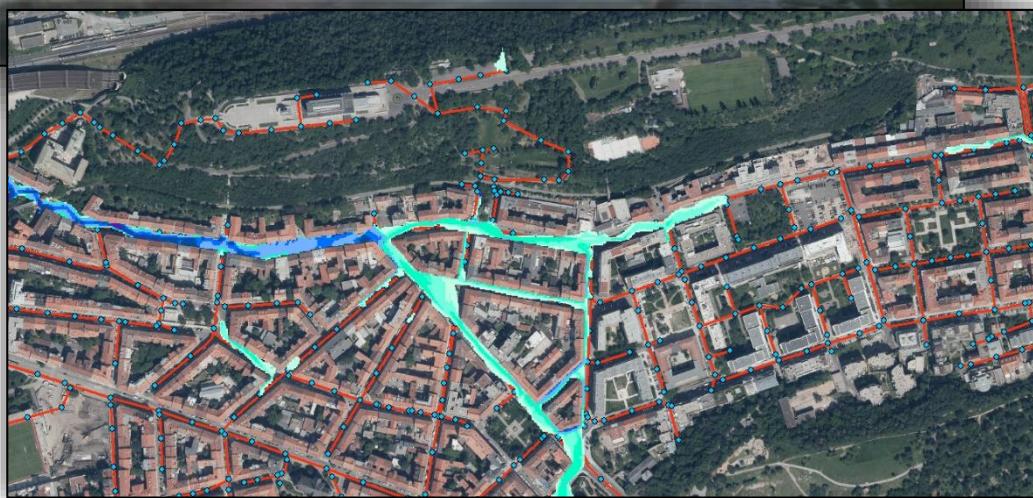



# Studie vyhodnocení a stanovení souboru N-letých extrémních přivalových zatěžovacích dešťů (dešťových intenzit) pro posudkové metody pomocí simulačních modelů



ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

ÚNOR 2021

Revize	Popis revize	Datum revize
--------	--------------	--------------

	<b>AQUA PROCON s.r.o.</b> Projektová a inženýrská společnost – divize Praha Dukelských hrdinů 12, 170 00 Praha tel.: 266 109 335, fax: 266 712 140 E-mail: info@aquaprocon.cz www.aquaprocon.cz
	Vedoucí projektu                      Ing. Radovan Haloun, CSc.
Vedoucí dílčího projektu              Ing. Tomáš Metelka	
Zodpovědný projektant                  Ing. Tomáš Metelka	
Vypracoval Ing. Táňa Janů Ing. Jaromír Štosek	
Kontroloval                                  Ing. Radovan Haloun, CSc.	

Investor	Pražská vodohospodářská společnost a.s.
Objednatel	Pražská vodohospodářská společnost a.s.

Formát	A4	Měřítko	Stupeň	Studie	Datum	02/2021	Zakázkové číslo	1545220-02
--------	----	---------	--------	--------	-------	---------	-----------------	------------

Projekt  <p style="text-align: center;">Studie vyhodnocení a stanovení souboru N-letých extrémních přívalových zatěžovacích dešťů (dešťových intenzit) pro posudkové metody pomocí simulačních modelů</p>		
Příloha  <p style="text-align: center;">ZÁVEREČNÁ ZPRÁVA</p>	Číslo přílohy  <p style="text-align: center;">A</p>	Revize  <p style="text-align: center;">0</p>

## Obsah

1	Úvod.....	5
1.1	Změna klimatu.....	5
1.2	Městské odvodnění v podmínkách změny klimatu.....	6
1.3	Cíle studie .....	7
2	Podklady projektu.....	8
2.1	Srážková data .....	9
2.1.1	Data srážkoměrné sítě PVS a.s. ....	9
2.1.2	Srážková data ČHMÚ.....	10
2.2	1D simulační model.....	12
2.3	Digitální model reliéfu .....	14
3	Řešení vlivu změny klimatu na srážkovou činnost v hl. m. Praze .....	17
3.1	Revize čáry náhradních intenzit.....	18
3.1.1	Srážková data použitá pro analýzy.....	18
3.1.2	Regionální frekvenční analýza .....	20
3.1.3	Volba rozdělení .....	20
3.1.4	Ověření předpokladů RFA.....	22
3.1.5	Statistický model pro podpis vztahu doby trvání a parametrů regionálního GEV MODELU.....	23
3.1.6	Odhad náhradních intenzit .....	24
3.2	Analýza tvaru náhradních dešťů.....	26
3.2.1	Přehled syntetických dešťů .....	26
3.2.2	Shluková analýza tvarů syntetických dešťů ČVUT UFA 2018.....	31
3.2.3	Vliv časového rozložení deště na hydrogram odtoku.....	33
3.2.4	Porovnání vybraných tvarů syntetických dešťů a doporučení vhodného tvaru.....	33
3.3	Stanovení závislosti srážkových intenzit na zasažené ploše povodí.....	37
3.3.1	Metodika stanovení plošných redukčních faktorů .....	37
3.3.2	Výpočet pro zájmové území .....	37
3.3.3	Doporučená velikost ARF pro území Prahy.....	39
3.4	Volba klimatického scénáře, časových horizontů a stanovení klimatického faktoru.....	41
3.4.1	Odhad vývoje srážkových extrémů v měnícím se klimatu.....	41
3.4.2	Použitá data .....	41
3.4.3	Statistický model .....	43

3.4.4	Disagregace .....	45
3.4.5	Výsledné klimatické faktory .....	47
4	Řešení vlivu změny klimatu na městské odvodnění v hl. m. Praze .....	52
4.1	Metodika řešení přívalových dešťů .....	52
4.1.1	Srážkový odtok v intravilánu .....	53
4.1.2	Úpravy 1D modelu .....	55
4.1.3	Zatěžovací deště .....	61
4.1.4	2D model .....	64
4.1.5	Propojení 1D a 2D simulačního modelu .....	67
4.1.6	Propojení šachet 1D modelu a DEM .....	67
4.2	Analýza funkce stokové sítě na 1D modelu .....	69
4.2.1	Použitý simulační model .....	69
4.2.2	Úpravy modelu pro simulaci extrémních srážek .....	70
4.2.3	Testování modelu stávající stav .....	70
4.2.4	Testování modelu výhledový stav .....	75
4.3	Analýza funkce stokové sítě na spojeném 1D a 2D modelu .....	84
4.3.1	Analýza stávajícího stavu .....	85
4.3.2	Analýza výhledového stavu .....	87
4.3.3	Dílčí závěry .....	89
5	Závěry a doporučení .....	90
6	Přílohy .....	92
7	Literatura .....	99

## 1 Úvod

### 1.1 Změna klimatu

Otázky spojené se změnou klimatu se v ČR objevují již mnoho let. Na vědecké úrovni panuje dnes prakticky shoda nejen o existenci tohoto fenoménu, ale i o významném vlivu antropogenní činnosti na jeho rozvoj. Existuje jasná korelace mezi vlivem lidské činnosti od počátku průmyslové revoluce v polovině devatenáctého století až do současnosti a mírou oteplování planety. Tento rok byl potvrzen nárůst globální teploty o 1 stupeň celsia za posledních sto let. Přesto, že tato hodnota v člověku na první pohled nevyvolává obavy, jedná se o významný nárůst, protože mění celkovou dynamiku globální cirkulace vzduchu na planetě. To s sebou přináší v podmínkách střední Evropy významné důsledky nejen v podobě růstu letních teplot a dlouhých období sucha, ale i na to navazující přívalové deště a zvýšený výskyt výrazné větrné činnosti (orkány, tornáda). Na globální úrovni pak hraje dále významnou roli růst hladiny světových oceánů v důsledku tajících ledovců, oteplování mořských vod zvýšenou absorpcí slunečního záření a mnoho dalších jevů, které ve svém součtu vytváří dominový efekt pro nestabilitu klimatu (více [www.IPCC.ch](http://www.IPCC.ch)).

Jestliže panuje na vědecké rovině shoda o klimatické změně a jejích důsledcích, na rovině politické a ekonomické tomu tak není. Je zřejmé, že změna klimatu s sebou přinese větší nebo menší důsledky pro život společnosti, jak na rovině ekonomické, tak i společenské. Proto lze do jisté míry chápat nechuť některých zemí (ke kterým ČR bohužel patří) začít celou situaci vnímat a hledat možnosti ochrany. Na druhé straně je ale evidentní, že tento přístup nepřinese řešení a pouze oddálí chvíli, kdy se celou otázkou ochrany společnosti začnou vlády zabývat.

Možnosti ochrany společnosti před důsledky klimatické změny je možno vidět ve dvou strategických směrech. Tím prvním je tzv. mitigační (zmírňovací) strategie, která je zaměřena na redukci skleníkových plynů jako příčiny nástupu změny klimatu. Druhým směrem je adaptační strategie zaměřená na adaptaci společnosti a jejích funkcí a procesů na důsledky změny klimatu.

Faktem je, že na globální úrovni bylo již vykonáno mnoho kroků na obranu před změnou klimatu. Posledním z nich je známá Pařížská dohoda z roku 2015, ve které se signatáři vlád světa zavázali k redukci skleníkových plynů do roku 2050 tak, aby celková teplota země nepřekročila 1,5 stupně celsia. Zároveň byly rozpracovány základní teze obrany společnosti před důsledky změny klimatu. Evropská Unie v tomto směru patří k hlavním hybatelům změn, které naši společnost čekají. Z tohoto důvodu je také ve stávajícím plánovacím období let 2021-2027 věnována významná pozornost financování projektů zaměřených na ochranu před důsledky změny klimatu. Nutno však dodat, že obdobnou situaci bohužel nevidíme v přístupu ČR.

Příprava naší země na zhoršující se podmínky života vlivem klimatické změny neodpovídá v současnosti přípravě EU jako celku, a to jak v mitigačních, tak i v adaptačních opatřeních. Nicméně můžeme v posledních letech vystopovat určité změny v přístupu ke klimatické změně i v ČR. Velmi vážně je brána otázka adaptace na období sucha, i když výsledky v podobě možných adaptačních opatření ještě nejsou zcela patrné. Podobně je tomu i v adaptaci měst,

kde lze vidět aplikaci opatření pro hospodaření s dešťovou vodou a opatření na redukcii tepelných ostrovů. Stále se však jedná spíše o ojedinělé případy.

## 1.2 Městské odvodnění v podmínkách změny klimatu

Hovoříme-li o důsledku klimatické změny v oblasti intravilánu měst, nutně musíme zmínit hlavní tři projevy, kterými o sobě klimatická změna dává vědět. Těm jsou extrémní (zvláště noční) teploty v důsledku přehřátí budov v centrech měst, dlouhá suchá období s nedostatkem vody pro zavlažování, čištění ulic a případně i pro zásobování obyvatel a dále situace náhlých přívalových dešťů způsobujících lokální záplavy se škodami na městské infrastruktuře, majetku obyvatel a v extrémních případech i ztráty na životech. Všechny tyto jevy jsou vlastně fyzikálně provázány (období extrémního horka s vláhovým deficitem a nedostatkem vody a na ně navázaná tvorba přívalových dešťů) a proto i adaptace na vyjmenované jevy by měla zahrnovat ochranu před nimi jako celku.

V současnosti můžeme sledovat návrhy opatření, které jsou směřovány na adaptaci měst, hlavně na ochranu před obdobími sucha a vln horka v podobě opatření pro hospodaření s dešťovou vodou (HDV), která napomáhají vyrovnat vodohospodářskou bilanci a přispívají k ochlazení lokálního mikroklimatu. Doposud ale v České republice nebyla věnována větší pozornost extrémním dešťům a jejich důsledkům na chod obcí. Přitom přívalové deště můžeme pozorovat již mnoho let (např. dešť ze dne 14.8.2020) a jejich důsledky již zakusilo mnoho českých měst.

Problematika přívalových dešťů a adaptace měst na ochranu před jejich důsledky se začíná v posledních několika letech řešit v celé Evropě. Přívalové deště v důsledku extrémních suchých období nabírají na intenzitě a tento trend bude trvat i nadále v důsledku probíhající změny klimatu. Výsledky klimatických modelů odhadují nárůst intenzity přívalových dešťů do roku 2100 (Klimatický Faktor) v podmínkách ČR okolo 20-40 %. Tento fakt s sebou přináší vzrůstající zájem měst a obcí na ochraně městské infrastruktury před přívalovými dešti ruku v ruce s konceptem hospodaření s dešťovou vodou v obdobích sucha. Je přitom jasné, že stávající kanalizace nemůže pojmout objemy vod z těchto extrémních srážek a také není možné stávající jednotnou nebo dešťovou kanalizaci dále rekonstruovat. Jedinou možnou adaptací města na takovéto extrémní situace je manipulace s dešťovými vodami (transformace, retence, retardace, přesměrování atd.) na povrchu povodí. Příkladem takového postupu je i zpracovaný generel přívalových dešťů města Kodaň z roku 2014 (jako důsledek zkušenosti města s několika extrémními srážkovými událostmi z let 2010-2012), ve kterém je proveden návrh adaptačních opatření v samotném centru města.

Velkým nedorozuměním v oblasti řešení přívalových dešťů je známý fakt, že tyto lokální extrémní události není v principu možno předvídat. To je sice pravda, ale pravda již není, že se na takovéto situace nemůže daná obec či město připravit. Přesto, že v současnosti nemůžeme předpovědět kdy a v jaké síle udeří lokální přívalový dešť na danou lokalitu, můžeme s využitím simulačních modelů příchod takovéto extrémní situace nasimulovat a vyhodnotit potenciální dopady a negativní důsledky. Navíc, při znalosti důsledků přívalové srážky na jednotlivé lokality v městě (směr proudu vody, lokální deprese vyplněné vodou, zasažená infrastruktura atd.) můžeme ve smyslu výše uvedeného přístupu navrhnout opatření

pro adaptaci města na příklad s pomocí přesměrování proudu vody, zpoždění a redukci objemu vod atp. a tím je možno připravit (adaptovat) danou lokalitu na příchod extrémní události tak, aby došlo k minimalizaci škod a k ochraně městské infrastruktury a majetku obyvatel.

Pro analýzu vlivu přívalových dešťů na městské odvodnění je třeba stanovit několik podmínek, které ve svém důsledku ovlivňují výsledné řešení. Těmi nejdůležitějšími je stanovení míry ochrany před důsledky přívalových dešťů (běžně se hovoří o ochraně proti 20, 50 nebo 100letému dešti obdobně jako je tomu u povodňových událostí) a dále stanovení vlivu změny klimatu na vlastní charakteristiky dešťových událostí. Tyto podmínky ještě nejsou v České republice definovány s ohledem na novost tohoto řešení. Předložená studie si tedy klade za cíl přispět k nastavení základních parametrů pro standardizaci výpočtů a vyhodnocení vlivu přívalových dešťů na městské odvodnění v intravilánu měst a obcí.

### 1.3 Cíle studie

Předmětem studie je dle smlouvy vyhodnocení a stanovení souboru N-letých extrémních přívalových zatěžovacích dešťů – dešťových intenzit – pro posudkové metody pomocí simulačních modelů. Součástí studie bude návrh a posouzení vhodnosti využití syntetických dešťů odvozených z blokového deště dané intenzity a N-letosti pro modelování extrémních srážkových událostí. Ve studii bude dále provedeno stanovení vlivu klimatické změny na extremicitu návrhových intenzit různé doby opakování pro zvolené časové horizonty výhledového stavu.

Studie by měla s využitím dostupného souboru srážkových dat přinést odpovědi na následující klíčové otázky:

- a. Jaké srážkové události použít pro zatížení a posouzení odtokových poměrů v urbanizovaném povodí Prahy při extrémních srážkových situacích v závislosti na délce trvání a intenzitě srážky, pro různé doby opakování a s ohledem na ekonomický efekt navržených opatření.
- b. Jaký bude očekávaný vliv klimatické změny na extremicitu srážek v Pražské kotlině v časovém horizontu do roku 2100.

Výstupem řešení má být jasně definovaný soubor extrémních přívalových zatěžovacích dešťů – dešťových intenzit – včetně podrobné metodiky postupu pracování, který bude dále využit v rámci správy generelu odvodnění hl. m. Prahy pro posudkovou a návrhovou činnost. Soubor dat bude zahrnovat vliv klimatické změny pro zvolené časové horizonty a bude rozšířen o zatěžovací srážky s požadovanou dobou opakování dle objednatele.

## 2 Podklady projektu

Podkladová data pro studii zhotovitel získal v otevřených formátech od objednatele či jiným způsobem. Jednalo se o následující podklady, které byly následně použity pro zpracování studie.

- a. 1D Simulační model stokové sítě
  - Model předán zhotoviteli objednatelem.
  - *Formát MDB, zdroj PVS a.s.*
- b. Digitální model povrchu
  - Zdrojem otevřených dat digitálního modelu je IPR Praha
  - *Formát TIFF, zdroj IPR.*
- c. Časové řady historicky měřených srážek 1999 – 2001 z 19 oblastí
  - Ruzyně, Stodůlky, Motol, Petřiny, Dejvice, Troja, Jiviny, Malešice, Modřany, Braník, Nové Město, Žižkov, Prosek, Vršovice, Strašnice, Libuš, Chodov Počernice, Hostivař.
  - *Formát DFS0, zdroj PVS a.s.*
- d. Časové řady historicky měřených srážek 2002-2012 z 23 oblastí
  - Řepy, Kopanina, Vidoule, Vypich, Bruska, Suchdol, Barrandov, Kyje, Radotín, Ládví, Karlov, Flora, Prosek, Zelená Liška, Hrdlořezy, Kamýk, Chodov, Kozinec, U ČOV, Dubeč, Čertousy, Miškovice, Újezd nad Lesy.
  - *Formát DFS0, zdroj PVS a.s.*
- e. Časové řady historicky měřených srážek 2014-2019 z 11 oblastí
  - Libuš, Karlov, Ruzyně, Kbely, Neumětely, Břevnov, Lány, Ondřejov, Klementinum, Kralupy nad Vltavou, Dobřichovice
  - *Formát XLS, zdroj ČHMÚ..*
- f. Doplňkovým podkladovým materiálem jsou videozáznam záplavy 14.7.2014 v Karlíně
  - *Formát MP4. zdroj internet.*



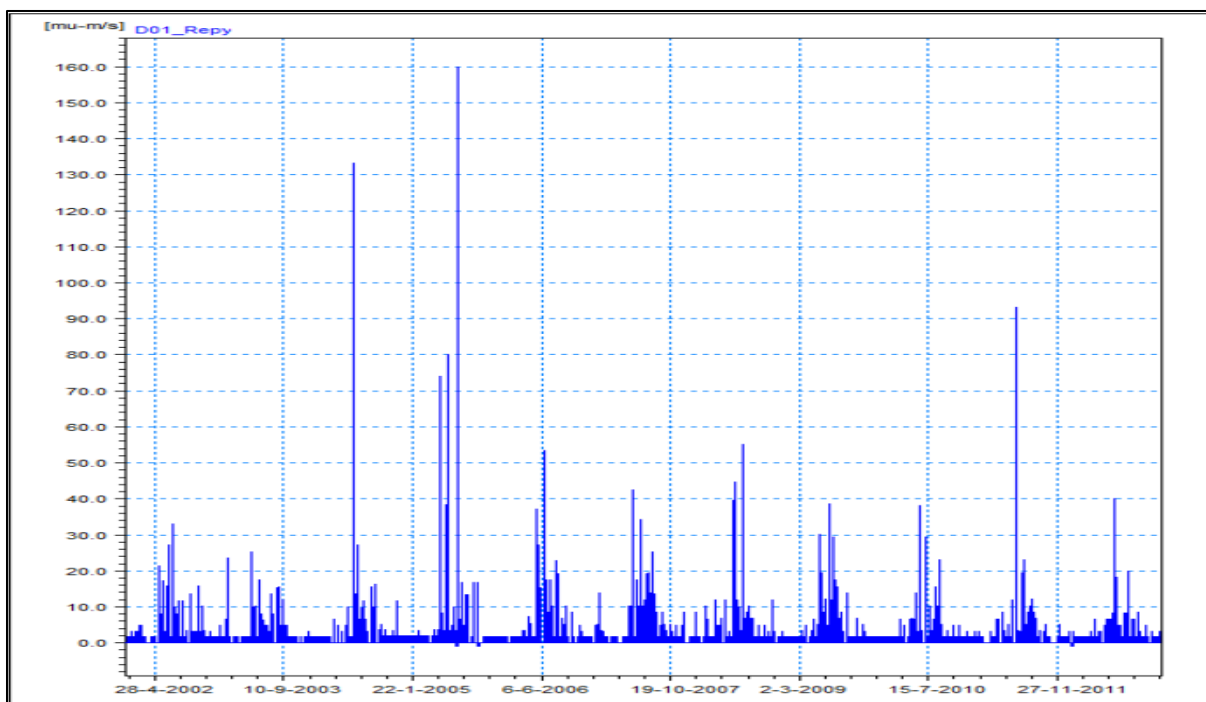
## 2.1 Srážková data

Data srážkových řad byla získána ze dvou zdrojů a sice ze srážkoměrné sítě hl.m.Prahy od PVS a.s. a dále ze sítě srážkoměrů ČHMÚ. Jednotlivé datové sety pokrývaly různé doby měření a byly předány v odlišných datových formátech. Stanice PVS pokrývají území HMP Praha, stanice ČHMÚ doplňují pražskou síť a rozšiřují ji o několik mimopražských stanic.

Srážkoměry na různých lokalitách lze rozdělit dle zaznamenaných srážek do dvou skupin. Jedna část je měřena mezi lety 1999 – 2001, druhá část mezi roky 2002 – 2019. Dále vznikají zvlášť ještě soubory srážek pro roky 2019 a 2020.

### 2.1.1 Data srážkoměrné sítě PVS a.s.

Srážková data od PVS a.s. byla získána pro časové období 1999 až 2020. Jedná se o hodnoty okamžité srážkové intenzity ( $\mu\text{m/s}$  resp.  $\text{mm/h}$ ) s časovým intervalem 1 min. Pro období 1999-2012 byla data ve formátu DFS0. Pro období 2013-2020 byla data ve formátu TXT a pro výpočetní práce s modelem je bylo třeba převést do formátu DFS0.



Obr. 1 Příklad srážkové řady, stanice D23 a rok 2002 - 2012

Srážkoměrné stanice měřící srážky v období 1999-2001 byly umístěny na jiných místech než stanice měřící srážky v letech 2002-2020. Souřadnice stanic měřících srážky v období 1999-2001 nejsou známy. Údaje ze stanice D19 jsou k dispozici pouze za léta 2007-2020, údaje ze stanic D20, D21, D22 a D23 pouze za léta 2009-2020. Souhrnné informace o stanicích měřících srážky v období 2002-2020 jsou v Tab. 1. Ukázka časové řady stanice D01 v intervalu 2002-2012 je na Obr. 1.

Tab. 1. Lokality srážkoměrů PVS a.s.

ID stanice	souřadnice		
	X	Y	Z
D01_Repy	-751037	-1043408	372
D02_Kopanina	-751759	-1045849	393
D03_Vidoule	-747840	-1045589	371
D04_Vypich	-748280	-1042815	370
D05_Bruska	-744644	-1041817	241
D06_Suchdol	-747468	-1038964	344
D07_Barrandov	-746032	-1048235	291
D08_Kyje	-731236	-1048555	256
D09_Radotin	-747774	-1052583	305
D10_Ladvi	-737772	-1037980	295
D11_Karlov	-742498	-1044735	241
D12_Flora	-740085	-1044676	277
D13_Prosek	-737641	-1040740	253
D14_Zelena Liska	-741730	-1047374	272,2
D15_Hrdlořezy	-737718	-1043263	270
D16_Kamyk	-742609	-1052028	292
D17_Chodov	-738309	-1050856	322
D18_Kozinec	-734387	-1049086	313
D19_UCOV_F1	-743856	-1039937	neznámá
D20_Dubec	-732160	-1040914	neznámá
D21_Certousy	-727031	-1041149	neznámá
D22_Miskovice	-732967	-1035649	neznámá
D23_Ujezd_nad_lesy	-727639	-1045431	neznámá

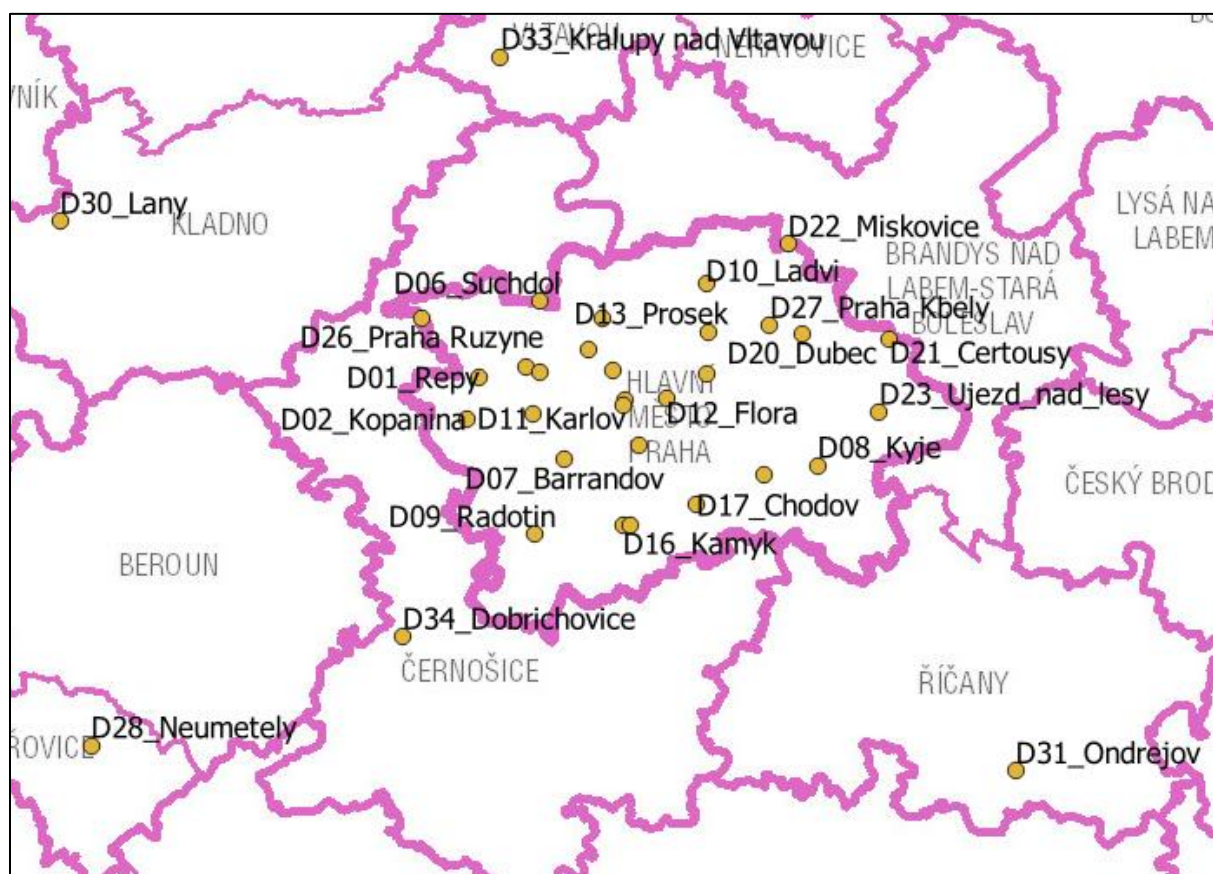
### 2.1.2 Srážková data ČHMÚ

Srážková data ČHMÚ byla získána pro časové období 2014 až 2019 ve formátech TXT, resp. XLSX. Rok 2016 a 2014 obsahuje data ze srážkoměrů D24 - D34. Jedná se o intenzitu v  $\mu\text{m/s}$  po 10 minutách za celý rok. V roce 2019 jsou navíc data ze srážkoměrných stanic Komořany (P1PKOM01) a Flóra (P1PVIN01). Souřadnice těchto dvou stanic nejsou známy.

Pro výpočetní práce s modelem bylo data potřeba převést do formátu DFS0. Data ve formátu XLSX bylo nutné před importem upravit. Souhrnné informace o srážkových stanicích měřících srážky v období 2014-2019 jsou v Tab. 2. Přehledná mapa lokalizující stanice je na Obr. 2.

Tab. 2. Lokality srážkoměrů sítě ČHMU

ID stanice	souřadnice		
	X	Y	Z
D24-P1PLIB01-Praha Libuš	-742200	-1052052	302
D25-P1PKAR01-Praha Karlov	-742625	-1045073	260
D26-P1PRUZ01-Praha Ruzyně	-754363	-1039981	364
D27-P1PKBE01-Praha Kbely	-734022	-1040384	285
D28-P1NEUM01-Neumětely	-773679	-1064892	322
D29-P1PBRE01-Praha Břevnov	-747458	-1043129	355
D30-P1LANY01-Lány	-775492	-1034295	415
D31-P3ONDR01-Ondřejov	-719678	-1066378	485
D32-P1PKLE01-Praha Klementinum	-743172	-1043058	191
D33-P1KRAL01-Kralupy nad Vltavou	-749749	-1024721	220
D34-P1DOBE01-Dobříchovice	-755472	-1058549	205



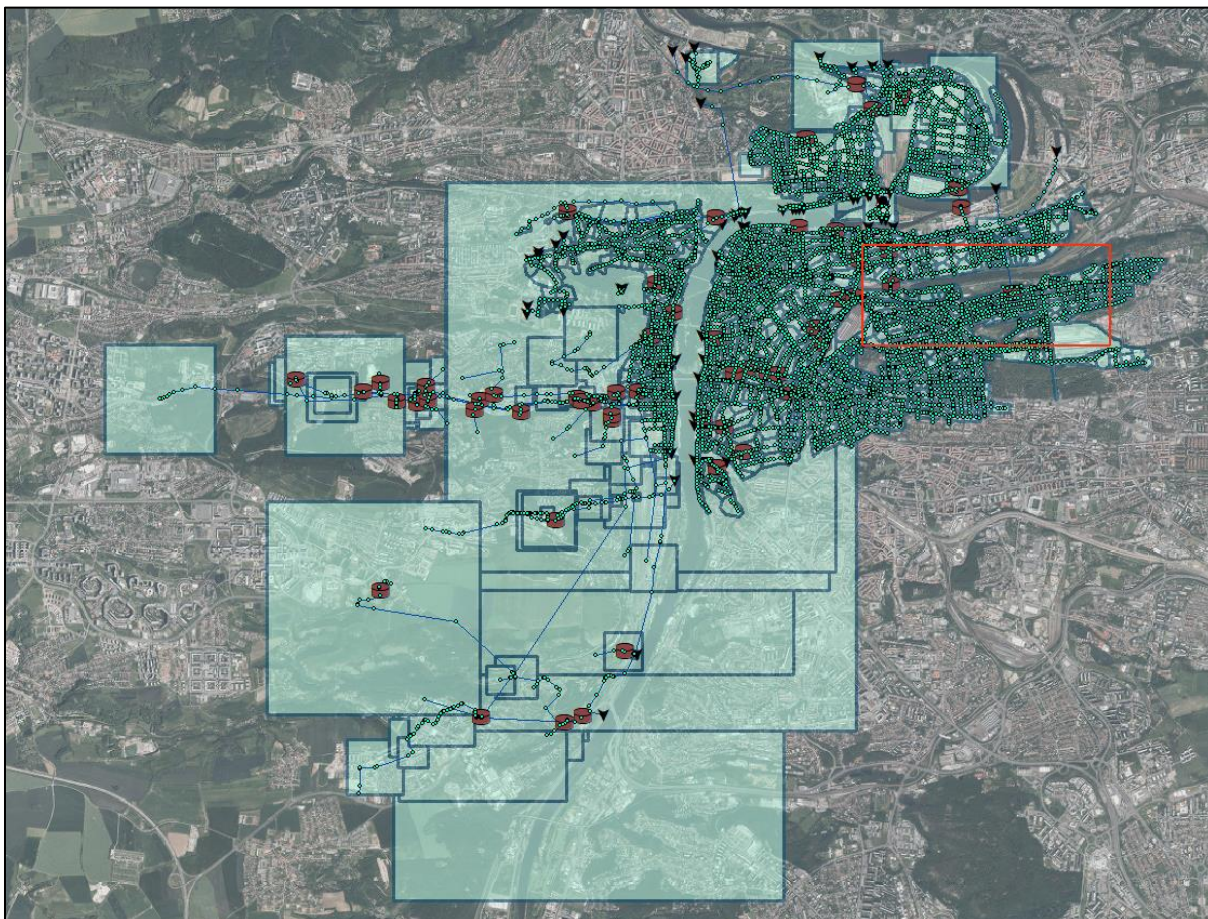
Obr. 2. Umístění srážkoměrných stanic PVS a.s. a ČHMU, které byly použity pro studii

## 2.2 1D simulační model

Mezi základní podklady zpracování studie patří 1D simulační model, který představuje pro vodohospodáře důležitý nástroj pro vyhodnocení funkce městského odvodnění. Společně s úpravou sítě a jednotlivých povodí pro budoucí rozvoj dokáže vyhodnotit kromě současného stavu i možné výhledové stavy odvodnění ve smyslu řešení typu „Co se stane, když...“.

Pro zpracování studie byl získán od objednatele 1D simulační model stokové sítě (Obr. 3) v otevřeném formátu MDB („SS\_povodi\_AB\_140930.mdb“). Nebyla nutná žádná transformace, databáze je připravena přímo pro simulační program MIKE URBAN, ve kterém jsou simulace prováděny. Model stávajícího stavu kanalizace zahrnuje pouze část hl. m. Prahy. Zájmovou oblastí je pro danou studii Karlín - Žižkov, nicméně simulační model také zahrnuje napojení kanalizačního systému celé oblasti nebo části oblastí Starého Města, Nového Města, Smíchova, Malé Strany, Hlubočep, Motola, Holešovic, Hradčan a Košíř.

Stoková síť Prahy má dlouhou historii, a proto je v centru města kanalizace převážně jednotná. Kanalizace je svedena do mechanicko-biologické ÚČOV na Císařském ostrově, která byla uvedena do provozu v roce 1966 a je spravována PVS a.s. Na síti je 64 odlehčovacích komor, jejichž přepad vyúsťuje převážně do koryta Vltavy či přilehlých vodotečí.



Obr. 3 1D simulační model stokové sítě

Přejatý model je z hlediska strukturálních dat v pořádku. Veškeré šachty mají informaci o výšce poklopu i terénu s přesností na centimetr. Zadán je i průměr šachet a ve většině případů i zdroj dat. Stejně tak jsou zpracována i potrubí, která mají zadáný průměr a materiál.

Simulační model stokové sítě se skládá z objektů, jejichž stručná charakteristika je uvedena v tabulce Tab. 3.

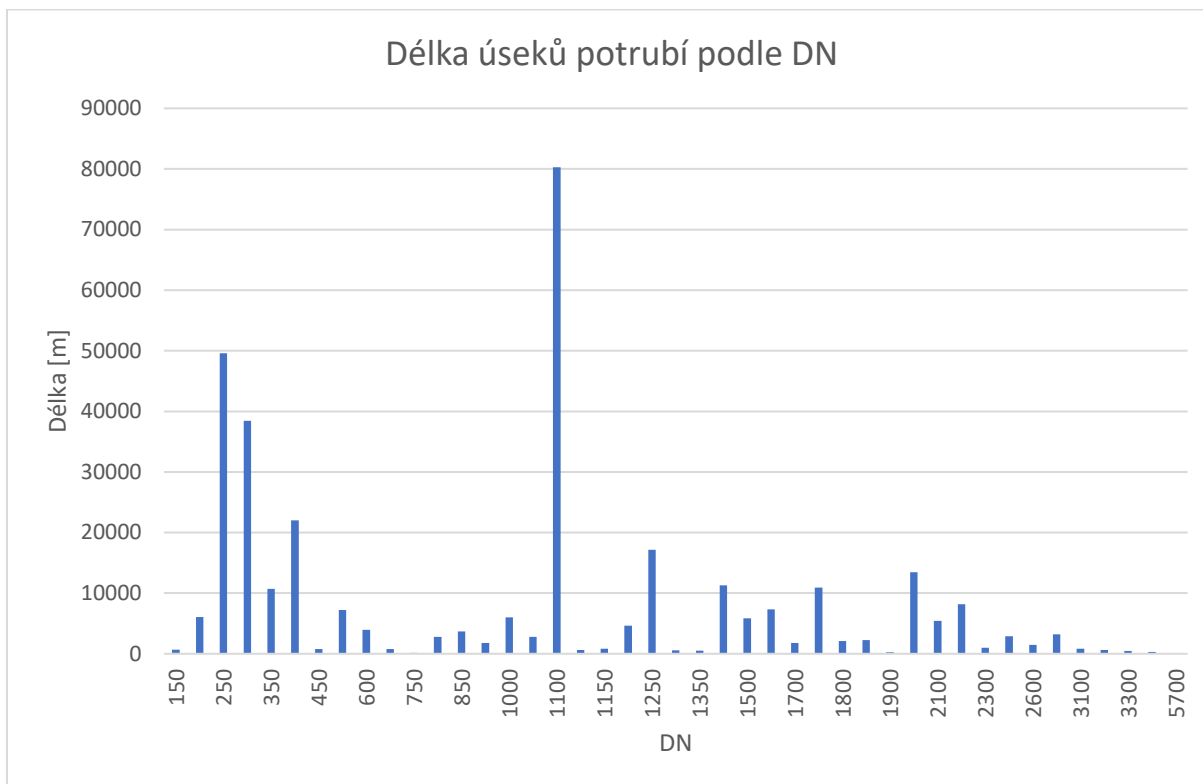
Tab. 3 Popis objektů původního simulačního modelu

Objekt	Velikost
Povodí (počet)	2301
Šachty (počet)	8600
Potrubí (počet/délka [m])	9058/340933
Čerpací stanice (počet)	3
Přelivy (počet)	36
Odlehčovací komory (počet)	64
Výusti (počet)	74

Celková délka kanalizace v modelu je 341,5km. V tabulce Tab. 4 Je rozpis délek potrubí a jejich grafické znázornění na obrázku Obr. 4. Všechna potrubí jsou propojena s šachtami. Dále model obsahuje detailně popsané objekty (zejm. Odlehčovací komory), které mají daný objem, vstupní i výstupní výšku pro nátok a odtok odpadních vod. V modelu nebylo nutné pro jeho funkčnost dělat zásadní úpravy či transformace.

