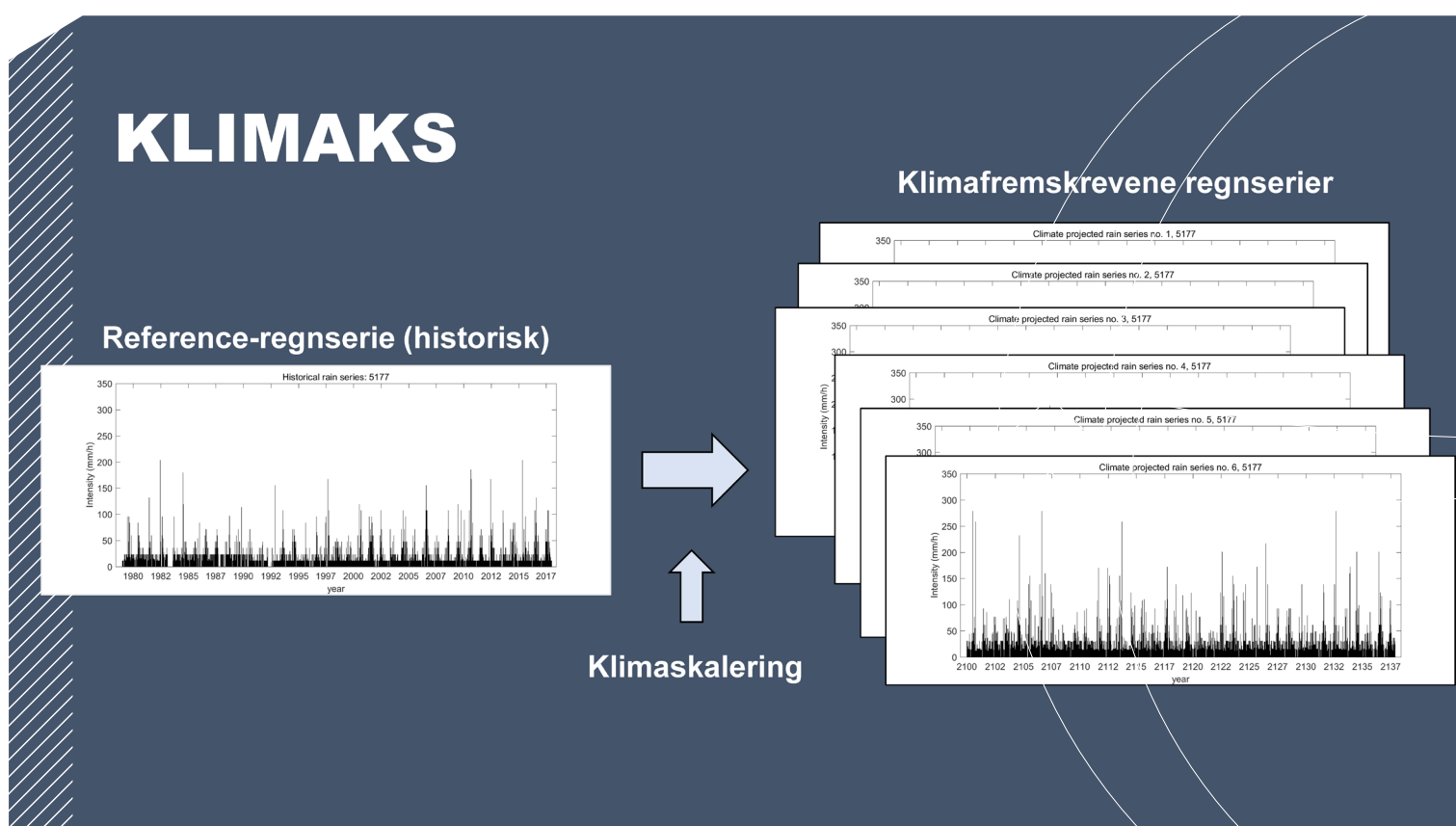


# KLIMAFREMSKRIVNING AF MÅLT NEDBØR TIL AFLØBSTEKNISK ANVENDELSE (KLIMAKS)



# KLIMAFREMSKRIVNING AF MÅLT NEDBØR TIL AFLØBSTEKNISK ANVENDELSE

## DANVA VUDP PROJEKTRAPPORT

**DATO:** 16. december 2020

---

**Projekt ID:**  
1162.1017

**Projekttitlel:**  
Klimafremskrivning af målt nedbør til afløbsteknisk anvendelse (KLIMAKS)

**Udgiver:**  
DANVA

**Udarbejdet af:**  
Søren Thorndahl, Aalborg Universitet  
Lene Bassø Duus, Aarhus Vand  
Preben Dam Simonsen, NIRAS  
Christoffer Bang Andersen, Aalborg Universitet  
Lene Lykke Kraglund, NIRAS  
Fredrik Boberg, DMI

**Finansiering:**  
Vejledningen er finansieret af  
VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

**Samarbejdspartnere:**  
Aarhus Vand  
Aalborg Universitet, Institut for By, Byggeri og Miljø  
NIRAS  
DMI

**Kategori:**  
Klimatilpasning

---

## Indholdsfortegnelse

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Sammenfatning</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>English summary</b>                                      | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>Introduktion</b>   | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>Projektets betydning for vandbranchen</b>                | <b>6</b>  |
| 4.1      | Marked og/eller anvendelsesmuligheder                       | 6         |
| 4.2      | Næste skridt  | 7         |
| 4.3      | Formidlingsplan   | 8         |
| <b>5</b> | <b>Projektet</b>  | <b>9</b>  |
| 5.1      | Formål  | 9         |
| 5.2      | Output  | 9         |
| 5.3      | Projektresultater   | 10        |
| 5.4      | Konklusion  | 53        |
| <b>6</b> | <b>Litteraturliste</b>                                      | <b>55</b> |
| <b>7</b> | <b>Bilag 1: Afstrømning fra ubefæstede (grønne) arealer</b> | <b>57</b> |

# 1 Sammenfatning

Projektet KLIMAKS' overordnede formål er at forbedre det nedbørsinput, som vandselskaber og kommuner benytter til dimensionering, analyse, planlægning og klimatilpasning af afløbssystemer samt det øvrige vandkredsløb i og uden for byer, både nu og i fremtiden.

Der er i projektet udviklet en metode til at klimafremskrive målte historiske regnserier, så de kan repræsentere fremtidens klima. Der anvendes forskellige klimafaktorer for forskellige klimavariabler, så det kan håndteres at års, årstidsnedbør og ekstreme ændres forskelligt i fremtiden. I projektet genereres et ensemble af klimafremskrevne kunstige regnserier, som alle repræsenterer fremtidens klima, og som indeholder usikkerheder i klimafremskrivningen. De kunstige serier sammenlignes med nuværende praksis for klimafremskrivning, hvor en konstant klimafaktor multipliceres alle de dimensionsgivende regnintensiteter (faktorfremskrivning). Metoden til at generere de kunstige regnserier er blevet tilpasset undervejs i projektet, ligesom klimaparametrene inkl. vægtingen af de enkelte parametre er blevet justeret.

Der har været fokus på, at de klimafremskrevne kunstige regnserier skal passe både på intensiteter og volumener for de fire årstider, hvor den nuværende praksis med faktorfremskrivning af en historisk regnserie f.eks. ikke håndterer, at sommerhændelser bliver kraftigere, men at der samtidig bliver længere imellem nedbøren.

I de regnserier, der repræsenterer fremtidens klima, er der tydelige ændringer i nedbørsmønstrene og derfor generelle stigninger i belastningen på de analyserede afløbssystemer i år 2100-2138 i forhold til referenceperioden 1979-2018.

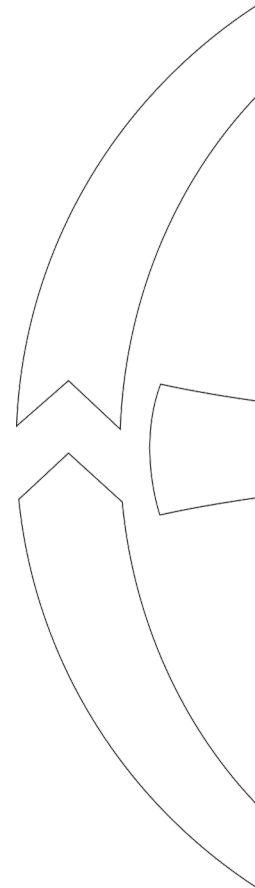
Klimafremskrivningen synliggør en væsentligt øget belastning på afløbssystemer i fremtiden; dog har analyserne i nærværende projekt vist, at ved anvendelsen af de kunstige klimafremskrevne regnserier frem for nuværende praksis opnås en lavere årlig udledning fra de beregnede afløbssystemer. Herudover viser resultaterne, at der ved bassindimensionering med de klimafremskrevne kunstige regnserier er et behov for lidt mindre bassiner i situationer, hvor koblede hændelser er dimensionsgivende (ved små afløbstal).

Nogle af de data, som set over året er midlet ud, viser større forskelle, når der analyseres på årstider. I projekter, hvor årstidsvariationen er betydende, vil det derfor være meget relevant at benytte de kunstige klimafremskrevne regnserier.

Der er på de kunstige klimafremskrevne regnserier en vis variabilitet, dels fra år til år, dels i forhold til klimafremskrivningen. Dette repræsenterer usikkerheden ved klimafremskrivning. Der anbefales derfor at anvende et ensemble af flere klimafremskrevne regnserier for at belyse usikkerheden i afløbssystemets respons.

Beregninger og analyser er i nærværende projekt gennemført med udgangspunkt i Aarhus Vands forsyningsområde, hvorfor metoden endnu ikke er klar til generel anvendelse i branchen. Dog er der med projektet et godt grundlag til at tage næste skridt i arbejdet med en opdateret praksis for anvendelse af nedbørsserier i branchen.

I projektet er der ligeledes arbejdet med potentialet i at udarbejde et radarregnkatalog og inklusion af tids- og stedligt varierende regn som alternativ til punktregn. Arbejdet med radarregnene er delvist forankret i et Ph.d.-projekt, som fortsætter efter afslutningen af KLIMAKS. Der er derfor på nuværende tidspunkt ingen anbefalinger til, hvordan radarregnhændelser bør anvendes.



---

## 2 English summary

The overall purpose of the project KLIMAKS is to improve the precipitation input that water utility companies and municipalities use for design, analysis, planning and climate adaptation of drainage systems and the rest of the water cycle in and outside cities both now and in the future.

In the project, a number of synthetic climate-projected rain series have been generated and compared to projections of multiple climate variables. Different climate-factors are used for different climate variables, in order to handle that yearly precipitation, seasonal precipitation and extreme rainfall change differently in the future. The project generates an ensemble of climate-projected synthetic rainfall series, all of which represent the climate of the future and which contain uncertainties in the climate projection. The synthetic series are compared to current practice for climate projection in Denmark where a constant climate factor is multiplied to the design-giving rain intensities. The method for generating the synthetic rain series, climate variables and weights have been modified and improved during the project.

There has been a focus on for the synthetic climate-projected rain series to represent both intensities and volumes for the four seasons. The current practice of factor projection of a historical rain series does e.g. not handle that summer events become more intensive, but that at the same time there will be longer time between the individual rainfall events.

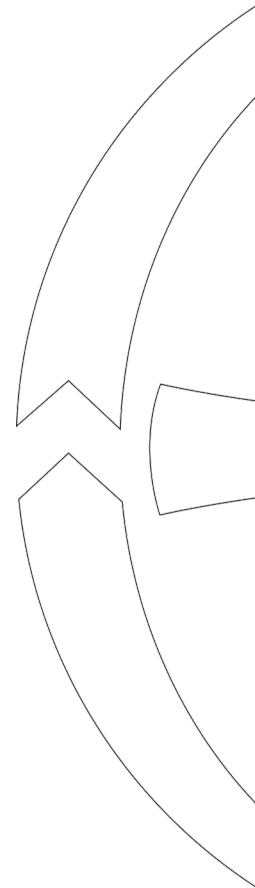
In the rainfall series that represent the climate of the future, there are clear changes in the precipitation patterns and therefore general increases in the load on the analyzed drainage systems in the years 2100-2138 compared to the reference period 1979-2018.

The analyses have shown that by using the synthetic climate-projected rain series that includes multiple climate variables, a lower annual discharge is obtained from the calculated drainage systems, compared to the current practice with a single climate factor projection. The same is the case for detention pond design where the proposed methods results in smaller design volumes. In the practical application of the synthetic climate-projected series, however, more than one rain series have to be applied since there is a statistical variability from series to series.

There is a tendency for larger variability over the year in the future climate, which can be difficult to identify averaging over the year. This argues for an application of the synthetic climate projected series.

Model simulations and analyses have been carried out in the present project on the basis of Aarhus Vand's supply area, which is why the method is not yet ready for general application in the Danish water industry. However, with the project, there is a good basis for taking the next step to an updated practice for the use of rainfall series in the Danish water industry.

The project has also included development of a radar rainfall catalog and considerations on application of spatio-temporal rainfall. This work is a part of a PhD project at Aalborg University, which will continue after the end of KLIMAKS.



---

## 3 Introduktion

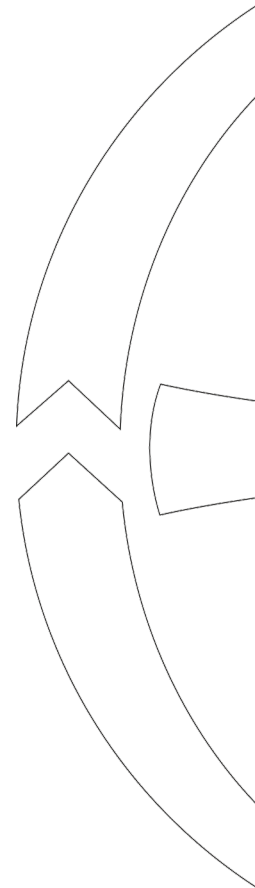
Klimaks er et udviklingsprojekt gennemført i et stærkt samarbejde mellem Aalborg Universitet, AAU, Institut for By, Byggeri og Miljø, NIRAS, Aarhus Vand og Danmarks Meteorologiske Institut, DMI.

AAU har stået for den forskningsmæssige metodeudvikling, hvor NIRAS og Aarhus Vand har bragt det i anvendelse i form af testområder og samtidig kortlagt brugernes behov undervejs. DMI har vurderet og leveret klimadata til projektet.

Motivationen for KLIMAKS er at bidrage til et mere præcist tids- og stedligt fordelt regnininput til brug i vandselskabernes og kommunernes dimensionering, analyse, planlægning og klimatilpasning af afløbssystemer i og uden for byer, både nu og i fremtiden. Ved anvendelse af dynamisk klimafremskrevet regn kan grundlæggende antagelser og simplificeringer omkring et afløbssystems regnrespons undgås. Projektets formål er at bidrage til korrekt dimensionering og planlægning, så fordyrende over-/underdimensionering kan minimeres. Herudover vil projektet gennem et bedre beregningsgrundlag sikre bedre udnyttelse af eksisterende afløbssystemer samt et forbedret grundlag for bestemmelse af risiko og konsekvens ved kapacitetsoverskridelse.

Udover et mere præcist tids- og stedligt fordelt regnininput har justerede og kontrollerede vejrradardata kombineret med regnmålerdata efterhånden opnået en kvalitet og kvantitet, der gør dem anvendelige til at undersøge regns variabilitet i tid og sted. Ved brug af vejrradardata som input til modeller kan påvirkningen af et afløbssystem bestemmes i forhold til kontrol af serviceniveau, recipientbelastning og påvirkning under oversvømmelseskabende hændelser. Denne anvendelse af vejrradardata er ny og unik i Danmark og i resten af verden.

Der er i forbindelse med KLIMAKS etableret en følgegruppe bestående af HOFOR, Novafos, Vandcenter Syd, Vejle Spildevand samt IDA Spildevandskomiteen repræsenteret ved forretningsudvalget og det faglige udvalg (Regnudvalget). Formålet med inddragelse af en følgegruppe er at give projektet et mere generelt sigte i den danske vandsektor og få inputs og feedback i forhold til erfaringer og behov i branchen. Der har været afholdt tre følgegruppe-workshops med ca. et års mellemrum, hvoraf den sidste workshop i december 2020 var et åbent (online) arrangement for hele vandbranchen.



## 4 Projektets betydning for vandbranchen

Hensigten med KLIMAKS-projektet er en fremskrivning af de historiske regnserier ud fra klimæksperternes forudsigelse af fremtidens klima. I dag designes afløbssystemerne og klimæløsningerne ved brug af historiske regnserier og designregn (CDS), som fremskrives med en klimafaktor uden hensyntagen til variation i årstider og nedbørstyper. Dette er en metode, som branchen er bekendt med ikke følger klimæksperternes forudsigelse, men det er blevet en almen anvendt praksis. Ligeledes designes store systemer med en ensartet regn uden nogen steds- og tidlig variation, hvilket resulterer i urealistiske resultater og dermed ikke tilstrækkelig godt grundlag til analyse, design og dialog om samspillet imellem systemerne.

KLIMAKS-projektet vil afdække et behov i branchen for at medtage årstidsvariationen på regnens udvikling, således at branchen bliver i stand til at designe og analysere systemerne for flere fremtidige funktionssituationer – altså både mere tørre og mere nedbørsrige perioder. Branchen vil blive i stand til at vurdere den nuværende og fremtidige udnyttelse af systemerne, recipientbelastningen og vandstrømmene i det samlede vandkredsløb, således at systemerne udnyttes optimalt, og der sikres en god målopfyldelse for recipienterne.

Branchen bliver i stand til at designe servicesystemerne og skybrudssystemerne bedre både på detailniveau og i forhold til det samlede vandkredsløb, da KLIMAKS-projektet vil kunne give "bud" på klimafremskrevne regnserier for gentagelsesperioder større end 100 år.

Ligeledes vil KLIMAKS-projektet bidrage med nedbørsinput til analyser med steds- og tidlig variation, hvilket vil give mere holistiske løsninger for hele vandsystemet.

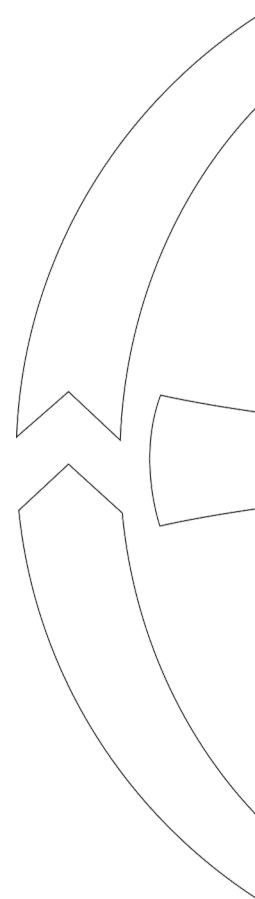
Det samlede output fra KLIMAKS vil gøre branchen i stand til at designe systemerne i hele vandkredsløbet mere optimalt i forhold til det fremtidige klima. Forhåbentlig vil outputtet i samspil med observationsdata gøre, at vi kan målrette indsatsen i rette tid og skabe et dynamisk overblik over de hydrauliske udfordringer, som følger af et ændret klima. Dette vil være til gavn for borgeren, naturen og miljøet.

### 4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Formålet med projektet er at forbedre det regninput, som anvendes i vandselskabers og kommuners analyser af vandkredsløbet nu og i fremtiden, hvorved bl.a. både analyser vil blive mere præcise, og dimensioneringen også vil blive bedre, så de økonomiske anlægsinvesteringer optimeres.

Projektet har som nævnt været fulgt af en følgegruppe, som sammen med projektpartnerne har bidraget til en behovsafklaring. Behovsafklaringen kortlægger overordnet følgende behov:

- a. Analyse af vandkredsløbet: Nedbørsinput i form af regnserie til generel anvendelse for både serviceniveau og skybrud (både høj-intense regn og langvarige volumenholdige regn).
- b. Analyse af vandkredsløbet: Nedbørsinput, som er repræsentativt for årsmængden, og som også repræsenterer hverdagsituationer.



- c. Design af bassiner: Nedbørsinput, som er repræsentativt for årsmængden og de forskellige årstider. Desuden belysning af behov for arealreduceret regn eller radarkatalog.
- d. Analyse af recipientbelastning: Nedbørsinput, som er repræsentativt for de forskellige årstider.

Resultatet af projektet er, at der er udarbejdet en metode for generering af kunstige regnsrækker, herunder en metode for klimafremskrivning af kunstige regnsrækker. Metoden kan anvendes generelt i branchen, såfremt der i andet regi udarbejdes et brugervenligt værktøj (se afsnit 4.2). Regnsrækkerne kan benyttes i alle fire analysesituationer, der er angivet ovenfor.

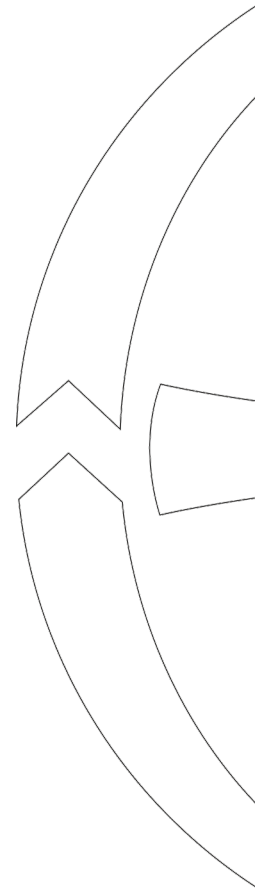
Resultatet af projektet er også, at der på basis af radardata fra Stevns-radaren er udarbejdet arealreduktionsfaktorer. Der er ligeledes udarbejdet første udkast til et radarregnkatalog. Arealreduktionsfaktorerne kan anvendes generelt i branchen ifm. analyse af større vandoplande. Radarkataloget er endnu ikke klar til generel anvendelse i branchen. Arbejdet med radarkataloget fortsætter ifm. et igangværende Ph.d.-projekt, som forløber i et samarbejde mellem Aalborg Universitet og Aarhus Vand, og som er delvist finansieret af Aarhus Vand, delvist gennem VUDP-bevillingen til KLIMAKS.

Projektet har sigtet mod at udarbejde et generelt anvendeligt open source regnininput, som er anvendeligt for alle. Det betyder også, at projektet ikke har haft et markedsfølsomt fokus, men primært et vidensopbyggende fokus.

## 4.2 Næste skridt

Den i KLIMAKS udviklede metode til klimafremskrivning af regnsrækker tjener en bred anvendelse i den danske vandbranche. I KLIMAKS' slutfase er flere danske vandselskaber gået sammen med universiteter og rådgivere om at opdatere den danske dimensioneringspraksis for afløbssystemer. Målet er at udgive et nyt skrift i regi af IDA Spildevandskomiteen. Dette arbejde er støttet af VUDP i projektet VÆRDI (bevilget efteråret 2019). De opnåede resultater fra KLIMAKS vil således blive anvendt og videreudviklet i dette projekt, så hele branchen på sigt kan få glæde af resultaterne. Konkret vil KLIMAKS-metoden blive anvendt til at klimafremskrive regnsrækker til forskellige anvendelser med en regional variation, så nedbørsforhold i hele landet repræsenteres.

Ligeledes vil radardata-kataloget kunne anvendes til at undersøge, hvordan regns stedlige udbredelse påvirker store afløbssystemer. I VÆRDI er den stedlige variabilitet udeladt som en del af projektformålet, men det ændrer ikke ved, at der i DK er stort fokus på at undersøge forskelle på at anvende arealregn og punktregn, og hvad det betyder ift. dimensioneringspraksis. AAU og andre partnere vil i 2021 søge yderligere midler til at videreudvikle radarregnkataloget.





## 4.3 Formidlingsplan

Som nævnt ovenfor vil projektet VÆRDI sammen med andre bidrag anvende de i KLIMAKS udviklede metoder til klimafremskrivning af regnserier og forsøge at skabe en ny dimensioneringspraksis, som skal udgives som et nyt skrift i regi af IDA Spildevandskomiteen. Resultaterne fra KLIMAKS vil derfor præsenteres, anvendes og formidles igennem VÆRDI-projektet i de kommende år.

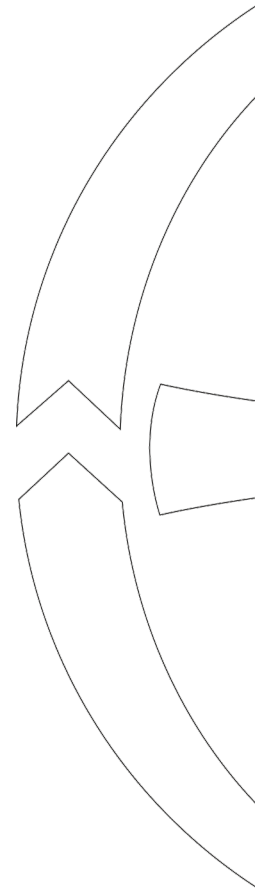
P.t. arbejdes der på at skrive flere videnskabelige artikler, som præsenterer resultaterne af KLIMAKS:

- Thorndahl, S., Andersen, C.B. (2020) CLIMACS: a method for stochastic generation of continuous climate projected point rainfall for urban drainage design. Under udarbejdelse til WATER - MDPI
- Thorndahl, S., Andersen, C.B., Simonsen, P.D., Kraglund, L.L., Duus, L.B. (under udarbejdelse) Generation of climate projected rainfall series ensembles and impact studies on integrated urban drainage systems
- Andersen, C.B., Thorndahl, S. (under udarbejdelse): Review of rainfall statistics from radar-based Stochastic Storm Transposition
- Andersen, C.B., Thorndahl, S. (under udarbejdelse) Stochastic Storm Transposition in Urban Drainage Modelling

Resultaterne fra KLIMAKS præsenteres på konferencerne:

- IWA World Water Congress & Exhibition, København (2021)
- International conference on Urban Drainage, Melbourne (2021)
- Nationale workshops og konferencer, fx Dansk Vand Konference, IDA-miljøarrangementer, EVA-temadage, mv.

