220	13,2	12,9

Na Obr. 37 se nachází graf znázorňující kulminační průtok povodí Malá Haná pro první návrhový stav ($p=0,01$ a $t=15$ min) a na Obr. 38 pro druhý návrhový stav ($p=0,1$ a $t=30$ min). Pro výpočet byla použita varianta 1 a náhradní intenzity z aplikace Rain.



Obr. 37 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 1, Rain).



Obr. 38 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 1, Rain).

Varianta 2 – Metoda zahrnující zjednodušený hypodermický odtok a transformaci odtoku říční sítí.

- Déšť o periodicitě 0,01.

Tab. 22: Výsledné průtoky pro N_{100} .

N_{100}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	10	6,6	5,5
	15	8,6	7,2
	20	10,3	8,5
	25	12	9,3
	30	13,5	10,4

- Déšť o periodicitě 0,02.

Tab. 23: Výsledné průtoky pro N_{50} .

N_{50}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	10	5,5	4,6
	20	8,4	7,2
	30	10,8	8,7
	60	15,1	11,4
	90	17,3	13,1

- Déšť o periodicitě 0,05.

Tab. 24: Výsledné průtoky pro N_{20} .

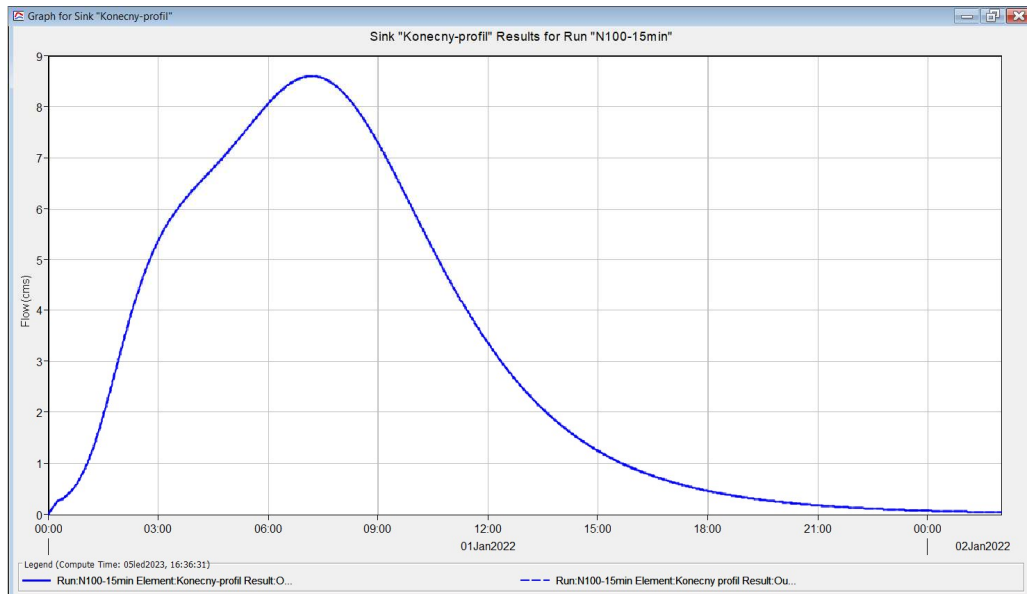
N_{20}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	7,5	6,8
	60	10,3	8,8
	90	11,8	10
	120	12,9	10,9
	180	13,8	12,8

- Déšť o periodicitě 0,1.

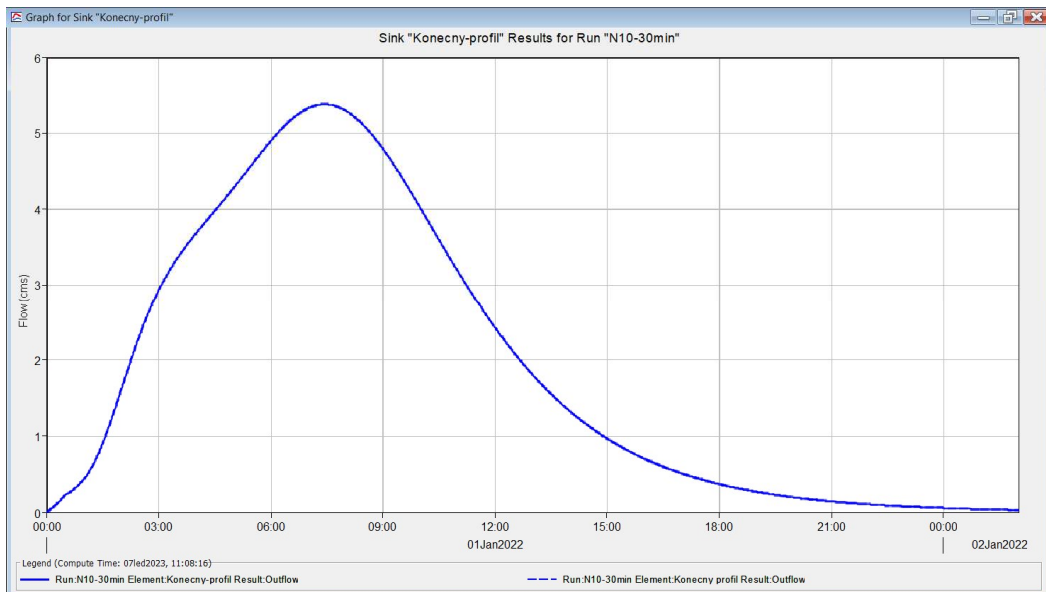
Tab. 25: Výsledné průtoky pro N_{10} .

N_{10}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	5,4	5,2
	60	7,2	6,7
	120	9	8,5
	180	9,6	9,4
	240	10,3	10,1

Graf zobrazující kulminační průtok povodí Malá Haná při použití varianty 2 a použití náhradních intenzit z aplikace Rain se nachází pro první návrhový stav na Obr. 39 a pro druhý návrhový stav na Obr. 40.



Obr. 39 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 2, Rain).



Obr. 40 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 2, Rain).

4.2.2 Povodí Rakovec

Pro povodí byla zkoumána závislost pro získání průtoku $Q_{20}=3,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Hodnoty N-letých průtoků povodí Rakovec jsou uvedeny v Tab. 26.

Tab. 26: N-leté průtoky povodí Rakovec.

Povodí	Plocha povodí [km ²]	Q_1 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Q_{10} [m ³ /s]	Q_{20} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]	Q_{100} [m ³ /s]
Rakovec	6,67	0,7	1,8	2,8	3,2	5,1	6,2

Varianta 1 – Metoda bez zahrnutí zjednodušeného hypodermického odtoku a transformací odtoku říční sítí.

- Déšť o periodicitě 0,01.

Tab. 27: Výsledné průtoky pro N_{100} .

N_{100}		Q [m ³ /s]	
		Rain	Trupl
t [min]	10	2	1,6
	15	3,4	2,8
	20	4,8	3,7
	25	6,2	4,3
	30	7,4	5,1

- Déšť o periodicitě 0,02.

Tab. 28: Výsledné průtoky pro N_{50} .

N_{50}		Q [m ³ /s]	
		Rain	Trupl
t [min]	10	1,3	1,1
	15	2,3	2
	20	3,3	2,7
	25	4,2	3,2
	30	5,2	3,8

- Déšť o periodicitě 0,05.

Tab. 29: Výsledné průtoky pro N_{20} .

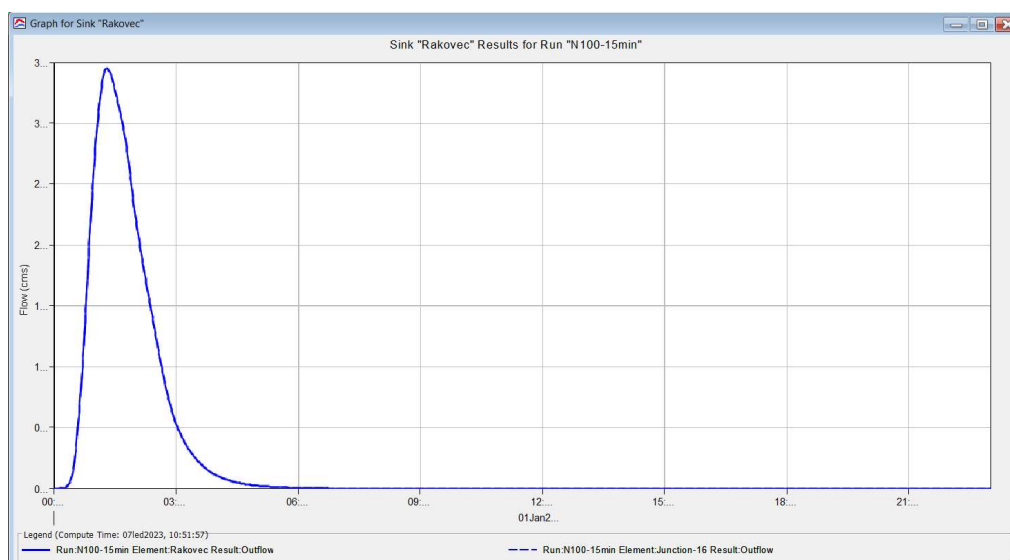
N_{20}		Q [m ³ /s]	
		Rain	Trupl
t [min]	20	1,5	1,7
	30	2,6	2,4
	40	3,5	3
	50	4,2	3,4
	60	4,6	3,7

- Děšť o periodicitě 0,1.