Tab. 4 Rozdělení potrubí podle DN

DN	Délka [m]	DN	Délka [m]	DN	Délka [m]	DN	Délka [m]
>150	649	850	3705	1500	5840	2600	1470
200	6035	900	1773	1600	7328	2700	3199
250	49566	1000	5983	1700	1777	3100	822
300	38456	1050	2778	1750	10903	3200	596
350	10712	1100	80271	1800	2076	3300	477
400	21991	1125	614	1850	2237	3500	281
450	770	1150	830	1900	224	5700	112
500	7233	1200	4637	2000	13462		
600	3946	1250	17143	2100	5440		
700	791	1300	580	2200	8183		
750	165	1350	500	2300	997		
800	2810	1400	11314	2400	2868		



Obr. 4 Grafické rozdělení potrubí podle DN

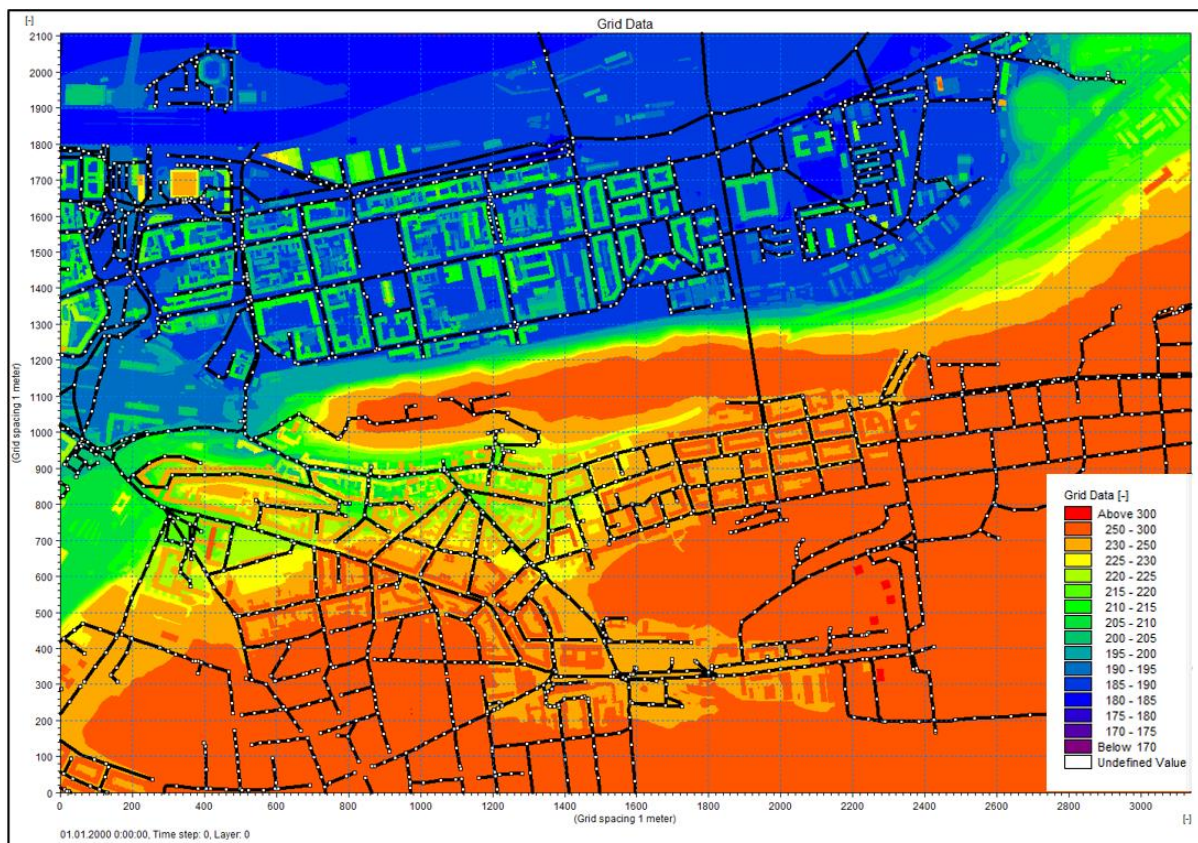
Celková plocha povodí původního modelu je 14 983,5 ha. Z toho velikost nepropustné plochy má průměrnou hodnotu na celém povodí 44,1 % (6 607,7 ha je sumou nepropustných ploch na jednotlivých povodích). Zbývá více než polovina povodí jsou plochy propustné (resp. plochy, ze kterých podle původně zkalibrovaného modelu neodtéká dešťová voda do kanalizace). Nepropustná plocha je dále zredukována průměrným redukčním faktorem RF 0,89 na výslednou hodnotu 39,2 %.

Z hlediska zájmového území je oblast Karlína ohraničena tak, aby bylo možné modelovat nátok extrémní srážky do ulic Koněvova a Husitská, ze kterých pochází videozáznamy zatopení ulic v roce 2014. Obě ulice se nacházejí pod Vítkovem, přibližně ve středu červeně vyznačené oblasti a navazují na sebe. Mimo jiné v důsledku poměrně velkého výškového rozdílu mezi Vítkovským kopcem (cca 260 m n. m.) a rovnoběžnými výše jmenovanými ulicemi pod ním (cca 225 m n. m.) v oblasti dochází k nahromadění vody a následné záplavě.

### 2.3 Digitální model reliéfu

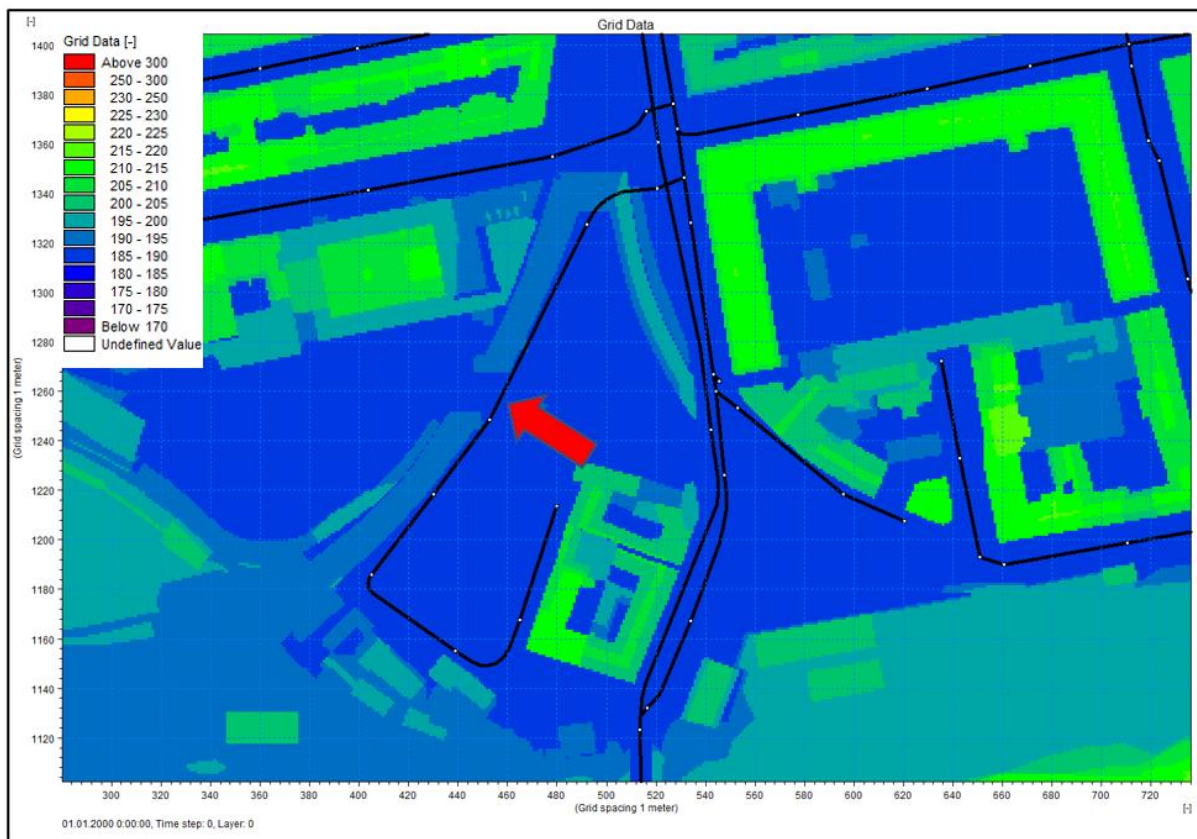
Digitální model reliéfu (povrchu) DMR vznikl vyhodnocením leteckých snímků. Zobrazuje terén včetně všech objektů na něm (budovy, mosty, porosty zeleně apod.). Síť je stavěna ze čtvercových buněk o rozlišení 1 m. Výchozím referenčním systémem je S-JTSK/Křovákovo konformní kuželové zobrazení East-North. Model byl vytvořen v roce 2015 a poslední aktualizace proběhla v roce 2020 (k aktualizaci dochází dvakrát ročně).

DMR byl následně upraven pro zájmovou oblast Karlína tak, že výsledný rastr obsahuje 3139 x 2108 gridových polí o velikost 1 x 1 m. Každé pole nese informaci jak o své poloze (X, Y souřadnice), tak i o výšce (Z souřadnice). Formát byl transformován z TIFF na DFS2 pro snazší úpravy modelu. Výškové rozpětí použitého výřezu z modelu se pohybuje mezi 179,70 m n.m. až po 394,78 m n. m (Obr. 5).



Obr. 5 Digitální model reliéfu zájmové oblasti

Jelikož rastrová data vznikají z leteckých snímků a v případě, že terén je překrytý např. mostní konstrukcí, dochází v modelu ke vzniku překážky, kterou je nutné odstranit. Pokud by odstraněna nebyla, dochází k plnění vody před překážkou a tím pádem simulace záplavy není v tomto místě správná. Při úpravách digitálního modelu proto došlo v některých místech ke změně výšky reliéfu, aby model odrážel prostupnost terénu pro odtok srážkových vod podle skutečnosti a záplavu generovaná z extrémní srážky také odpovídala realitě.



Obr. 6 Úprava DMR v lokalitě Florenc

V některých lokalitách za pomoci Google Street View došlo k revizi modelu a v případě chybné neprostupnosti terénu byly hodnoty upraveny nejčastěji pomocí interpolace okolního terénu. Příkladem je vjezd do autobusového nádraží Florenc (Obr. 6).

Po celkové revizi DMR zájmové lokality Karlín byl reliéf použit jako součást 2D simulačního modelu, který vznikl propojením 1D simulačního modelu stokové sítě a DMR. Na základě tohoto propojení je možné simulovat a následně vizualizovat rozliv extrémních srážek po povrchu terénu (více v kap. 4.1.5 Propojení 1D a 2D simulačního modelu).



### 3 Řešení vlivu změny klimatu na srážkovou činnost v hl. m. Praze

Řešení vlivu změny klimatu na srážkovou činnost v oblasti Prahy je opřeno o čtyři spolu související bloky analýz a sice

- a. Revize čáry náhradních intenzit
- b. Analýza tvaru náhradních dešťů
- c. Volba klimatického scénáře, časových horizontů a stanovení klimatického faktoru
- d. Stanovení závislosti srážkových intenzit na zasažené ploše povodí

V části a) zhotovitel provedl revizi hodnot náhradních intenzit používaných v inženýrské praxi (konkrétně se jedná o hodnoty Pražských Stavebních Předpisů) na základě souboru srážkových dat ze srážkoměrné sítě hl. m. Prahy a s využitím současných metod statistiky a pravděpodobnosti.

V části b) zhotovitel analyzoval převažující charakter a tvar dešťových událostí v Pražské kotlině a na jeho základě provedl návrh vhodného tvaru pro převod blokových intenzit do formy technického deště.

V části c) pak zhotovitel po diskusi se objednatelem provedl návrh použití datových souborů klimatických modelů pro zvolené scénáře vývoje společnosti a na základě výsledků simulací regionálních a globálních modelů pak zpracoval hodnoty klimatického faktoru pro definované časové horizonty.

V části d) zhotovitel provedl analýzu vlivu velikosti zasaženého povodí na velikost extrémních srážkových intenzit s ohledem na fakt, že v rámci řešení v intravilánu města jsou prostorová měřítka menšího rozsahu (2-10 km<sup>2</sup>).

Výsledkem předložených prací je pak soubor extrémních srážkových intenzit navržených pro simulace přívalových dešťů v Praze.

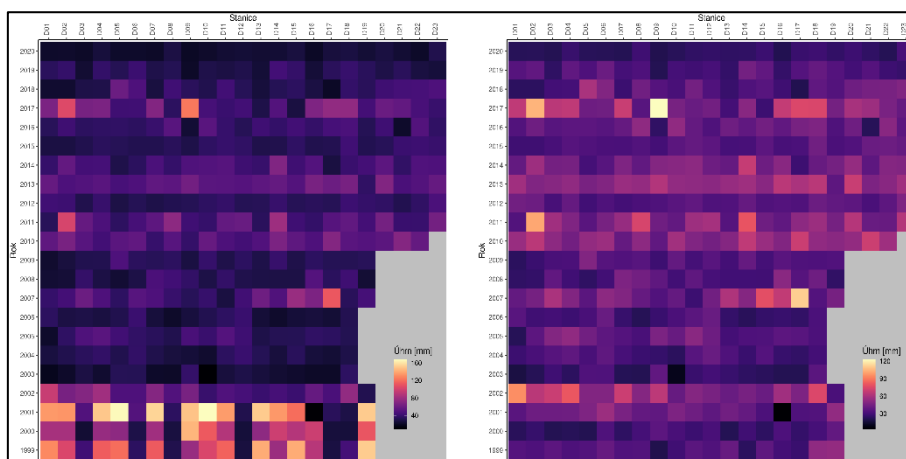
### 3.1 Revize čáry náhradních intenzit

#### 3.1.1 Srážková data použitá pro analýzy

Pro zpracování čáry náhradních intenzit byla zhotoviteli poskytnuta data ze dvou zdrojů, a to: 1. Pražská vodohospodářská společnost a.s. (PVS a.s.) a Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ).

Data od PVS byla v časovém rozlišení 1 minuta v jednotkách  $\mu\text{m.s}^{-1}$  (viz Obr. 7). Data se kvalitou lišila ve dvou obdobích let 1999–2001 (dostupné stanice D01-D19) a 2002–2020 (dostupné stanice D01-D23), která jsou uvedena na (viz Obr. 8).

V datovém souboru pro období 1999–2001 se nacházela systematická chyba u všech stanic kromě D03, D06, D08, D12, D17, D18. Byla provedena korekce dle vztahu  $\bar{x}(A)/\bar{x}(B) = \text{ref } \bar{x}(A)/\text{ref } \bar{x}(B)$ , kde  $\bar{x}$  jsou průměry denních úhrnů pro stanice PVS,  $\text{ref } \bar{x}$  jsou průměry denních úhrnů pro referenční stanice a  $A$  a  $B$  jsou období měření 1999–2001 a 2002–2019 jako referenční stanice sloužila data ČHMÚ s dostatečně dlouhou časovou řadou pro pokrytí obou časových období. Následně bylo po jednání se objednatelem nicméně rozhodnuto odstranit data pro období 1999–2001 z celé analýzy.



Obr. 7 Blokovaná maxima pro data PVS, vlevo - nekorigovaná data; vpravo - korigovaná data.

Data ČHMÚ se skládala ze dvou datasetů, rok 2016 a 2014 obsahoval data ze srážkoměrů D241-D34 v jednotkách  $\mu\text{m.s}^{-1}$ , pro rok 2015, 2017, 2018, 2019 byla data v jednotkách  $\text{mm}$ . Oba datasety byly v desetiminutovém časovém kroku. V roce 2019 byla navíc data ze srážkoměrných stanic Komořany (P1PKOM01) a Flora (P1PVIN01).

Stanice PVS						
Označení	ČHMÚ ID stanice	Lokalita	Umístění	Souřadnice		
				Y	X	Z
D1	P8PREP01	ŘEPY	Reinerova ul., Praha 6	751037,88	1043408,55	372,74
D2	P8PSTO01	STODŮLKY (KOPANINA)	Lěsnická ul., Praha 5	751759,33	1045849,25	393,71
D3	P8PJIN01	JINONICE (VIDOULE)	Na Vidouli, Praha 5	747840,33	1045589,95	371,85
D4	P8PBRE01	BŘEVNOV, VYPICH	Na Klášteřin, Praha 6	748280,47	1042815,12	370,59
D5	P8PSTR01	STŘEŠOVICE, BRUSKA	Svatovítská ul., Praha 6	744644,6	1041817,67	241,52
D6	P8HORO01	HOROMĚŘICE, SUCHDOL	Truhlářka, Praha 6	747468,21	1038964,1	344,67
D7	P8PHLU01	HLUBOČEPY, BA RRANDOV	Pražského ul., Praha 5	746032,28	1048235,67	291,03
D8	P8PKYJ01	KYJE	Průmyslová ul., Praha 9	734617,83	1043950,69	256,67
D9	P8PRAD01	RADOTÍN	Strážovská ul., Praha 5	747774,03	1052583,88	305,09
D10	P8PDAB01	ĎÁBLICE, LÁDVI	Ďáblická ul., Praha 8	737772,98	1037980,98	295,47
D11	P8PKAR01	KARLOV	Ke Karlovu, Praha 2	742498,16	1044735,3	241,65
D12	P8PVIN01	VINOHRADY, FLORA	Hradecká ul., Praha 3	740085,21	1044676,41	276,94
D13	P8PLBE01	LIBEŇ, PROSEK	Prosecká ul., Praha 9	737641,75	1040740,38	253,68
D14	P8PMIC01	MICHLE, ZELENÁ LIŠKA	Hanusova ul., Praha 4	741730,47	1047373,88	272,2
D15	P8PZIZ01	ŽIŽKOV, HRDLOŘEZY	Koněvova ul., Praha 9	737718,71	1043263,25	270,07
D16	P8PMOD01	MODŘANY SEVER II	Generála Štěpky, Praha 4	742609,78	1052028,71	292
D17	P8PCHO01	CHODOV	Roztylská ul., Praha 4	738309,8	1050856,05	322,38
D18	P8PHME01	HORNÍ MĚCHOLUPY, KOZINEC	Evy Olmerové, Praha 10	734387,44	1049086,49	313,6
D19	P8PBUB01	BUBENEČ, FO ÚČOV	Papírenská ul., Praha 6	743633,4	1040168,9	184
D20	P8PDUB01	DUBEČ, PČOV Uhřetěves	Bečovská, Praha 22	731217,85	1048616,8	164
D21	P8PHPO01	HORNÍ POČERNICE, PČOV Čertousy	Bártlova, Praha 20	727035,1	1041156,7	266
D22	P8VELE01	VELEŇ, PČOV Miškovice	Polabská, Miškovice	732966,08	1035678,69	224
D23	P8PBEC01	BĚCHOVICE, PČOV Újezd nad Lesy	Bečvářská, Praha 21	727642,19	1045436,4	246
Stanice CHMU						
Označení	ČHMÚ ID stanice	Lokalita	Umístění	Souřadnice		
				Y	X	Z
D24	P1PLIB01	Praha Libuš	Meteorologická, Praha 4	742200	1052052	302
D25	P1PKAR01	Praha Karlov	Ke Karlovu, Praha 2	742176	1041795	260
D26	P1PRUZ01	Praha Ruzyně	Letiště, Praha 6	754363	1039981	364
D27	P1PKBE01	Praha Kbely	Letiště, Praha 9	734022	1040384	285
D28	P1NEUM01	Neumětely	č.p. 33	773679	1064892	322
D29	P1PBRE01	Praha Břevnov	Štefkova, Praha 6	747458	1043129	355
D30	P1LANY01	Lány	Zámek	775492	1034295	415
D31	P3ONDR01	Ondřejov	č.p. 162	719678	1066378	485
D32	P1PKLE01	Praha Klementinum	Klementinum, Praha 1	743172	1043058	191
D33	P1KRAL01	Kralupy nad Vltavou	Lutovičova, Kralupy n. V.	749749	1024721	220
D34	P1DOBR01	Dobříchovice	Francouzská, Dobříchovice	749749	1024721	205

Obr. 8 Seznam stanic.

Vzhledem ke krátké délce časových řad a desetiminutovému časovému kroku, který komplikuje analýzu vzhledem k rozdílu maxim z fixních a klouzavých intervalů, bylo nakonec

po dohodě se objednatelem rozhodnuto o vyřazení ČHMÚ dat. Problém s časovým krokem je do budoucna řešitelný, nicméně by bylo dobré mít k dispozici časové řady o srovnatelné délce s daty PVS.

### 3.1.2 Regionální frekvenční analýza

Odhad N-letých srážkových maxim je zatížen značnou nejistotou, vyplívající mj. z délky dostupných řad. Podobně jako pro extrémní průtoky, tak i pro srážky lze pro snížení nejistot odhadu vysokých kvantilů využít metod regionální frekvenční analýzy (RFA). Předpokladem RFA je, že srážkové úhrny v předem definované oblasti mohou být normovány tak, že rozdělení těchto úhrnů je v dané oblasti stejné. Normovací faktor, který je určen pro jednotlivé stanice, je zpravidla označován „index-flood“.

Jako vstup pro RFA jsou uvažována jednoletá maxima úhrnů pro jednotlivé doby trvání. Agregace dob trvání byla provedena klouzavou sumou. RFA byla aplikována pro jednu oblast tvořenou všemi stanicemi PVS, tato oblast není vždy striktně homogenní. Nicméně je známo, že porušení předpokladů homogenity oblastí nevede k zásadním chybám v odhadech vysokých kvantilů. N-letý kvantil lze získat dosazením pravděpodobnosti  $p$  ze vztahu  $p = 1 - 1/T$ , kde  $T$  je doba opakování.

### 3.1.3 Volba rozdělení

Maximální úhrny z jednotlivých stanic lze popsat pomocí zobecněného rozdělení extrémních hodnot (Generalized extreme value distribution - GEV). Volba tohoto rozdělení je jednak podpořena teoretickými poznatky - za určitých, poměrně obecných podmínek, by bloková maxima měla mít GEV rozdělení. Zároveň jde o rozdělení široce používané v literatuře.

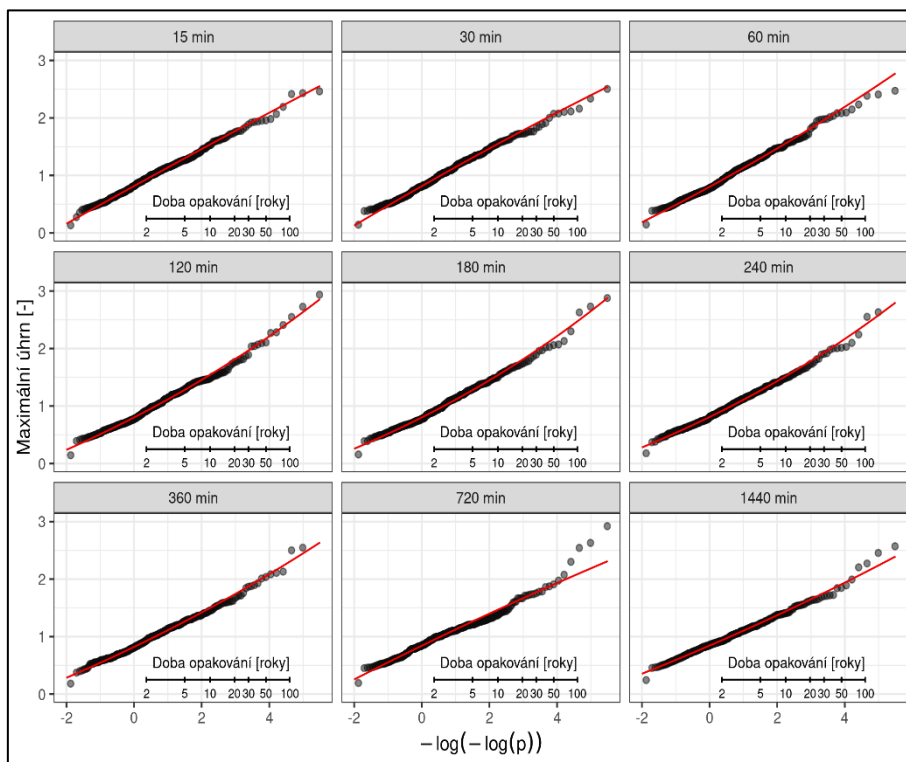
GEV rozdělení kombinuje tři limitní rozdělení extrémů (Gumbelovo, Fréchetovo a obrácené Weibullovo) a je definováno jako:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \kappa \left( \frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right]^{-\frac{1}{\kappa}} \right\}, \kappa \neq 0, \quad (1)$$

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[ - \left( \frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \right\}, \kappa = 0, \quad (2)$$

kde  $\xi \in \mathbb{R}$  je location,  $\alpha > 0$  scale a  $\kappa \in \mathbb{R}$  shape parametr. Použité předpoklady implikují, že parametr  $\xi$  a disperzní koeficient  $\gamma = \alpha / \xi$ , jsou v uvažované oblasti konstantní.

Jako ukazatel dobré shody byly použity dvě metody Gumbel plot (Obr. 9) a Anderson-Darling test (viz Obr. 10). Gumbel plot je grafickým znázorněním transformované distribuční funkce extrémů s pravděpodobností na ose x a maximy na ose y, přičemž pravděpodobnosti  $p$  jsou transformované pomocí vztahu  $-\log(-\log(p))$ . Tato transformace zajišťuje lepší zobrazení extrémů s vysokou dobou opakování.

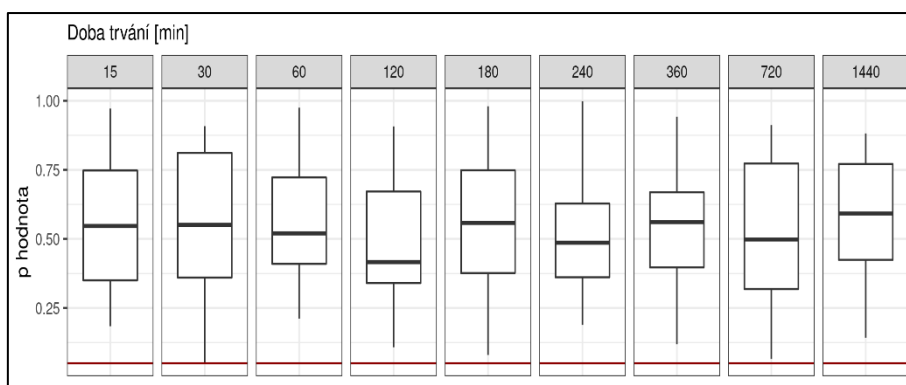


Obr. 9 Gumbel plot - vyobrazení shody empirických hodnot (body) a teoretické kvantilové funkce (linie).

Anderson-Darlingův (AD) test je statistický test (Empirical Distribution Function test - EDF) založený na analýze empirické distribuční funkce testovaného výběru. Základem testu je ověřování hypotézy, že nezávislých proměnných vychází z předem daného spojitého rozdělení s distribuční funkcí. AD test patří do třídy kvadratických EDF statistik. Testová statistika pro ověřování n-prvkového výběru má následující tvar:

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[Fn(x) - F(x)]^2}{F(x)[1 - F(x)]} dF(x), \quad (3)$$

kde  $F$  je teoretická distribuční funkce pod nulovou hypotézou a  $F_n$  je empirická distribuční funkce. At-site AD test probíhal s  $\alpha = 95\%$  pro GEV pro všechny doby trvání pro stanice PVS, kritická hodnota byla odhadnuta pomocí bootstrap metody.



Obr. 10 Vyhodnocení AD testu pro jednotlivé doby trvání.

## 3.1.4 Ověření předpokladů RFA

Hlavním předpokladem regionální frekvenční analýzy je homogenita posuzované oblasti. Vzhledem k velikosti zájmového území je tento předpoklad poměrně přirozený. V měřítku celé ČR byly při využití RFA identifikovány 4–7 oblastí. Je navíc známo, že i při mírné nehomogenitě oblastí je využití RFA výhodné, neboť významně zvyšuje spolehlivost odhadu a nepřesnost, která může vzniknout v případě mírně nehomogenních oblastí a není zpravidla významná.

Pro posouzení homogenity zájmového území byly vypočteny hodnoty diskordance a byly využity testy homogenity (viz Tab. 5 a Tab. 6). Je zřejmé, že považovaná oblast může být pokládána za homogenní.

Tab. 5 Diskordance blokových maxim (kritická hodnota = 3).

Stanice	15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	240 min	360 min	720 min	1440 min
D01	1.43	0.30	0.27	0.64	0.50	0.49	0.58	1.17	0.73
D02	0.50	0.28	0.50	0.92	0.40	0.30	0.75	1.11	1.31
D03	0.59	0.47	0.20	0.10	0.10	0.21	0.38	0.11	0.63
D04	0.39	0.71	0.80	0.70	1.28	0.81	0.54	0.56	0.09
D05	1.77	0.79	0.43	0.21	0.17	0.18	0.26	0.34	0.15
D06	0.62	0.23	0.11	0.51	1.15	0.80	0.69	0.64	0.62
D07	0.56	0.53	0.43	0.42	0.29	0.59	0.90	0.05	0.39
D08	1.54	1.91	0.36	0.28	0.58	0.65	1.11	0.21	0.29
D09	0.38	0.49	0.40	0.82	0.38	0.91	1.40	1.82	2.11
D10	0.23	0.11	0.39	0.75	1.97	2.50	2.34	0.91	0.95
D11	1.03	1.33	1.41	0.91	1.00	0.66	0.43	0.30	0.65
D12	0.98	2.13	2.53	2.38	2.60	2.09	1.87	1.07	1.35
D13	0.43	0.25	0.76	0.51	1.00	2.28	2.08	0.96	0.53
D14	0.99	1.40	1.15	0.99	0.45	0.41	0.59	1.02	0.50
D15	1.36	0.75	1.08	1.30	1.19	1.23	0.69	0.99	1.20
D16	0.11	0.21	0.60	0.53	0.78	0.87	0.68	3.29	1.82
D17	1.31	2.22	2.57	2.02	1.94	1.69	1.64	1.36	1.21
D18	1.15	0.79	0.63	0.15	0.26	0.18	0.17	0.49	0.90
D19	1.11	0.38	1.49	1.60	0.23	0.28	0.40	0.56	0.61
D20	3.37	2.27	0.30	0.77	1.54	1.60	1.98	1.63	2.14
D21	0.10	0.63	2.76	2.75	1.86	1.16	0.95	0.92	0.51
D22	2.29	3.85	2.30	1.63	1.39	1.06	0.83	1.28	3.93
D23	0.76	0.95	1.55	2.12	1.96	2.06	1.72	2.19	0.38

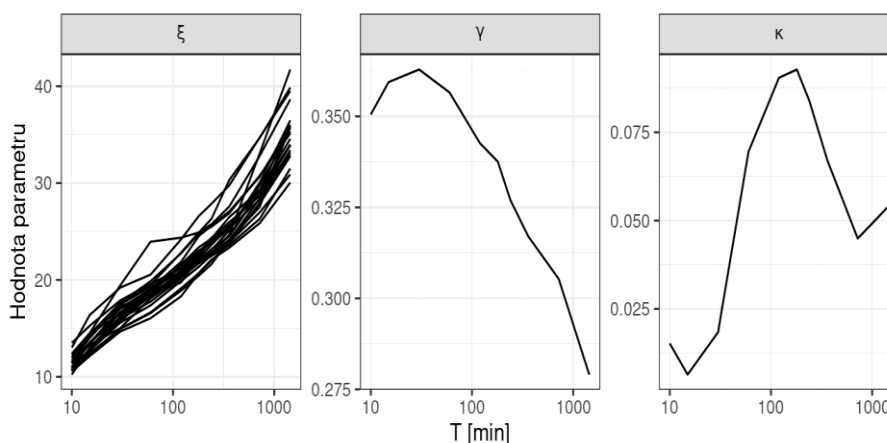
Tab. 6 Testy heterogenity, 1. řádek - vážené směrodatné odchytky L-CV (koeficientu L-variace); 2. řádek - průměr L-CV/L-skew; 3. řádek - průměr L-skew/L-kurtosis. Hodnota vyšší než 1 ukazuje, že případné rozdělení do subregionů může vést k přesnějšímu odhadu kvantilů, nicméně za cenu nižší spolehlivosti odhadu.

15 min	30 min	60 min	120 min	180 min	240 min	360 min	720 min	1440 min
-2.11	-2.37	-1.15	-0.49	0.28	0.57	1.40	2.79	3.01
-1.56	-1.44	-0.75	1.14	1.68	1.63	2.44	2.92	1.46
-0.44	-0.80	-0.87	0.94	1.32	1.38	2.18	1.77	0.42

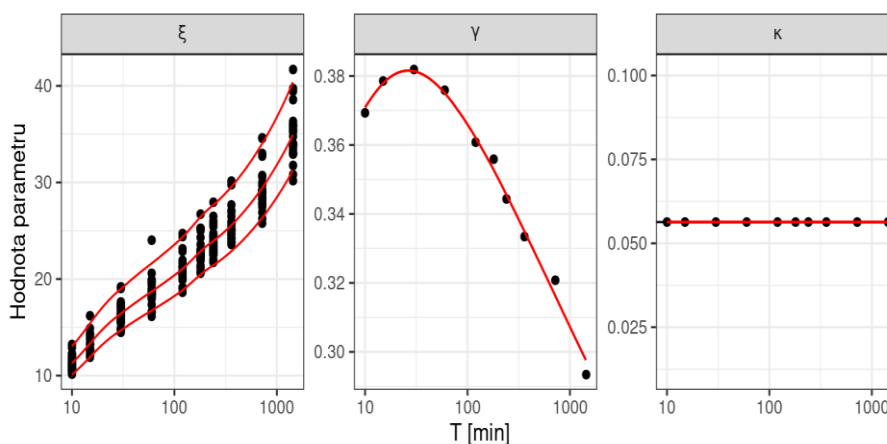
### 3.1.5 Statistický model pro podpis vztahu doby trvání a parametrů regionálního GEV MODELU

Výše uvedený statistický model odhaduje parametry regionálního GEV modelu zvlášť pro každou agregaci (viz Obr. 11). Je vidět, že zatímco parametry  $\xi$  a  $\gamma$  se mění poměrně hladce s trváním, u parametru  $\kappa$  je závislost na době trvání nejasná. Jelikož obecně platí, že odhad tohoto parametru je zatížen řádově vyšší nejistotou než odhady zbývajících parametrů a z těchto důvodů je i v literatuře pro odvození regionálních DDF křivek uvažován konstantní, využili jsme předpoklad nezávislosti tvaru rozdělení na době trvání srážky. Tento předpoklad byl zároveň ověřen resamplovacím testem, který hypotézu o nulové směrnicí vztahu mezi  $\kappa$  a trváním nezamítl.

Jelikož jsou hodnoty parametrů GEV modelu pro jednotlivé doby trvání závislé, upravili jsme statistický model a proceduru odhadu parametrů tak, že  $\kappa$  parametr je odhadován společně pro všechny doby trvání a tento parametr zároveň vstupuje do odhadů pro jednotlivé doby trvání v iterativní proceduře založené na minimalizaci věrohodností funkce. Výsledné parametry jsou zobrazeny černými body na (viz Obr. 12). Posledním krokem bylo neparametrické vyhlazení vztahů mezi parametry a dobou trvání pomocí spline funkce, červené čáry (viz Obr. 12).



Obr. 11. Hodnoty parametru  $\xi$  (poloha, vlevo) pro jednotlivé stanice a doby trvání a regionální parametry  $\gamma$  (disperzní koeficient, uprostřed) a  $\kappa$  (tvar, vpravo) pro různé doby trvání, které jsou v této verzi statistického modelu uvažovány odděleně.

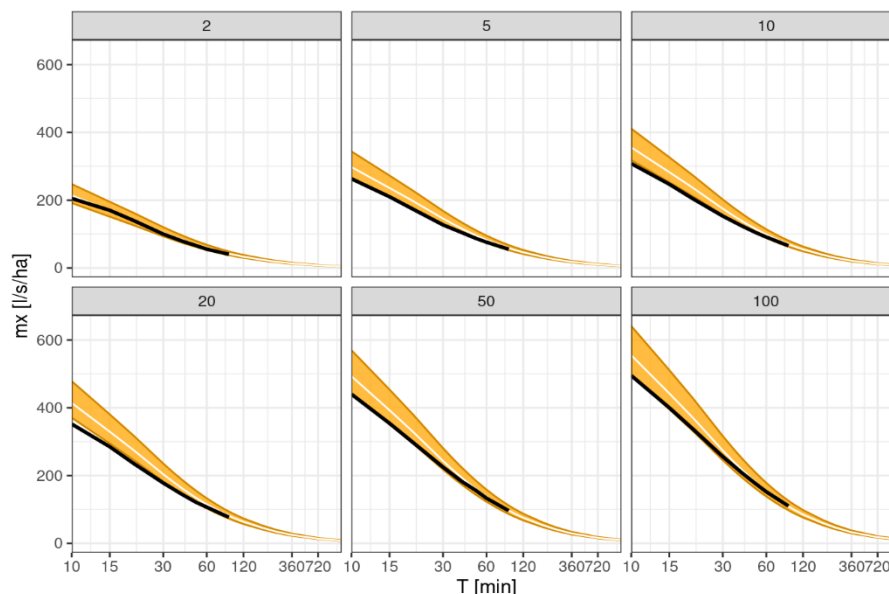


Obr. 12. Hodnoty parametru  $\xi$  (poloha, vlevo) pro jednotlivé stanice a doby trvání a regionální parametry  $\gamma$  (disperzní koeficient, uprostřed) a  $\kappa$  (tvar, vpravo) pro různé doby trvání. Parametr  $\kappa$  je odhadován zároveň pro všechny agregace. Červené čáry znázorňují výsledný vztah mezi jednotlivými parametry a dobou trvání srážek.

V případě parametru  $\xi$  odpovídá prostřední čára průměrné stanici, spodní čára stanici s nejnižšími maximy a nejvyšší čára stanici s nejvyššími maximy.