Parallelt med KLIMAKS er Christoffer Bang Andersens Ph.d.-forløb på Aalborg Universitet igangsat. Dette forløber til efteråret 2021, og det forventes, at yderligere videnskabelige artikler publiceres som en del af Ph.d.-afhandlingen. Herudover vil der være mundtlige præsentationer relateret til KLIMAKS i form af Ph.d.-forsvar og conferencebidrag.



## 5 Projektet

### 5.1 Formål

Projektets overordnede formål er at forbedre det nedbørsinput, som vandselskaber og kommuner benytter til dimensionering, analyse, planlægning og klimatilpasning af afløbssystemer samt det øvrige vandkredsløb i og uden for byer både nu og i fremtiden. Der er fokus på både tids- og stedsvarierende nedbør.

Ved anvendelse af dynamisk klimafremskrevet regn kan grundlæggende antagelser og simplificeringer omkring et afløbssystems regnrespons undgås. Projektets formål er at bidrage til korrekt dimensionering og planlægning, så fordyrende over-/underdimensionering kan minimeres.

Herudover vil projektet gennem et bedre beregningsgrundlag sikre bedre udnyttelse af eksisterende afløbssystemer samt et forbedret grundlag for bestemmelse af risiko og konsekvens ved kapacitetsoverskridelse.

Da der er et behov for at medtage dynamiske variationer i tid og sted i både hverdags- og dimensionsgivende regn, er der fokus på såvel regnserier som radarregnhændelser. Behovet for at medtage dynamiske variationer i tid og sted gælder f.eks. ift. dimensionering af bassiner og LAR-systemer, i analyse af overløb fra fællessystemer og udledning fra separate regnvandssystemer samt ift. oversvømmelsesskabende regn og den klimatilpasning, som pågår i vandselskaber og kommuner.

Et væsentligt formål er ligeledes, at metoderne, som udvikles i projektet, kan anvendes bredt i branchen og skabe fundamentet for en opdateret praksis for anvendelse af regninput.

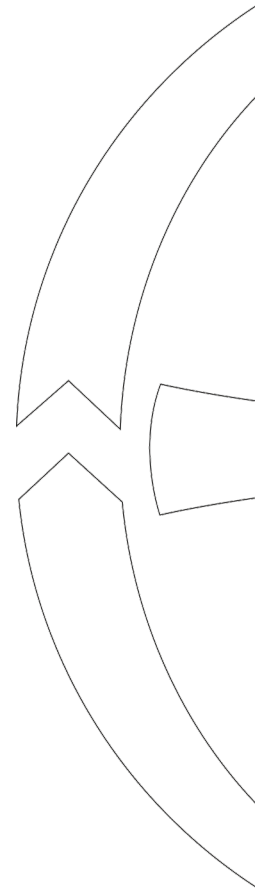
### 5.2 Output

Der er igennem KLIMAKS opbygget meget viden om klimaændringernes påvirkning på afløbssystemer. Denne viden tjener ikke kun Aarhus Vand i deres arbejde med planlægning, klimatilpasning og skybrudssikring, men generelt i branchen som eksempler på, hvorledes der kan tages højde for klimaændringerne.

Igennem projektet er der udviklet procedurer til dels at evaluere regnserier statistisk, dels at evaluere afløbstekniske modelberegninger baseret på klimafremskrevne regnserier.

De klimafremskrevne regnserier er forbedret løbende gennem projektet, og udgangspunktet har været en iterativ tilgang, hvor AAU har fremstillet de klimafremskrevne serier, som så er blevet testet og evalueret på forskellige afløbstekniske anvendelser af NIRAS og Aarhus Vand. Det endelige output i form af klimafremskrevne regnserier er derfor undersøgt på forskellige anvendelser og anses som realistiske bud på regnserier, der tager højde for klimaændringerne, og som kan anvendes til dimensionering og analyse i Aarhus Vands forsyningsområde.

Et andet output fra projektet er et katalog af radarregnhændelser, som kan anvendes i afløbsteknisk sammenhæng til at belyse, hvad den stedlige variabilitet af regn, der bevæger sig over et opland, betyder for afløbssystemets respons.



## 5.3 Projektresultater

I de følgende afsnit beskrives KLIMAKS-projektets resultater detaljeret. Der er taget udgangspunkt i metodeudvikling samt demonstration og konsekvensberegning af de udviklede metoder. Processen i projektet har været en iterativ tilgang, hvor klimafremskrevne serier er genereret, hvorefter der er foretaget modelbaserede konsekvensberegninger på forskellige anvendelser. Baseret på evaluering af de opnåede resultater er der således udviklet og forbedret på metoderne til klimafremskrivning inden næste runde af konsekvensberegninger. Denne proces er gentaget tre gange.

I 5.3.1 beskrives den udviklede metode til klimafremskrivning, som evalueres på en simpel bassindimensioneringsberegning i 5.3.2. I 5.3.3 gennemføres en demonstration og konsekvensberegning på tre forskellige afløbssystemer med de klimafremskrevne serier. Endelig præsenteres Radarregn-kataloget i 5.3.4.

### 5.3.1 Metodeudvikling: Klimafremskrivning af regnserier

Metoden til klimafremskrivning af historiske regnserier er udviklet på Aalborg Universitet. Første version (1.0) blev udviklet igennem et kandidatspeciale: Klimaændringernes betydning for ekstremstatistikkerne på afløbssystemer af Andersen og Larsen (2015) og er forbedret og opdateret flere gange siden. En af de første versioner er anvendt i Thorndahl et al. (2016), herunder den første fremskrivning af Vibby-regnserien i Thorndahl (2016). Metoden er videnskabeligt beskrevet i artiklen *Event-based stochastic point rainfall resampling for statistical replication and climate projection of historical rainfall series* (Thorndahl et al., 2017). Desuden er der i Sørup et al. (2018) og De Niel et al. (2019) foretaget en sammenligning mellem nærværende og andre metoder til klimafremskrivning af regnserier.

Klimafremskrivningsmetoden er igennem KLIMAKS blevet udviklet og opdateret. Disse forbedringer beskrives i artiklen: CLIMACS: a method for stochastic generation of continuous climate projected point rainfall for urban drainage design (Thorndahl og Andersen, 2020). I dette notat gennemgås metoden ikke detaljeret, hvorfor der i stedet henvises til ovenstående referencer. Nedenstående redegøres for, hvordan metoden er opdateret og udviklet gennem KLIMAKS-projektets forløb (fra version 1 til version 2.2):

#### 1. iteration ver. 2.0

- Original version 1.0 er opdateret med Vibby-regnserien og tilpassede klimafaktorer
- Evaluering: Milepæl 1, Opland til Vibby renseanlæg (1100 ha), se afsnit 5.3.3.1

#### 2. iteration ver. 2.1

- Ny udvælgelse af hændelser (godkendte versus alle hændelser): Nu anvendes samme metode som SVK-statistikken (skrift 26)
- Flere års data er medtaget løbende
- Flere målparametre er medtaget: fx 5-døgnsnedbør og flere varigheder på ekstremstatistikken
- Ny vægtning mellem målparametre
- Forbedring af metode til håndtering af variabilitet og usikkerheder
- Ny metode til frasortering af nedetid
- Hurtigere beregningsprocedure med flere accepterede serier
- Udvikling af kode i Python
- Evaluering: Milepæl 2, Stavtrup (140 ha): se afsnit 5.3.3.2

### 3. iteration: ver. 2.2

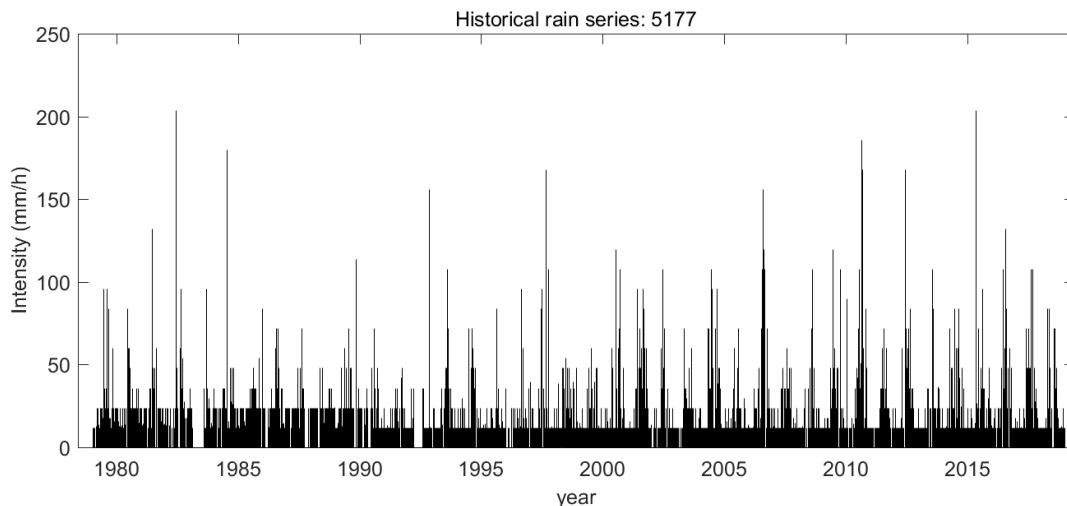
- Forbedret udvælgelse af serier
- Evaluering på baggrund af bassindimensionering
- Inkludering af afstrømning fra ubefæstede (grønne) arealer og modificering af klimafremskrevne regnserier.
- Evaluering: Milepæl 3, Haarup (32 ha): se afsnit 5.3.3.3

I det nedenstående beskrives metodeudviklingen og resultaterne fra 3. og sidste iteration.

Det overordnede koncept for metoden er, med udgangspunkt i en historisk reference-regnserie, at kunne generere kunstige regnserier, der statistisk har samme karakteristika som referenceserien. Dette tjener som en validering af metoden til at kunne sammensætte kunstige regnserier. De klimafremskrevne regnserier genereres efter samme reference-regnserie samt klimafaktorer for statistiske parametre, således at de klimafremskrevne regnserier kommer til at repræsentere et givent klimascenarie. Genererede serier udvælges efter målparametre for både nuværende og fremtidigt klima, og de serier, der samlet set passer bedst til målparametrene, udvælges til videre anvendelse.

De genererede regnserier er gjort tilgængelige i både dfs0-format (DHI MIKE) samt km2-format (Spildevandskomiteen).

Som reference-regnserie anvendes Viby-regnserien (målnr. 5177) i perioden 1979 til og med 2018. Serien indeholder ca. 2 års nedbrud, så reelt dækker serien 38 helår. I arbejdet med regnserien er år med mere end 30 dages nedbrud frasorteret i statistikken for at undgå fejlagtige resultater i års- og årstidsstatistik.



Figur 5.1. Tidsserieafbildning af den originale Viby-regnserie, der er anvendt som reference-regnserie gennem projektet.

I Tabel 5.1 ses målparametre og vægte, som er anvendt både til generering af serier for den nuværende klima og det fremtidige klima. Desuden klimafaktorer for de forskellige statistiske parametre. Der er klimafremskrevet til perioden 2100-2138 med klimascenariet RCP 4.5 fremskrevet til perioden 2071-2100. Målparametrene er baseret på et ensemble af 15 EURO-CORDEX 0.11° vejrmødel-simuleringer, som DMI har bearbejdet som en del af projektet. Klimafaktorerne for regnintensiteter med forskellige varigheder og gentagelsesperioder er baseret på IDA Spildevandskomiteens Skrift 30.

Tabel 5.1: Målparametre anvendt og vægte i version 2.2.

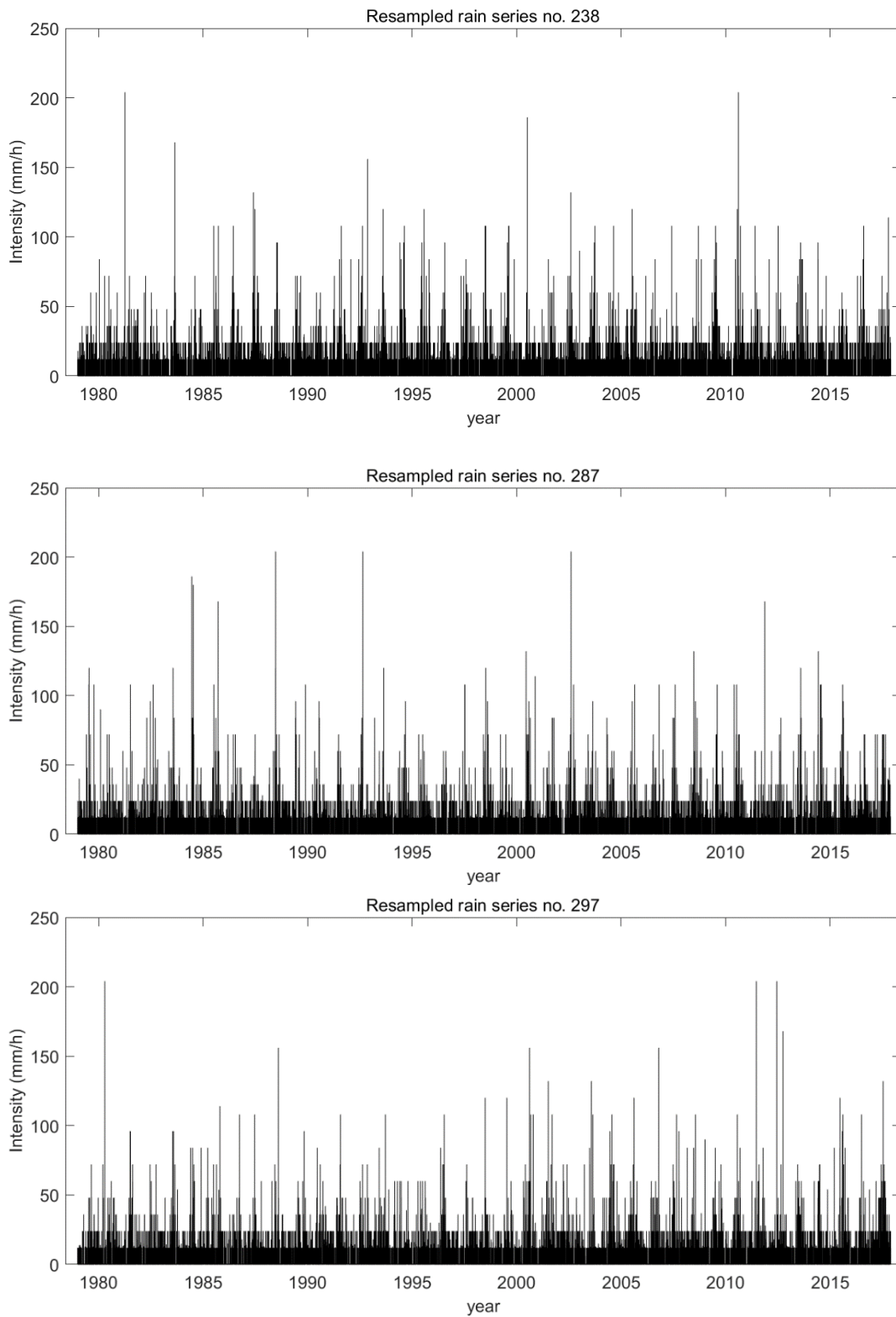
| Målparameter                        | Forkortelse    | Klimafaktorer (RCP4.5) | Vægte |
|-------------------------------------|----------------|------------------------|-------|
| Årsnedbør                           | ap (mm)        | 1.08 ( $\pm$ 0.06)     |       |
| Vinternedbør                        | spwi (mm)      | 1.12 ( $\pm$ 0.06)     | 0.125 |
| Forårsnedbør                        | spsp (mm)      | 1.13 ( $\pm$ 0.08)     | 0.125 |
| Sommernedbør                        | spsu (mm)      | 1.06 ( $\pm$ 0.18)     | 0.125 |
| Efterårsnedbør                      | spau (mm)      | 1.05 ( $\pm$ 0.07)     | 0.125 |
| Årlige antal hændelser > 10 mm/dag  | n10mm (#)      | 1.20 ( $\pm$ 0.13)     | 0.06  |
| Årlige antal hændelser > 20 mm/dag  | n20mm (#)      | 1.41 ( $\pm$ 0.30)     | 0.04  |
| Årets største døgnsum               | mdp (mm)       | 1.12 ( $\pm$ 0.09)     | 0.05  |
| Årets største 5-døgnssum            | m5dp (mm)      | 1.15 ( $\pm$ 0.06)     | 0.05  |
| Regnintensitet for 10 min, T=2 år   | d10T2 (mm/h)   | 1.20 ( $\pm$ 0.10)     | 0.06  |
| Regnintensitet for 10 min, T=10 år  | d10T10 (mm/h)  | 1.30 ( $\pm$ 0.20)     | 0.04  |
| Regnintensitet for 60 min, T=2 år   | d60T2 (mm/h)   | 1.20 ( $\pm$ 0.10)     | 0.06  |
| Regnintensitet for 60 min, T=10 år  | d60T10 (mm/h)  | 1.30 ( $\pm$ 0.20)     | 0.04  |
| Regnintensitet for 360 min, T=2 år  | d360T2 (mm/h)  | 1.20 ( $\pm$ 0.10)     | 0.06  |
| Regnintensitet for 360 min, T=10 år | d360T10 (mm/h) | 1.30 ( $\pm$ 0.20)     | 0.04  |
|                                     |                |                        | 1     |

Følgende regnserier er ikke klimafremskrevet, men tilfældigt regenereret (*resamplet*), så de statistisk repræsenterer Viby-regnserien. Der er udvalgt de tre regnserier, som samlet set stemmer bedst overens med den originale serie. Der er i alt genereret 1000 regnserier, hvor de tre nedenstående har de højeste P-værdier. P=1 svarer til et fuldstændigt statistisk sammenfald af kunstig serie mod referenceserien. Der er udvalgt tre serier for at undersøge variabiliteten i de genererede serier.

I det nedenstående er tidserierne vist sammen med figurer, der viser, hvorledes serierne passer på de forskellige målparametre.

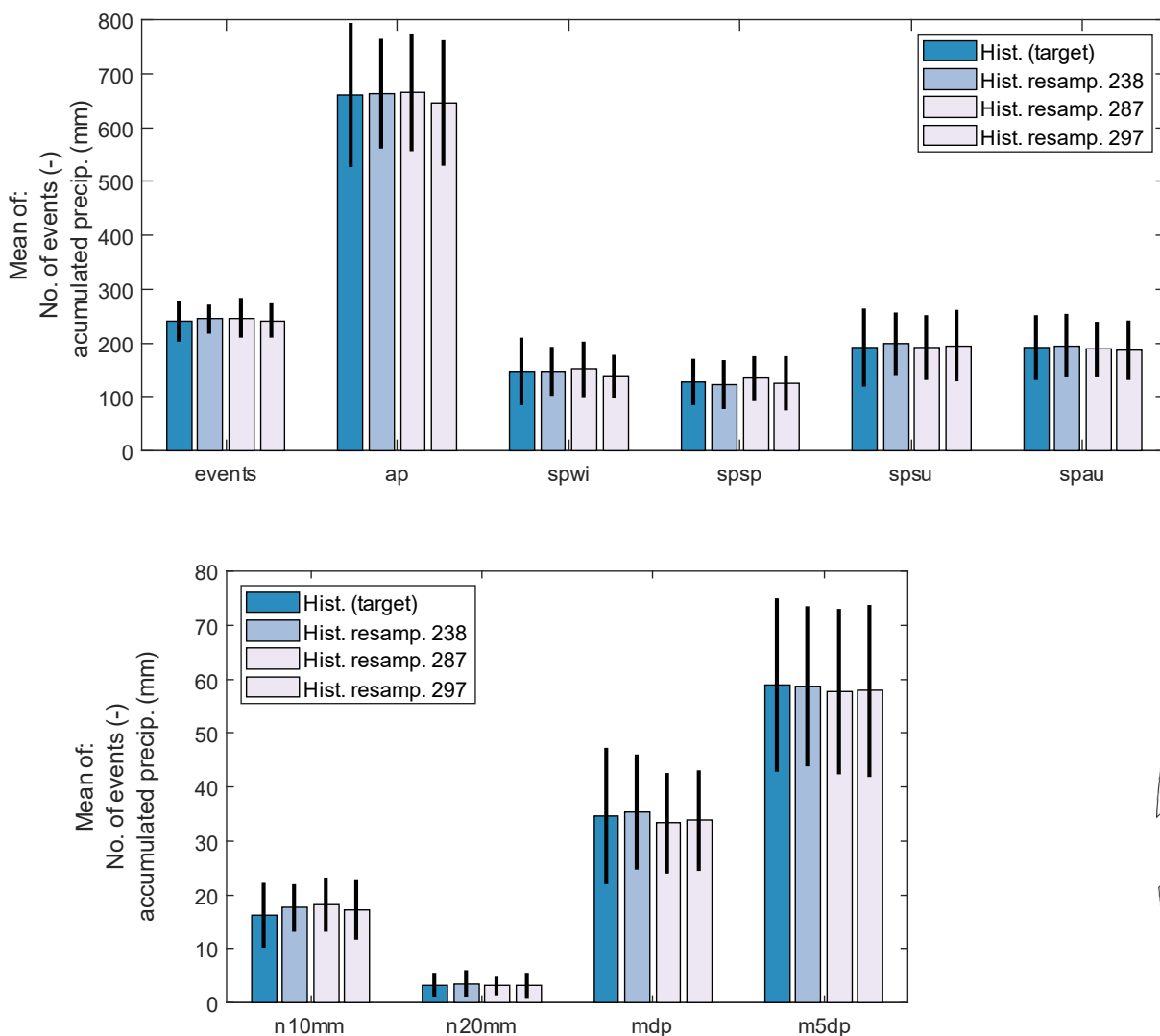
Tabel 5.2: Regenererede serier, der repræsenterer det nuværende klima.

| Simulering nr. | P <sub>total</sub> | Metode                   | Filnavn   |
|----------------|--------------------|--------------------------|---|
| 238            | 0.969              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | Resamp5177_v2_2_No238.dfs0<br>Resamp5177_v2_2_No238.km2 |
| 287            | 0.976              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | Resamp5177_v2_2_No287.dfs0<br>Resamp5177_v2_2_No287.km2 |
| 297            | 0.974              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | Resamp5177_v2_2_No297.dfs0<br>Resamp5177_v2_2_No297.km2 |

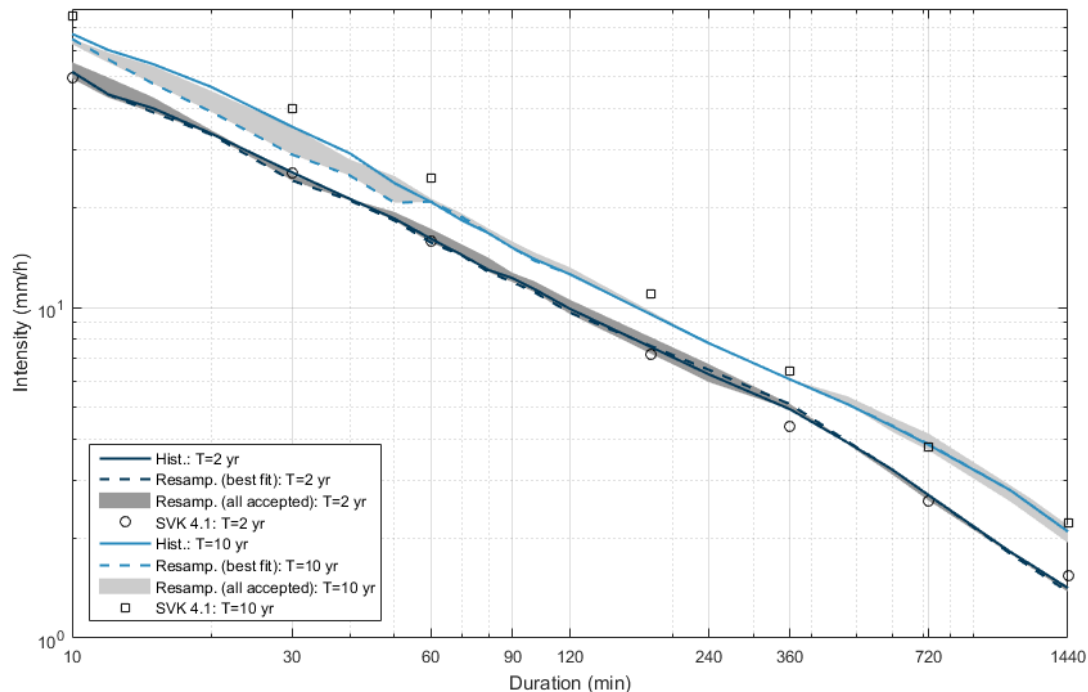


Figur 5.2. Tidserieafbildning af kunstige regnserier, som repræsenterer det nuværende klima.

På nedenstående figurer er vist resultatet af evalueringen af de kunstige regnserier, som repræsenterer det nuværende klima. De fuldt optrukne søjler beskriver middelværdierne for klimaparametrene angivet i Tabel 5.1. De sorte error bars beskriver usikkerheden angivet som  $\pm 1 \times$  standard-afvigelsen. Målet er overensstemmelse mellem målparameteren i mørk blå og statistikken på de kunstigt fremstillede serier (resamplede). Resultaterne viser afvigelser på nogle få procent, og det vurderes, at de kunstige serier statistisk kan repræsentere reference-regnserien ift. de valgte klimaparametre. På tilsvarende vis er der god overensstemmelse på ekstremstatistikken for det nuværende klima (Figur 5.4). Der ses en lille tendens til, at SVK-statistikken ligger højere end statistikken for reference-regnserien. Det skyldes, at der i den regionale statistik laves midlinger over flere regnmålere.



Figur 5.3. Evaluering af de kunstige regnserier, der repræsenterer det nuværende klima. Forkortelserne for klimaparametrene findes i tabel 5.1.



Figur 5.4. IDF-kurver for hhv. gentagelsesperioder 2 og 10 år for referenceserie, kunstige serier og værdier fra SVK-statistikken v. 4.1.