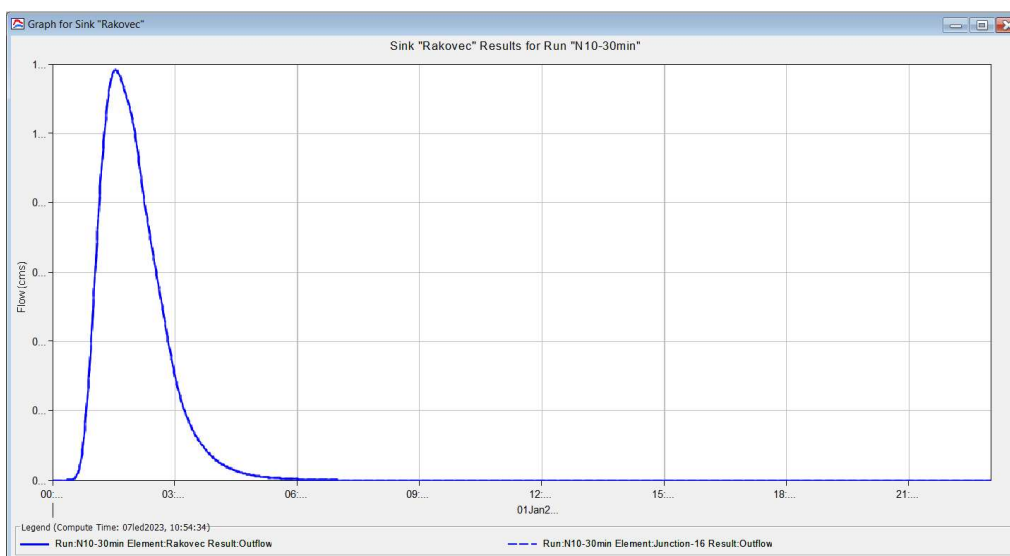
Tab. 30: Výsledné průtoky pro N_{10} .

N_{10}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	1,2	1,4
	60	2,3	2,3
	120	3,5	3,2
	180	3,7	3,4
	220	3,7	3,4

Graf zobrazující kulminační průtok povodí Rakovec při použití varianty 1 a náhradních intenzit z aplikace Rain se pro první návrhový stav nachází na Obr. 41 a na Obr. 42 pro druhý návrhový stav.



Obr. 41 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 1, Rain).



Obr. 42 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 1, Rain).

Varianta 2 – Metoda zahrnující zjednodušený hypodermický odtok a transformaci odtoku říční sítí.

- Déšť o periodicitě 0,01.

Tab. 31: Výsledné průtoky pro N_{100} .

N_{100}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	10	1,8	1,5
	15	2,6	2,1
	20	3,2	2,5
	25	3,9	2,8
	30	4,5	3,2

- Déšť o periodicitě 0,02.

Tab. 32: Výsledné průtoky pro N_{50} .

N_{50}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	10	1,5	1,2
	20	2,5	2
	30	3,4	2,6
	60	5,2	3,6
	90	6,1	4,3

- Déšť o periodicitě 0,05.

Tab. 33: Výsledné průtoky pro N_{20} .

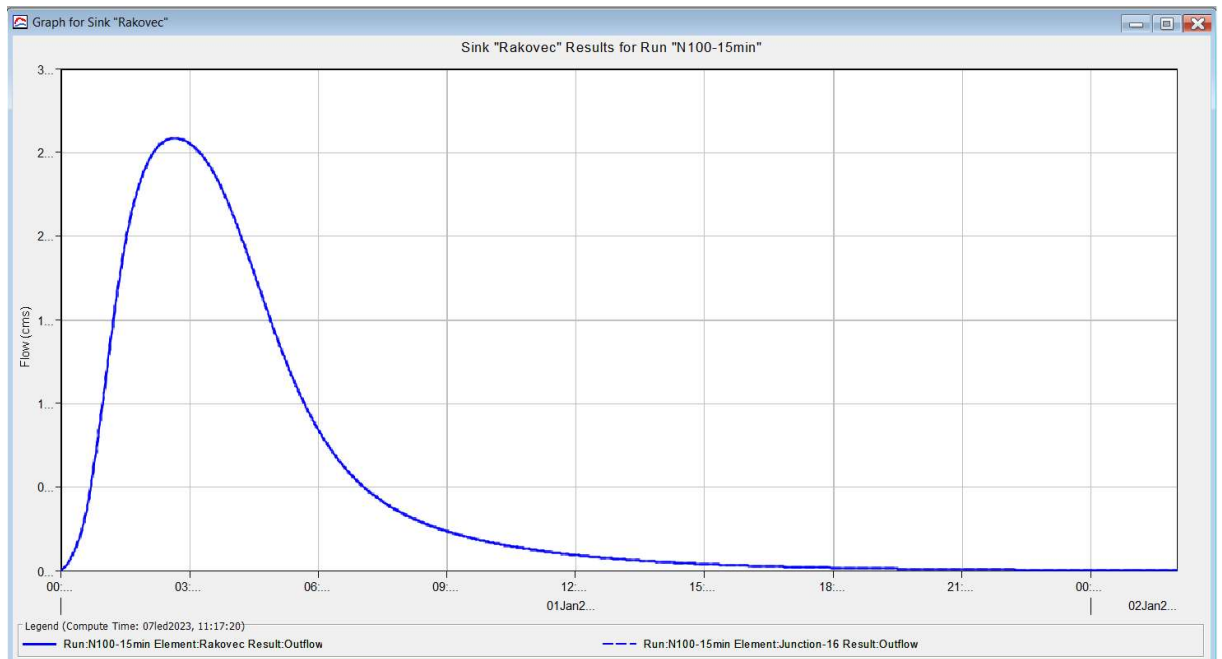
N_{20}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	2,2	1,9
	60	3,2	2,6
	90	3,8	3,1
	120	4,2	3,4
	180	4,5	4

- Déšť o periodicitě 0,1.

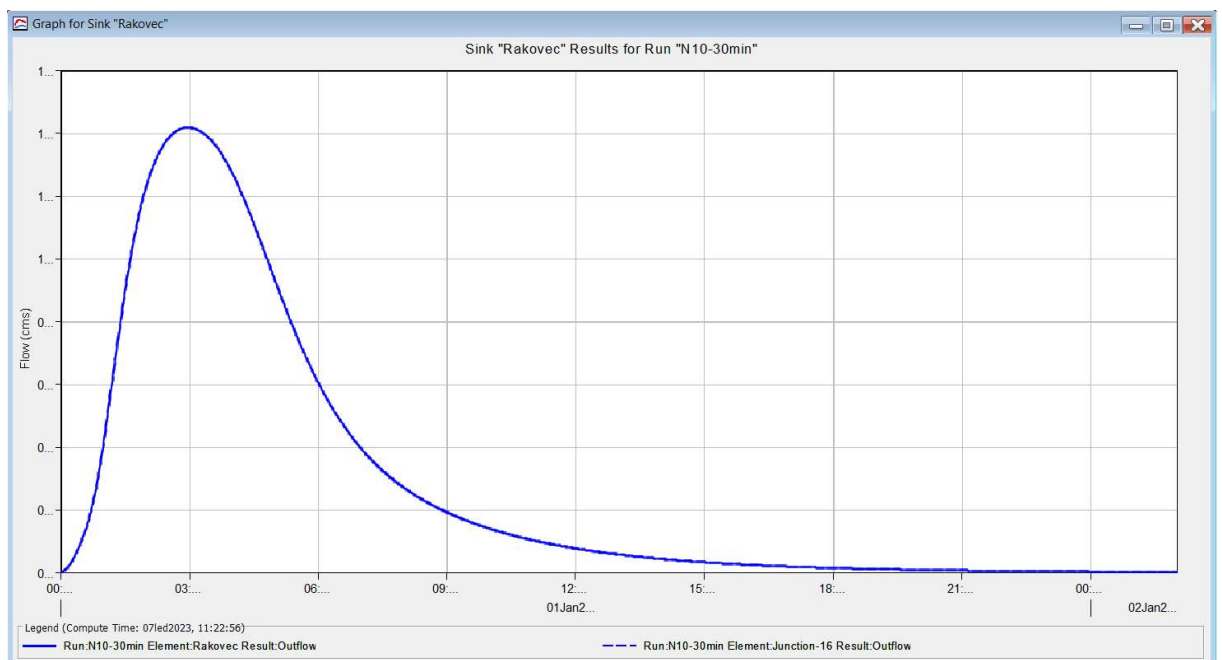
Tab. 34: Výsledné průtoky pro N_{10} .

N_{10}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	1,4	1,4
	60	2	1,9
	120	2,6	2,5
	180	2,8	2,8
	240	3,1	2,9

Graf znázorňující kulminační průtok povodí Rakovec při použití varianty 2 a náhradních intenzit z aplikace Rain se nachází na Obr. 43 pro první návrhový stav a na Obr. 44 pro druhý návrhový stav.



Obr. 43 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 2, Rain).



Obr. 44 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 2, Rain).

4.2.3 Povodí Krásensko

Pro povodí byla zkoumána závislost pro získání průtoku $Q_{20}=2,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Hodnoty N-letých průtoků povodí Krásensko jsou uvedeny v Tab. 35.

Tab. 35: N-leté průtoky povodí Krásensko.

Povodí	Plocha povodí [km ²]	Q_1 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Q_{10} [m ³ /s]	Q_{20} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]	Q_{100} [m ³ /s]
Krásensko	4,89	0,6	1,5	2,5	2,7	4,5	5,5

Varianta 1 – Metoda bez zahrnutí zjednodušeného hypodermického odtoku a transformací odtoku říční sítí.