### 3.1.6 Odhad náhradních intenzit

Na základě modelu popsaného výše byly sestaveny tabulky náhradních intenzit odpovídající průměru pro Prahu (Tab. 7) a stanici s nejvyšším (Tab. 8) a nejnižším (Tab. 9) maximem. Zároveň bylo provedeno porovnání se stávajícími odhady (Obr. 13). Které ukazují, že starší odhady leží téměř vždy v rozmezí hodnot pro Prahu, nicméně zejména pro delší doby opakování je zřetelný posun k vyšším intenzitám.



Obr. 13. Výsledné odhady náhradních intenzit [l/s/ha]. Průměr pro Prahu (bílá čára) a stanice s maximálními a minimálními hodnotami (oranžová obálka). Černá čára odpovídá odhadu dodanému poskytovatelem. Jednotlivé panely zobrazují různé doby opakování.

Tab. 7 Náhradní intenzity pro průměrnou stanici

T [min]	2	5	10	20	50	100
10	214	298	356	414	493	555
15	169	236	283	329	393	442
20	141	197	236	275	328	370
25	120	168	201	235	280	316
30	104	146	175	204	243	274
35	92	129	155	180	215	242
40	83	116	139	162	193	217
45	75	105	126	147	175	197
50	69	96	115	134	160	180
55	64	89	106	124	148	166
60	59	82	99	115	137	154
70	52	72	87	101	120	135
80	47	65	77	90	107	120

Tab. 8. Náhradní intenzity pro maximální stanici

T [min]	2	5	10	20	50	100
10	247	344	411	478	570	641
15	195	273	327	381	454	511
20	163	228	273	318	380	428
25	139	194	233	271	324	365
30	120	168	202	235	281	317
35	106	149	179	208	248	280
40	96	134	160	187	223	251
45	87	121	145	170	202	228
50	80	111	133	155	185	208
55	74	103	123	143	171	192
60	68	95	114	133	158	178
70	60	84	100	116	139	156
80	54	75	89	104	124	139



90	42	58	70	81	97	109	90	49	68	81	94	112	126
100	39	53	64	74	88	99	100	45	62	74	86	102	115
120	33	46	55	64	75	85	120	38	53	63	73	87	98
180	24	33	39	45	54	60	180	28	38	45	52	62	70
240	19	26	30	35	42	47	240	22	30	35	41	48	54
360	13	18	21	25	29	33	360	15	21	25	29	34	38
720	8	10	12	14	16	18	720	9	12	14	16	19	21
1440	4	6	7	8	9	10	1440	5	7	8	9	11	12

Tab. 9 Náhradní intenzity pro minimální stanici

T [min]	2	5	10	20	50	100
10	192	266	318	370	441	496
15	151	211	253	295	351	396
20	126	176	211	246	294	331
25	107	150	180	210	251	282
30	93	130	156	182	218	245
35	82	115	138	161	192	217
40	74	104	124	145	173	194
45	67	94	113	131	157	176
50	62	86	103	120	143	161
55	57	79	95	111	132	149
60	53	74	88	103	123	138
70	47	65	77	90	107	121
80	42	58	69	80	96	108
90	38	52	62	73	86	97
100	35	48	57	66	79	89
120	30	41	49	57	68	76
180	21	29	35	41	48	54
240	17	23	27	32	37	42
360	12	16	19	22	26	29
720	7	9	11	12	15	16
1440	4	5	6	7	8	9

**Lze konstatovat, že nově zpracovaný datový set srážkových intenzit se nijak významně neliší od hodnot srážkových intenzit používaných v současnosti v souladu s Pražskými stavebními předpisy a městskými standardy.**

## 3.2 Analýza tvaru náhradních dešťů

### 3.2.1 Přehled syntetických dešťů

V rámci aktivit souvisejících s volbou návrhového hyetogramu byl sestaven přehled základní vybraných modelů návrhových hyetogramů. Byl sestaven na základě literární rešerše.

V rámci literární rešerše byl proveden rozbor nejnovějších studií, které vzájemně porovnávají návrhové hyetogramy.

Byly analyzovány syntetické deště, které poskytují informaci o převážně vyskytujících se tvarů dešťů na území hl. města Prahy.

Výsledná doporučení o průbězích syntetických dešťů jsou sestaveny s ohledem na posouzení vlivu tvaru syntetického deště na charakteristiky hydrogramu odtoku.

#### 3.2.1.1 Základní reprezentace syntetických dešťů

Syntetický déšť je možné reprezentovat prostřednictvím relativních intenzit a relativní doby trvání deště.

Relativní intenzita deště  $i_r$  je definována

$$i_r(t) = \frac{i_t}{i_{block}}, \quad (4)$$

kde  $i_t$  průměrná intenzita deště v dílčím intervalu  $t$ ,  $i_{block}$  průměrná intenzita deště.

Relativní doba trvání deště  $t_r$  je definována

$$t_r(i) = \frac{t_i}{t_D}, \quad (5)$$

kde  $t_i$  doba trvání deště po dílčí intervalu  $i$ ,  $t_D$  doba trvání deště deště.

Každý syntetický déšť je možné reprezentovat dvěma základními způsoby, které využívají relativní intenzitu deště a relativní dobu trvání deště.

První typ reprezentace poskytuje informace o posloupnostech průměrných relativních intenzit deště pro zvolené časové rozlišení dat. Posloupnost je uspořádána dle času výskytu příslušných průměrných relativních intenzit deště. Druhým způsobem je součtová čára agregující relativní intenzity  $i_r(t)$ .

#### 3.2.1.2 Rozdělení syntetických dešťů

Rozdělení syntetických dešťů je zobrazeno na Obr. 14. Návrhové deště je možné rozdělit do dvou základních kategorií:

- deterministické syntetické deště
- stochastické syntetické deště

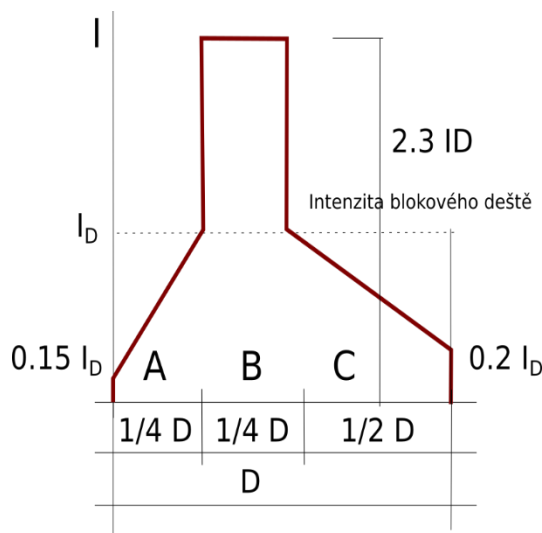
Deterministické syntetické deště poskytují jednu realizaci časového průběhu deště, stochastické deště poskytují soubor pravděpodobných realizací různých časových průběhů dešťových událostí. Dle tvaru deště je možné deterministické deště rozdělit jedno modální a více modální. Více modální deště jsou označovány termínem násobné deště.

V předložené práci je v následujících kapitolách vzájemně porovnán soubor 29 deterministických syntetických dešťových profilů. Byly porovnány deště odvozené z různých typů dat (radarových a staničních). Soubor porovnávaných syntetických dešťů představuje standard mezi dešti, které se používají pro řešení různých výpočetních úloh souvisejících s odhadem odtoku na urbanizovaných a přirozených povodích.

Možnosti využití stochastického dešťového simulátoru jsou představeny v kapitole 9. Tento model syntetických dešťů je schopen poskytnout informace o pravděpodobných profilech návrhových dešťů a prostřednictvím jejich použití v rámci hydrologického modelování, popsat nejistoty související s rozdílným časovým průběhem.

#### 1.1.1.1. Šifaldův déšť

Šifaldův syntetický déšť je standardem pro tvorbu syntetických dešťů pro urbanizovaná povodí v České republice (Sifalda, 1973). Jeho průběh je graficky zobrazen na Obr. 14.



Obr. 14. Šifaldův syntetický déšť (převzato z (Sifalda, 1973)), kde  $I$  - je intenzita deště,  $D$  - znázorňuje dobu trvání deště,  $I_D$  - je intenzita blokového deště.

Dešťový profil je rozdělen na tři části. První část A tvoří vzestup hyetogramu, druhá část B tvoří maximum hyetogramu a poslední část C tvoří sestup hyetogramu. Celková doba trvání první a druhá části je rovna  $1/2$  doby trvání hyetogramu, doba trvání poslední části hyetogramu je polovina doby trvání. Doba trvání částí A a B je shodně rovna  $1/4$  doby trvání deště.

Jedná se jedno modální déšť a jeho tvar je středním tvarem celé řady standardně používaných syntetických dešťových profilů (viz kapitola 10). Obr. 14 zobrazuje okamžité intenzity pro libovolný časový okamžik v intervalu  $D \in (0, D)$ .

Porovnání Šifaldova syntetického deště s vybranými 11 modely návrhových dešťů, které jsou standardem pro řešení návrhových úloh v městské hydrologii, popisuje také kapitola 10.

#### 3.2.1.3 Syntetické deště odvozené z radarových dat UFA 2004

V České republice probíhal od roku 2000 výzkum zaměřený na využití radarových dat při analýze časového a prostorového průběhu dešťů. Radarová data poskytla informace, které byly využity pro odhad hyetogramu syntetických dešťů a také plošných redukčních koeficientech.

První vyhodnocení poskytlo nové návrhy pro syntetické deště (Kulasová et al., 2004). Výsledkem analýzy je sestavení následujících syntetických dešťů. Pro povodí s plochou menší než 4 km<sup>2</sup> byly stanoveny 4 modely syntetických dešťů. Syntetické deště byly odvozeny Ústavem fyziky atmosféry AV ČR v.v.i. (UFA).

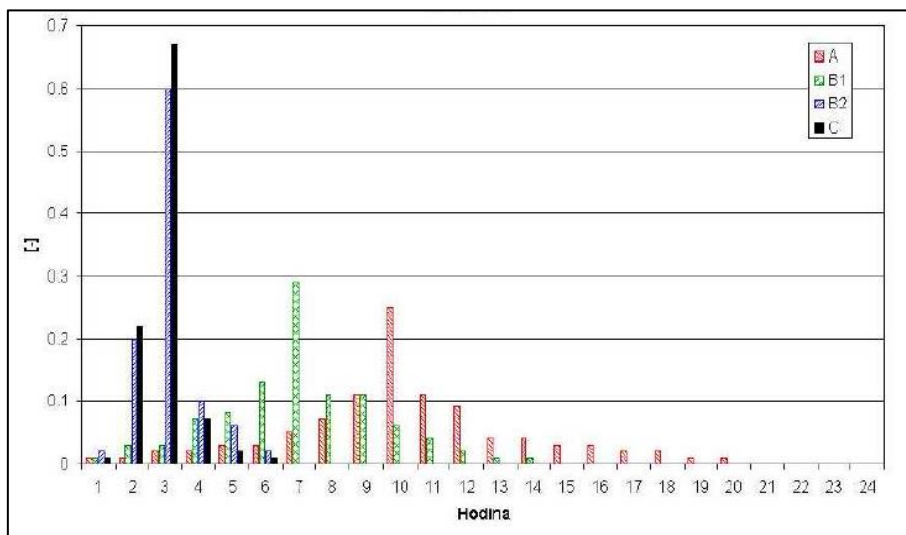
Tab. 10. Syntetické deště konvektivního typu - UFA 2004.

t [hod]	1	2	3	4	5	6
$i_r$ B2 typ	0.02	0.20	0.60	0.10	0.06	0.02
$i_r$ C typ	0.01	0.22	0.67	0.07	0.02	0.01

Tab. 11. Syntetické deště stratiformního typu - UFA 2004.

t[hod]	$i_r$ A typ	$i_r$ B1 typ
1	0.01	0.01
2	0.01	0.02
3	0.02	0.02
4	0.02	0.07
5	0.03	0.08
6	0.03	0.13
7	0.05	0.29
8	0.07	0.11
9	0.11	0.11
10	0.25	0.07
11	0.11	0.05
12	0.09	0.02
13	0.04	0.01
14	0.04	0.01
15	0.03	
16	0.03	
17	0.02	
18	0.02	
19	0.01	
20	0.01	

Byly sestaveny 2 syntetické profily pro konvektivní deště viz Tab. 8 a syntetické profily pro deště z vrstevnaté oblačnosti viz Tab. 9. Syntetické profily jsou zobrazeny na Obr. 15.

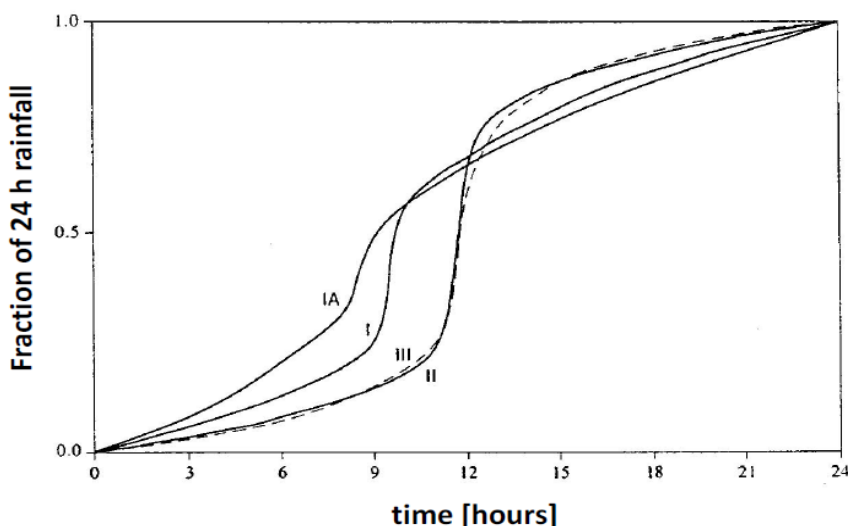


Obr. 15. Syntetické deště odvozené z radarových dat UFA 2004 (převzato z (Kulasová, Šercl, and Boháč, 2004)).

Všechny profily dešťů jsou jedno modální a vrstevnaté profily dešťů jsou symetrické (viz. Obr. 15). Jejich použití se doporučuje na povodích do 4 až 10 km<sup>2</sup>. Konvektivní deště UFA 2004 náleží do stejné tvarové skupiny jako Šifaldův dešť.

#### 1.1.1.2. Syntetické deště SCS USA

Americká instituce Soil Conservation Service používá pro analýza maximálních odtoků z malých povodí následující jedno-modální modely syntetických dešťů (Chow, Maidment and Mays, 1988), (viz Obr. 16). Tvary návrhových dešťových profilů jsou podobné tvaru jedno-modálního deště vyvinuté pro Chicago (Keifer and H., 1957). Podobné tvary dešťů jsou doporučovány pro území hl. města Prahy na základě výsledků prezentovaných v certifikovaném metodickém postupu (Kavka et al., 2018).



Obr. 16. Součtová čára jednodenních syntetických dešťů SCS (převzato z (Chow, Maidment and Mays, 1988)).

Pro území Prahy je doporučen dešť typu II a v případě nutnosti odvození syntetického deště kratší doby trvání je nutné normalizovat původně navrženou dobu trvání 24 hod. SCS syntetické deště jsou svým tvarem podobné Šifaldovu dešti, pokud jsou agregovány ve vhodných intervalech.

24-hour storm						6-hour storm		
Hour $t$	$t/24$	$P_t/P_{24}$				Hour $t$	$t/6$	$P_t/P_6$
		Type I	Type IA	Type II	Type III			
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0	0.083	0.035	0.050	0.022	0.020	0.60	0.10	0.04
4.0	0.167	0.076	0.116	0.048	0.043	1.20	0.20	0.10
6.0	0.250	0.125	0.206	0.080	0.072	1.50	0.25	0.14
7.0	0.292	0.156	0.268	0.098	0.089	1.80	0.30	0.19
8.0	0.333	0.194	0.425	0.120	0.115	2.10	0.35	0.31
8.5	0.354	0.219	0.480	0.133	0.130	2.28	0.38	0.44
9.0	0.375	0.254	0.520	0.147	0.148	2.40	0.40	0.53
9.5	0.396	0.303	0.550	0.163	0.167	2.52	0.42	0.60
9.75	0.406	0.362	0.564	0.172	0.178	2.64	0.44	0.63
10.0	0.417	0.515	0.577	0.181	0.189	2.76	0.46	0.66
10.5	0.438	0.583	0.601	0.204	0.216	3.00	0.50	0.70
11.0	0.459	0.624	0.624	0.235	0.250	3.30	0.55	0.75
11.5	0.479	0.654	0.645	0.283	0.298	3.60	0.60	0.79
11.75	0.489	0.669	0.655	0.357	0.339	3.90	0.65	0.83
12.0	0.500	0.682	0.664	0.663	0.500	4.20	0.70	0.86
12.5	0.521	0.706	0.683	0.735	0.702	4.50	0.75	0.89
13.0	0.542	0.727	0.701	0.772	0.751	4.80	0.80	0.91
13.5	0.563	0.748	0.719	0.799	0.785	5.40	0.90	0.96
14.0	0.583	0.767	0.736	0.820	0.811	6.00	1.0	1.00
16.0	0.667	0.830	0.800	0.880	0.886			
20.0	0.833	0.926	0.906	0.952	0.957			
24.0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000			

Source: U. S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, 1973, 1986.

Obr. 17. Profily syntetických dešťů SCS (převzato z (Chow et al., 1998)).

V případě, že je nutné stanovit odtok z povodí neovlivněných urbanizací, jejichž odtok tvoří přítok do urbanizovaných povodí, je možné použít vedle doporučeného typu II také syntetický profil šestihodinového deště (viz Obr. 17). Opět je možné standardizovat syntetický dešť na libovolnou dobu trvání.

#### 1.1.1.3. Soubor Huffových syntetických dešťů ČVUT UFA 2018

Jednou z nejzákladnějších reprezentací syntetických dešťů reprezentuje soubor Huffových dešťů, který byl odvozen pro stát Illinois na základě vyhodnocení záznamů ze 49 srážkoměrů (Huff, 1967, 1990). Příklad reprezentace mediánových tvarů syntetických dešťů odvozený pro stát Illinois uvádí tabulka Tab. 12.

Vyhodnocení reprezentuje deště pro bodovou reprezentaci syntetických dešťů. Dále je součástí zpracování reprezentace syntetických dešťů zohledňujících plošnou redukci pro povodí s rozlohou 25-130 km<sup>2</sup>.

Tab. 12. Součtové čáry  $i_r(t_r)$  4 skupin Huffových bodových syntetických dešťů.

$t/td$	1. kvartil	2. kvartil	3. kvartil	4. kvartil
0.05	0.16	0.03	0.03	0.02
0.10	0.33	0.08	0.06	0.05
0.15	0.43	0.12	0.09	0.08
0.20	0.52	0.16	0.12	0.10
0.25	0.60	0.22	0.15	0.13
0.30	0.66	0.29	0.19	0.16
0.35	0.71	0.39	0.23	0.19

0.40	0.75	0.51	0.27	0.22
0.45	0.79	0.62	0.32	0.25
0.50	0.82	0.70	0.38	0.28
0.55	0.84	0.76	0.45	0.32
0.60	0.86	0.81	0.57	0.35
0.65	0.88	0.85	0.70	0.39
0.70	0.90	0.88	0.79	0.45
0.75	0.92	0.91	0.85	0.51
0.80	0.94	0.93	0.89	0.59
0.85	0.96	0.95	0.92	0.72
0.90	0.97	0.97	0.95	0.84
0.95	0.98	0.98	0.97	0.92

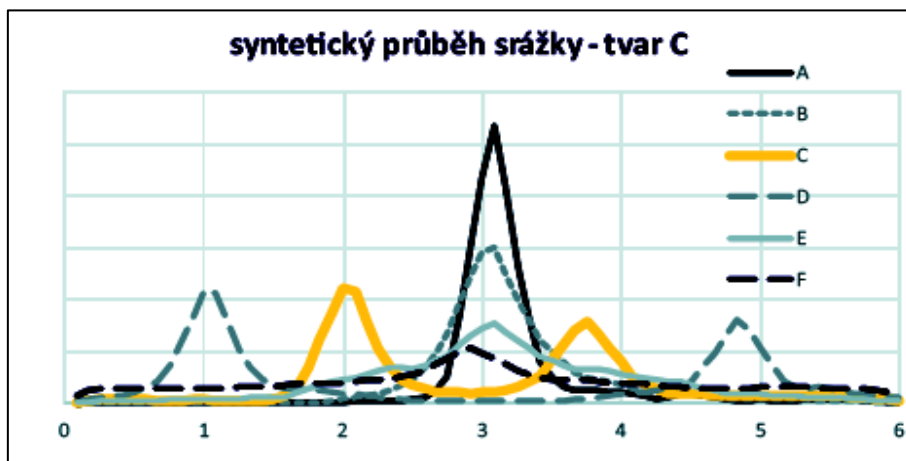
Deště jsou rozděleny do 4 skupin, nazývaných kvartily. První skupina a druhá skupina reprezentuje deště dobou trvání menší než 12 hodin. Třetí kvartil je určen pro deště s dobou trvání 12 až 24 hodin, poslední skupina 4. kvartil reprezentuje deště s dobou trvání větší nebo rovno 1 den. Skupiny dešťů jsou určeny výskytem maxima, pro první skupinu (1. kvartil) se maximum vyskytuje v první čtvrtině doby trvání deště, pro druhou v druhé, třetí skupina ve třetí a ve čtvrté skupině se maximum vyskytuje v poslední čtvrtině doby trvání dešťové události. Toto vyhodnocení dešťů je možné použít v okrajových částech Prahy na urbanizaci neovlivněných povodích (zejména 3. a 4. kvartil).

### 3.2.2 Shluková analýza tvarů syntetických dešťů ČVUT UFA 2018

Jedním z posledních vyhodnocení tvarů syntetických dešťů v České republice byla provedena v rámci prací zaměřených na sestavení certifikovaného metodického postupu pro hydrologický návrh v povodích drobných vodních toků (Kavka et al., 2018).

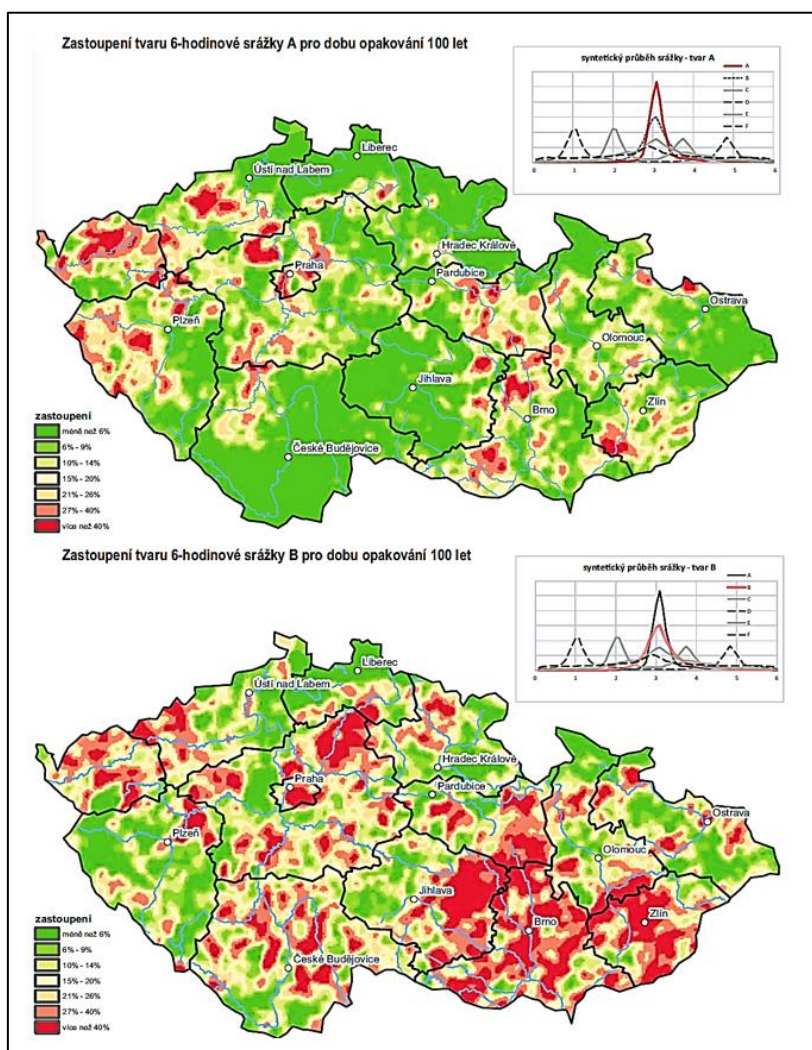
V této práci byla provedena shluková analýza převládajících tvarů dešťů na celém území České republiky. Výstupem analýzy jsou doporučení týkající se vhodných profilů syntetických pro deště s různou N-letostí.

Pro stanovení syntetických tvarů dešťových událostí byla použita radarová data s prostorovým rozlišením 1 km<sup>2</sup>. Pro Českou republiku bylo stanoveno celkem 6 dešťových profilů, které jsou uvedeny (viz Obr. 18). V rámci této studie byly odvozeny 4 jedno modální profily syntetických dešťů a dva dvounásobné profily dešťů.



Obr. 18. Syntetické deště z vyhodnocení ČVUT a UFA 2018 převzato z (Kavka et al., 2018).

Pro území Prahy byly doporučeny převážně jedno-modální syntetické deště typu A a typu B. Prostorové zastoupení jedno-modálních syntetických dešťů na území Prahy pro dobu opakování 100 let ukazuje Obr. 19.



Obr. 19. Syntetické deště z vyhodnocení ČVUT (nahore) a UFA (dole) 2018 převzato (Kavka et al., 2018)).



V okrajových částech území Prahy se také více často vyskytují v menší míře také více-modální deště. Doporučené deště jsou svým tvarem podobné Šifaldovu dešti. V malých okrajových částech Prahy pro povodí neovlivněná urbanizací lze doporučit také pro malé N-letosti násobné deště.

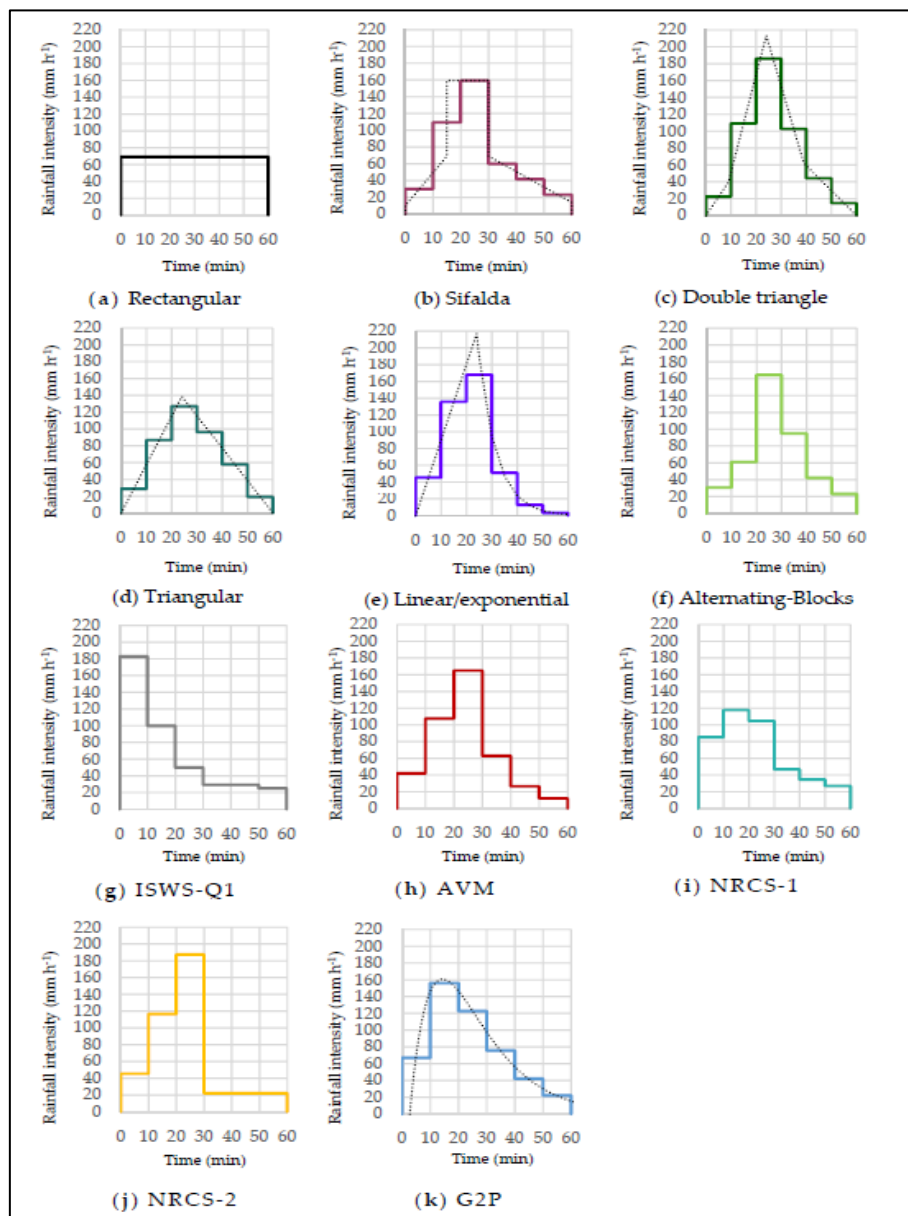
### 3.2.3 Vliv časového rozložení deště na hydrogram odtoku

Hlavní úlohou syntetických dešťů je posouzení zatížení hydrologického systému deštěm, který je více podobný skutečné extrémní dešťové události než blokový déšť. Nicméně je nutné konstatovat, toto posouzení je ovlivněno 3 typy nejistot: nejistotou určenou vstupními daty, strukturou hydrologického modelu a parametrizací hydrologického modelu (Beven, 2004).

Jednou z hlavních nejistot je nejistota generovaná časovým průběhem deště. Tuto nejistotu je možné popsat za využití stochastických simulací (Maca and Torfs, 2009).

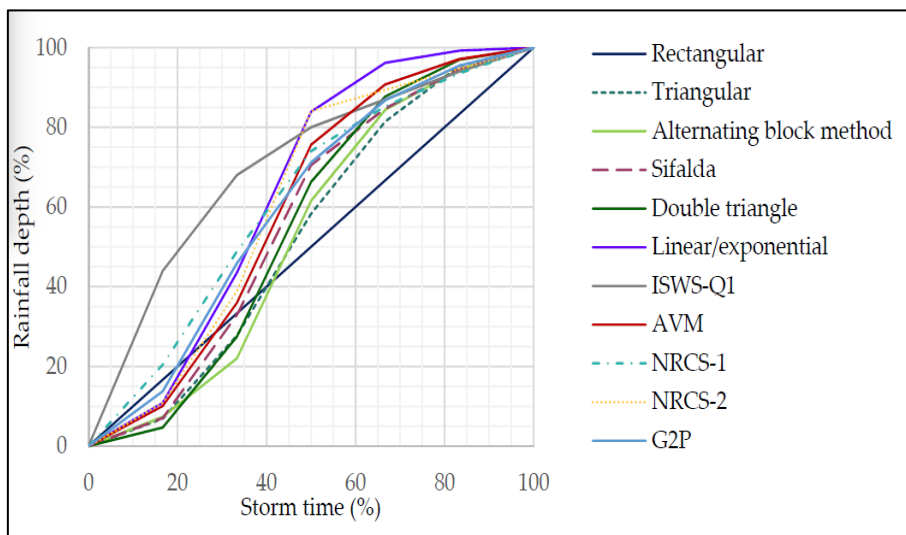
### 3.2.4 Porovnání vybraných tvarů syntetických dešťů a doporučení vhodného tvaru

Jedno z posledních porovnaní vlivu tvaru syntetických dešťů na odtok bylo provedeno na urbanizovaném povodí ve Valencii, Španělsku (Balbastre-Soldevila, García-Bartual, and Andrés-Doménech, 2019). V této studii bylo vzájemně porovnáno 11 modelů syntetických dešťů. Jejich profily jsou uvedeny na Obr. 20.



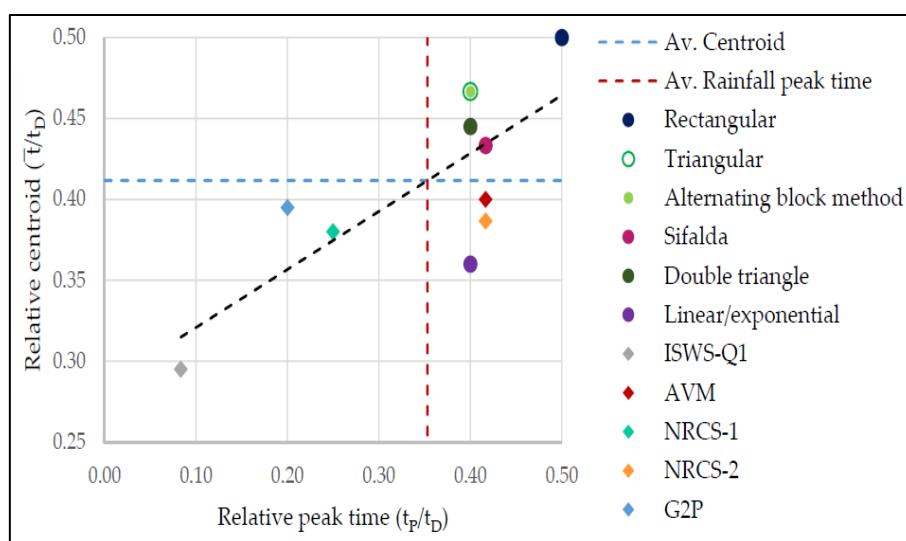
Obr. 20. Soubor syntetických dešťů, převzato z (Balbastre-Soldevila, García-Bartual and Andrés-Doménech, 2019).

Porovnání součtových čar relativních intenzit všech 11 syntetických dešťů ukazuje Obr. 21. Každý syntetický déšť v rozmezí od 20 % do cca 40 % doby trvání deště podhodnocuje součtovou čaru blokového deště. Následně od doby trvání 40 % jsou všechny součtové čary nad součtovou čarou blokového deště.



Obr. 21. Porovnání součtových čar relativních intenzit syntetických dešťů – převzato z (Balbastre-Soldevila, García-Bartual, and Andrés-Doménech 2019).

Z vizuálního porovnání součtových čar relativních intenzit syntetických dešťů vyplývá, že Šifaldův syntetický déšť (Sifalda, 1973) se nachází v blízkosti těžiště všech součtových čar testovaných syntetických dešťů. Tato skutečnost je patrná z Obr. 22, který ukazuje vzájemný vztah mezi relativním těžištěm návrhového deště a relativním výskytem maximální intenzity syntetickém dešti.



Obr. 22. Porovnání výskytu relativního těžiště a relativního maxima syntetických dešťů – převzato z (Balbastre-Soldevila, García-Bartual, and Andrés-Doménech 2019).

Relativní těžiště bylo definované jako poměr výskytu těžiště a doby trvání, relativní výskyt maximální intenzity je definován jako poměr mezi dobou výskytu maximální intenzity a dobou trvání hyetogramu. Z porovnání těchto charakteristik vyplývá, že pouze Šifaldův déšť se nachází nejbližší těžiště všech 11 testovaných hyetogramů syntetických dešťů.

Výběr vhodných syntetických dešťů byl proveden na základě rešerše nejnovějších poznatků o časových průbězích dešťů a o vlivu syntetických dešťů na tvar hydrogramu odtoku.

**Na základě expertního porovnání 29 deterministických syntetických dešťových profilů doporučujeme syntetický Šifaldův déšť odvozený na základě (Sifalda, 1973).**

Šifaldův déšť je typickým syntetickým deštěm, který svým tvarem podobně popisuje časové rozložení intenzit jako valná většina jedno-modálních syntetických dešťů. Je to návrhový hyetogram, který je podobný návrhovým dešťům, které byly odvozeny pro území Prahy na základě nejnovější analýzy dešťových událostí, pro kterou byla využita radarová data o prostorovém rozlišení 1 km<sup>2</sup> (Kavka et al., 2018).

### 3.3 Stanovení závislosti srážkových intenzit na zasažené ploše povodí

#### 3.3.1 Metodika stanovení plošných redukčních faktorů

Odvození faktorů redukující bodovou srážku na základě plochy povodí (Area reduction factors-ARF) bylo provedeno pomocí metody, kterou popisuje Asquith and Famiglietti (2000). Návrhovou srážku na plochu povodí  $W$  je možno vyjádřit pomocí

$$V = \int_W Z [Z_T(x, y)] dx dy, \quad (6)$$

kde  $Z[Z_T(x, y)]$  popisuje srážkové pole nad plochou  $W$  jako funkci bodové návrhové srážky  $Z_T$  (pro dobu opakování  $T$ ) a polohy v povodí  $(x, y)$ .  $Z[Z_T(x, y)]$  můžeme zároveň vyjádřit jako součin bodové návrhové srážky a neznámého redukčního faktoru  $S'_T(x, y)$ . Velikost srážky je pak možno přepsat jako

$$V = \int_W Z_T S'_T(x, y) dx dy, \quad (7)$$

Předpokládáme-li, že déšť má maximální intenzitu nad středem plochy  $W$  a intenzita se symetricky snižuje od středu, je možné zapsat objem pomocí vzdálenosti  $r$  od středu povodí jako

$$V = \int_W Z_T S'_T(r) dx dy, \quad (8)$$

Efektivní srážka  $Z_E$  je rovna

$$Z_E = \frac{V}{A}, \quad (9)$$

kde  $A$  je plocha. ARF faktor pak můžeme psát jako

$$ARF = \frac{Z_E}{Z_T}, \quad (10)$$

Po zjednodušení

$$ARF = \frac{\int_W S_T(r) dx dy}{\int_W dx dy}, \quad (11)$$

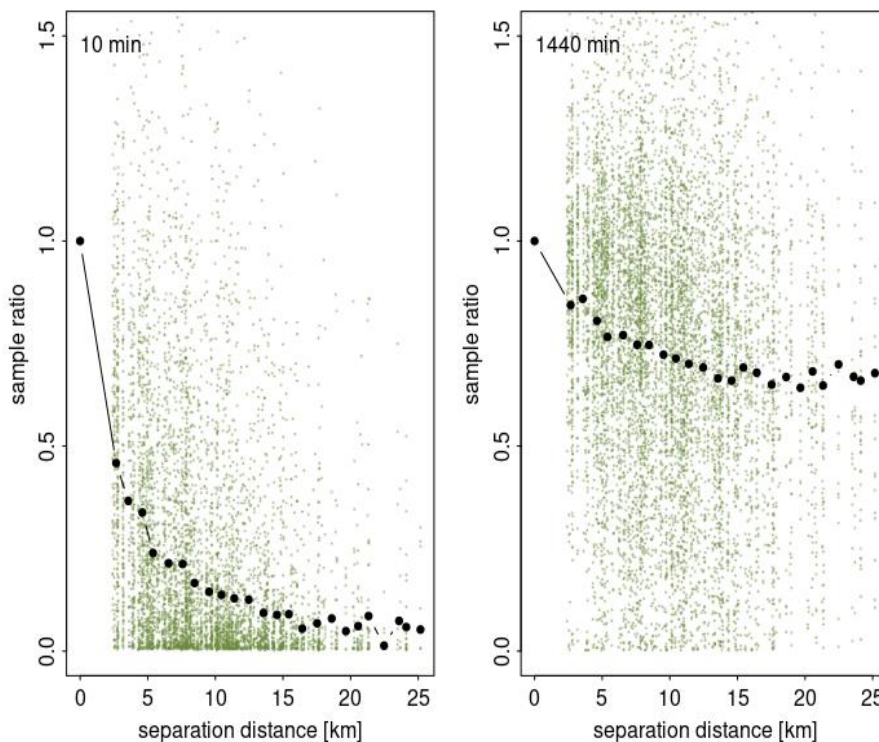
a pro kruhovou oblast

$$ARF = \frac{\int_0^R 2r S_T(r) dr}{R^2} \quad (12)$$

kde  $R$  je poloměr kruhové oblasti přes kterou se integruje.