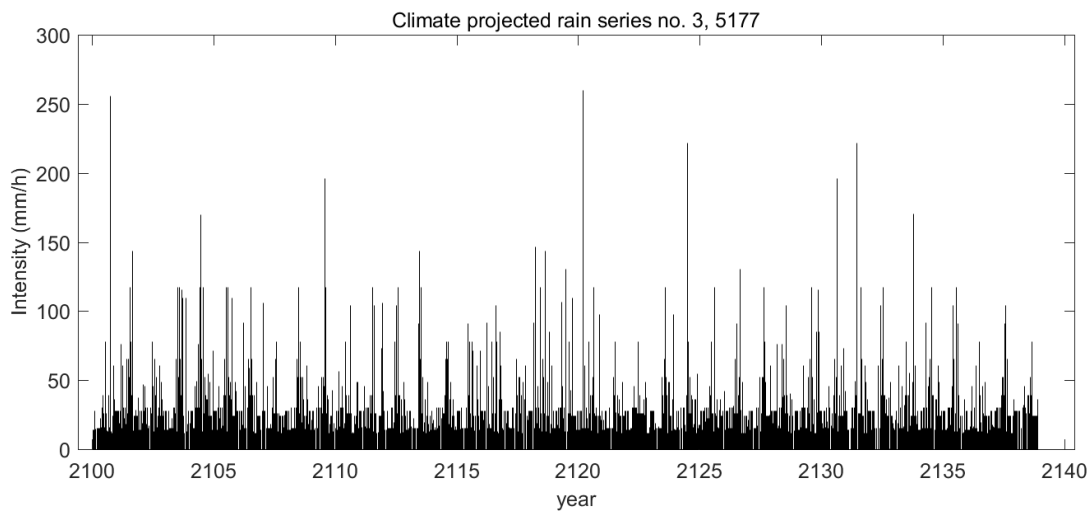
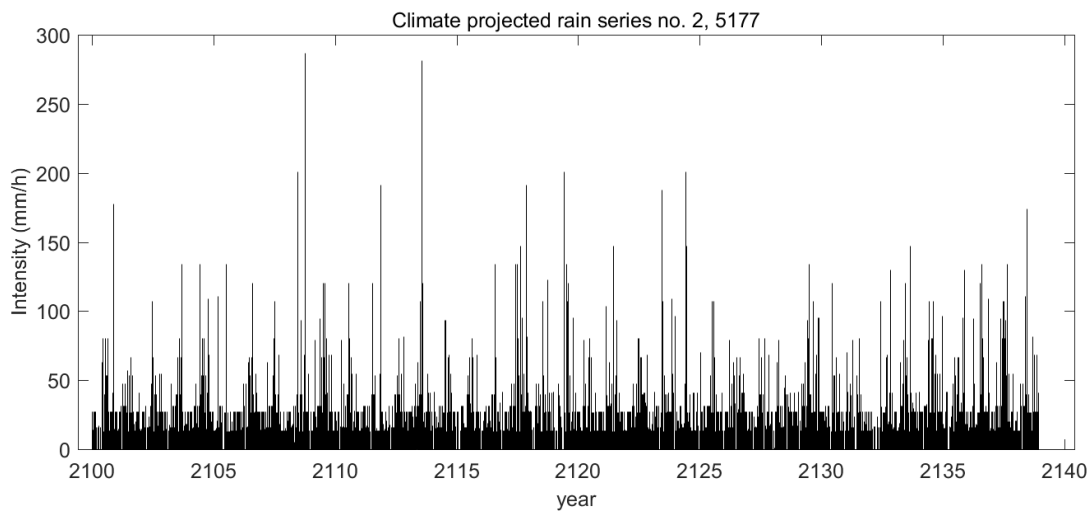
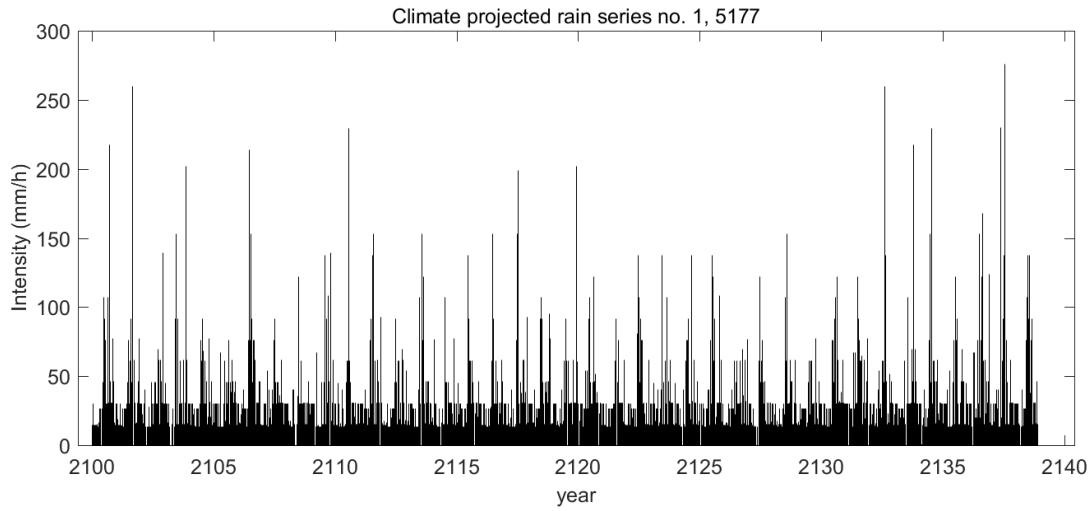
De klimafremskrevne serier fremskrives vha. RCP4.5 -scenariet til år 2100-2138 ud fra parametrene angivet i Tabel 5.1. Da der er væsentlig større usikkerhed på de klimafremskrevne serier i forhold til de kunstige serier for det nuværende klima, er der genereret i alt fem klimafremskrevne serier. Tidsserier og figurer, der beskriver enkelte målparametre, er vist i det nedenstående.

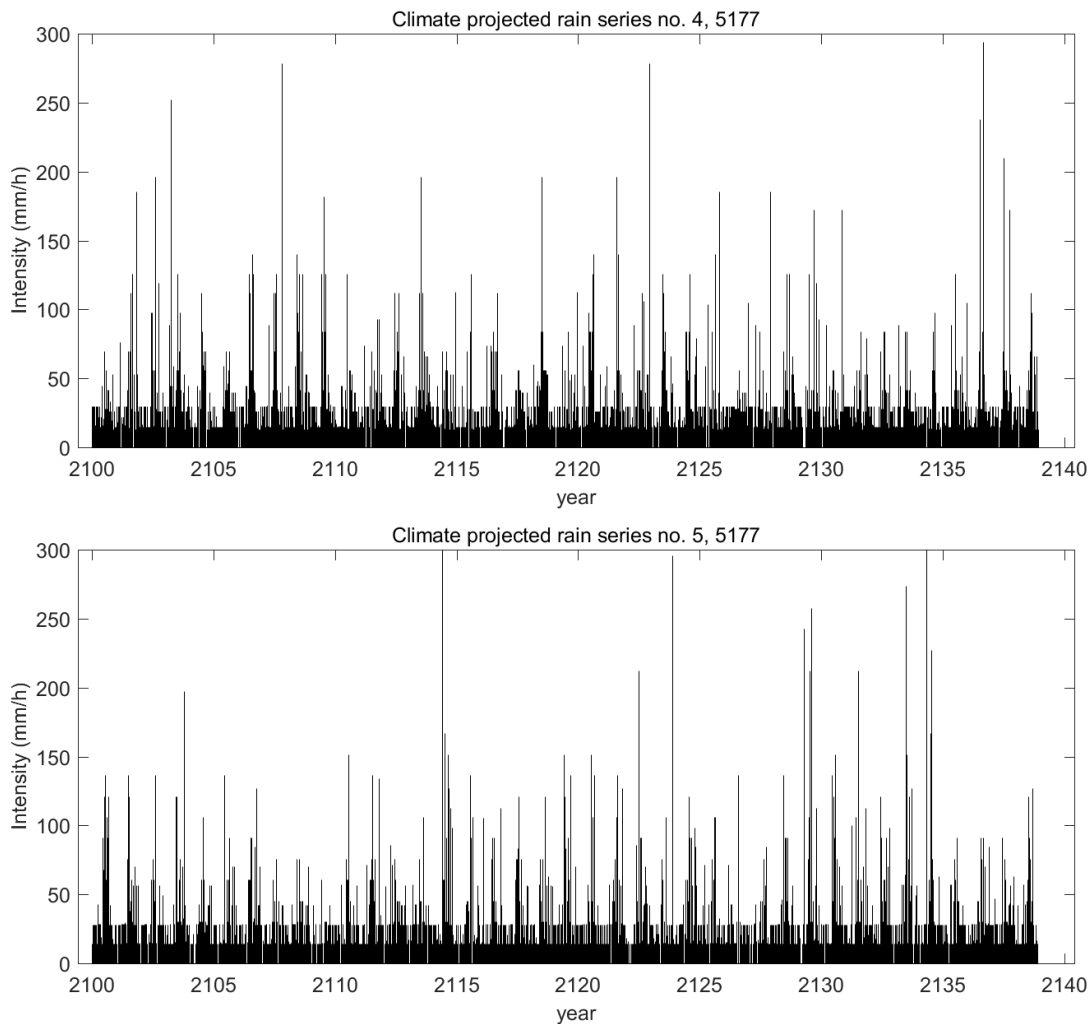
Til sammenligningerne mellem nuværende og fremtidigt klima, som præsenteres senere i dette afsnit, anvendes også en såkaldt faktor-fremskrevet regnserie. Den faktor-fremskrevne regnserie er den originale reference-regnserie, hvor alle regnintensiteter er multipliceret med en klimafaktor på 1.2. Der benyttes således et konstant tillæg på 20 % i stedet for de i Tabel 5.1 angivne klimaparametre. I den faktor-fremskrevne regnserie er hændelsernes kronologi og antal således ikke ændret ift. den originale regnserie.

Tabel 5.3 Regenererede serier, der repræsenterer det fremtidige klima.

| Nummer | P <sub>total</sub> | Metode                   | Periode   | Filnavn   |
|--------|--------------------|--------------------------|-----------|---|
| 2492   | 0.881              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | 2100-2138 | ClimateProjected5177_v2_2_No2492.dfs0<br>ClimateProjected5177_v2_2_No2492.km2 |
| 3816   | 0.951              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | 2100-2138 | ClimateProjected5177_v2_2_No3816.dfs0<br>ClimateProjected5177_v2_2_No3816.km2 |
| 7008   | 0.930              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | 2100-2138 | ClimateProjected5177_v2_2_No7008.dfs0<br>ClimateProjected5177_v2_2_No7008.km2 |
| 7117   | 0.894              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | 2100-2138 | ClimateProjected5177_v2_2_No7117.dfs0<br>ClimateProjected5177_v2_2_No7117.km2 |
| 8133   | 0.884              | MATLAB<br>KLIMAKS v. 2.2 | 2100-2138 | ClimateProjected5177_v2_2_No8133.dfs0<br>ClimateProjected5177_v2_2_No8133.km2 |



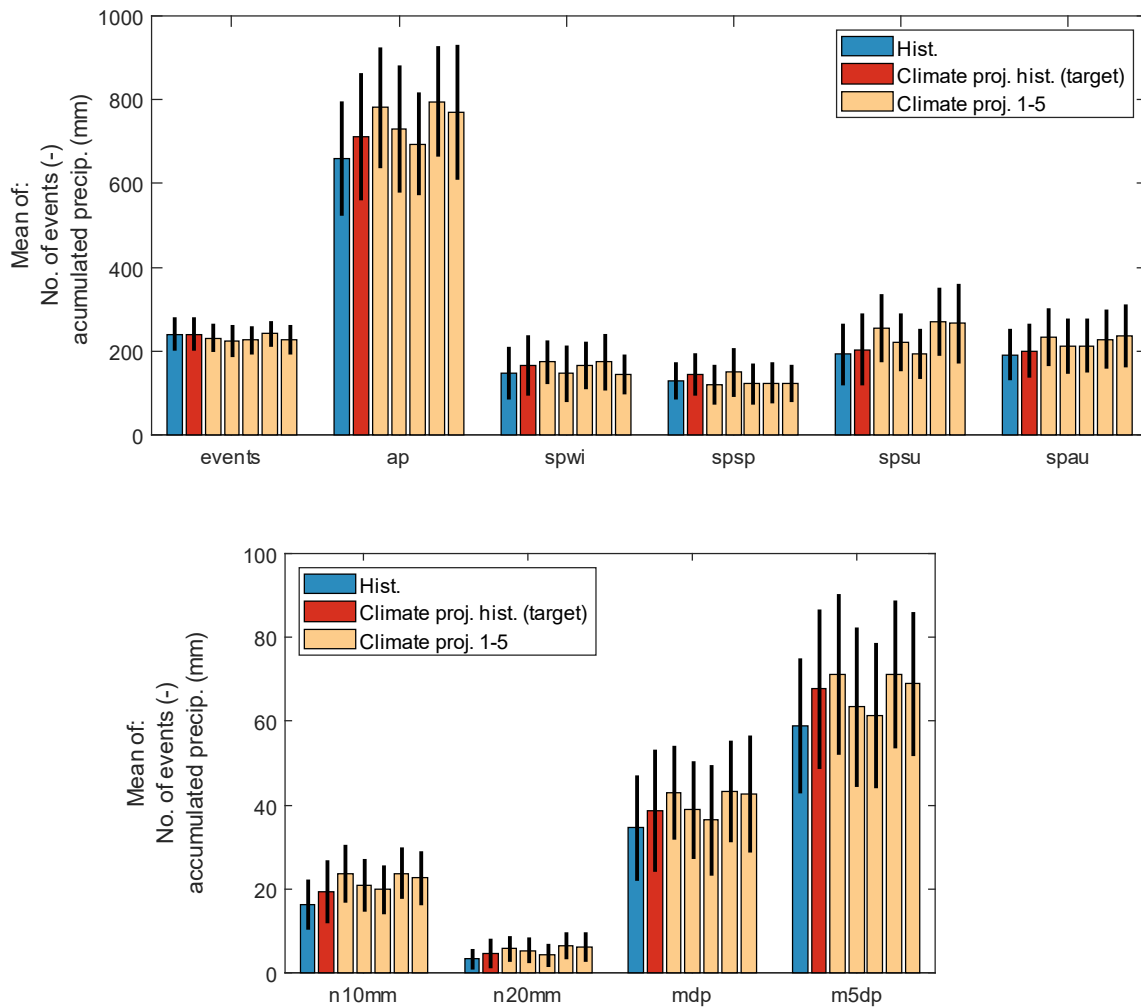




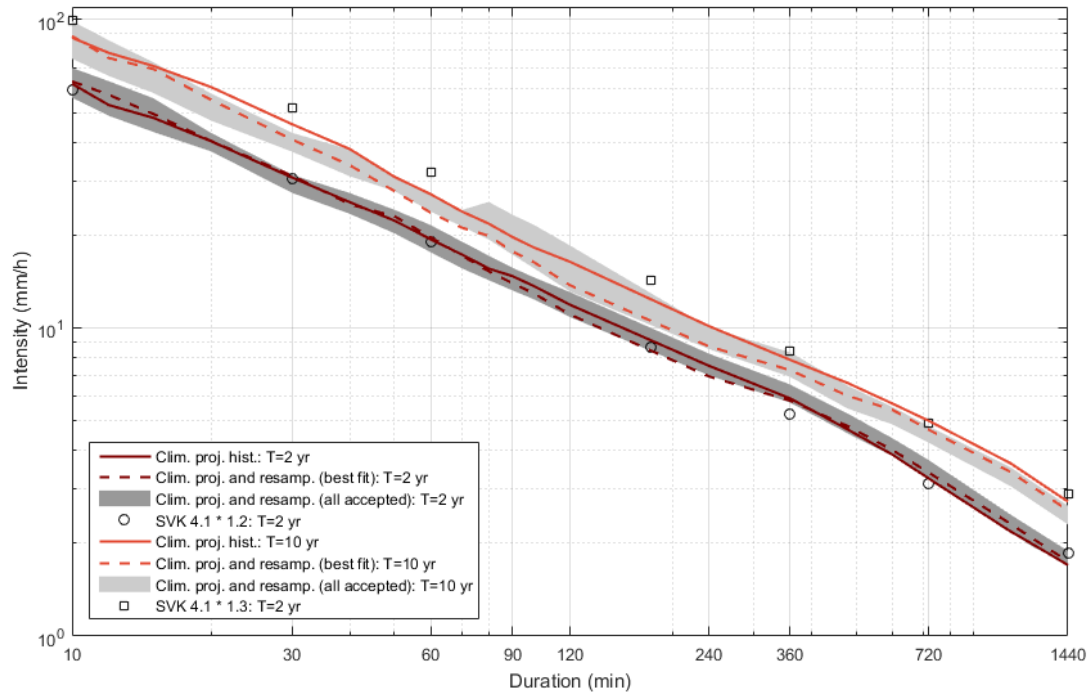
Figur 5.5. Tidsserieafbildning af fem klimafremskrevne regnserier.

I Figur 5.6 er evalueringen af de fem klimafremskrevne regnserier sammenfattet. Princippet er det samme, som er angivet i Figur 5.3. Dog er målværdierne (i blå for det nuværende klima) angivet sammen med målparametrene for det fremtidige klima (i rød) for at kunne vurdere, hvor meget de enkelte klimavariabler fremskrives. Generelt ses god overensstemmelse mellem målparametre og de fem klimafremskrevne serier, men dog større variabilitet serierne imellem i forhold til serierne for det nuværende klima. Det skyldes, at der også tillades en usikkerhed på klimafremskrivningsparametrene.

På tilsvarende vis er der god overensstemmelse på ekstremstatistikken for det fremtidige klima (Figur 5.7).



Figur 5.6. Evaluering af de klimafremskrevne regnserier. Parametrene svarer til de i tabel 1 angivne.



Figur 5.7. IDF-kurver for hhv. gentagelsesperioder 2 og 10 år for den fremskrevne referencereseriestatistik samt de klimafremskrevne serier og den klimafremskrevne SVK-statistik.

Ud fra de regenererede og klimafremskrevne serier konkluderes følgende:

- Der er god overensstemmelse mellem statistik på reference-regnserien og kunstige regnserier (ud fra opstillede krav og målparametre)
- Der er god overensstemmelse mellem dynamiske klimaparametre og klimafremskrevne regnserier (ud fra opstillede krav og målparametre)
- Der er stor variabilitet mellem de genererede serier, når usikkerheden på klimaparametre medregnes.

### 5.3.2 Bassindimensionering

Som en del af valideringen af de klimafremskrevne regnserier er der foretaget en bassindimensionering. Denne er dels gennemført med spildevandskomiteens værktøj (regneark, regionalregnrække, ver 4.1, SVK Skrift 30, 2014), dels med en boksmodel, hvor der frem for den regionale regnstatistik anvendes kontinuerte regnserier. Således er det en grundlæggende antagelse i Spildevandskomiteens regneark, at der er overensstemmelse mellem gentagelsesperioden for regnintensiteten ved den dimensiongivende regnvarighed og gentagelsesperioden for det dimensiongivende bassinvolumen. I boksmodellen beregnes gentagelsesperioden for det dimensiongivende bassinvolumen direkte ud fra en kontinuert simulering af den fra oplandet tilstrømmende vandmængde og den fastsatte udløbsvandføring (afløbstallet). Herved beregnes bassinets dimensiongivende volumen direkte ud fra simulerede volumener frem for en beregning ud fra regnstatistikken. I Spildevandskomiteens regneark kompenseres for dette fænomen ved at forøge de nødvendige bassinvolumener med 20 %.

Formålet er at undersøge, i hvor høj grad dimensionering af bassiner med lave afløbstal er påvirket af såkaldte koblede hændelser. Bassinerne har, når de dimensioneres med et lavt afløbstal, en lang tømme tid, hvorfor de ikke når at tømme ud inden næste regnhændelse sker. Herved bliver de dimensionsgivende regn for det pågældende bassin meget lange og bestående af adskillige på hinanden følgende hændelser.

I forhold til klimaændringernes påvirkning af dette er det ligeledes et formål at undersøge, hvorledes bassindimensioneringen påvirkes af klimaændringerne i et klimascenarie, hvor de ekstreme hændelser bliver kraftigere, men færre, og der for sommerhændelsernes vedkomme vil være længere tørkeperioder mellem hændelserne.

Der tages udgangspunkt i et enhedsopland med følgende karakteristika:

- Reduceret oplandsareal:  $Fr = 1$  ha
- Afløbstal  $a = 0.5, 1.0$  og  $5.0$  l/s/ha
- Klimafaktor (SVK 4.1):  $k_f = 1.2$
- Gentagelsesperiode for et fyldt bassin:  $T = 5$  år
- Lokalitet: Viby

Beregning af nødvendigt bassinvolumen gennemføres med følgende metoder og inputs for det nuværende klima:

- Boksmode med Viby regnserien (reference-regnserien i KLIMAKS)
- Boksmode med 10 andre SVK-regnserier, som har mindre end 5 % afvigelse i årsnedbøren i Aarhus, og som alle har en længde på mere end 25 år.
- Boksmode med 3 kunstige regnserier, der repræsenterer det nuværende klima
- SVK 4.1 regneark (med 20 % tillæg for koblede hændelser)
- SVK 4.1 regneark (uden 20 % tillæg for koblede hændelser)

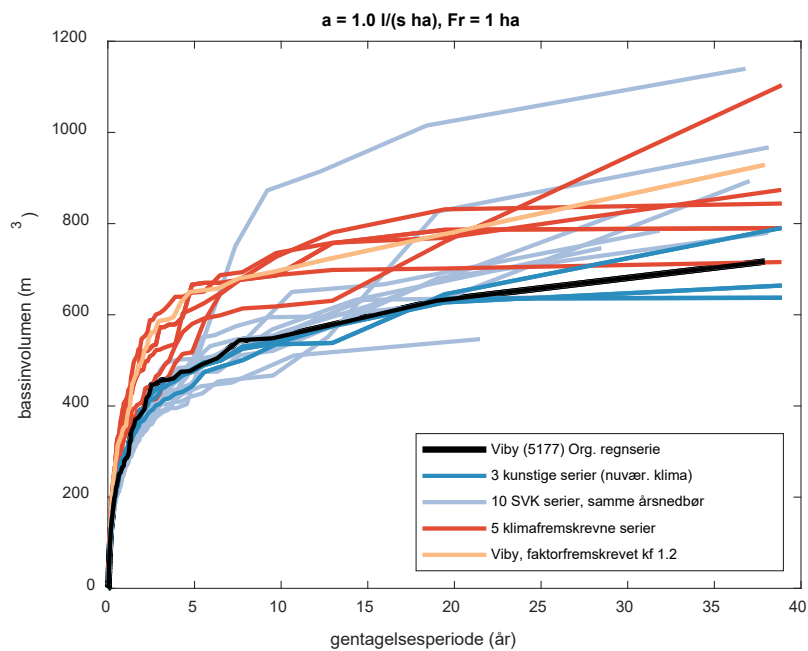
Beregning af nødvendigt bassinvolumen gennemføres med følgende metoder og inputs for det fremtidige klima:

- Boksmode med 5 kunstige regnserier, der repræsenterer det fremtidige klima (i det følgende refereret til som klimafremskrevne serier)
- Boksmode med Viby regnserien, hvor alle intensiteter er ganget med en klimafaktor på 1.2 (i det følgende refereret til som den faktorforemskrevne serie)
- SVK 4.1 regneark (med 20 % tillæg for koblede hændelser og klimafaktor 1.2)
- SVK 4.1 regneark (uden 20 % tillæg for koblede hændelser og klimafaktor 1.2)

Figur 5.8 viser et eksempel på den bassindimensionering, hvor der anvendes boksmodeller med forskellige regninputs og et afløbstal på  $a=1$  l/(s ha).

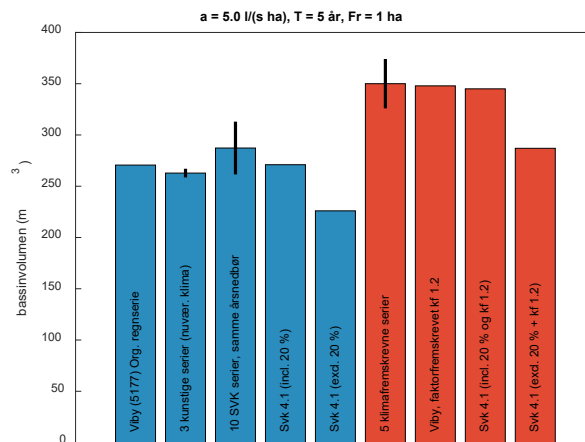
I det nuværende klima ligger de 3 kunstige serier tæt omkring kurven for den originale Viby-regnserie, og det vurderes, at disse derfor statistisk repræsenterer det samme. De ti regnserier, som er udvalgt, da de har en årsmiddelnedbør inden for 5 % af årsmiddelnedbøren i Aarhus, har også sammenfaldende volumener op til en gentagelsesperiode på ca. 5 år, hvorefter der er større forskelle på serierne. Det viser den usikkerhed, der er forbundet med at estimere gentagelsesperioder større end  $1/5$ - $1/4$  af seriernes længde, som ofte er angivet i litteraturen som en afskæringsværdi.

De beregnede nødvendige bassinvolumener for det fremtidige klima er større og indeholder også en vis spredning som funktion af stigende gentagelsesperiode.

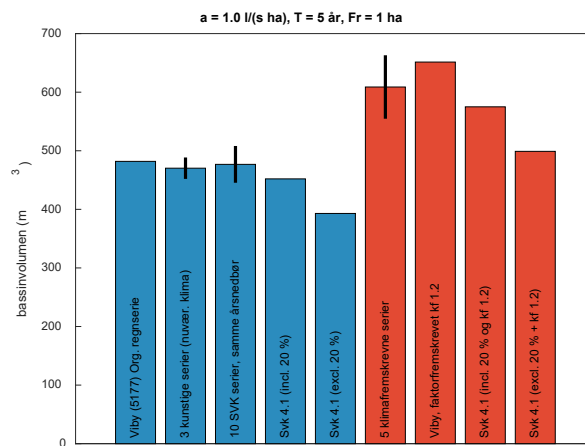


Figur 5.8. Beregnede nødvendige bassinvolumener estimeret med kontinuerte regnsrier og boksmode som funktion af gentagelsesperiode. Divideres y-aksen med 10, fås bassinvolumet i mm.