- Déšť o periodicitě 0,01.

Tab. 36: Výsledné průtoky pro N_{100} .

N_{100}		Q [m ³ /s]	
		Rain	Trupl
t [min]	10	1,6	1,3
	15	3,1	2,4
	20	4,4	3,3
	25	5,7	3,9
	30	7	4,7

- Déšť o periodicitě 0,02.

Tab. 37: Výsledné průtoky pro N_{50} .

N_{50}		Q [m ³ /s]	
		Rain	Trupl
t [min]	10	0,9	0,8
	15	1,9	1,6
	20	2,9	2,3
	25	3,8	2,8
	30	4,8	3,4

- Déšť o periodicitě 0,05.

Tab. 38: Výsledné průtoky pro N_{20} .

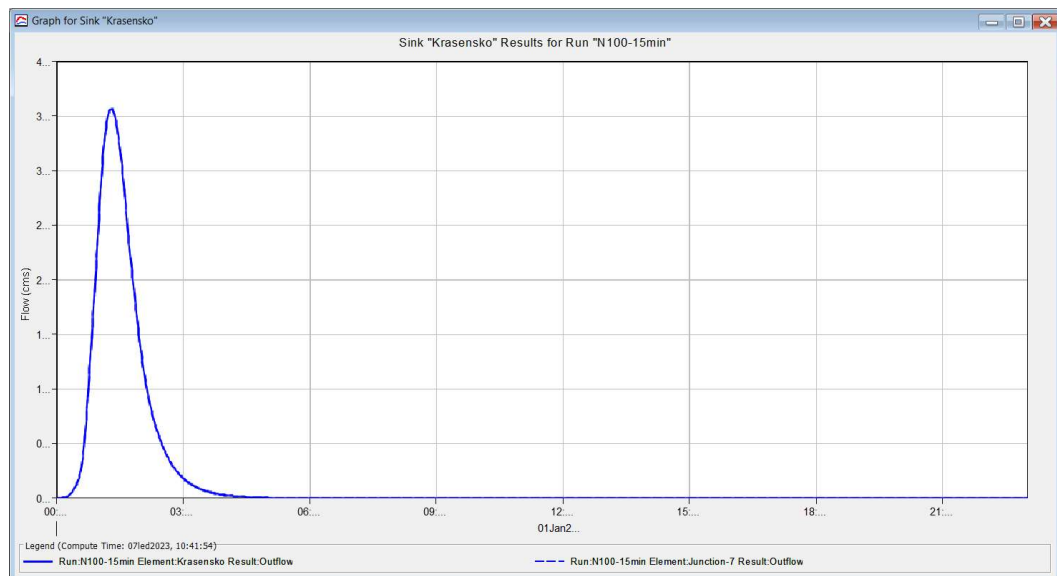
N_{20}		Q [m ³ /s]	
		Rain	Trupl
t [min]	20	1,2	1,4
	30	2,2	2
	40	3,1	2,6
	50	3,8	2,9
	60	4,2	3,3

- Děšť o periodicitě 0,1.

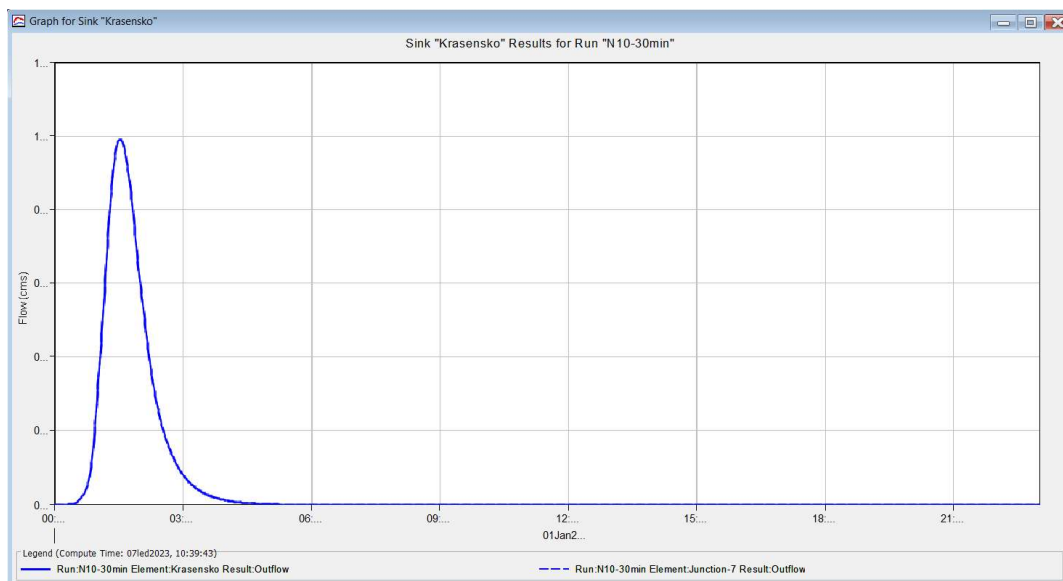
Tab. 39: Výsledné průtoky pro N_{10} .

N_{10}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	0,9	1,1
	60	2	1,9
	120	3	2,7
	180	3,1	2,8
	220	3,1	2,8

Graf zobrazující kulminační průtok povodí Krásensko při použití varianty 2 a použití náhradních intenzit z aplikace Rain se nachází na Obr. 45 pro první návrhový stav a na Obr. 46 pro druhý návrhový stav.



Obr. 45 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 1, Rain).



Obr. 46 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 1, Rain).

Varianta 2 – Metoda zahrnující zjednodušený hypodermický odtok a transformaci odtoku říční sítí.

- Déšť o periodicitě 0,01.

Tab. 40: Výsledné průtoky pro N_{100} .

N_{100}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	10	1,8	1,5
	15	2,4	2
	20	2,9	2,4
	25	3,3	2,6
	30	3,8	3

- Déšť o periodicitě 0,02.

Tab. 41: Výsledné průtoky pro N_{50} .

N_{50}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	10	1,5	0,9
	20	2,3	2
	30	3	2,5
	60	4,2	3,2
	90	4,8	3,7

- Déšť o periodicitě 0,05.

Tab. 42: Výsledné průtoky pro N_{20} .

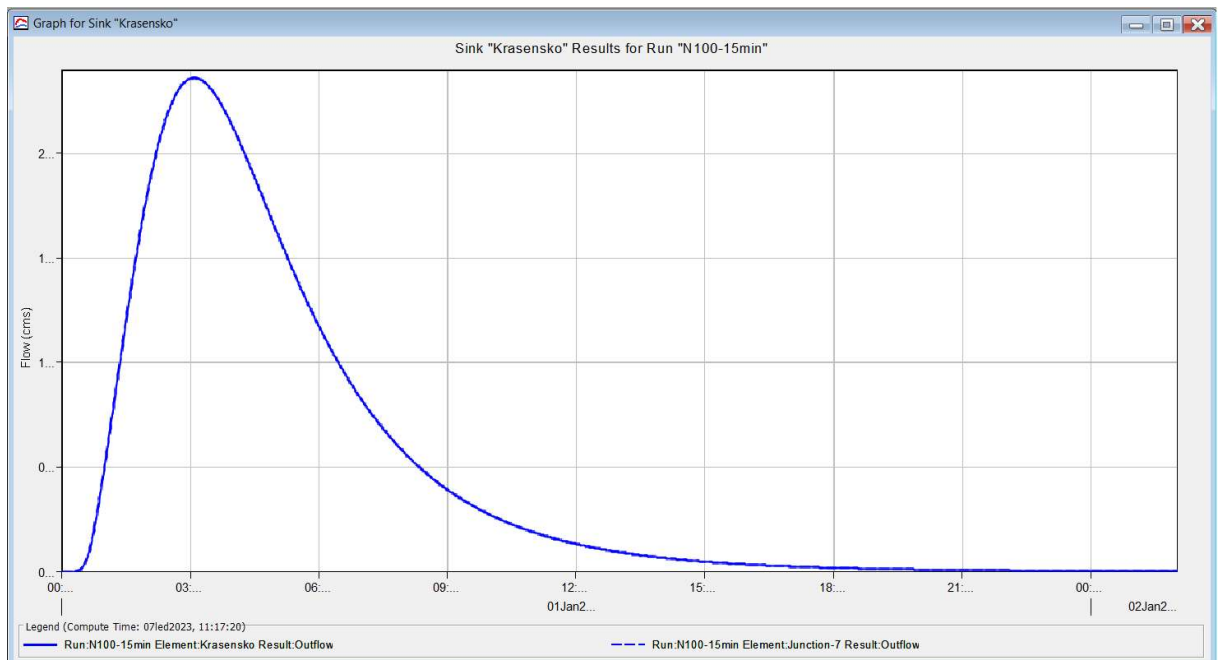
N_{20}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	2	1,9
	60	2,8	2,5
	90	3,2	2,8
	120	3,5	3
	180	3,6	3,5

- Déšť o periodicitě 0,1.