#### 3.3.2 Výpočet pro zájmové území

Redukční faktory byly spočítané pro všechny dvojice stanic v časech, kdy na jedné ze stanic byla pozorována roční maximální srážka. Tyto poměry jsou zobrazeny na Obr. 23. Je zřejmé, že pro kratší doby trvání klesají poměry podstatně rychleji než pro delší. Zároveň je zjevné, že některé poměry jsou vyšší než 1 a to v důsledku výskytu vyšší srážky na párové stanici (než na stanici posuzované).

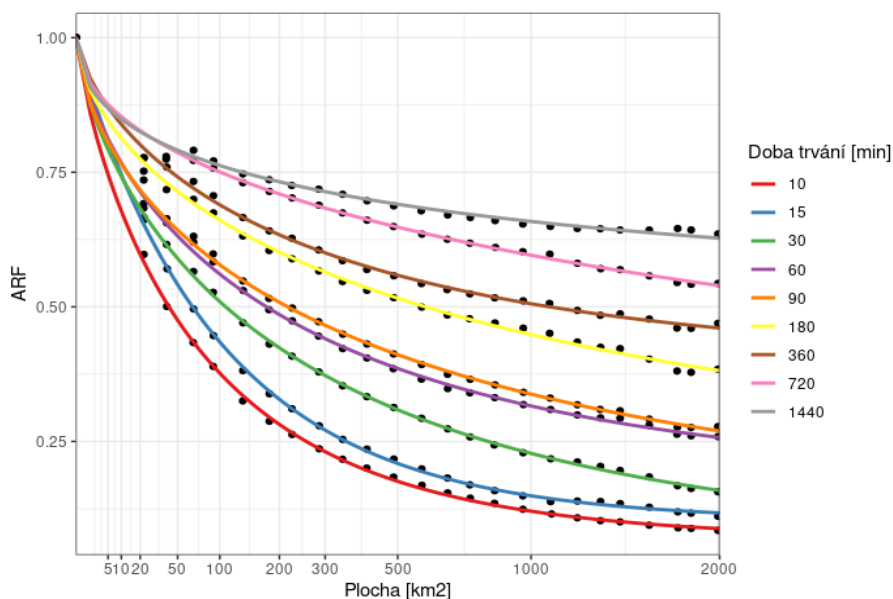


Obr. 23. Redukční faktory pro 10 min a 1440 min (=1 den) data. Černou čarou je vyznačen průměr pro jednotlivé vzdálenosti.

Integrací podle rovnice (11) dostaneme hodnoty ARF pro jednotlivé doby trvání a plochu povodí. Tyto hodnoty byly nakonec proloženy mocninným exponenciálním modelem ve tvaru

$$ARF(A) = c + (1 - c)\exp(-[A/\Phi]^\kappa), \quad (13)$$

kde  $A$  je plocha a  $c$ ,  $\Phi$  a  $\kappa$  jsou parametry mocninného exponenciálního modelu. Výsledné ARF ukazuje Obr. 24 a tabulky Tab. 13a Tab. 14.



Obr. 24. ARF faktory pro zájmovou oblast. Body odpovídají hodnotám integrovaným podle rovnice (12), čáry pak proložení exponenciálním modelem dle rovnice (13).

Tab. 13. ARF pro plochy do 12 km<sup>2</sup>.

plocha [km <sup>2</sup> ]	<=30min	30min- 1h	1-3h	3-24h
1	88	89	90	92
2	84	86	87	90
3	82	84	85	89
4	80	82	84	88
5	78	81	83	87
6	77	80	82	87
7	75	79	81	86
8	74	78	80	86
9	73	77	80	85
10	72	77	79	85
11	71	76	78	84
12	70	75	78	84

Tab. 14. ARF pro plochy 15–2000 km<sup>2</sup>.

plocha [km <sup>2</sup> ]	10	15	30	60	90	180	360	720	1440
15	63	70	71	74	75	79	82	84	84
20	60	67	68	71	72	77	80	83	83
25	57	64	66	70	71	76	79	82	82
30	55	61	64	68	69	75	78	81	81
35	52	59	63	67	67	74	77	80	80
40	51	57	61	65	66	73	76	80	80
45	49	56	60	64	65	72	75	79	80
50	48	54	59	63	64	71	74	79	79
75	42	48	54	59	61	68	71	77	77
100	38	43	51	56	58	66	69	75	76
150	32	37	46	52	54	63	66	73	75
200	28	33	42	49	51	60	63	71	73
300	23	27	37	44	47	56	60	68	71
400	20	23	34	41	44	54	58	66	70
500	18	21	31	39	41	52	56	65	69
750	14	17	26	34	37	48	53	62	67
1000	12	15	23	32	34	45	51	60	66
2000	9	12	16	26	27	38	46	54	63

### 3.3.3 Doporučená velikost ARF pro území Prahy

Problematickou částí se jeví aplikace Šifaldova deště v povodích s krátkou dobou koncentrace, protože uvedený dešť zvyšuje oproti blokovému dešti částečně nereálně maximální intenzitu. Toto je způsobeno rozdílem mezi návrhovými dešti odvozenými z bodových dat a dešti, které reprezentují vstupní srážku spadlou na celou plochu povodí.

Proto byly nově pro podmínky Prahy vyhodnoceny prostorové redukční koeficienty, které tuto skutečnost zohledňují a snižují tento druh nejistoty (viz kapitola [11](#)).

**S ohledem na obvyklou velikost řešených povodí v urbanizovaném území hl.m.Prahy je doporučeno používat redukční faktor o velikosti ARF=0,8. Tímto způsobem bude adekvátně redukována bodová hodnota intenzit z čáry náhradních intenzit ve větším souladu s realitou.**



### 3.4 Volba klimatického scénáře, časových horizontů a stanovení klimatického faktoru

#### 3.4.1 Odhad vývoje srážkových extrémů v měnícím se klimatu

Clausius-Clapeyronova rovnice udává, že atmosféra je schopna při oteplení o 1 °C udržet o cca 7 % vodních par více (Lenderink a Meijgaard, 2008). Některé studie založené na pozorování nicméně uvádějí i růst vyšší. Možné vysvětlení spočívá v případné koncentraci zdrojů vlhkosti z větších oblastí v průběhu krátkých intenzivních událostí. Tato skutečnost je zohledněna např. ve scénářích změny klimatu pro Nizozemí (KNMI, 2015), které počítají s růstem srážkových extrémů o 7-10 % / °C v zimních měsících a 10-14 % / °C v letních měsících.

Zatímco odhad změn srážkových extrémů pro denní a vícedenní doby trvání je v klimatologické literatuře relativně standardní úlohou (např. Hanel and Buishand, 2009; Hanel and Buishand, 2012), změny subdenních srážkových extrémů nejsou běžně prováděny, ale studie zabývající se těmito změnami existují (Chan, et al. 2014; Prein, et al. 2017; Lenderink and Meijgaard, 2008). Postupy využívané v těchto studiích lze rozdělit v zásadě do dvou skupin – první vychází z analýzy dlouhých pozorovaných řad a závislosti změn srážkových extrémů na teplotě, druhá z analýzy simulací regionálních klimatických modelů, v poslední době zejména těch, které explicitně řeší konvekci, které však bohužel nejsou obecně dostupné. Simulace klimatických modelů lze zároveň využít různými způsoby (Sunyer, et al. 2017).

Simulace klimatických modelů v kratším než denním rozlišení nebyly donedávna standardně distribuovány (na rozdíl od denních simulací) a jejich využití je proto spíše ojedinělé. Navíc vzhledem k systematickým chybám se nedoporučuje využívat tyto simulace v impaktových studiích přímo, ale spíše se preferuje odvození koeficientů změn (klimatických faktorů) srážkových extrémů příslušných pro dané doby trvání a opakování (Berg, et al. 2019, Sunyer, et al. 2017, Sunyer, et al. 2015). Tímto je možné eliminovat systematickou chybu v simulaci srážek, na druhou stranu tato metoda předpokládá, že změny srážek jsou nezávislé na systematické chybě. Tento předpoklad nelze ověřit, nicméně v ČR i ve světě se tvorba scénářů změny klimatu pomocí těchto změnových faktorů běžně využívá, v hydrologických studiích pro ČR dokonce dominantně. Z těchto důvodů byla, po dohodě se objednatelem, zvolena analýza simulací klimatických modelů a odvození změnových (klimatických) faktorů.

#### 3.4.2 Použitá data

Pro účely této studie byly uvažovány simulace regionálních klimatických modelů z projektů ENSEMBLES (2009) a CORDEX (aktuální) v hodinovém kroku. Menší část dat byla získána přímo od modelářů (cca 30 %), zbytek byl nedávno uvolněn v rámci Earth System Federation Grid (standardní kanál pro distribuci simulací klimatických modelů). Celkem bylo uvažováno 62 simulací 10 regionálních klimatických modelů řízených 13 globálními klimatickými modely pokrývající období 1970–2100 v prostorové rozlišení 10–40 km. Přehled simulací je uveden v Tab. 15. Část simulací z projektu ENSEMBLES má emise skleníkových plynů dle scénáře SRES A1B, simulace z projektu CORDEX se řídí scénáři koncentrací RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Z hlediska radiačního působení dle jednotlivých scénářů koncentrací/emisí (viz Obr. 25) lze učinit několik pozorování:

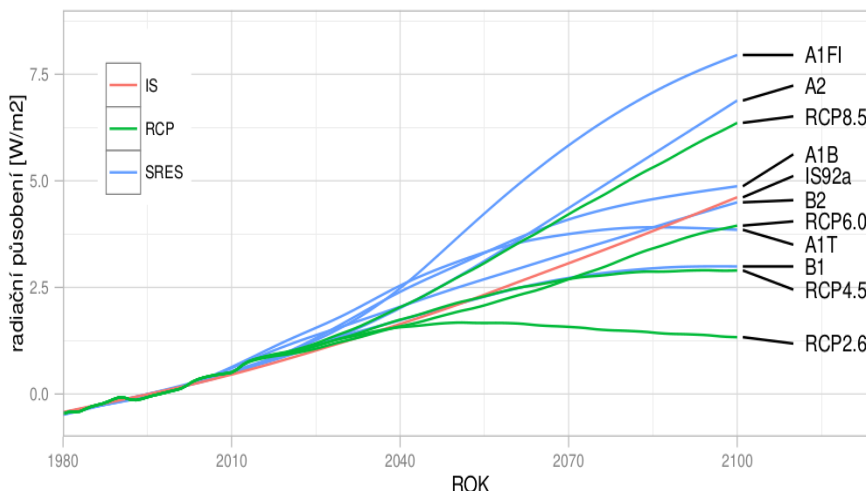
- RCP2.6 - víceméně konstantní, dle současného vývoje ne zcela reálné
- RCP4.5 + RCP8.5 - do 2050 poměrně malé rozdíly

- RCP4.5 2100  $\approx$  RCP8.5 2050
- RCP8.5 2100 výrazně vyšší než ostatní RCP

Pro konečné odvození změnových faktorů byly proto využity simulace dle RCP4.5 a RCP8.5, které jsou zároveň nejběžněji využívány v ČR.

Tab. 15. Přehled simulací regionálních klimatických modelů.

GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	SRES A1B
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN63	1	1	1	
	SMHI-RCA4		2	2	
ECHAM5	RACMO				1
ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05			1	
	SMHI-RCA4	2	2	4	
IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4		2	2	
MIROC	RACMO				1
MOHC-HadGEM2-ES	CNRM-ALADIN63			1	
	MOHC-HadREM3-GA7-05			1	
	SMHI-RCA4	1	2	2	
MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-ETH-COSMO-crCLIM-v1-1			2	
	ICTP-RegCM4-6	1		1	
	SMHI-RCA4	1	2	4	
NCC-NorESM1-M	GERICS-REMO2015	1		2	
	CLMcom-ETH-COSMO-crCLIM-v1-1			1	
	SMHI-RCA4	1	1	2	
	GERICS-REMO2015	2		1	
	GERICS-REMO2015	1		1	
HadCM	HadRMQ0				1
	HadRMQ16				1
	HadRMQ3				1
CCCma-CanESM2	SMHI-RCA4		1	1	
MIROC-MIROC5	SMHI-RCA4		1	1	
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI-RCA4		1	1	
<b>**TOTAL:**</b> 12	10	11	15	31	5



Obr. 25. Radiační působení dle scénářů SRES a RCP.

### 3.4.3 Statistický model

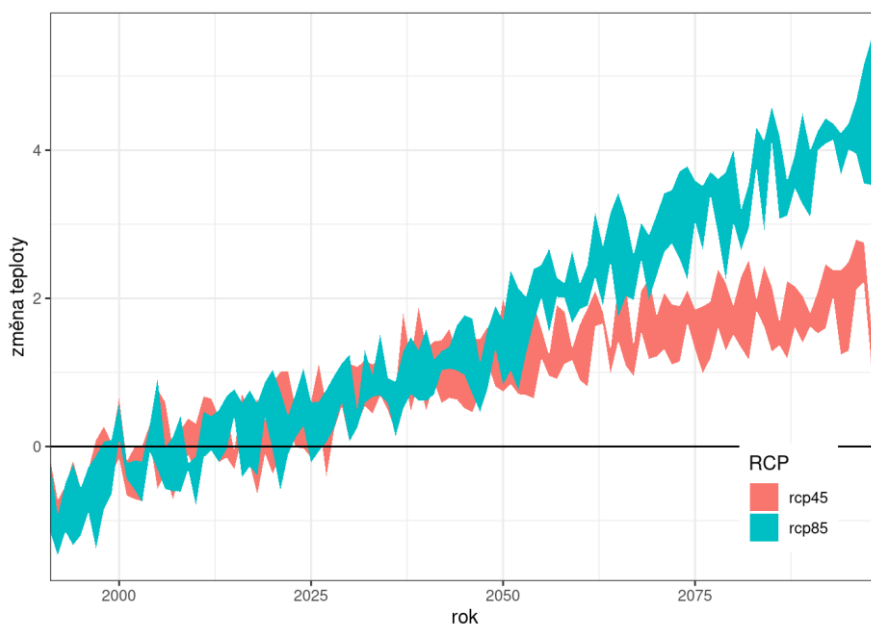
Podobně jako pro pozorovaná data byly pro jednotlivé simulace extrahovány roční srážkové extrémy, vzhledem k hodinovému rozlišení simulací klimatických modelů pro doby trvání 1 h a více. Byly uvažovány výpočetní body klimatických modelů pokrývající cca území Středočeského kraje. Pro jednotlivé simulace a doby trvání byl formulován nestacionární regionální GEV model, který rozšiřuje model použitý pro pozorovaná data o časově závislou složku v parametrech  $\xi$  (location) a  $\gamma$  (disperzní koeficient) dle:

$$\xi(s, t) = \xi_0(s) \exp[\xi_1 I(t)] \quad (14)$$

$$\gamma(t) = \exp[\gamma_0 + \gamma_1 I(t)] \quad (15)$$

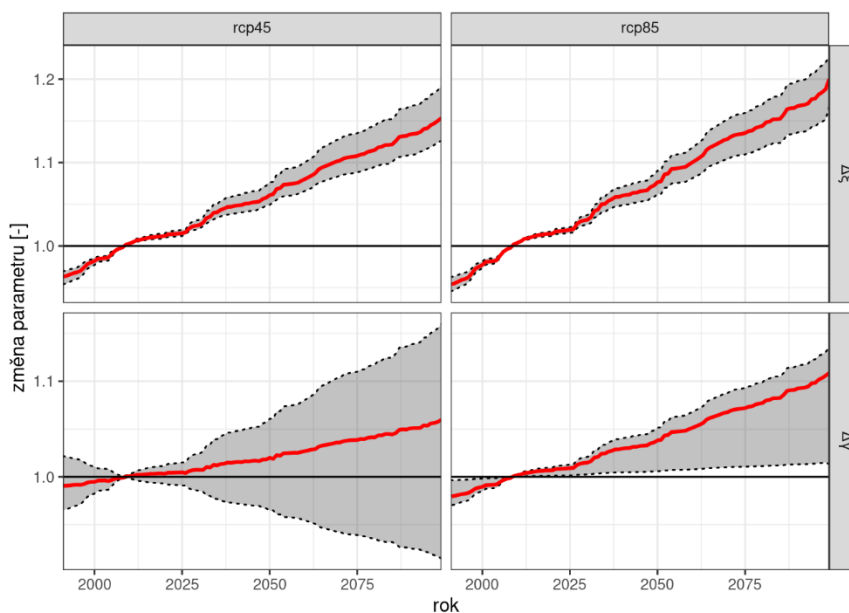
kde  $s$  je výpočetní bod klimatického modelu,  $I(t)$  je indikátor klimatické změny v roce  $t$  - nejjednodušeji rok, nicméně vzhledem k zřejmé souvislosti změn srážkových extrémů a teploty se jeví jako užitečnější indikátor klimatické změny teplota. Pro účely této studie byla využita teplota řídicího globálního modelu pro střední Evropu (viz Obr. 26).

Parametr  $\kappa(t) = \kappa$  je v modelu uvažován konstantní, a to z toho důvodu, že nejistota jeho určení je značná i v případě stacionárního modelu a je známo, že povolení nestacionarity tohoto parametru může vést k extrémnímu růstu srážkových extrémů s vysokou dobou opakování (Hanel and Buishand, 2010). Parametry modelu byly odhadnuty pro jednotlivé simulace a doby trvání pomocí maximalizace věrohodnostní funkce.



Obr. 26. Teplota řídicího globálního modelu pro střední Evropu.

Odhadnuté změny parametrů GEV modelu pro hodinové srážkové extrémy jsou uvedeny na Obr. 27. Z obrázku je patrné, že celé rozdělení se systematicky posouvá směrem k vyšším hodnotám (horní panely – růst location parametru), zatímco relativní variabilita (disperzní koeficient) pro většinu simulací roste a zároveň vykazuje velké rozdíly mezi simulacemi, zejména pro RCP4.5. To je pravděpodobně dáno skutečností, že vzhledem k relativně slabému klimatickému signálu (zvyšování teploty a srážek) hraje při odhadu tohoto parametru značnou roli přirozená variabilita, která může do velké míry signál zkreslovat/překrývat. Pro RCP8.5 (vykazující vyšší růst teploty a zřetelnější růst srážkových extrémů) je růst disperzního koeficientu robustní. Posun celého rozdělení vlivem změn location parametru vede k rovnoměrnému zvýšení srážkových extrémů pro všechny doby opakování. Růst disperzního koeficientu zvyšuje variabilitu rozdělení, a tedy vyšší doby opakování rostou rychleji než nižší.



Obr. 27. Změna parametrů GEV modelu pro hodinové srážkové extrémy. Šedá plocha zobrazuje rozmezí mezi 25% a 75% kvantilem, červená čára průměr.

#### 3.4.4 Disagregace

Vzhledem k hodinovému rozlišení je možno přímo z RCM simulací odvodit pouze změny maxim s dobou trvání min 1 h. Abychom mohli odvodit parametry pro simulované subhodinové extrémy, využili jsme jednoduché transformace pozorovaných extrémů, která následně umožňuje odhad parametrů pro doby trvání < 1 h pro každý rok a každou simulaci:

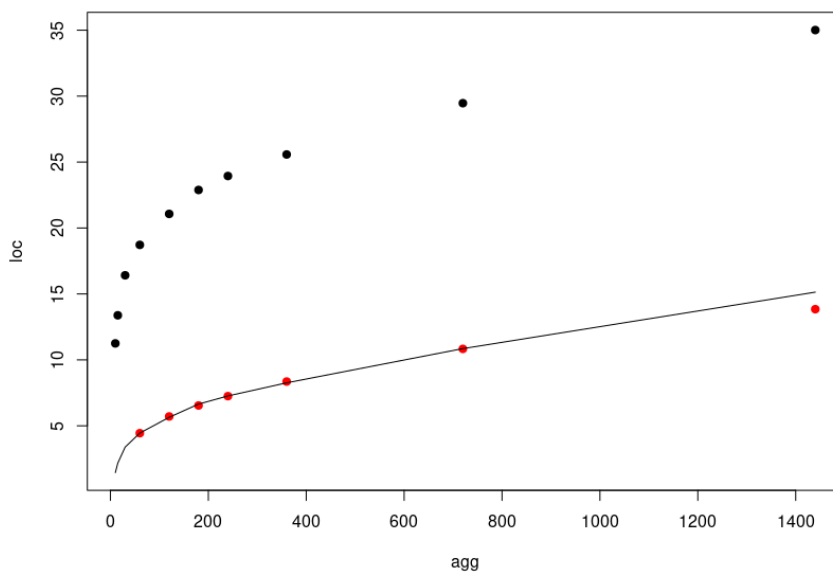
$$\log(\xi_{sim}) = x_0 + x_1 \log(\log(\xi_{poz})) + x_2 \xi_{poz}^2 \quad (16)$$

pro location parametr

$$\log(\gamma_{sim}) = g_0 + g_1 \gamma_{poz}^2 \quad (17)$$

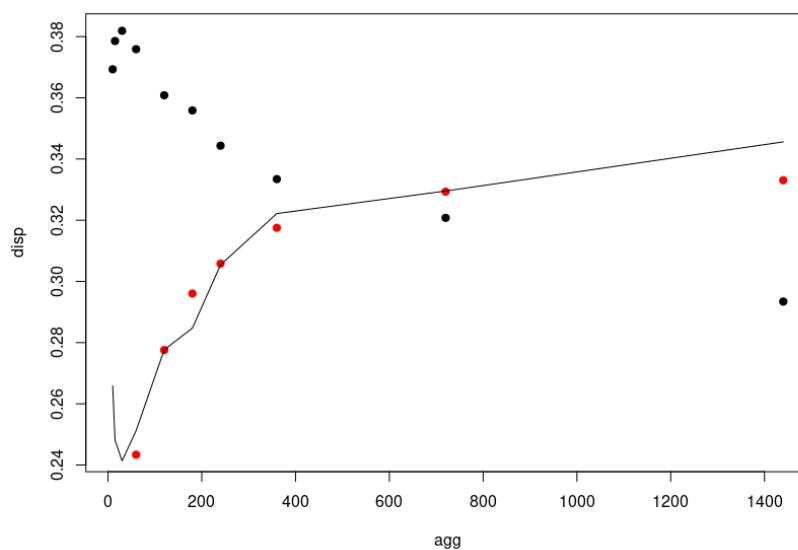
pro disperzní koeficient, kde *sim* označuje odhad na základě simulace klimatického modelu a *poz* odhad na základě pozorovaných dat (který je dostupný pro 10 min+ doby trvání).

Parametr  $\xi$  vykazuje v simulacích klimatického modelu většinou poměrně vysoké podhodnocení (viz Obr. 28), nicméně růst tohoto parametru s dobou trvání a tvar funkční závislosti umožňují odhad parametrů výše uvedené funkce bez problému. Důvodem podhodnocení je rozdíl mezi povahou extrémů v pozorovaných datech (bodová data) a simulacích (reprezentujících celou plochu výpočetní buňky, tj. 100 a více km<sup>2</sup> a zároveň ARF cca 0.37) a samozřejmě i systematická chyba simulací.

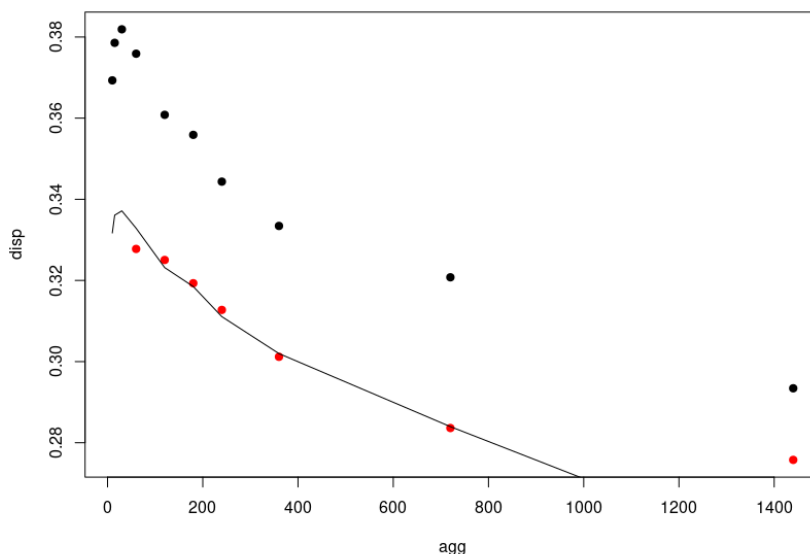


Obr. 28. Příklad simulace závislosti parametru  $\xi$  na době trvání pro jeden regionální klimatický model a rok. Červeně simulace, černě pozorovaná data, černá čára ukazuje odhad pomocí rovnice 16.

Vztah parametru  $\gamma$  s dobou trvání je pro většinu simulací v rozporu s pozorováním – zatímco pozorovaný disperzní koeficient klesá s dobou trvání (tj. chvost rozdělení je relativně lehčí pro delší extrémy), pro řadu simulací s dobou trvání roste (viz. Obr. 29). Je zřejmé, že i tak lze poměrně úspěšně použít vztah pomocí rovnice 17. Nicméně považujeme za věrohodnější simulace vykazující chování nekonzistentní s pozorováním vyloučit z analýzy a soustředit se pouze na simulace vykazující věrohodné chování (příklad viz. Obr. 30).



Obr. 29. Příklad simulace závislosti parametru  $\gamma$  na době trvání pro jeden regionální klimatický model a rok. Červeně simulace, černě pozorovaná data, černá čára ukazuje odhad pomocí rovnice 17.



Obr. 30. Příklad simulace závislosti parametru  $\gamma$  na době trvání pro jeden regionální klimatický model a rok. Červeně simulace, černě pozorovaná data, černá čára ukazuje odhad pomocí rovnice 17.

Takto byl celý soubor simulací zredukován na 8 simulací provedených čtyřmi různými globálními klimatickými modely, třemi regionálními modely a jedním scénářem koncentrací (RCP8.5), většinou v rozlišení cca 10 km, dvě simulace v rozlišení 20 km (viz Tab. 16).

Tab. 16. Vybrané simulace klimatických modelů.

RCP	GCM	RCM	RES
rcp85	ICHEC-EC-EARTH	MOHC-HadREM3-GA7-05	EUR-11
rcp85	MOHC-HadGEM2-ES	MOHC-HadREM3-GA7-05	EUR-11
rcp85	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	EUR-11
rcp85	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	EUR-11
rcp85	MPI-M-MPI-ESM-LR	GERICS-REMO2015	EUR-11
rcp85	NCC-NorESM1-M	CLMcom-ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	EUR-11
rcp85	MPI-M-MPI-ESM-LR	GERICS-REMO2015	EUR-22
rcp85	NCC-NorESM1-M	GERICS-REMO2015	EUR-22

### 3.4.5 Výsledné klimatické faktory

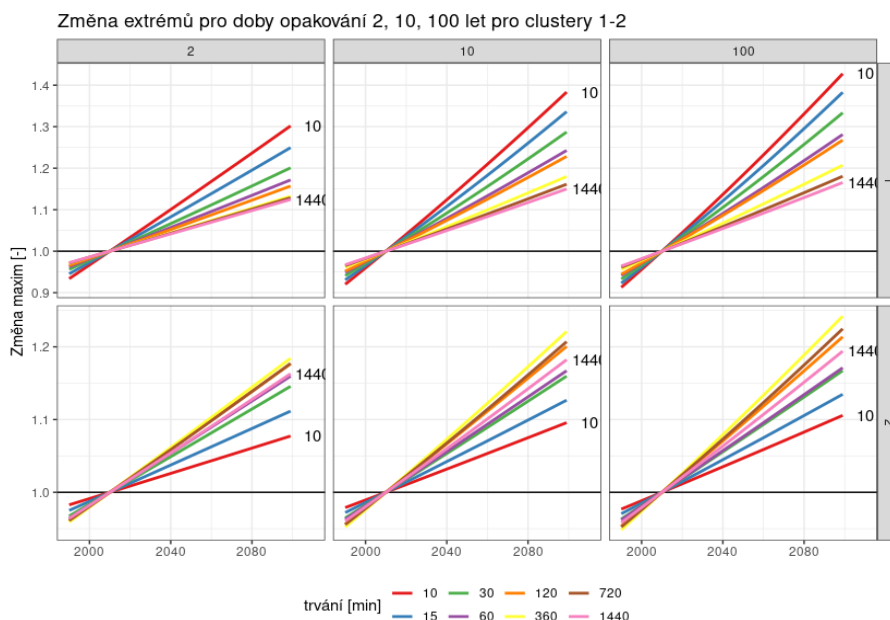
Vybraných 8 simulací bylo následně rozčleněno pomocí clusteringu (dynamic time warping), Sardá-Espinosa (2019), do dvou shluků vykazujících poměrně odlišné chování (viz Obr. 31):

#### Cluster 1

- vyšší růst u kratších událostí
- vyšší růst u delších dob opakování
- změna 100leté srážky 20-40 %

#### Cluster 2

- vyšší růst u delších událostí
- mírně vyšší růst u delších dob opakování
- změna 100leté srážky 10-25 %



Obr. 31. Změna extrémů pro výsledné clustery k roku 2100.

Pro modelování odtokových poměrů na území Prahy je možno využít obou shluků, nicméně v případě požadavku na redukci variant je doporučeno uvažovat cluster 1, jelikož jeho projekce je více v souladu s dosavadními poznatky o změnách subdenních extrémů. Tabulky změn (klimatické faktory) pro tento cluster jsou uvedeny níže pro roky 2050, 2080 a 2100 (viz Tab. 17, Tab. 18, Tab. 19). Výsledné hodnoty jsou konzistentní s odhadem změn srážkových extrémů na základě analýzy vztahu srážek a teploty, kdy po přepočtu změn na 1 °C oteplení docházíme ke změnám řádově 8-14 % / °C, což je zcela v souladu s publikovanými hodnotami.

V metodikách věnujících se odhadu dopadů klimatické změny je vždy zdůrazňována nutnost vyhodnocení většího počtu variantních scénářů. Bohužel, v inženýrské praxi je tato cesta obtížná a návrh konkrétních opatření se nakonec realizuje dle konkrétní návrhové hodnoty. Volba pravděpodobnosti/zabezpečení spojené s návrhovými hodnotami je rozhodnutí spíše politické/manažerské než odborné a mělo by být založeno na širším konsenzu. Je totiž třeba si uvědomit, že vyšší zabezpečení sice poskytuje vyšší ochranu, nicméně kromě vyšších nákladů znamená i daleko větší zásahy do sídel a krajiny, které by často vedly k poměrně zásadní změně těchto struktur, případně by byly jen obtížně realizovatelné. V ČR bohužel žádný takový širší konsenzus neexistuje a výsledné prezentované hodnoty odpovídají, po dohodě se objednatel, středním odhadům změn.

To je nutné mít na paměti v případě posuzování velkých infrastrukturních projektů, kdy je vždy nezbytné prověřovat i scénáře předpokládající extrémnější změny, které mohou, zejména v případě vývoje dle scénářů předpokládajících vyšší růst teploty, být zcela reálné. Například při růstu teploty o 6 °C (tj. hodnota, která není v rámci uvažovaného souboru simulací extrémní) vychází zvýšení srážek potenciálně i 80 a více procent. Zásadní projekty se tak vždy musí



opírat o důkladnou analýzu rizik a nejistot a jejich multikriteriální vyhodnocení. Vzhledem k nejistotám spojeným s vývojem klimatu bude navíc nutné po nějaké době odvozené změny srážkových extrémů revidovat, ať už z důvodu pokroku ve vývoji klimatických modelů nebo snížení nejistoty odhadu změn koncentrace skleníkových plynů a teploty.

Analýza uvažovala RCP4.5 a RCP8.5, nicméně vzhledem k validaci zůstaly ve finálním výběru simulací pouze ty, řízené scénářem koncentrací RCP8.5. Vzhledem k teoretickým předpokladům a skutečnosti, že zvýšení teploty dle RCP4.5 je pro rok 2100 o cca 2 °C nižší, lze očekávat, že z hlediska středního odhadu by změny dle RCP4.5 mohly být cca poloviční. Nicméně je třeba uvážit, že 1) do roku 2050 jsou trajektorie vývoje teploty pro RCP4.5 a RCP8.5 velmi blízké a 2) střední odhad změn srážkových extrémů pro RCP8.5 je stále reálným odhadem i dle RCP4.5, jinými slovy, i dle scénáře RCP4.5 existují simulace, které projektují stejný nebo vyšší růst srážkových extrémů jako střední odhad dle RCP8.5. Výsledný odhad je tak „střední“ vzhledem k RCP8.5 a reálný a na straně bezpečnosti pro RCP4.5.

Tab. 17. Klimatické faktory pro rok 2050.

T [min]	2	5	10	20	50	100
10	1.13	1.16	1.17	1.17	1.18	1.18
15	1.11	1.13	1.14	1.15	1.16	1.16
20	1.10	1.12	1.13	1.14	1.15	1.15
25	1.09	1.12	1.13	1.13	1.14	1.15
30	1.09	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14
35	1.09	1.11	1.12	1.13	1.13	1.14
40	1.08	1.11	1.12	1.12	1.13	1.14
45	1.08	1.11	1.11	1.12	1.13	1.13
50	1.08	1.10	1.11	1.12	1.12	1.13
55	1.08	1.10	1.11	1.12	1.12	1.13
60	1.08	1.10	1.11	1.11	1.12	1.12
70	1.07	1.09	1.10	1.11	1.11	1.12
80	1.07	1.09	1.10	1.11	1.11	1.12
90	1.07	1.09	1.10	1.11	1.11	1.11
100	1.07	1.09	1.10	1.11	1.11	1.11
120	1.07	1.09	1.10	1.11	1.11	1.12
180	1.07	1.09	1.10	1.11	1.11	1.12
240	1.07	1.09	1.09	1.10	1.11	1.11
360	1.06	1.07	1.08	1.08	1.09	1.09
720	1.06	1.07	1.07	1.07	1.08	1.08
1440	1.06	1.06	1.07	1.07	1.07	1.07

Tab. 18. Klimatické faktory pro rok 2080.

T [min]	2	5	10	20	50	100
10	1.24	1.28	1.30	1.31	1.32	1.33
15	1.20	1.24	1.26	1.27	1.29	1.30
20	1.17	1.22	1.24	1.25	1.27	1.27
25	1.16	1.21	1.23	1.24	1.26	1.26
30	1.16	1.20	1.22	1.24	1.25	1.26
35	1.15	1.20	1.22	1.23	1.24	1.25
40	1.15	1.19	1.21	1.22	1.24	1.24
45	1.15	1.19	1.21	1.22	1.23	1.24
50	1.14	1.18	1.20	1.21	1.22	1.23
55	1.14	1.18	1.19	1.21	1.22	1.22
60	1.13	1.17	1.19	1.20	1.21	1.22
70	1.13	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21
80	1.13	1.16	1.18	1.19	1.20	1.21
90	1.12	1.16	1.18	1.19	1.20	1.20
100	1.12	1.16	1.18	1.19	1.20	1.20
120	1.12	1.16	1.18	1.19	1.20	1.21
180	1.12	1.16	1.18	1.19	1.20	1.21
240	1.12	1.15	1.17	1.18	1.19	1.20
360	1.10	1.13	1.14	1.15	1.16	1.16
720	1.10	1.12	1.13	1.13	1.14	1.14
1440	1.10	1.11	1.12	1.12	1.13	1.13

Tab. 19. Klimatické faktory pro rok 2100.

