

Indvirkning af spatialt regn på hydraulisk modellering og ekstremstatistik



KANDIDATSPECIALE
EMIL BUNDGAARD CARSTENS
SEBASTIAN MEYER JOHANNESSEN
WATER AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING
AALBORG UNIVERSITET - BUILD
AFSLUTTET D. 06-06-2024



AALBORG UNIVERSITET
Kandidatspeciale

BUILD

9. - 10. Semester

Thomas Manns vej 23

9220 Aalborg Øst

<https://www.build.aau.dk>

Titel:

Indvirkning af spatialt regn på
hydraulisk modellering og ekstremstatistik

Title in English:

Influence of spatial rainfall on hydraulic
modeling and the extreme statistics

Projekt:

Kandidatspeciale - 45-ECTS

Projektperiode:

01-09-2023 - 06-06-2024

Forfattere:

Emil Bundgaard Carstens
Sebastian Meyer Johannesen

Vejledere:

Søren Liedtke Thorndahl
Christoffer Bang Andersen

Synopsis:

Dette projekt omhandler brugen af regnin-put med stedlig opløsning i hydraulisk mo-dellering, og hvilken betydning det har på model responsen. Ved brugen af regninput med stedlig opløsning kan den usikkerhed, der opstår ved at ekstrapolere en punktmålt regn over oplandet, mindskes. Oplandet omkring Utterslev Mose i København er brugt til projektet. I projektet er der arbej-det med regnmålerdata og radardata, hvor radardataet er justeret til at efterligne de regnmålermålte nedbørsmængder.

De store mængder af regndata har skabt grundlag for mange lokale regnserier, som i projektet benyttes til scenarier med forskel-lige grader af stedlig opløsning. Scenarierne benyttes til undersøgelsen af den relative model respons og ekstremstatistik. Her blev en tendens til, at bedre stedlig opløsning gav mindre overløbsvolumen, fundet.

Afviselserne mellem de lokale regnserier og den regionale model er undersøgt med hen-syn til måleusikkerheden mellem radar og regnmåler. To korrigeringsmetoder benyt-tes: én faktor korrigerer og statistisk nud-ging. For disse serier beregnes ny ekstrem-statistik på overløb. Derudover er der fore-taget en sensitivitetsanalyse på f-værdier for alle de individuelle serier. Forholdene ved ekstrapolerings usikkerheden er under-søgt, og viste sig at være stor.

Der er foretaget en stokastisk kalibringsa-nalyse af, hvordan den hydrologiske reduk-tionsfaktor ændrer sig ved regninput med forskellige grader af stedlig opløsning.

Antal sider: 110

Bilag: 11

Afsluttet: 06-06-2024

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af Emil Bundgaard Carstens og Sebastian Meyer Johannesen, fra studieretningen Water and Environmental Engineering på Aalborg Universitet. Projektet er lavet på baggrund af erfaringerne med vejrradar fra instituttets forskningsgruppe "Byens vand". Projektet er på 45 ECTS-point og er udarbejdet i perioden 01-09-2023 til 06-06-2024.

Der udtrykkes tak til vejlederne; Søren Liedtke Thorndahl og Christoffer Bang Andersen for løbende sparring og vejledning gennem projektperioden. Yderligere skal der afgives et tak til Daniel L. Brødbæk, Toke Sloth Illeris og Thomas Aagaard Jensen fra Hovedstadsområdets Forsyningsselskab (HOFOR), for løbende samarbejde samt udlevering af hydraulisk model og niveaumålinger fra overløbsbygværker.

Læsevejledning

Projektrapporten er inddelt i dele, som hver repræsenterer en analyse. Projektets figurer og tabeller er refereret til med kapitel og så rækkefølge nummer, "Kapitel.Nummer" i teksten. Referencer til kapitler eller afsnit i rapportteksten er angivet som "Kapitel.Afsnit". Rapportens bilag er angivet med bogstaver og er refereret, hvor relevante, med "Bilag X". Tidsangivelser i rapporten er præsenteret i UTC+0 tidszone.

Projektets kilder er refereret til efter Harvard metoden, med forfatterens efternavn først efterfulgt af udgivelses året. Kilder i teksten vil vises som; "Efternavn [År]" og kilder til teksten vil vises som; "[Efternavn År]". Er "[ibid]" vist, er dette en kildehenvisning, til den forrige præsenterede kilde. I slutningen af rapporten vil der være en bibliografi hvor mere information på kilder kan findes, såsom; alle forfattere, titel og URL-link.

Projektet er udarbejdet af følgende:

Emil B Carstens

Emil Bundgaard Carstens

Sebastian M Johannesen

Sebastian Meyer Johannesen

Abstract

This project investigates the implementation of spatial resolution rainfall input in hydraulic modeling and its consequential impact on model response. By employing rainfall input with spatial resolution, the uncertainty from extrapolating point-measured rainfall over a catchment area is mitigated.

Utterslev Mose located in Copenhagen Denmark is used as a case area for the project. The study utilizes a combination of rain gauge data and radar data, here adjustments are made to the radar data to accurately replicate ground measurements from rain gauges.

The abundance of rainfall data facilitates the generation of numerous local rain series, which are utilized across scenarios with varying spatial resolutions. Through analysis of the relative model responses and extreme statistics, these scenarios showed a trend wherein finer spatial resolution resulted in lower overflow volumes.

In assessing the disparities between local rain series and the Danish regional model, particular attention is given to the measurement uncertainty between radar and rain gauge data. To address this, two correction methods are used: single factor correction and statistical nudging. This is followed by an analysis of the change in extreme statistics. Additionally, a sensitivity analysis of the f-value on all individual rain series is conducted. In addition, the spatial extrapolation uncertainty is investigated.

Furthermore, a stochastic calibration analysis is conducted to investigate the change in the hydrological reduction factor in response to varying degrees of spatial resolution on the rainfall input. This is done in relation to real life observed data from overflow structures connected to the combined sewer system.

Indholdsfortegnelse

I	Introduktion	11
Kapitel 1	Indledning	13
Kapitel 2	Beskrivelse af projektområde	15
2.1	Model for Utterslev Mose	16
Kapitel 3	Problemformulering	19
II	Analyse af nedbørsdata	21
Kapitel 4	Radardata	23
4.1	Radardata for projektområde	26
Kapitel 5	Regnmålerdata	27
5.1	Regnmåler udfaldsperioder	28
Kapitel 6	Sammenhæng mellem radar og regnmålere	29
6.1	Sammenhæng i døgnnedbør mellem radar og regnmåler	29
6.2	Sammenhæng i årsnedbør mellem radar og regnmåler	32
6.3	Sammenligning af intensitet mellem radar og regnmåler	33
Kapitel 7	Opsamling på Del II	35
III	Relativ sammenligning af model respons	37
Kapitel 8	Udvælgelse af regnhændelser	39
Kapitel 9	Modelopsætning	41
9.1	Model kriterier	41
9.2	Regninput scenarier	42
Kapitel 10	Relativ sammenligning af modelresultater	47
10.1	Samlet overløb fra projektområde	47
10.2	Overløb til Utterslev Mose fra Københavns Kommune	50
10.3	Fordeling af overløbsvolumen på månedsbasis	52
Kapitel 11	Opsamling af Del III	55

IV	Lokale regnserier & den regionale model	57
Kapitel 12	Sammenligning af lokale regnserier og den regionale model	59
12.1	Den regionale model og korrektion	59
12.2	F-værdier for originale regnserier	61
Kapitel 13	Korrigerig af lokale regnserier til den regionale model . .	65
13.1	Én faktor korrigerig	65
13.2	Korrigerig med statistisk nudging metode	66
Kapitel 14	Ekstremstatistik for korrigerede regnserier	69
Kapitel 15	Sensitivitetsanalyse af f-værdi	71
15.1	Metode til sensitivitetsanalyse	71
15.2	Resultater af sensitivitetsanalyse	72
Kapitel 16	Diskussion - Del IV	77
16.1	Diskussion af metoder til korrigerig	77
16.2	Diskussion af sensitivitetsanalysen på f-værdi	78
Kapitel 17	Opsamling af Del IV	81
V	Stokastisk kalibreringsanalyse på hydrologisk reduktionsfaktor	83
Kapitel 18	Metode til kalibreringsanalyse	85
Kapitel 19	Resultater til kalibreringsanalyse	89
Kapitel 20	Diskussion til kalibreringsanalyse	95
Kapitel 21	Opsamling af Del V	101
VI	Afrunding af rapport	103
Kapitel 22	Overordnet diskussion	105
Kapitel 23	Konklusion	109
VII	Bilag	115
Bilag A	Radardata korrigerig	117
Bilag B	Performance parameter	119
Bilag C	Regnmåler nedbrudsanalyse	121
Bilag D	Sammenhæng mellem individuel målere og radarpixels . .	125

Bilag E	LTS-regndage	127
Bilag F	Yderligere resultater fra den relative sammenligning . . .	131
Bilag G	F-værdier for ukorrigerede serier	135
Bilag H	Én faktor korrigerig	143
Bilag I	Statistisk nudging metode f-værdier	145
Bilag J	Kalibreringsanalyse	149
Bilag K	Nudged Kalibringsanalyse	151

Del I

Introduktion



1 | Indledning

I 1800-tallet blev nødvendigheden af at have overordnede forhold for afløbsvand erkendt, som konsekvens af koleraepidemier i Europa [Winther 2011]. Indførelsen af afløbssystemer har bidraget til forbedring af folkesundheden ved at lede det forurenede vand væk fra urbane områder, og ud til vandløb og hav. Men dette har senere haft konsekvenser for miljøtilstanden i udledningsrecipienterne. I sidste halvdel af 1900-tallet blev afløbssystemerne i stedet tilsluttet rensningsanlæg [ibid.].

I moderne tid har kapacitetsproblemer under nedbør, i fælleskloakerede afløbssystemer og rensningsanlæg, været håndteret med overløbsbygværker til recipienter. Miljøkonsekvenser i recipienterne har medført skærpede krav til udledning af overløbsvand, dette har resulteret i en nødvendig omlægning af afløbssystemet [Miljøstyrelsen 2024]. I dag dimensioneres løsninger til reduktion af overløb primært med hydrauliske modeller, som forsøger at estimere virkeligheden [Mark 2019].

Brugen af spatialt regndata i hydrauliske modeller er steget i popularitet i de seneste år, med for eksempel radardata. Med spatialt regn menes input, som beskriver nedbørens dynamik i tid og sted. Dette introducerer mulighed for at tage højde for regnens stedlig variation over oplandet i modelarbejdet, i forhold til brug af traditionelt punktmålt regn [Thorndahl et al. 2017]. Traditionelt har kasseregns og CDS-regns været brugt som dimensioneringsgrundlag i simple systemer. Ved mere komplekse systemer anbefales brug af historiske regnserier fra en regnmåler [Harremoës et al. 2005]. Ved brug af en punktmåling introduceres der dog ved ekstrapoleringen af regnserien over oplandet, usikkerheder i de hydrauliske beregninger [Mikkelsen et al. 1999].

Brugen af radarteknologi til estimering af nedbør påbegyndes under anden verdenskrig, til militære formål. Siden har udviklingen været foretaget af meteorologiske og forskningsinstitutter med henblik på at forbedre datagrundlaget for nedbørs observationer [Sokol et al. 2021]. Udviklingen har medført at radardata i dag er et essentielt værktøj til vejrprognose og varslig [Hansen 2020]. Yderligere har udviklingen medført at der findes et datagrundlag, der har god nok opløsning til brug i hydrauliske modeller [Einfalt et al. 2004].

Forholdet mellem opløsning af vejrradar og usikkerhed på hydrauliske modeller er undersøgt i flere studier. I Ochoa-Rodriguez et al. [2015] konkluderes det på baggrund af undersøgelse af flere forskellige oplande, af varierende areal, at den stedlige opløsning har stor betydning på modelfejlen. Ved små oplande er fejlen ved grov opløsning størst. Samtidigt havde den tidlige opløsning af radardataet en betydelig effekt på modelfejlen. Studiet estimerer, at oplande på omkring 100 ha bør have en stedlig opløsning på minimum 0,5 km og tidlig opløsning på under 5 minutter. [ibid.]

Som alternativ til en punktmåling er der i nogle studier, for at tage højde for regnens stedlige variation, brugt flere regnmålere fordelt over oplandet. Der blev i Maier et al. [2020] fundet betydelige forskelle på modelresultatet afhængig af mængden af medtagende regnmålere over oplandet. Ligeledes i Zeng et al. [2018] blev der fundet betydelige forbedringer af model

responsen ved brug af flere regnmålere.

Forholdet mellem punktregn og fladeregner i hydrauliske modeller er ofte beskrevet ved arealreduktionsfaktorer og depth-area forhold. Disse er typisk afhængig af oplandsarealet, hvor der ved store oplande er mindre arealreduktionsfaktorer og derved en større forskel mellem punktregn og fladeregner [Berndtsson og Niemczynowicz 1988]. I Danmark er der ligeledes arbejdet med arealreduktionsfaktorer for at tage højde for den stedlige fordeling af regn i Rosbjerg og Madsen [2019] og Thorndahl et al. [2019]. Hvor det er konkluderet at arealudbredelse og varighed af regnhændelsen har stor betydning på arealreduktionsfaktoren.

Usikkerheden ved brugen af punktregn er at den spatiale variation over oplandet indirekte bliver håndteret med den hydrologisk reduktionsfaktor ved kalibrering. Problematikken ved brug af reduktionsfaktor i forbindelse med kalibrering af hydrauliske modeller, med input fra punktmåling, er at det kun er repræsentativ for den anvendte regns spatiale udbredelse [Thorndahl 2008]. Derved bør der, ved regnininput af andre opløsninger, ske en ændring i den hydrauliske models parametre ved ny kalibrering. Det hypoteses at usikkerheden på regnininputtet vil falde når der bruges spatialt regn og derved vil der potentielt kunne opnås en højere reduktionsfaktor ved kalibrering.

I Danmark er der et landsdækkende regnmåler netværk bestående af lange tidsserier med høj tidslig opløsning, som drives af Spildevandskomiteen (SVK) [Sarup 2023]. Her er der særligt på Sjælland en høj densitet af regnmålere, som tidligere har skabt grundlag for undersøgelsen af spatialt regn. Blandt andet i: Andersen [2018], Thomassen et al. [2023] og Thorndahl [2017]. Regnmåler netværket er yderligere grundlag for den regionale model for ekstremregn i Danmark, beskrevet i Arnbjerg-Nielsen et al. [2023]. Det er praksis, at bruge modellen til at medtage den regionale variation i dimensioneringsregn for punktregn. Ved brug af historiske regnserier fra regnmålere netværket anbefales det at korrigere intensiteten så belastningen er lig den regionale model. Uoverensstemmelser mellem de historiske regnserier og den regionale model kan skyldes de generelle usikkerheder, som er tilknyttet regnmåling, såsom læforhold og lokal klimatologi [Winther 2011]. Dette introducerer den såkaldte f-værdi der skal bruges til korrigeringen til den regionale model. [Arnbjerg-Nielsen og Illeris 2023]

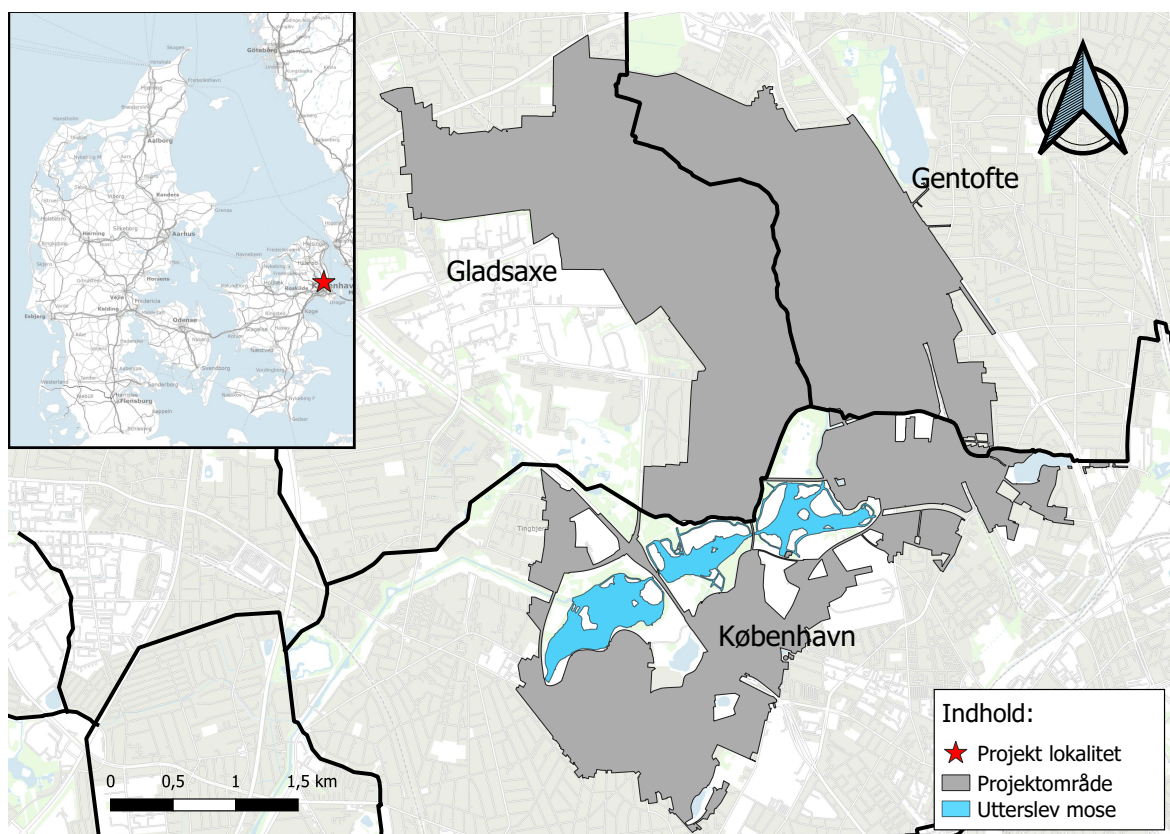
Et kloakopland som kan være interessant at analysere spatialt regn, kan være ved Utterslev Mose. Her er der tidligere undersøgt i kandidatspecialet Hansen et al. [2023], om spatialt regns påvirkning på afløbsmodelleringen. I studiet blev spatialt regn brugt til undersøgelsen af model respons, som konkluderes at have en signifikant betydning. Med input fra flere regnmålere, konvergerede model responsen mod resultatet opnået ved radardata input.

På baggrund af Københavns Kommunes spildevandsplan er det fastsat at hyppigheden af aflastninger fra overløbsbygværker til Utterslev Mose skal reduceres til én gang årligt, ved etablering af bassinvolumen eller tilsvarende [Københavns Kommunes 2018]. Forsyningsselskabet i Københavns Kommune; HOFOR, skal i forbindelse med spildevandsplanen foretage planlægning til nødvendige tiltag for at opholde kravet [ibid.].

Oplandet omkring Utterslev Mose er en del af projektet Svanemøllen Skybrudstunnel [HOFOR 2024]. Skybrudstunnelen skal udover at håndtere skybrud ved høje gentagelsesperioder, bruges som bassinkapacitet til reduktion af overløb fra fællessystemet ved lave gentagelsesperioder [ibid.]. Der er i dette projekt valgt at arbejde med model af kloakoplandet for Utterslev Mose til analyse af indflydelsen af spatialt regn. I følgende kapitel er området og modellen præsenteret.

2 | Beskrivelse af projektområde

Projektetområdet er lokaliseret i København ved Utterslev Mose, hvor oplandet fordeles i henholdsvis København, Gentofte og Gladsaxe Kommune, se figur 2.1. Oplandet har et total areal på 12,5 km². Utterslev Mose er beskyttet natur og fungerer som rekreativt område i byen. Projektet er udført i samarbejde med HOFOR, som undervejs har givet sparring samt udleveret model og måltdata for området.



Figur 2.1: Projekt lokation Utterslev Mose København Danmark.

Historisk set har Utterslev Mose været brugt som dele af vandforsyningen til København frem til 1959. I 1939 til 1943 blev mosen opgravet til den nuværende sø med åbent vand. I takt med byfortætningen omkring mosen blev der etableret bolig- og industrikvarter. Dette har medført at store mængder urensset kloak og industrispildevand er blevet ledet til mosen i 1950'erne og 1960'erne. Udledningen er i dag reduceret til regnbetingede overløb, som også er blevet reduceret væsentligt i de senere år. [Heick 2023] [Københavns Kommune 2018]

I dag er søen fortsat meget forurenet og blandt andet benævnt som "En af Danmarks mest forurenede søer" [Rothenborg 2023]. I henhold til at kunne leve op til EUs vandrammedirektiv om god økologisk tilstand i år 2027, er der fastlagt planer i Københavns Kommunes spildevandsplan. Forsyningsselskabet HOFOR skal reducere overløb til en gang årligt, ved etablering af bassinvolumen. [Københavns Kommune 2018]

I det omkringliggende område er der flere SVK-regnmålere der kan danne grundlag for projektets analyser. Yderligere er området indenfor Stevns radarens observationsområde. Nedbørsdata er præsenteret i Del II.