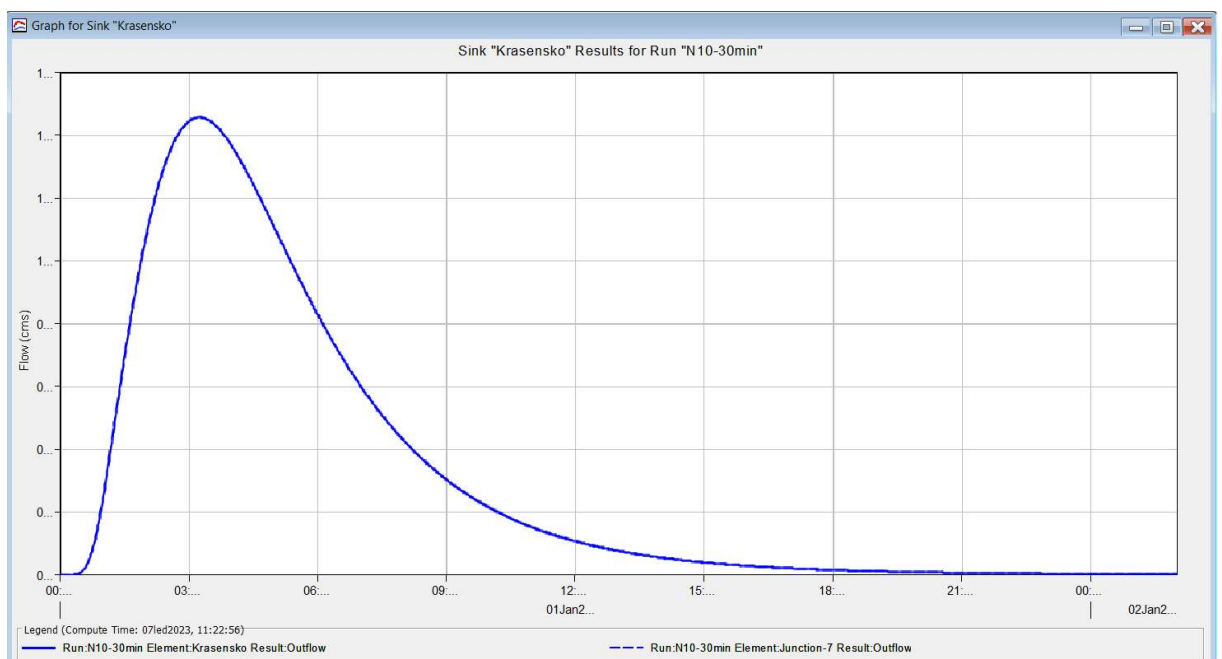
Tab. 43: Výsledné průtoky pro N_{10} .

N_{10}		Q [m ³ /s]	
		<i>Rain</i>	<i>Trupl</i>
t [min]	30	1,5	1,4
	60	1,9	1,8
	120	2,4	2,3
	180	2,5	2,5
	240	2,6	2,6

Graf zobrazující kulminační průtok povodí Krásensko při použití varianty 2 a náhradních intenzit z aplikace Rain se pro první návrhový stav nachází na Obr. 47 a na Obr. 48 pro druhý návrhový stav.



Obr. 47 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 2, Rain).



Obr. 48 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 2, Rain).

4.2.4 Shrnutí výsledků

Úkolem bylo ověřit vliv náhradních intenzit dešťů a jejich délky trvání na celkovém průběhu srážko-odtokového procesu, s cílem vytvořit z nich průtok odpovídající přibližně Q_{20} . Pro porovnání byla od ČHMÚ poskytnuta tabulka N-letých průtoků, která byla odvozena na základě měření v závěrovém profilu povodí Malá Haná (měrná stanice Opatovice nad nádrží). Pro dílčí povodí Rakovec a Krásensko byly poskytnuté hodnoty N-letých průtoků získány pomocí výpočtů na základě statistických metod. N-leté průtoky jsou uvedeny v Tab. 44.

Tab. 44: Poskytnuté N-leté průtoky pro řešená povodí.

<i>Povodí</i>	<i>Plocha povodí [km²]</i>	Q_1 [m ³ /s]	Q_5 [m ³ /s]	Q_{10} [m ³ /s]	Q_{20} [m ³ /s]	Q_{50} [m ³ /s]	Q_{100} [m ³ /s]
Malá Haná	30,92	2,3	7	9,7	12,8	17,6	21,5
Rakovec	6,67	0,7	1,8	2,8	3,2	5,1	6,2
Krásensko	4,89	0,6	1,5	2,5	2,7	4,5	5,5

V rámci diplomové práce byly porovnávány deště s různou periodicitou a dobou trvání. Zvláště byly zkoumány návrhové stavy z bakalářské práce doporučené na základě praktických zkušeností.

- Déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut.
- Déšť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut.

Mimo těchto návrhových stavů byly zkoumány i další stavy podle periodicity tak, aby co nejvíce odpovídaly návrhovému průtoku Q_{20} .

- Déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 10 až 30 minut.
- Déšť o periodicitě 0,02 s dobou trvání 10 až 30 minut.
- Déšť o periodicitě 0,05 s dobou trvání 20 až 60 minut.
- Déšť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 až 220 minut.

Všechny výše zmíněné návrhové stavy byly navíc řešeny metodou zahrnující vliv zjednodušeného hypodermického odtoku a transformaci odtoku říční sítí.

Pro zajištění stejných podmínek výpočtu byla provedena kalibrace modelu na blokový déšť z aplikace Rain i z Truplových tabulek. V případě simulace pomocí základních metod byl model kalibrován na návrhový průtok Q_5 poskytnutý od ČHMÚ. Při kalibraci na návrhový průtok Q_{10} model vykazoval nereálné hodnoty dílčích parametrů. Při simulaci metodou zohledňující podzemní odtok a transformace v korytě vodního toku byl model kalibrován již na návrhový průtok Q_{10} .

V ideálním případě by bylo model kalibrovat a otestovat na vhodné reálné epizodě, která pro toto povodí nebyla k dispozici. Z těchto důvodů nelze brát výsledky za stoprocentně správné a mohou se lišit od skutečnosti.

Při porovnání návrhových stavů z bakalářské práce a použitím varianty 1 lze s jistotou říci, že v tomto případě vychází lépe déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut. Tento déšť dosahuje blízkých hodnot k těm návrhovým od ČHMÚ, zejména při použití náhradních intenzit z aplikace Rain. Při použití náhradních intenzit z Truplových

tabulek vychází průtoky podhodnoceny, ale stále vhodněji než u deště o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut, kde dosahují průtoky výrazně nižších hodnot v obou případech. Všechny výsledky pro návrhové stavy z bakalářské práce při využití varianty 1 jsou shrnuty v Tab. 45 pro náhradní intenzity z aplikace Rain a v Tab. 46 pro náhradní intenzity z Truplových tabulek.

Tab. 45: Vypočtené průtoky pro aplikaci Rain (varianta 1).

Rain			
Povodí	$p=0,01$ $t=15 \text{ min}$	$p=0,1$ $t=30 \text{ min}$	$Q_{20} - \check{C}HM\acute{U}$
	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$
Malá Haná	11,9	3,9	12,8
Rakovec	3,4	1,2	3,2
Krásesko	3,1	0,9	2,7

Tab. 46: Vypočtené průtoky pro Truplovy tabulky (varianta 1).

Trupl			
Povodí	$p=0,01$ $t=15 \text{ min}$	$p=0,1$ $t=30 \text{ min}$	$Q_{20} - \check{C}HM\acute{U}$
	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$
Malá Haná	9,5	4,8	12,8
Rakovec	2,8	1,4	3,2
Krásesko	2,4	1,1	2,7

Při porovnání návrhových stavů z bakalářské práce a použitím varianty 2 lze opět říci, že vychází lépe dešť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut. Zde už ovšem nejsou rozdíly v průtocích tak výrazné. V obou případech dosahují průtoky při porovnání s požadovanými nižších hodnot a to v případě aplikace Rain i Truplových tabulek. Výsledné průtoky pro variantu 2 jsou shrnuty v Tab. 47 v případě použití náhradních intenzit z aplikace Rain a v Tab. 48 v případě použití náhradních intenzit z Truplových tabulek.

Tab. 47: Vypočtené průtoky pro aplikaci Rain (varianta 2).

Rain			
Povodí	$p=0,01$ $t=15 \text{ min}$	$p=0,1$ $t=30 \text{ min}$	$Q_{20} - \check{C}HM\acute{U}$
	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$
Malá Haná	8,6	5,4	12,8
Rakovec	2,6	1,4	3,2
Krásesko	2,4	1,5	2,7

Tab. 48: Vypočtené průtoky pro Truplov tabulky (varianta 2).

Trupl			
Povodí	$p=0,01$ $t=15$ min	$p=0,1$ $t=30$ min	Q_{20} - ČHMÚ
	Q [m³/s]	Q [m³/s]	Q [m³/s]
Malá Haná	7,2	5,2	12,8
Rakovec	2,1	1,4	3,2
Krásesko	2	1,4	2,7

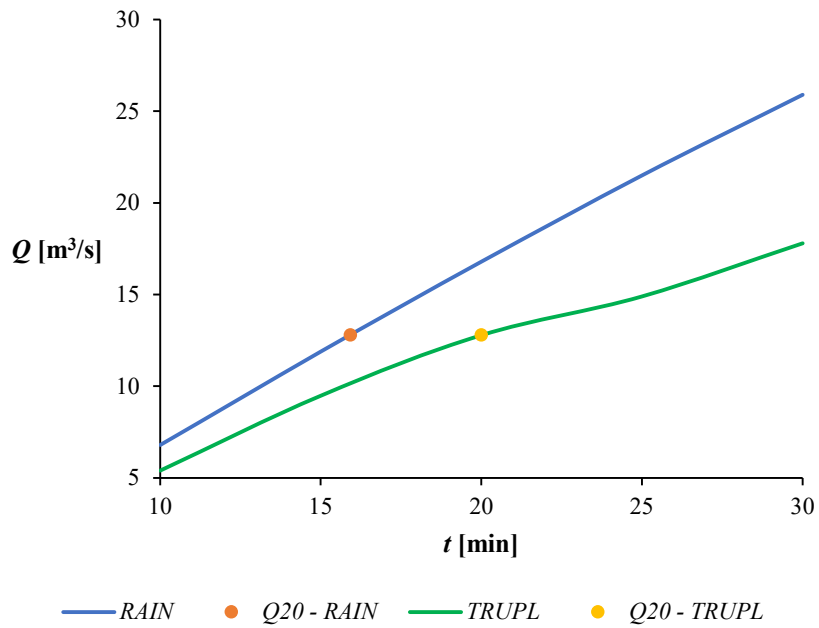
Při porovnání variant výpočtu vychází blíže návrhovým hodnotám od ČHMÚ varianta 1 využívající základní metody.