T [min]	2	5	10	20	50	100
10	1.30	1.36	1.38	1.40	1.42	1.43
15	1.25	1.31	1.34	1.35	1.37	1.38
20	1.22	1.28	1.31	1.33	1.35	1.36
25	1.21	1.27	1.29	1.31	1.33	1.34
30	1.20	1.26	1.29	1.31	1.32	1.33
35	1.20	1.26	1.28	1.30	1.31	1.32
40	1.19	1.25	1.27	1.29	1.31	1.32
45	1.19	1.24	1.26	1.28	1.30	1.31
50	1.18	1.23	1.26	1.27	1.29	1.30
55	1.18	1.23	1.25	1.26	1.28	1.29
60	1.17	1.22	1.24	1.26	1.27	1.28
70	1.17	1.21	1.23	1.25	1.26	1.27
80	1.16	1.21	1.23	1.24	1.26	1.26
90	1.16	1.21	1.23	1.24	1.25	1.26
100	1.16	1.21	1.23	1.24	1.25	1.26
120	1.16	1.21	1.23	1.24	1.26	1.27
180	1.15	1.21	1.23	1.24	1.26	1.27
240	1.15	1.20	1.22	1.23	1.25	1.26
360	1.13	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21
720	1.13	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18
1440	1.12	1.14	1.15	1.16	1.16	1.17

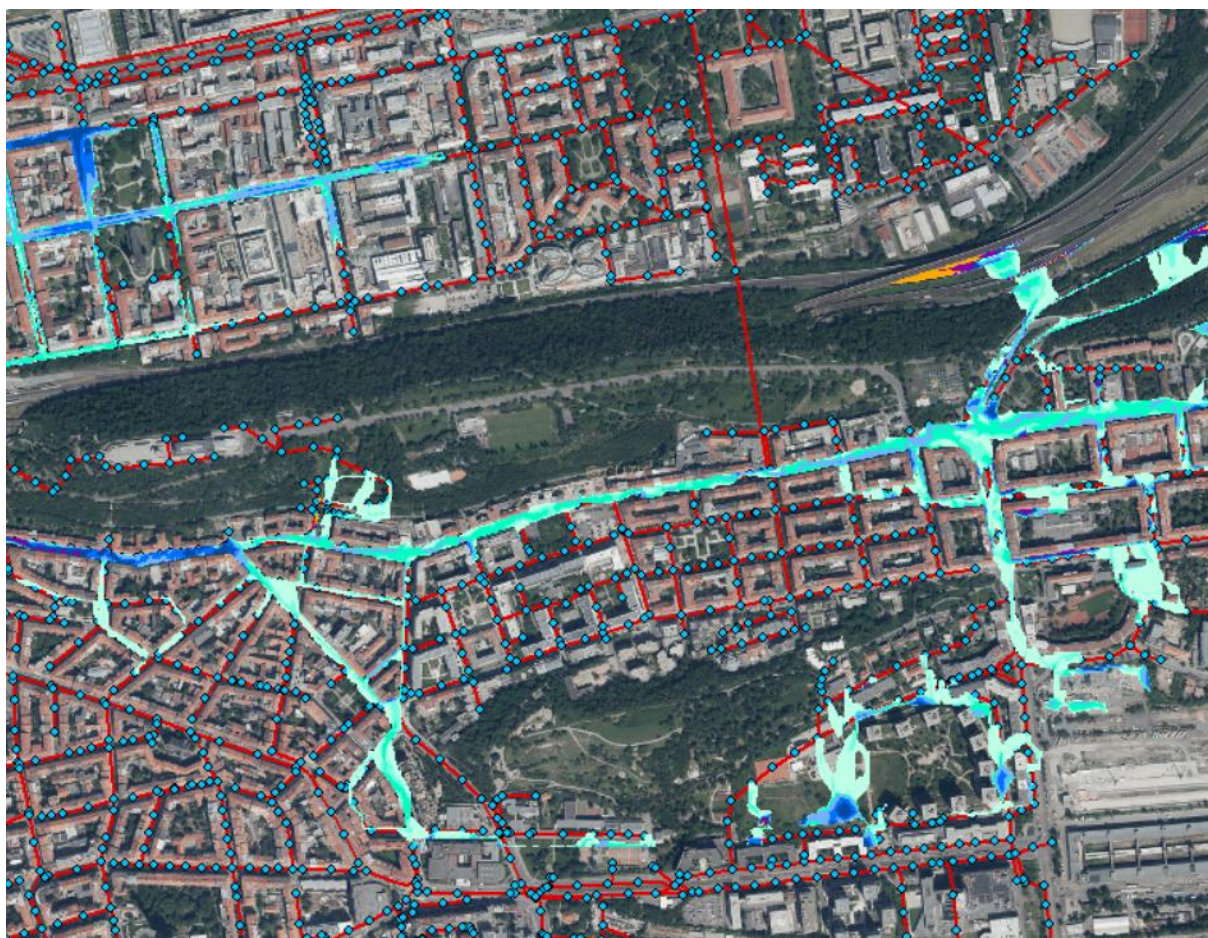
Na základě zpracovaných hodnot klimatického faktoru pro definované srážkové intenzity a zvolené časové horizonty lze konstatovat následující.

- a. Intenzita návrhového deště N02 doby trvání 15 minut naroste v časovém horizontu do roku 2050 o cca. 10 % oproti stávající návrhové hodnotě dle PSP.
- b. Hodnota desetiletého deště, která odpovídá zhruba kapacitním limitům stokové sítě se zvětší v horizontu k roku 2050 o cca. 12 %.
- c. Nárůst extremicity deště v období do roku 2050 lze odhadnout v rozsahu 10-15 % oproti stávajícím hodnotám náhradních intenzit.
- d. Pro časový horizont k roku 2080 dojde k dalšímu zvýšení těchto hodnot na cca. 20-30 % oproti stávajícímu stavu.
- e. Pro časový horizont k roku 2100 pak dojde k dalšímu zvýšení hodnot na cca.30-40 % oproti stávajícímu stavu.

## 4 Řešení vlivu změny klimatu na městské odvodnění v hl. m. Praze

### 4.1 Metodika řešení přívalových dešťů

Pro simulace lokálních zátop v důsledku extrémních dešťových událostí je třeba uchopit celou problematiku srážkového odtoku z intravilánu z nového pohledu. Základní premisou navrženého řešení je fakt, že u přívalových dešťů a dešťů extrémních dochází postupně k odtoku srážkových vod z celého dílčího povodí, a ne pouze z nepropustných ploch tohoto povodí. Tomu faktu musí být celé řešení přívalových dešťů podřízeno. Dalším důležitým faktem je to, že stávající 1D simulační model používaný v ČR pro řešení generelů odvodnění nepodává dostatečně jasnou informaci o výronu vod z městské kanalizace a o jejich následném transportu po povrchu intravilánu. Z tohoto důvodu je třeba celé řešení rozšířit o 2D simulační model proudění vody po povodí. Propojením 1D a 2D simulačního modelu lze pak získat poměrně přesnou informaci o ohrožení plynoucím z přetížení stokové sítě a výronu odpadních vod na povrch v důsledku průchodu extrémních srážek. (Pro tento účel je proto v podmínkách ČR použit 1D simulační model MikeUrban a 2D simulační model Mike21 v konfiguraci zvané MikeFlood). V následujících kapitolách je představen návrh postupu při simulacích přívalových srážek spolu s argumentací navrhovaných změn oproti standardnímu 1D řešení (metoda Time/area srážko-odtokového modulu A v programu MikeUrban) používaném při řešení generelů odvodnění.



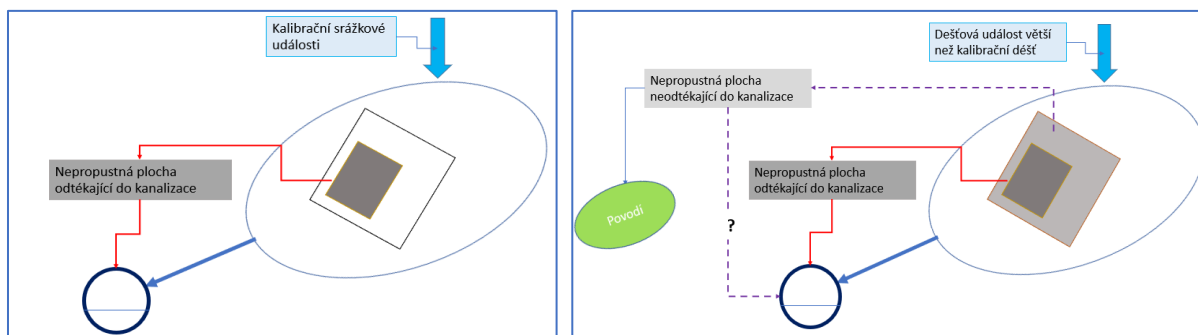
Obr. 32 Vývěr odpadních vod na povrch terénu při extrémní srážce

#### 4.1.1 Srážkový odtok v intravilánu

Při standardním řešení generelů odvodnění je nedílnou součástí prací na stavbě simulačního modelu jeho kalibrace (a případně verifikace). V praxi tato aktivita spočívá v tom, že na základě měřených dat srážek, průtoků, hladin a rychlostí dochází k úpravě hodnot parametrů modelu. Těmito parametry jsou hlavně velikost nepropustné plochy a počáteční ztráta nepropustných ploch, neboť tyto hodnoty charakterizují velikost výsledného odtoku z dílčího povodí. V rámci kalibrace je tak redukována hodnota velikosti nepropustných ploch (tzn. skutečná velikost nepropustných ploch zjištěná analýzou na povrchu) redukčním součinitelem (koeficientem s rozsahem 0-1) a případně je upravena i hodnota počáteční ztráty (obvykle používaná základní hodnota počátečních ztrát je pro nepropustné plochy 0,6 mm) tak, aby výsledná křivka průtokového hydrogramu v místě měření spočítaná v modelu v rámci simulace dané dešťové události odpovídala hodnotě průtokového hydrogramu z měření na síti pro tuto událost. Tento postup je plně v souladu s principy kalibrace popsány v literatuře a zajišťuje stejnou odezvu modelu na vnější podnět (srážku) jako je v reálném systému. Při tomto postupu jsou nicméně potlačeny dva spolu související podstatné aspekty.

- Prvním z nich je v literatuře citovaný fakt, že simulační model podává přesné výsledky jen v rámci rozsahu kalibrace. Pro větší než kalibrační deště vzniká menší nebo větší nejistota co do přesnosti výpočtu (velikosti vygenerovaného srážkového odtoku). To je v literatuře často dokumentovaná informace.
- Druhým faktem je praktický problém kalibrace na „malé“ a „velké“ deště. Je známou pravdou, že je velmi problematické úspěšně kalibrovat model zároveň na malé i velké srážkové události. (Buď je kalibrace úspěšná pro „malé“ nebo pro „velké“, ale ne pro oba typy najednou). Tato skutečnost se většinou obchází volbou kalibrace na „velké“ deště s ohledem na následné úlohy simulačního modelu. Jenže uvedený jev bude pravděpodobně fungovat obdobně i pro „větší“ než „velké“ deště, které ale nebyly v rámci časově omezené monitorovací kampaně získány.

Z výše uvedeného vyplývá, že v rámci kalibrace je vždy nastavena velikost nepropustných ploch ve vztahu k velikosti kalibračních dešťů. Pro dešťové události menších intenzit a úhrnů je tato plocha malá (malé hodnoty redukčního součinitele) zatímco pro větší srážkové události je celková nepropustná plocha větší. To je pravděpodobně důsledkem situace, kdy postupně začíná přitékat voda i z původně polopropustných ploch, které ovšem v rámci kalibrace na malé deště k odtoku nepřispívají.



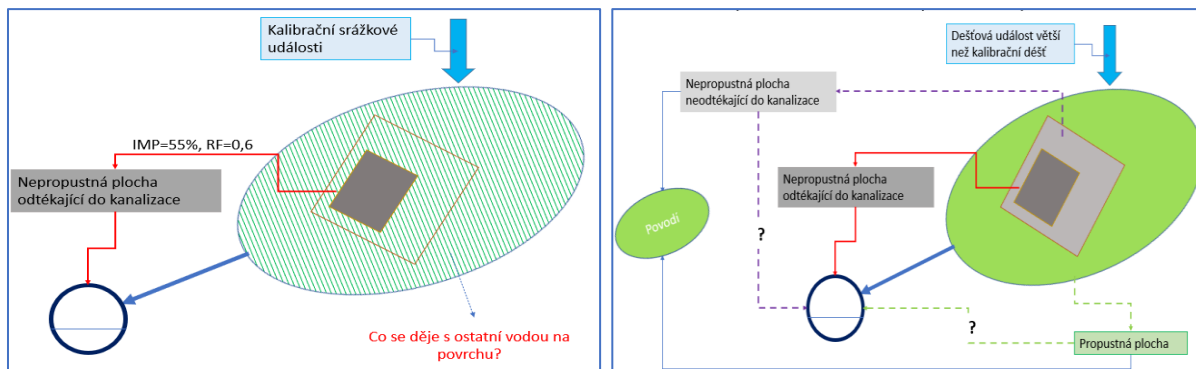
Obr. 33 Odtok srážkových vod při „malých“ a „velkých“ deštích

Je zřejmé, že určité procento srážkových vod se do kanalizace nedostane v důsledku hydraulických problémů uličních vpustí, nepřesností při vyspárování povrchu atd., nicméně velikost srážkové události hraje významnou roli při určení velikosti nepropustných ploch. Velikost nepropustných ploch tedy není konstantní, ale mění se s velikostí deště (a samozřejmě v závislosti na hydrologických podmínkách povodí před příchodem deště). Problém pak nastává při zatížení modelu kalibrovaného na „malé“ srážky srážkovými událostmi „velkými“ (2, 5, 10letý dešť). Simulační model používá pro další výpočty a analýzy velikost nepropustné plochy stanovenou podle kalibrace jako konstantní hodnotu. 1D simulační model tak může podávat pro velké deště podhodnocené výsledky srážkového odtoku oproti realitě.

Z výše uvedeného plyne, že existuje vztah mezi velikostí kalibračního deště a celkovou nepropustnou plochou srážko-odtokového simulačního modelu. S ohledem na výše uvedené pak lze předložit další aspekt řešení srážkového dotoku. Tento fakt hraje důležitou roli při řešení simulace přívalových a extrémních dešťů pomocí 1D a 2D simulačních modelů

- Pro velké, přívalové nebo extrémní deště bude nakonec přispívat ke srážkovému odtoku celá plocha dílčího povodí, a to včetně propustných ploch.

Na následujícím obrázku je znázorněn schematicky princip kalibrace modelu vlevo na obrázku (Obr. 34) a velikosti ploch, které se na celkovém odtoku podílejí při velkých (větších než kalibračních) srážkových událostech (pravý Obr. 34).



Obr. 34 Rozdílný nátok srážkových vod do kanalizace při kalibračním a extrémním dešti

Z výše uvedených okolností plyne, že při simulaci srážkového odtoku z přívalových a extrémních dešťových událostí je třeba se zabývat nejen odtokem z nepropustných ploch zjištěných v rámci kalibrace, ale také ostatními plochami, které se na odtoku za těchto událostí podílejí. S ohledem na fakt, že simulace srážkového odtoku je prováděna v rámci 1D simulačního modelu je zapotřebí upravit parametry srážko-odtokového děje tak, aby lépe odpovídaly skutečnostem uvedeným výše. Jako základní úpravu na úrovni srážkového odtoku je možno jmenovat úpravu povodí. Soubor základních navržených úprav na 1D simulačním modelu a zpracování 2D simulačního modelu je zpracováno v následujících kapitolách.

#### 4.1.2 Úpravy 1D modelu

Jednorozměrný simulační model používaný v ČR pro řešení generelů odvodnění je pro potřeby simulací přívalových a extrémních srážkových událostí nutno upravit do adekvátního stavu tak, aby výsledný model co nejvěrohodněji reflektoval všechny děje, které se na tomto jevu podílejí. V následujících odstavcích je zpracován soubor doporučených (a někdy i nezbytných) úprav, které mají za cíl uzpůsobit 1D simulační model pro řešení dané problematiky.

##### 4.1.2.1 Řešení odtoku z propustných a polopropustných ploch

Jak již bylo diskutováno výše, velkou pozornost je nutno věnovat odtoku, a to nejen z nepropustných ploch zjištěných v rámci kalibrace modelu ale i ostatních ploch, které se při takovémto jevu a srážkovém odtoku podílejí. Jedná se o odtok z propustných ploch a dále o odtok z ploch nepropustných, které byly v rámci kalibrace redukovány redukčním součinitelem.

Pro řešení odtoku z propustných ploch je navrženo následující alternativní řešení.

- a. Řešení pomocí doplňkových povodí
- b. Řešení pomocí skutečných typů zástavby (Princip GONEW)

**a. Řešení pomocí doplňkových povodí** je založeno na duplikaci vrstvy dílčích povodí, přičemž odtok z těchto povodí je generován na doplňkové ploše k původní nepropustné ploše každého dílčího povodí. V hydrologických parametrech je pak odtok regulován pomocí procenta nepropustných ploch ( $IMP=100\%$  - voda tedy bude odtékat z celé doplňkové plochy) a velikosti počáteční ztráty (IL) v rozmezí 16-30 mm. Velikost počáteční ztráty zajistí, že chování simulačního modelu bude až do velikosti srážkového úhrnu rovného počáteční ztrátě rovno chování původního simulačního modelu. Po zatížení modelu srážkou o úhrnu větším než IL dojde postupně k odtoku srážkových vod i z povodí původně označených jako propustné plochy.

Alternativní možností k výše uvedenému postupu je **b. Řešení pomocí skutečných typů zástavby**. Při tomto řešení je využito jako podkladu např. digitální vrstvy využití ploch, která stanovuje typ plochy (a tudíž její míru propustnosti) pro každý prvek na povodí (dům, ulice, náměstí, zeleň, dlažba atd.). Vrstva dílčích povodí je pak použita pro ohraničení všech prvků (nebo jejich částí) příslušných k danému dílčímu povodí. V tomto konceptu řešení není nutné přidávat do modelu paralelní vrstvu doplňkových povodí jako je tomu u metody a.

Odtok z polopropustných ploch nebo z ploch, které jsou v důsledku redukčního součinitele odpojeny z odtoku z nepropustných ploch je možno řešit zvýšením hodnoty redukčního součinitele, a to buď až na hodnotu  $RS=0,9$  (hodnota součinitele odtoku z nepropustných ploch) anebo je možno využít informací z historických záplavových událostí pro reprodukci události na 1D anebo 1D+2D modelu (výskyt zátopy na povrchu povodí v dané oblasti) pomocí adekvátního zvýšení hodnoty RS. V tomto případě je ovšem třeba v dané simulaci použít i možnosti řešení odtoku z propustných ploch.

##### 4.1.2.2 Úprava propustných ploch povodí

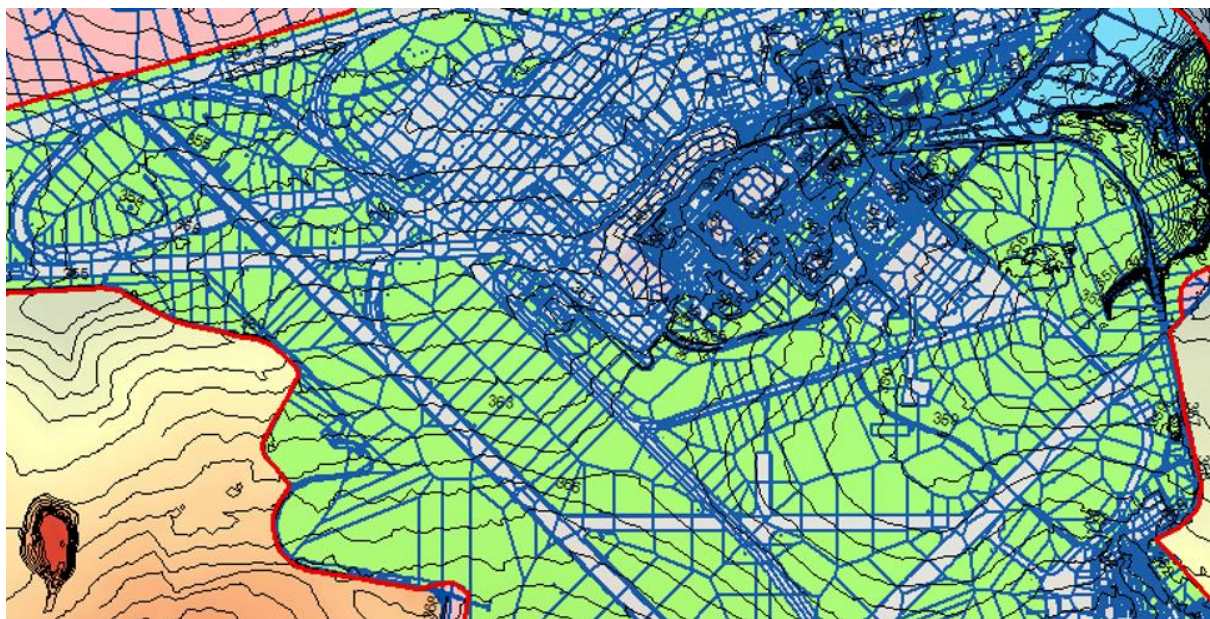
Kromě výše uvedených základních změn na úrovni hydrologie povodí je vhodné zkontrolovat a případně upravit také velikosti a tvary jednotlivých dílčích povodí, a to s ohledem na

předpokládaný nátok dešťových vod z propustných ploch podle morfologie terénu a dalších charakteristik terénu.

Důvodem těchto prací je okolnost, že stávající 1D simulační modely používají pro výpočet srážkového odtoku pouze nepropustné plochy. V případě extrémních dešťů přitom bude voda odtékat i z ploch propustných, které v původním modelu nemusí být topologicky zahrnuty ve své úplné velikosti. Příkladem jsou povodí na hranici intravilánu a extravilánu, u kterých lze očekávat za extrémního deště nátok vod na příklad z přilehlých polí nebo luk, která ovšem nejsou zahrnuta v simulačním modelu. Cílem těchto prací tedy je provést kontrolu velikosti ploch ze kterých s ohledem na morfologii terénu může za určitých podmínek dotéci srážková voda do kanalizace.

Tato práce (změna tvaru povodí, úprava velikosti povodí atd.) je ale logicky prováděna pouze u povodí propustných povrchů u postupu řešení viz. bod a) výše. U postupu řešení b) je kontrola a úprava prováděna pouze u povodí reprezentujících typ povrchu „zelené plochy“, případně další polopropustné plochy, které nejsou součástí přímého odtoku z nepropustných ploch.

Na obrázku níže (Obr. 35) je znázorněn způsob úpravy povodí 1D simulačního modelu pomocí sítě vrstevnic, jejichž sklonitost jasně vymezuje oblasti s potenciálním odtokem srážkových vod z propustných ploch (zelená barva) do kanalizace.



Obr. 35 Soubor povodí na modelu Letiště Praha upravený na základě kombinace kanalizační sítě a svodnic DTM

#### 4.1.2.3 Stanovení počátečních ztrát propustných ploch

Nastavení počátečních ztrát pro nově zadané propustné plochy je důležitým krokem, který ve výsledku ovlivňuje velikosti rozlivu dešťových vod na terénu.

Dostupná literatura udává hodnoty počátečních ztrát (konstantní ztráty) v širokém rozmezí.

Hingrey (2015) udává tuto hodnotu v rozmezí od 3 mm do 15 mm v závislosti na sklonu terénu.



**Table 4.2:** Orders of magnitude of depression storage capacities per unit area for different types of surfaces and moderate slopes.

Type of surface	Storage [mm]	Reference
Sand	5.0	Hicks (1944)
Loam	3.8	
Clay	2.6	
Pervious	6.5	Tholin and Keifer (1960)
Impervious	1.5	
Urban basins	1.5–4.0	Viessman <i>et al.</i> (1977)
Impervious areas	0.5–2	Kidd (1978)
Flat roofs	2.5–7.5	
Yard lawns	10	
Pasture	5.0	ASCE (1992)
Forest litter	7.5	
Pervious with: slope <3%	15	Chocat (1997)
Pervious with: slope >3%	3	
Impervious with: slope <3%	3	
Impervious with: slope >3%	0.2	

Obr. 36 počáteční ztráty dle *Hydrology, science for engineers, Hingrey et al., 2015 Hydrology: A Science for Engineers – Google Books*

Richards prezentuje hodnotu počáteční ztráty propustných ploch v rozmezí 9-11 mm.

Land use	Level 3 land use code	# obs	Mean effective storage (mm)	Std. dev. effective storage (mm)
Wetland	610	24	10.8	7.0
Mature deciduous forest *includes tree fall depressions	410	30	7.0 (9.9*)	7.0 (13.0*)
Unused crop field	250(300)	32	9.4	5.0
Urban residential grassland	113	20	0.5	0.4
Urban open (commercial)	120	15	2.0	2.4

Obr. 37 Počáteční ztráta - Richards *et al.*, *Depression storage in land uses common to the fringe lakes region* Microsoft Word - richards\_abstract.doc (hws.edu)

Dokumentace firmy Innovyze udává pro tuto veličinu hodnoty mezi 5-35 mm.

Type of Catchment Surface	Initial Loss (mm)	Continuous Loss (mm/hr)
<b>Impervious Areas</b>		
Roofs of houses, factories and commercial buildings, road surfaces, etc.	1.5	0
<b>Pervious Areas</b>		
1. Sandy, open saturated soils	5.0 - 20*	10 - 25*
2. Loam soils	5.0 - 20*	3.0 - 10*
3. Clays, dense structured soils	5.0 - 20*	.5 - 3.0*
4. Clay subject to high shrinkage and in a cracked state at the start of the rain	25 - 35*	4.0 - 6.0*
5. ARR (1977)	0 - 50*	-
* Values taken from an unpublished report by Aitken (1974) based on various textbook values.		

Obr. 38 Počáteční ztráta, Zdroj: <https://help.innovyze.com/display/xprafts2016/Initial+and+Continuing+Loss+Model>

Endreny udává hodnotu počáteční ztráty pro oblast Nizozemí, Švédska a UK na úrovni 5-15 mm.

Land cover type	Depression storage range (mm)
Large paved area	2–4
Roofs – flat	3–8
Roofs – sloped	2–3
Lawn grass	5–13
Wooded areas/open fields	5–15

Obr. 39 Počáteční ztráty dle Endreny, 2006, (PDF) *Land Use and Land Cover Effects on Runoff Processes: Urban and Suburban Development* (researchgate.net)

BARR Engineering company předkládá hodnoty počáteční ztráty na úrovni 6-10 mm.

Land Covers	Depression Storage (inches)	Source
Impervious, 1 percent slope, flat roofs, parking lots, roads	0.0625 – 0.125	Tholin and Kiefer 1960
Impervious, 2.5 percent slope and sloped roofs	0.05	Viessman 1996
Turfgrass	0.25	Tholin and Kiefer 1960
Open Fields	0.40*	Urban Drainage and Flood Control District 2008
Wooded Areas	0.40*	Urban Drainage and Flood Control District 2008

\*These values include interception losses by vegetation

Obr. 40 (Minimal Impact Design Standards (state.mn.us))

Vliv lesního porostu na hodnotu počátečních ztrát je analyzován pro poměry České republiky Keršlem z Lesnické fakulty, Brno (*Minimal Impact Design Standards (state.mn.us)*). Podle této analýzy je počáteční ztráta v zalesněných oblastech na úrovni cca. 70 mm (intercepce 5 mm, povrchová akumulace 7 mm, však 60 mm).

Z výsledků výše uvedené rešerše lze odvodit, že hodnota počáteční ztráty propustných ploch v urbanizovaném povodí se bude pohybovat mezi 16 a 30 mm. Pro účely řešení vlivu extrémních dešťů na odtokové poměry v intravilánu je doporučeno volit počáteční ztrátu propustných ploch na úrovni 16-30 mm podle lokálních podmínek (sklonitost terénu, hydrogeologie oblasti atd.).

Pro upřesnění hodnoty počáteční ztráty propustných ploch je velmi vhodné využít historických informací o záplavových událostech (v současnosti lze velmi výhodně využít videa, která při takovýchto událostech vznikají a jsou k dispozici zejména na sociálních sítích).



Obr. 41 Záplava v Karlině z 21.7.2014 z videozáznamu zveřejněném na <https://www.youtube.com/>

#### 4.1.2.4 Stabilizace modelu na extrémní srážku

Při přípravě 1D simulačního modelu na řešení přívalových dešťů je třeba vzít v úvahu, že stávající simulační model byl používán pro řešení dešťových událostí významně nižších intenzit (2, 5, 10letý dešť), a v důsledku toho lze očekávat problémy se stabilitou modelu při zatížení srážkami většími. Proto je vhodné simulační model před vlastním řešením dané studie nebo projektu ustálit na průchod extrémního deště s opakováním 100 let. Doba trvání srážky je pak volena v rozmezí 15minutového deště a deště o trvání rovném době dotoku v daném povodí. Je zřejmé, že největší stabilitní problémy lze očekávat u dešťů krátkých dob trvání.

Při úpravě 1D modelu je vhodné odstranit krátká potrubí (menší než 10 m), odstranění nestabilit v okolí shybek a udělat si představu o retenčních objektech na síti tak, aby nedošlo k jejich duplikaci při spojení 1D a 2D simulačního modelu (zdvojený objem). Celkový časový krok výpočtu 1D simulačního modelu v zásadě nehraje významnou roli, neboť výsledná simulace 1D+2D je řízena z 2D simulačního modelu, jehož časový krok výpočtu je významně kratší než u 1D modelu.

#### 4.1.2.5 Ztráta třením a místní ztráty

Samostatnou a pro tuto chvíli nedořešenou otázkou zůstává volba místních ztrát a ztrát třením. V praxi se standardně používají předdefinované hodnoty ztrát z literatury, což ale může vést u simulačních modelů k podhodnocení těchto ztrát. Z literatury je známý fakt, že 1D simulační model vzhledem k výpočtu pouze axiální složky proudění neobsahuje příčné (radiální) fluktuace, které se spoluúčastní na výsledných třecích silách v potrubí. Z tohoto důvodu jsou rychlosti v simulačním modelu vyšší než v reálném kanalizačním potrubí. Nicméně parametry součinitele tření (Manningovo malé „n“ nebo velké „N“) byly odvozeny pro reálná potrubí, kde jsou radiální složky rychlosti (turbulence) přítomny. Proto lze předpokládat, že například hodnoty součinitele drsnosti pro betonové potrubí nevytvoří „dostatečnou“ drsnost pro proudění, ve kterém část rychlostní složky podílející se na zvýšení tření chybí. Obdobně je tomu u součinitele místních ztrát u nátoku do šachet nebo jiných objektů (speciálním fenoménem v tomto smyslu jsou spadiště s jejich komplexní hydraulikou).

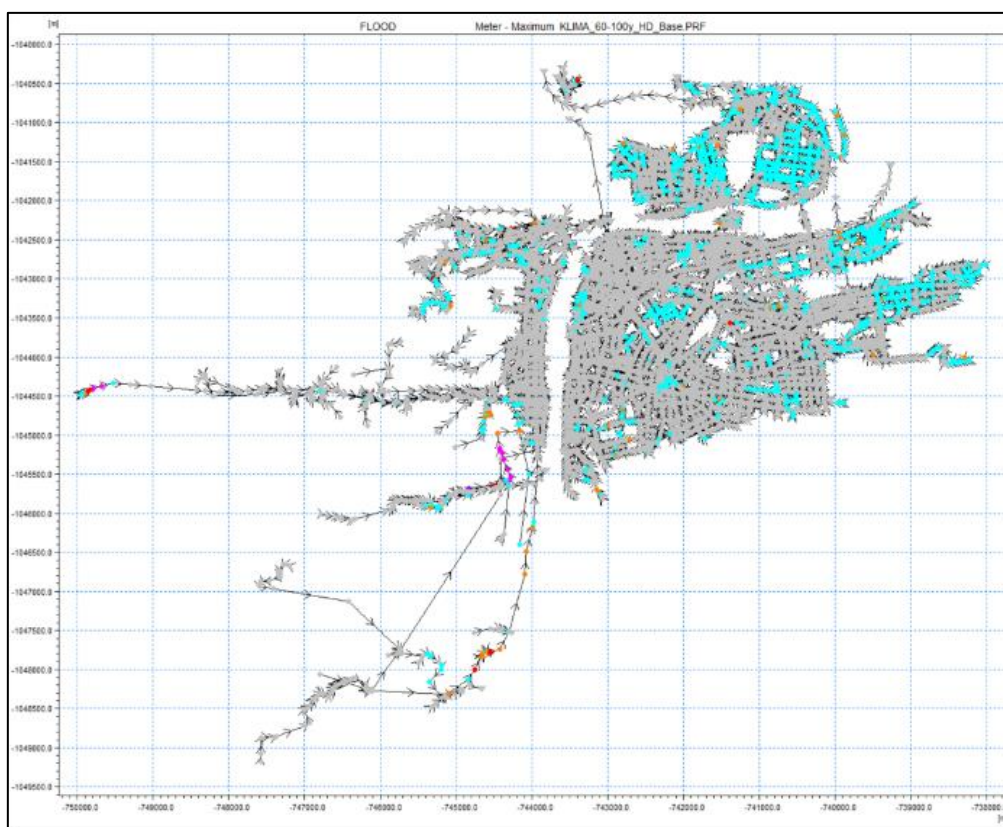
Důsledky těchto jevů jsou podstatné při stanovení výšek hladin v potrubí, při odhadu tlakového proudění nebo v našem případě při výronu vod na terén. Lze odhadovat, že většina stávajících

simulačních modelů podhodnocuje výšku hladiny a nadhodnocuje velikost rychlosti v potrubí. V důsledku toho teče voda v modelu rychleji než je reálné, a tím jsou potlačeny jevy s tím spojené, jako je tlakové proudění nebo výron vody na terén.

Jako řešení této nepřesnosti je do budoucna vhodné zajistit při kalibraci simulačního modelu nastavení parametrů modelu nejen pro průtokové hydrogramy, ale také pro průběhy hladin a rychlostí.

#### 4.1.2.6 Simulace 1D zátopy zvolených dešťů

Po úpravě 1D modelu a po jeho stabilizaci na průchod extrémní srážky je jako poslední krok přípravných prací doporučeno provést 1D simulaci dané extrémní nebo přívalové srážky a vyhodnotit lokality s výronem vody na terén a se zaplavením povrchu (např. funkcí FLOOD v programu MikeView). Tento krok prací je vhodný provést ještě před spojením 1D a 2D modelu, protože se může ukázat již na úrovni 1D modelu, že k žádnému zaplavení povrchu nedojde, a tudíž není nutné počítat 1D+2D model. Pokud k výronu vody dojde, je na druhé straně vhodné označit oblasti s přetíženými šachtami tak, aby je bylo možno propojit s 2D modelem, zatímco ostatní šachty bez výronu vody mohou zůstat nepropojené. Tím dojde k úsporám výpočetního času, který u 1D+2D modelu hraje důležitou roli.



Obr. 42 Výsledkový soubor pro 1D model stokové sítě, na které jsou světlemodrou barvou jsou vyznačeny šachty, ze kterých odpadní voda vyvívá na povrch terénu

## 4.1.3 Zatěžovací deště

Volba zatěžovacích (tedy přívalových a extrémních) dešťů představuje další milník při řešení srážkového odtoku z urbanizovaných povodí. Jelikož se jedná o extrémní srážkové činnosti je vhodné pečlivě volit parametry těchto dešťů, a to i s ohledem na předpokládaná následná adaptační opatření na ochranu dané lokality před důsledky těchto srážkových extrémů.

## 4.1.3.1 Doba opakování a doba trvání deště

Na rozdíl od standardních zatěžovacích (posudkových) dešťů používaných pro posudkovou činnost (2, 5, 10letý blokový déšť nebo historické deště s dobou opakování průměrně jednou za 2, 5, 10 let) se v případě řešení extrémních nebo přívalových dešťů jedná o významně větší srážkové úhrny a maximální intenzity, které lze získat pouze z čáry nebo tabulky náhradních intenzit (dále jen čára „IDF“ – Intenzity, Duration, Frequency) pro danou lokalitu. Na příklad pro oblast hl. m. Prahy byla aktualizována tabulka náhradních intenzit IDF na základě dvacetiletého souboru srážkových dat z 23 srážkoměrných stanic v oblasti Prahy (viz. Tab. 20).

Tab. 20 Průměrné náhradní intenzity pro Prahu odvozené na základě historických měření

Průměrné náhradní intenzity [l/s/ha]						
T [min]	2 roky	5 let	10 let	20 let	50 let	100 let
10	214	298	356	414	493	555
15	169	236	283	329	393	442
20	141	197	236	275	328	370
25	120	168	201	235	280	316
30	104	146	175	204	243	274
35	92	129	155	180	215	242
40	83	116	139	162	193	217
45	75	105	126	147	175	197
50	69	96	115	134	160	180
55	64	89	106	124	148	166
60	59	82	99	115	137	154
70	52	72	87	101	120	135
80	47	65	77	90	107	120
90	42	58	70	81	97	109
100	39	53	64	74	88	99
120	33	46	55	64	75	85
180	24	33	39	45	54	60
240	19	26	30	35	42	47
360	13	18	21	25	29	33
720	8	10	12	14	16	18
1440	4	6	7	8	9	10

Je zřejmé, že urbanizované povodí bude jinak reagovat na 15timinutovou srážku o opakování 2 roky (návrhový déšť) o intenzitě 169 l/s-ha a jinak na srážku 15timinutovou o opakování sto let s intenzitou 442 l/s-ha.

Volba extrémních srážek je ovšem většinou vázána na stanovené časové horizonty řešení v návaznosti na požadovanou míru ochrany zájmové oblasti. Obecně lze jako spodní hranici doby opakování brát déšť větší než desetiletý, a to s ohledem na fakt, že většina stávajících

stokových sítí dokáže víceméně bezpečně provést desetiletý dešť bez zatopení povodí. S ohledem na tento fakt jsou pro řešení průběhu extrémních a přívalových srážek voleny doby opakování v rozmezí 20, 50, a 100 let.

Trvání deště je pak vhodné zvolit v rozsahu mezi 15 minutami a předpokládanou dobou dotoku v daném povodí. Ta se ve většině případů pohybuje mezi 1-2 hodinami. Pro podmínky hl. m. Prahy je doporučeno používat dobu trvání v rozmezí 15 min a 60 minut.

#### 4.1.3.2 Volba tvaru deště

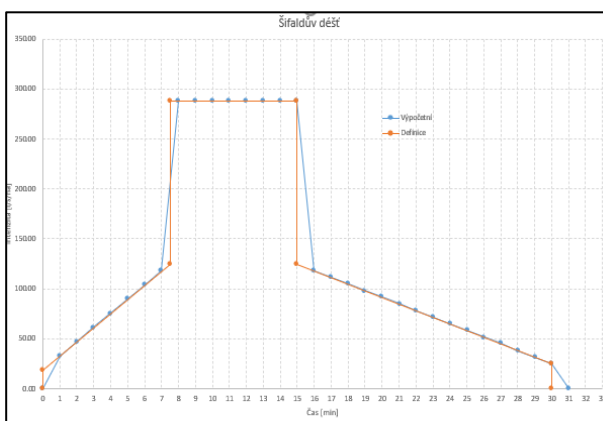
Volba tvaru deště hraje poměrně důležitou roli, a to zvláště u dešťů krátkých dob trvání. V principu je k dispozici buď srážka v podobě blokového deště nebo syntetický dešť upravený do zvoleného tvaru. V podmínkách ČR je to tvar dle Ing. Šifaldy, který i podle posledních studií nejlépe vystihuje převládající tvar a rozložení dešťů v české kotlině.