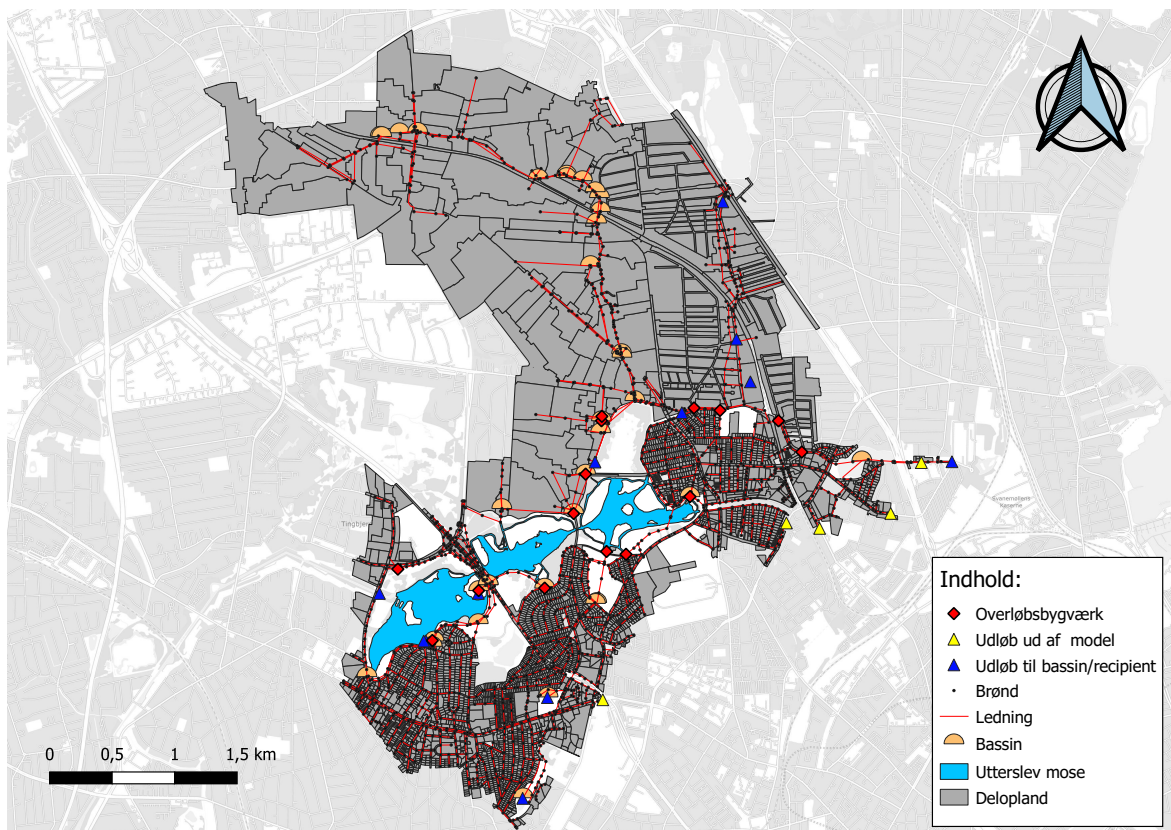
2.1 Model for Utterslev Mose

Der er til projektet udleveret en Mike Urban model for området af HOFOR. Mike Urban er et hydraulisk modelleringsværktøj til modelleringen af løbssystemer, yderligere information kan ses i programmets dokumentation DHI [2019]. Modellen er opsat i MIKE URBAN 2020 update 1 og kører i MIKE1D engine. Her er der brugt overflademodell A - Tid-Areal-Metoden og dynamisk bølge i rørmodel. Projektets Mike Urban model skal benyttes til undersøgelse af model responsen ved brug af forskelligt spatialt regnininput, samt den kalibreringsmæssige ændring. Arealfordelingen af modeloplandet kan ses på tabel 2.1.

Total areal [ha]	Befæstetareal [ha]	Reduceret areal [ha]
1248	448	345

Tabel 2.1: Arealfordeling af modelopland.

Model området består hovedsageligt af et fællessystem, hvor overløbsbygværker er tilknyttet. Opbygningen af projektets model kan ses på figur 2.2, hvoraf antallet af komponenter i modellen kan ses i tabel 2.2.



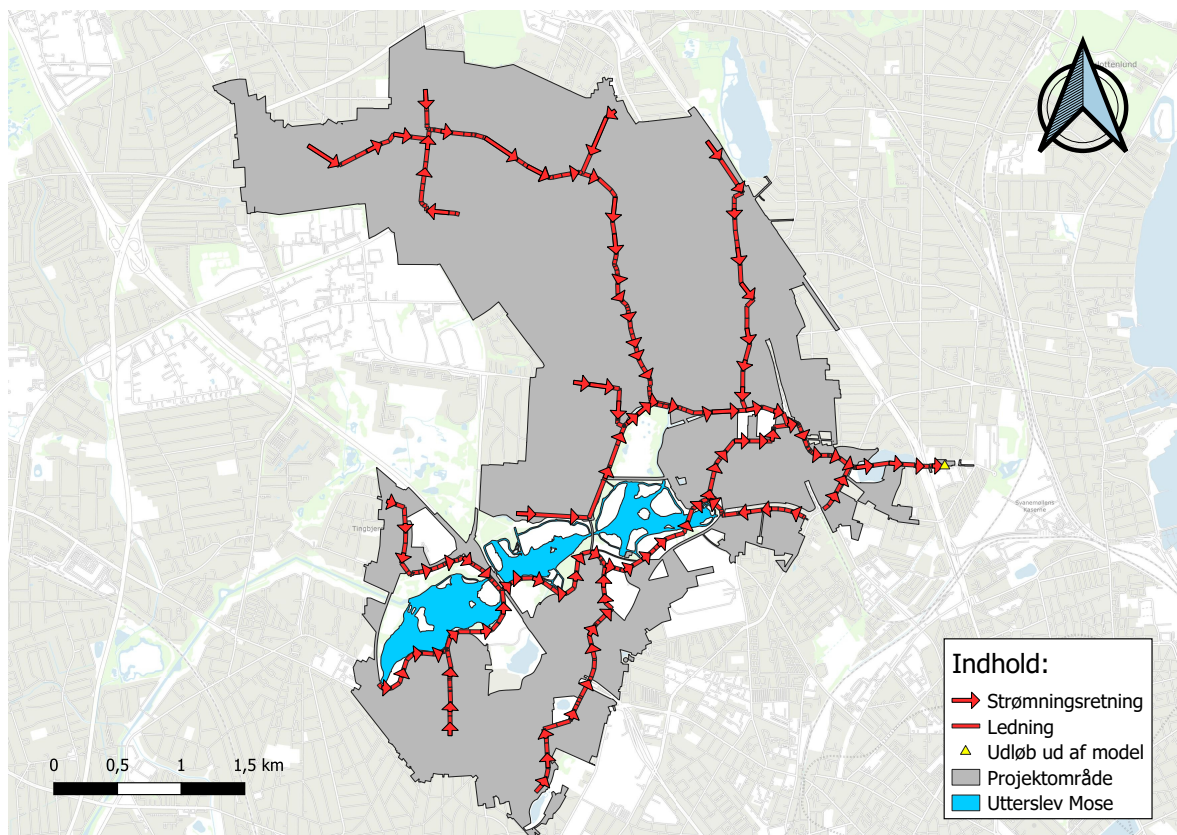
Figur 2.2: Projektets Mike Urban model med visualiseret komponenter.

Brønd	Ledning	Deloplande	Bassin	Udløb	Overløb	Pumpe	Spjæld
1739	1880	5022	35	17	71	6	21

Tabel 2.2: Antal komponenter i projektområdets Mike Urban model.

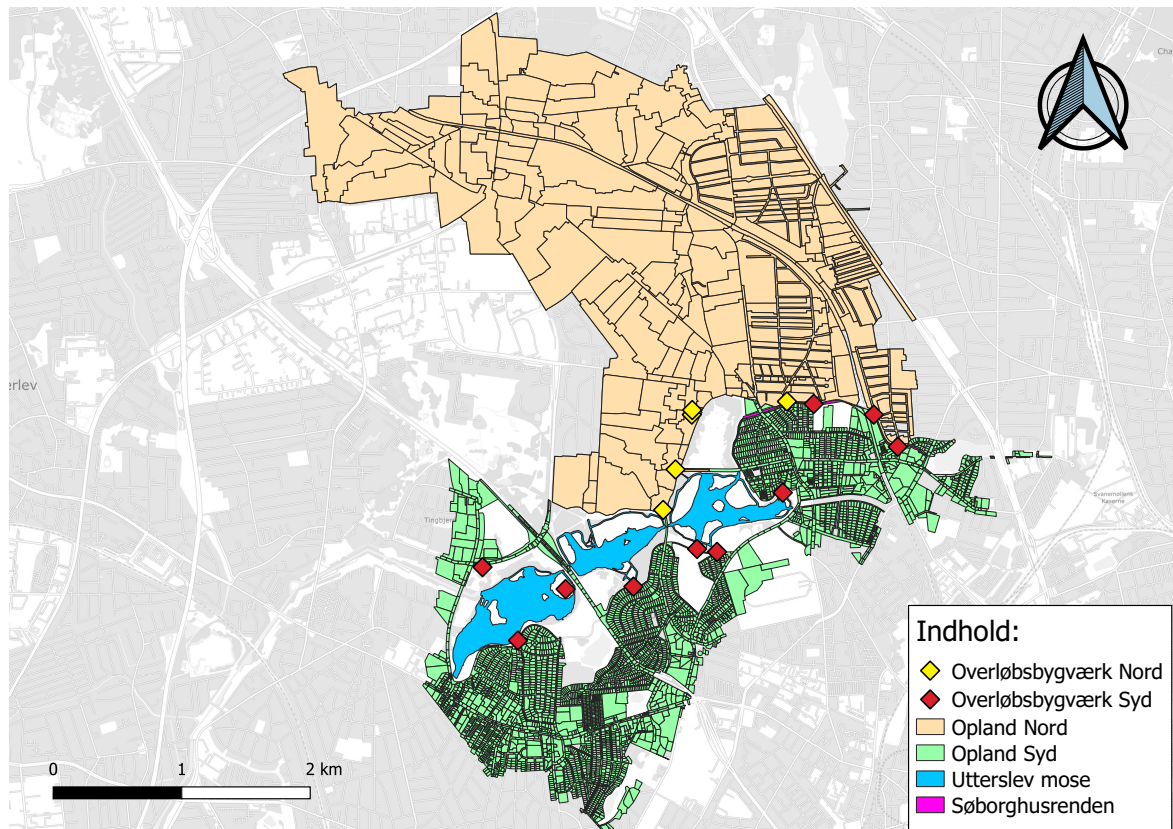
På figur 2.2 kan det observeres at der er fem udløb fra modellen, som gennem en videreførende ledning, ledes til BIOFOS renseanlæg Lynetten [BIOFOS 2019]. Der vil i projektet ikke bliver arbejdet yderligere med kloakanlægget nedstrøms modelområdet.

Modellen har en høj kompleksitet med realtidsstyring af pumper og spjæld samt mange koblede bassiner. Strømningsretningen for projektområdets primære ledninger kan observeres på figur 2.3. Strømningsretningen er hovedsageligt fra vest til øst, hvor ledningsstrækningen ender i udløbet der ledes mod Lynetten. Ledningssystemet kan observeres at være sammenhængende igennem området, fra opstrøms til nedstrøms. Dette skaber en dynamisk sammenhæng imellem de forskellige oplande i modellen og bidrager til dens kompleksitet.



Figur 2.3: Strømningsretningen for de primære ledninger i den udleverede Mike Urban model.

For den udleverede model kan det ses at modellen er opdelt i to detaljeringsgrader. Det nordlige opland beliggende i Gladsaxe og Gentofte Kommune har en grov detaljeringsgrad, hvor oplandet indenfor Københavns Kommune har en højere detaljeringsgrad. Dette kan ses på figur 2.4, her er deloplandene i Københavns Kommune inddelt i matrikler, hvor den nordlige del består af større deloplande bestående af flere matrikler. Da HOFOR ikke er forsyningsselskab i Gentofte og Gladsaxe kommune er modelarbejdet lavet mere groft. Men det er medtaget for at kunne lukke massebalancen for den videreførende ledning ud af modellen [Brødbæk 2023]. Det vurderes at detaljeringen af oplandene er tilstrækkelige til analyserne i dette projekt.



Figur 2.4: Modellens detaljeringsgrad og tilhørende overløbsbygværker.

Projektområdet består af 15 overløbsbygværker, som under kraftige regnhændelser vil udlede til Utterslev Mose og Søborghusrenden. Søborghusrenden danner grænse mellem Gentofte og Københavns kommune i den østlige del af projektområdet. Den nordlige del af området indeholder fem overløbsbygværker hvoraf fire udleder til Utterslev Mose. Den sydlige del består af ti overløbsbygværker hvoraf syv udleder til mosen.

HOFOR har i forbindelse med en hydraulisk analyse af området udført en kalibrering af modellen. Dette er udført på baggrund af observerede målinger for niveau i overløbsbygværker og vandføring i et rør nedstrøms oplandet. Her er modellen vurderet som kalibreret med en hydrologisk reduktionsfaktor på 0.8. I analysen er der også lavet betragtninger om variation i tørvejs afstrømning. [Brødbæk 2023]

3 | Problemformulering

Med udgangspunkt i de eksisterende erfaringer beskrevet i indledningen, arbejdes der i dette projekt med følgende to usikkerheder på regninputtet i hydrauliske modeller:

- Ekstrapolerings usikkerheden der opstår når en punktmålt regnserie ekstrapoleres ud over modeloplandet. Denne usikkerhed kan mindskes ved at benytte sig af spatialt regndata der beskriver nedbørens fordeling bedre i tid og sted end en punktmåling.
- Afvigelser mellem de lokale regnserier og den regionale model. På grund af måleusikkerheder, observationsperioder og usikker klimatologi kan der forekomme differencer mellem de lokale regnserier og den regionale model. Denne usikkerhed kan mindskes med korrektion af belastningen fra de lokale regnserier til den regionale model.

Med ovenstående og beskrivelsen af projektområdet Utterslev Mose, er følgende problemformulering fremsat. Her er hovedspørgsmålet:

Hvordan kan spatialt regn bruges til, at mindske usikkerheden ved hydraulisk modellering af urbane oplande?

For at kunne besvare ovenstående spørgsmål kan der formuleres følgende underspørgsmål til projektet:

1. Forekommer der betydelige afvigelser imellem regnintensiteterne målt med radar og regnmålere?
2. Hvorledes ændres den relative model respons, i ekstremstatistikken for overløb, ved brug af regninput med varierende grad af stedlig opløsning?
3. Hvordan kan lokale regnserier sammenlignes og korrigeres til den regionale model?
4. Hvilken indflydelse har en regnseries f-værdi på den resulterende ekstremstatistik på overløb?
5. Hvordan ændres den hydrologisk reduktionsfaktor ved kalibrering med regninput af forskellige grader af stedlig opløsning?

Projektet er inddelt i dele til besvarelse af problemformuleringens underspørgsmål. Formålet med de enkelte dele i rapporten er beskrevet som følger:

Del II - Analyse af nedbørsdata

I Del II er nedbørsdataet for projektområdet præsenteret og sammenlignet. Her er formålet at justere radardataet i henhold til regnmåler observationer, til brug i de følgende analyser. Forholdet mellem regnintensiteter i tidsserierne for radar og regnmålere undersøges. Denne del skal besvare problemformuleringens underspørgsmål 1.

Del III - Relativ sammenligning af modelresultater

Formålet med analysen i Del III er at arbejde med ekstrapolerings usikkerheden. Her undersøges indflydelsen af spatialt regn ved en relativ sammenligning mellem forskellige regninput scenarier. Ved udelukkende at kigge på den relative forskel er der ikke lavet betragtninger om, hvordan regnserier korrigeres og modellen kalibreres. Denne del skal besvare problemformuleringens underspørgsmål 2.

Del IV - Lokale regnserier & den regionale model

Formålet med analysen i Del IV er at undersøge og korrigere afvigelserne mellem de lokale regnserier og den regionale model. Her er der præsenteret to metoder til korrigering af regnserier med f -værdier, samt dens påvirkning på model responsen. Denne del skal besvare problemformuleringens underspørgsmål 3. og 4.

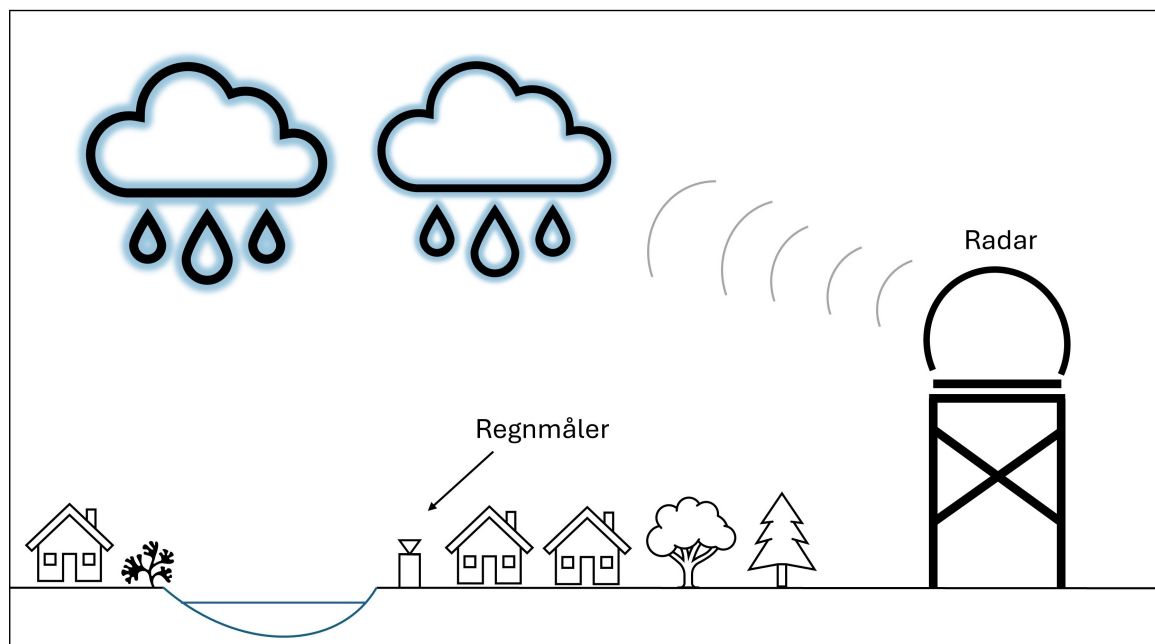
Del V - Stokastisk kalibreringsanalyse

Formålet med analysen i Del V er at undersøge hvordan mindskning af ekstrapolerings usikkerheden ved brug af spatialt regn, påvirkninger kalibreringen af den hydrauliske model mod observeret data. Med baggrund i den eksisterende viden at modeller bør kalibreres på ny ved brug af andet regninput, bliver optimale kalibreringsparametre for forskellige regninput scenarier undersøgt. Denne del skal besvare problemformuleringens underspørgsmål 5.