Dále byly pro výše zmíněné periodicity deště testovány různé doby trvání, aby bylo zjištěno dosažení požadovaného průtoku. Simulace byla provedena pro obě varianty výpočtů. Při jejich porovnání dochází u varianty 1 k výrazně kratším dobám dosažení návrhového průtoku než u varianty 2. V případě varianty 2 se nedalo přesně určit dobu pro dosažení průtoku Q_{20} pro periodicitu deště 0,1. Výsledné doby dosažení návrhového průtoku Q_{20} , které značí doba t , jsou uvedeny v Tab. 49 pro variantu 1 a v Tab. 50 pro variantu 2. Grafy zobrazující hydrografy jednotlivých průtoků a doby dosažení průtoku Q_{20} pro povodí Malá Haná jsou zobrazeny na Obr. 28 až 31 pro variantu 1 a na Obr. 32 až 35 pro variantu 2.

Tab. 49: Doby dosažení Q_{20} pro variantu 1.

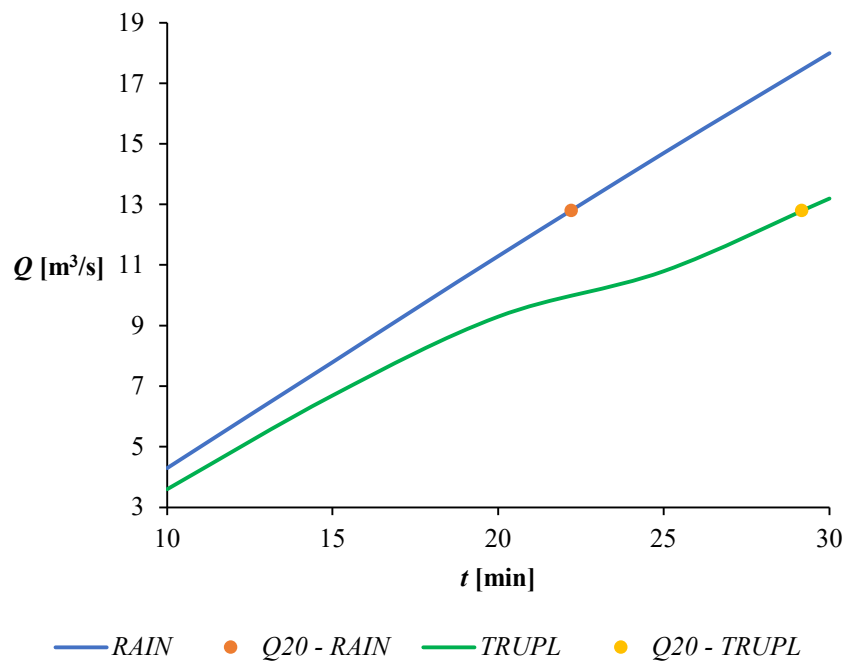
Varianta 1					
Povodí	Blokový dešť	$p = 0,01$	$p = 0,02$	$p = 0,05$	$p = 0,1$
		t [min]	t [min]	t [min]	t [min]
Malá Haná	Rain	16	22	42	170
	Trupl	20	29	59	213
Rakovec	Rain	14	20	37	100
	Trupl	17	25	45	120
Krásensko	Rain	14	19	36	100
	Trupl	17	24	43	120

N_{100} - Malá Haná



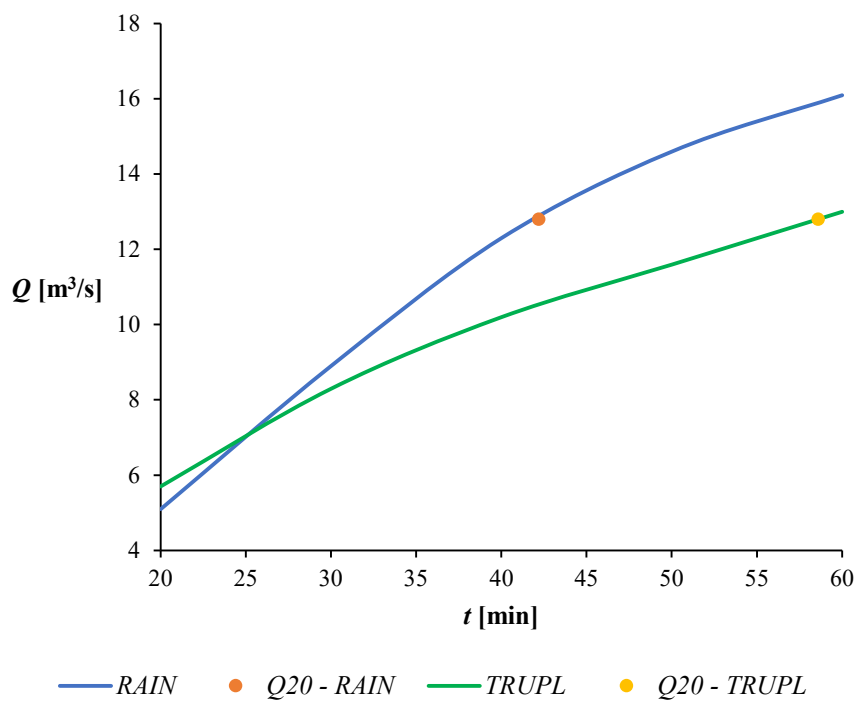
Obr. 49 Hydrograf pro $p=0,01$ (varianta 1).

N_{50} - Malá Haná



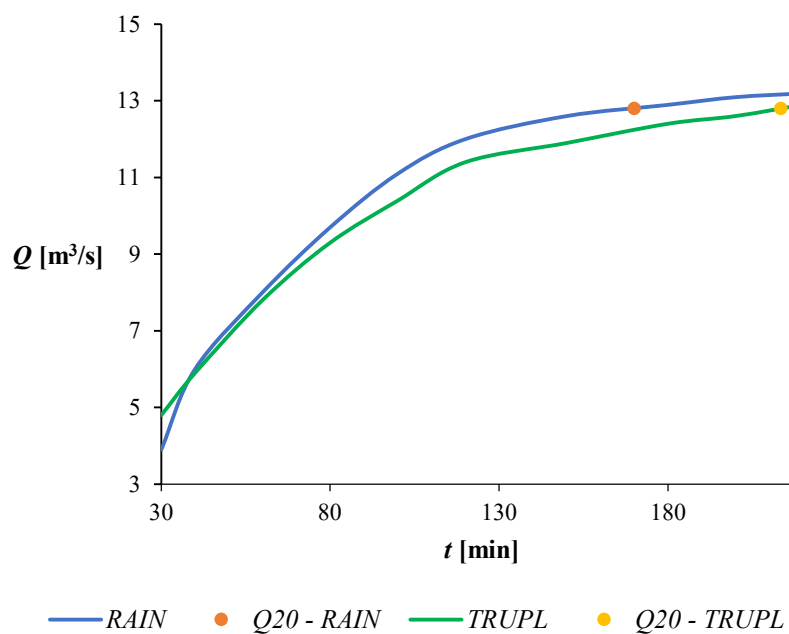
Obr. 50 Hydrograf pro $p=0,02$ (varianta 1).

N_{20} - Malá Haná



Obr. 51 Hydrograf pro $p=0,05$ (varianta 1).

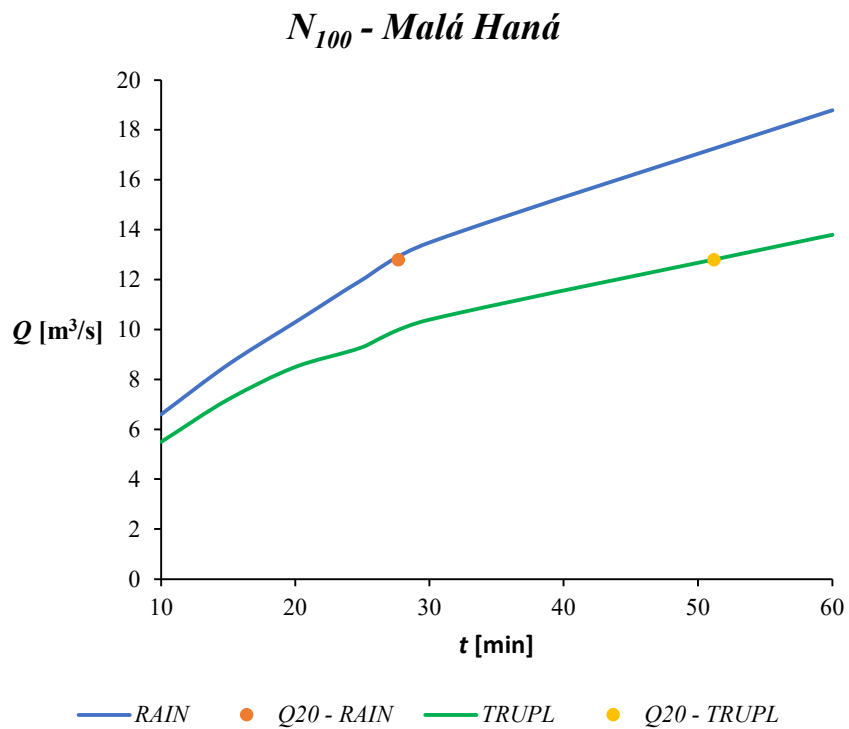
N_{10} - Malá Haná



Obr. 52 Hydrograf pro $p=0,1$ (varianta 1).