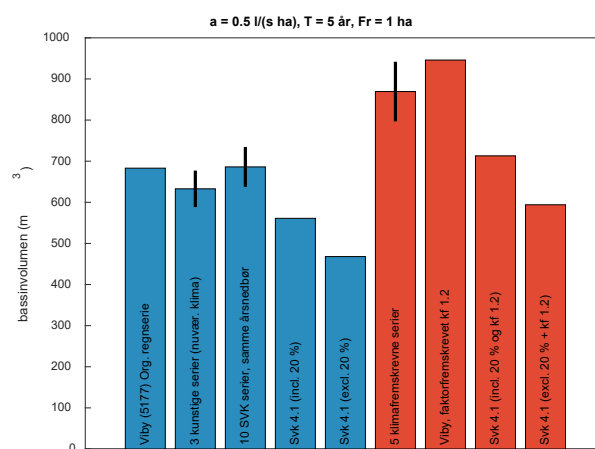
I nedenstående figurer er de nødvendige bassinvolumener beregnet for alle opstillede metoder og inputs med forskellige afløbstal.



Figur 5.9. Beregnede nødvendige bassinvolumener med afløbstal a=5 l/(s ha).



Figur 5.10. Beregnede nødvendige bassinvolumener med afløbstal a=1 l/(s ha).



Figur 5.11. Beregnede nødvendige bassinvolumener med afløbstal a=0.5 l/(s ha).

Der er et generelt sammenfald mellem alle boksmodellerne for det nuværende klima. Anskuet over hver af de tre forskellige afløbstal-simuleringer giver Viby-regnserien således de samme volumener som gennemsnittet af de tre kunstige regnserier og de 10 målte serier. Det er dog vigtigt at bemærke, at der på de 10 serier er en ikke-uvæsentlig spredning på resultaterne (vist som den sorte error bar) afhængigt af, hvilken serie der vælges.

Dimensionering med SVK-regnearket viser sin begrænsning ved afløbstallet på  $a=0.5$  l/s/ha, da der kun tages højde for de koblede hændelser ved at øge det nødvendige volumen med 20 %. Således er den regionale regnstatistik ikke repræsentativ for de lange dimensionsgivende regnvarigheder. Tømmetiden for bassinet er i designsituationen med  $a=0.5$  l/s/ha omkring 22 dage.

I det fremtidige klimascenarie (de røde søjler på figurerne) er der sammenfald mellem metoderne for det højeste afløbstal på  $a=5$  l/s/ha, men forskellene bliver større, jo lavere afløbstallet bliver. Især er det tydeligt, at den faktorfremskrevne regnserie vil give et større bassinvolumen ved det lave afløbstal, hvilket skyldes, at denne metode er en skalering af den originale serie, og derfor ikke ændrer på sammensætningen af hændelser og tiden mellem dem. De 5 klimafremskrevne serier har netop en anden fordeling af hændelserne og inkluderer fx færre sommerhændelser med længere tid mellem dem. Dette fænomen ses af et mindre gennemsnitligt nødvendigt bassinvolumen for afløbstallene  $a=1$  l/s/ha og  $a=0.5$  l/s/ha.

I nedenstående tabel er der beregnet gennemsnitlige værdier for, hvornår på året de dimensionsgivende hændelser forekommer, med de forskellige afløbstal og i det nuværende og klimafremskrevne scenarie. I alle tilfælde er det hændelser i sommerperioden, som er dimensionsgivende. Følgende observeres:

- jo højere afløbstal, des mere er det de enkeltstående kraftige sommerhændelser, der er dimensionsgivende
- jo lavere afløbstal, des mere er det de koblede langvarige sensommer-efterårshændelser, der er dimensionsgivende

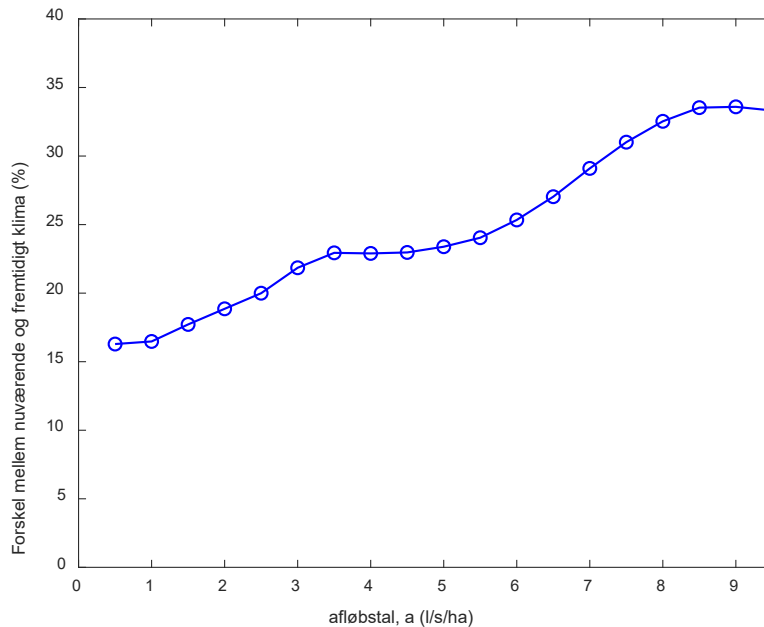
Der er tendenser til, at de dimensionsgivende hændelser, når der dimensioneres med et lavt afløbstal, bliver flyttet fra midt på sommeren til sensommeren eller starten af efteråret i det fremtidige klima. Tilsvarende forekommer den dimensionsgivende regn i fremtiden for et højt afløbstal tidligere på året, dvs. i slutningen af foråret/starten af sommeren (Tabel 5.4.: Sammenhæng mellem afløbstal for, hvornår på året dimensionsgivende hændelser forekommer.)

Tabel 5.4. Sammenhæng mellem afløbstal for, hvornår på året dimensionsgivende hændelser forekommer.

| Afløbstal        | Nuværende klima     | Fremtidigt klima    |
|------------------|---------------------|---------------------|
| $a=0.5$ l/(s ha) | 24. jun. - 18-aug.  | 18. jul. - 18. sep. |
| $a=1.0$ l/(s ha) | 18. jun. - 24. jul. | 6. jun. - 1. aug.   |
| $a=5.0$ l/(s ha) | 12. jun. - 18. jul. | 18. maj - 18. jul   |

I Figur 5.12 vises sammenfattende og mere generaliserende resultater, der viser, hvor meget større et bassin skal være i det fremtidige klima i forhold til den nuværende (reference-serien). Det er tydeligt, at der er en afhængighed af afløbstallet, som skyldes, at nedbørsfordelingen over sommer- og efterårsperioden er anderledes i det fremtidige klima. Således kommer de længere tørkeperioder til at virke til gunst for de nødvendige bassinvolumener, baseret på små afløbstal.





Figur 5.12 Sammenhæng mellem afløbstal og forskellen mellem reference-regnserie og gennemsnittet af de klimafremskrevne serier.

Baseret på ovenstående beregning og tolkninger af resultaterne konkluderes følgende:

- Jo lavere afløbstal, des vigtigere er koblede hændelser og dermed tiden mellem hændelser. Derfor er det nødvendigt med en metode, der ikke blot skalerer regnen i det fremtidige klima, men tager højde for, at årstiderne og ekstremterne ændres forskelligt. En faktorforemskrevet regnserie vil i dette tilfælde overestimere det nødvendige bassinvolumen, og en anvendelse af Spildevandskomiteens værktøjer vil tilsvarende underestimere det nødvendige volumen.
- Ved høje afløbstal er det i overvejende grad enkeltstående kraftige sommerhændelser, der er dimensionsgivende, hvorfor det kan være tilstrækkeligt at anvende en faktorforemskrevet serie i en boksmode eller anvende de statistiske værktøjer i Spildevandskomiteens regneark, sammen med en velvalgt klimafaktor.

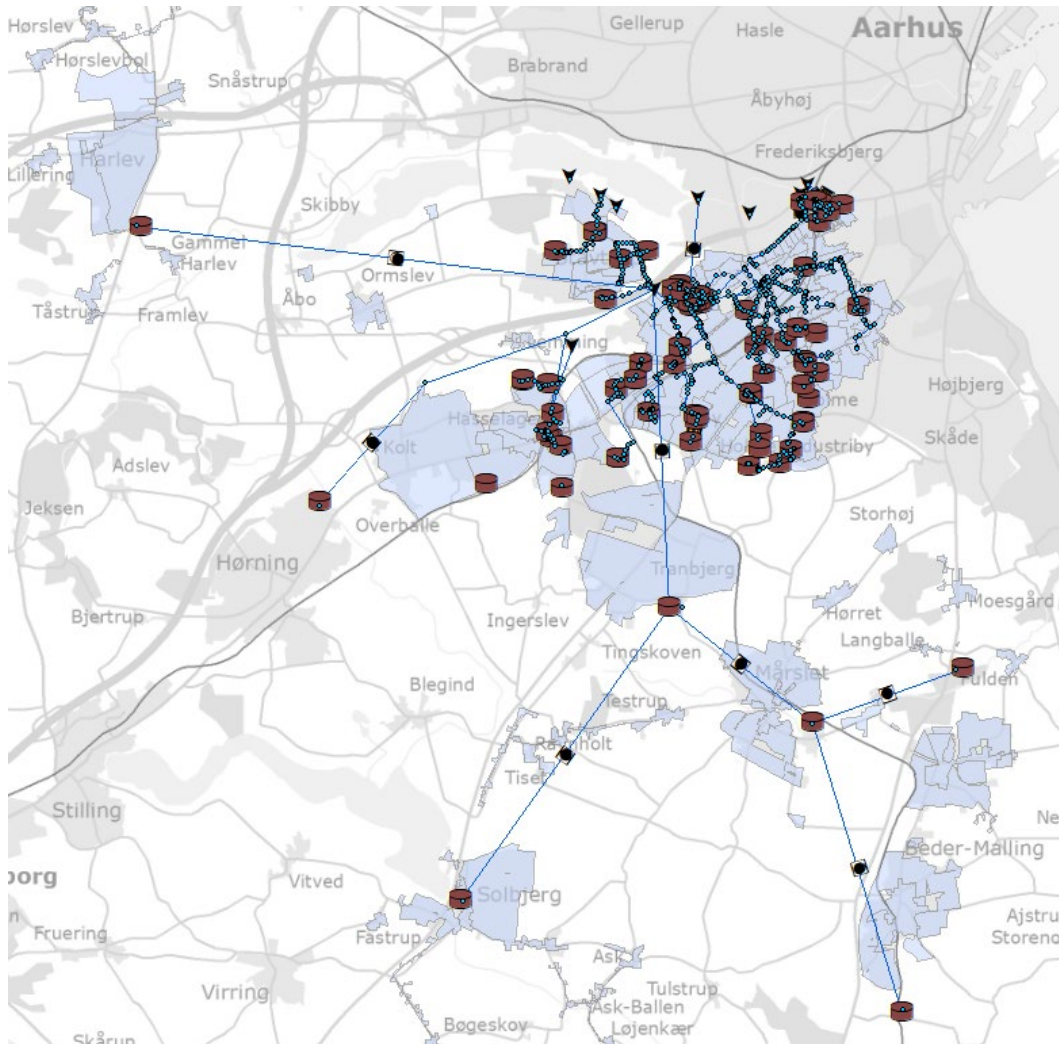
### 5.3.3 Demonstration og konsekvensberegning

I det følgende beskrives det, hvordan de genererede regnserier er afprøvet i en hydraulisk model for at demonstrere anvendelsen af klimafremskrevne regnserier, se responsen i en afløbsmodel samt vurdere konsekvensen af at bruge en kunstigt klimafremskrevet regnserie i stedet for at bruge en faktorforemskrevet historisk regnserie.

I projektet har der været tre milepæle, hvor der løbende er optimeret på metoden for generering af klimafremskrevne regnserier. I hver milepæl er anvendelsen af klimafremskrevne regnserier og responsen i afløbssystemet blevet kontrolleret for at give input til udviklingen af metoden for klimafremskrivning af regnserier.

### 5.3.3.1 Milepæl 1, Oplandet til Viby renseanlæg

I Milepæl 1 blev de klimafremskrevne regnserier testet på en hydraulisk model for oplandet til Viby Renseanlæg. Modellen er en overordnet model for det totale opland, som har en størrelse på i alt 1.100 hektar. Modellen er simplificeret, således at der kun er medtaget hovedledninger, overløbsbygværker og bassiner. I figur 5.13 ses et udklip fra MIKE URBAN med model-setuppet.



Figur 5.13. Hydraulisk model for oplandet til Viby Renseanlæg

Nedenfor er listet en række nøgletal for modellen:

- 1.100 hektar oplandsareal
- 532 hektar befæstet oplandsareal
- 450 hektar reduceret oplandsareal
- 995 knuder
- 64,6 km ledning
- 25 overløbsbygværker

I Milepæl 1 er der genereret 3 resamplede regnserier (nuværende klima) og 6 klimafremskrevne regnserier<sup>1</sup>. Herudover er den historiske regnserie fra Viby-måleren anvendt, se beskrivelse af kørsler i tabel 5.5.

Tabel 5.5. Beskrivelse af kørsler i Milepæl 1

| Regnserie           | Beskrivelse  |
|---------------------|--|
| Original            | Reference-regnserie, registrerede data på SVK regnmålerstation 5177 Viby Renseanlæg                  |
| Resample1-3         | Syntetisk genereret serie, nutidens klima  |
| ClimateProjected1-6 | Syntetisk genereret serie, klimaet i 2100  |
| Original 1,2        | Faktorfremskrevet, den originale regnserie fremskrevet på traditionel vis med en klimafaktor på 1,2  |
| Original 1,25       | Faktorfremskrevet, den originale regnserie fremskrevet på traditionel vis med en klimafaktor på 1,25 |

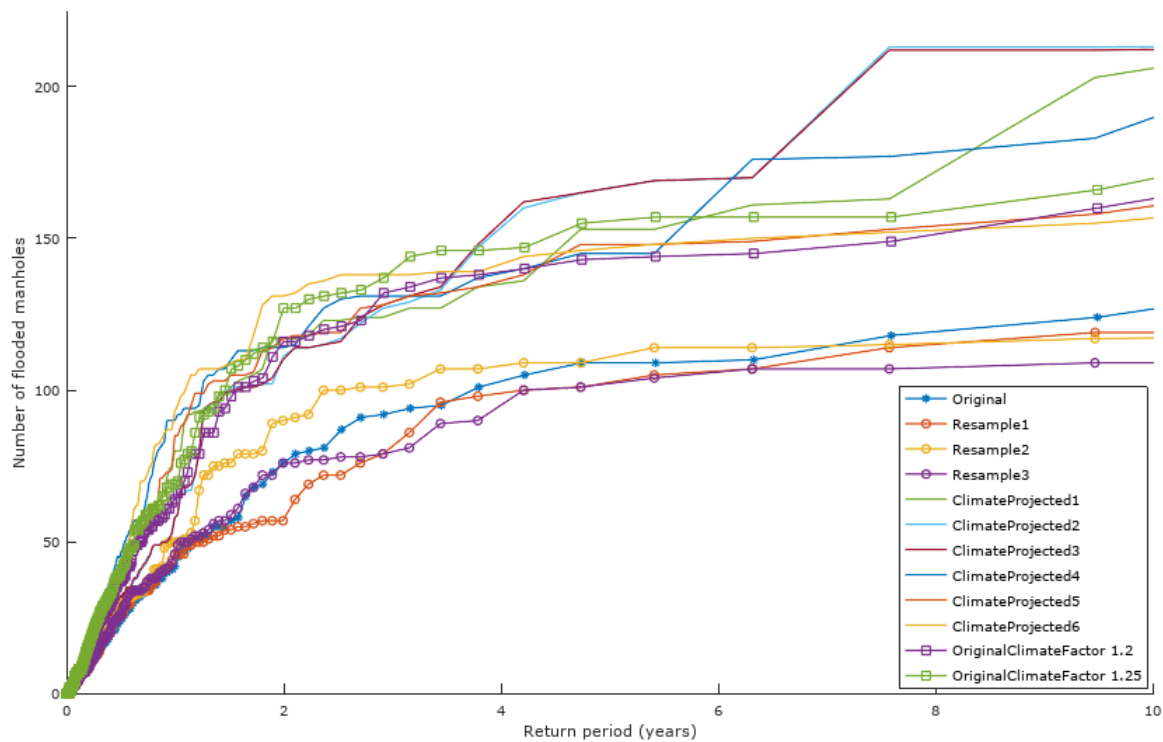
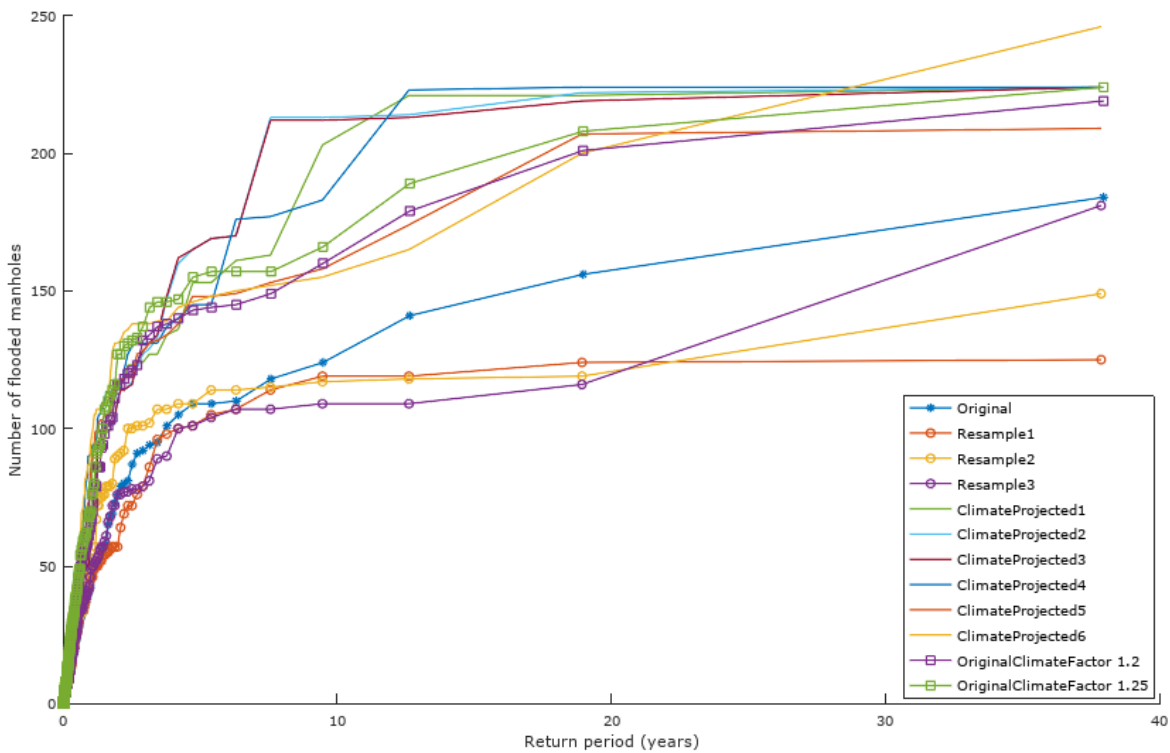
En skaleringsfaktor på 1,0 svarer til det nuværende klima. 1,2 svarer til den sikkerhedsfaktor, der skal anvendes til bassindimensionering i Aarhus Vand. 1,25 svarer omtrent til den anbefalede værdi for en 5-års hændelse i Spildevandskomiteens Skrift 30.

## Resultater

Alle regnserier er regnet igennem i MIKE URBAN-modellen. For at sammenligne responsen i afløbssystemet med de forskellige regnserier er der udtrukket data for antallet af brønde med stuvning over terræn som funktion af gentagelsesperioden, antal overløb pr. år og overløbsvolumen pr. år omregnet til mm.

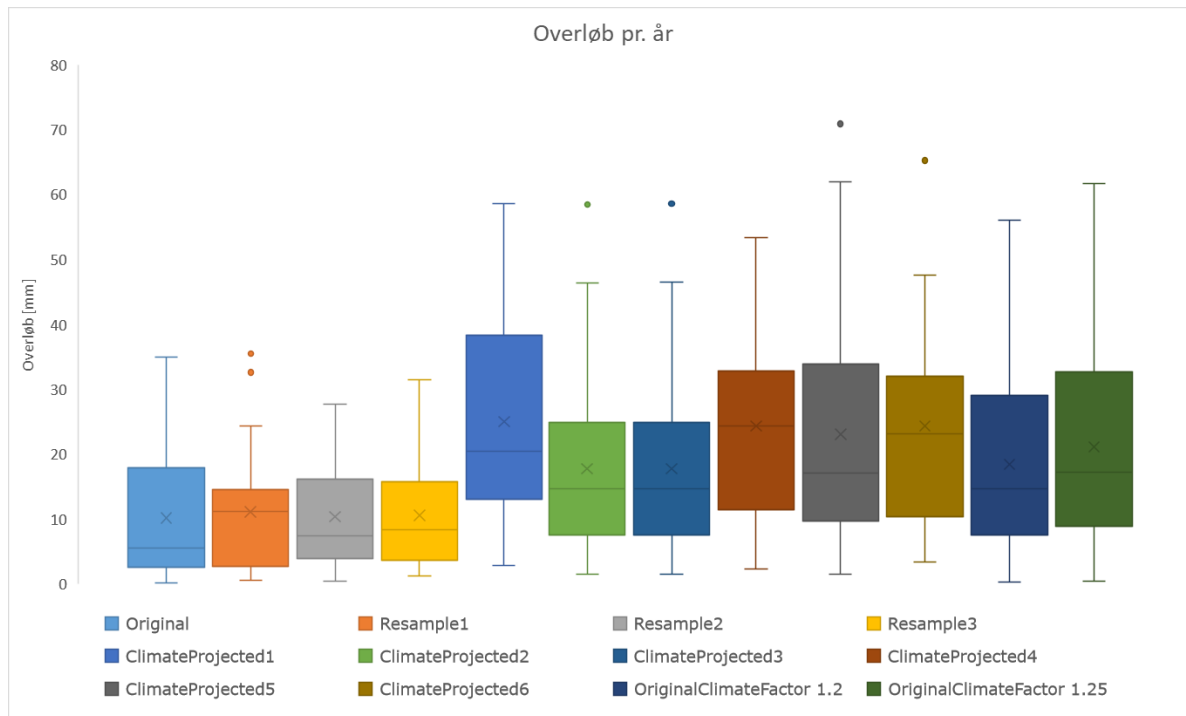
I figur 5.14 ses antallet af brønde med stuvning over terræn som funktion af gentagelsesperioden. Det ses, at den originale regnserie uden sikkerhedsfaktor og de 3 resamplede regnserier stemmer godt overens. Ved gentagelsesperioder højere end 10 år ligger de resamplede regnserier lidt lavt i forhold til den originale. Dette kan skyldes, at gentagelsesperioden er beregnet på et lille antal regnhændelser, når gentagelsesperioden bliver stor. De to historiske og de klimafremskrevne regnserier ligger fint sammen, men med lidt spredning mellem de klimafremskrevne. Dette viser den variabilitet, der er, når de klimafremskrevne regnserier genereres.

<sup>1</sup> Milepæl 1 er gennemført med 1. iteration af klimafremskrivningen. De anvendte serier afviger derfor fra dem, der er præsenteret i afsnit 5.3.1. Desuden er der her anvendt seks serier, der repræsenterer det fremtidige klima, og ikke fem som angivet i afsnit 5.3.1.



Figur 5.14. Antal brønde med stuvning over terræn som funktion af gentagelsesperioden. Øverst viser gentagelsesperiode op til 40 år, nederst viser gentagelsesperiode op til 10 år.

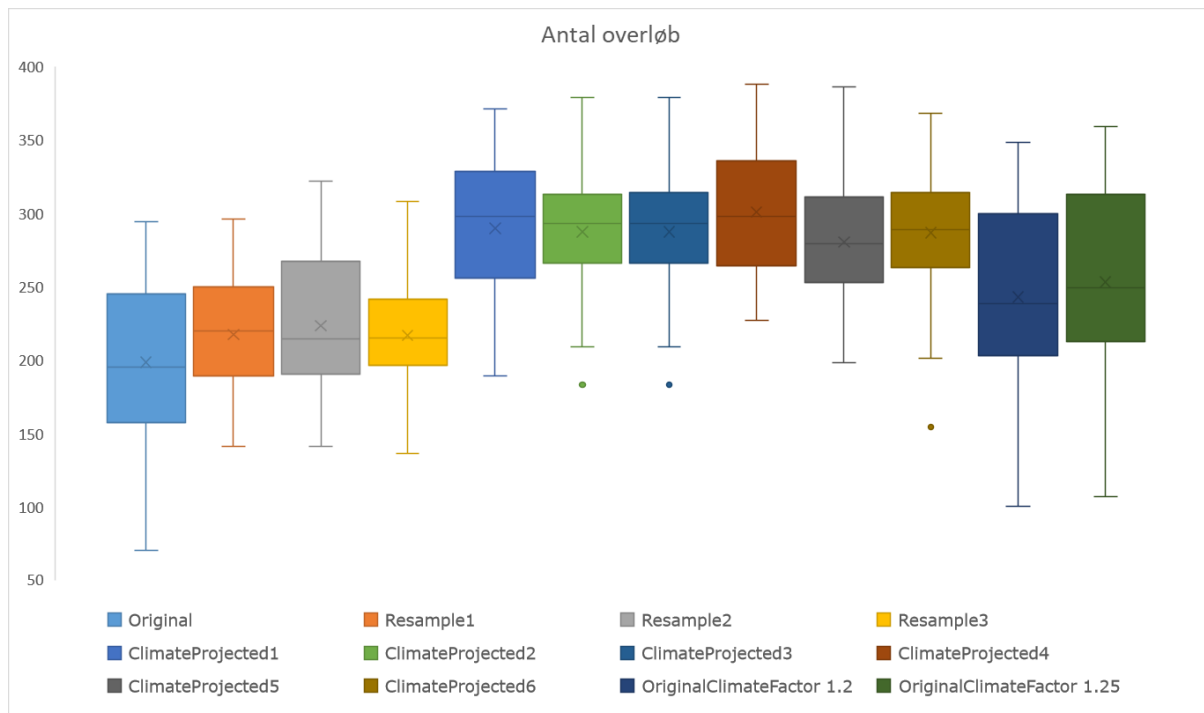
I Figur 5.15 ses de beregnede overløbsvolumener pr. år. Volumenerne er omregnet til millimeter for at gøre det uafhængigt af oplandsarealet. For at vise variabiliteten fra år til år er overløbsvolumenerne vist som boksplot. Herved er det muligt at se gennemsnit (kryds) og median (vandret streg), øvre og nedre 25 % fraktil (kassen) samt minimums- og maksimumsværdier (lodrette streger). Statistiske outliers (defineret som 2 x afstand fra hhv. 25 % og 75 % -fraktilen) er markeret med prikker.