Del II

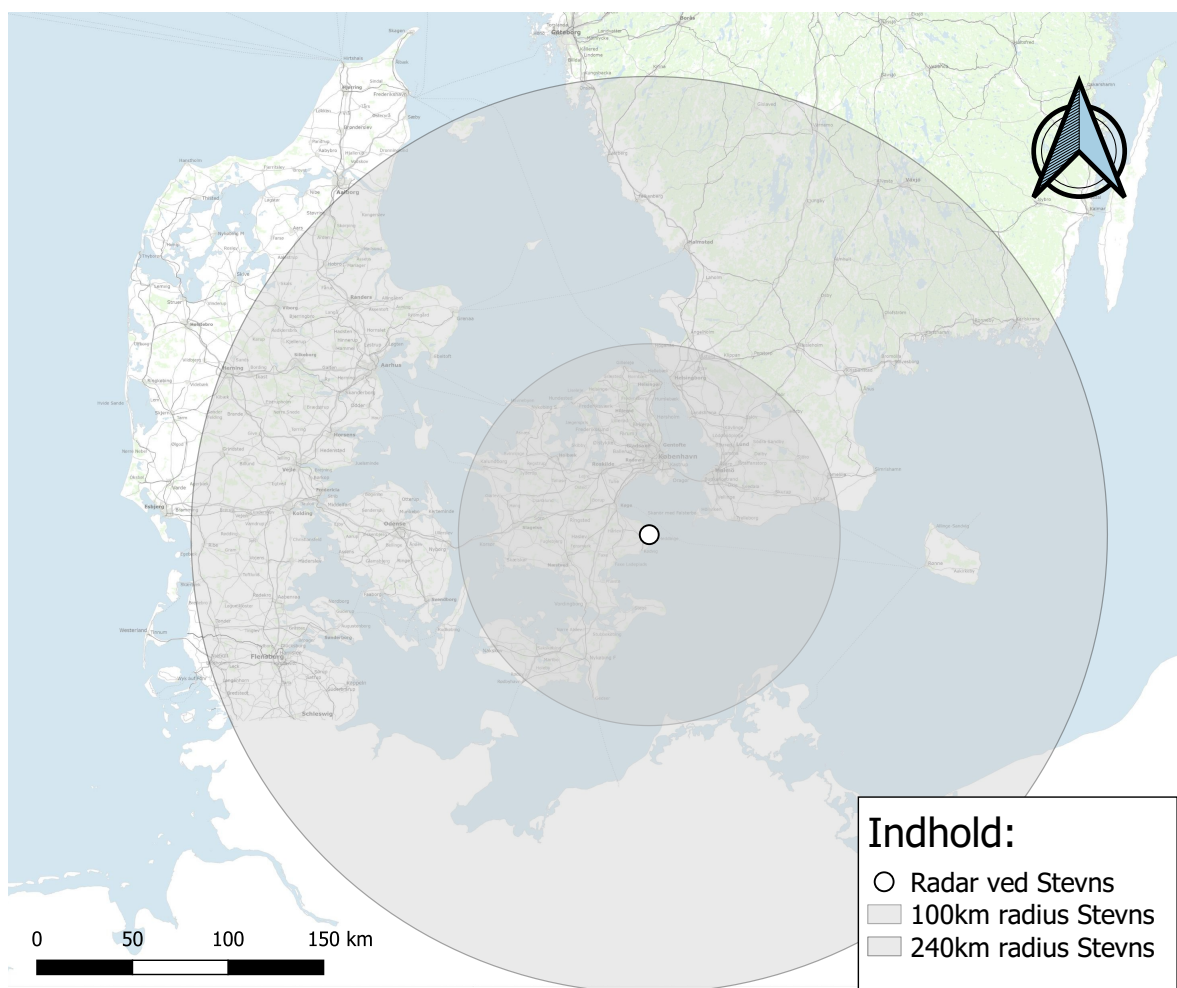
Analyse af nedbørsdata

Denne del af rapporten omfatter beskrivelsen af datagrundlaget, for henholdsvis radar og regnmåler data. Dataet skal bruges til analyser om brugen af spatialt regn i de efterfølgende dele af rapporten. Derfor analyseres sammenhængen mellem radar og regnmåler data, med henblik på at vurdere bias-justeringen. Her undersøges sammenhængen både med hensyn til døgnnedbøren og regnintensiteten for forskellige varigheder. Dataet bliver tilslut vurderet om det er af høj nok kvalitet til brug i model simuleringer.



4 | Radardata

Til dette projekt er der udleveret radardata for udvalgte dage med over 5 mm nedbørsdybde indenfor måleoplandet, i perioden 21-09-2002 til 17-09-2022. Projektets radardata er observeret af Danmarks Meteorologiske Instituts (DMI) C-bånds radar, kaldet EKXS, som er lokaliseret ved Stevns, omtrent 40 km syd for projektområdet. Radaren ved Stevns har en maksimal rækkevidde på 240 km, men ifølge Thorndahl et al. [2014] er kvaliteten af data forringet ved rækkevidder over 120 km. For projektet er der valgt at arbejde videre med 100 km rækkevidde da det dækker hele Sjælland. Placeringen af radaren og rækkevidder kan ses på figur 4.1.



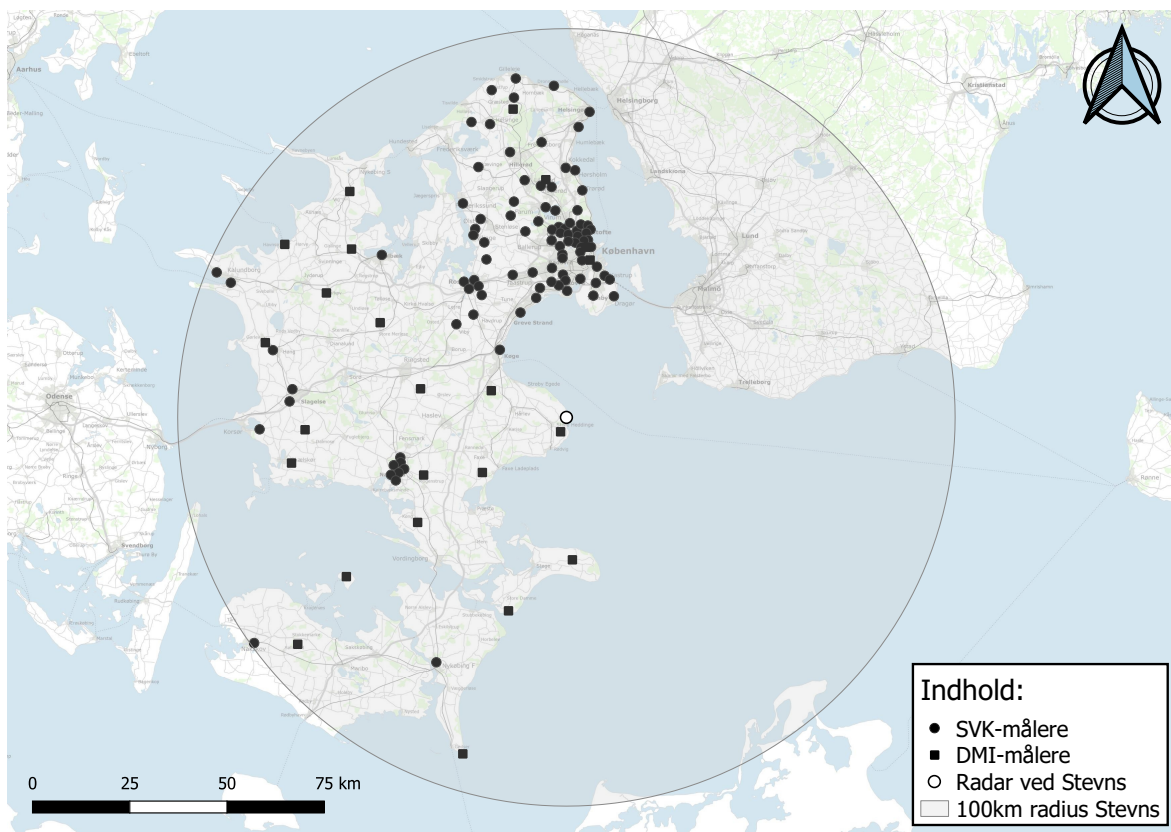
Figur 4.1: Total rækkevidde og udvalgt rækkevidde for radaren ved Stevns.

DMIs C-bånds radar, måler nedbør ved at udsende højfrekvenssignaler i ni forskellige højder, hvilket danner et grid cirka 1 km over jorden. En fuld radar cyklus tager ti minutter, og vil derfor måle regnen hvert 10. minut. Radaren opererer i et polært koordinatsystem, som senere konverteres til et kartesisk koordinatsystem med en størrelse på 480x480 pixels, hvor hver pixel har en opløsning på 0,5x0,5 km. Når signalet støder på et objekt, for eksempel

en regndråbe, reflekteres det tilbage til radaren, som vil registrere dette. Den reflekterede styrke af det registrerede signal anvendes derefter til at beregne regnintensiteten ved hjælp af en Z-R-relation [Marshall og Palmer 1948]. Denne relation etablerer forbindelsen mellem refleksion og regnintensitet. [Thorndahl et al. 2014] [Nielsen et al. 2014]

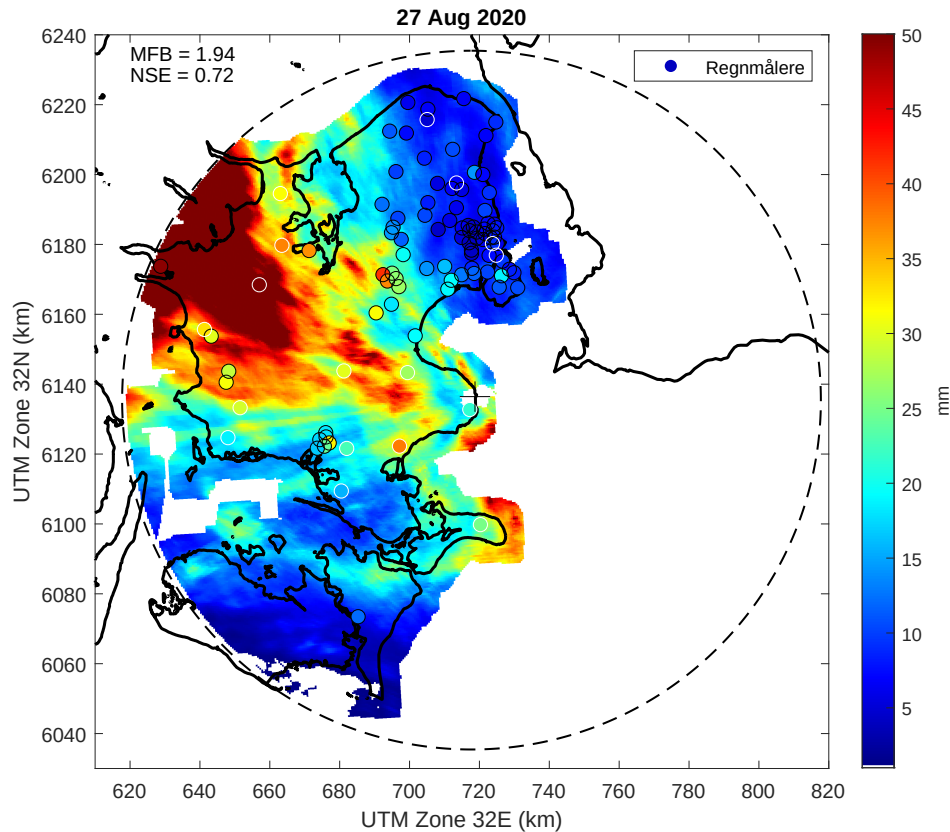
Z-R-relationen brugt i projektet kan findes i Bilag A, hvor formelen består af parametrene A og B. Disse parametre beskriver dråbe størrelse fordelingen, hvor standardværdierne $A = 200$ og $B = 1,6$, estimeret af Marshall et al. [1955], benyttes. Standardparametrene er gode til at beskrive let til moderate regnhændelser, men knap så gode ved kraftige regnintensiteter [Thorndahl et al. 2014].

Den beregnede regnintensitet via Z-R-relationen, udført på baggrund af radarmålingerne, bør bias-justeres. For optimal udnyttelse af radardata kræves daglig kalibrering ved at bias-korrigerer radardataen i forhold til punktmålinger fra regnmålere [Smith og Krajewski 1991]. Dette udføres ved at tage forholdet mellem den summerede nedbør i regnmålerne og den tilsvarende radarpixel, hvoraf en bias-faktor opnås for den pågældende dag. Bias-justeringen gentages for alle dage med tilgængelig radardata, for alle aktive regnmålere. Fremgangsmåden for bias-korrigeringen kan findes i Bilag A. Indenfor 100 km radius af Stevns radaren er der lokaliseret 96 SVK-regnmålere og 23 DMI-regnmålere, som benyttes til justeringen af radardataen, se figur 4.2. [Thorndahl et al. 2014]



Figur 4.2: Regnmåler indenfor 100 km radius af Stevns radaren.

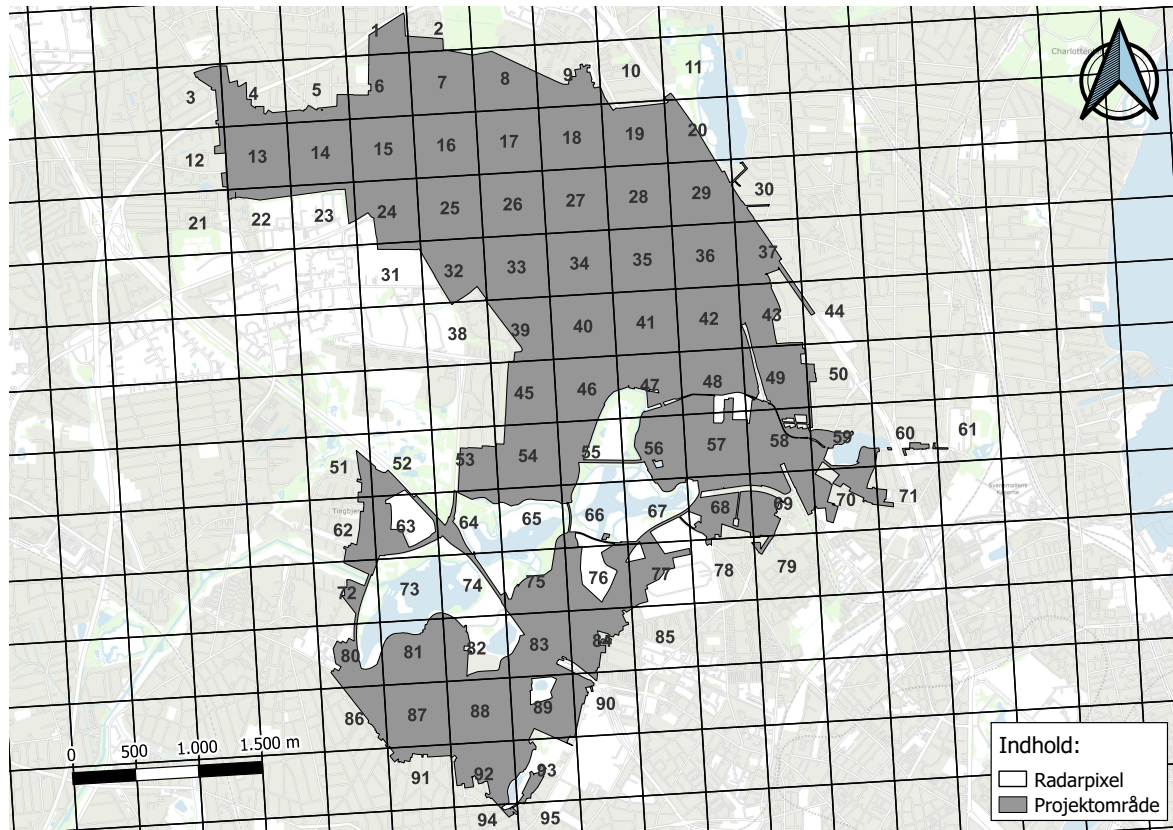
Et eksempel på bias-justering af en dag, sammenlignes den daglige summerede nedbør målt af radaren og de 119 regnmålere, kan ses på figur 4.3. Det kan observeres at der generelt er gode sammenhæng mellem døgnet nedbøren observeret i målerne og det bias-justerede radardata. Enkelte målere er længere fra radardataet end andre, men i gennemsnit giver den beregnede bias-faktor den bedste overensstemmelse.



Figur 4.3: Eksempel på bias-justering af radardata, med justeret døgnet nedbør for radar og observeret døgnet nedbør i målere. [Thorndahl et al. 2014]

4.1 Radardata for projektområde

På figur 4.4 kan fordeling af radar produktets grid i forhold til projektområdet ses. I hver pixel er en regnintensitet målt hvert 10. minut. På figuren er de pixels som overlapper dele af oplandet nummererede, disse skal senere i projektet bruges som det spatiale regnininput fra radaren i den hydrauliske model. Radarbillederne for hvert tidskridt er konverteret til en tidsserie for hver individuel pixel, som benævnes som "radarserier".



Figur 4.4: Radarpixel overlap med projektområdets kloakopland.

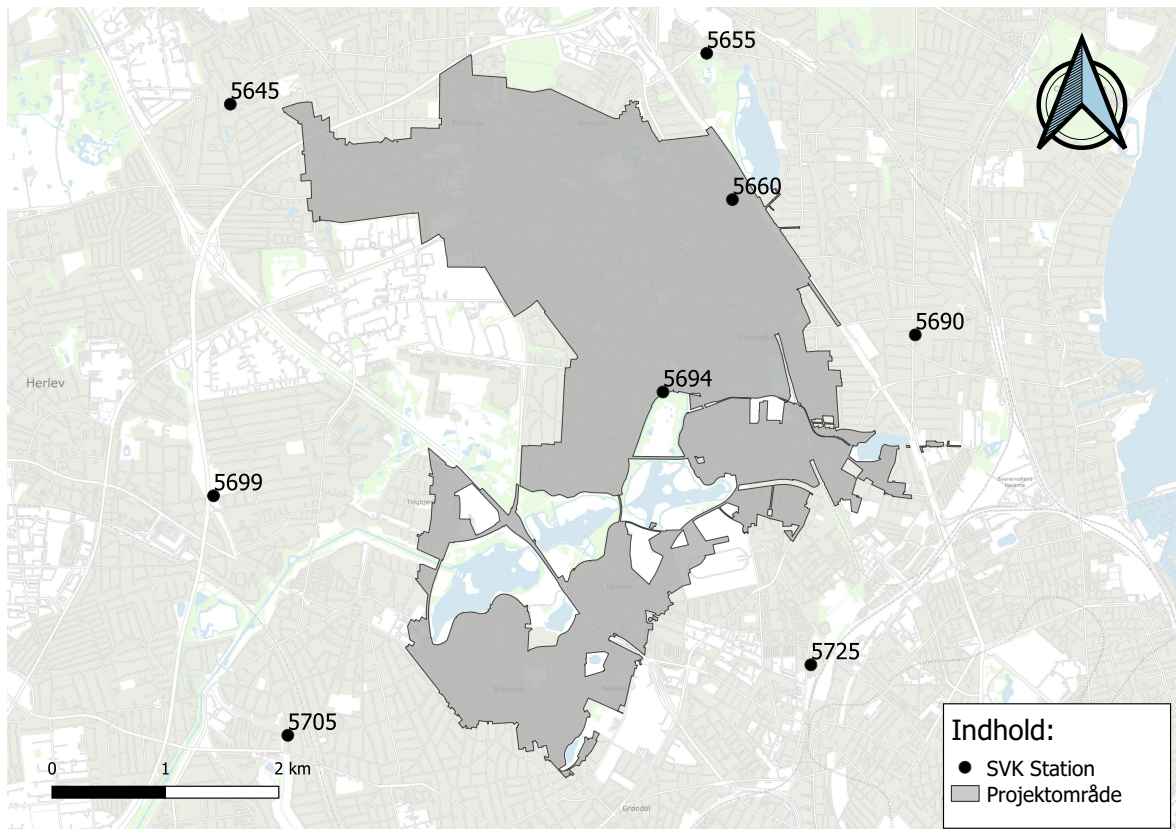
På figur 4.4 kan det observeres at griddet er roteret med $-3,45$ grader. Roteringen skyldes radarens placering langt fra central meridian i UTM 32. Når radardataet sammelignes med objekter projekteret i UTM 32 skal der derfor korrigeres for forskellen på nordretningen. [Lantmateriet 2023]

Det udleverede radardata er advektion interpoleret imellem måletidspunkterne således at dataet er givet i 1 min opløsning frem for 10 min opløsning. Denne interpolation mellem målepunkter er beskrevet i Nielsen et al. [2014], og gør radar produktet bedre til brug i hydrauliske modeller. Der er behov for radardata med høj tidslig og stedlig opløsning, for at modellere peak afstrømningen opstrøms i et afløbssystem [Thorndahl et al. 2017].

I Del III af projektet er der i analysen af den relative forskel på model responsen, benyttet tre forskellige opløsninger af radardata: $0,5 \times 0,5$ km celler med både 1 min og 10 min opløsning, samt 2×2 km celler med 1 minuts opløsning. Traditionelt har DMI offentliggjort data fra C-bånds radaren i 2×2 km celler [Thorndahl og Rasmussen 2010]. For at få data i 2×2 km opløsning er tidsserierne for $0,5 \times 0,5$ km data midlet over arealet.