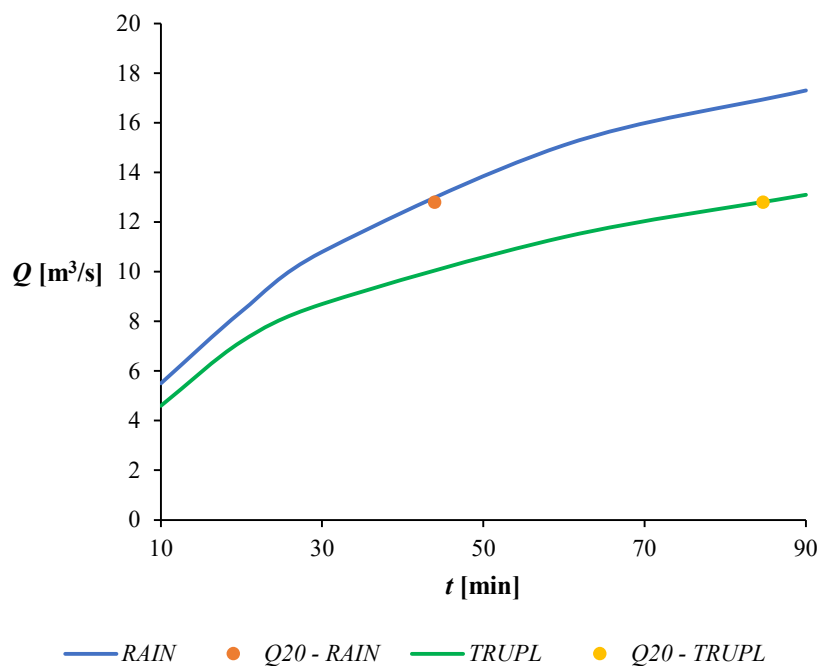
Tab. 50: Doby dosažení Q_{20} pro variantu 2.

<i>Varianta 2</i>					
<i>Povodí</i>	<i>Blokový děšť'</i>	<i>p = 0,01</i>	<i>p = 0,02</i>	<i>p = 0,05</i>	<i>p = 0,1</i>
		<i>t [min]</i>	<i>t [min]</i>	<i>t [min]</i>	<i>t [min]</i>
Malá Haná	Rain	28	44	117	-
	Trupl	51	85	180	-
Rakovec	Rain	20	28	60	-
	Trupl	30	48	100	-
Krásensko	Rain	18	26	56	-
	Trupl	26	39	80	-



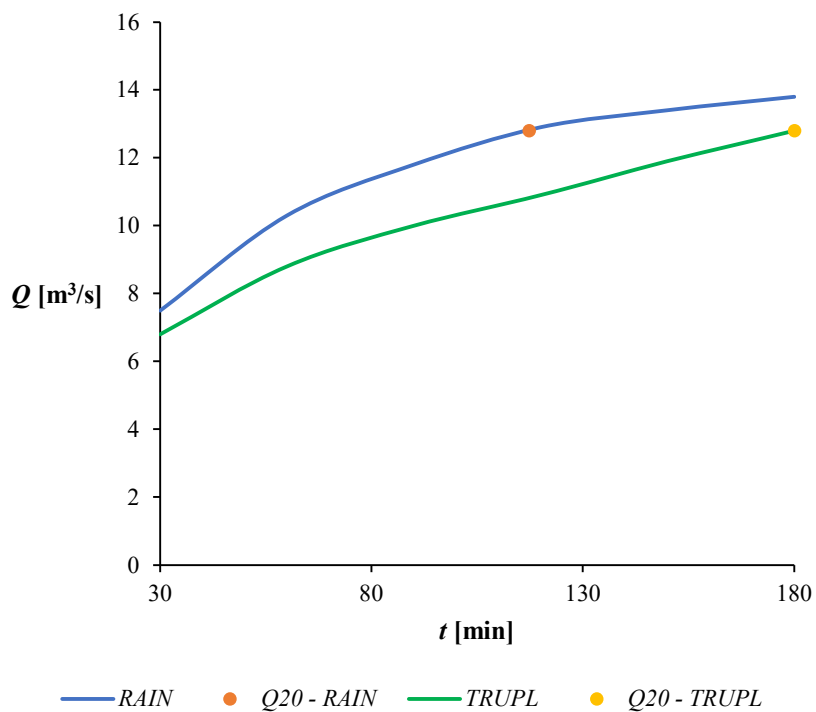
Obr. 53 Hydrograf pro $p=0,01$ (varianta 2).

N₅₀ - Malá Haná



Obr. 54 Hydrograf pro $p=0,02$ (varianta 2).

N₂₀ - Malá Haná



Obr. 55 Hydrograf pro $p=0,05$ (varianta 2).

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo ověřit dopad náhradních intenzit dešťů a jejich délky trvání na celkový průběh srážko-odtokového procesu se záměrem získání průtoku, který co nejvíce odpovídá návrhovému průtoku Q_{20} od ČHMÚ. Pro testování bylo využito více návrhových stavů na základě periodicity a doby trvání deště. Primární pozornost byla věnována dvěma návrhovým stavům z bakalářské práce, které byly doporučeny na základě praktických zkušeností.

První návrhový stav je často využíván při projektování zejména kanalizačních systémů ($p=0,01$ a $t=15$ min), zatímco druhý návrhový stav byl doporučen od Povodí Odry ($p=0,1$ a $t=30$ min). Další návrhové stavy byly testovány za účelem dosažení návrhového průtoku Q_{20} . Z tohoto důvodu byla pro každou periodicitu ($p=0,01$; $p=0,02$; $p=0,05$; $p=0,1$) zvolena jiná doba trvání deště ($t=10$ až 240 min).

Všechny návrhové stavy byly testovány na dvě varianty výpočtu. Varianta 1 využívá pro simulaci pouze základních metod a nepočítá s hypodermickým odtokem a transformací odtoku říční sítě, kdežto varianta 2 pracuje s metodou zahrnující zjednodušený hypodermický odtok a transformaci odtoku říční sítě.

Ke splnění byla nejprve vypracována řešební část, která sloužila k poznání řešeného povodí a k získání informací o faktorech ovlivňující srážko-odtokový proces.

V rámci práce byla nejdříve provedena schematizace povodí v programu ArcMap, kde byly zjištěny základní parametry (plocha povodí, tvar povodí, sklon, hustota říční sítě, délka toku, vegetační pokryv). Metodou podle odhadu rychlostí byla stanovena výsledná doba koncentrace na 199 minut (po kalibraci) pro celé povodí. V závislosti na vegetačním pokryvu a druhu povrchu byly určeny průměrné hodnoty odtokových křivek CN. Pro jejich určení byla využita databáze LPIS a databáze BPEJ. K simulaci byl použit blokový déšť ze dvou zdrojů. Byla využita webová aplikace Rain, která poskytuje údaje o srážkovém úhrnu na základě N-letosti a doby trvání kdekoli na území ČR. Kromě aplikace Rain byly využity Truplovy tabulky, ve kterých se nachází údaje o srážkovém úhrnu pouze do N_{20} . Pro dosažení vyšších N-letých průtoků bylo nutné provést extrapolaci pomocí spojnice trendu a použitím vygenerované logaritmické rovnice. Poté byla provedena schematizace varianty 1 v programu HEC-HMS. Byla použita metoda ztrát SCS Curve Number a transformační metoda SCS Unit Hydrograph. Následně proběhla kalibrace, která spočívala v nastavení počátečních ztrát povodí v závislosti na druhu vegetačního pokryvu. Ke kalibraci varianty 1 byl využit průtok Q_5 . Po dokončení kalibrace varianty 1 byla provedena simulace srážko-odtokového procesu pro všechny návrhové stavy. Schematizace varianty 2 vychází ze základních metod první varianty a použité parametry jsou pro obě varianty stejné. Navíc byla využita metoda Linear reservoir a metoda zdržení Lag&K. Kalibrace spočívala ve správném nastavení ztrátového koeficientu, doby dobehu podzemního odtoku a koeficientu, který transformuje povodňovou vlnu. Ke kalibraci varianty 2 byl využit průtok Q_{10} . Po dokončení kalibrace varianty 2 byla provedena simulace srážko-odtokového procesu pro všechny návrhové stavy.

Při porovnání doporučených návrhových stavů dosahoval bližších hodnot k těm požadovaným první návrhový stav (déšť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut), který

vycházel lépe ve všech možných případech. Návrhový stav dosahoval vyšší shody při použití náhradních intenzit deště z Truplových tabulek i z aplikace Rain. Vyšší shody bylo dosaženo i v případě použití obou variant výpočtů.