Figur 5.15. Boksplot, der viser årlige overløbsvolumener pr. år, omregnet til mm, for hver regnserie.

Det kan ses, at de tre resamplede regnserier passer fint overens med den historiske, når man sammenligner overløbsvolumener. Gennemsnitsværdier passer rigtig godt, og spredningen mellem årene er lidt mindre end den historiske. De 6 klimafremskrevne regnserier ligger alle markant højere end den historiske og på niveau med de faktor-fremskrevne regnserier. Spredningen på de klima- og faktor-fremskrevne serier er større end serierne for det nuværende klima. Der er også en forholdsvis stor forskel i maksimumsværdier for årlige overløb ved de klimafremskrevne regnserier, hvilket viser, at variabiliteten mellem de genererede regnserier er vigtig at tage højde for.

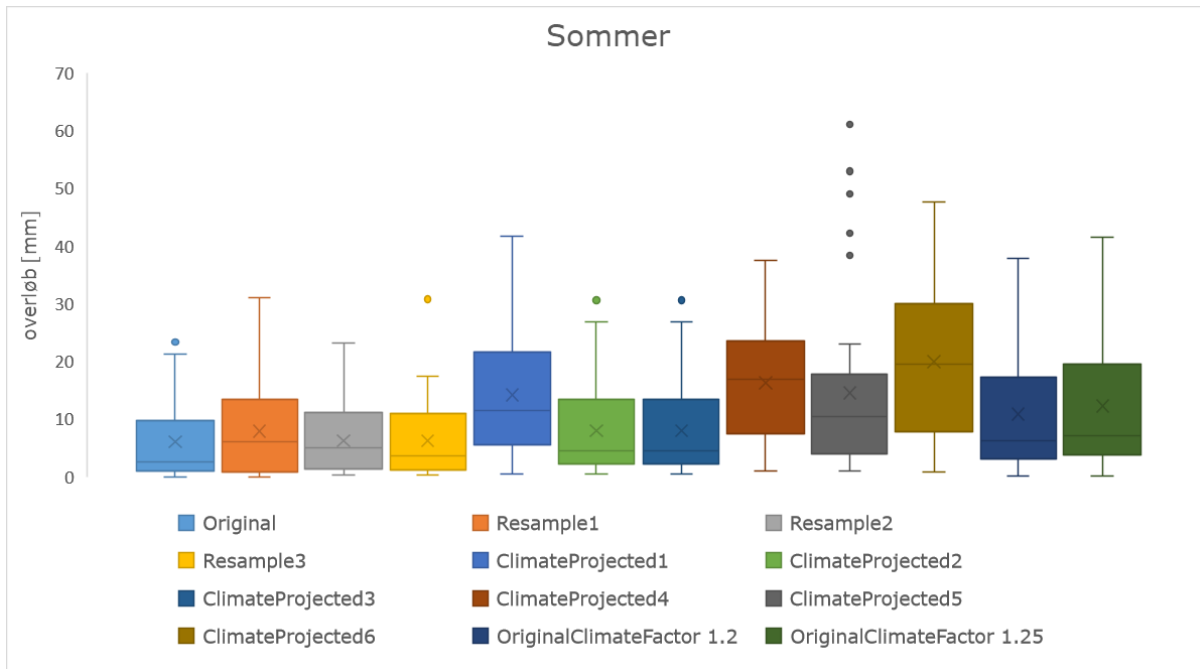
I figur 5.16 ses antallet af overløb pr. år. Det ses, at den historiske og de tre resamplede regnserier stemmer fint overens, og alle de klimafremskrevne ligger også fint på linje, dog lidt højere end de to faktor-fremskrevne regnserier. Dette skyldes især, at spredningen på de faktor-fremskrevne regnserier er meget stor, hvilket medfører, at gennemsnittet trækkes ned.



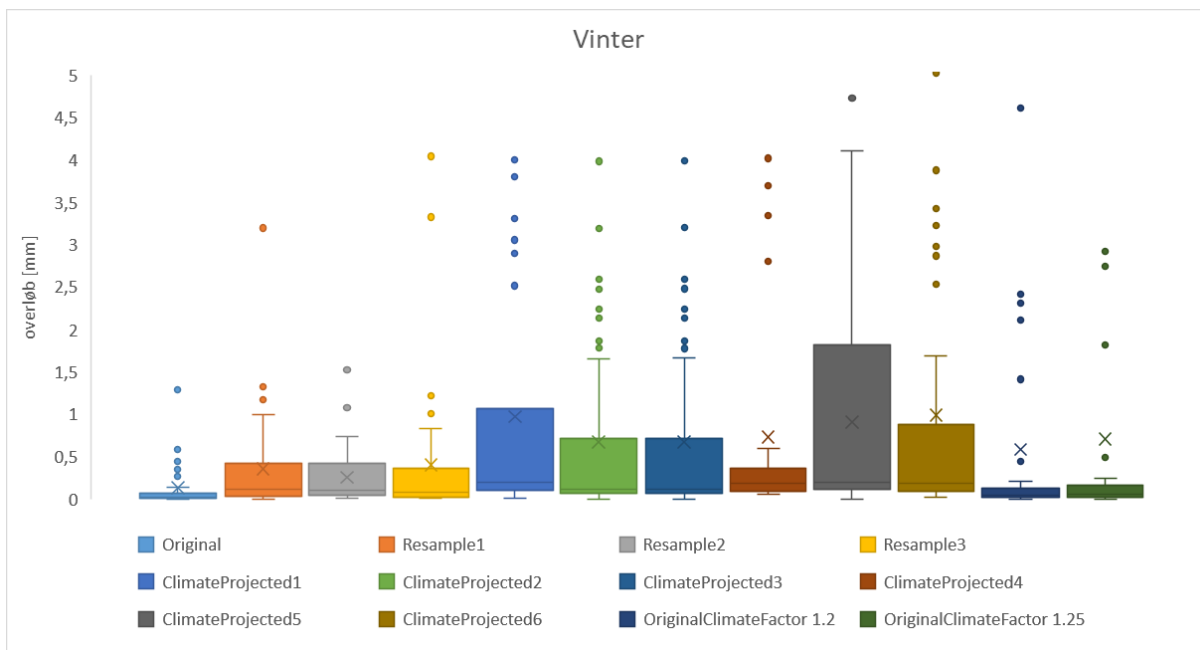
Figur 5.16. Antal overløb pr. år for hver regneserie

Ved at opdele overløbsstatistikken på sæsoner er det muligt at se responsen i afløbssystemet med de klima- og faktorfremskrevne regneserier for at belyse, hvordan målparametrene i genereringen af regneserier træder frem. I figur 5.17 og figur 5.18 ses overløbsvolumener for hhv. sommer- (juni, juli, august) og vintermånedene (december, januar, februar).

Det ses, at i sommermånedene er der god lighed mellem de klima- og faktorfremskrevne regneserier, mens der i vintermånedene er større variabilitet mellem de forskellige metoder, men også internt mellem de klimafremskrevne serier.



Figur 5.17. Overløbsvolumen pr. år i sommersæsonen



Figur 5.18. Overløbsvolumen pr. år i vintersæsonen

## Delkonklusion

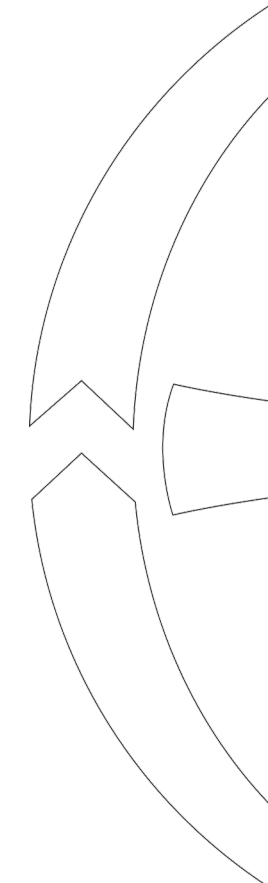
Analyserne af responsen i en afløbsmodel viser, at der er stor variabilitet de forskellige metoder imellem, ligesom der er stor variabilitet i de enkelte klimafremskrevne regnserier. Desuden ses der en tydelig forskel mellem sommer og vinter. Erfaringen fra disse modelkørsler er, at fremskrivningen på vinterhændelser adskiller sig fra faktorfremskrivningsmetoden. Desuden er det erfaret, at med en meget stor model, mange bassiner samt en simplificeret model er det vanskeligt at adskille de enkelte resultater og tendenser. I stedet bliver resultatet et gennemsnit af mange bassiner med forskellige afløbstal.

### 5.3.3.2 Milepæl 2, Stavtrup

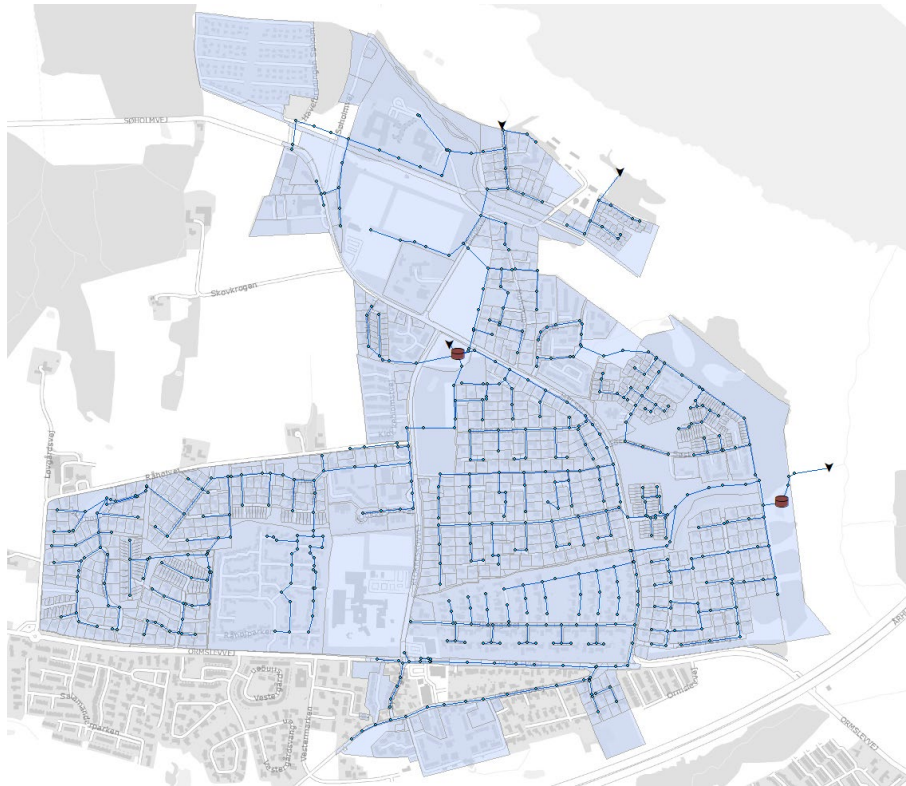
I Milepæl 2 blev de genererede regnserier testet på en hydraulisk model for Stavtrup, som er en mindre by vest for Aarhus. Modellen er en detailmodel, som er modificeret, således at der kun er to forsinkelsesbassiner med et afløbstal på 1 l/s/red. ha. Forsinkelsesvolumenet i de 2 bassiner er desuden ændret, så modellen ikke længere afspejler virkeligheden.

Nedenfor er listet en række nøgletal for modellen:

- 140 hektar oplandsareal
- 56 hektar befæstet oplandsareal
- 46 hektar reduceret oplandsareal
- 581 knuder
- 23 km ledning
- 2 overløbsbygværker
- Magasineringsvolumen i bassin B695 svarende til ca. 1 overløb om året ved SVK-regneark
- Magasineringsvolumen i bassin B869 svarende til ca. 17 overløb om året ved SVK-regneark







Figur 5.19. Hydraulisk model for Stavtrup

I Milepæl 2 er der genereret 3 resamplede regnserier (nuværende klima) og 5 klimafremskrevne regnserier. Herudover er den historiske regnserie fra Viby-måleren anvendt, se beskrivelse af kørsler i tabel 5.6.

Tabel 5.6. Beskrivelse af kørsler i Milepæl 2

| Regnserie           | Beskrivelse   |
|---------------------|---|
| Original            | Reference-regnserie, registrerede data på SVK-regnmålerstation 5177 Viby Renseanlæg                 |
| Resample1-3         | Syntetisk genereret serie, nutidens klima   |
| ClimateProjected1-5 | Syntetisk genereret serie, klimaet i 2100   |
| Original 1,2        | Faktorfremskrevet, den originale regnserie fremskrevet på traditionel vis med en klimafaktor på 1,2 |

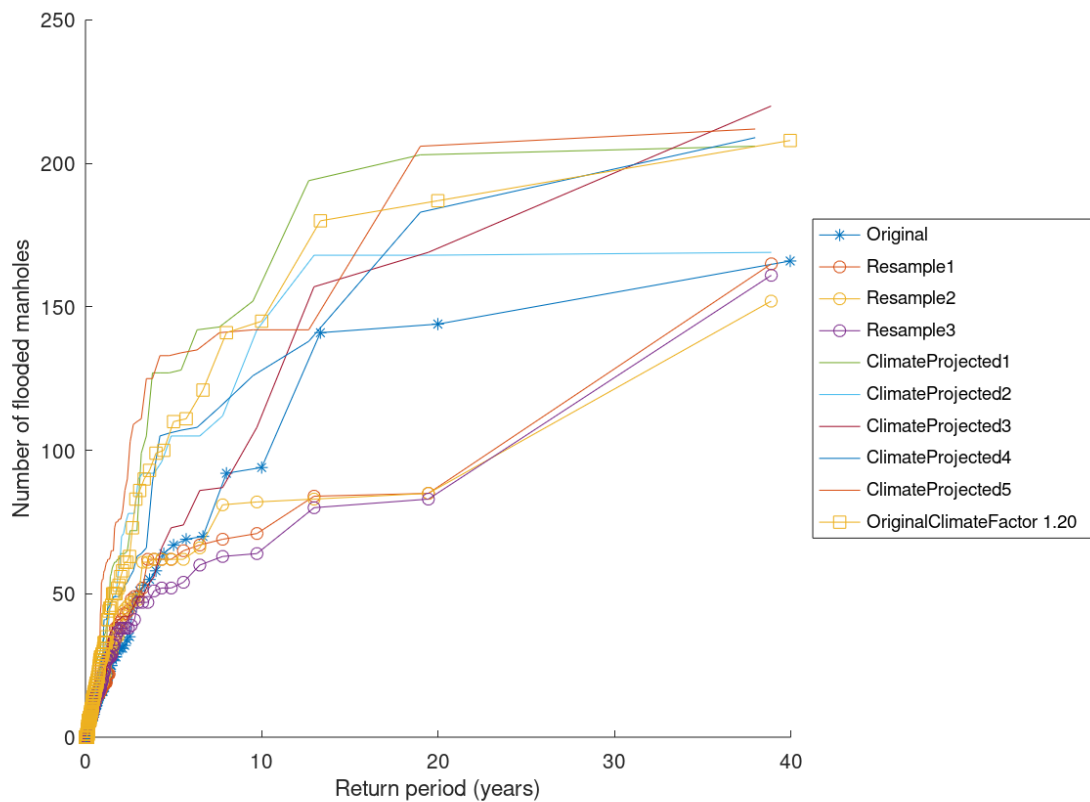
## Resultater

I figur 5.20 ses antallet af brønde med stuvning over terræn, plottet som funktion af gentagelsesperioden. I simuleringerne for det nuværende klima er der ca. 60 brønde, hvori der er stuvning til terræn for en gentagelsesperiode på  $T=5$  år (svarende til serviceniveauet). I simuleringerne for det fremtidige klima er der ca. 110 brønde, som ikke overholder det tilsvarende serviceniveau. Der er således en signifikant påvirkning fra klimændringerne.

Det ses, at for gentagelsesperioder mindre end 10 år stemmer de resamplede regnserier fint overens med den historiske, mens de ved større gentagelsesperioder ligger lidt for lavt.

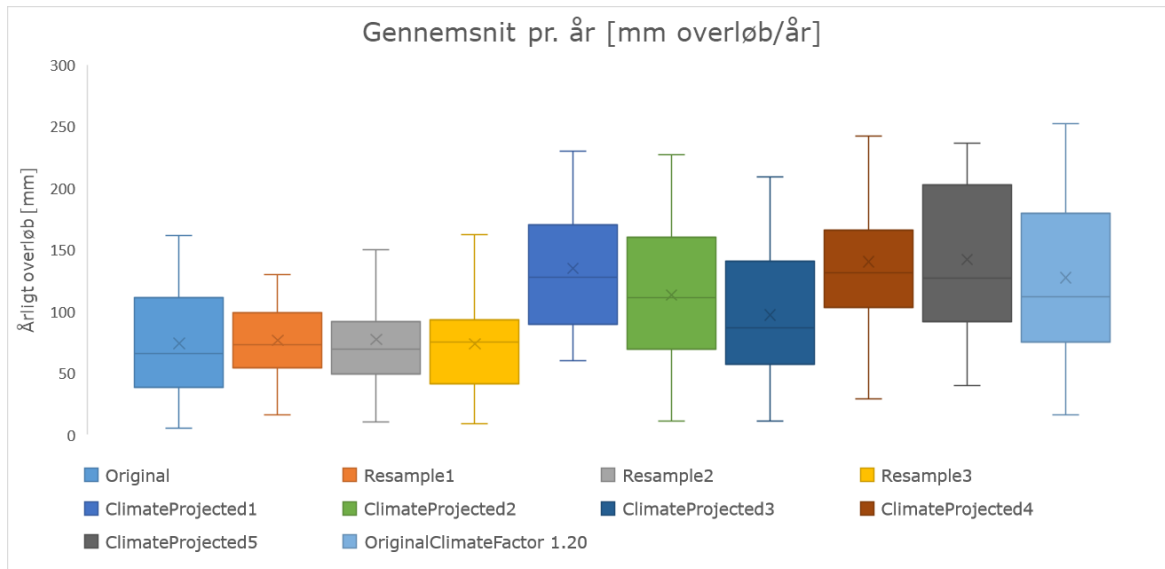
Dette skyldes igen, at statistikken er baseret på et meget lille antal hændelser. Hvis man sammenligner den faktorfremskrevne med de klimafremskrevne, ses det, at de klimafremskrevne ligger som et "bånd" over og under den faktorfremskrevne. Dette viser igen den variabilitet, der er i de klimafremskrevne regnserier.

I forhold til overholdelse af serviceniveauet er der en lille forskel på den faktorfremskrevne serie og gennemsnittet af de klimafremskrevne serier, hvilket er forventeligt, da de dimensiongivende hændelser typisk er kraftige sommerhændelser og korte varigheder, fx 10 min. I de to metoder fremskrives disse hændelser på næsten samme vis med hhv. en konstant klimafaktor på 1.2 i faktorfremskrivningen, en faktor 1.2 (for T=2 år) og en faktor 1.3 (for T=10 år) i klimafremskrivningsmetoden.



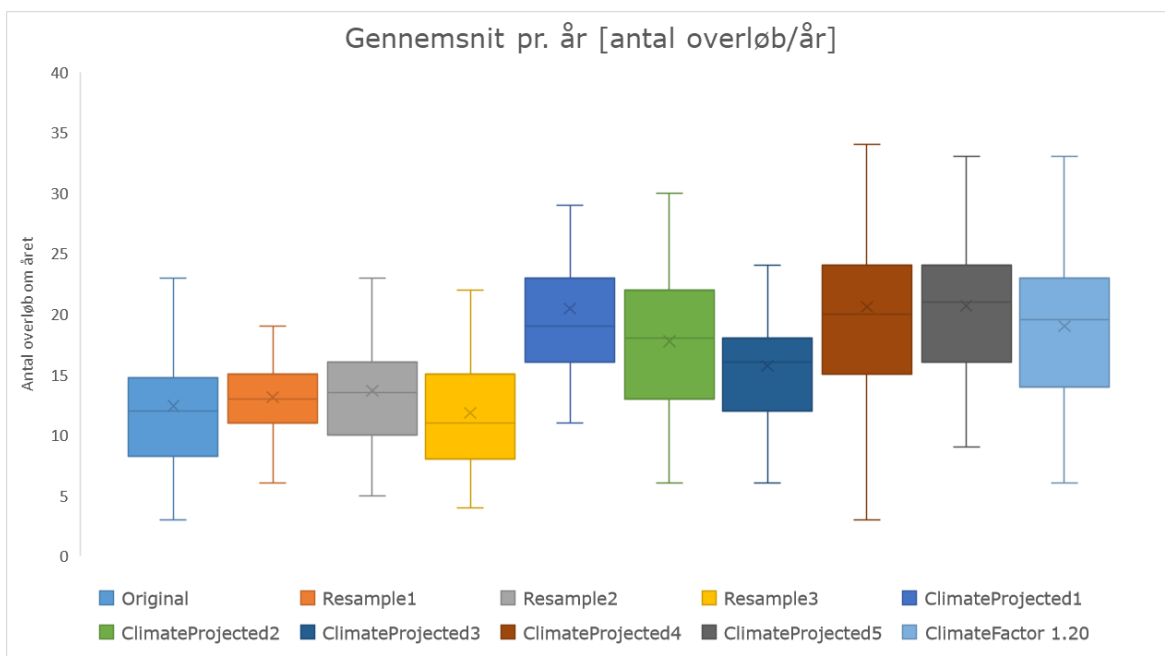
Figur 5.20. Antallet af brønde med stuvning over terræn som funktion af gentagelsesperioden

I Figur 5.21 ses de modellerede overløbsvoluminer, vist som gennemsnit pr. år. Det ses at de resamplede regnserier stemmer fint overens med den historiske regnserie, mens de klimafremskrevne regnserier stemmer fint overens med den faktorfremskrevne regnserie.



Figur 5.21. Overløbsvolumen pr. år for bassin B869

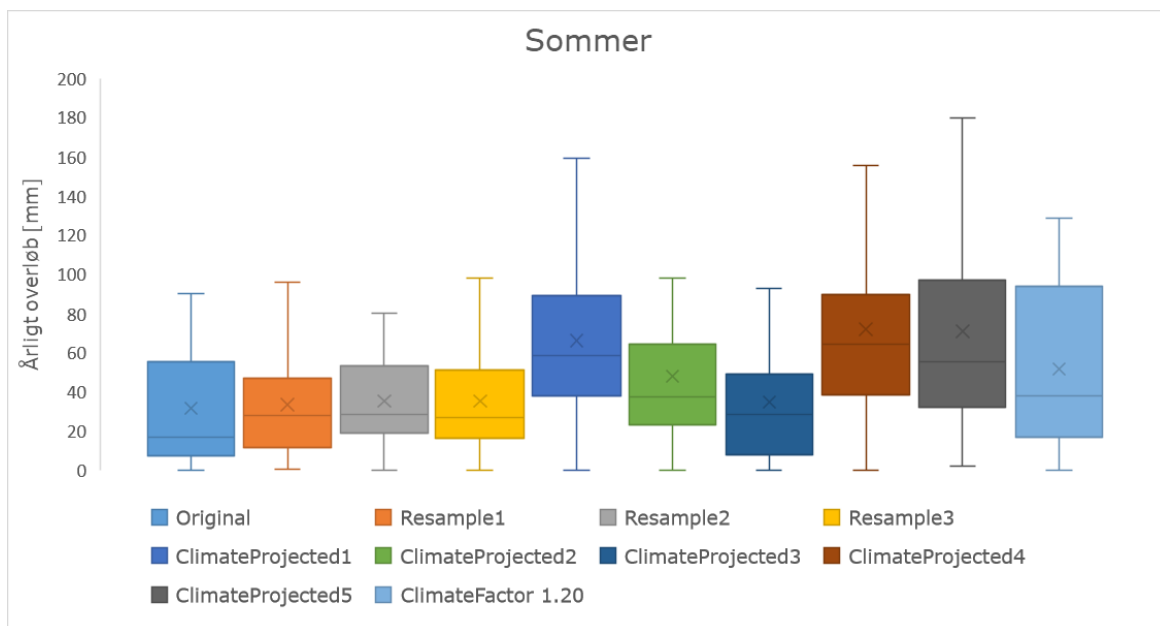
I figur 5.22 ses de modellerede antal overløb pr. år. Som det er tilfældet med overløbsvolumen, stemmer antallet også fint overens.