S ohledem na okolnost, že tvarové vlastnosti srážkových událostí jsou významně jiné než základní tvar blokového deště, je doporučeno používat při řešení extrémních a přívalových dešťů syntetických dešťů zpracovaných do tvaru podle Ing. Šifaldy.

#### 4.1.3.3 Vliv klimatické změny

V posledních letech se do řešení vodohospodářských úloh stále více promítá vliv klimatické změny. Důsledky změny klimatu je možno pozorovat nejen na čím dál delších obdobích sucha a z toho plynoucího nedostatku podzemních i povrchových vod, ale i na rostoucí extremicitě dešťů, které se během roku na našem území objeví. Přesto, že v současnosti nejsou pozorovány změny v rámci ročního úhrnu srážek, výrazně se proměňuje distribuce srážek během roku a jejich intenzita obzvláště v situaci, kdy před srážkovou událostí předchází delší období sucha. Navíc, klimatické modely vývoje klimatu do budoucnosti jasně ukazují, že tento trend bude pokračovat.

S ohledem na výše uvedená fakta je vliv klimatické změny v podobě nárůstu intenzit a úhrnů dešťů postupně zahrnován do vodohospodářské praxe. Jedním z možných způsobů zahrnutí vlivu klimatické změny na srážkovou činnost je použití tzv. „Klimatického Faktoru“, což je koeficient definující předpokládaný nárůst intenzity a srážkového úhrnu deště v definovaném budoucím časovém horizontu (obvykle se jedná o rok 2100). Pro oblast Pražské kotliny byl zpracován Klimatický Faktor s pomocí výsledků několika desítek klimatických modelů a zvoleného výhledového stavu produkce emisí skleníkových plynů RCP 8,5 do následující tabulky (Tab. 21).



Obr. 43 Rozložení intenzity deště do tvaru dle Ing. Šifaldy („Šifaldovo rozložení“)

Tab. 21 Hodnota klimatického faktoru CF pro výhledový stav 2100 vč. emisního modelu RCP 8,5

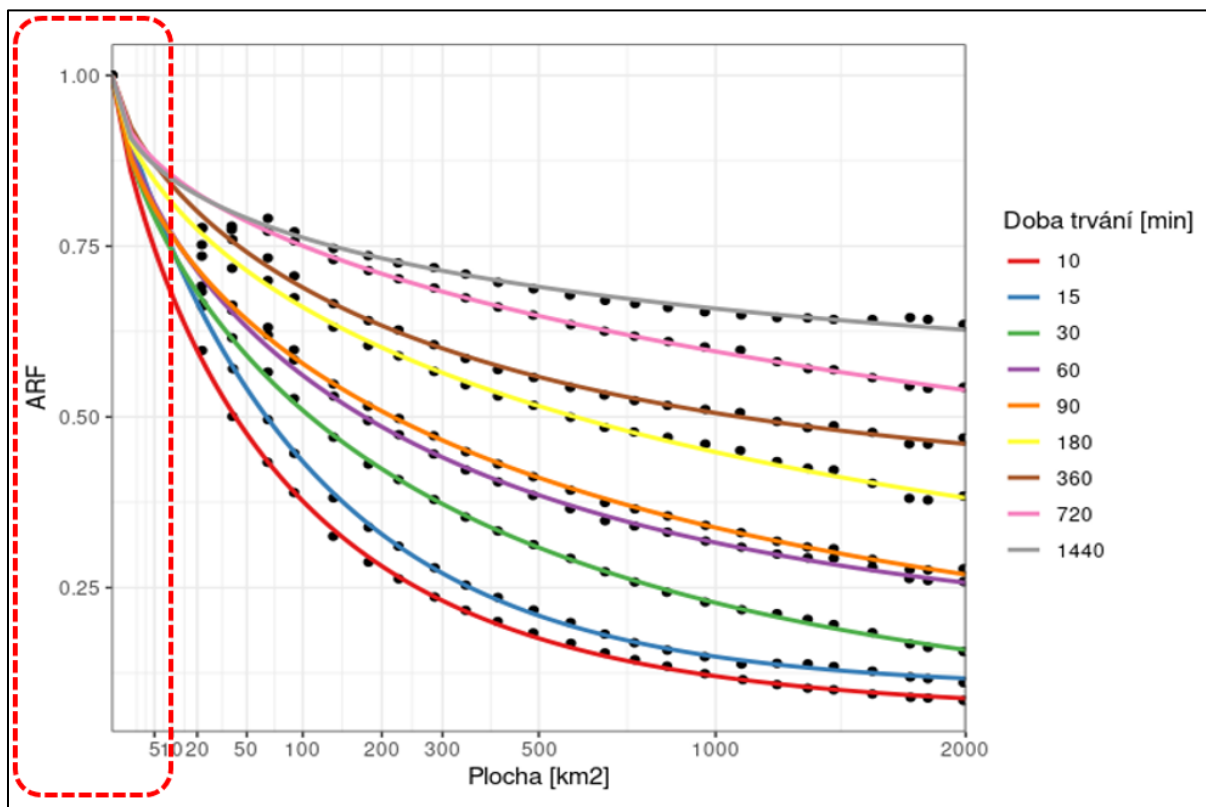
Klimatický faktor pro výhledový rok 2100 a emisní model RCP 8,5						
T [min]	2 roky	5 let	10 let	20 let	50 let	100 let
10	1.3	1.36	1.38	1.4	1.42	1.43
15	1.25	1.31	1.34	1.35	1.37	1.38
20	1.22	1.28	1.31	1.33	1.35	1.36
25	1.21	1.27	1.29	1.31	1.33	1.34
30	1.2	1.26	1.29	1.31	1.32	1.33
35	1.2	1.26	1.28	1.3	1.31	1.32
40	1.19	1.25	1.27	1.29	1.31	1.32
45	1.19	1.24	1.26	1.28	1.3	1.31
50	1.18	1.23	1.26	1.27	1.29	1.3
55	1.18	1.23	1.25	1.26	1.28	1.29
60	1.17	1.22	1.24	1.26	1.27	1.28
70	1.17	1.21	1.23	1.25	1.26	1.27
80	1.16	1.21	1.23	1.24	1.26	1.26
90	1.16	1.21	1.23	1.24	1.25	1.26
100	1.16	1.21	1.23	1.24	1.25	1.26
120	1.16	1.21	1.23	1.24	1.26	1.27
180	1.15	1.21	1.23	1.24	1.26	1.27
240	1.15	1.2	1.22	1.23	1.25	1.26
360	1.13	1.17	1.18	1.19	1.2	1.21
720	1.13	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18
1440	1.12	1.14	1.15	1.16	1.16	1.17

Je doporučeno používat hodnoty Klimatického Faktoru při řešení přívalových a extrémních dešťů podle výše uvedené tabulky.

#### 4.1.3.4 Velikost zasažené plochy povodí

Při použití náhradních (syntetických nebo blokových) dešťů je třeba vzít v úvahu, pro jak velkou oblast je řešení přívalových srážek zpracováváno. Pokud se jedná o malá území o rozloze několik desítek hektarů, není třeba se zabývat vlivem zasažené plochy povodí. U větších oblastí je však tento jev třeba brát v úvahu.

Čára (nebo tabulka) náhradních dešťových intenzit dané doby trvání a opakování je tvořena na základě bodových informací jednotlivých použitých srážkoměrů. Z toho plyne, že i výsledná velikost náhradních intenzit představuje v principu bodovou hodnotu. Přitom je známý fakt, že velikost maximálních intenzit klesá s velikostí zasažené plochy. To je znázorněno na následujícím grafu (Obr. 44) zpracovaném pro hl. m. Prahu na základě dat 23 srážkoměrných stanic a dobu pozorování cca. 20 let.



Obr. 44 Čára náhradních intenzit zpracovaná pro hl. m. Praha na základě dlouhodobého pozorování

Z grafu je patrné, že hodnoty náhradních intenzit výrazně klesají s narůstající velikostí zasaženého povodí. V urbanizovaném povodí se nicméně v praxi setkáváme s povodími o velikostech 1-10 km<sup>2</sup>. Pro takovéto velikosti povodí (Tab. 22) je pak předpokládána redukce náhradních intenzit menší (okolo hodnoty 0,8). Je proto doporučeno při simulaci extrémní srážkové události s využitím čáry náhradních intenzit zvážit využití uvedeného redukčního faktoru podle velikosti modelovaného povodí.

Tab. 22 Redukční faktor v závislosti na zasažené ploše a době trvání srážky

ARF - Area Reduction Factor [%]				
plocha [Km2]	Doba trvání			
	<=30min	30mi – 1h	1-3h	3-24
1	88	89	90	92
2	84	86	87	90
3	82	84	85	89
4	80	82	84	88
5	78	81	83	87
6	77	80	82	87
7	75	79	81	86
8	74	78	80	86
9	73	77	80	85
10	72	77	79	85
11	71	76	78	84
12	70	75	78	84
<b>AVG</b>	<b>78.3</b>	<b>81.3</b>	<b>83.1</b>	<b>87.5</b>

#### 4.1.4 2D model

Použití dvourozměrného simulačního modelu pro řešení simulací přívalových a extrémních srážkových událostí je v současnosti v ČR novým prvkem vodohospodářské praxe. 2D simulační modely jsou standardně svázané s řešením povodňových stavů v extravilánu a jejich využití pro městskou hydrologii je relativní novinkou. 2D simulační model je v principu opřen o kvalitně zpracovaný digitální model terénu resp. reliéfu a o dobře připravený 1D simulační



model kanalizační sítě. Příprava 1D simulačního modelu byla diskutována v předchozích kapitolách. V následujících odstavcích bude pozornost věnována důležitým krokům při přípravě ortogonálního (2D buňky modelu jsou uspořádány do čtvercové sítě) 2D simulačního modelu.

#### 4.1.4.1 Digitální Model Reliéfu (DEM)

Digitální model terénu představuje klíčový prvek stavby 2D simulačního modelu. Při jeho přípravě je třeba věnovat pozornost několika důležitým aspektům. Těmi jsou:

##### a. Rozlišení modelu – velikost buněk čtvercové sítě

Rozlišení modelu je jedním z kritických faktorů významně ovlivňujících výslednou délku simulace. Pokud například chceme modelovat oblast o velikosti  $2 \times 2 = 4 \text{ km}^2$ , při volbě velikosti buňky modelu  $2 \times 2 \text{ m}$  dostáváme 250 000 výpočetních bodů modelu. Pokud mřížku zmenšíme na  $1 \times 1 \text{ m}$  dostáváme 4 miliony výpočetních bodů tzn. 16krát větší výpočetní pole. Důsledky toho jsou výrazně patrné na rychlosti výpočtu modelu. V literatuře se obecně doporučuje pro řešení povodní v intravilánu velikost čtvercové buňky v rozmezí 1-2 m. Zkušenosti z hl. m. Prahy ukazují, že výpočetní velikost 1,5 m umožňuje řešení simulací srážkových událostí v rozmezí několika hodin. Oproti tomu při velikosti buňky  $1 \times 1 \text{ m}$  je výpočetní čas srážkové události na úrovni desítek hodin až dnů. To je dáno požadovanou volbou časového kroku, která se v praxi pohybuje mezi 0,2-1,0 sekundou.

Pro podmínky simulací v intravilánu města je doporučena velikost buňky 1,5 m s časovým krokem výpočtu okolo 0,5 sekundy.

##### b. Kontrola a úprava hran modelu

Při stavbě DEM hraje významnou roli umístění hran objektů (lokalit, ve kterých dochází ke skokové změně Z souřadnice – jako jsou stěny domů, hrany koryta, nebo umístění jiných kolmých překážek proudu vody jako je např. betonový plot). Vložení těchto hran a jejich kontrola s využitím ortofota je velmi důležitým krokem přípravy DEM. Tyto úpravy je možno provádět v trojúhelníkovém (TIN) modelu, kde je možno vystihnout umístění hran přesněji než ve čtvercovém gridu. Při převodu TIN modelu do čtvercového (GRID) modelu je pak třeba zkontrolovat a případně upravit finální umístění těchto objektů.

##### c. Odstranění překážek pro proud vody (přejezdy a nadjezdy)

Klasickým problémem DEM je modelování mostů, přejezdů, podjezdů, křížení atp. DEM neví, že se jedná o tyto objekty a místo nich tvoří souvislou plochu, která pro tok vody působí jako bariéra. Pokud DEM zůstane na této úrovni, simulace nebudou podávat správné výsledky. Je třeba v místech těchto objektů odstranit tuto překážku, resp. ji nahradit hodnotami povrchu terénu tak, aby mohla srážkové vod v případě záplavy těmito objekty projít v souladu s realitou.

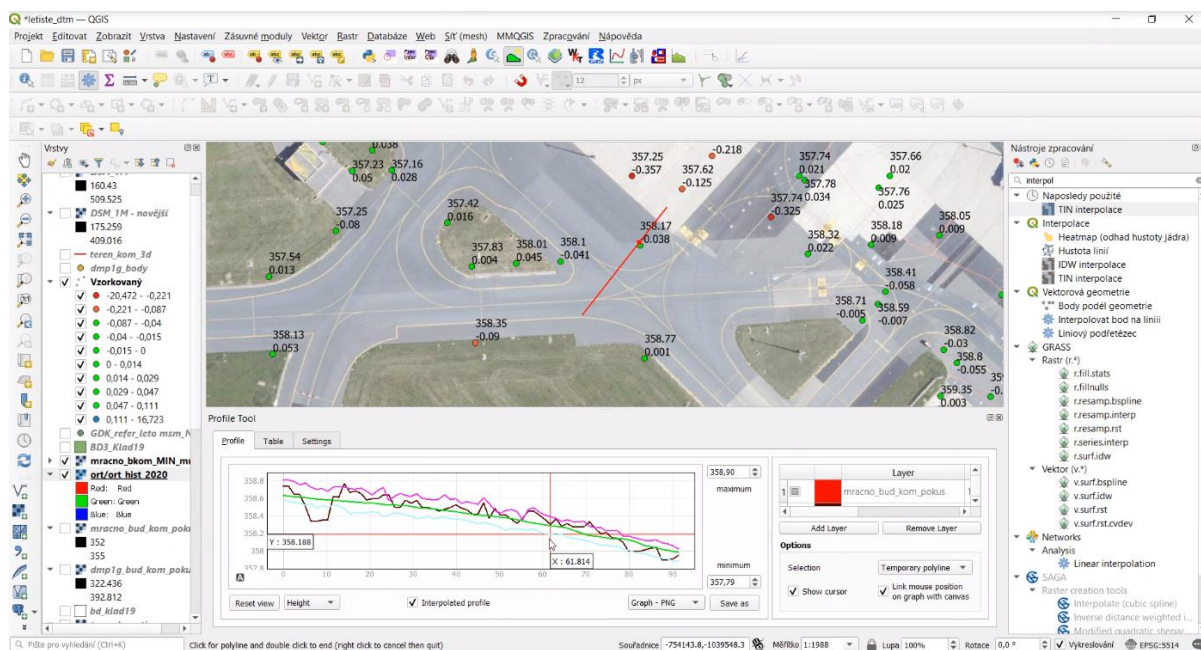
##### d. Objekty retencí

Při přípravě DEM modelu je také třeba kontrolovat umístění a velikosti objektů retencí (suchý poldr, retenční nádrže atp.). Při práci se 1D simulačním modelem je standardně řešeno umístění lokálních retenčních objemů formou retencí (basin) přímo v modelu. U spojeného 1D+2D modelu je třeba zajistit, aby výsledný spojený model nezdvojoval tyto retence například tím, že vedle 1D retence bude na stejném místě lokální retenční prostor převzatý nebo

vytvořený v DEM. Při rozhodování o volbě priority je vhodné upřednostnit retence v 1D modelu a to zvláště u nově navrhovaných objektů.

### e. Rozdíly Z-tových souřadnic v 1D modelu a v DEM

V budoucím spojeném 1D+2D simulačním modelu hraje významnou roli pro stabilitu výpočtu potenciální rozdíl mezi Z-tovou souřadnicí poklopu šachet a velikostí Z-tových souřadnic buněk DEM v okolí místa poklopu. Spojený simulační model provádí úpravy na úrovni 1D modelu tak, že mění velikosti Z souřadnic poklopu podle DEM. To je poměrně silný zásah do 1D modelu, a proto je třeba dopředu zajistit, aby uvedené rozdíly byly co nejmenší. V literatuře se popisuje jako akceptovatelný rozdíl těchto výšek hodnota do 20 cm. Pokud jsou výškové rozdíly velké, je vhodné provést doměření poklopů např. pomocí GPS stanic.



Obr. 45 Vizualizace rozdílu výšek mezi úrovní poklopu a zemského povrchu z digitálního modelu DEM

#### 4.1.5 Propojení 1D a 2D simulačního modelu

Po dokončení přípravy 1D simulačního modelu a DEM nastává čas pro tvorbu spojeného 1D+2D modelu. Při tomto kroku je vhodné vzít v úvahu následující okolnosti.

##### 4.1.5.1 Výpočet srážkového odtoku

Výpočet srážkového odtoku je v principu možné uskutečnit jak na úrovni 1D simulačního modelu (pomocí soustavy podpovodí a zvoleného hydrologického modelu) tak i na úrovni 2D modelu (pomocí definice srážky nad celým územím a k tomu přidruženým hodnotám počátečních ztrát a infiltrace – podle zvoleného modulu výpočtu). S ohledem na v urbanizovaném povodí a přítomnost 1D simulačního modelu je nejvhodnější možností výpočet hydrologie na úrovni 1D modelu. Do 2D modelu pak vstupuje pouze srážková voda, která vytéká nebo nemůže s ohledem na kapacitu stokové sítě natéct do dané šachty. Na druhé straně, srážková voda, která postupuje terénem ve 2D modelu může kdekoli v místě napojené šachty natéci zpět do 1D modelu. Na tomto principu je provedeno spojení 1D a 2D simulačního modelu v programu MikeUrban. S ohledem na existenci 1D simulačních modelů a jejich souboru podpovodí používaných pro výpočet generelů odvodnění je doporučeno postupovat podle výpočtu hydrologie v 1D simulačním modelu.

Volba způsobu výpočtu srážkového odtoku popsaná výše hraje roli při nastavení některých výpočetních parametrů 2D simulačního modelu. Konkrétně se jedná o hodnoty DRYING a FLOODING v nastavení 2D modelu. Tyto parametry zajišťují spuštění a ukončení výpočtu v dané buňce 2D modelu. Následující tabulka předkládá doporučené hodnoty těchto parametrů pro oba způsoby výpočtu hydrologie.

Tab. 23 Doporučené parametry pro start a stop výpočtu v buňce modelu

Hodnoty nastavení výpočtu	jednotky	Drying	Flooding
Gridová hydrologie ve 2D modelu	[m]	0.001	0.002
Hydrologie v 1D modelu	[m]	0.02	0.03

#### 4.1.6 Propojení šachet 1D modelu a DEM

Vlastní propojení obou simulačních modelů je vytvořeno jako propojení mezi šachtami 1D modelu a místem poklopu šachty ve 2D modelu. V tomto místě je ve výpočtu provedeno propojení modelů na úrovni jednoho časového kroku.

Při výběru seznamu šachet, které jsou použity pro propojení obou modelů je vhodné se nejdříve seznámit s průběhem dané extrémní srážky na 1D simulačním modelu. Pro tento účel je vhodné použít informace o



Obr. 46 Světlemodře vyznačené šachty slouží k propojení 1D modelu s DEM

výronu vody ze šachet na povrch (např. s využitím funkce „Flood“ v programu MikeView). Zjištěná fakta o místech výronu mohou významně pomoci při následném výběru šachet pro propojení 1D a 2D modelů. Není tak nutné automaticky vybírat všechny šachty v oblasti, ale jenom tu část, ve které buď dochází k výronu vod nebo s ohledem na morfologii terénu u nich naopak může dojít k nátoku dešťových vod, které se dostaly na terén.

#### 4.1.6.1 Další úpravy na 1D a 2D modelu

Kromě výše uvedených okolností spojení obou simulačních modelů je vhodné se dále zabývat ještě minimálně následujícími aspekty.

##### a. Odpojení šachet s překryvem napojených buněk sítě 2D modelu

Jedná se o to, že spojený simulační model vykazuje nestability u šachet, které jsou umístěny v blízké vzdálenosti od sebe. Tato vzdálenost je definována vzdáleností k těmto šachtám napojeným buňkám gridu 2D modelu. Pokud se tyto buňky překrývají nebo jsou v naprosté blízkosti, je třeba jednu z šachet odpojit z 1D+2D propojení.



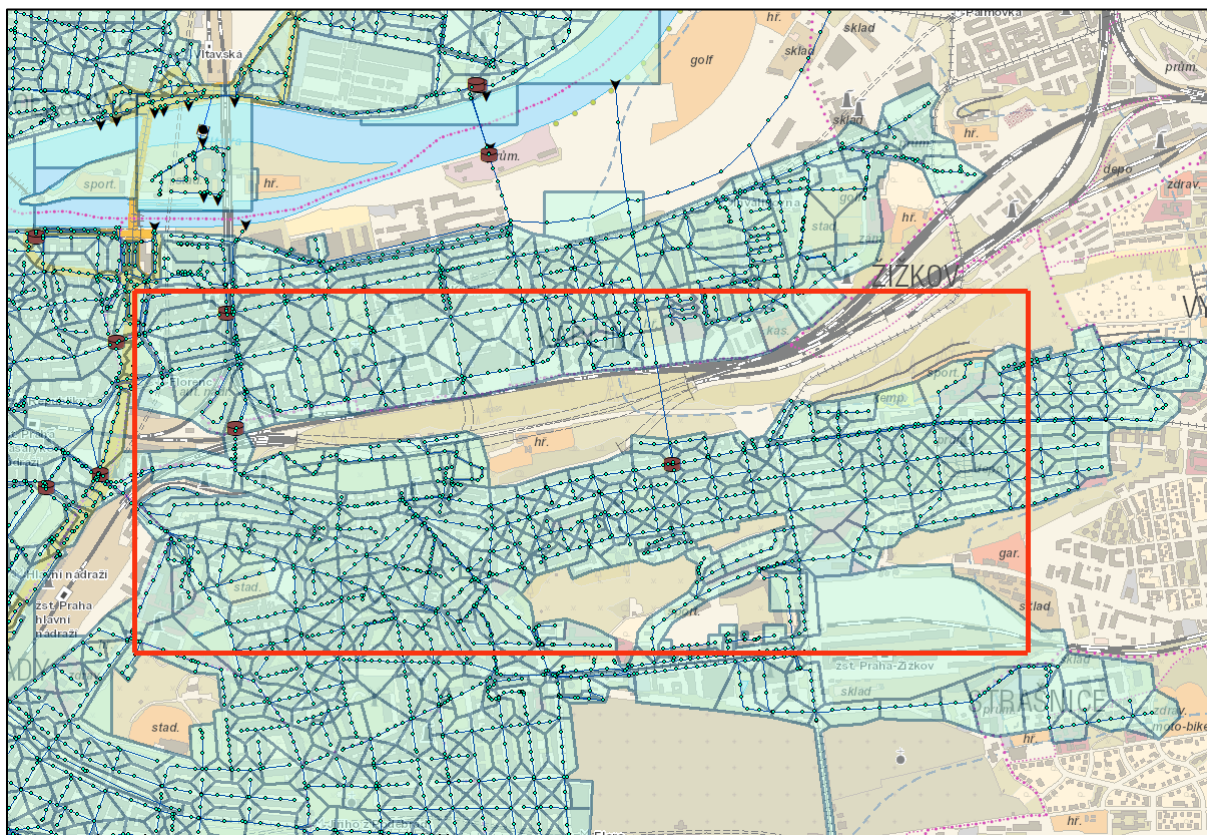
Obr. 47 Rozliv vody z šachet na terén při extrémní srážce

## 4.2 Analýza funkce stokové sítě na 1D modelu

Postupy a závěry analýz provedené v rámci výše uvedených kapitol byly dále otestovány na pilotním povodí v oblasti Karlín – Žižkov. V tomto území použil zhotovitel 1D simulační model předaný objednatelem a provedl na něm úpravy dle metodiky uvedené v kap. 4.1. Jednorozměrný simulační model byl poté propojen s dvourozměrným modelem povodí a na tomto spojeném modelu byly provedeny simulace zátopy zvoleným extrémním deštěm definovaným v rámci zpracování kapitoly 3. Následující kapitoly prezentují postup a výsledky této práce.

### 4.2.1 Použitý simulační model

Pro zpracování studie byl od objednatele získán 1D simulační model stokové sítě hl. města Prahy uložený v databázi **SS\_povodi\_AB\_140930.mdb**. Model pokrývá v detailu oblast centra Prahy v oblasti Karlín, Holešovice a Žižkov. Nicméně s ohledem na celkovou vazbu modelu je v modelu připojena i páteří síť celého města spolu s velkými povodími (čtvercové oblasti) tak, jak byly převzaty ještě z originálního modelu GOHMP z roku 2001. Tento fakt částečně komplikuje použití modelu pro zájmovou oblast, neboť model má velký rozsah, a to se odráží na jeho potenciální nestabilitě a době výpočtu jednotlivých simulací. Celková plocha povodí je tedy významně větší než zájmová oblast Karlín-Žižkov a pokrývá nejen střed města včetně zájmové oblasti Karlína (červeně vyznačeno), ale i významnou část celé aglomerace hl. m. Prahy.



Obr. 48 Zájmová oblast Karlín-Žižkov (červeně vyznačeno)

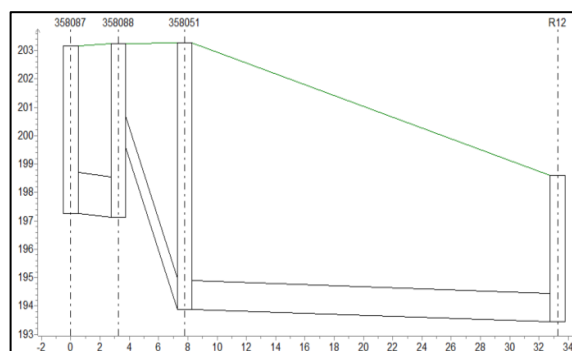
Tento simulační model byl dále upraven v souladu s výše uvedenou metodikou pro potřeby simulací extrémních přívalových dešťů. Jednalo se hlavně o přidání povodí propustných ploch a dále o zvýšení hodnoty redukčního faktoru na úroveň  $RF=0,8$ . Srážková data byla vytvořena na základě metodiky ze stanovených blokových dešťů a zvoleného tvaru deště dle Šifaldy.

#### 4.2.2 Úpravy modelu pro simulaci extrémních srážek

Původní model stokové sítě pro simulaci extrémních srážek bylo nutné upravit tak, aby byl model stabilní i při simulaci extrémní srážky (stoletého deště) a dále, aby dokázal odvádět vodu i ze zelených ploch po nasycení povodí. K tomu bylo zapotřebí jednotlivá povodí doplnit o nové propustné (případně polopropustné) plochy.

Napojení nových zelených ploch bylo provedeno kopií původní vrstvy povodí v modelu, kde plocha nových povodí zůstala stejná (fyzicky vznikla dvě totožná, na sebe položená povodí). Odtoková (v modelu nepropustná) plocha nových povodí je pak doplňkem nepropustné plochy povodí původního. Nová povodí byla napojena na nejbližší šachtu a dále byly vytvořeny nové hydrologické parametry, kde je nastavena počáteční ztráta  $IL=16$  mm a redukční faktor  $RF=1$ . U původních povodí zůstávají parametry stejné jako při kalibraci na návrhové srážky, jedinou změnou je hodnota redukčního faktoru, která byla při kalibraci modelu na extrémní událost ze dne 21.7.2014 nastavena na hodnotu  $RF=0,8$ .

Model byl dále ustálen na simulaci 100letého deště. Za tím účelem bylo odstraněno potrubí o délce 1-2 metry v oblasti pod OK 20A. Dále byla provedena úprava shybky (změna šachet na typ „sealed“). Také bylo upraveno spadiště (chybné zadání  $UpLevel$  a  $DwLevel$ ). Po těchto úpravách byl model stabilizován pro výpočet extrémního deště na hodnotách výpočetního kroku 4-8 vteřin a připraven pro testování extrémních srážkových situací.



Obr. 49 Úprava chybně zadaného spadiště

#### 4.2.3 Testování modelu stávající stav

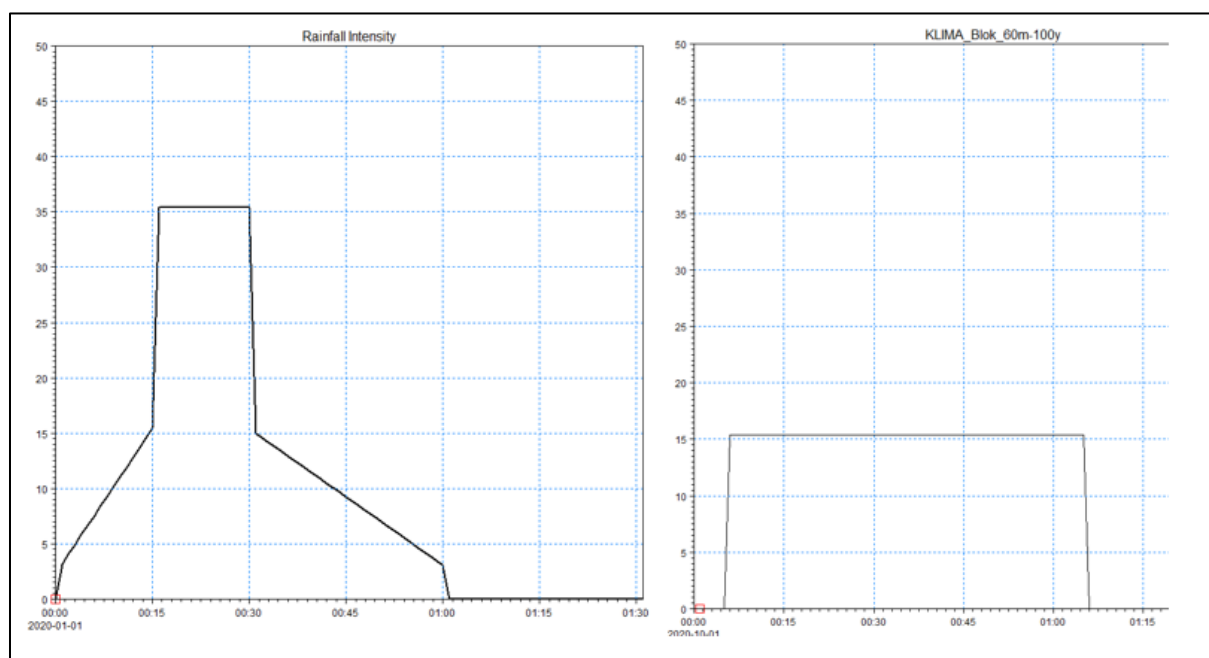
Na upraveném 1D simulačním modelu byly provedeny výpočty extrémních srážek podle tabulky extrémních intenzit dle kapitoly 3.1. Velikosti srážkových intenzit byly dále zredukovány pomocí prostorové redukce  $ARF=0,8$  (Tab. 24).

Tab. 24 Průměrné hodnoty čáry náhradních intenzit zredukované  $ARF 0,8$

Průměrné náhradní intenzity s $ARF 0.8$ [l/s/ha]						
$T$ [min]	N02	N05	N10	N20	N50	N100
10	171	238	285	331	394	444
15	135	189	226	263	314	354
20	113	158	189	220	262	296
25	96	134	161	188	224	253
30	83	117	140	163	194	219
35	74	103	124	144	172	194
40	66	93	111	130	154	174
45	60	84	101	118	140	158

50	55	77	92	107	128	144
55	51	71	85	99	118	133
60	47	66	79	92	110	123
70	42	58	70	81	96	108
80	38	52	62	72	86	96
90	34	46	56	65	78	87
100	31	42	51	59	70	79
120	26	37	44	51	60	68
180	19	26	31	36	43	48
240	15	21	24	28	34	38
360	10	14	17	20	23	26
720	6	8	10	11	13	14
1440	3	5	6	6	7	8

Tyto náhradní intenzity byly zpracovány do podoby syntetických blokových dešťů a také do podoby syntetických Šifaldových dešťů. Na modelu upraveném pro extrémní srážky bylo testováno zatížení sítě pro jednotlivé srážky o dané periodicitě a dané době trvání. Pro stávající stav (rok 2020) byly vytvořeny časové řady syntetických dešťů (blokové a Šifaldovy deště) pro doby opakování N02, N05, N10, N20, N50 a N100. Pro tyto doby opakování byly vytvořeny časové řady dešťů o vybrané délce trvání. Jako nejvýznamnější délky trvání pro další vyhodnocení byly použity doby trvání deště 15 min, 30 min, 60 min, 90 min a 120 min.



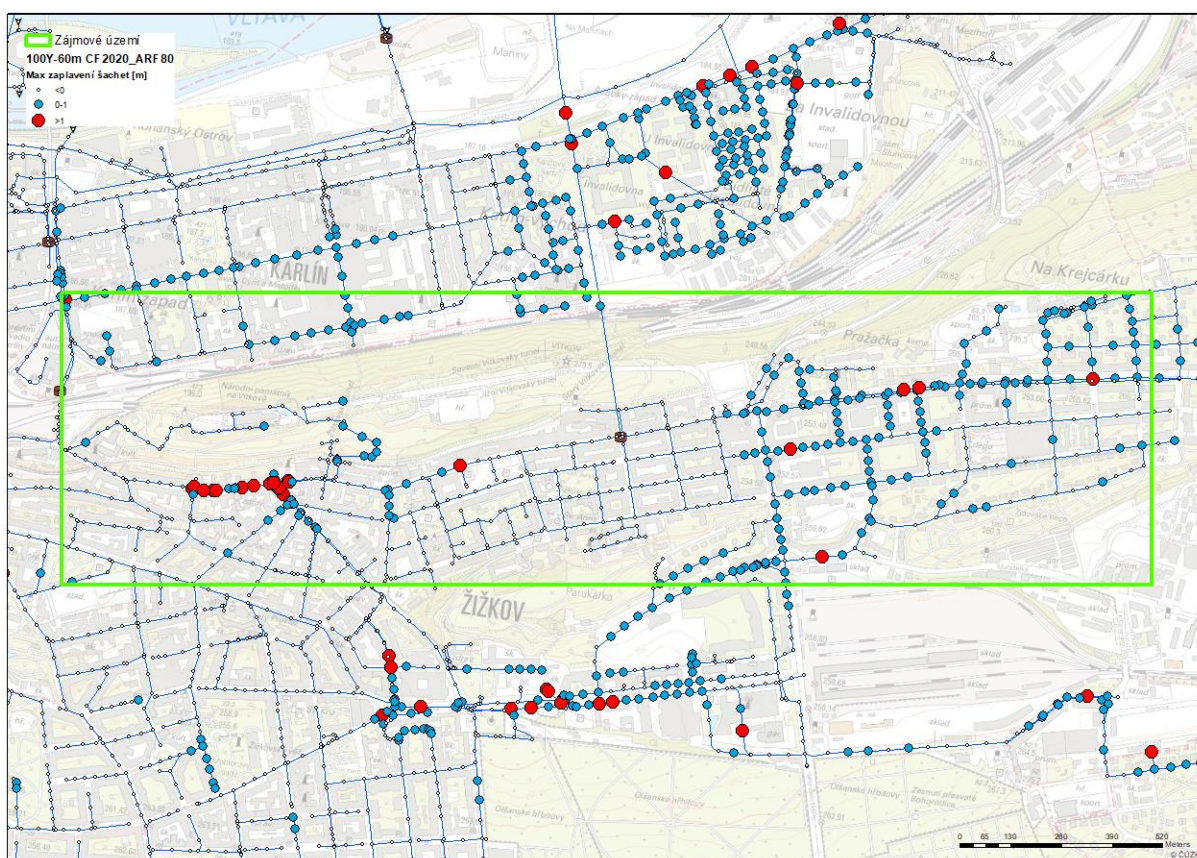
Obr. 50 Časové rozložení intenzity syntetických dešťů „BLOK“ vs. „ŠIFALDA“

#### 4.2.3.1 Blokové deště

Pro zvolené dešťové intenzity byl proveden výpočet srážkového odtoku a transportu dešťové vody stokovou sítí na 1D simulačním modelu kanalizace. Výsledky těchto výpočtů jsou zpracovány pro blokové deště do tabulky (Tab. 25)

Tabulka prezentuje výsledky simulací z hlediska kapacitního přetížení způsobeného blokovým deštěm. Pro každou dešťovou událost je dokumentován počet šachet, u kterých došlo k vývěru odpadních dešťových vod na povrch terénu a dále procento takto přetížených šachet v rámci celého modelu. (Mezi definované simulace byl přidán i dvouletý patnáctiminutový dešť, který je významný z hlediska návrhových dešťů.)

Následující obrázek (Obr. 51) dokumentuje způsob analýzy výsledků 1D simulačního modelu pro 100letý blokový dešť o trvání 60 minut.