5 | Regnmålerdata

For projektområdet ved Utterslev Mose er der otte regnmålere, som er lokaliseret tæt på oplandet. Regnmålernes placering kan ses på figur 5.1. De mange regnmålere placeret tæt på oplandet gør det idealt til undersøgelse af regnens spatiale udbredelse.



Figur 5.1: Placering af regnmålere tæt på Utterslev Mose. [Sarup 2023]

De otte regnmålere, som er en del af SVKs regnmåler netværk, har forskellige opførelsesdatoer. På tabel 5.1 kan datoen for den første aktive dag for hver af de otte målere ses. Disse tider skal bruges til at skabe et sammenligningsgrundlag for projektets videre analyse, hvor tidsserierne for alle otte regnmålere bør have samme tidslige længde.

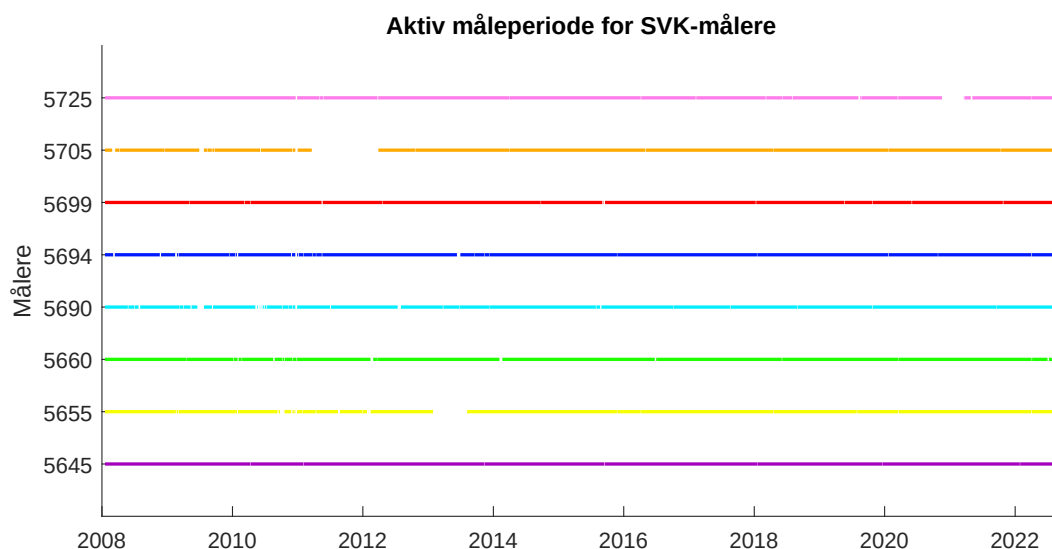
Stationsnavn	SVK-ID	Startdato
Gladsaxe Vibevangenget	5645	16-01-2008
Brogårdsbassin	5655	06-03-2006
Fuglegården	5660	13-03-2006
Hellerup Kirkegård	5690	13-03-2006
Søborg Vandværk	5694	01-01-1979
Gladsaxe Stavnsbjerg Alle	5699	16-01-2008
Åvendingen	5705	11-04-1995
Lygten	5725	25-11-1994

Tabel 5.1: Stationsnavn, ID og startdato for de nærliggende SVK regnmåler for projektområdet. [Sarup 2023]

Det kan ses på tabel 5.1 at den seneste startdato er 16-01-2008, hvilket derfor vil give start begrænsningen for projektet. I kaptitel 4 blev det angivet at radardataen er begrænset til og med den 17-09-2022, hvilket derfor vil markere slutningen af analyseperioden for projektet. På dette grundlag vil tidsserierne for projektet blive begrænset til perioden 16-01-2008 til og med den 17-09-2022.

5.1 Regnmåler udfaldsperioder

For hver regnmåler er der blevet registret udfaldsperioder, hvor måleren har været inaktiv på grund af "Teknisk fejl" [Sarup 2023]. Dette er vigtigt at medtage i sammenligningen af radar og regnmåler da, der kan opstå situationer hvor radaren har registret nedbør mens regnmåler har været afbrudt. På figur 5.2 kan den aktive periode ses for de otte regnmåler.



Figur 5.2: Aktive perioder for projektområdets regnmålere.

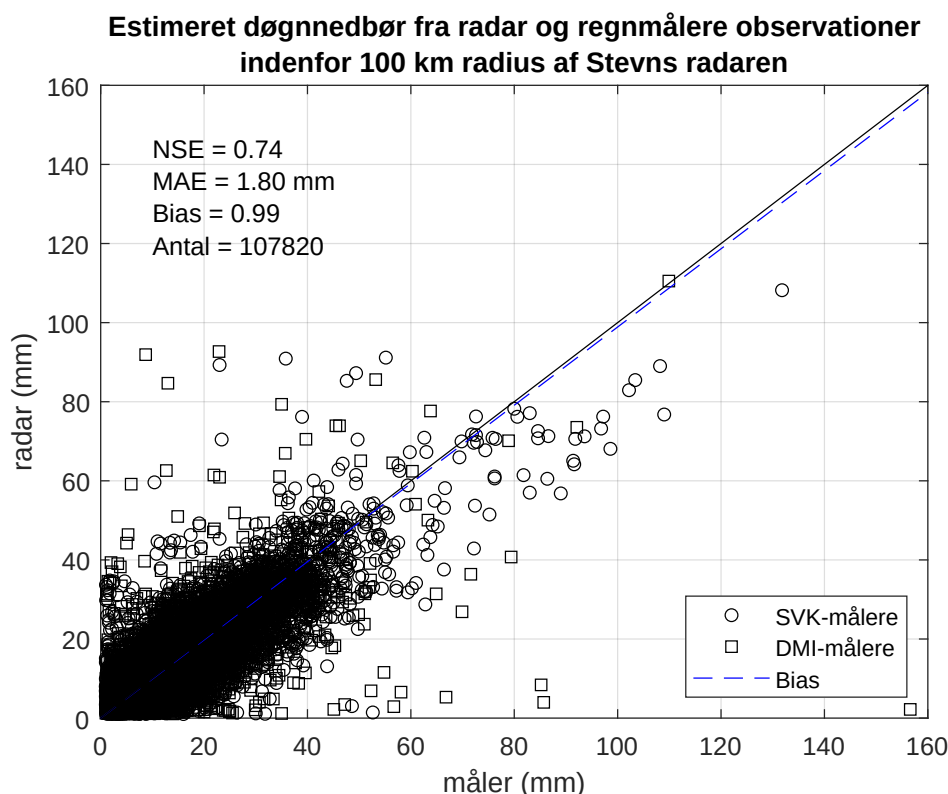
For at kunne kortlægge nedbrud og fejl perioder er der gjort brug af udtrækket "Perioder hvor måleren har været afbrudt" fra SVK databasen. Udover tekniske fejl er dage med større afvigelse fra nærmeste målere heller ikke medtaget, samt hændelser markeret med "ekstrem nedbørintensitet" som ikke er godkendt i DMIs kvalitetskontrol [ibid.].

6 | Sammenhæng mellem radar og regnmålere

Som nævnt i kapitel 4 er der foretaget en bias-justering hvor radardataet på dagsbasis er justeret til regnmåler observationer. I dette afsnit er resultatet af denne korrigering præsenteret.

6.1 Sammenhæng i døgnnedbør mellem radar og regnmåler

På figur 6.1 er den akkumulerede døgnnedbør fra 96 SVK-målere og 23 DMI-målere sammenlignet med den akkumulerede døgnnedbør i målere lokationens tilsvarende radarpixel. De undersøgte målere ligger indenfor en radius af 100 km fra Stevns radaren. Den observerede døgnnedbør i SVK-målerne tager udgangspunkt i tidsserier uden bortkastede hændelser. Til undersøgelsen er der tilknyttet performance parameter for at vurdere sammenhængens ydeevne, her er Nash Sutcliffe efficiency (NSE), Mean absolute error(MAE) og bias brugt. Performance parameter er forklaret i Bilag B.

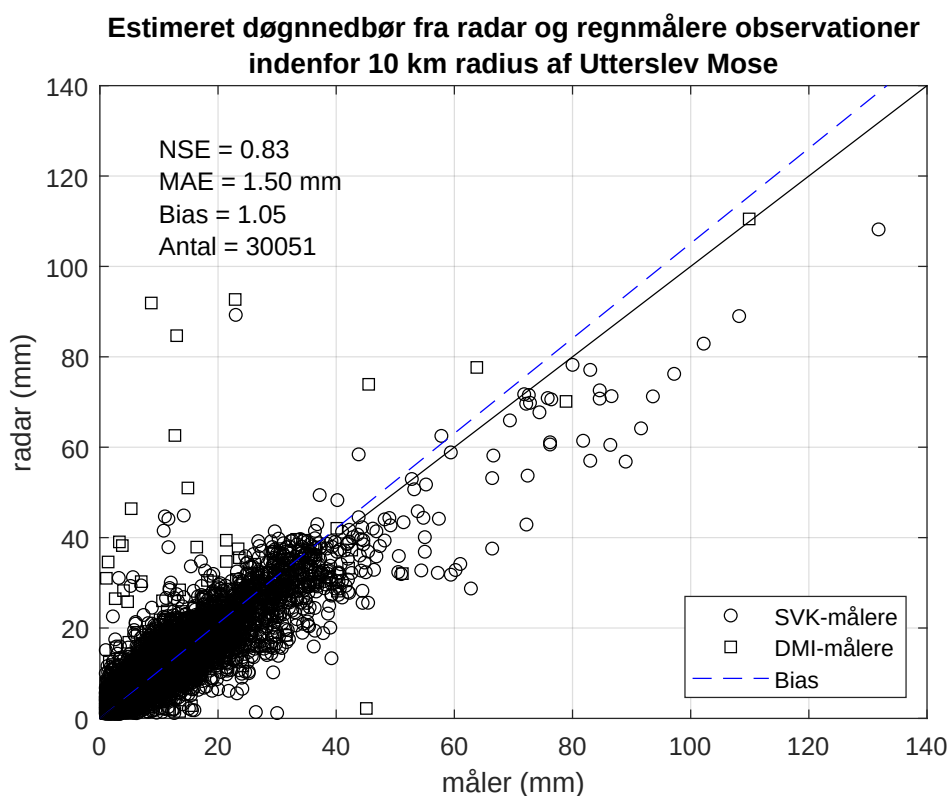


Figur 6.1: Sammenligning af estimeret døgnnedbør fra radar og regnmålere observationer, indenfor 100 km radius af Stevns radaren. Observationer under 1 mm i enten radar eller måler er fjernet. Periode over 16-01-2008 - 17-09-2022.

Der kan observeres en udmærket sammenhæng mellem radar og regnmålere med en ligevægt

omkring vinkelhalveringslinjen, der er dog en relativ stor spredning på data punkterne hvilket påvirker NSE-værdien. På figuren er datapunkter med under 1 mm på enten radar eller måler fjernet. Dette er gjort for at tage højde for dage med nedbrud og fejl på regnmålere eller radar.

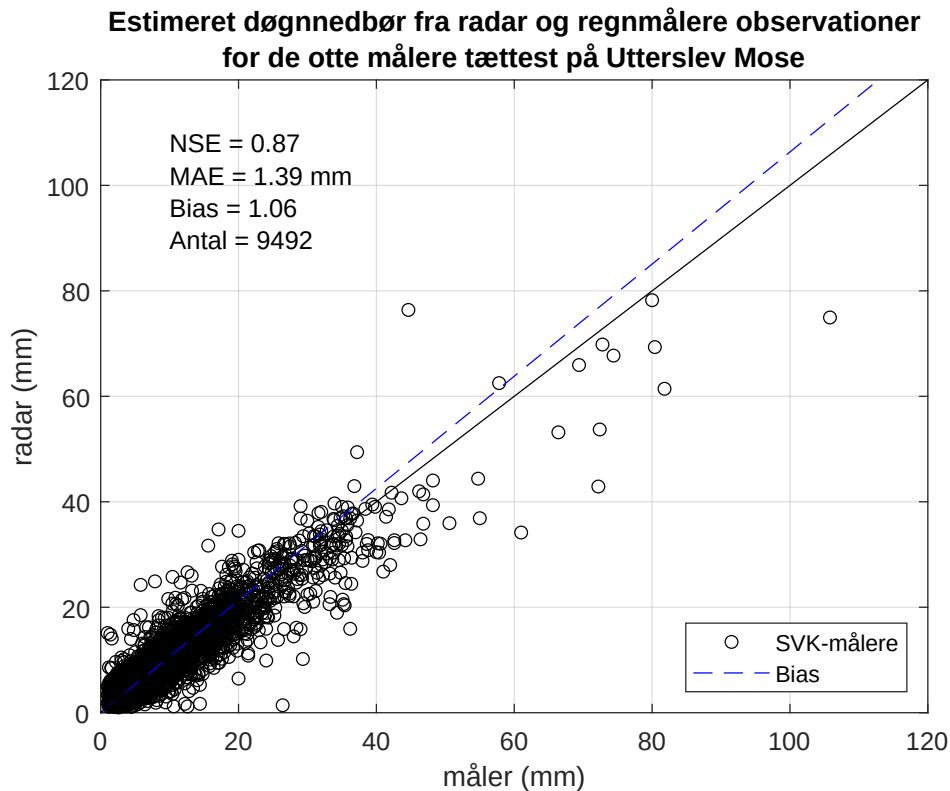
Med den høje densitet af regnmålere i hovedstadsområdet er der 30 SVK-målere og to DMI-målere inden for 10 km af Utterslev Mose. Resultatet af det bias-korrigerede radardata mod disse målere kan ses på figur 6.2. Der kan observeres en mindre spredning på datapunkterne i forhold til figur 6.1, med målere inden for 100 km af radaren.



Figur 6.2: Sammenligning af estimeret døgngnedbør fra radar og regnmålere observationer, indenfor 10 km radius af Utterslev Mose. Observationer under 1 mm i enten radar eller måler er fjernet. Periode over 16-01-2008 - 17-09-2022.

På figur 6.3 er projektområdets otte regnmålere, omtalt i kapitel 5, sammenlignet med radar døgngnedbøren. Der kan på figuren observeres en god sammenhæng mellem regnmåler og radar med en høj NSE og lav MAE. Der er en lille bias i forhold til overestimering af døgngnedbøren på radaren. På trods af denne bias er der en tendens til at dage med høj døgngnedbør, over 40 mm, er målt højere i målere. Dette passer godt overens med den eksisterende erfaring, hvor radaren underestimerer de høje regnintensiteter og derved underestimerer døgngnedbøren [Thorndahl et al. 2014].

Der er på figuren fjernet datapunkter med under 1 mm på enten radar eller måler, for at tage højde for usikkerhed på mindre hændelser, samt nedbrud og fejl på målerene. Der er i Bilag C foretaget yderligere betragtninger om hvilke dage der bør fjernes fra projektområdets datasættet til projekts øvrige analyser. Her er der fjernet dage hvor der er registret nedbrud eller fejl på målere. Yderligere er der fjernet fem dage fra radar datasættet, hvor bias-justeringen har medført en meget dårlig sammenhængen med de otte målere.



Figur 6.3: Sammenligning af estimeret døgnnedbør fra radar og regnmålere observationer, for de otte målere tættest på Utterslev Mose. Observationer under 1 mm i enten radar eller måler er fjernet. Periode over 16/01/2008 - 17/09/2022.

I tabel 6.1 sammenlignes projektområdets målere individuelt med den tilsvarende radarpixel. Individuelle figurer for hver regnmåler kan ses i Bilag D.

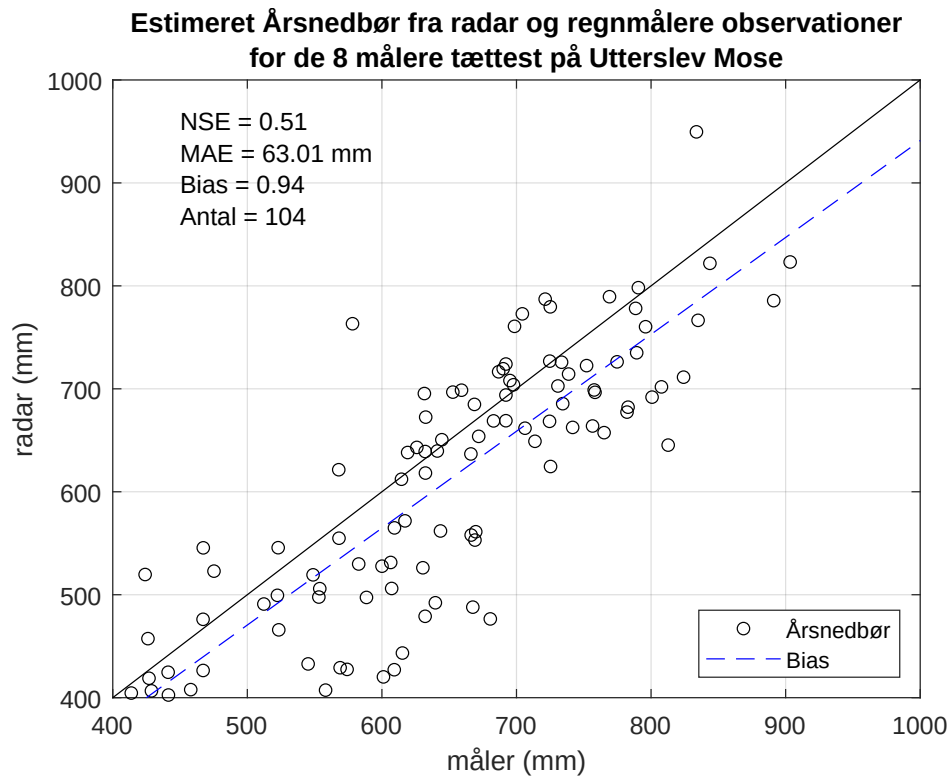
SVK-ID	NSE	MAE [mm]	Bias	Antal [Døgn]
5645	0,91	1,18	1,04	1578
5655	0,92	1,16	1,05	1513
5660	0,89	1,30	1,09	1553
5690	0,88	1,33	1,14	1522
5694	0,90	1,27	1,06	1551
5699	0,89	1,27	1,13	1565
5705	0,88	1,29	1,11	1444
5725	0,79	1,75	1,24	1528

Tabel 6.1: Sammenligning mellem projektområdets målere og tilsvarende radarpixel.

Det kan observeres at der generelt er en lidt svagere sammenhæng mellem måler 5725 og radar produktet. Ifølge SVK-årsnotat Sarup [2022] har der været foretaget ombygning ved stationen, dette kan være årsagen til den dårligere sammenhæng.

6.2 Sammenhæng i årsnedbør mellem radar og regnmåler

På figur 6.4 er den samlede årsnedbør mellem målere og radarpixel sammenlignet. Her er datapunkter med mere end 40 dages fejl eller nedbrud på måler om året fjernet fra undersøgelsen. Der kan generelt observeres dårligere sammenhæng mellem radar og de otte SVK-målere, med en lav NSE og en høj MAE.

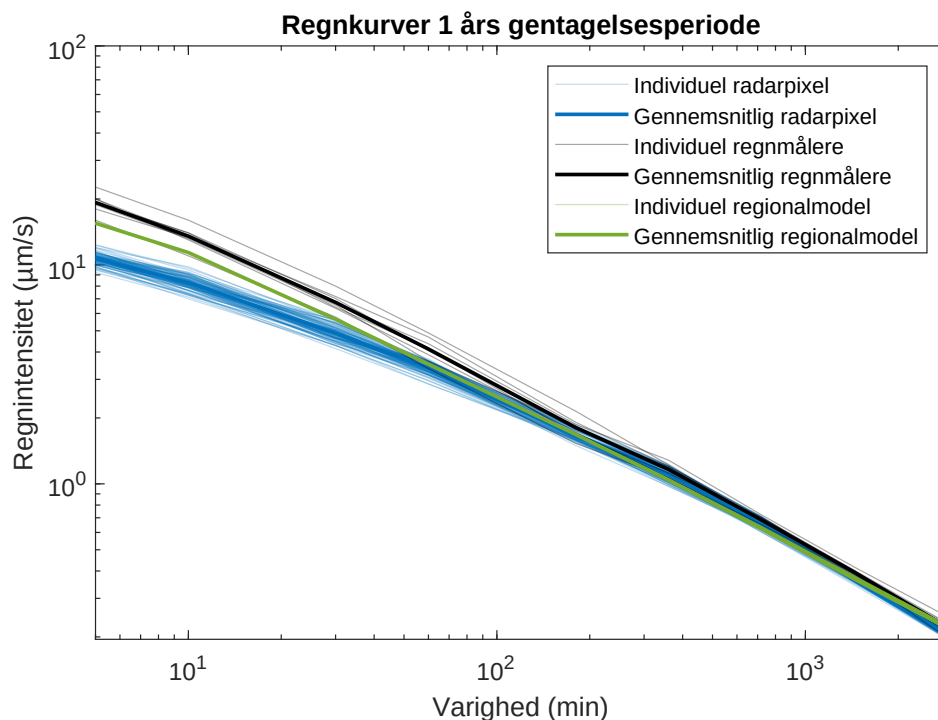


Figur 6.4: Sammenligning af estimeret årsnedbør fra radar og regnmålere observationer, for de otte målere tættest på Utterslev Mose. Periode over 2008-2021.