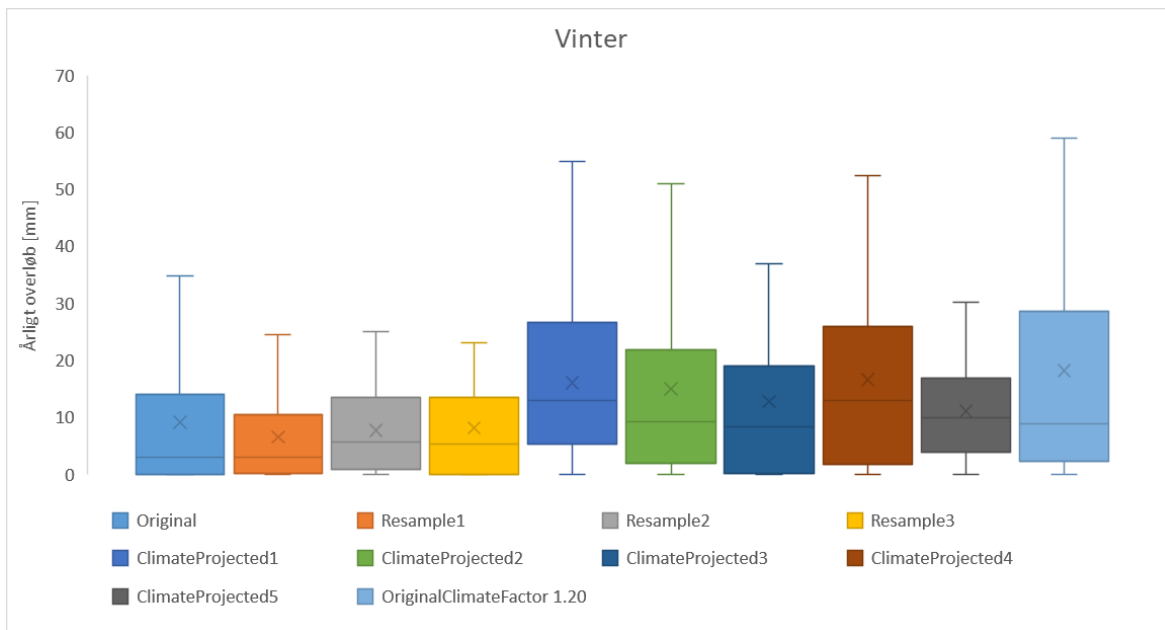
Figur 5.22. Antal overløb pr. år for bassin B869

Det kan ses, at den klimafremskrevne regnserie "ClimateProjected3" generelt ligger lidt lavere end de andre. Det kommer også til udtryk i Figur 5.20, hvor antallet af brønde med stuvning over terræn ligger på højde med den historiske uden faktorfremskrivning indtil gentagelsesperioder højere end ca. 10 år.

I figur 5.23 og figur 5.24 ses de modellerede overløbsvolumener i hhv. sommer- og vintermånederne. Det ses, at i dette model-setup er der god overensstemmelse mellem de klima- og faktorfremskrevne regnserier. Variabiliteten er større mellem de 5 klimafremskrevne serier end i forhold til den faktorfremskrevne.

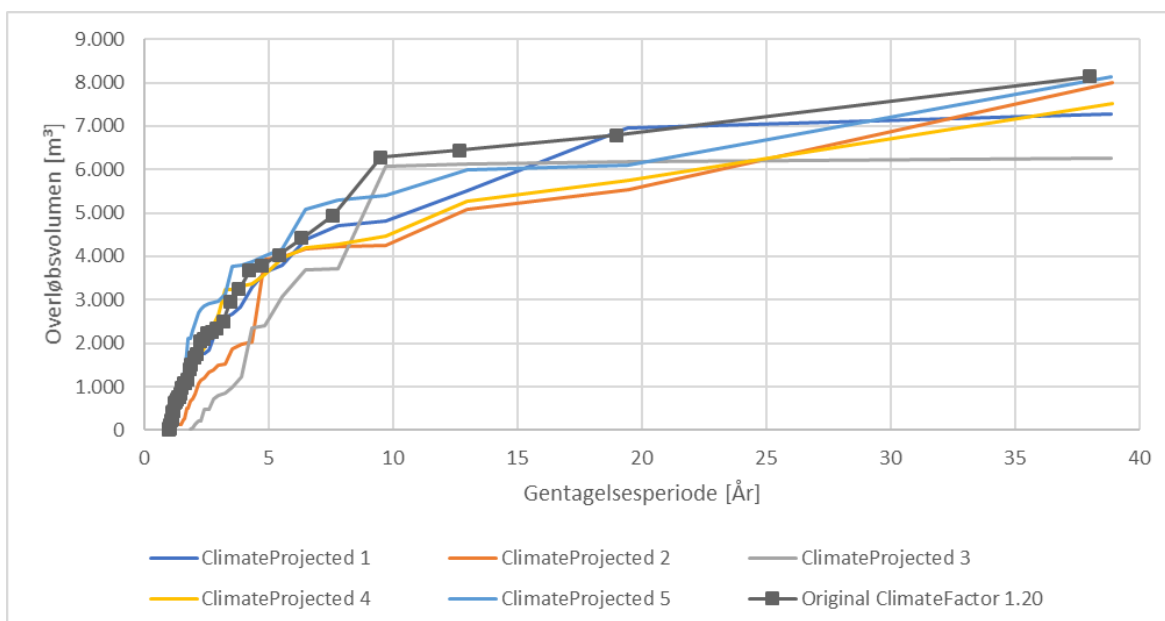


Figur 5.23. Overløbsvolumener pr. år i sommermånederne



Figur 5.24. Overløbsvolumener pr. år i vintermånederne

I figur 5.25 ses de modellerede overløbsvolumener fra bassin B695; de er plottet som funktion af gentagelsesperioden. Det kan ses, at den faktorfremskrevne regnserie ligger højt i forhold til de klimafremskrevne på alle gentagelsesperioder. Dette indikerer, at man overestimerer aflastede mængder ved blot at fremskrive den historiske regnserie med en konstant faktor.



Figur 5.25. Overløbsvolumener som funktion af gentagelsesperioden

## Delkonklusion

Den originale referenceserie og gennemsnittet af de 3 serier, der statistisk repræsenterer det nuværende klima, giver resultater, som må betragtes som i overensstemmelse, hvorfor det kan konkluderes, at de tre serier statistisk repræsenterer det nuværende klima.

I Tabel 5.7. ses gennemsnitsværdier for overløbsvolumen og antal overløb for modelberegningerne. Overløb udgør i gennemsnit ca. 12 % af den samlede årsafstrømning i det nuværende klima. I det fremtidige klima er det tilsvarende tal ca. 16 % af årsafstrømningen, dvs., at ikke nok med, at der er en signifikant stigning i antal overløb og overløbsmængde, så udgør det også relativt en større andel af den samlede årsbelastning.

Antallet af overløb stiger 46 % fra det nuværende til det fremtidige klima. Overløbsmængderne stiger i gennemsnit 61 % i det fremtidige klima, hvilket er en markant stigning i forhold til de gennemsnitlige stigninger i nedbøren. Det kan tilskrives, at bassinet er dimensioneret til det nuværende klima, hvorfor den øgede nedbør vil give anledning til flere overløb samt større gennemsnitlig aflastning for hver overløbshændelse

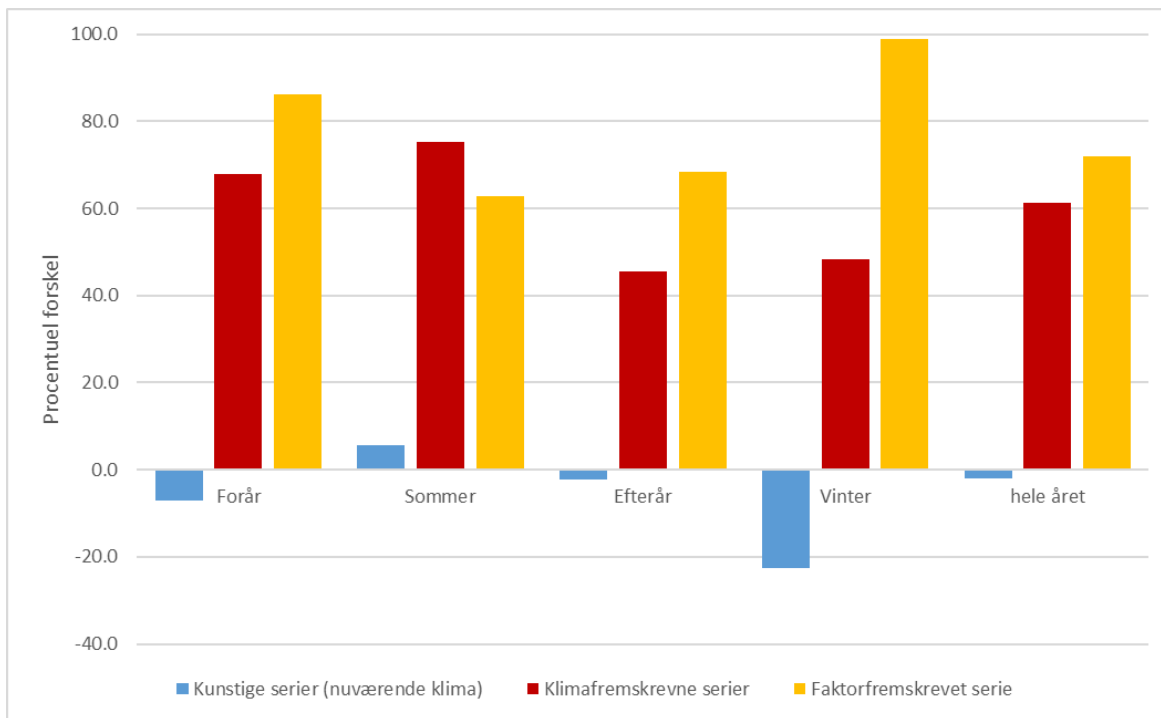
Tabel 5.7. Forskel i antal og volumen for overløb

|                          | <b>Overløbsvolumen<br/>[mm/år]</b> | <b>Forskel</b> | <b>Antal overløb [stk./år]</b> |     |
|--------------------------|------------------------------------|----------------|--------------------------------|-----|
| Original                 | 77.9                               |                | 13.1                           |     |
| Kunstige nuværende klima | 75.7                               | -3%            | 12.9                           | -1% |
| Klimafremskrevne 1-5     | 125.5                              | 61%            | 19.0                           | 46% |
| Original 1,2             | 133.9                              | 72%            | 20.0                           | 53% |

Sammenlignes den faktorfremskrevne serie og gennemsnittet af de klimafremskrevne serier, er der en lille tendens til, at førstnævnte giver større aflastningsmængder samt flere overløb end de klimafremskrevne serier. Det skyldes sandsynligvis, at den samlede årsnedbør i den faktorfremskrevne serie er større, og at den ikke tager højde for, at der sker en ændring i antallet af regnhændelser om sommeren.

Figur 5.26 viser fordelingen over årtiderne. Her ses tydeligt, at der er forskelle på den faktorfremskrevne og gennemsnittet af de klimafremskrevne serier, da den faktorfremskrevne serie ikke ændrer på årtidsfordelingen. Umiddelbart er forskellene ikke store, når tallene ansues som et gennemsnit over året, og det er tvivlsomt, hvorvidt det ville give anledning til egentlige forskelle, hvis serierne skulle anvendes i dimensionerings sammenhæng. Dog kan omfordelingen over året have effekter på recipientbelastningen. Fx hvis der er store overløb samtidig med, at recipienten er naturligt højt belastet (fx om vinteren).

Det vurderes derfor, at de klimafremskrevne serier bedre repræsenterer variationen over året end den faktorfremskrevne serie, men at forskellene på ekstrem- og årsstatistikken for overløb er begrænsede.



Figur 5.26 Procentuelle forskelle i overløbsvolumener ift. til referencaserien som funktion af årstider

Erfaringerne fra Milepæl 2 er altså igen, at sæsonvariationen er vigtig, ligesom der er en tendens, som viser, at bassiner med små afløbstal er mere påvirkede af de ændringer, der kommer i nedbørsmønstret i fremtiden.

Spredningen på de klimafremskrevne serier er relativ stor, da den både inkluderer klimafremskrivningen samt usikkerheden på klimafremskrivningen. Dette understreger nødvendigheden af at simulere med flere serier som input, så usikkerheden i beregningsresultaterne kan belyses.

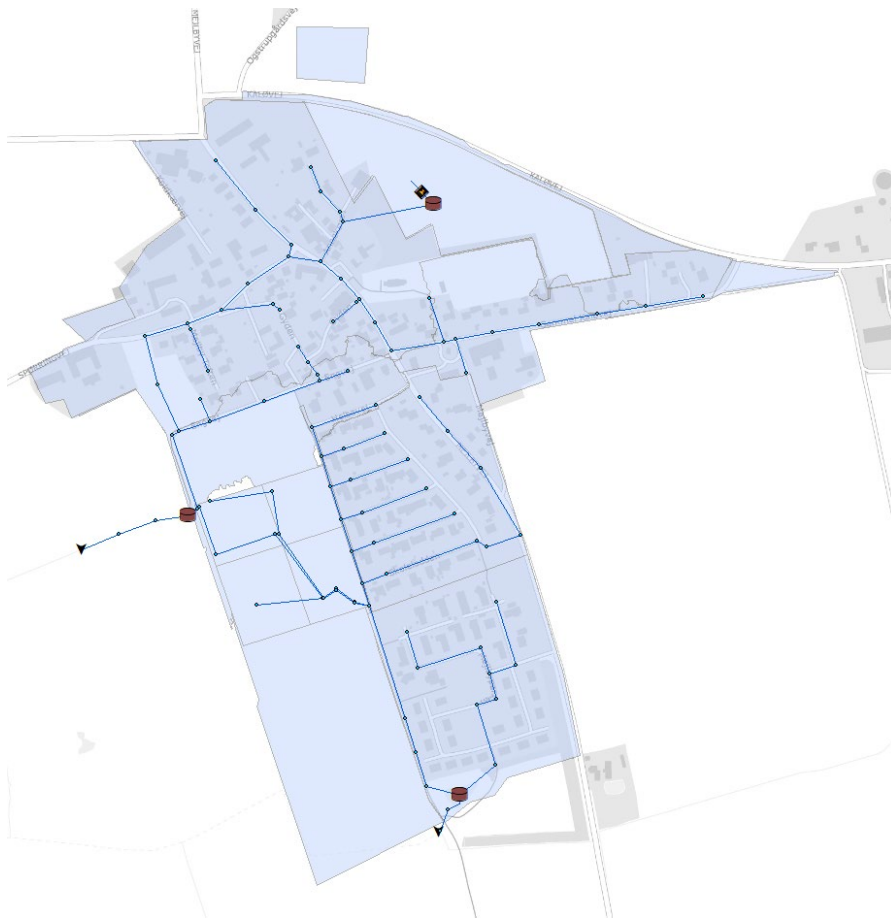
### 5.3.3.3 Milepæl 3, Hårup

I Milepæl 3 blev de genererede regnserier testet på en hydraulisk model for Hårup, som er en lille by nord for Aarhus. Idet resultaterne fra Milepæl 1 og 2 indikerede, at de klimafremskrevne regnserier påvirker bassiner med små afløbstal mere end bassiner med høje afløbstal, er det valgt at teste responsen på en lille model med tre fiktive bassiner. I stedet for at fokusere på overløbsmængder og hyppighed er der i Milepæl 3 fokuseret på design af forsinkelsesbassiner og på, hvilken betydning det får for det nødvendige forsinkelsesvolumen, om man anvender klima- eller faktorfremskrevne regnserier.

Den anvendte model er en detailmodel, som er modificeret således, at de tre forsinkelsesbassiner, der er i byen, hver har et afløbstal på 0,5 l/s/ha og er dimensioneret til at gå i overløb én gang hvert 10. år. Dette er gjort på traditionel vis ved at bruge den historiske regnserie med en klimafaktor på 1,2. Herved kan det direkte sammenlignes, hvordan man ville designe et bassin med klimafremskrevne regnserier imod en faktorfremskrevet regnserie.

I Hårup-modellen er der desuden implementeret grønne arealer, som bidrager til regnvands-systemet. De grønne arealer er indarbejdet med den metode, som Aarhus Vand også anvender på andre oplande. Inputtet på de grønne arealer er en reduceret regnserie, som vha. en infiltrationsmodel er fratrukket den del, som nedsiver. Til dette er der anvendt en Green & Ampt-infiltrationsmodel, som er modificeret af Skipper-Jørgensen (2019), og som er parameteriseret ud fra målinger foretaget i projektet MOGO (støttet af VTU-fonden, 2015) på en forsøgslokalitet i Lystrup nord for Aarhus (Nielsen, 2018 og Nielsen et al. 2019). Proceduren er beskrevet i bilag 1.

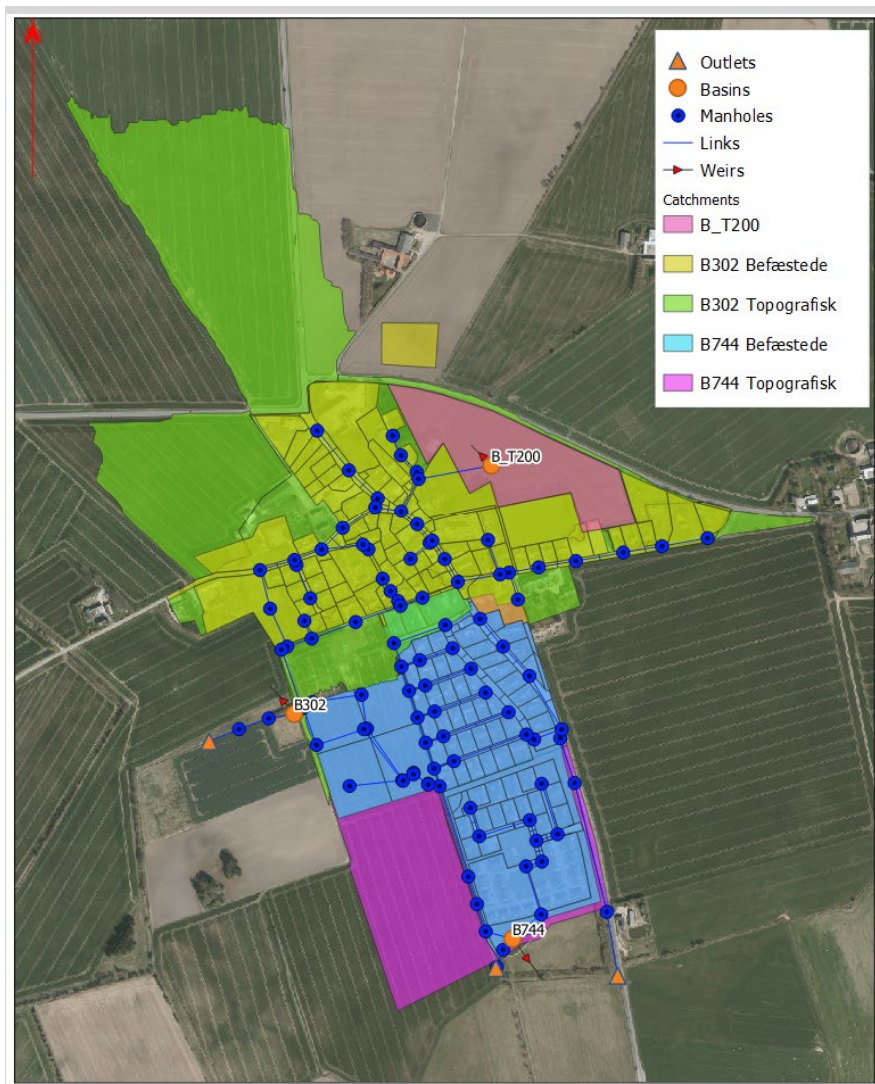
Udover de grønne arealer, som er i den kloakerede del af Hårup, er der også et stort bidrag fra opstrømsliggende markarealer. Disse oplande er også medtaget i model-setuppet. I figur 5.27 ses model-setuppet, som er anvendt til responsanalyse i Milepæl 3.



Figur 5.27. Model-setup i Hårup

I figur 5.28 ses oplandsplanen for Hårup. De omkringliggende markarealer, som kan afvande til bassinerne, er noteret som "topografiske" oplande i signaturen. Bemærk desuden, at bassin B\_T200 ligger opstrøms bassin B302. Det betyder, at en del af oplandet til B302 allerede forsinkes opstrøms.





Figur 5.28. Oplandsplan for Hårup. Det ses, at der er store omkringliggende markarealer, som kan afstrømme til bassinerne.

I tabel 5.8. ses oplandsarealer og afløbsvandføringer for de tre bassiner i Hårup.

Tabel 5.8. Oplandsplan og afløbsvandføring for bassiner i Hårup

|   | <b>B744</b> | <b>B302</b> | <b>B_T200</b> | <b>SUM</b> |
|---|-------------|-------------|---------------|------------|
| Totalt areal u. grønt [ha]                | 13,56       | 18,74       | 3,7           | 32,3       |
| Befæstelsesgrad [%]                       | 42%         | 35%         | 55%           | 38%        |
| Befæstet areal [ha]                       | 5,66        | 6,59        | 2,04          | 12,25      |
| Reduceret areal [ha]                      | 5,09        | 5,87        | 1,83          | 10,96      |
| Grønt areal [ha]                          | 12,51       | 30,86       | 1,66          | 43,37      |
| Afløbstal [l/s/ha]                        | 0,5         | 0,5         | 0,5           | 0,5        |
| Afløbstal [l/s/red. ha]                   | 1,33        | 1,6         | 1,01          | 1,47       |
| Afløbstal [l/s/(bef.areal + grønt areal)] | 0,37        | 0,25        | 0,5           | 0,3        |
| Afløbsvandføring [l/s]                    | 6,78        | 9,37        | 1,85          | 16,15      |

I tabel 5.9. ses de regnserier, der er anvendt i responsanalysen i Milepæl 3.

Tabel 5.9. Regnserier anvendt i Milepæl 3.

| Regnserie           | Beskrivelse  |
|---------------------|--|
| Original            | Referenceserie, registrerede data på SVK-regnmålerstation 5177 Viby Renseanlæg   |
| Resample1-3         | Syntetisk genereret serie, nutidens klima  |
| ClimateProjected1-5 | Syntetisk genereret serie, klimaet i 2100  |
| Original 1,2        | Den originale regnserie fremskrevet på traditionel vis med en klimafaktor på 1,2 |

## Resultater

Analysen af responsen i afløbssystemet i Milepæl 3 viste, at det nødvendige bassinvolumen reduceres, hvis man bruger de klimafremskrevne regnserier. Mellem 3 og 9 %, hvis man ikke tager højde for ekstra bidrag fra grønne arealer. Hvis de grønne arealer medtages, stiger reduktionen fra mellem 5 og 17 %.

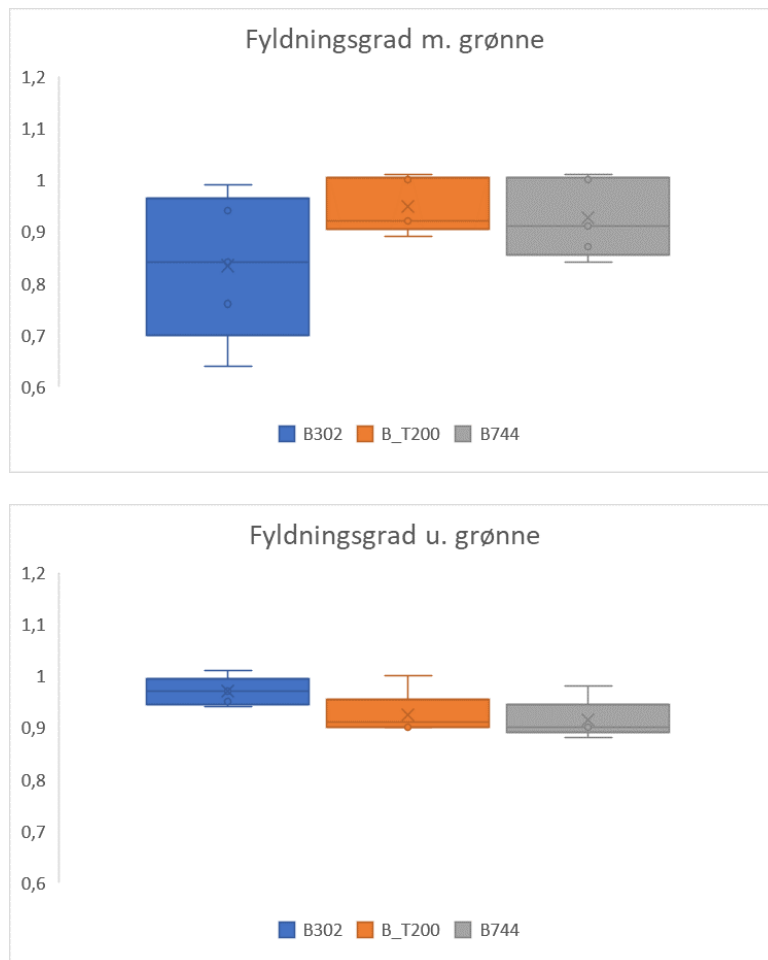
Desuden er det nødvendige bassinvolumen også sammenlignet med det, der findes ved at bruge SVK-regnearket fra Skrift 30 til bassindimensionering. Det viser, at ved bassiner med små afløbstal underestimeres det nødvendige volumen med SVK-regnearket. Årsagen til, at det nødvendige volumen i bassin B302 er mindre i modelberegningen ift. SVK-regnearket, er, at en del af oplandet til B302 allerede er forsinket i bassin B\_T200. Denne effekt kan ikke medtages i SVK-regnearket. Se nødvendige bassinvolumener i tabel 5.10.