Obr. 51 Vizualizace zatížení sítě při 60minutové stoleté blokové extrémní srážce s ARF 0.8 v zájmové oblasti

#### 4.2.3.2 Šifaldovy deště

Dále byl pro zvolené dešťové intenzity ve tvaru dle Šifaldy proveden výpočet srážkového odtoku a transportu dešťové vody stokovou sítí na 1D simulačním modelu kanalizace. Výsledky těchto výpočtů jsou zpracovány pro blokové deště do tabulky (Tab. 25)

Pro každou dešťovou událost je dokumentován počet šachet, u kterých došlo k vývěru odpadních dešťových vod na povrch terénu a dále procento takto přetížených šachet v rámci

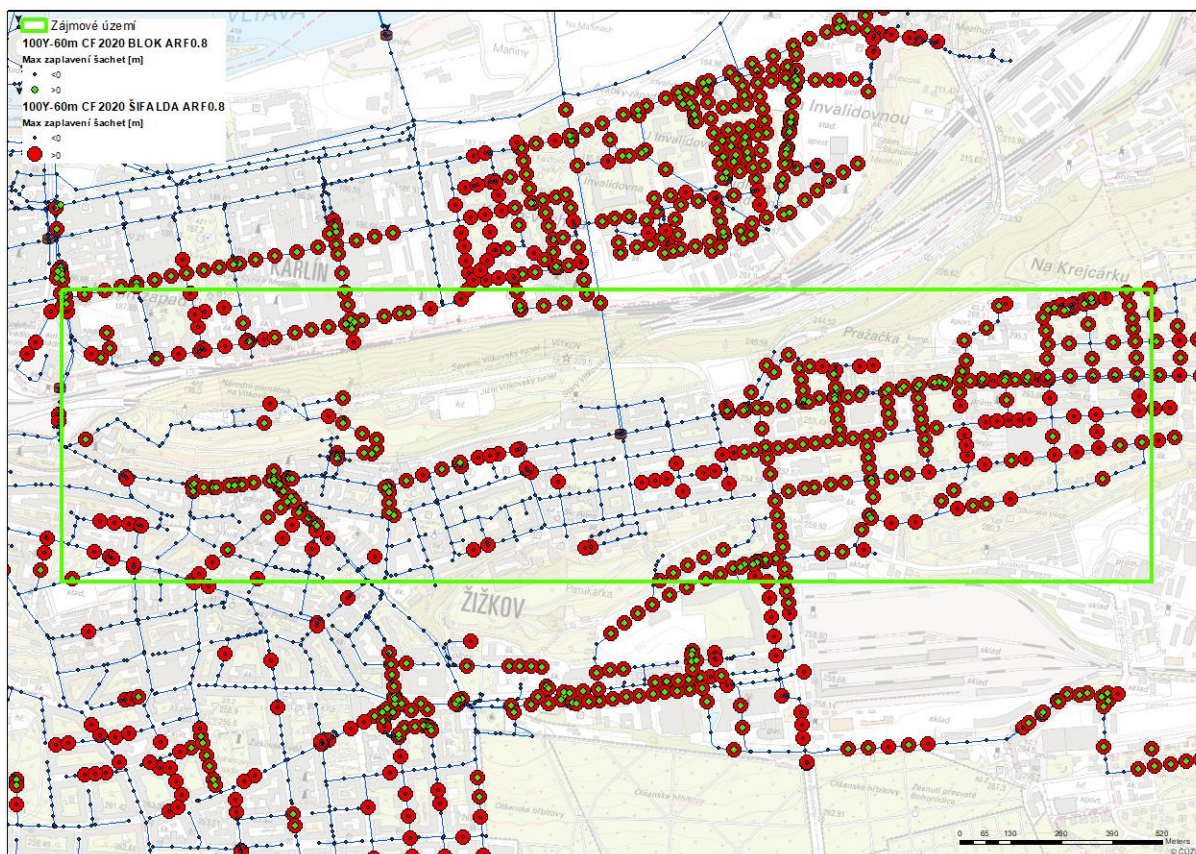


celého modelu. (Mezi definované simulace byl přidán i dvouletý patnáctiminutový dešť, který je významný z hlediska návrhových dešťů.)

Tab. 25 Zatížení sítě (počet šachet s vývěrem vody na povrch) při blokovém a Šifaldově dešti za stávajícího stavu

		BLOKOVÝ DEŠŤ		DEŠŤ TYPU ŠIFALDA	
	Trvání zatěžujícího deště	Stávající stav - CF 2020 s ARF 0.8		Stávající stav - CF 2020 s ARF 0.8	
		počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet	počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet
<b>N02</b>	15 min	67	0,78	97	1,13
<b>N10</b>	15 min	662	7,70	814	9,47
	30 min	858	9,98	1038	12,07
	60 min	471	5,48	764	8,88
	90 min	230	2,67	617	7,18
	120 min	139	1,62	474	5,51
<b>N20</b>	15 min	1175	13,66	1381	16,06
	30 min	1430	16,63	1776	20,65
	60 min	730	8,49	1309	15,22
	90 min	371	4,31	1045	12,15
	120 min	217	2,52	822	9,56
<b>N50</b>	15 min	2026	23,56	2231	25,94
	30 min	1969	22,90	2471	28,74
	60 min	1138	13,23	2033	23,64
	90 min	595	6,92	1690	19,65
	120 min	352	4,09	1332	15,49
<b>N100</b>	15 min	2513	29,22	2758	32,07
	30 min	2305	26,81	2946	34,26
	60 min	1413	16,43	2415	28,08
	90 min	817	9,50	2038	23,70
	120 min	475	5,52	1653	19,22

Následující obrázek dokumentuje způsob analýzy výsledků 1D simulačního modelu pro 100letý dešť ve tvaru bloku a dle Šifaldy o délce trvání 60 minut.



Obr. 52 Vizualizace zatížení sítě při 60minutové stoleté blokové (zelené body výše) a Šifaldově (červené body níže) extrémní srážce v zájmové oblasti

#### 4.2.3.3 Porovnání a dílčí závěry

Z provedených simulací jsou patrné následující závěry.

- a. U všech provedených analýz je přetížení sítě (podle počtu vývěrů vod ze šachet) vyšší u deště ve tvaru Šifalda než u blokového deště.
- b. U obou typů zatěžovacích dešťů je významnější zatížení dešti kratších dob trvání, a to pro všechny analyzované doby opakování. Je zde zřetelný trend nárůstu zatížení sítě se zkracující se dobou trvání deště.
- c. ...

## 4.2.4 Testování modelu výhledový stav

Výhledovým stavem pro testování vlivu změny klimatu je chápán dle kapitoly 3.3. časový horizont budoucího vývoje společnosti (podle zvoleného RCP), pro který byly zpracovány hodnoty klimatického faktoru (CF). V této studii byly analyzovány časové hladiny k roku 2050, 2080 a 2100.

Pro výhledový stav byly zpracovány velikosti náhradních intenzit deště na základě čáry náhradních intenzit pro stávající stav 2020 a spočteného klimatického faktoru z kapitoly 3.3. pro výhledové roky 2050, 2080 a 2100 (viz. Tab. 26, Tab. 27, Tab. 28).

Tab. 26 Průměrná náhradní intenzita pro výhledový rok 2050 vč. započítaného klimatického faktoru pro daný rok

Průměrná náhradní intenzita s ARF 0.8 [l/s/ha] pro rok 2050						
T [min]	N02	N05	N10	N20	N50	N100
10	193	277	333	388	465	524
15	150	213	258	303	365	410
20	124	177	213	251	302	340
25	105	151	182	212	255	291
30	91	130	157	184	222	250
35	80	115	139	163	194	221
40	72	103	125	145	174	198
45	65	93	112	132	158	178
50	60	84	102	120	143	163
55	55	78	94	111	133	150
60	51	72	88	102	123	138
70	45	63	77	90	107	121
80	40	57	68	80	95	108
90	36	51	62	72	86	97
100	33	46	56	66	78	88
120	28	40	48	57	67	76
180	21	29	34	40	48	54
240	16	23	26	31	37	42
360	11	15	18	22	25	29
720	7	9	10	12	14	16
1440	3	5	6	7	8	9

Tab. 27 Průměrná náhradní intenzita pro výhledový rok 2080 vč. započítaného klimatického faktoru pro daný rok

Průměrná náhradní intenzita s ARF 0.8 [l/s/ha] pro rok 2080						
T [min]	N02	N05	N10	N20	N50	N100
10	212	305	370	434	521	591
15	162	234	285	334	406	460
20	132	192	234	275	333	376
25	111	163	198	233	282	319
30	97	140	171	202	243	276
35	85	124	151	177	213	242
40	76	110	135	158	191	215
45	69	100	122	143	172	195

50	63	91	110	130	156	177
55	58	84	101	120	144	162
60	53	77	94	110	133	150
70	47	67	82	96	115	131
80	42	60	73	86	103	116
90	38	54	66	77	93	105
100	35	49	60	70	84	95
120	30	43	52	61	72	82
180	22	31	37	43	52	58
240	17	24	28	33	40	45
360	11	16	19	23	27	31
720	7	9	11	13	15	16
1440	4	5	6	7	8	9

Tab. 28 Průměrná náhradní intenzita pro výhledový rok 2100 vč. započítaného klimatického faktoru pro daný rok

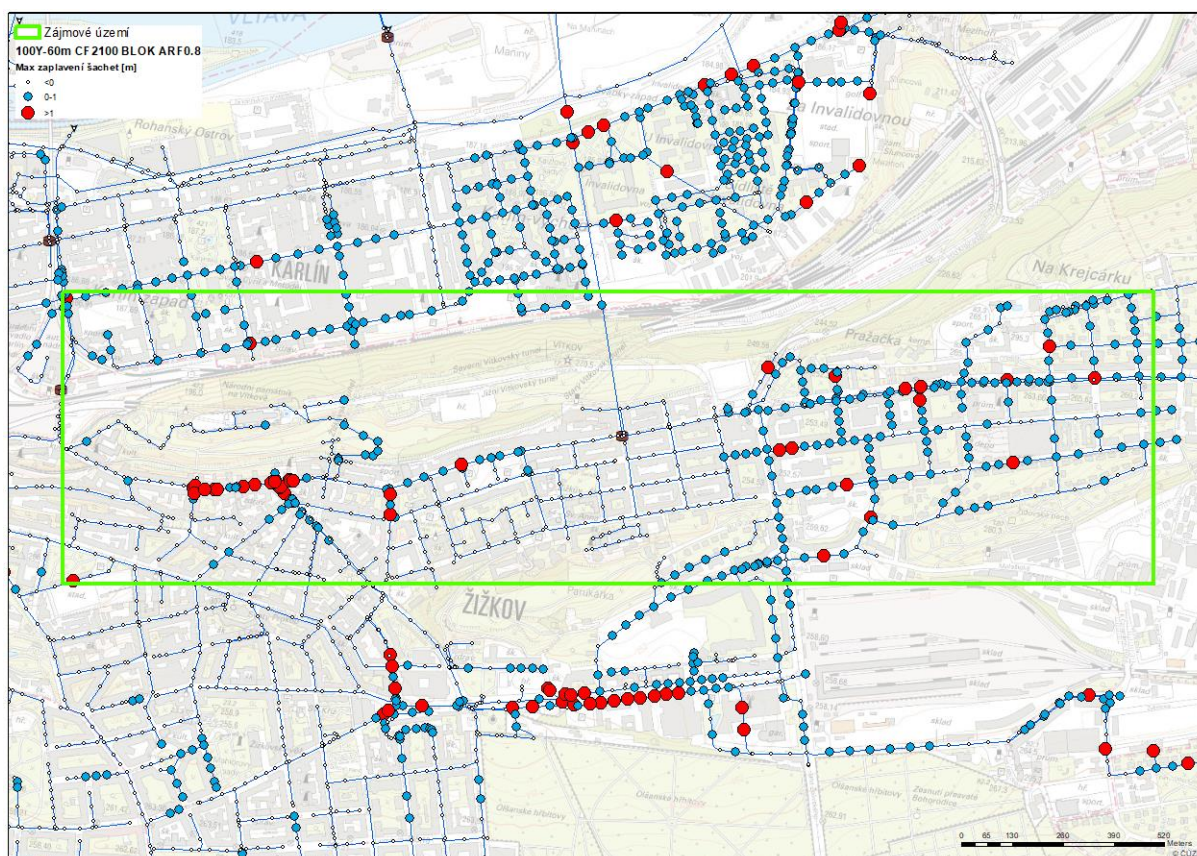
Průměrná náhradní intenzita s ARF 0.8 [l/s/ha] pro rok 2100						
T [min]	N02	N05	N10	N20	N50	N100
10	223	324	393	464	560	635
15	169	247	303	355	431	488
20	138	202	247	293	354	403
25	116	171	207	246	298	339
30	100	147	181	214	257	292
35	88	130	159	187	225	256
40	79	116	141	167	202	229
45	71	104	127	151	182	206
50	65	94	116	136	165	187
55	60	88	106	125	152	171
60	55	80	98	116	139	158
70	49	70	86	101	121	137
80	44	63	76	89	108	121
90	39	56	69	80	97	110
100	36	51	63	73	88	100
120	31	45	54	63	76	86
180	22	32	38	45	54	61
240	17	25	29	34	42	47
360	12	17	20	24	28	32
720	7	9	11	13	15	17
1440	4	5	6	7	8	9

Tyto průměrné náhradní intenzity byly následně zpracovány do podoby syntetických dešťů (blokový dešť a dešť dle Šifaldy) a na 1D simulačním modelu bylo následně testováno zatížení sítě pro jednotlivé srážky o dané periodicitě a dané době trvání obdobně jako je prezentováno v předchozí kapitole stávajícího stavu. Srážkové intenzity jsou i pro výhledový stav redukovány pomocí součinitele plošné redukce ARF=0,8.

#### 4.2.4.1 Blokové deště

Pro desetiletý, dvacetiletý, padesátiletý a stoletý dešť bylo vyhodnoceno procentuální zatížení sítě pro dané srážkové události s různou dobou trvání (15 min, 30 min, 60 min, 90 min, 120 min) pro výhledový stav. Výhledový stav je označen jako CF 2100, v němž je zahrnut klimatický faktor pro daný rok. Výsledky simulací jsou zpracovány v následující tabulce (Tab. 29).

Následující obrázek (Obr. 53) dokumentuje způsob analýzy výsledků 1D simulačního modelu pro 100letý blokový dešť s vlivem klimatické změny o trvání 60 minut.



Obr. 53 Vizualizace zatížení sítě při 60minutové stoleté blokové extrémní srážce s ARF 0.8 v zájmové oblasti ve výhledovém stavu 2100

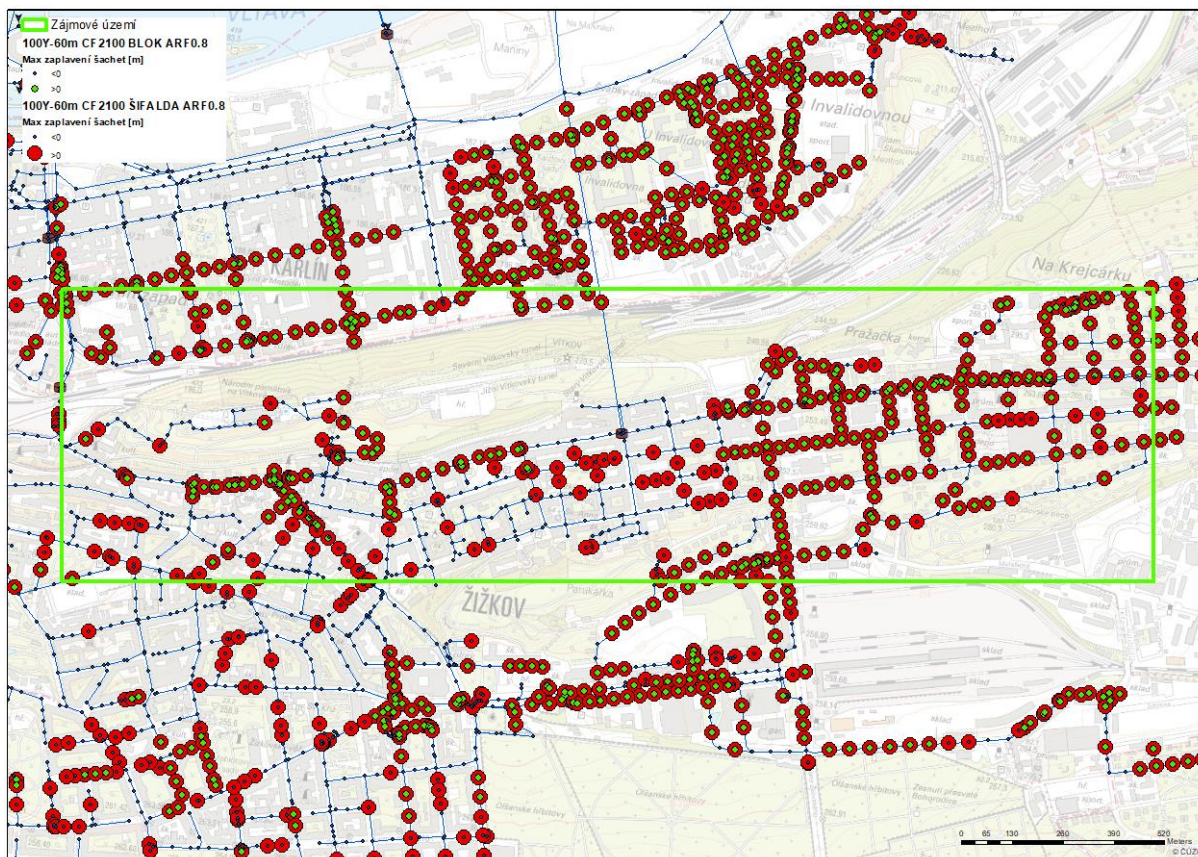
#### 4.2.4.2 Šifaldovy deště

Pro N-leté Šifaldovy deště (pro dvouletý, desetiletý, dvacetiletý, padesátiletý a stoletý dešť) byla zpracována tabulka s procentuálním vyhodnocením zatížení sítě pro tyto srážkové události s různou dobou trvání pro výhledový stav (označeno jako CF 2100, kde je zahrnut klimatický faktor pro daný rok).

Tab. 29 Zatížení sítě (počet šachet s vývěrem vody na povrch) při blokovém a Šifaldově dešti za výhledového stavu 2100

		BLOKOVÝ DĚŠŤ		DĚŠŤ TYPU ŠIFALDA	
	Trvání zatěžujícího deště	Výhledový stav - CF 2100 s ARF 0.8		Výhledový stav - CF 2100 s ARF 0.8	
		počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet	počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet
<b>N02</b>	15 min	158	1,84	237	2,76
<b>N10</b>	15 min	1871	21,76	2090	24,31
	30 min	1748	20,33	2181	25,36
	60 min	895	10,41	1607	18,69
	90 min	439	5,11	1275	14,83
	120 min	253	2,94	1024	11,91
<b>N20</b>	15 min	2540	29,54	2771	32,22
	30 min	2226	25,89	2844	33,07
	60 min	1263	14,69	2223	25,85
	90 min	641	7,45	1777	20,67
	120 min	402	4,67	1458	16,96
<b>N50</b>	15 min	3233	37,60	3552	41,31
	30 min	2718	31,61	3523	40,97
	60 min	1691	19,67	2839	33,02
	90 min	1071	12,45	2327	27,06
	120 min	622	7,23	1951	22,69
<b>N100</b>	15 min	3643	42,37	3972	46,19
	30 min	3070	35,70	3940	45,82
	60 min	1991	23,15	3202	37,24
	90 min	1305	15,18	2660	30,93
	120 min	887	10,32	2292	26,65

Následující obrázek (Obr. 54) dokumentuje způsob analýzy výsledků 1D simulačního modelu pro 100letý déšť s vlivem klimatické změny ve tvaru bloku a dle Šifaldy o trvání 60 minut.



Obr. 54 Vizualizace zatížení sítě při 60minutové stoleté blokové (zelené body výše) a Šifaldově (červené body níže) extrémní srážce v zájmové oblasti při výhledovém stavu 2100

#### 4.2.4.3 Srovnání a dílčí závěry

Z provedených simulací jsou patrné následující závěry.

- Vliv klimatické změny v podobě faktoru CF se významně podílí na růstu jak hodnot intenzit přívalových dešťů, tak i hodnot celkového přetížení stokové sítě. Nárůst intenzit dešťů pro rok 2050 je zhruba 10-15 %, pro rok 2080 zhruba 20-30 % a pro rok 2100 okolo 30-40 %.
- Předpokládaná kapacita stokové sítě v Praze je odhadována přibližně na velikost 10letého deště. Při zahrnutí vlivu změny klimatu je velikost 10letého deště zvětšena o cca. 12 % pro rok 2050, cca. 20 % pro rok 2080 a okolo 30 % pro rok 2100. Z toho plyne, že lze očekávat nárůst kapacitních přetížení sítě nejméně o 10, 20 a 30 % pro dané časové horizonty.
- Rozdíl zatížení se liší podle délky trvání a doby opakování extrémního deště (viz. bod d.). Stejně jako u stávajícího stavu dochází k větším vývěrům z šachet při zatížení syntetickým Šifaldovým deštěm oproti blokovému a také stále platí pravidlo zvyšujícího se zatížení na základě kratší doby trvání deště (15-30 min) a delší periodicitě srážky.
- Při srovnání tabulek zatížení sítě stávajícího a výhledového stavu je zřejmé, že po zahrnutí klimatického faktoru ve výhledovém stavu je síť zatížena víc. Velikost tohoto nárůstu zatížení není lineární a také přímo nekoresponduje s hodnotami nárůstu intenzit deště.

- e. Tabulka na obrázku Tab. 30 a Tab. 31 pro blokový déšť a déšť podle Šifaldy dokumentuje vliv klimatické změny na přetížení stokové sítě při porovnání stávajícího stavu a časového horizontu k roku 2100. Porovnáním hodnot simulací stávajícího a výhledového stavu lze odhadnout, že přetížení stokové sítě bude zvýšeno pro časový horizont k roku 2100 a 10letý desetiletý déšť o cca. 55 %, pro 20letý déšť o cca. 40 %, pro 50letý déšť o cca. 30 % a pro 100letý déšť o přibližně 25 %.
- f. Zajímavé je také porovnání vlivu klimatické změny na hodnotu návrhového deště N02 o trvání 15 minut. Zde dochází pro časový horizont k roku 2100 o zvýšení hodnoty cca. 150 %.

Tab. 30 Porovnání procentuálního přetížení šachet při blokovém a Šifaldově dešti za stávajícího a výhledového stavu

ARF 0.8		BLOKOVÝ DÉŠŤ		DÉŠŤ TYPU ŠIFALDA	
	Trvání zatěžujícího deště	CF 2020	CF 2100	CF 2020	CF 2100
		% přetížených šachet	% přetížených šachet	% přetížených šachet	% přetížených šachet
<b>N02</b>	15 min	0,78	1,84	1,13	2,76
<b>N10</b>	15 min	7,70	21,76	9,47	24,31
	30 min	9,98	20,33	12,07	25,36
	60 min	5,48	10,41	8,88	18,69
	90 min	2,67	5,11	7,18	14,83
	120 min	1,62	2,94	5,51	11,91
<b>N20</b>	15 min	13,66	29,54	16,06	32,22
	30 min	16,63	25,89	20,65	33,07
	60 min	8,49	14,69	15,22	25,85
	90 min	4,31	7,45	12,15	20,67
	120 min	2,52	4,67	9,56	16,96
<b>N50</b>	15 min	23,56	37,60	25,94	41,31
	30 min	22,90	31,61	28,74	40,97
	60 min	13,23	19,67	23,64	33,02
	90 min	6,92	12,45	19,65	27,06
	120 min	4,09	7,23	15,49	22,69
<b>N100</b>	15 min	29,22	42,37	32,07	46,19
	30 min	26,81	35,70	34,26	45,82
	60 min	16,43	23,15	28,08	37,24
	90 min	9,50	15,18	23,70	30,93
	120 min	5,52	10,32	19,22	26,65



Tab. 31 Zatížení sítě blokovým deštěm za stávajícího vs. Výhledového stavu

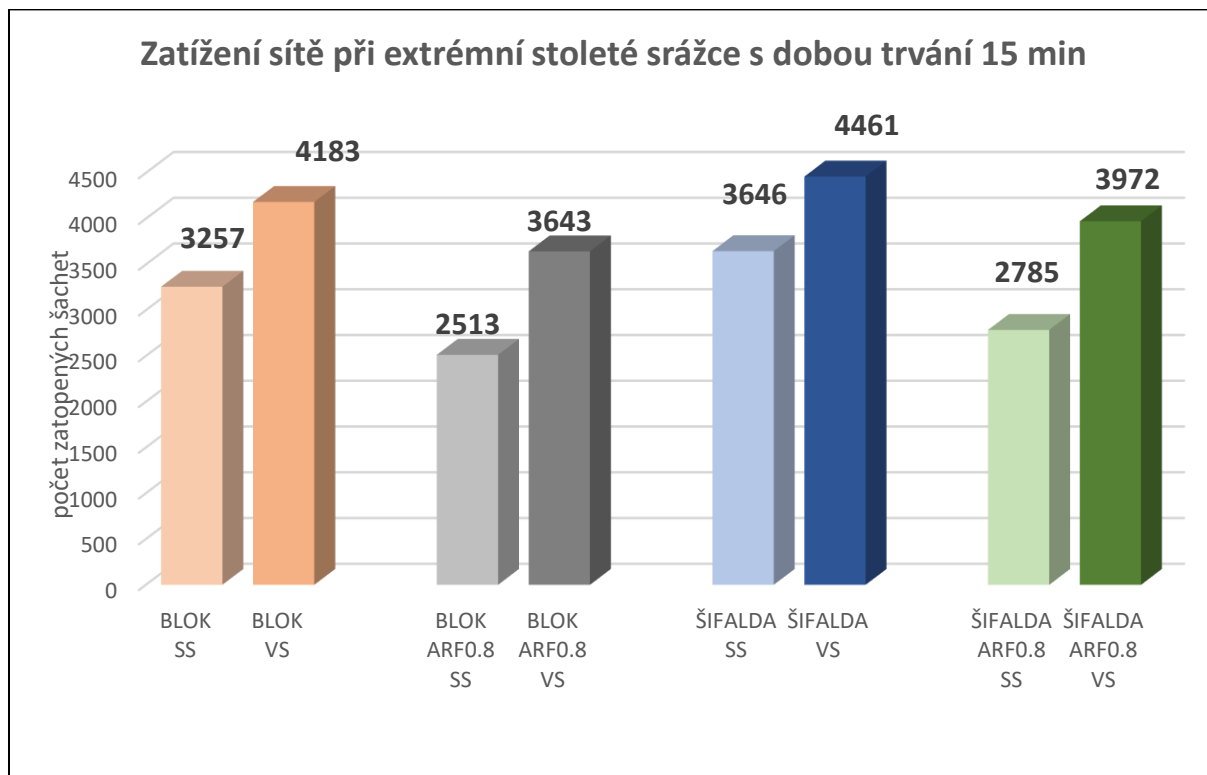
ARF 0,8		BLOKOVÝ DEŠŤ			
	Trvání zatěžujícího deště	Stávající stav 2020		Výhledový stav 2100	
		počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet	počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet
<b>N02</b>	15 min	67	0,78	158	1,84
<b>N10</b>	15 min	662	7,70	1871	21,76
	30 min	858	9,98	1748	20,33
	60 min	471	5,48	895	10,41
	90 min	230	2,67	439	5,11
	120 min	139	1,62	253	2,94
<b>N20</b>	15 min	1175	13,66	2540	29,54
	30 min	1430	16,63	2226	25,89
	60 min	730	8,49	1263	14,69
	90 min	371	4,31	641	7,45
	120 min	217	2,52	402	4,67
<b>N50</b>	15 min	2026	23,56	3233	37,60
	30 min	1969	22,90	2718	31,61
	60 min	1138	13,23	1691	19,67
	90 min	595	6,92	1071	12,45
	120 min	352	4,09	622	7,23
<b>N100</b>	15 min	2513	29,22	3643	42,37
	30 min	2305	26,81	3070	35,70
	60 min	1413	16,43	1991	23,15
	90 min	817	9,50	1305	15,18
	120 min	475	5,52	887	10,32

Tab. 32 Zatížení sítě Šifaldovým deštěm za stávajícího vs. Výhledového stavu

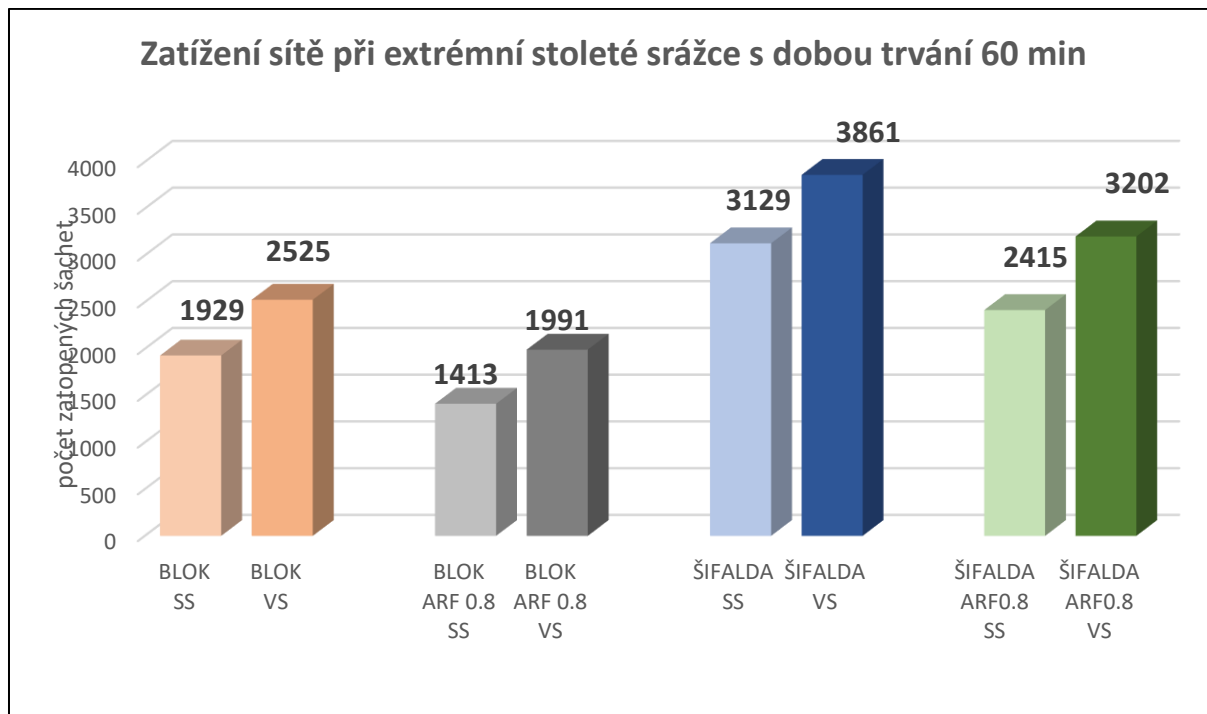
ARF 0,8		DEŠŤ TYPU ŠIFALDA			
	Trvání zatěžujícího deště	Stávající stav 2020		Výhledový stav 2100	
		počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet	počet šachet s vývěrem na povrch	% přetížených šachet
<b>N02</b>	15 min	97	1,13	237	2,76
<b>N10</b>	15 min	814	9,47	2090	24,31
	30 min	1038	12,07	2181	25,36

	60 min	764	8,88	1607	18,69
	90 min	617	7,18	1275	14,83
	120 min	474	5,51	1024	11,91
<b>N20</b>	15 min	1381	16,06	2771	32,22
	30 min	1776	20,65	2844	33,07
	60 min	1309	15,22	2223	25,85
	90 min	1045	12,15	1777	20,67
	120 min	822	9,56	1458	16,96
<b>N50</b>	15 min	2231	25,94	3552	41,31
	30 min	2471	28,74	3523	40,97
	60 min	2033	23,64	2839	33,02
	90 min	1690	19,65	2327	27,06
	120 min	1332	15,49	1951	22,69
<b>N100</b>	15 min	2758	32,07	3972	46,19
	30 min	2946	34,26	3940	45,82
	60 min	2415	28,08	3202	37,24
	90 min	2038	23,70	2660	30,93
	120 min	1653	19,22	2292	26,65

V následujících grafech Obr. 55 a Obr. 56 je prezentováno zatížení stokové sítě zvlášť pro stoletý déšť o době trvání 15 min a 60 min.



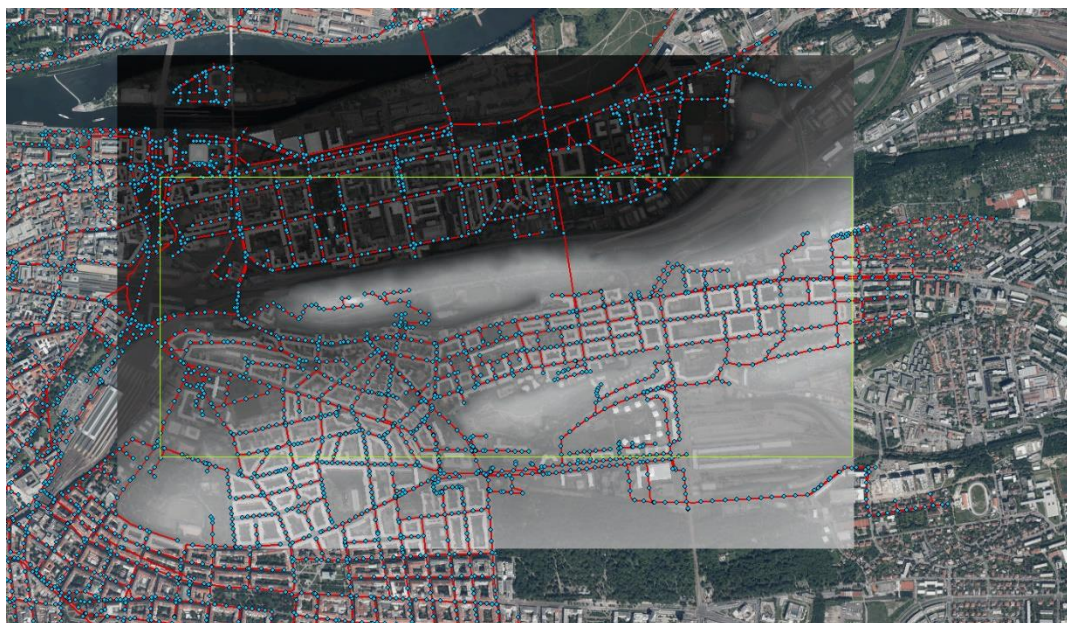
Obr. 55 Grafické znázornění zatížení sítě při extrémní srážce N100-15 min



Obr. 56 Grafické znázornění zatížení sítě při extrémní srážce N100-60 min

#### 4.3 Analýza funkce stokové sítě na spojeném 1D a 2D modelu

Součástí prací řešení vlivu změny klimatu na městské odvodnění je také testování extrémních přívalových srážek na spojeném 1D a 2D simulačním modelu. Tento spojený model byl vytvořen s využitím 1D simulačního modelu upraveného pro simulace extrémních srážek a 2D simulačního modelu ve zvolené testovací oblasti Karlína (viz. Obr. 57.- zelený obdélník).



Obr. 57 Stoková síť hl. města na černobílém podkladu DEM pro propojení 1D na 2D model

Propojení obou simulačních modelů bylo provedeno v místech šachet tak, aby výsledný spojený model dobře reprezentoval oblasti vývěru srážkových vod a jejich dalšího pohybu po povodí Karlína (Obr. 58).

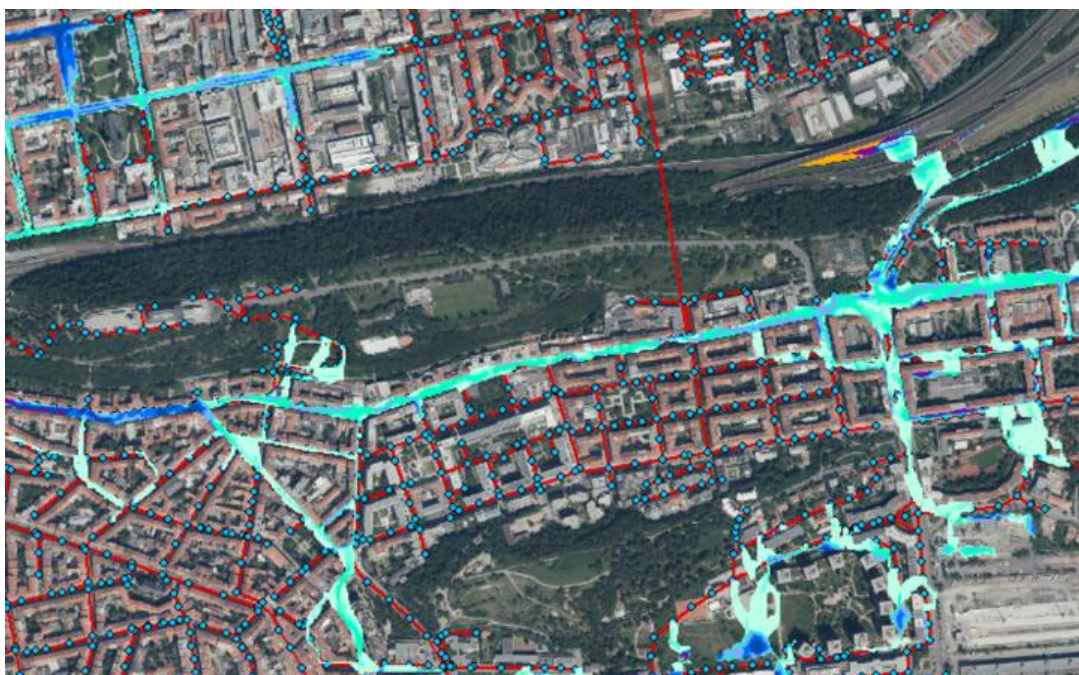


Obr. 58 Světlemodře vyznačené šachty sloužící pro propojení stokové sítě a povrchu terénu

Spojený 1D a 2D simulační model byl zatížen extrémní srážkovou intenzitou 100letého 60minutového deště pro současný i výhledový stav k roku 2100. Výsledky těchto prací jsou zpracovány v následujících kapitolách.

#### 4.3.1 Analýza stávajícího stavu

Simulace stávajícího stavu byla provedena pro blokový dešť a dešť typu Šifalda o opakování 100 let a době trvání 60 minut. Pro simulaci byl použit faktor plošné redukce ARF=0,8. Simulace spojeného 1D a 2D modelu byla provedena v oblasti ulic Koněvova, Husitská, Prokopova v okolí památníku na Vítězství. Výsledek simulace pro blokový dešť je prezentován na následujícím obrázku.