I det udleverede radardata er der kun medtaget data for dage med over 5 mm nedbør indenfor bias-justerings oplandet. Derved er radardata for dage med mindre regnhændelser ikke med i opgørelsen af årsnedbøren. Det kan samtidigt skyldes at vippekarsmålere ikke er optimale til at opgøre årsnedbør [Sarup 2023]. SVK-målere registrerer hændelser med en opløsning på 0,2 mm, derfor er meget små hændelser ikke medtaget. Der er generelt større usikkerheder ved nedbørshændelser under 3°C hvor nedbøren kan være fast og varmelegemet i måleren er tændt. Eftersom store dele af vinternedbøren forekommer under 3°C medføre dette også usikkerhed på årsnedbøren. [ibid.]

6.3 Sammenligning af intensitet mellem radar og regnmåler

For yderligere analyse af sammenhængen mellem radardata og regnmålere er der i dette afsnit undersøgt forskellen i regnintensitet ved forskellige varigheder. Til dette er der opstillet regnkurver for de otte regnmålere og for hvert enkelte radarpixel i projektområdet, hvilket er visualiseret på figur 6.5. Regnkurverne er regnintensiteten som funktion af hændelses varigheden, som er beregnet ved Spildevandskomiteen regnserieværktøj [Sørup og Gregersen 2023]. Der er på figuren fokuseret på intensiteterne ved 1 års gentagelsesperiode, kurverne vil ændre sig ved andre gentagelsesperioder. Hændelsesopdeling for radarserierne er udført på baggrund af tilsvarende metode til SVK-målerne, hvor hver hændelse defineres af et antal vip. Sammenlignes regnkurverne for radarserierne og regnmålerne, kan det ses at regnmålerne overordnet har højere regnintensitet. Derudover kan det observeres at regnmålerne overestimerer intensiteten i forhold til Danmarks regionale model, som er indtegnet på baggrund af Skrift 32 [Arnbjerg-Nielsen et al. 2023]. Yderligere underestimerer radarserierne i forhold til både målerne og den regionale model. Forskellen kan tydeligt ses ved de korte varigheder hvor radarserierne ligger betydeligt lavere end den regionale model og regnmålerne. En del af forskellen mellem de lokale serier og den regionale model kan skyldes forskellen i observationsperiode på henholdsvis 15 år og >25 år [ibid.]. Der er lavet yderligere betragtninger om variationen af de målte regnintensiteter i relation til den regionale model i Del IV.

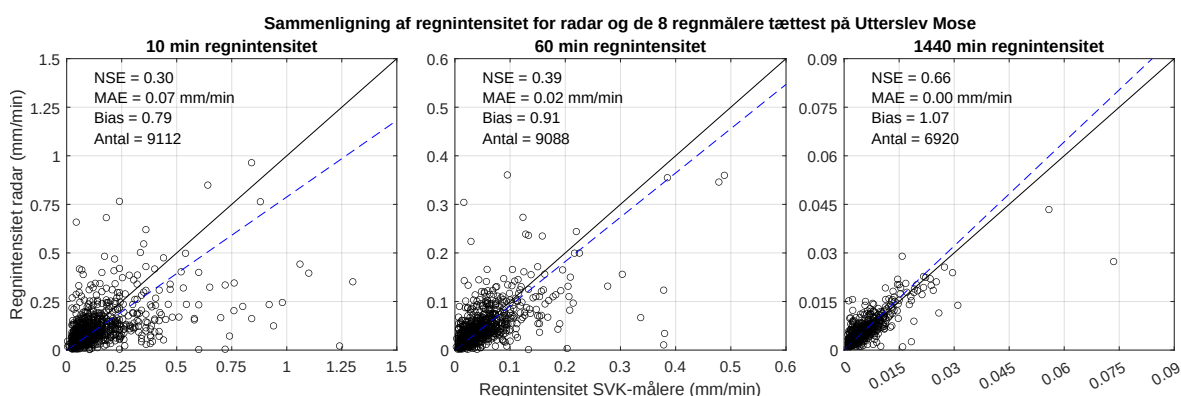


Figur 6.5: Regnkurver for alle otte regnmålere og radarpixels i projektområdet, samt beregnet regnintensiteten for den regionale model i hver radarpixel. En gennemsnitlig regnkurve er udført på hvert regnprodukt.

På figur 6.6 er regnintensiteten ved varighederne 10, 60 og 1440 min sammenlignet for regnmålerne og deres tilsvarende radarpixel. Hvilket er udført på baggrund af hændelsesopdeling svarende til hele dage, hvor hver hændelse indeholder en regnintensitet til hver varighed. Sammenligningen viser at radarserierne underestimerer intensiteten i forhold til regnmålerne,

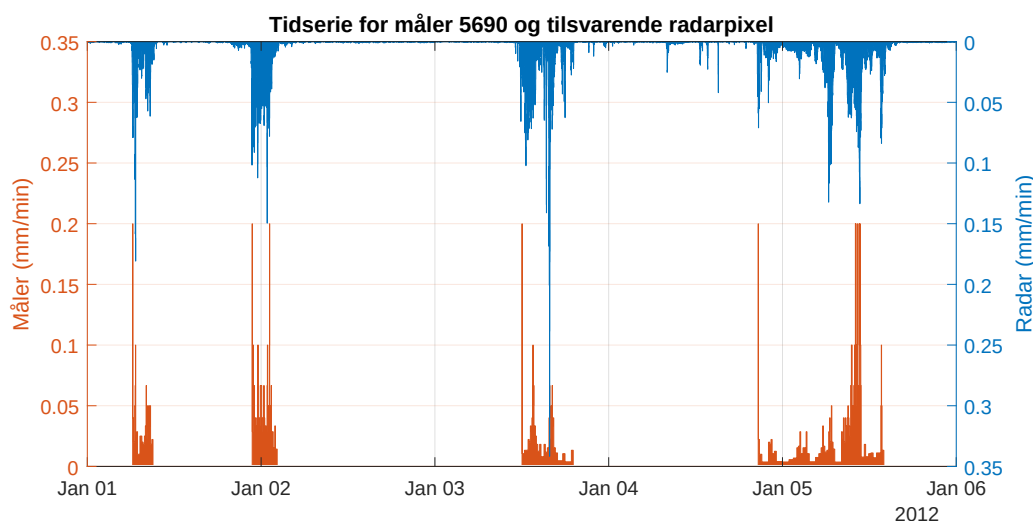
specielt ved de korte hændelser. Sammenhængen mellem døgn regnintensiteten er bedre, da det er denne varighed der er bias-justeret imod. Ved intensiteten på døgnbasis opnås en bias svarende til overestimeringen af døgnedbøren vist tidligere i kapitlet på figur 6.3.

På baggrund af figur 6.5 og 6.6, kan det vurderes at radarserierne har tendens til at undervurdere de korte intense hændelser. Dette kan blandt andet være forklaret i målemetoden hvor radaren måler nedbøren i 1 km højde i 0,5 km celler, hvorimod regnmåleren registrerer i et punkt på jorden [Thorndahl et al. 2019].



Figur 6.6: Sammenligning af regnintensitet for de otte regnmålere og deres tilsvarende radarpixel ved varighederne 10, 60 og 1440min.

På figur 6.7 er der et eksempel på tidsserier for måler 5660 og for den tilsvarende radarpixel. Det kan observeres at der generelt er forskel på intensiteterne, mens timingen mellem de to regnserier passer meget godt. Dele af uoverensstemmelserne mellem de to regnserier kan begrundes i målemetoderne. Høje intensiteter i starten af målerserien kan forklares med hvordan vippekarrets vip fortolkes til regnintensiteter. Dette kan også medføre at der er meget små regnintensiteter i radarserien, for eksempel den 4. januar, som ikke er registreret i målerserien.



Figur 6.7: Eksempel på tidsserie for måler 5690 og tilsvarende radarpixel.

På baggrund af overstående analyse vurderes det at den opnåede bias-justering, er af god nok kvalitet til videre brug i analyser med hydrauliske modeller.

7 | Opsamling på Del II

I rapportens Del II blev nedbørsdata fra henholdsvis radar og regnmåler analyseret. Her blev det besluttet at perioden for projektets undersøgelse skal strække sig fra 16-01-2008 til 17-09-2022. Dette blev udvalgt på baggrund af projektområdets nærliggende regnmåleres aktive periode, samtidig med at radardataet er begrænset til perioden før 17-08-2022.

Udbredelsen af radarpixels over projektområdet blev præsenteret. Det blev fastlagt at benyttet datamålinger indenfor 100 km rækkevidde fra Stevns radaren til en bias-justering, eftersom kvaliteten forringes væsentlig ved rækkevidder over 120 km. Her blev radardataet omregnet til regnintensitet via en Z-R-relation. Indenfor 100 km radius af Stevns radaren er der lokaliseret 96 SVK og 23 DMI regnmålere, som benyttes til bias-justeringen af radardataet. Her blev radardataet justeret på baggrund af en gennemsnitlig daglig bias faktor, beregnet på alle regnmålere inden for 100 km rækkevidde. Justeringen blev udført med henblik på at radaren kan efterligne den målte nedbør i regnmålerne.

Som følge af bias-justeringen blev der opnået en god sammenhæng mellem døgnnedbøren målt ved regnmålere og radar for alle målere på Sjælland. Sammenhængen for radarpixels og regnmålere tættere på projektområdet var ligeledes god og det blev derfor vurderet passende til videre anvendelse i projektet. Yderligere blev sammenhængen for årsnedbøren analyseret, hvor et bias mod regnmålerne blev fundet.

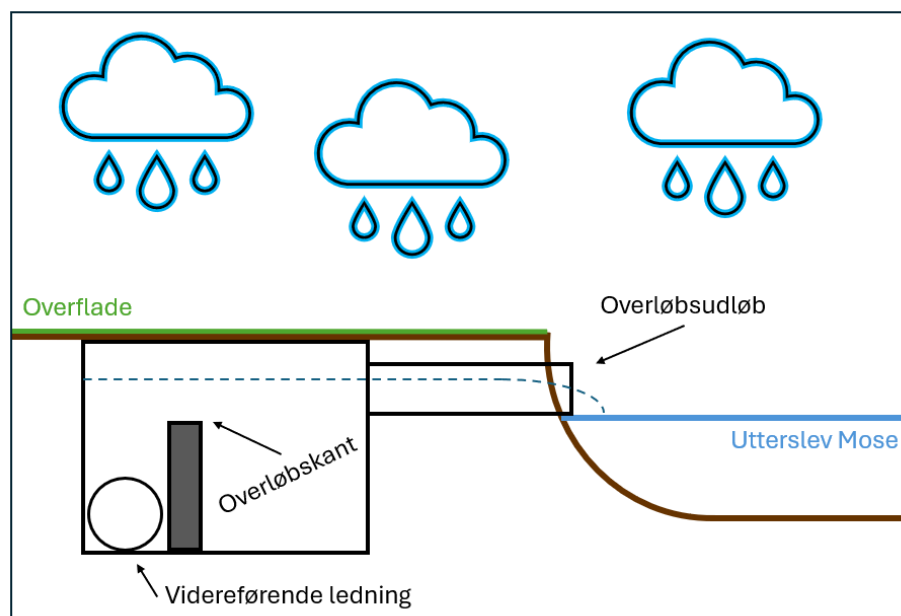
Regnintensiteten målt i radar og regnmåler blev sammenlignet. I denne sammenhæng blev det observeret, at regnmålerne overestimerer nedbøren i korte varigheder sammenlignet med den regionale model, mens radarpixelene undervurderer. For de længere varigheder var sammenhængen god, hvilket blev begrundet i resultatet af bias-justering udført på daglig basis.

Afslutningsvis i Del II, blev et eksempel af en tidsserie for radar og regnmåler sammenlignet. Her blev der vurderet god sammenhæng mellem hændelsens start og slut tider. Dog kunne der observeres let regn mellem hændelserne i radarserien, som i regnmålerens vippekar vil akkumuleres over tid. På baggrund af undersøgelsen blev regndataet for både radar og regnmålere vurderet kvalitative for perioden og til videre anvendelse i projektet.

Del III

Relativ sammenligning af model respons

I denne del af projektet undersøges model responsen ved forskellige scenarier for spatialt regninput. Analysen udføres på den udleverede model, kalibreret af HOFOR, hvor modelparametre holdes konstant for alle scenarier. I følgende kapitler er fremgangsmåden for analysen præsenteret, heriblandt: Udvælgelsen af regnhændelser og modelopsætningen til at køre "Long Term Statistics" (LTS), med henblik på at estimere overløbsvolumen med 1 års gentagelsesperiode til Utterslev Mose. Resultaterne sammenlignes og diskuteres afslutningsvis, med henblik på den relative forskel fundet ved varianter af spatialt regninput.



8 | Udvælgelse af regnhændelser

I dette afsnit foretages der en udvælgelse af nedbørshændelser, som skal medtages i projektets LTS-simuleringer for ekstremstatistik på overløbsvolumen. Baggrunden for udvælgelsen sker for at undgå en alt for lang simuleringstid og udføres ved at udvælge hændelser, som er repræsentative for projektets undersøgelse. Formålet er at samle alle repræsentative hændelser i en jobliste, som kan bruges i simulering af den hydrauliske model. Den genererede jobliste skal genbruges på alle model scenarier, da det er vigtigt at de samme hændelser undersøges i alle simuleringer, for at den relative forskel kan undersøges.

Der er valgt at opgøre regnhændelserne i hele døgn, eftersom, der kan være væsentlige forskelle på en regnhændelses starttidspunkt imellem regnmålere og radar. Et eksempel på dette kan ses på figur 6.7 på side 34. Differencen i starttidspunkt kan blandt andet begrundes i de forskellige målemetoder og afstanden imellem målerne. De udvalgte døgn benævnes som regndage.

Udvælgelsen af joblisten til LTS tager udgangspunkt i tidsserierne fra projektområdets otte regnmålere i perioden 16-01-2008 til 17-09-2022. Udvælgelseskriteriet for regndagene er, alle dage hvor der er målt minimum en hændelse, på over 5 mm og 5 minutters varighed, i en eller flere af de otte regnmålere.

Der er tre længere perioder med fejl og nedbrud på målerne 5655, 5705 og 5725, se figur 5.2 på side 28. Da større huller i tidsserien vil påvirke de beregnede gentagelsesperioder er det besluttet, på baggrund af anbefalingerne i Sarup [2023], at substituere den manglende tidsserie med en tidsserie fra den nærmeste måler. Da målertætheden i området er høj ses det som en rimelig løsning på problemet. Se tabel 8.1.

Måler med udfald	Udfaldsperiode	Erstatningsmåler
5655	29-01-2013 til 06-08-2013	5660
5705	23-03-2011 til 27-03-2012	5699
5725	18-11-2020 til 18-03-2021	5694

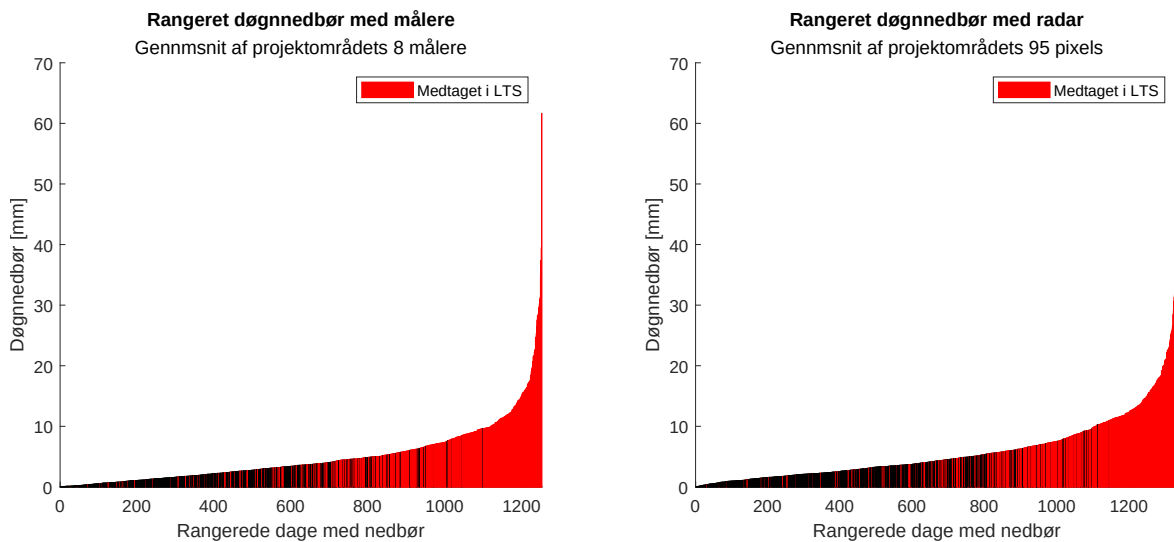
Tabel 8.1: Målere med udfald samt substitutions tidsserie fra nærmeste måler.

De udvalgte regndage hvor der ikke er radardata tilgængeligt bortkastes. Yderligere er kortere perioder med fejl eller nedbrud frasorteret. Det kan diskuteres om mindre nedbrudsperioder også bør substitueres. Yderligere betragtninger om nedbrud er beskrevet i Bilag C.

For at kontrollere at alle relevante regnhændelser er medtaget, rangeres alle udleverede dage med radardata ud fra den gennemsnitlige døgnnedbør over projektområdet. Her undersøges det om alle dage hvor det har regnet mere end 10 mm er medtaget i udvælgelsen. På baggrund af dette tilføjes der ekstra regndage til joblisten. Disse dage kunne for eksempel indeholde koblede regnhændelser, hvor flere hændelser under 5 mm har fundet sted. I et sådant tilfælde ville dagen ikke være medtaget i de udvalgte dage fra målerne. Det kunne også skyldes en lokal advektiv regn, som har ramt forbi regnmålerne og derfor ikke er blevet målt.

På baggrund af udvælgelsesprocessen er der opnået 602 regndage, som samles til en jobliste. De udvalgte datoer i joblisten kan findes i Bilag E. De udvalgte regndage som er medtaget i LTS kan ses på figur 8.1, hvor regndagene er rangeret med henblik på døgnetbøren.

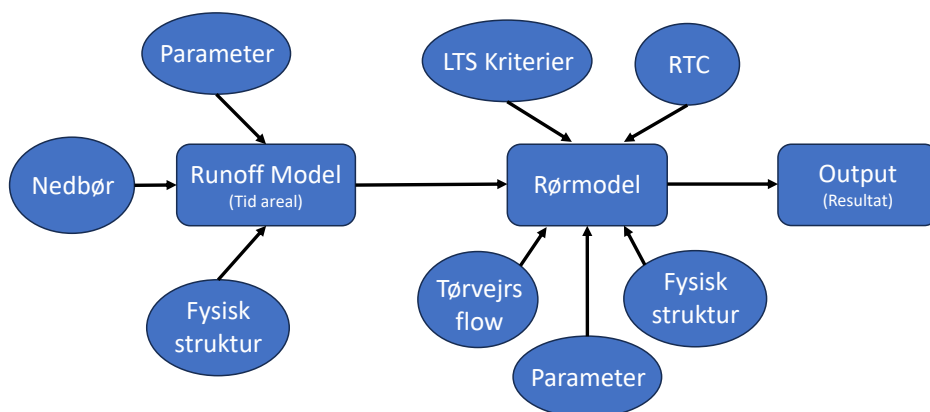
Det vurderes at det ikke er alle 602 regndage der er nødvendige at medtage i analysen for at lave statistik på overløbsvolumen. Det er dog vanskeligt at bestemme hvilke af de 602 dage der er kritiske og derfor er alle dage medtaget for at være på den sikre side. Det kan derfor siges at der benyttes en "Brute force" fremgangsmåde.



Figur 8.1: Udvalgte LTS regndage. Dage med fejl eller mindre nedbrud på regnmålere frasortet.