Tabel 5.10. Nødvendige bassinvolumener fundet ved forskellige metoder. Reduktion af nødvendigt volumen ved klimafremskrevet serie ift. faktorfremskrevet serie er angivet i parentes.

|  | B302 [m <sup>3</sup> ] | B744 [m <sup>3</sup> ] | B_T200 [m <sup>3</sup> ] |
|--|------------------------|------------------------|--------------------------|
| SVK-regneark v. 4,1 (u. grønne)              | 3.563                  | 3.217                  | 1.252                    |
| Reference regnserie (u. grønne)              | 1.984                  | 2.731                  | 1.193                    |
| Reference regnserie (m. grønne)              | 6.292                  | 3.984                  | 1.285                    |
| Kunstige serier (nuværende klima, u. grønne) | 1.960                  | 2.637                  | 1.117                    |
| Kunstige serier (nuværende klima, m. grønne) | 4.583                  | 3.600                  | 1.211                    |
| Faktorfremskrevet (u. grønne)                | 2.390                  | 3.501                  | 1.420                    |
| Faktorfremskrevet (m. grønne)                | 7.768                  | 4.800                  | 1.477                    |
| Klimafremskrevet (u. grønne)                 | 2.318 (3 %)            | 3.200 (9 %)            | 1.312 (8 %)              |
| Klimafremskrevet (m. grønne)                 | 6.479 (17 %)           | 4.445 (7 %)            | 1.400 (5 %)              |

Det ses altså, at for bassiner med små afløbstal er der væsentlig forskel på at benytte en klimafremskrevet regn ift. en faktorfremskrevet regn. Analyserne viser desuden også, at det er af meget stor betydning at medtage vand fra det topografiske opland.

I figur 5.29 ses fyldningsgraden af bassinerne ved gentagelsesperiode på T = 10 år. Boksplottene viser spredningen af de 5 klimafremskrevne regnserier. Det ses, at der er en væsentlig større spredning på fyldningsgraden, når der medtages grønne arealer.



Figur 5.29. Fyldningsgrad af bassiner ved T = 10 år. Boksplots viser spredningen på de 5 klimafremskrevne regnserier.

### Delkonklusion

Hvis man ser overordnet på alle bassinerne i modellen og anvender de faktorfremskrevne serier, skal bassinerne i gennemsnit være 38 % større i det fremtidige klima end i det nutidige. Anvendes de klimafremskrevne serier, skal bassinerne i gennemsnit være 29 % større i det fremtidige klima end i det nutidige. Der er således en "besparelse" på 9 % ved at anvende de klimafremskrevne serier frem for de faktorfremskrevne.

Den faktorfremskrevne regnserie vil øge den årlige udledning med 20 %, jf. klimafaktoren på 20%. I gennemsnit vil de klimafremskrevne regnserier give anledning til en 14 % stigning i den årlige udledning. Der er således en forskel på 6 % i de samlede udledte volumener.

Generelt er der i modelopsætningerne et stort bidrag fra de ubefæstede (grønne) arealer.

Bidrag fra grønne arealer udgør 6 % af årsnedbøren i det nuværende klima og 7 % i det fremtidige klimascenario. Det indikerer derfor, at det primært er i designsituationen, der kommer grønne afstrømningsbidrag. Idet der i modellen er store ubefæstede oplande, der potentielt bidrager, især i oplandet til bassin B302, vil medtagelse af "grøn afstrømning" i dimensionering medføre en signifikant forøgelse af det nødvendige bassinvolumen.

Modsat vil det nødvendige bassinvolumen, hvis den grønne afstrømning ikke medtages i dimensioneringen, underestimeres, hvorfor der vil være flere og hyppigere overløb fra bassinerne.

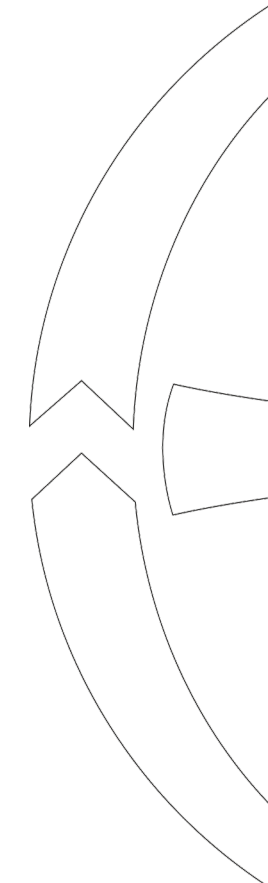
Den grønne afstrømning er forbundet med stor usikkerhed, og de beregnede bidrag er det bedste bud ud fra de målinger, der i MOGO-projektet er foretaget i Lystrup. Pga. usikkerheden er de relative ændringer fra nuværende til fremtidigt klima samt forskellen på faktorfremskrivning og klimafremskrivning mere interessante end de absolutte værdier.

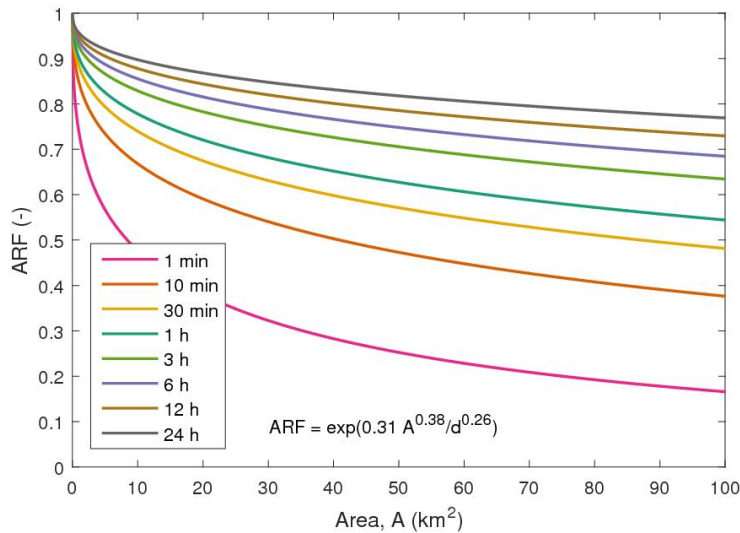
For bassin B302 vil medtagelsen af grøn afstrømning i det fremtidige klima betyde, at bassinvolumenet skal forøges med 225 %, hvis de faktorfremskrevne serier anvendes, og 179 %, hvis de klimafremskrevne serier anvendes. I dette tilfælde er fordelingen regn over året især en vigtig parameter, hvorfor den faktorfremskrevne serie vil overestimere bidraget pga., at den ikke medtager ændringer i tiden mellem hændelser. Jordmætningen og hvorledes jorden dræner af mellem hændelser får derfor en større effekt, hvorfor der i dette tilfælde vurderes, at de klimafremskrevne serier bedre repræsenterer de fremtidige forhold.

#### 5.3.4 Radarregn-katalog til design af urbane afløbssystemer

I Danmark har vi siden 1979 kunne drage stor nytte, og viden fra det nationale netværk af regnmålere drevet af Spildevandskomiteen (SVK). Ud fra disse har det været muligt at opstille intuitive relationer mellem en regnhændelses varighed, gentagelsesperiode og intensitet. Disse omdannes til såkaldte designregn, enten i form af kasseregn (én intensitet over specifik varighed) eller "Chicago Design Storm" (CDS, forsøg på at samle samtlige intensiteter, over forskellige varigheder, i én design-regnhændelse). I en tid, hvor hydrodynamiske afløbsmodeller dækker større urbane områder, øges kompleksiteten ligeledes ved fx at indføre flere interne bassiner, pumper på diverse strækninger eller styring på forskellige systemer. Dette medfører, at den interne spatiale heterogenitet, i selve det urbane opland, får væsentlig større betydning. Det har været branchestandard at antage, at regn, målt eller statistisk, fra et enkelt punkt er gældende for det totale opland. Med særligt store oplande vurderes det, at denne antagelse vil føre til forkert repræsentation af afløbssystemets respons.

For at imødekomme dette er det forsøgt at beskrive regnens spatiale fordeling med såkaldte "Areal Reduktions Faktorer", enten udledt fra SVK-netværket (Rosbjerg og Madsen, 2019) eller fra vejrradardata (Thorndahl et al. 2019). Her opsættes en relation imellem en intensitet, over en specifik varighed, og oplandsareal, således at særligt høje intensiteter, ved korte varigheder, bliver reduceret for at gøre regninputtet mere repræsentativt over et givent areal. En ulempe ved denne fremgangsmåde er, at det kun er gældende for designregn og ikke på dynamisk målt regn, hvorved man mister den tidslige dynamik af regnen.





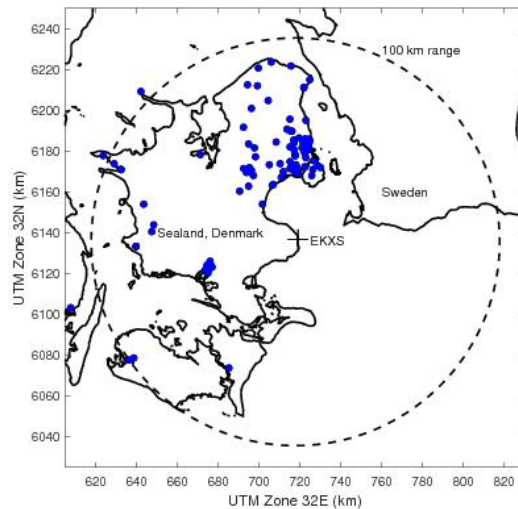
Figur 5.30 Udlæste ARF fra radardata (Thorndahl et.al. 2019)

Vejrradar-teknologien har de seneste årtier set fremgang, hvorfor der nu foreligger data af tilstrækkelig høj kvalitet til, at det bør undersøges, hvorvidt viden herfra kan inddrages i planlægning og design af urbane afløbssystemer. I dette studie undersøges en stokastisk fremgangsmåde kaldet "Stochastic Storm Transposition" (SST). Denne metode kan anvendes til dels at genskabe regnstatistik ud fra radardata ved at udnytte radardatas information om variabilitet i tid og sted som alternativ til traditionelle punktmålinger. Dels kan metoden anvendes til at belyse, hvad regnens stedlige variabilitet betyder for afløbssystemets respons, når radardata bruges som input til en afløbsmodel.

## Data

Til dette studie anvendes et radardatasæt fra Danmarks-Meteorologiske Instituts (DMI) C-bånds radar (EKXS), placeret ved Stevns på Sjælland (ses på Figur 5.31). På trods af, at Stevns-radaren ikke dækker Aarhus Vands forsyningsområde, anvendes den til at repræsentere regnstatistikken alligevel, da den har den længste observationsperiode og den højeste datakvalitet af DMIs radarer.

Radaren måler nedbøren i en stedlig opløsning på 500m x 500m og i en tidlig opløsning på 10 minutter. Den tidlige opløsning er som udgangspunkt vurderet for grov til afløbstekniske behov, hvorfor datasættet interpoleres ned til en tidlig opløsning på 1 minut ved metoder præsenteret i Nielsen et al. (2014). For at øge præcisionen af radarregn estimatet justeres de målte værdier i forhold til alle SVK-målere inden for en radius af 100 km som vist på Figur 5.31. Yderligere forklaring af denne proces præsenteres i Thorndahl et al. (2014).



Figur 5.31 Placering af anvendt C-bånds radar samt de regnmålere, der er anvendt til at bias-justere regnproduktet. (Thorndahl et al. 2014)

EKXS har målt siden 2002, men det er kun data for perioden 2002-2016, som er anvendt. Datasættet er ikke komplet grundet udfald eller støj i data. Til dette studie er det vurderet, at 655 observationsdage har data af tilfredsstillende kvalitet, hvor størstedelen af disse kommer fra år 2010-2016.

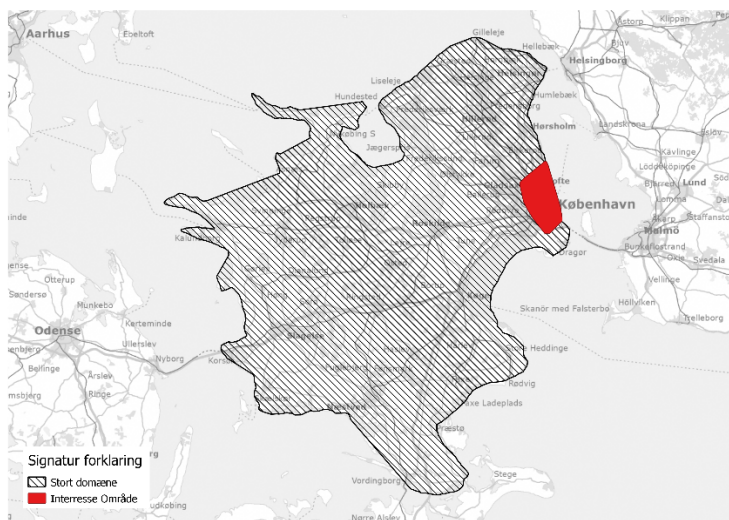
## Metoder

En ulempe ved at anvende vejrradardata ligger i de korte observationsperioder. Dette besværliggør muligheden at lave meningsfyldt statistik ved traditionelle metoder. SST er en stokastisk fremgangsmåde til at genskabe længevarende regnstatistik for et specifikt område/punkt. Observationsperioden for et radardatasæt kan virtuelt forlænges, således at der kan foretages ekstremstatistik på den stedligt målte nedbør og tilhørende "*Intensity-Duration-Frequency*" (IDF) kurver kan udledes. Dette gøres helt grundlæggende ved at udnytte den stedlige variation i radarmålingerne, således at man anvender regn fra et større område end blot et enkelt punkt/opland. Metoden er beskrevet i dybden i Wright et al. (2013, 2014), men en kort gennemgang af hovedpunkterne præsenteres i det følgende:

1. Der udpeges et område, også kaldet "transponeringsdomæne", der indeholder et udvalgt interesseområde (modelopland, rektangulært areal eller et punkt). I dette studie udvælges transponeringsdomænet som værende Sjælland som vist Figur 5.32. En primær betingelse (eller antagelse) om transponeringsdomænet er, at klimatologien forekommer homogen. Dette undersøges senere i afsnittet.
2. Ud fra det anvendte radarregn datasæt udvælges de  $m$  (300 for dette studie) største storme (storme er i denne forbindelse en betegnelse for en periode af stedligt målt nedbør og skal ikke forveksles med regnhændelse), der falder inden for det udvalgte transponeringsdomæne ud fra en udvalgt varighed (10, 30, 60, 180, 360, 720, 1440, 2880 minutter er valgt for dette studie). Denne samling af storme kaldes for "stormkataloger" (forskellig fra radarkataloget, som beskrives senere).
3. Der udvælges, tilfældigt, en storm fra et af de respektive stormkataloger afhængig af, hvilken varighed der undersøges. Da transponeringsdomænet er vurderet homogent, kan den udvalgte storm flyttes tilfældigt i både x- og y-aksen. Den tilfældige

transponering er ens for alle tidsskridt i den udvalgte storm, således at stormmorfologien er uændret. Dette skridt gentages et  $k$  antal gange (for dette studie er det valgt, at  $k$  er et tilfældigt tal fra en Poisson-fordeling, med en  $\lambda$  værdi på 20, svarende til et gennemsnit på 20 storme pr. år.).

4. Den totale regndybde for de  $k$  storme udregnes, hvor den største værdi gemmes, og indgår i den endelige statistik.
5. Punkt 3 og 4 gentages et bestemt antal gange (1000 for dette studie), svarende til det antal år med syntetiske storme, der ønskes.
6. Punkt 3-5 kan ligeledes gentages et bestemt antal gange (100 for dette studie) for at undersøge den statistiske usikkerhed på de IDF-kurver, der udledes fra metoden.



Figur 5.32 Transponeringsdomæne samt interesseområde

Et programmeringsværktøj, navngivet "RainyDay" (Wright et al. 2017), er udviklet til at foretage disse SST-analyser, hvorfor dette anvendes i det foreliggende studie.

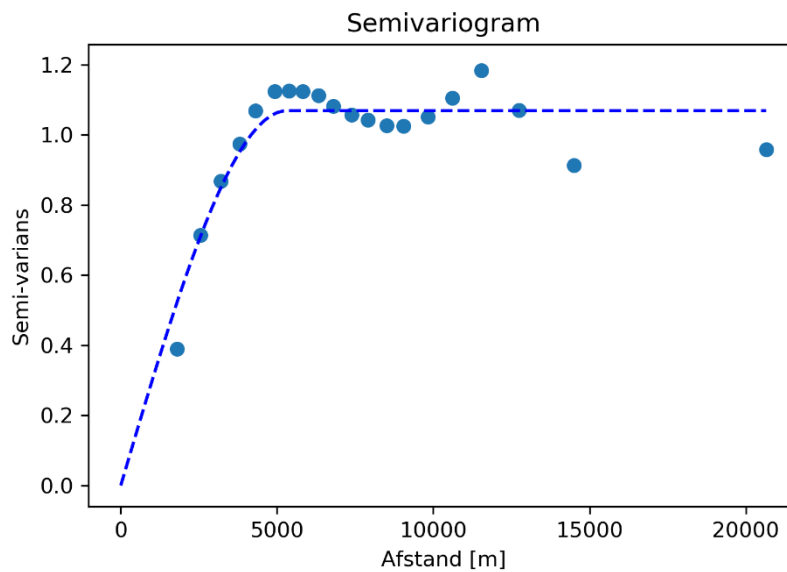
For at undersøge validiteten af metoden foretages en analyse, hvor IDF-kurverne fra SST og RainyDay sammenlignes med den gældende regionalmodel for Danmark (Skrift 30).

Det er muligt at gemme de storme, der giver anledning til ekstremstatistikken, fra RainyDay. For dette studie vælges det at gemme storme med en gentagelsesperiode på hhv. 2, 5 og 10 år og undersøge disse nærmere til det foreslåede radarkatalog. For at give et kvalificeret bud på, hvilke storme der skal indgå i dette katalog, undersøges den spatiale karakteristikk for de udtrukne storme.

Den første parameter, der undersøges, er forholdet imellem største punktnedbør, ( $R_{maks}$ ), fra den udtrukne storm og gennemsnitsværdien, ( $R_{gns}$ ), for samme storm over hele stormens varighed for begge parametre. Dette kan give indblik i, hvor stor variabiliteten er i de respektive nedbørsfelter.

Den anden parameter, som undersøges, er resultatet af en semi-variogramanalyse af de enkelte stokastisk genererede storme. Resultatet for dette bliver, en såkaldt "range"-parameter, der beskriver, ved hvilken afstand spatial afhængighed ophører, og derfor kan give indblik i de enkeltes stormes spatiale struktur. En lav "range"-værdi kan være et tegn på en relativt uorganiseret storm, f.eks. ved at enkelte områder udsættes for signifikant mere

nedbør end andre (typisk skybrudslignende storme). Omvendt kan en høj "range"-værdi være indikation på en mere jævnt fordelt type storm som f.eks. frontregn. Til denne analyse, fastsættes søgeradiusen til den længste afstand mellem to radar pixels inden for interesseområdet som vist på Figur 5.33. Dette betyder, at "range"-parameteren maksimalt kan udregnes til  $\sim 20$  km. Selve analysen følger samme struktur som præsenteret i Ochoa-Rodriguez et al. (2015), hvor der bestemmes et empirisk variogram, for hvert tidsskridt i radarbillede-serien, hvorefter der midles over hele varigheden for at fremstille et klimatologisk semi-variogram. Et eksempel på dette kan findes på Figur 5.33.

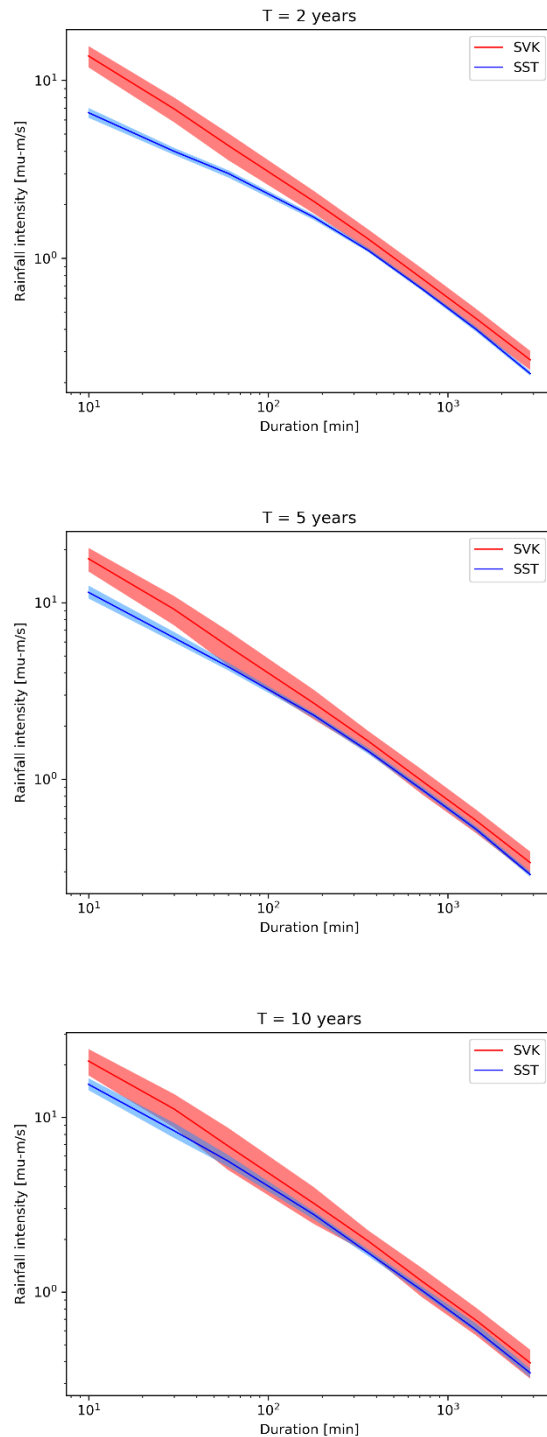


Figur 5.33 Semivariogram. De blå punkter angiver det klimatologiske semivariogram. Den stiplede linje viser det fittede semivariogram, hvor range bestemmes ud fra.

## Resultater

Først ønskes det at undersøge validiteten af selve SST-metoden. Dette gøres ved at sammenligne IDF-kurver fra den danske regionalmodel, udtrukket fra et specifikt punkt, med dem generet fra RainyDay. Det vælges at undersøge IDF-kurver for gentagelsesperioder (T) på hhv. 2, 5 og 10 år. Dels da disse er branchestandarder, og dels hvis gentagelsesperioden, øges yderligere, vurderes det besværligt at sammenligne de to datasæt, da statistisk usikkerhed bliver mere signifikant. Resultaterne vises på Figur 5.34.





Figur 5.34 IDF-kurver for hhv. den regionale model (SVK) og SST-metoden (SST). De markerede linjer angiver medianværdien. De skraverede arealer angiver 95% konfidensintervallet.

Der noteres for alle tre gentagelsesperioder, at SST-metoden generelt underestimerer værdierne i forhold til SVK. Yderligere noteres det også, at ved korte varigheder forekommer forskellen større. Dog ses det, at denne forskel bliver mindre, desto større gentagelsesperioden bliver. Den procentvise forskel, i forhold til skrift 30, præsenteres i Tabel 5.11 Procentvis forskel mellem skrift 30 IDF-kurverne og SST.

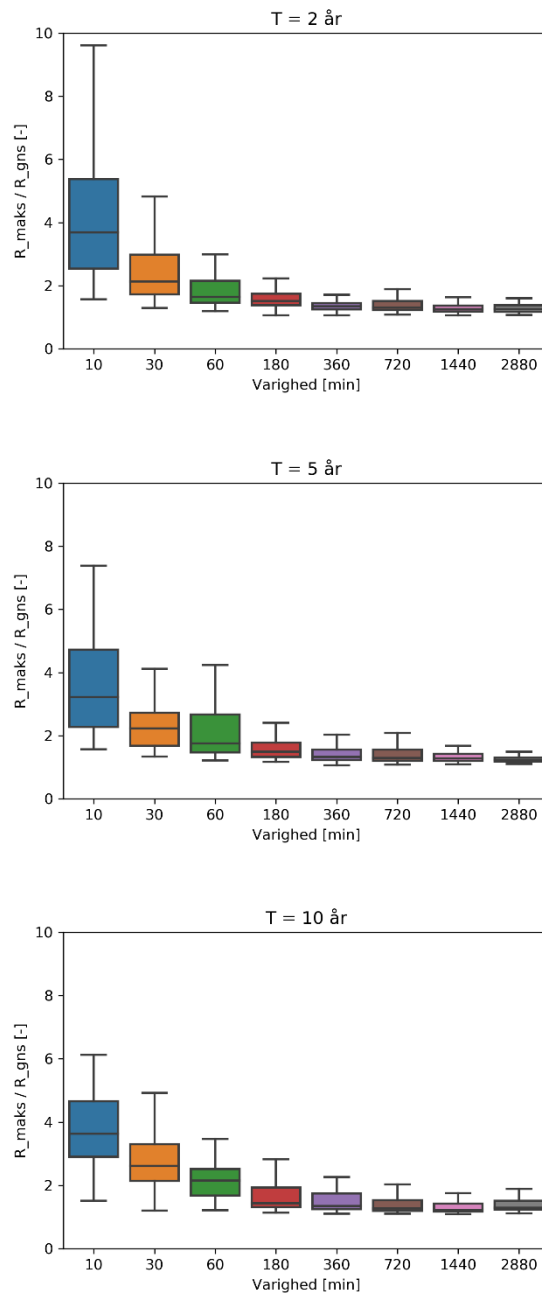
Tabel 5.11 Procentvis forskel mellem skrift 30 IDF-kurverne og SST

| T [År] / Varighed [min.] | 10   | 30   | 60   | 180  | 360  | 720  | 1440 | 2880 |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2                        | 51,7 | 42,5 | 30,4 | 18,5 | 13,9 | 12,7 | 13,2 | 16,2 |
| 5                        | 35,2 | 30,7 | 23,4 | 14,7 | 12,5 | 11,1 | 10,7 | 14,2 |
| 10                       | 26,3 | 24,6 | 18,3 | 14,0 | 14,5 | 11,8 | 11,8 | 12,2 |

Når der arbejdes med radardata, er det ikke ualmindeligt, at der opleves forskel, når der sammenlignes med data fra et regnmålersystem. Til trods for, at det anvendte radardatasæt er af relativ høj opløsning, forekommer der stadig en tydelig bias imellem regnmåler og radar, især ved korte varigheder. Dette nævnes også i Thorndahl et al. (2014) og skyldes primært forskellen på at sammenligne et punkt med et areal på 500x500m. Derfor forekommer det også besynderligt, at forskellen på de korte varigheder mindskes ved højere gentagelsesperioder. Forklaring på dette kan komme fra selve SST-metoden. Storme med en lav gentagelsesperiode dækker, med al sandsynlighed, ikke et stort areal, hvorfor sandsynligheden for at transponere stormen over et vilkårligt opland ligeledes er lav. Dette giver SST-metoden en intern variabilitet. En anden forklaring kan ligge i tidsperioden, som radardatasættet stammer fra. Som nævnt i dataafsnittet anvendes der data fra 2002-2016 med overvægt af data fra 2010-2016. Grundet klimaforandringerne er det ikke usandsynligt, at regn for denne tidsperiode generelt er kraftigere end dem, statistikken fra SVK er baseret på, og at der på den måde forekommer en implicit overestimering ved at resample fra denne periode.