Obr. 59 Záplava po simulaci blokovým deštěm N100-60 min s ARF 0.8

Výsledky simulace dokumentují výron vody na mnoha místech zájmové oblasti a transformaci ulice Koněvova a později i Husitská do podoby dešťového koridoru, kterým dešťová voda odtéká do níže položených míst oblasti. Jedná se hlavně o oblast Karlína, která je s ohledem na rovinatou morfolonii ideálním místem pro rozliv dešťových vod z přívalových srážek. Výsledek simulace pro dešť tvaru dle Šifaldy je představen na následujícím obrázku. Obdobně jako u blokového deště i v tomto případě dochází k zatopení klíčových komunikací v oblasti.



Obr. 60 Záplava po simulaci Šifaldovým deštěm N100-60 min s ARF 0.8

Porovnání obou situací lokální zátopy je zpracováno na následujícím obrázku. Modrou barvou je zobrazena zátopa (maximální rozliv vody) pro blokový dešť a červenou barvou pro dešť dle Šifaldy. (Jedná se o dvě vrstvy dat přičemž vrstva zátopy dle Šifaldy je níže - z důvodu většího rozsahu, než vrstva zátopy dle blokového deště.)

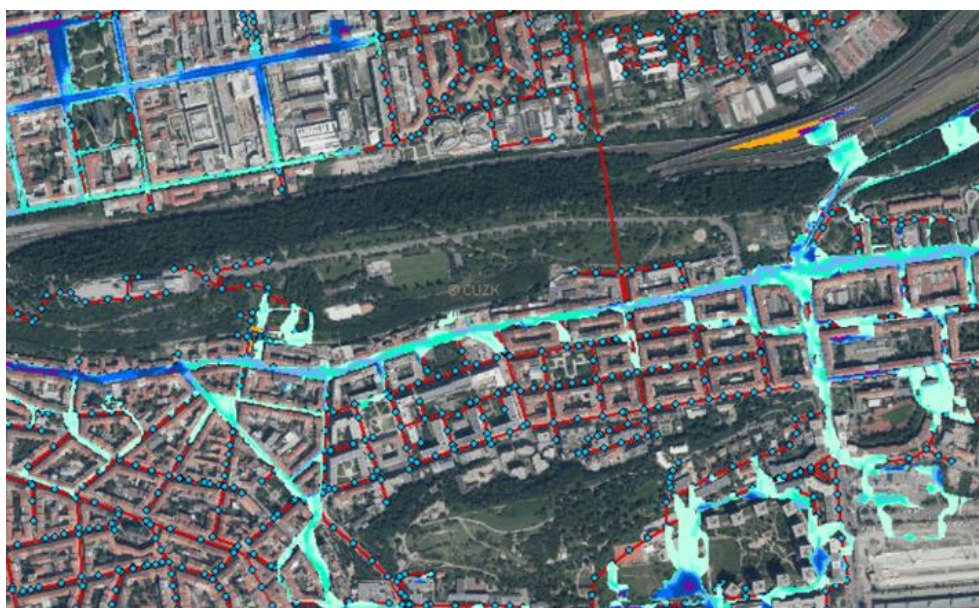


Obr. 61 Rozliv po simulaci Šifaldova deště (červená níže) a blokového deště (modrá výše)

Z obrázku je patrné, že vliv změny tvaru deště z blokového na typ Šifalda způsobuje výraznější zátopy v zájmové oblasti a to v souladu s výše uvedenými výsledky pro 1D simulační model.

#### 4.3.2 Analýza výhledového stavu

Simulace výhledového stavu k časovému horizontu pro rok 2100 s vlivem změny klimatu byla stejně jako v případě simulace stávajícího stavu provedena pro blokový déšť a déšť typu Šifalda o opakování 100 let a době trvání 60 minut. Klimatický faktor byl pro zatěžující intenzitu deště nastaven v souladu s výsledky v kapitole 3.3. na hodnotu  $CF=1,28$ . Pro simulaci byl opět použit faktor plošné redukce  $ARF=0,8$ . Výsledek simulace pro blokový déšť je prezentován na následujícím obrázku.



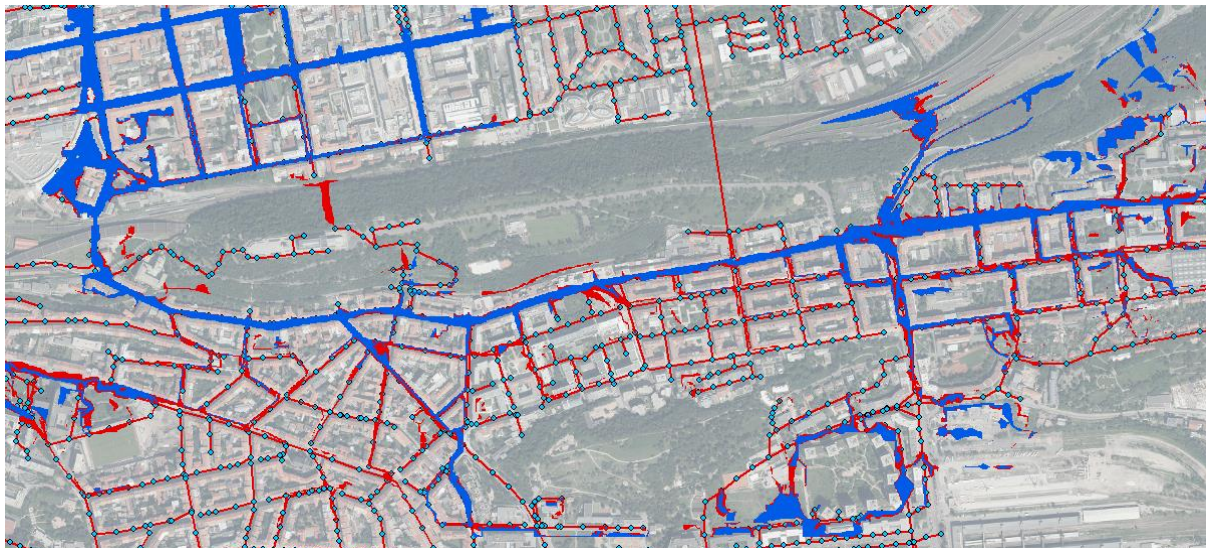
Obr. 62 Záplava po simulaci blokovým deštěm N100-60 min s ARF 0.8 ve výhledovém stavu 2100

Výsledek simulace pro déšť tvaru dle Šifaldy je prezentován na následujícím obrázku.



Obr. 63 Záplava po simulaci Šifaldovým deštěm N100-60 min s ARF 0.8 ve výhledovém stavu 2100

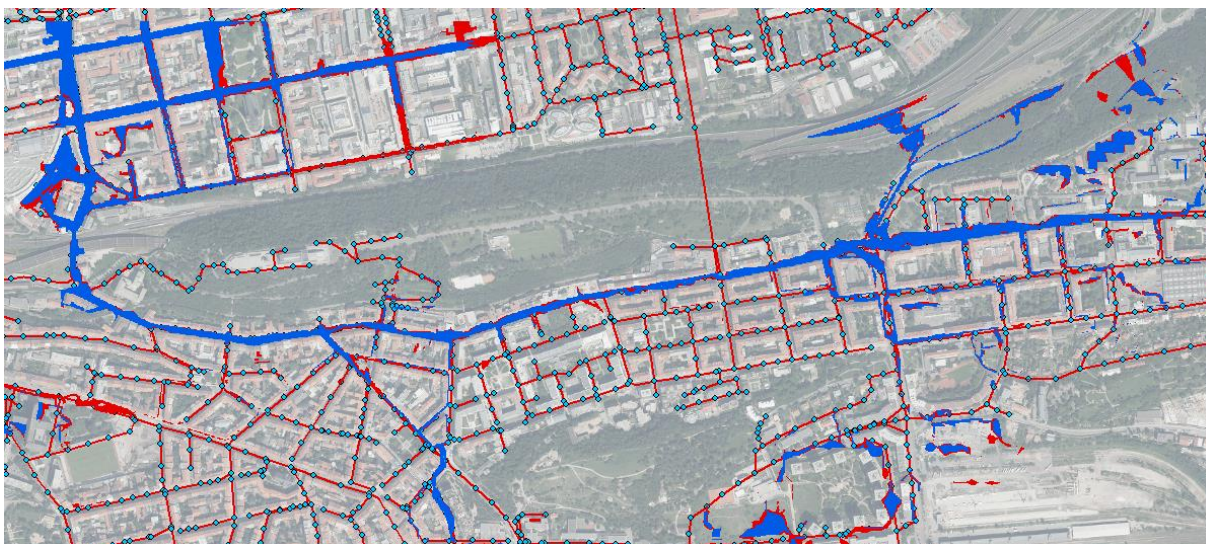
Porovnání obou situací lokální zátopy pro výhledový stav k roku 2100 je zpracováno na následujícím obrázku. Modrou barvou je zobrazena zátopa (maximální rozliv vody) pro blokový déšť a červenou barvou pro déšť dle Šifaldy. (Jedná se o dvě vrstvy dat, přičemž vrstva zátopy dle Šifaldy je níže než vrstva zátopy dle blokového deště).



Obr. 64 Rozliv po simulaci Šifaldova deště (červená níže) a blokového deště (modrá výše) pro výhledový stav 2100

Z obrázku je i zde patrné, že vliv změny tvaru deště z blokového na typ Šifalda způsobuje výraznější zátopu v zájmové oblasti, a to v souladu s výše uvedenými výsledky pro 1D simulační model.

Porovnání rozlivu 100leté dešťové události ve tvaru blokového deště pro stávající a výhledový stav k roku 2100 je zpracováno na následujícím obrázku.



Obr. 65 Rozliv blokového N100 deště stávajícího stavu (modrá výše) a výhledového stavu (červená níže)

Porovnání rozlivu 100leté dešťové události ve tvaru Šifaldova deště pro stávající a výhledový stav k roku 2100 je zpracováno na následujícím obrázku.





Obr. 66 Rozliv Šifaldového N100 deště stávajícího stavu (modrá výše) a výhledového stavu (červená níže)

Při pohledu na uvedené výstupy je vidět, že rozdíly mezi dešti typu blok jsou výraznější než pro typ Šifalda. V obou případech je ale celková zátoka zhruba stejná. To plyne z faktu, že srážková voda nezůstává na povodí stát, ale je gravitačně odváděna směrem k níže položeným místům na povodí.

#### 4.3.3 Dílčí závěry

Zhotovitel aplikoval závěry z kapitoly 3 a metodické postupy z kapitoly 4.1. pro simulace na spojeném 1D a 2D simulačním modelu.

**Lze konstatovat, že spojený 1D a 2D simulační model je schopen počítat a dokumentovat charakteristiky lokálních záplav v důsledku průchodu extrémních přívalových srážek a to jak pro současný stav tak i pro situace budoucí ovlivněné důsledky klimatické změny (viz.kapitola 3).**

## 5 Závěry a doporučení

Zhotovitel předložil objednateli výsledky studie zpracované ve čtyřech tematických kapitolách. Těžiště celé práce je však obsaženo v kapitole 3 a kapitole 4.

Kapitola 3 se zabývá řešením extrémních srážek. V tomto rámci je provedena analýza podkladových srážkových dat a na jejím základě je definován nový soubor dat čáry (tabulky) náhradních intenzit. Dále je v této kapitole provedena analýza vhodného tvaru syntetického deště odvozeného pro srážkové intenzity, je prověřen vliv velikosti zasažené plochy na hodnoty srážkových intenzit a dále je zpracován vliv důsledků klimatické změny na extremicitu hodnot náhradních intenzit dešťů.

Kapitola 4 pak provádí vyhodnocení možnosti využití hodnot N-letých extrémních srážek v podobě blokového a Šifaldova deště na stanovení odtokových poměrů v intravilánu města Prahy. Vyhodnocení vhodnosti těchto dat je prověřeno jak pro jednorozměrný, tak i pro dvourozměrný simulační model.

Naplnění požadovaných cílů studie je provedeno dle požadavků zadání studie. V následujících bodech je provedeno srovnání jednotlivých smluvních požadavků s výsledky prací.

***a. Předmětem této studie bylo vyhodnocení a stanovení souboru N-letých extrémních přívalových zatěžovacích dešťů – dešťových intenzit – pro posudkové metody pomocí simulačních modelů.***

Zhotovitel provedl v kapitole 3.1., 3.2 a 3.3. analýzu srážkových dat ze systému srážkoměrných stanic na oblasti hl. m. Prahy a na základě těchto dat a s použitím metod statistiky a pravděpodobnosti

- ověřil a zpřesnil historickou čáru náhradních intenzit platnou pro současnost,
- stanovil potřebnou hodnotu plošné redukce dešťových intenzit,
- stanovil vhodný tvar syntetického deště na základě analýzy chování srážkové činnosti.

**Lze konstatovat, že zpracování N-letých extrémních přívalových dešťů bylo provedeno.**

***b. Součástí studie má dále být návrh a posouzení vhodnosti využití syntetických dešťů odvozených z blokového deště dané intenzity a N-letosti pro modelování extrémních srážkových událostí.***

Zhotovitel posoudil vhodnost využití syntetických dešťů pro modelování extrémních srážkových událostí na zvoleném pilotním povodí Karlín-Žižkov. Závěry kapitoly 4.1. a 4.2. dokumentují, že zpracované extrémní srážkové události jsou vhodné pro simulace srážkového odtoku, transportu vody v kanalizaci a při řešení lokálních záplav v důsledku vývěru srážkových vod z kanalizace na terén.

**Lze konstatovat, že posouzení vhodnosti využití N-letých extrémních přívalových dešťů pro modelování srážkového odtoku na území hl. m. Prahy bylo provedeno.**

**c. Ve studii mělo být provedeno stanovení vlivu klimatické změny na extremicitu návrhových intenzit různé doby opakování pro zvolené časové horizonty výhledového stavu.**

Zhotovitel provedl v kapitole 3.4. analýzu vhodných regionálních a globálních modelů atmosféry a na základě těchto dat a s použitím metod statistiky a pravděpodobnosti

- provedl analýzu vlivu klimatické změny na extremicitu srážek v podobě klimatického faktoru a
- provedl výpočet čáry náhradních intenzit pro definované časové horizonty 2050, 2080 a 2100.

**Lze konstatovat, že stanovení vlivu klimatické změny na extremicitu srážkové činnosti bylo provedeno.**

**d. Studie by měla s využitím dostupného souboru srážkových dat přinést odpovědi na následující klíčové otázky:**

- i. Jaké srážkové události použít pro zatížení a posouzení odtokových poměrů v urbanizovaném povodí Prahy při extrémních srážkových situacích v závislosti na délce trvání a intenzitě srážky, pro různé doby opakování a s ohledem na ekonomický efekt navržených opatření.**

Zhotovitel studie navrhuje použití dešťových intenzit o opakování N=100 let a době trvání 15, 30 a 60 minut pro stanovení adaptační ochrany intravilánu s klimatickým faktorem daným zvoleným časovým horizontem (zde doporučen časový horizont 2100). Dále je doporučeno použití N=50let pro alternativní adaptační ochrany u finančně náročných investic. Poslední navrženou hodnotou je N20 (obvykle používáno pro ochranu extravilánu). Pro všechny srážkové události je doporučen tvar dle Ing. Šifaldy spolu se součinitelem plošné redukce ARF=0,8. Volba klimatického faktoru je doporučena o velikosti CF=15 % pro časový horizont roku 2050, CF=20 % pro časový horizont roku 2080, CF=30 % pro časový horizont roku 2050. Návrh extrémních srážkových intenzit pro řešení vlivu přívalových dešťů na městské odvodnění hl.m.Praze je zpracován v následující tabulce.

Tab. 33. Návrh náhradních intenzit deště pro řešení přívalových dešťů v Praze

Rok 2020, intenzita [l/s/ha], CF=0%, ARF=0.8				Rok 2100, intenzita [l/s/ha], CF=30%, ARF=0.8			
T [min]	20 let	50 let	100 let	T [min]	20 let	50 let	100 let
15	263	314	354	15	342	409	460
30	163	194	219	30	212	253	285
60	92	110	123	60	120	142	160

**ii. Jaký bude očekávaný vliv klimatické změny na extremicitu srážek v Pražské kotlině v časovém horizontu do roku 2100.**

Studie stanovuje vliv klimatické změny na extremicitu srážkové činnosti pomocí klimatického faktoru CF. Pro časový horizont k roku 2100 tento faktor nabývá hodnoty CF=30-40 % (1,3 až 1,4násobek stávajících srážkových intenzit).

**e. Výstupem řešení má být jasně definovaný soubor extrémních přívalových zatěžovacích dešťů – dešťových intenzit – včetně podrobné metodiky postupu**

**pracování, který bude dále využit v rámci správy generelu odvodnění hl. m. Prahy pro posudkovou a návrhovou činnost. Soubor dat bude zahrnovat vliv klimatické změny pro zvolené časové horizonty a bude rozšířen o zatěžovací srážky s požadovanou dobou opakování dle objednatele.**

Zhotovitel připravil v Příloze 1-5 soubor extrémních srážkových intenzit pro stávající stav k roku 2020 a dále pro roky 2050, 2080 a 2100. Součástí dokumentace je metodika postupu zpracování zdokumentovaná v kapitole 4.1. Zatěžovací srážky podle požadavku objednatele (doby trvání dešťů dle Městských standardů) byly do datového souboru doplněny. Navržený soubor srážkových intenzit je zpracován v tabulce 33.

### 5.1 Závěrečná doporučení

Předložená studie je svým tématem, obsahem a rozsahem (podle znalostí zhotovitele) prvním dokumentem tohoto druhu zpracovaným pro podmínky hl.m.Prahy. Studie předkládá základní pravidla pro typové řešení přívalových srážek a navrhuje soubor náhradních srážek pro tyto účely. Zároveň studie doporučuje využití tzv. „Klimatického faktoru“ pro zahrnutí vlivu klimatické změny do budoucích projektů tohoto druhu a to i s ohledem na požadavky současného plánovacího rámce EU pro období 2021-2026, kde je jednoznačně podporován typ projektů zohledňujících vliv změny klimatu a možnosti adaptace společnosti na jeho důsledky.

S ohledem na novost předloženého tématu je zřejmé, že předložená studie předkládá pouze základní směr řešení přívalových dešťů a lze předpokládat, že v budoucnosti dojde k dalšímu upřesnění a rozšíření výše uvedených závěrů. Jako podklad pro další navazující práce lze na tomto místě doporučit některá dílčí témata k dalším analýzám.

- a. Délka použitých časových řad srážek je přibližně 20 let. Lze se domnívat, že v budoucnosti bude na srážkoměrné síti PVS zachyceno větší množství přívalových dešťů. Zhotovitel doporučuje se těmto měřeným extrémům dále věnovat a srovnávat je s předloženými výsledky pro jejich případně upřesnění.
- b. Zhotovitel doporučuje vytvořit databázi o přívalových deštích na oblasti hl.m.Prahy, ve které by byly k dispozici informace o extrémní srážce a jejích důsledcích na zasaženém povodí (např. formou map, videí, fotografií, atd.).

Tato studie byla zpracována firmou Aquaprocon s.r.o. ve spolupráci s ČZU v období let 2020 až 2021.

## 6 Přílohy

Příloha 1. Tabulka náhradních srážkových intenzit pro rok 2020

Příloha 2. Tabulka náhradních srážkových intenzit pro rok 2050 s vlivem klimatické změny

Příloha 3. Tabulka náhradních srážkových intenzit pro rok 2080 s vlivem klimatické změny

Příloha 4. Tabulka náhradních srážkových intenzit pro rok 2100 s vlivem klimatické změny

Příloha 5. Tabulka hodnot klimatického faktoru pro výhledový rok 2050, 2080, 2100

Příloha 6. Tabulka návrhových dešťů pro řešení přívalových srážek v Praze

Příloha 7. Mapa zátopy pro blokový přívalový déšť a déšť typu Šifalda pro N100/T60 pro současný stav k roku 2020

Příloha 8. Mapa zátopy pro přívalový déšť N100/T60 typ Šifalda a současný stav i výhledový stav k roku 2100

Příloha 9. Mapa hloubek pro přívalový déšť N100/T60 typ Šifalda a současný stav k roku 2020

Příloha 10. Mapa hloubek pro přívalový déšť N100/T60 typ Šifalda a výhledový stav k roku 2100

Příloha 1: Tabulka průměrných, minimálních a maximálních náhradních srážkových intenzit pro rok 2020 (ARF 0.8)

Průměrné náhradní intenzity ARF 0,8 [l/s/ha]						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	171	238	285	331	394	444
15	135	189	226	263	314	354
20	113	158	189	220	262	296
25	96	134	161	188	224	253
30	83	117	140	163	194	219
35	74	103	124	144	172	194
40	66	93	111	130	154	174
45	60	84	101	118	140	158
50	55	77	92	107	128	144
55	51	71	85	99	118	133
60	47	66	79	92	110	123
70	42	58	70	81	96	108
80	38	52	62	72	86	96
90	34	46	56	65	78	87
100	31	42	51	59	70	79
120	26	37	44	51	60	68
180	19	26	31	36	43	48
240	15	21	24	28	34	38
360	10	14	17	20	23	26
720	6	8	10	11	13	14
1440	3	5	6	6	7	8

Minimální náhradní intenzity ARF 0,8 [l/s/ha]						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	154	213	254	296	353	397
15	121	169	202	236	281	317
20	101	141	169	197	235	265
25	86	120	144	168	201	226
30	74	104	125	146	174	196
35	66	92	110	129	154	174
40	59	83	99	116	138	155
45	54	75	90	105	126	141
50	50	69	82	96	114	129
55	46	63	76	89	106	119
60	42	59	70	82	98	110
70	38	52	62	72	86	97
80	34	46	55	64	77	86
90	30	42	50	58	69	78
100	28	38	46	53	63	71
120	24	33	39	46	54	61
180	17	23	28	33	38	43
240	14	18	22	26	30	34
360	10	13	15	18	21	23
720	6	7	9	10	12	13
1440	3	4	5	6	6	7

Maximální náhradní intenzity ARF 0,8 [l/s/ha]						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	198	275	329	382	456	513
15	156	218	262	305	363	409
20	130	182	218	254	304	342
25	111	155	186	217	259	292
30	96	134	162	188	225	254
35	85	119	143	166	198	224
40	77	107	128	150	178	201
45	70	97	116	136	162	182
50	64	89	106	124	148	166
55	59	82	98	114	137	154
60	54	76	91	106	126	142
70	48	67	80	93	111	125
80	43	60	71	83	99	111
90	39	54	65	75	90	101
100	36	50	59	69	82	92
120	30	42	50	58	70	78
180	22	30	36	42	50	56
240	18	24	28	33	38	43
360	12	17	20	23	27	30
720	7	10	11	13	15	17
1440	4	6	6	7	9	10

Příloha 2: Tabulka průměrných, minimálních a maximálních náhradních srážkových intenzit pro rok 2050 (ARF 0.8)

Průměrná náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2050 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	193	277	333	388	465	524
15	150	213	258	303	365	410
20	124	177	213	251	302	340
25	105	151	182	212	255	291
30	91	130	157	184	222	250
35	80	115	139	163	194	221
40	72	103	125	145	174	198
45	65	93	112	132	158	178
50	60	84	102	120	143	163
55	55	78	94	111	133	150
60	51	72	88	102	123	138
70	45	63	77	90	107	121
80	40	57	68	80	95	108
90	36	51	62	72	86	97
100	33	46	56	66	78	88
120	28	40	48	57	67	76
180	21	29	34	40	48	54
240	16	23	26	31	37	42
360	11	15	18	22	25	29
720	7	9	10	12	14	16
1440	3	5	6	7	8	9

Minimální náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2050 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	174	247	298	346	416	468
15	134	191	231	271	326	367
20	111	158	191	224	270	305
25	93	134	163	190	229	259
30	81	115	140	165	199	223
35	72	102	124	146	174	198
40	64	92	111	130	156	177
45	58	83	100	117	142	159
50	54	76	91	108	128	146
55	49	70	84	99	118	135
60	46	65	78	91	110	124
70	40	57	68	80	95	108
80	36	51	61	71	85	97
90	33	45	55	65	76	86
100	30	42	50	59	70	79
120	26	36	43	51	60	68
180	18	25	31	36	43	48
240	15	20	24	28	33	37
360	10	14	16	19	23	25
720	6	8	9	10	13	14
1440	3	4	5	6	7	8

Maximální náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2050 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	223	319	385	447	538	605
15	173	247	298	351	421	474
20	143	204	247	290	350	394
25	121	174	211	245	295	336
30	105	149	181	212	256	289
35	92	132	160	188	224	255
40	83	119	143	168	202	229
45	75	107	129	152	183	206
50	69	98	118	139	166	188
55	64	91	109	128	153	174
60	59	84	101	118	142	159
70	51	73	88	103	123	140
80	46	65	78	92	110	125
90	42	59	71	83	99	112
100	39	54	65	76	91	102
120	33	46	55	65	77	88
180	24	33	40	46	55	63
240	19	26	31	36	43	48
360	13	18	22	25	30	33
720	8	10	12	14	16	18
1440	4	6	7	8	9	10

Příloha 3: Tabulka průměrných, minimálních a maximálních náhradních srážkových intenzit pro rok 2080 (ARF 0,8)

Průměrná náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2080 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	212	305	370	434	521	591
15	162	234	285	334	406	460
20	132	192	234	275	333	376
25	111	163	198	233	282	319
30	97	140	171	202	243	276
35	85	124	151	177	213	242
40	76	110	135	158	191	215
45	69	100	122	143	172	195
50	63	91	110	130	156	177
55	58	84	101	120	144	162
60	53	77	94	110	133	150
70	47	67	82	96	115	131
80	42	60	73	86	103	116
90	38	54	66	77	93	105
100	35	49	60	70	84	95
120	30	43	52	61	72	82
180	22	31	37	43	52	58
240	17	24	28	33	40	45
360	11	16	19	23	27	31
720	7	9	11	13	15	16
1440	4	5	6	7	8	9

Minimální náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2080 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	190	272	331	388	466	528
15	145	209	255	300	362	412
20	118	172	209	246	299	336
25	99	145	177	208	253	284
30	86	125	152	181	218	247
35	75	110	135	158	190	217
40	68	99	120	142	172	192
45	62	89	109	128	154	175
50	57	81	99	116	140	158
55	52	75	90	107	129	145
60	48	69	84	99	119	135
70	42	61	73	86	103	117
80	38	54	65	76	92	105
90	34	48	59	69	83	93
100	31	45	54	63	76	85
120	27	38	46	54	65	74
180	19	27	33	39	46	52
240	15	21	25	30	35	40
360	11	14	17	20	24	27
720	6	8	10	11	14	15
1440	4	4	5	6	7	8

Maximální náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2080 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	245	352	427	501	602	682
15	187	271	330	387	469	531
20	153	223	271	318	386	435
25	129	188	229	269	327	368
30	111	161	197	233	281	320
35	98	143	175	205	246	280
40	88	128	155	183	221	249
45	80	115	140	166	199	226
50	73	105	128	150	181	205
55	67	97	117	138	167	187
60	61	89	109	128	153	174
70	54	79	94	110	133	151
80	49	70	84	99	119	135
90	44	63	76	89	108	121
100	40	58	70	82	98	110
120	34	49	59	69	84	95
180	25	35	42	50	60	68
240	20	28	33	39	46	52
360	13	19	23	27	32	35
720	8	11	13	14	17	19
1440	4	6	7	8	10	11



Příloha 4: Tabulka průměrných, minimálních a maximálních náhradních srážkových intenzit pro rok 2100 (ARF 0,8)

Průměrná náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2100 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	223	324	393	464	560	635
15	169	247	303	355	431	488
20	138	202	247	293	354	403
25	116	171	207	246	298	339
30	100	147	181	214	257	292
35	88	130	159	187	225	256
40	79	116	141	167	202	229
45	71	104	127	151	182	206
50	65	94	116	136	165	187
55	60	88	106	125	152	171
60	55	80	98	116	139	158
70	49	70	86	101	121	137
80	44	63	76	89	108	121
90	39	56	69	80	97	110
100	36	51	63	73	88	100
120	31	45	54	63	76	86
180	22	32	38	45	54	61
240	17	25	29	34	42	47
360	12	17	20	24	28	32
720	7	9	11	13	15	17
1440	4	5	6	7	8	9

Minimální náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2100 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	200	289	351	414	501	567
15	151	221	271	319	385	437
20	123	180	221	262	318	360
25	104	152	186	220	267	302
30	89	131	161	191	230	261
35	79	116	141	167	201	229
40	70	104	126	150	181	205
45	64	93	114	134	163	184
50	59	85	104	122	148	167
55	54	78	95	112	135	154
60	50	72	87	104	125	141
70	44	63	76	90	108	123
80	39	56	68	79	97	109
90	35	50	61	72	86	98
100	32	46	56	65	79	90
120	28	40	48	57	69	77
180	19	28	34	41	48	55
240	16	22	26	31	37	42
360	11	15	18	21	25	28
720	6	8	10	11	14	15
1440	4	5	6	6	7	8

Maximální náhradní intenzita [l/s/ha] pro rok 2100 - RCP8,5 - ARF 0,8						
T [min]	2	5	10	20	50	100
10	257	374	454	535	648	733
15	195	286	351	411	498	564
20	159	233	286	338	410	466
25	135	197	240	284	345	391
30	115	169	208	246	297	337
35	102	150	183	216	260	296
40	91	134	163	193	234	265
45	83	120	146	174	210	239
50	76	109	134	157	191	216
55	70	101	123	144	175	198
60	64	93	113	134	161	182
70	56	81	98	116	140	158
80	50	73	88	103	125	140
90	45	66	80	93	112	127
100	42	60	73	85	102	116
120	35	51	62	72	88	100
180	26	37	44	52	62	71
240	20	29	34	40	48	54
360	14	20	24	28	33	37
720	8	11	13	15	18	20
1440	4	6	7	8	10	11

Příloha 5: Tabulka hodnot klimatického faktoru pro výhledový stav - rok 2050, 2080, 2100

Hodnoty klimatického faktoru CF pro rok 2050							Hodnoty klimatického faktoru CF pro rok 2080							Hodnoty klimatického faktoru CF pro rok 2100						
T [min]	2	5	10	20	50	100	T [min]	2	5	10	20	50	100	T [min]	2	5	10	20	50	100
10	1,13	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	10	1,24	1,28	1,3	1,31	1,32	1,33	10	1,3	1,36	1,38	1,4	1,42	1,43
15	1,11	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	15	1,2	1,24	1,26	1,27	1,29	1,3	15	1,25	1,31	1,34	1,35	1,37	1,38
20	1,1	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	20	1,17	1,22	1,24	1,25	1,27	1,27	20	1,22	1,28	1,31	1,33	1,35	1,36
25	1,09	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	25	1,16	1,21	1,23	1,24	1,26	1,26	25	1,21	1,27	1,29	1,31	1,33	1,34
30	1,09	1,11	1,12	1,13	1,14	1,14	30	1,16	1,2	1,22	1,24	1,25	1,26	30	1,2	1,26	1,29	1,31	1,32	1,33
35	1,09	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	35	1,15	1,2	1,22	1,23	1,24	1,25	35	1,2	1,26	1,28	1,3	1,31	1,32
40	1,08	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	40	1,15	1,19	1,21	1,22	1,24	1,24	40	1,19	1,25	1,27	1,29	1,31	1,32
45	1,08	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	45	1,15	1,19	1,21	1,22	1,23	1,24	45	1,19	1,24	1,26	1,28	1,3	1,31
50	1,08	1,1	1,11	1,12	1,12	1,13	50	1,14	1,18	1,2	1,21	1,22	1,23	50	1,18	1,23	1,26	1,27	1,29	1,3
55	1,08	1,1	1,11	1,12	1,12	1,13	55	1,14	1,18	1,19	1,21	1,22	1,22	55	1,18	1,23	1,25	1,26	1,28	1,29
60	1,08	1,1	1,11	1,11	1,12	1,12	60	1,13	1,17	1,19	1,2	1,21	1,22	60	1,17	1,22	1,24	1,26	1,27	1,28
70	1,07	1,09	1,1	1,11	1,11	1,12	70	1,13	1,17	1,18	1,19	1,2	1,21	70	1,17	1,21	1,23	1,25	1,26	1,27
80	1,07	1,09	1,1	1,11	1,11	1,12	80	1,13	1,16	1,18	1,19	1,2	1,21	80	1,16	1,21	1,23	1,24	1,26	1,26
90	1,07	1,09	1,1	1,11	1,11	1,11	90	1,12	1,16	1,18	1,19	1,2	1,2	90	1,16	1,21	1,23	1,24	1,25	1,26
100	1,07	1,09	1,1	1,11	1,11	1,11	100	1,12	1,16	1,18	1,19	1,2	1,2	100	1,16	1,21	1,23	1,24	1,25	1,26
120	1,07	1,09	1,1	1,11	1,11	1,12	120	1,12	1,16	1,18	1,19	1,2	1,21	120	1,16	1,21	1,23	1,24	1,26	1,27
180	1,07	1,09	1,1	1,11	1,11	1,12	180	1,12	1,16	1,18	1,19	1,2	1,21	180	1,15	1,21	1,23	1,24	1,26	1,27
240	1,07	1,09	1,09	1,1	1,11	1,11	240	1,12	1,15	1,17	1,18	1,19	1,2	240	1,15	1,2	1,22	1,23	1,25	1,26
360	1,06	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	360	1,1	1,13	1,14	1,15	1,16	1,16	360	1,13	1,17	1,18	1,19	1,2	1,21
720	1,06	1,07	1,07	1,07	1,08	1,08	720	1,1	1,12	1,13	1,13	1,14	1,14	720	1,13	1,15	1,16	1,17	1,18	1,18
1440	1,06	1,06	1,07	1,07	1,07	1,07	1440	1,1	1,11	1,12	1,12	1,13	1,13	1440	1,12	1,14	1,15	1,16	1,16	1,17

Příloha 6: Tabulka hodnot návrhových dešťů pro řešení přívalových srážek v Praze

Rok 2020, intenzita [l/s/ha], CF=0%, ARF=0.8			
T [min]	N20 let	N50 let	N100 let
15	263	314	354
30	163	194	219
60	92	110	123

Rok 2100, intenzita [l/s/ha], CF=30%, ARF=0.8			
T [min]	N20 let	N50 let	N100 let
15	342	409	460
30	212	253	285
60	120	142	160

## 7 Literatura

1. Asquith, W. H., Famiglietti, J. S. (2000). Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. *Journal of Hydrology*, 230(1-2), 55-69.
2. Balbastre-Soldevila, R., García-Bartual, R., Andrés-Doménech, I. (2019). A Comparison of Design Storms for Urban Drainage System Applications. *Water*, 11(4), 757.
3. Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer*. John Wiley & Sons.
4. Berg, P., Christensen, O. B., Klehmet, K., Lenderink, G., Olsson, J., Teichmann, C., & Yang, W. (2019). Summertime precipitation extremes in a EURO-CORDEX 0.11 degrees ensemble at an hourly resolution. *Natural hazards and earth system sciences*, 19(4), 957-971.
5. Te Chow, V., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1962). *Applied hydrology*. Journal of Engineering Education, 308, 1959.
6. Hanel, M., Buishand, T. A. (2012). Multi-model analysis of RCM simulated 1-day to 30-day seasonal precipitation extremes in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 412, 141-150.
7. Hanel, M., Buishand, T. A. (2010). On the value of hourly precipitation extremes in regional climate model simulations. *Journal of hydrology*, 393(3-4), 265-273.
8. Hanel, M., Buishand, T. A., Ferro, C. A. (2009). A nonstationary index flood model for precipitation extremes in transient regional
9. Chan, S. C., Kendon, E. J., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Roberts, N. M. (2014). Projected increases in summer and winter UK sub-daily precipitation extremes from high-resolution regional climate models. *Environmental Research Letters*, 9(8), 084019.
10. Huff, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources research*, 3(4), 1007-1019.
11. Huff, F. A. (1990). Time distributions of heavy rainstorms in Illinois. Circular no. 173.
12. Kavka, P., Müller, M., Strouhal L., Kašpar M., Bližňák V., Landa M., Weyskrabová L., Pavel M., and Dostál, T. (2018). *Krátkodobé Srážky Pro Hydrologické Modelování a Navrhování Drobných Vodohospodářských Staveb V Krajině*. Metodika Spú 3/2018-Spu/O. České vysoké učení technické v Praze, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i., Sweco Hydroprojekt a.s.
13. Keifer, C. J., Chu H. H. (1957). Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. *Journal of Hydraulics Division* 83: 1–25.
14. KNMI, 2015: KNMI'14 climate scenarios for the Netherlands; A guide for professionals in climate adaptation, KNMI, De Bilt, The Netherlands, 34 pp

15. Kulasová, B., Šercl P., and Boháč M. (2004). Verifikace Metod Odvození Hydrologických Podkladů Pro Posuzování Bezpečnosti Vodních Děi Za Povodní. Závěrečná Zpráva Projektu Qd 1368. Praha. ČHMÚ.
16. Lenderink, G., Van Meijgaard, E. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), 511-514.
17. Máca, P., Torfs, P. (2009). "The Influence of Temporal Rainfall Distribution in the Flood Runoff Modelling." *Soil and Water Research* 4 (SPECIAL ISSUE 2): S102–S110.
18. Prein, A. F., Rasmussen, R. M., Ikeda, K., Liu, C., Clark, M. P., Holland, G. J. (2017). The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nature Climate Change*, 7(1), 48-52.
19. Sardá-Espinosa, A. (2019). "Time-Series Clustering in R Using the dtwclust Package." *The R Journal*. URL <https://doi.org/10.32614/RJ-2019-023>.
20. Sifalda, V. (1973). "Entwicklung Eines Berechnungsregens Für Die Bemessung von Kanalnetzen." *Gwf-Wasser/Abwasser* 114: 435–40.
21. Sunyer, M. A., Luchner, J., Onof, C., Madsen, H., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2017). Assessing the importance of spatio-temporal RCM resolution when estimating sub-daily extreme precipitation under current and future climate conditions. *International Journal of Climatology*, 37(2), 688-705.
22. Sunyer, M. A., Gregersen, I. B., Rosbjerg, D., Madsen, H., Luchner, J., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). Comparison of different statistical downscaling methods to estimate changes in hourly extreme precipitation using RCM projections from ENSEMBLES. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2528-2539.