U povodí Malá Haná byla porovnávána hodnota kulminačního průtoku $Q_{20}=12,8$ m^3/s . V případě varianty 1 a použití náhradních intenzit z aplikace Rain bylo pro první návrhový stav dosaženo průtoku $Q=11,9$ m^3/s , zatímco pro druhý návrhový stav bylo dosaženo průtoku pouze $Q=3,9$ m^3/s . U náhradních intenzit z Truplových tabulek vycházejí hodnoty průtoků pro první návrhový stav více podhodnoceny, zatímco u druhého návrhového stavu Truplovy tabulky dosahují vyšších hodnot než právě aplikace Rain. Pro první návrhový stav byla získána hodnota průtoku $Q=9,5$ m^3/s a pro druhý návrhový stav hodnota $Q=4,8$ m^3/s . V případě varianty 2 a použití náhradních intenzit z aplikace Rain, byla pro první návrhový stav dosažena hodnota průtoku $Q=8,6$ m^3/s a pro druhý návrhový stav hodnota $Q=5,4$ m^3/s . Při použití náhradních intenzit z Truplových tabulek byla dosažena hodnota průtoku $Q=7,2$ m^3/s pro první návrhový stav a hodnota $Q=5,2$ m^3/s pro druhý návrhový stav.

U povodí Rakovec byla porovnávána hodnota kulminačního průtoku $Q_{20}=3,2$ m^3/s . S využitím varianty 1 a náhradních intenzit z aplikace Rain byla dosažena hodnota průtoku $Q=3,4$ m^3/s pro první návrhový stav a hodnota $Q=1,2$ m^3/s pro druhý návrhový stav. Při použití náhradních intenzit z Truplových tabulek byl pro první návrhový stav průtok $Q=2,8$ m^3/s a průtok $Q=1,4$ m^3/s pro druhý návrhový stav. V případě varianty 2 a náhradních intenzit z aplikace Rain byla získána hodnota průtoku $Q=2,6$ m^3/s pro první návrhový stav a hodnota $Q=1,4$ m^3/s pro druhý návrhový stav. U Truplových tabulek byla pro první návrhový stav dosažena hodnota průtoku $Q=2,1$ m^3/s a pro druhý návrhový stav hodnota $Q=1,4$ m^3/s .

U povodí Krásensko byla porovnávána hodnota kulminačního průtoku $Q_{20}=2,8$ m^3/s . Při využití varianty 1 a náhradních intenzit z aplikace Rain byl dosažen průtok $Q=3,1$ m^3/s pro první návrhový stav a průtok $Q=0,9$ m^3/s pro druhý návrhový stav. Pro Truplovy tabulky byl dosažen průtok $Q=2,4$ m^3/s pro první návrhový stav a průtok $Q=1,1$ m^3/s pro druhý návrhový stav. V případě varianty 2 a náhradních intenzit z aplikace Rain byl pro první návrhový stav získán průtok $Q=2,4$ m^3/s a pro druhý návrhový stav průtok $Q=1,5$ m^3/s . Při použití Truplových tabulek pak průtok dosáhl hodnoty průtoku $Q=2$ m^3/s pro první návrhový stav a hodnoty $Q=1,4$ m^3/s pro druhý návrhový stav.

Při porovnání všech výsledných hodnot vychází nejbližší průtok Q_{20} první návrhový stav za předpokladu použití blokového deště z aplikace Rain a simulací variantou 1. Toto platí pro všechna řešená povodí. Pro druhý návrhový stav vychází průtoky značně podhodnoceny a ani zdaleka nedosahují požadovaných hodnot. V případě simulace variantou 2 dochází také k výraznému podhodnocení průtoků. Při porovnání doporučených návrhových stavů vypočítaných variantou 2 však dochází k postupnému vyrovnávání průtoků a nevyskytují se zde tak výrazné rozdíly v hodnotách průtoků jako při použití varianty 1.

Dále byly pro obě varianty simulace testovány náhradní intenzity deště s cílem získat doby dosažení požadovaného průtoku Q_{20} .

Při využití varianty 1 a deště s periodicitou $p=0,01$ pro aplikaci Rain/Truplovy tabulky byla dosažena doba dosažení průtoku Q_{20} $t=16/20$ min (hodnota 16 značí dobu

dosažení požadovaného průtoku v minutách při použití náhradních intenzit z aplikace Rain, zatímco hodnota 20 je doba při využití Truplových tabulek) pro povodí Malá Haná a $t=14/17$ min pro povodí Rakovec a Krásensko. Pro periodicitu $p=0,02$ vycházela doba $t=22/29$ min pro povodí Malá Haná, $t=20/25$ min pro povodí Rakovec a $t=19/24$ min pro povodí Krásensko. Pro periodicitu $p=0,05$ byla stanovena doba $t=42/59$ min pro povodí Malá Haná, $t=37/45$ min pro povodí Rakovec a $t=36/43$ pro povodí Krásensko. Při použití deště s periodicitou $p=0,1$ pak vycházela doba $t=170/213$ min pro povodí Malá Haná, $t=100/120$ min pro povodí Rakovec a Krásensko.

Při použití varianty 2 a deště o periodicitě $p=0,01$ pro aplikaci Rain/Truplovy tabulky byla doba dosažení průtoku Q_{20} stanovena na $t=28/51$ min pro povodí Malá Haná, $t=20/30$ min pro povodí Rakovec a $t=18/26$ min pro povodí Krásensko. Pro dešť o periodicitě $p=0,02$ byla dosažena doba $t=44/85$ min pro povodí Malá Haná, $t=28/48$ min pro povodí Rakovec a $t=26/39$ min pro povodí Krásensko. Při použití deště o periodicitě 0,05 byla stanovena doba $t=117/180$ min pro povodí Malá Haná, $t=60/100$ min pro Povodí Rakovec a $t=56/80$ min. Pro dešť o periodicitě $p=0,1$ model vykazoval příliš vysoké a pravděpodobně i nepřesné hodnoty. Z těchto důvodů pro tento dešť nebyla doba dosažení požadovaného průtoku stanovena.

Na základě výsledků simulace lze pro řešené povodí doporučit první návrhový stav vypočítaný variantou 1, který využívá dešť o periodicitě 0,01 s dobou trvání 15 minut. Tento návrhový stav velmi blízko odpovídá průtoku Q_{20} i při použití blokového deště z obou zdrojů zejména na menších dílčích povodích. První návrhový stav vychází lépe i v případě simulace variantou 2, kde je při použití náhradních intenzit z aplikace Rain dosaženo na malých povodích hodnot blízkých Q_{20} . Vezmeme-li v potaz celé povodí jsou hodnoty mírně podhodnoceny. Za předpokladu využití varianty 2 a blokového deště z Truplových tabulek vychází průtoky pro všechny návrhové stavy značně nižší, než jsou požadované.

Druhý návrhový stav využívající dešť o periodicitě 0,1 s dobou trvání 30 minut, který doporučuje Povodí Odry, nedosahoval pro řešené povodí příznivých hodnot průtoků. Vzhledem k poloze a charakteru řešeného území však může být tento návrhový stav v jiných případech vhodný. Na územích ve správě Povodí Odry je totiž dosahováno výrazně vyšších sklonů a srážkových úhrnů než v případě řešeného území. Z dosažených výsledků vyplývá, že návrhový stav nelze využívat jako univerzální pro všechna povodí.

Z mého pohledu bych pro simulaci doporučoval spíše využití náhradních intenzit dešťů z webové aplikace Rain, která v diplomové práci vykazuje vyšší hodnoty. Truplovy tabulky vycházejí ze starších dat a ve většině případů nezohledňují vliv přívalových dešťů. V případě použití srážkových úhrnů z Truplových tabulek je dosahováno nižších průtoků, což může vést například k nedostatečné kapacitě objektů.

Na výsledné hodnoty a zejména jejich podhodnocení má vliv velké množství faktorů, které ovlivňují průběh srážko-odtokového procesu. Průtok ovlivňuje především doba koncentrace, nasycenost povodí, využívání území a mnoho dalších proměnných. V případě varianty 2 lze připsat podhodnocení především nastavovaným koeficientům. Srážko-odtokový model by bylo potřeba kalibrovat a otestovat na vhodnou reálnou epizodu, která ale pro řešené povodí nebyla k dispozici.

6 Seznamy

6.1 Seznam použité literatury

- [1] RUDA, Aleš. *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele*. Brno: Masarykova univerzita, 2014. ISSN 1802-128X.
- [2] STARÝ, Miloš. *Hydrologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2005.
- [3] Odtokový proces: Hypodermický odtok. [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_2.4.0.htm
- [4] SIVS – kód VI. Dešťové srážky [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/vystrahy/napoveda/dest.html>
- [5] KRÁLOVÁ, Magda. ATMOSFÉRICKÉ SRÁŽKY [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfericke-srazky>
- [6] Meteorologické přístroje [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.pocasimeteoaktuality.cz/meteorologie/meteorologicke-pristroje/>
- [7] LIPINA, Pavel. Meteorologie: Meteorologie aneb jak měříme počasí [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://www.branadovesmiru.eu/odborne-clanky/meteorologie.html>
- [8] Ekotechnika: Thies – Laserový srážkoměr [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: <https://ekotechnika.cz/vyrobek/thies-laserovy-srazkomer>
- [9] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata a Jindřich FRAJER. *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013.
- [10] PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata, Jindřich FRAJER a Jan GELETIČ. Hydrologické modely [online]. [cit. 2023-01-11]. Dostupné z: http://hydro.upol.cz/?page_id=15
- [11] SMELÍK, L. Analýza změn odtokových poměrů pro Českou republiku. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 2016, roč. 58, č. 4, str. 7–12. ISSN 0322-8916.
- [12] JEŽÍK, P. EXTRAPOLACE INTENZITNÍCH KŘIVEK PRO ÚČELY MODELOVÁNÍ SRÁŽKODTOKOVÉHO PROCESU. In *21th Annual Conference Proceedings*. Praha: 2013. s. 1-6. ISBN: 978-80-7080-863-4.
- [13] KAVKA, Petr, Miloslav MÜLLER, Luděk STROUHAL, et al. *Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině: metodika*. [Praha]: České vysoké učení technické v Praze, 2018. ISBN 978-80-01-06363-7.
- [14] JANEČEK, Miloslav. *Ochrana zemědělské půdy před erozí: metodika*. Praha: Powerprint, 2012. ISBN 978-80-87415-42-9.