9 | Modelopsætning

I dette afsnit opsættes den hydrauliske model til LTS-simulering, med henblik på at undersøge ændringen af model respons ved regninput med forskellige stedlige opløsninger. Den konceptuelle opbygning af modellen kan ses på figur 9.1, hvor det kun vil være regninputtet som varierer mellem simuleringerne. Da nedbøren varierer, ændrer det på resultaterne for både runoff- og rørmodellen, som derfor bør gentages for hver simulering. Modellen er opsat til perioden 16-1-2008 til 17-9-2022, som bestemt i afsnit 5 på side 27, heraf en længde på næsten 15 år.



Figur 9.1: Den konceptuelle opbygning af model til LTS.

9.1 Model kriterier

I dette afsnit beskrives model kriterierne, som vil være konstante for alle simuleringer. Derudover holdes den fysiske struktur og de tilknyttede parameter såsom; Manningtal, hydrologisk reduktionsfaktor og koncentrationstid konstante, således den udleverede model ikke ændres.

Hotstart

I den udleverede Mike Urban model er der opstillet døgnvariation for tørvejs afstrømningen. Døgnvariationen har til formål at afspejle det daglige forbrug på timebasis, ved forskellige forbrugere, med henblik på at estimerer den virkelige tørvejs afstrømning. I modellen er der opstillet fem forskellige døgnvariations profiler, heraf Beboelse, Industri, Offentlig, Erhverv og Andet, hvor hver har profiler for hverdag og weekend variation [Brødbæk 2023]. For at medtage tørvejs afstrømningen i modellen og undgå en simuleringstart i et tomt system skal en hotstart fil opstilles.

En hotstart fil består af en netværks simulering uden pålagt nedbør, som derfor kun vil simulere netværkets belastning svarende til tørvejs afstrømningen. For at skabe en valid hotstart hvor tørvejs afstrømningen i modellen har stabiliseret sig, simuleres netværket i tre dage. Ved indsættelse af hotstart til LTS udvælges en dag i filen, som vil repræsentere tørvejs afstrømningen i hele LTS perioden. I projektet er der udvalgt den 29-8-2012, som er en hverdag,

men da alle dage simuleres fra midnat, starter alle simuleringer i samme fyldningsgrad. På trods af hotstart betingelsen vil døgnvariationen igennem simuleringen være bestemt ud fra om den pågældende dag er en hverdag eller weekend.

Stopkriterie

Koncentrationstiden til modellens udløb er blevet undersøgt, heraf afstrømningstiden efter endt nedbørshændelse, hvilket er cirka 6 timer. Dette bør implementeres for at tage højde for modellens afløbstid, således modellen ikke bare stopper når jobbet er gennemført. Derfor opstilles et stopkriterie hvorved modellen vil fortsætte indtil stopkriteriet er opfyldt. Stopkriteriet er som følger: Simuleringen stoppes når modellens totale udløb er på mindre end $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ i 6 timer. Dette stopkriterie er undersøgt og vurderet til at være fornuftigt i forhold til de fysiske strukturer i projektets Mike Urban model.

Realtidsstyring

I den udleverede model er der opsat realtidsstyring, som styre komponenter, såsom spjæld og pumper på baggrund af forudsætningerne i modellen. Disse dele er slået til og holdes konstant for alle simuleringer. Der er i projektet ikke lavet yderligere betragtninger om korrektheden af opsætning af realtidsstyringen i modellen. Dog ændres modellens resultat drastisk hvis ikke realtidsstyrings elementerne er aktiveret i netværks simuleringen.

9.2 Regninput scenarier

Til den relative analyse af model respons ved regninput med forskelligt stedlig opløsning, opstilles herunder seks scenarier, som LTS udføres på. Følgende scenarier undersøges i denne del:

- Scenarie "1 Måler": Oplandets centrale regnmåler; Søborg Vandværk (5694).
- Scenarie "8 Målere": Alle 8 nærtliggende regnmålere for projektområdet.
- Scenarie "8 Radarpixel": De 8 regnmåleres tilsvarende radarpixel.
- Scenarie "Radar 2km": Radardata i 2x2 km med 1 min opløsning.
- Scenarie "Radar 0,5km": Radardata i 0,5x0,5 km med 1 min opløsning.
- Scenarie "Radar 10min": Radardata i 0,5x0,5 km med 10 min opløsning.

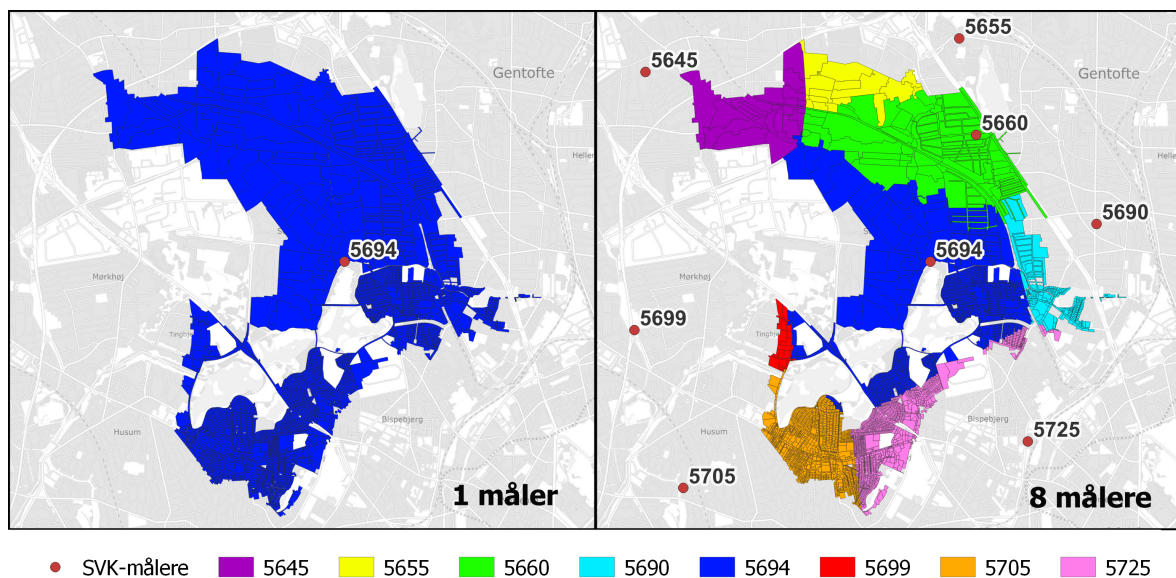
Yderligere beskrivelse af scenarierne kan ses i de følgende afsnit.

Scenarier med regnmålere serier

I dette afsnit opstilles de forskellige regnininput, som skal simuleres. Regninputtene uddeles på modellens deloplandene i Mike Urban. Her tildeles oplandene et regnininput ud fra den regnmåler som er tættest på oplandets massemidtpunkt.

Der opstilles to forskellige scenarier med regnmålere. Det ene scenarie er ved brug af én måler, hvor måler 5694 er udvalgt grundet dens centrale placering i projektområdet. 1 Måler scenariet vil derfor dække hele projektarealet på de 12,48 km². Det andet scenarie er ved brug af alle otte nærtliggende regnmålere. De to udvalgte scenarier for regnmålere kan ses på figur 9.2.

I tilknytning til scenariet med otte målere udføres ligeledes en simulering med de otte regnmålernes tilsvarende radarpixels, som regnininput. Dette er under antagelse af at de individuelle radarpixels kan ses som tilsvarende til punktmålingerne. Her skal det holdes i mente at der i virkeligheden er en stedlig variabilitet indenfor pixelsene, som er arealmidlet i radardataet [Thorndahl et al. 2019].



Figur 9.2: De to scenarier med regnmåler for projektområdet her: "1 Måler" & "8 Målere".

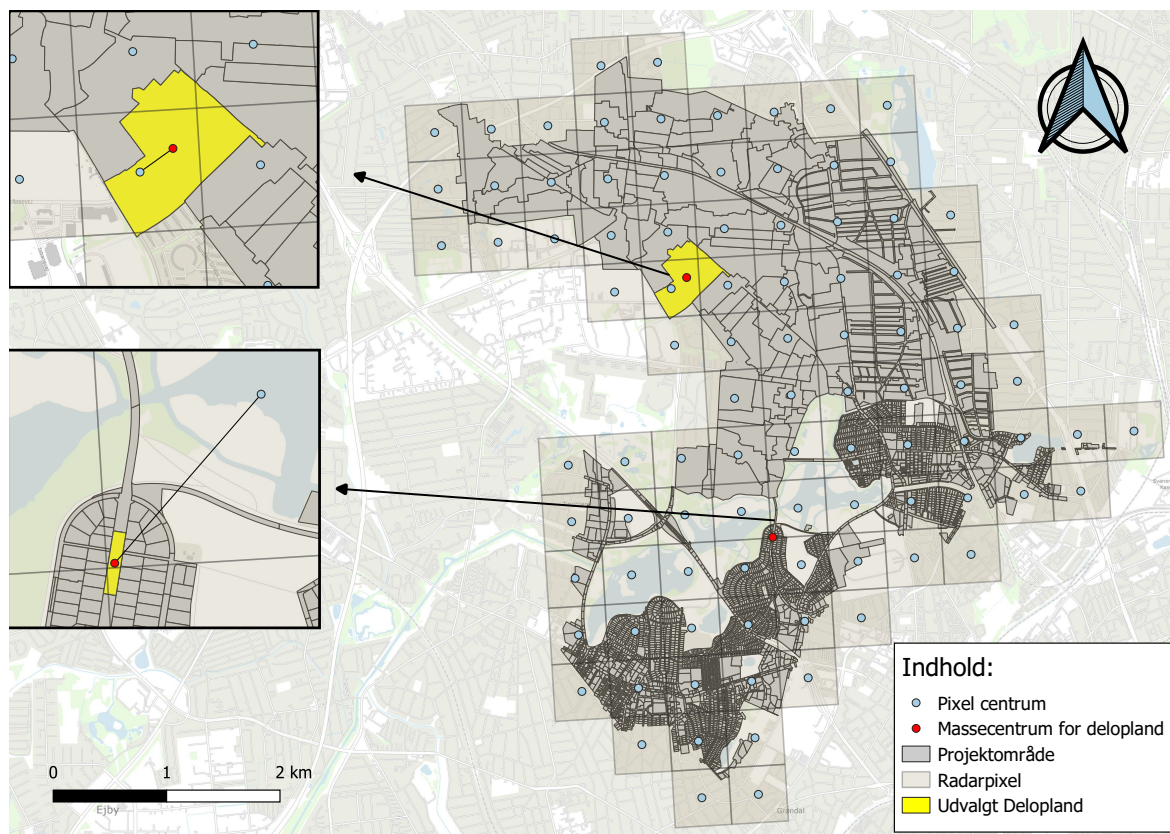
Arealfordelingen på de enkelte regnmålere i 8 Målere scenariet, fordelt på deloplandene kan ses i tabel 9.1.

5645	5655	5660	5690	5694	5699	5705	5725
1,32	0,77	3,01	0,66	4,42	0,17	1,06	1,06

Tabel 9.1: Arealdække [km²] for de enkelte regnmålere fra 8 Målere scenariet.

Scenarier med radarserier

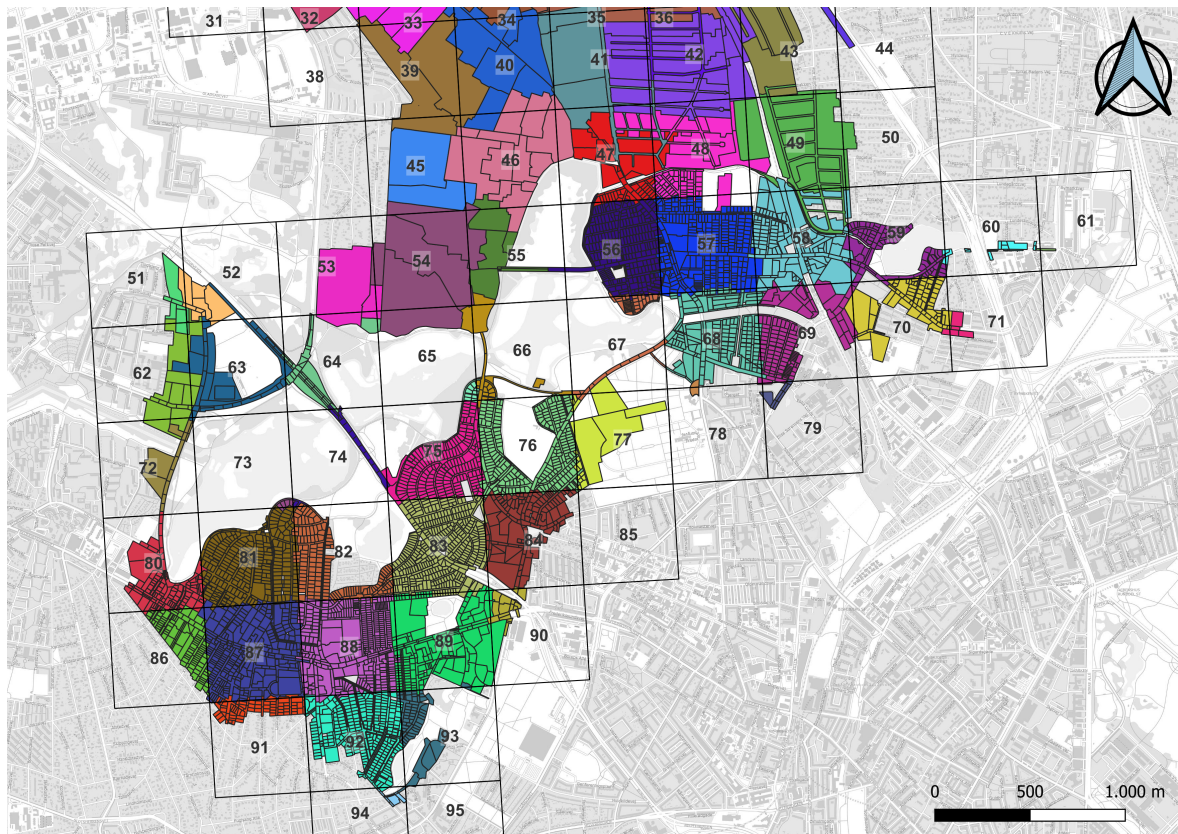
For at opnå en finere stedlig opløsning på regninputtet kan radardata benyttes. Regnserierne tildeles deloplandene fra de forskellige radarpixels på samme måde som for regnmålerne. For hver radarpixel er der opsat et pixelcentrum, hvor deloplandene fordeles ud på den radarpixel hvis pixelcentrum er tættest på deloplandets massemidtpunkt. Et eksempel på dette kan ses på figur 9.3, hvor to forskellige delopland tilknyttes de tilhørende radarpixel.



Figur 9.3: Eksempel på hvordan deloplandene fordeles til de forskellige radarpixels.

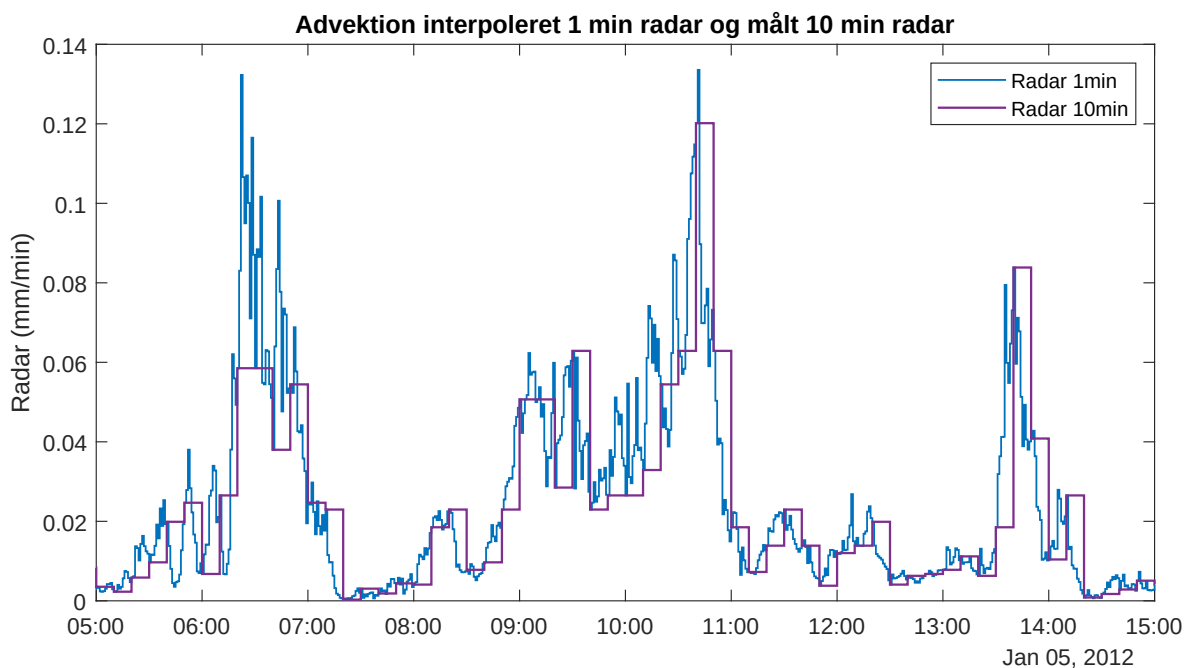
Fordelingen af deloplandene ud på radarpixels er visualiseret på figur 9.4, hvor blandt andet detaljeringsgraden af oplandene er tydelige. Dette ses ved at områderne med fin detaljeringsgrad bliver bedre opdelt indenfor pixlerne, hvorimod ved grov detaljeringsgrad overlapper deloplandene pixel grænserne betydeligt. Dette kan give en usikkerheden ved modelarbejdet i det grov detaljerede område.

For hver radarpixel er der beregnet en tidsserie på baggrund af hvad radaren ved Stevn har observeret. Der er foretaget en LTS-simulering med radardata i $0,5 \times 0,5$ km celler med 1 min opløsning, hvor oplandene er fordelt som på figur 9.4. Den gennemsnitlige radarpixel har et arealdække på deloplandene svarende til $0,15 \text{ km}^2$. Dette scenarie tager udgangspunkt i det advektion interpolerede radardata.



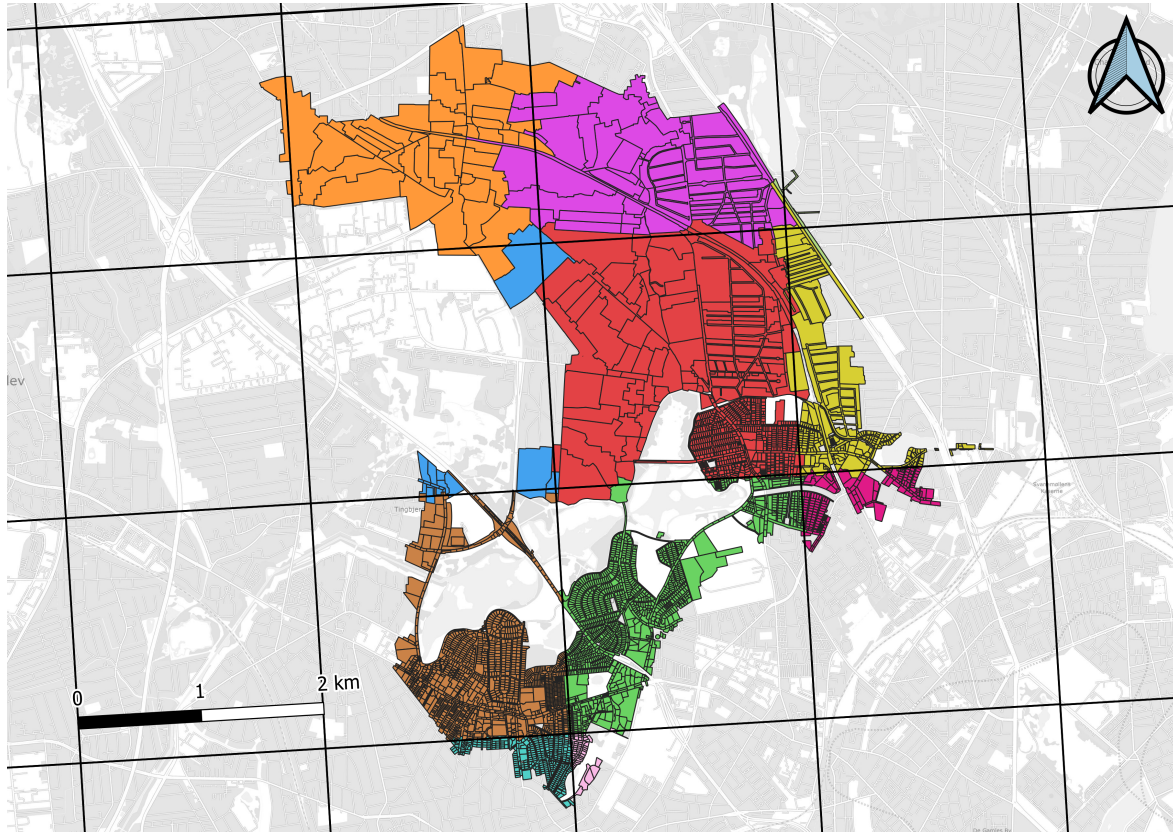
Figur 9.4: Model deloplande opdelt efter radarpixels.