Ses der bort fra ovenstående kommentar, vurderes det, at SST-metoden kan reproducere statistik fra et datasæt på kun 14 år sammenligneligt med statistik fra et 40-årigt datasæt. Dette vurderes på baggrund af resultaterne på Figur 5.34, der enten ligger inden for den statistiske usikkerhed eller relativt tæt på.

Med selve SST-metoden valideret undersøges de storme, der generer den statistik, som er vist på Figur 5.34. Først undersøges  $R_{\max}$ - og  $R_{\text{gns}}$ -forholdet for de udvalgte varigheder og gentagelsesperioder. Resultaterne for dette præsenteres på Figur 5.35.

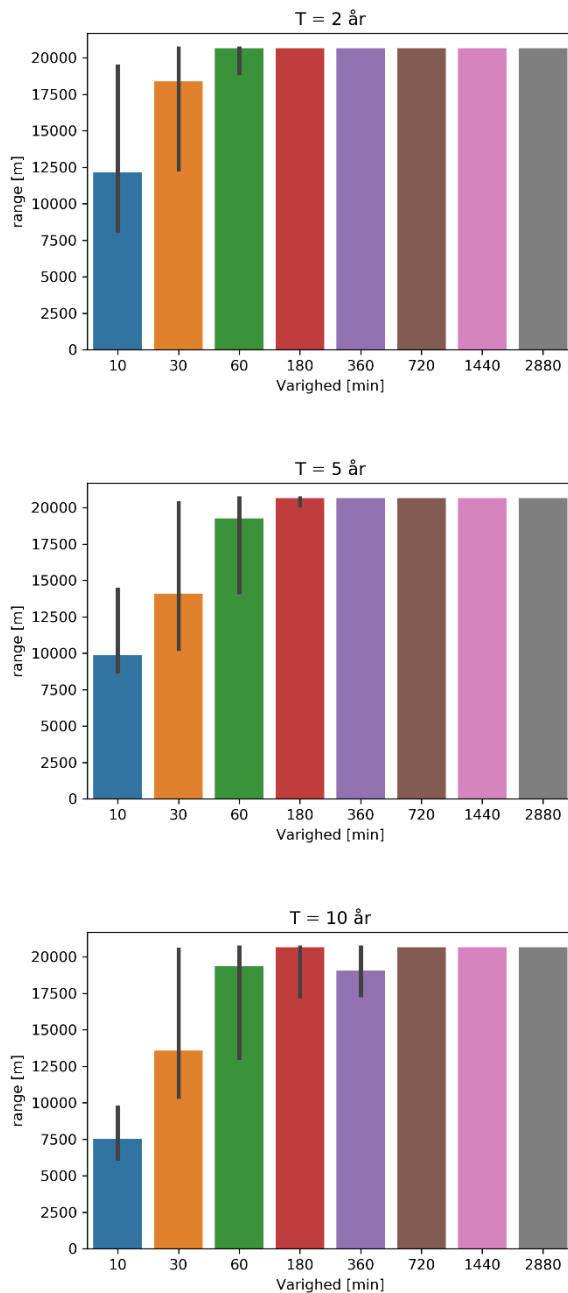


Figur 5.35 Boksplot for  $R_{maks} / R_{gns}$  for de 100 realiseringer af storme fra RainyDay for udvalgte varigheder.

Af Figur 5.35 ses det, at nedbørsfeltet generelt har størst variation ved de korte varigheder, gældende for alle gentagelsesperioder. Denne variabilitet observeres til at stabilisere sig ved en varighed på 180 minutter. At de korte varigheder forekommer mere kaotiske end de længerevarende er at forvente. Regnhændelser med kort varighed tilskrives ofte såkaldte "konvektive" byger, altså byger, der opstår nærmest øjeblikkeligt og med meget lav arealudbredelse. For varighederne, 10 og 30 minutter, observeres det, at medianværdien er relativt fast for alle tre undersøgte gentagelsesperioder. Yderligere ses det, at spredningen

falder ved længere gentagelsesperiode. I og med at spredningen falder, i takt med at gentagelsesperioden stiger, er dette nok et tegn på, at enkelte specifikke radarhændelser optræder flere gange i forskellige kørsler. Hvordan den "rammer" oplandet kan variere fra kørsel til kørsel, men den generelle struktur bevares.

Resultaterne af semivariogram-analyse, præsenteres på Figur 5.36.



Figur 5.36 Boksplot, af den udregnede range-parameter for hver af de 100 SST-realiseringer.

Samme tendens, som blev observeret på figur Figur 5.35 i  $R_{\text{maks}}/R_{\text{gns}}$ -analysen, observeres også i semivariogram-analysen. Ved korte varigheder forekommer den stedlige afhængighed af nedbøren relativt kort, især for de høje gentagelsesperioder. Dette tyder på, at storme med kort varighed, repræsenterer intense regnbyger med lav arealudbredelse. Omvendt ses det, at ved lange varigheder stabiliseres rangeparameteren omkring 20 km, hvilket er en indikation for meget lav stedlig variation i de pågældende storme.

Hvor det ved den foregående analyse var svært at konkludere direkte på den spatiale struktur af regnen, afhængig af gentagelsesperioden, ses det her, at medianværdierne generelt er faldende med længere gentagelsesperiode, især for de korte varigheder. Dette er et tegn på, at nedbørsfeltet bliver mere kaotisk, jo mere ekstrem regnen bliver.

### Delkonklusion

I dette afsnit er det undersøgt, hvorvidt data målt med vejrradar kan anvendes til design og planlægning af afløbssystemer. Først blev det undersøgt, hvorledes ekstremstatistik beregnet igennem SST-metoden kan sammenlignes med SVK Skrift 30. Det blev vurderet, at statistikken fra de to metoder/datasæt er sammenlignelige, hvor der dog noteres signifikant forskel på korte regnvarigheder. For at kunne vurdere hvornår et radarkatalog kan være brugbart, er den spatiale struktur af de kunstige storme undersøgt. Dette blev gjort ved en simpel analyse af forholdet imellem største punktværdi og arealgennemsnittet. Denne analyse viste indikationer på, at ved korte regnvarigheder forekommer der væsentlig større variationer i nedbørsfeltet, end når der kigges på længerevarende regn. For at underbygge dette blev der foretaget en semivariogram-analyse, der ligeledes beskriver den spatiale struktur af nedbørsfeltet. Her observeres der ligeledes tendenser til, at regn af kort varighed observeres mere kaotisk på det stedlige plan end ved længerevarende regn. Dette leder til den forsigtige konklusion, at et eventuelt radarregnkatalog vil være mest brugbart ved regn af kort varighed. Her skal det dog noteres, at direkte sammenligninger af nuværende praktik og denne foreslåede fremgangsmåde kan være vanskelig, da det i Tabel 5.11 ses, at det netop er ved de korte varigheder, der forekommer størst forskel på de to datasæt/metoder.

### Perspektivering

Dette kapitel har præsenteret grundstenene for, hvordan radarregn kan bruges til at lave en samling arealregnhændelser, der hver især repræsenterer forskellige gentagelsesperioder og varigheder, som kan indgå i et samlet "katalog". Næste skridt ville være at lave en kvalitetsbaseret udvælgelse af de genererede hændelser. Som det ses fra semi-variogram-analysen er det som udgangspunkt ikke nødvendigt med et bredt spænd af hændelser med varighed på 180 minutter og opefter. Det bliver dog mere vanskeligt at skulle vælge én specifik hændelse til at indgå i kataloget, da den spatiale struktur af disse hændelser varierer signifikant. Det ville kræve enten en fuld forståelse for det afløbssystem, der skal undersøges med radarkataloget, eller at det accepteres, at der kan indgå flere hændelser i kataloget for de korte varigheder.

For at vurdere den fulde værdi af et radarregnkatalog er det oplagt at benytte de genererede arealhændelser som input til en hydraulisk afløbsmodel. For at gøre sammenligning mest fair kunne de enkelte hændelser fra kataloget blive sammenlignet med designregn genereret ud fra den punktstatistik, SST-metoden genererer, som vist på Figur 5.34.

## 5.4 Konklusion

KLIMAKS-projektet har søgt at løse presserende problemstillinger inden for brug af regninput til dimensionering, analyse og planlægning af afløbssystemer i Danmark. Hovedfokus har været klimafremskrivning af historiske regnserier til vurdering af, hvordan afløbssystemer belastes i fremtiden på grund af klimaændringerne. Dernæst har projektet fokuseret på, hvad den stedlige variabilitet af regn betyder for belastningen på afløbssystemer.

Igennem en behovsafklaringsproces mellem projektpartnerne og projektets følgegruppe er der kortlagt fire udfordringer i forhold til håndtering af regninput som i projektet er undersøgt: 1) analyse af vandkredsløbet under serviceniveau og skybrud, 2) analyse af vandkredsløbet i hverdagsituationer, 3) design af bassiner samt 4) analyse af recipientbelastning.

Der er i projektet udviklet en metode til at klimafremskrive historiske regnserier som igennem forskellige beregningsrul er testet i forhold til udfordringerne i behovsafklaringen. Klimafremskrivningen foretages med dynamiske klimafaktorer, der varierer på årsnedbør, årstidsnedbør og ekstremer. Metoden er sammenlignet med den nuværende praksis, hvor konstante, ikke-dynamiske klimafaktorer anvendes. Følgende konkluderes:

Situationer, hvor "nuværende" metoder vurderes tilstrækkelige:

- Ved dimensionering og analyse under serviceniveau og skybrud på "simple" systemer, hvor enkelthændelser er dimensionsgivende.
- Ved design af bassiner med "store" afløbstal, hvor effekten af "koblede hændelser" er minimal.
- Når der kan knyttes en uafhængig og konstant klimafaktor til den dimensionsgivende hændelse, fx med en bestemt gentagelsesperiode.

Situationer, hvor kunstige klimafremskrevne serier er fordelagtig:

- Ved undersøgelse af, hvordan gentagelsesperioden for en kritisk hændelse (under serviceniveau og skybrud) ændrer sig fra nuværende til fremtidigt klima.
- Ved analyse og design af afløbssystemer og bassiner, hvor koblede hændelser og regnens "historik" er vigtig.
- Ved design af bassiner med "små" afløbstal
- Ved situationsafhængig afstrømning (afstrømning fra grønne arealer) i både design- og hverdagsituationer.
- Ved beregning af recipientbelastning, fx årsbelastninger (PULS-indberetninger).
- I situationer med hverdagsregn og i designsituationer, hvor årstidsafhængighed er vigtig.

Spredningen på de klimafremskrevne serier er relativt stor, da den både inkluderer variationen fra år til år samt usikkerheden på klimafremskrivningen. Dette understreger nødvendigheden af at simulere med flere serier som input, så usikkerheden i beregningsresultaterne kan belyses. Derfor anbefales et ensemble af klimafremskrevne serier frem for en enkelt klimafremskrevet regnserie.

I forhold til at undersøge den stedlige variabilitet af regn under hver af de fire situationer som beskrevet i behovsafklaringen er der i projektet initieret et arbejde omkring anvendelse af radardata. Dette arbejde fortsætter efter projektets afslutning, og derfor er der kun foreløbige konklusioner.

På store afløbsoplande falder regnen ikke jævnt fordelt over oplandet, og der er behov for arealfordelt regn. Dette kan håndteres ved anvendelse af radardata. Da anvendelse af radardata er relativt uafprøvet, er der flere udfordringer, der skal tages hånd om, før data kan anvendes direkte som regninput til afløbssystemberegninger. I nærværende projekt er denne proces startet ved en udvælgelse af "hændelser" efter areal og varighed og gentagelsesperiode ved hjælp af metoden SST. Ud fra disse data er der konstrueret et radarregnkatalog. Resultaterne viser, at der kan etableres en sammenlignelig "statistik" ved brug af radardata og regnmåler-systemet, og at den stedlige variabilitet af regn er vigtig for regnvarigheder under 180 minutter.

I et Ph.d.-projekt på Aalborg Universitet, som har været knyttet til KLIMAKS projektet, er næste skridt at undersøge respons på afløbssystemet med radarregn ift. punktregn. Herudover arbejdes der på at kunne generere kontinuerte kunstige arealregnsrserier baseret på radarregnkataloget på samme måde som genereringen af kunstige punkt-regnsrserier. På sigt skal klimafremskrivningen ligeledes implementeres på kunstige arealregnsrserier, så der kan fremstilles kunstige arealregnsrserier, som er repræsentative for det fremtidige klima i Danmark, og som kan anvendes inden for afløbsteknikken.

## 6 Litteraturliste

De Niel, J., Van Uytven, E. and Willems, P.: Uncertainty Analysis of Climate Change Impact on River Flow Extremes Based on a Large Multi-Model Ensemble, *Water Resour. Manag.*, 33(12), 4319–4333, doi:10.1007/s11269-019-02370-0, 2019.

Nielsen, K.T., 2018, *Monitoring af Overfladeafstrømning fra Grønne Områder (MOGO)*, Slutrapport, Vandteknologiens udviklingsfond.

Nielsen, K.T., Moldrup, P., Thorndahl, S., Nielsen, J.E., Uggerby, M., Rasmussen, M.R. (2019) Field-scale monitoring of urban green area rainfall-runoff processes. *Journal of Hydrologic Engineering* 24 (8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001795](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001795)

Ochoa-Rodriguez, S., Wang, L.P., Gires, A., Pina, R.D., Reinoso-Rondinel, R., Bruni, G., Ichiba, A., Gaitan, S., Cristiano, E., van Assel, J., Kroll, S., Murlà-Tuyls, D., Tisserand, B., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Onof, C., Willems, P., ten Veldhuis, M.C., 2015. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. *J. Hydrol.* 531, 389–407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.035>

Rosbjerg, D., Madsen, H., 2019. Initial design of urban drainage systems for extreme rainfall events using intensity–duration–area (IDA) curves and Chicago design storms (CDS). *Hydrol. Sci. J.* <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1645958>

Skipper-Jørgensen, C. (2019) *Afstrømning fra Ubefæstede Arealers Påvirkning på Afløbssystemet*, Kandidatspeciale, Vand og Miljø, Aalborg Universitet

SVK, 2014: *Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter*, Skrift nr. 30. [online] Available from: [https://ida.dk/sites/default/files/svk\\_skrift30\\_0.pdf](https://ida.dk/sites/default/files/svk_skrift30_0.pdf), 2014.

Sørup, H.J.D., Davidsen, S., Löwe, R., Thorndahl, S.L., Borup, M., Arnbjerg-Nielsen, K., 2018. Evaluating catchment response to artificial rainfall from four weather generators for present and future climate. *Water Sci. Technol.* 77, 2578–2588. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.217>

Thorndahl, S., 2016. *Klimafremskrivning af Viby-regnserien*. DCE Technical Memorandum, nr. 61, Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg.

Thorndahl, S.L. & Løvgaard, A. 2018, *Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde: Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer*. DCE Technical Memorandum, nr. 66, Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg.

Thorndahl, S., Korup Andersen, A., Larsen, A.B., 2017. Event-based stochastic point rainfall resampling for statistical replication and climate projection of historical rainfall series. *Hydrology and Earth System Sciences* 21. doi:10.5194/hess-21-4433-2017

Thorndahl, S., Nielsen, J.E., Rasmussen, M.R., 2014. Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series. *J. Hydrol.* 508. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.056>

Thorndahl, S., Andersen, C.B. (2020) *CLIMACS: a method for stochastic generation of continuous climate projected point rainfall for urban drainage design*. Under udarbejdelse til WATER - MDPI

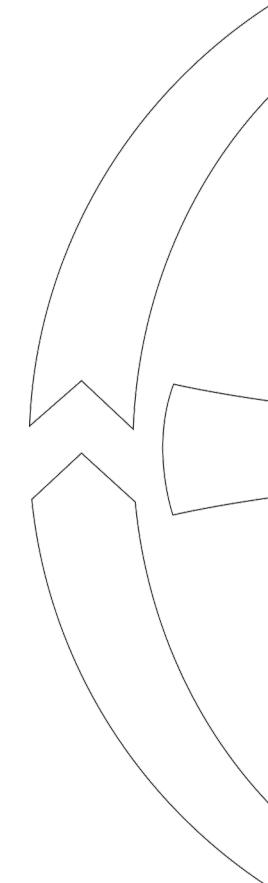


Thorndahl, S., Nielsen, J., Rasmussen, M., 2019. Estimation of Storm-Centred Areal Reduction Factors from Radar Rainfall for Design in Urban Hydrology. *Water* 11, 1120. <https://doi.org/10.3390/w11061120>

Wright, D.B., Mantilla, R., Peters-Lidard, C.D., 2017. A remote sensing-based tool for assessing rainfall-driven hazards. *Environ. Model. Softw.* 90, 34–54. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.12.006>

Wright, D.B., Smith, J.A., Villarini, G., Baeck, M.L., 2014. Long-Term High-Resolution Radar Rainfall Fields for Urban Hydrology. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 50, 713–734. <https://doi.org/10.1111/jawr.12139>

Wright, D.B., Smith, J.A., Villarini, G., Baeck, M.L., 2013. Estimating the frequency of extreme rainfall using weather radar and stochastic storm transposition. *J. Hydrol.* 488, 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.003>

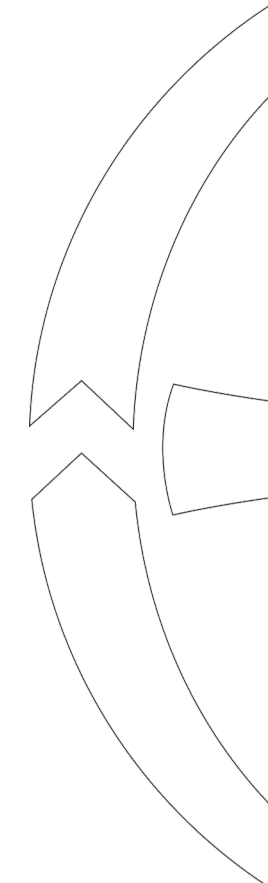


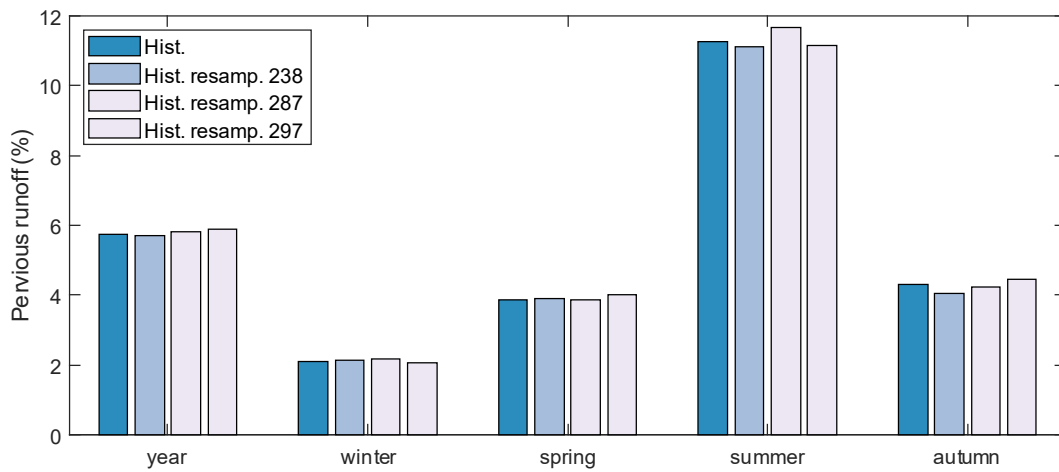
## 7 Bilag 1: Afstrømning fra ubefæstede (grønne) arealer

Tidligere, som en del af projektet MOGO (Monitering af Overfladeafstrømning fra Grønne Områder, VTU-fonden), er der udarbejdet en metode til at beregne et muligt afstrømningsbidrag fra ubefæstede grønne arealer til afløbssystemer. I rapporten *Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde: Metoder til beregning af bidrag fra grønne og ubefæstede arealer* (Thorndahl og Løvgaard, 2018) er der således beskrevet to forskellige metoder, hhv. Horton og Green-Ampt, som kan anvendes og parameteriseres til at beskrive denne afstrømning. Metoden er i Skipper-Jørgensen (2019) opdateret til en modificeret Green-Ampt, der i bedre grad beregner jordens infiltrationskapacitet i den umættede zone, og dermed mere præcist kan beregne et eventuelt overfladeafstrømningsbidrag. Desuden er der sammenlignet med Thorndahl og Løvgaard (2018) anvendt parameterværdier, som er mere repræsentative for de geologiske forhold i og omkring Aarhus, idet data fra MOGO-projektets målekampagner i Lystrup er anvendt (Nielsen, 2018 og Nielsen et al. 2019). I KLIMAKS er den modificerede Green-Ampt anvendt på både reference-regnserie, kunstige regnserier, der repræsenterer det nuværende klima, samt de genererede klimafremskrevne regnserier.

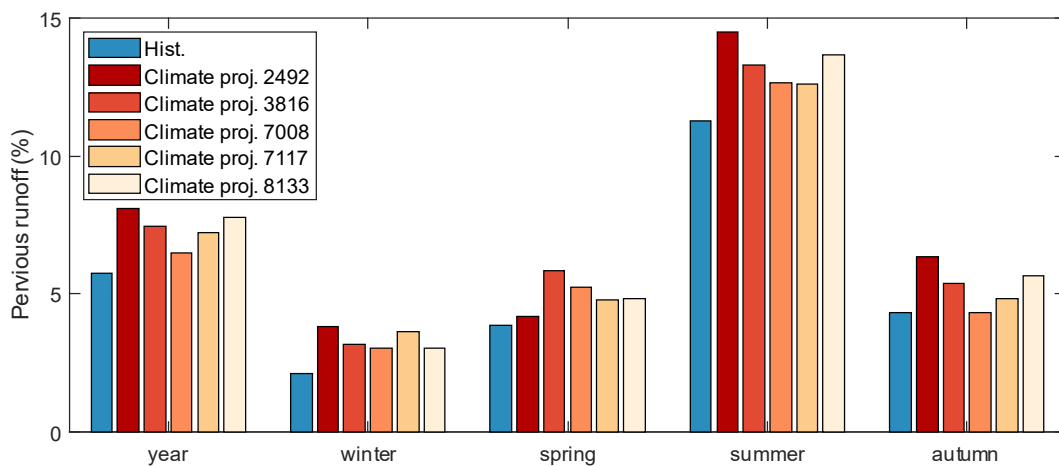
Det overordnede koncept i beregning af afstrømningsbidraget fra ubefæstede arealer er MIKE URBAN-modelberegninger, hvor der regnes på et afstrømningsbidrag fra de befæstede overflader (på traditionel vis). Herudover beregnes afstrømningsbidraget fra de ubefæstede arealer ved at koble disse separat på overflademodellen. Herved kan der på de ubefæstede overflader beregnes et afstrømningsbidrag, som baserer sig på en modificeret regnserie. I denne er overfladeafstrømningen beregnet ud fra den del af regnen, som ikke infiltrerer og magasineres i jorden. Der tages således kronologisk højde for jordens aktuelle vandmætning og afdræning af jorden mellem regnhændelser. Der regnes derfor kun et afstrømningsbidrag, når jorden opnår en vis mætning. Der henvises til de nævnte referencer for en detaljeret beskrivelse af metodikken.

Figureerne viser, hvor meget den ubefæstede afstrømning (afstrømning fra grønne overflader) udgør af års- og årstidsnedbøren for hhv. det nuværende klima og det fremtidige klima med de forskellige genererede serier.





Figur 7.1 Procentandel af afstrømning fra ubefæstede arealer i forhold til nedbøren fordelt på regnserier for det nuværende klima og årstider



Figur 7.2 Procentandel af afstrømning fra ubefæstede arealer i forhold til nedbøren fordelt på regnserier for det fremtidige klima og årstider

I tabellen er det gennemsnitlige antal millimeter ubefæstet afstrømning angivet sammen med ændringen i procent fra nuværende til fremtidigt klima. Bemærk, at stigningerne i den ubefæstede afstrømning er meget større end stigningerne i års- og årstidsnedbør. Det skyldes, at overfladejorden generelt vil være mere vandmættet pga. øget nedbør i det fremtidige klima, og derfor er der flere regnhændelser, hvor forudsætningen for ubefæstet afstrømning er gunstig.

Tabel 7.1 Afstrømning fra ubefæstede arealer i nuværende og fremtidigt klima

|   | <b>Hele året</b> | <b>Vinter</b> | <b>forår</b> | <b>Sommer</b> | <b>Efterår</b> |
|---|------------------|---------------|--------------|---------------|----------------|
| <b>Afstrømning fra ubefæstede arealer Nuværende klima (mm)</b>  | 38,0             | 3,1           | 4,9          | 21,7          | 8,3            |
| <b>Afstrømning fra ubefæstede arealer fremtidigt klima (mm)</b> | 56,1             | 5,4           | 6,4          | 32,2          | 12,0           |
| <b>Ændring (%)</b>  | 47,4             | 72,7          | 29,4         | 48,7          | 45,0           |