6.2 Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Orografické a hydrologické povodí. [2]	11
Obr. 2 Schéma srážko-odtokového procesu. [2].....	11
Obr. 3 Hydrologická a hydraulická transformace. [2].....	12
Obr. 4 Vztah mezi trváním, intenzitou a periodicitou deště. [2]	15
Obr. 5 Impulsní srážkoměr (elektronika a měřicí část). [7].....	16
Obr. 6 Automatický váhový srážkoměr. [7]	17
Obr. 7 Optický srážkoměr. [8].....	17
Obr. 8 Výpočet návrhové srážky. [13].....	21
Obr. 9 Vybrané povodí.	22
Obr. 10 Zájmové území.	22
Obr. 11 Mapa sklonitosti povodí.	24
Obr. 12 Mapa využití území.	25
Obr. 13 Vyjádření logaritmické spojnice trendu.	28
Obr. 14 Nastavené metody v HEC-HMS pro variantu 1.	29
Obr. 15 Nastavené metody v HEC-HMS pro variantu 2.	30
Obr. 16 Hydrologické skupiny půd. [14].....	30
Obr. 17 Hydrologické skupiny půd podle HPJ. [14]	31
Obr. 18 Průměrná čísla CN. [14]	32
Obr. 19 Nastavení metody ztrát.	33
Obr. 20 Nastavení transformační metody.	33
Obr. 21 Nastavení metody Linear reservoir.....	34
Obr. 22 Nastavení metody Lag.	34
Obr. 23 Nastavení metody Lag & K.	34
Obr. 24 Zájmové území Malá Haná.....	35
Obr. 25 Schematizace povodí v ArcMap.....	36
Obr. 26 Basin model povodí Malá Haná.	38
Obr. 27 Povodí Rakovec.....	39
Obr. 28 Schematizace povodí Rakovec v ArcMap.....	39
Obr. 29 Schematizace povodí Rakovec v HEC-HMS.	40
Obr. 30 Povodí Krásensko.	40
Obr. 31 Schematizace v povodí Krásensko v ArcMap.....	41
Obr. 32 Schematizace povodí Krásensko v HEC-HMS.	41
Obr. 33 Global summary pro kalibraci varanty 1 (Trupl).....	43
Obr. 34 Summary table pro kalibraci jednoduchých metod (Trupl).....	44
Obr. 35 Graph pro kalibraci varianty 1 (Trupl).	44
Obr. 36 Time-Series table pro graf z Obr. 35.	45
Obr. 37 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 1, Rain).....	47
Obr. 38 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 1, Rain).....	47
Obr. 39 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 2, Rain).....	49
Obr. 40 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 2, Rain).....	49
Obr. 41 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 1, Rain).....	51
Obr. 42 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 1, Rain).....	51
Obr. 43 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 2, Rain).....	53
Obr. 44 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 2, Rain).....	53
Obr. 45 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 1, Rain).....	55
Obr. 46 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 1, Rain).....	55
Obr. 47 Kulminační průtok při $p=0,01$ a $t=15$ min (varianta 2, Rain).....	57
Obr. 48 Kulminační průtok při $p=0,1$ a $t=30$ min (varianta 2, Rain).....	57

Obr. 49 Hydrograf pro $p=0,01$ (varianta 1).	61
Obr. 50 Hydrograf pro $p=0,02$ (varianta 1).	61
Obr. 51 Hydrograf pro $p=0,05$ (varianta 1).	62
Obr. 52 Hydrograf pro $p=0,1$ (varianta 1).	62
Obr. 53 Hydrograf pro $p=0,01$ (varianta 2).	63
Obr. 54 Hydrograf pro $p=0,02$ (varianta 2).	64
Obr. 55 Hydrograf pro $p=0,05$ (varianta 2).	64

6.3 Seznam tabulek

Tab. 1: Plocha jednotlivých povodí.	24
Tab. 2: Využití území pro povodí Malá Haná.	25
Tab. 3: Využití území pro povodí Rakovec.	26
Tab. 4: Využití území pro povodí Krásensko.	26
Tab. 5: Náhradní intenzity pro N_{100} z aplikace Rain.	27
Tab. 6: Náhradní intenzity pro N_{50} z aplikace Rain.	27
Tab. 7: Náhradní intenzity pro N_{20} z aplikace Rain.	27
Tab. 8: Náhradní intenzity pro N_{10} z aplikace Rain.	27
Tab. 9: Náhradní intenzity pro N_{100} z Truplových tabulek.	28
Tab. 10: Náhradní intenzity pro N_{50} z Truplových tabulek.	28
Tab. 11: Náhradní intenzity pro N_{20} z Truplových tabulek.	28
Tab. 12: Náhradní intenzity pro N_{10} z Truplových tabulek.	28
Tab. 13: Čísla CN pro dílčí povodí.	33
Tab. 14: Parametry povodí Malá Haná.	37
Tab. 15: Výsledky kalibrace pro variantu 1.	42
Tab. 16: Výsledky kalibrace pro variantu 2.	43
Tab. 17: N-leté průtoky povodí Malá Haná.	46
Tab. 18: Výsledné průtoky pro N_{100} .	46
Tab. 19: Výsledné průtoky pro N_{50} .	46
Tab. 20: Výsledné průtoky pro N_{20} .	46
Tab. 21: Výsledné průtoky pro N_{10} .	47
Tab. 22: Výsledné průtoky pro N_{100} .	48
Tab. 23: Výsledné průtoky pro N_{50} .	48
Tab. 24: Výsledné průtoky pro N_{20} .	48
Tab. 25: Výsledné průtoky pro N_{10} .	48
Tab. 26: N-leté průtoky povodí Rakovec.	50
Tab. 27: Výsledné průtoky pro N_{100} .	50
Tab. 28: Výsledné průtoky pro N_{50} .	50
Tab. 29: Výsledné průtoky pro N_{20} .	50
Tab. 30: Výsledné průtoky pro N_{10} .	51
Tab. 31: Výsledné průtoky pro N_{100} .	52
Tab. 32: Výsledné průtoky pro N_{50} .	52
Tab. 33: Výsledné průtoky pro N_{20} .	52
Tab. 34: Výsledné průtoky pro N_{10} .	52
Tab. 35: N-leté průtoky povodí Krásensko.	54
Tab. 36: Výsledné průtoky pro N_{100} .	54
Tab. 37: Výsledné průtoky pro N_{50} .	54
Tab. 38: Výsledné průtoky pro N_{20} .	54
Tab. 39: Výsledné průtoky pro N_{10} .	55
Tab. 40: Výsledné průtoky pro N_{100} .	56

Tab. 41: Výsledné průtoky pro N_{50}	56
Tab. 42: Výsledné průtoky pro N_{20}	56
Tab. 43: Výsledné průtoky pro N_{10}	56
Tab. 44: Poskytnuté N-leté průtoky pro řešená povodí.	58
Tab. 45: Vypočtené průtoky pro aplikaci Rain (varianta 1).	59
Tab. 46: Vypočtené průtoky pro Truplovy tabulky (varianta 1).....	59
Tab. 47: Vypočtené průtoky pro aplikaci Rain (varianta 2).	59
Tab. 48: Vypočtené průtoky pro Truplovy tabulky (varianta 2).....	60
Tab. 49: Doby dosažení Q_{20} pro variantu 1.	60
Tab. 50: Doby dosažení Q_{20} pro variantu 2.	63

6.4 Seznam zkratk

Q_{20}	Maximální průtok s dobou opakování 20 let.
Q_N	Maximální N-letý průtok doby opakování N.
p	Periodicita.
t	Doba trvání.
e (q)	Absolutní vlhkost vzduchu.
E (Q_{max})	Maximální vlhkost.
r	Relativní vlhkost.
d	Sytostní doplněk.
p'	Průměrná roční frekvence.
N	Průměrná doba opakování.
m	Počet výskytů daného jevu za sledované období.
M	Počet roků pozorování.
i	Intenzita.
t	Časový úsek.
i_{pr}	Plošně průměrná intenzita v kruhu o poloměru L.
L	Poloměr kruhu.
I_b	Maximální bodová intenzita v jádru deště.
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav.
ČR	Česká republika.
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System.
CN	Curve number.
Q	Průtok.
ADCP	Acoustics Doppler Current Profiler.
BPEJ	Bonitovaná půdně ekologická jednotka.
LPIS	Registr půdy.
GW	Ground water.
HSP	Hydrologická skupina půd.
SCS	Soil Conservation Service.