Derudover er der foretaget en LTS-simulering af det ikke interpolerede målte data med 10 minutters opløsning, som beskrevet tidligere i kapitel 4. Som tidligere nævnt er det interpolerede radardata bedre til at estimere de højintense hændelser, som er essentielt til modelleringen af peak afstrømning i afløbssystemer [Thorndahl et al. 2017]. På denne baggrund undersøges forskellen mellem interpoleret kontra ikke interpoleret radardata.



Figur 9.5: Advektion interpoleret 1 min radardata og målt 10 min radardata

På figur 9.5 kan tidsserier for det advektion interpoleret 1 min radardata og det målte 10 min radardata ses. Det kan observeres at der, med den mindre tidslige opløsning i 10 min radardataet, er perioder hvor de høje regnintensiteter over- og undervurderes. I slutningen af regnhændelserne bliver længden af regnhændelserne typisk overvurderet i forhold til 1 min radardataet.



Figur 9.6: Model deloplande opdelt efter 2 km radarpixels.

For yderligere undersøgelse af regnininput med stedlig opløsning, samles de 0,5x0,5km radarpixels til 2x2km. Som nævnt i kapitel 4 har C-bånd radarerne traditionelt været offentliggjort i 2x2 km radarpixels. Opdelingen sker ved at tidsserierne for de reelle radarpixels bliver midlet ud i de større celler. Fordelingen af projektområdets deloplande ved brug af opløsning på 2 km radarpixels er visualiseret på figur 9.6. Den gennemsnitlige arealfordeling for 2x2 km radarpixels fordelt på projekt oplandet er 1,13 km².

Resultaterne for de seks beskrevne scenarier bliver præsenteret i følgende kapitel.

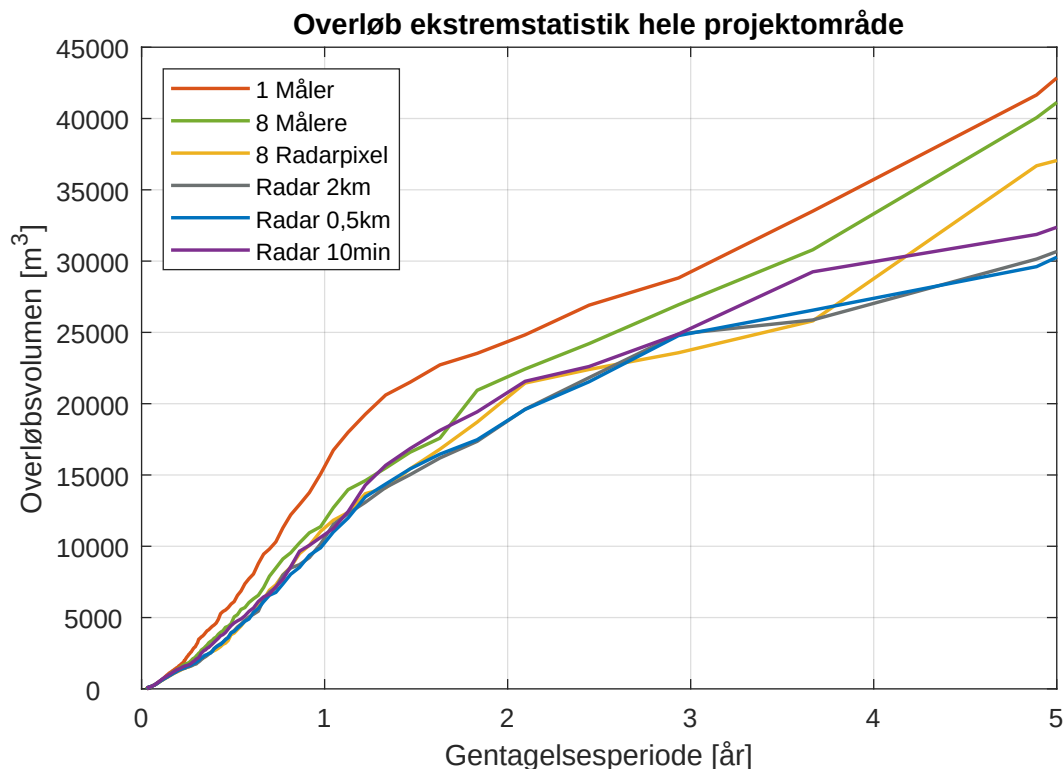
10 | Relativ sammenligning af modelresultater

I dette kapitel præsenteres den relative forskel på LTS resultaterne for de seks forskellige scenarier. Der er i resultaterne lagt fokus på overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode, i henhold til tidligere præsenterede krav for udledning til Utterslev Mose. Gentagelsesperioderne for ekstremstatistikken, i dette kapitel, er beregnet på baggrund af California plotting metoden, tilsvarende metoden beskrevet i Sørup og Gregersen [2023].

10.1 Samlet overløb fra projektområde

I dette afsnit udføres en sammenligning af total overløbsvolumener ved gentagelseperioder for alle overløbsbygværkerne, som udleder til Utterslev Mose og Søborghusrenden. Overløbsbygværkernes placering kan ses i projektets modelafsnit på figur 2.4 på side 18.

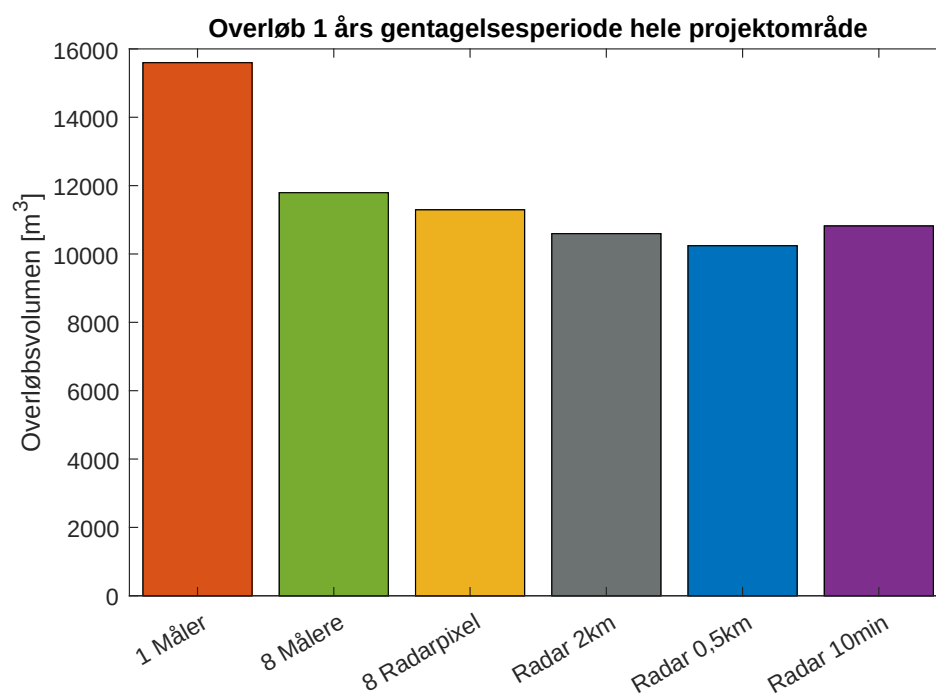
På figur 10.1 kan ekstremstatistikken for modelresultaterne fra simuleringerne ses. Her er der præsenteret resultater for de seks før omtalte scenarier. Det er besluttet at præsentere ekstremstatistikken fra nul til fem års gentagelseperiode da det, ifølge Mikkelsen et al. [1999], som minimum kræver en serie på fire gange længden der ønskes fastlagt. De fulde serier for ekstremstatistikken kan ses i Bilag F.



Figur 10.1: Ekstremstatistik på overløbsvolumen for hele projektområdet.

Det kan observeres at der er målt en højere overløbsvolumen for serien baseret på input fra 1 Måler. Dette kan skyldes den generelle tendens at højere intensiteter observeres i målingerne end i radaren ved korte varigheder, se figur 6.6 på side 34. Sammenlignes der med resultatet, med input fra 8 målere, kan der observeres at den større stedlige opløsning har resulteret i en lavere overløbsvolumen. Det kan observeres at der er mindre spredning på de radar baserede scenarier. De mindste overløbsvolumener er fundet med input fra radar med 0,5 km radarpixels og 1 minut tidslig opløsning.

På figur 10.2 kan den samlede overløbsvolumen med en 1 års gentagelseperiode observeres. Det kan observeres at når den samlede volumen for hele projektområdet betragtes, er der ved scenarierne med bedre stedlig opløsning fundet en mindre overløbsvolumen.



Figur 10.2: Overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode for hele projektområdet.

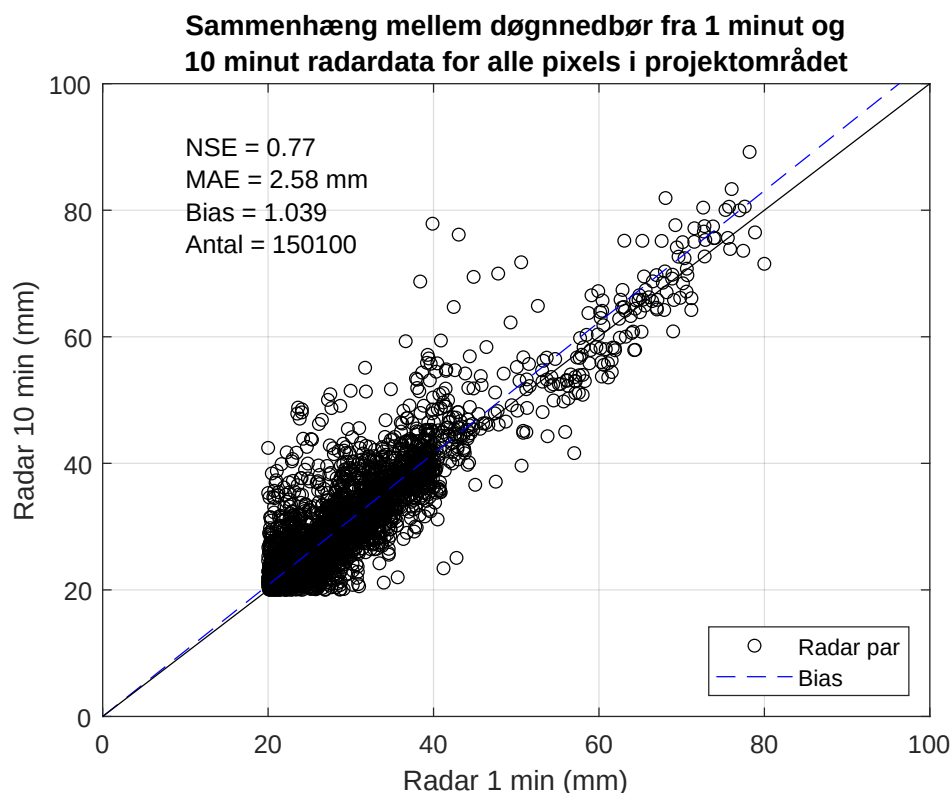
På baggrund af figur 10.2 ses det at scenarierne hvor regnmålere benyttes er der højere overløbsvolumen end scenarierne med radardata. Dette kan både skyldes målemetoden mellem produkterne og den bedre stedlig opløsning på radardataen. Hvis der fokuseres på scenariet med 8 målere og 8 radarpixels, hvor begge har samme stedlig opløsning, ses det at scenariet med 8 radarpixels opnår en lavere 1 års overløbsvolumen. Dette antyder at der er en forskel mellem brugen af radardata og regnmåler, som kan afspejles i de forskellige målemetoder. Denne forskel kan skyldes at radardataen underestimerer de højintense nedbørshændelser som tidligere beskrevet i kapitel 4. En anden grund til forskellen kan være den før omtalte arealmidling over pixel området i radardataet [Thorndahl et al. 2019].

Hvis scenarierne opdeles i målemetoder, ses det at der sker en formindskning i overløbsvolumen ved bedre stedlig opløsning både for måler- og radardata. Denne tendens ses også i etablerede erfaring med arealreduktionskurver, som for eksempel i Thorndahl [2017], hvor reduktionsfaktoren falder ved større areal. Hvilket forklarer at der ved større areal, skal reduceres yderligere for at tage hensyn til regnens stedlige variation.

Sammenlignes denne erfaring med resultatet vist på figur 10.2, kan hypotesen være, at ved brug af bedre stedlig opløsning opnås en lavere overløbsvolumen. Dette kan skyldes den bedre formidling af regnens stedlige variation. For eksempel scenariet ved brug af 1 måler som dækker et stort areal og derfor, ifølge Thorndahl [ibid.], skal pålægges en lav reduktionsfaktor for at tage højde for regnens stedlig variation.

Det målte radardata med 10 minutters opløsning giver lidt større overløbsvolumener end det advektion interpoleret radardata (1 min opløsning). Dette kan skyldes de, som nævnt i kapitel 9, differencer imellem tidsserierne. For yderligere undersøgelse af denne forskel, opstilles en sammenligning af regnprodukternes døgnedbør.

Sammenligningen mellem 1 og 10 minutters opløsning kan ses på figur 10.3, hvor en bias på omkring 4% imod opløsningen på 10 minutter kan ses ved regndage større end 20 mm. Dage med meget nedbør vil typisk indholde hændelser, som bidrager til overløbsvolumen. På baggrund af overløbsvolumenerne på figur 10.2, er der 6% større volumen ved 10 minutters opløsning i forhold til 1 minuts opløsning. Her kan omkring 4% skyldes biasen i døgnedbør, hvor resten kan skyldes den tidslige opløsning, som ifølge Ochoa-Rodriguez et al. [2015] har indflydelse på model responsen. Her kan der argumenteres for om der bør foretages en ny biasjustering af radardataet, for at kunne sammenligne de to tidsopløsninger på ens forudsætninger. Samme argument kan sige om radar 2 km scenariet der også ville opnå en anden biasjustering og derved ændre ekstremstatistikken.



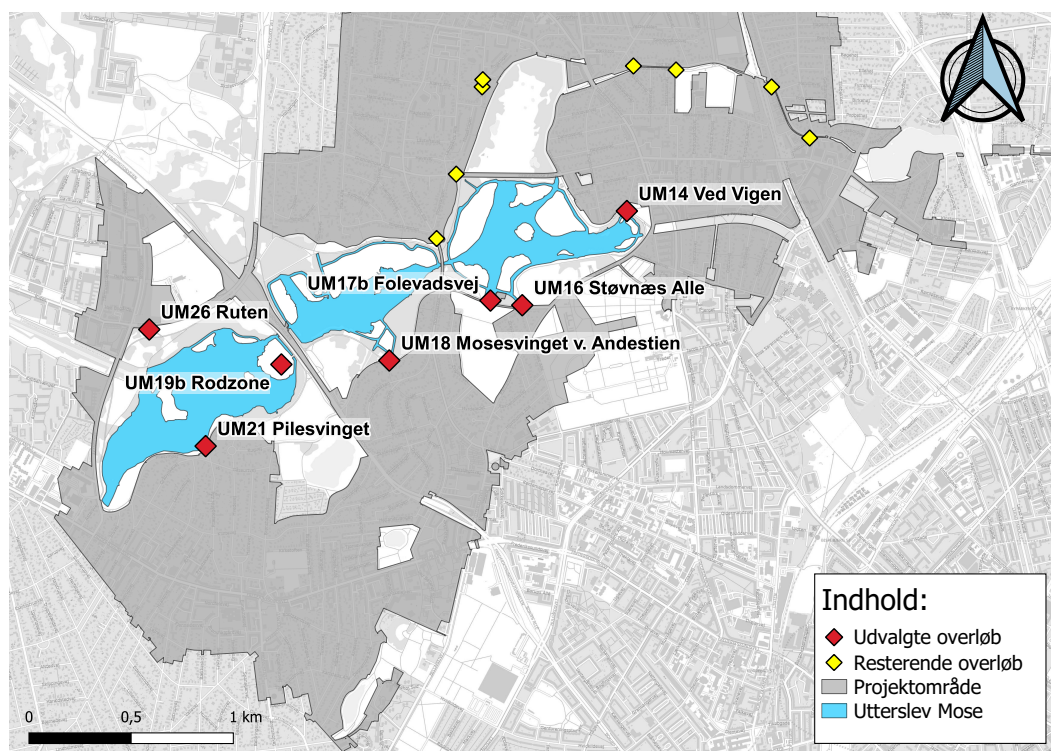
Figur 10.3: Sammenhæng mellem 1 minut og 10 minut radar.

Da der ikke findes en kontinuert tidsserie for overløb er man nødsaget til at benytte sig af modeller til at estimerer overløbsvolumen. Men eftersom der er stor forskel på model responsen ved forskellige regninput, giver det usikkerhed på resultatet. Det må antages at man med

bedre sted- og tidlig opløsning kommer tættere på virkeligheden. Men på grund af de tidligere præsenterede begrænsninger i målemetoderne og usikkerheder i modellen er det problematisk at estimere hvilken af inputtene der giver et resultat tættest på virkeligheden. Da der i denne del af rapporten er arbejdet med den relative forskel mellem regninput er der ikke foretaget betragtninger om hvordan modelresultatet kunne forbedres ved kalibrering.

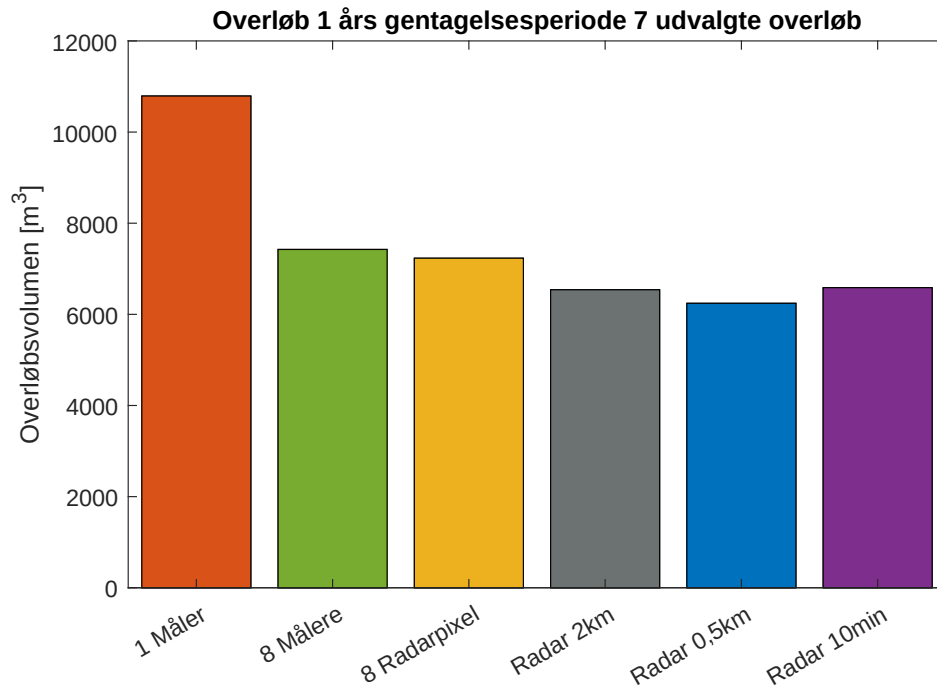
10.2 Overløb til Utterslev Mose fra Københavns Kommune

Som tidligere nævnt i afsnit 2 på side 15 er der forskel på detaljeringsgraden i modelarbejdet. Derfor er der valgt i dette afsnit at præsentere specifikke resultater for de syv overløbsbygværker i Københavns Kommune, som udleder til Utterslev Mose. Placeringen af de syv udvalgte overløbsbygværker kan ses på figur 10.4.



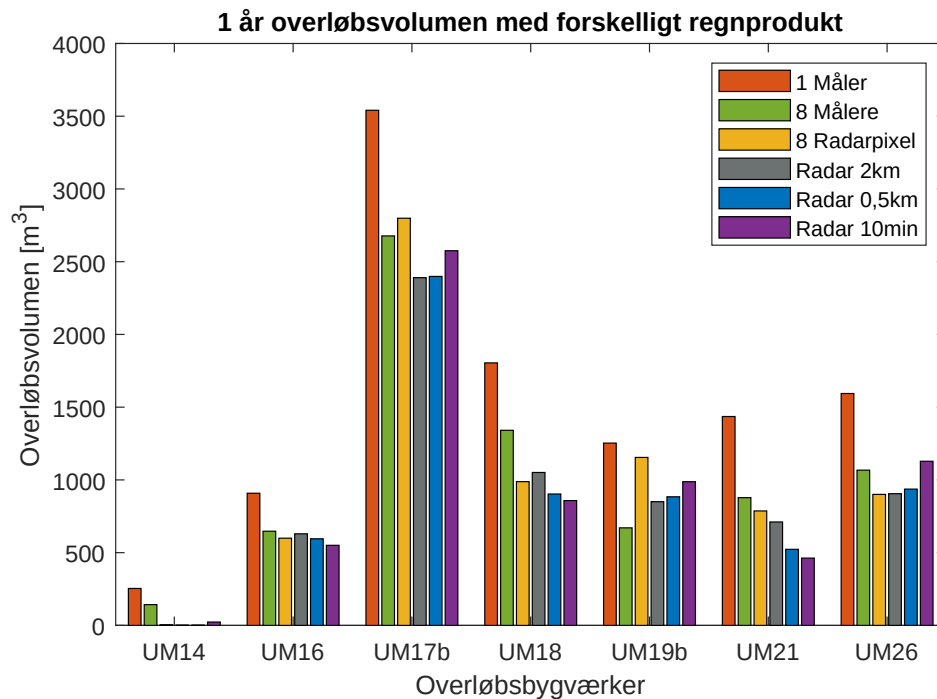
Figur 10.4: Placering af de syv udvalgte overløb tilknyttet Københavns Kommune.

På figur 10.5 kan den samlede overløbsvolumen med en 1 års gentagelsesperiode for de syv overløb observeres. Der er ligeledes opstillet ekstremstatistik på baggrund af LTS-simuleringerne, for den samlede overløbsvolumen fra de syv overløbsbygværker. For hver af de enkelte overløbsbygværk kan ekstremstatistikken ses i Bilag F. Der er umiddelbart samme tendens som i det foregående afsnit, hvor scenarierne med bedre stedlig opløsning opnår en mindre overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode.



Figur 10.5: Overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode for de syv udvalgte overløbsbygværker.

På figur 10.6 kan 1 års overløbsvolumen for hvert af de syv overløbsbygværker observeres. Her kan det ses at overløbsbygværk UM17b har den højeste udledning til Utterslev Mose ved 1 års gentagelsesperiode. Det kan konstateres at der som udgangspunkt forekommer samme tendens, med mindre overløbsvolumener ved større stedlig variation, som på figur 10.2 for det samlede område.



Figur 10.6: Overløbsvolumener ved 1 års gentagelsesperiode for forskellige scenarier set på de syv individuelle overløbsbygværker.

Der er dog enkelte overløbsbygværker der afviger fra den generelle tendens. Et eksempel på dette kunne være UM19b, hvor de radar basserede scenarier giver større volumener end scenariet med 8 målere. Det vurderes dog at nu mindre opland der bliver undersøgt på, nu mere vil andre ting kunne påvirke overløbsvolumen end det spatiale regninput. Dette kunne for eksempel være modellens fysiske strukture, samt realtidstyringen, omkring overløbsbygværkerne.

I overløbsbygværk UM19b tilfælde, kan en af grundene til den lave overløbsvolumen ved 8 målere scenariet være at størstedelen af oplandet opstrøms bygværket har regninput fra regnmåler 5705. I den næste del af rapporten vil relationen mellem områdets regnmålere og den regionale model præsenteres. Her underestimerer måler 5705 regnintensiteten. Dette kan medføre den mindre overløbsvolumen fundet ved dette scenarie. Variationer i regnintensiteten mellem regnserierne kan medfører usikkerhed på ekstremstatistikken i den relative sammenligning.

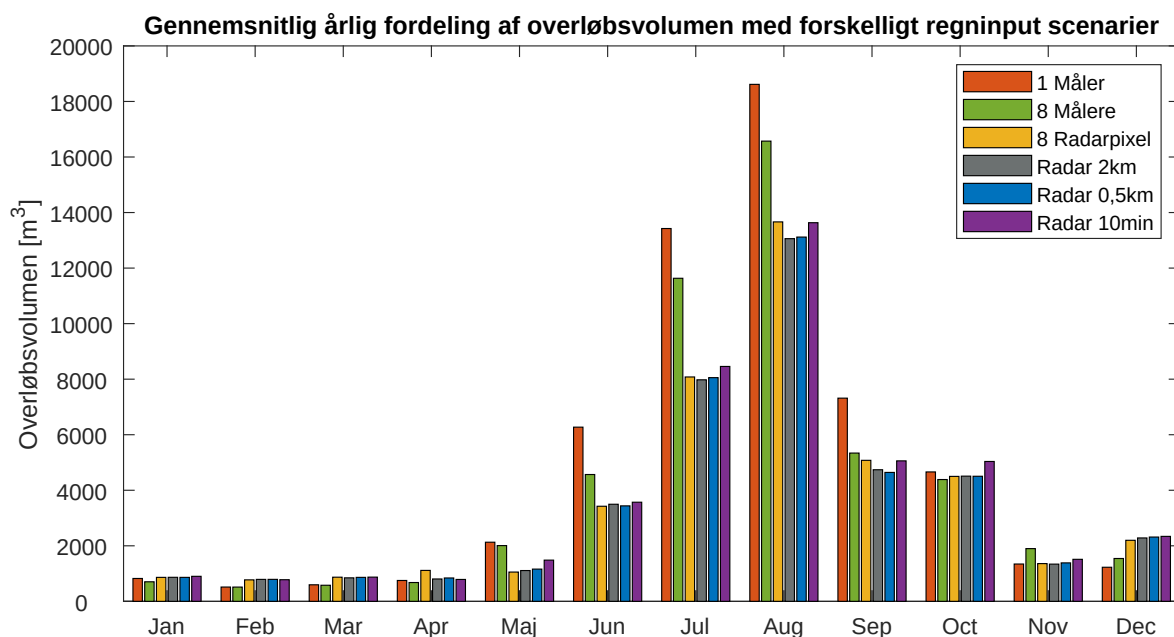
10.3 Fordeling af overløbsvolumen på månedsbasis

På baggrund af modelresultaterne fra LTS-simuleringerne undersøges der, hvilke måneder som bidrager mest til den totale overløbsvolumen. Derudover undersøges det om der månedsvist er forskel ved brug af forskellige regninput scenarier. Derfor evalueres alle overløbsvolumener over hele simuleringsperioden ud på månedsbasis for hver scenarie. Den procentvis fordeling af total overløbsvolumen fordelt på årstiderne er beregnet for alle regnprodukter, se tabel 10.1. Her er den maksimale afvigelse mellem scenarierne omkring 3 %.

Forår	Sommer	Efterår	Vinter
7%	61%	25%	8%

Tabel 10.1: Gennemsnitlig total overløbsvolumen fordelt ud på årstiderne.
Forår(Mar, Apr, Maj) Sommer(Jun, Jul, Aug) Efterår(Sep, Oct, Nov) Vinter(Dec, Jan, Feb)

På figur 10.7 kan fordelingen af det årlige gennemsnit på overløbsvolumen fordelt på månederne, for de seks scenarier observeres. Det tydeligt ses at juli og august måned har størst bidrag.



Figur 10.7: Den årlige gennemsnitlige overløbsvolumen fordelt på månederne for de seks scenarier.

Fokuseres der på figur 10.7, med hensyn til forskellen mellem scenarierne for de individuelle måneder, kan det visuelt ses at de større forskelle sker i sommermånederne samt september. Denne forskel kan skyldes størrelses forholdet mellem mængden af overløbsvolumer, da store volumener også vil medføre store forskelle kontra små volumener.

Denne forskel kan eventuelt forklares ved de regntyper, som typisk vil forekomme i de forskellige perioder. Konvektionsregn forekommer oftest i varme perioder, såsom månederne fra maj til september, som er højsæson for skybrud [DMI 2023]. En konvektionsregn er typisk højintensiv og har en lille geografisk udbredelse. Skybrudssæsonen afspejler sig i resultaterne vist på figur 10.7, hvor de største overløbsvolumener befinder sig indenfor samme periode.

I modsætning kan frontregn forekomme hele året, og er nedbørshændelser med stor geografisk udbredelse som typisk har jævn intensitet i flere timer [Winther 2011].

Ligeledes er udbredelsen mellem frontregn og konvektionsregn meget forskellige og kan forklare differencen mellem de forskellige scenarier på månedsbasis. Eftersom frontregn har stor stedlig udbredelse vil der være god chance for at både måler og radar, observere den samme intensitet. Hvorimod i de varmere måneder hvor konvektionsregn forekommer, er den stedlig udbredelse af regninputtet mere afgørende grundet denne regntypes lille geografiske udbredelse.

På baggrund af denne analyse vurderes det at brugen af regnininput med spatialt opløsning er mest afgørende i sommer- og start efterårs månederne, grundet forekomsten af flere konvektionsregn. Disse måneder er ligeledes der hvor størstedelen af overløbsvolumen udledes, derfor relativt set kan brugen af regn med stedlig opløsning være mere akkurat kontra traditionelt brug af en regnmåler. Men modsat passer fordeling på figuren med erfaringen at radaren underestimerer højintense hændelser såsom skybrud. Dette kan også medføre de mindre overløbsvolumener ved de radar baserede scenarier i skybrudssæsonen.

11 | Opsamling af Del III

I Del III af rapporten er metoden og resultaterne for LTS-simuleringerne præsenteret. Her er model responsen ved forskellige opløsninger af regninput undersøgt på en ikke kalibreret model. Til analysen er der foretaget en udvælgelse af nedbørshændelser indenfor perioden 16-01-2008 til 17-09-2022. Det er besluttet at alle hændelser over 5 mm og 5 minutters varighed skal medtages i joblisten til LTS. Store perioder med målernedbrud og huller i regnserien er blevet substitueret med data fra den nærmeste måler. På baggrund af udvælgelsen er 602 regndage udvalgt til LTS-simuleringerne.

Til analysen er en model opsat til LTS, hvor tørvejs afstrømning og realtidsstyring er medtaget. Der er defineret et stopkriterie for hver hændelse ved mindre end $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ i 6 timer ved udløbet. Model parametrene vil forholdes konstante, hvor kun regninputtet vil variere mellem simuleringerne.

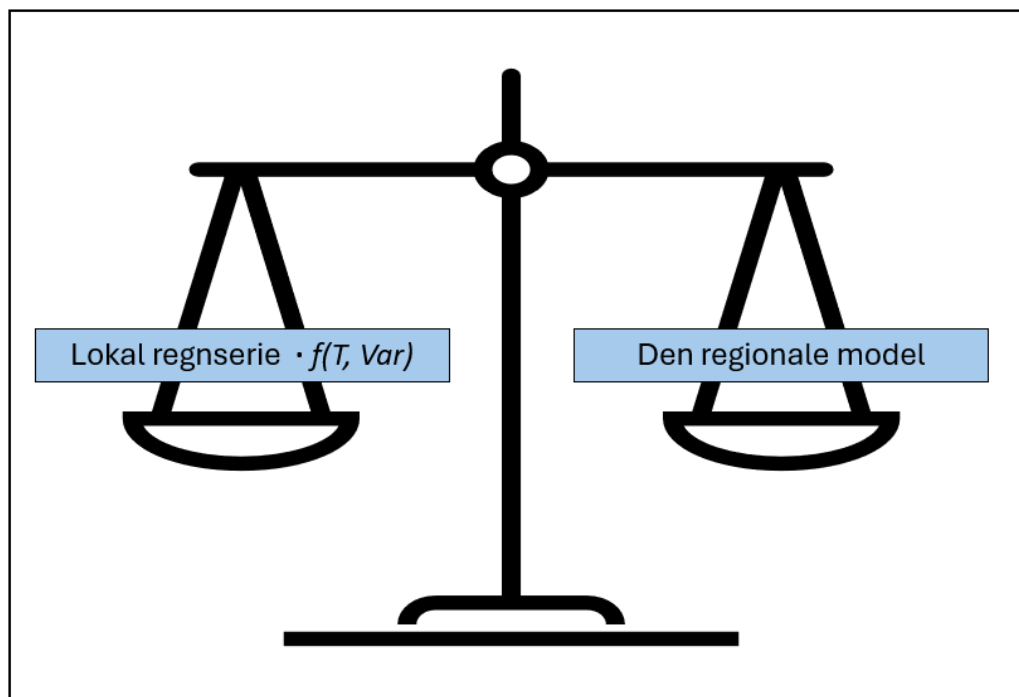
Der er defineret seks regninput scenarier, hvor oplandene i modellen er fordelt efter regnserien tætteste på massemidtpunktet af oplandet. Der er opstillet et scenarie med radardata i 10 minutters opløsning, som i modsætning til de andre radar scenarier ikke er advektion interpoleret. For regninput scenarierne er der præsenteret resultater på ekstremstatistik og med fokus på overløbsvolumen ved 1 års gentagelseperiode. Her er der fundet en tendens til at der med større stedlig opløsning er fundet en mindre overløbsvolumen, når hele projektområdet bliver betragtet. Der er også tendens til at radarserierne resultere i mindre volumener, dette kan skyldes forskellen i målemetode. Samme tendenser er ligeledes fundet for de syv udvalgte overløbsbygværker tilknyttet Københavns Kommune. Der er yderligere lavet betragtninger om hvordan den udledte overløbsvolumen fordeler sig over året.

Da kontinuere tidsserier for overløb ikke findes, er man nødsaget til at benytte sig af modeller til at estimere overløbsvolumen. Men ud fra de varierende resultater i denne del, er det vanskeligt at bestemme hvilket scenarie der er tætteste på virkeligheden. Dette kan give stor usikkerhed på den nødvendige bassinstørrelse, for at reducerer overløb til én gang årligt til Utterslev Mose.

Del IV

Lokale regnserier & den regionale model

I denne del vil de lokale regnserier omkring projektområdet sammenlignes og korrigeres i forhold til den regionale model fra skrift 32. Her introduceres den beskrivende parameter f -værdien som, ved flere metoder i denne del, benyttes til korrigerende af de lokale regnserier. Tilsidst evalueres effekten af korrektionen på ekstremstatistikken ved udførsel af flere LTS-simuleringer. Her er betydningen af regnseriernes f -værdier på overløbsstatistikken også undersøgt.



12 | Sammenligning af lokale regnserier og den regionale model

I dette kapitel sammenlignes de lokale regnserier med den regionale model, med henblik på at følge anbefalingerne for dansk dimensioneringspraksis [Gegersen et al. 2014]. Her vurderes det, hvordan regnintensiteten i de lokale regnserier afviger i forhold til den regionale model. Yderligere er der undersøgt, hvordan de lokale regnserier geografisk fordeler sig over projektområdet. Dette undersøges med henblik på om der bør foretages korrigerende på de lokale regnserier.

12.1 Den regionale model og korrektion

Der er indenfor dansk afløbsteknisk dimensionering tradition, for at beregne dimensionsgivende regnhændelser ud fra en regional model [Winther 2011]. En dansk regional model for "Regional variation af ekstremregn i Danmark" blev første gang præsenteret i SVK skrift 26 [Mikkelsen et al. 1999] hvor der tages udgangspunkt i SVK regnmålersystemet. Med udbygningen af regnmålersystemet er regionalmodellen siden revideret i skrift 28, 30 og 32 med større datagrundlag og mindre ændringer til metoden [Arnbjerg-Nielsen et al. 2023].

Den regionale model har til formål at medtage regnens naturlige variation i tid og sted, til bestemmelsen af den dimensionsgivende regnintensitet, for en vilkårlig lokation i Danmark. Hvor regnintensiteten vurderes på baggrund af årsmiddelledbøren og den ekstreme døgnnedbør for den pågældende lokation. I den regionale model medtages den statistiske usikkerhed for datasættene og deres ekstrem variationer. Den regionale opløsningen på de forklarende variabler er siden skrift 26 opdateret betydeligt [ibid.]. Her blev U-værdien som et mål for repræsentative regnserier defineret. U-værdien beskrives som en standardafvigelse i forhold til prediktions spredningen på den regionale models regnintensitet. En U-værdi på over 0 overestimerer den regionale model, hvor værdier under 0 underestimerer. [Mikkelsen et al. 1999]

I skrift 30 bliver der introduceret en korrektionsfaktor til repræsentative historiske regnserier [Gegersen et al. 2014]. Denne såkaldte korrektionsfaktor, senere benævnt som "f-værdi" sikrer at lokale regnserier kan korrigeres ind til regionalmodellen for den pågældende lokation. Faktoren sikrer derved at usikkerheden for den tilfældige variationen i ekstremværdier ved lokale regnmålers datasæt, kan håndteres ved korrigerende til den regionale model. F-værdien er et mål på forholdet mellem den lokale regnserie og den regionale model. På ligning (12.1) kan udtrykket for korrektion af lokale regnserier til den regionale model med f-værdi ses. [Sørup og Gegersen 2023]

$$i_{regional} = i_{lokalregnserie} \cdot f_{regnserie}(T, Var) \quad (12.1)$$

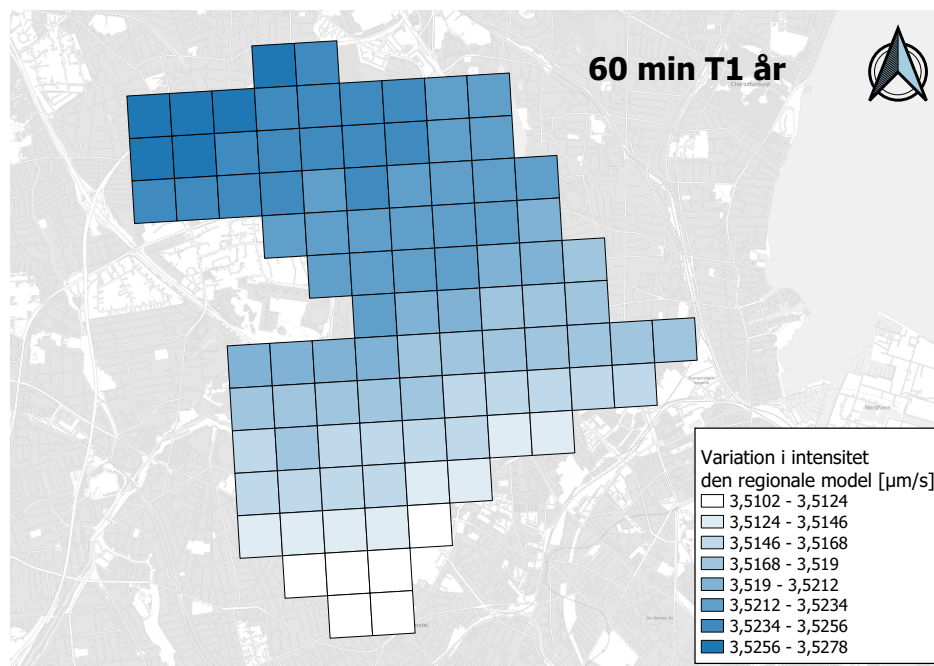
En f-værdi på 1 angiver at der er god overensstemmelse mellem regnserien og den regionale model, hvor ved værdier under 1 overestimerer regnserien den regionale model [Gregersen et al. 2014]. De lokale regnserier kan være påvirket af usikkerheder såsom læforhold, nedbrud, længde af serie og lokal klimatologi, som kan skabe differens i forhold til den regionale model. Disse usikkerheder kan give anledning til over- og underestimering af ekstremregn intensiteter i forhold til den regionale model [Winther 2011] [Mikkelsen et al. 1999].

Ved analyser hvor det er nødvendigt at bruge historiske regnserier til dimensionering, som for eksempel stuvning og overløbs beregninger for komplekse oplande, bør de lokale serier sammenlignes og korrigeres så effekterne er tilsvarende den regionale model [Gregersen et al. 2014]. Da der i projektet arbejdes med ekstremstatistik, ud fra historiske regnserier (Beregningsniveau 3, Harremoës et al. [2005]), bør serierne korrigeres for at tage højde på usikkerhederne ved de lokale serier.

Noget af det problematiske med at benytte f-værdier er at de er afhængig af varigheder og gentagelseperioden på hændelsen. Ved lokale regnserier med stor variation på f-værdier, ved forskellige varigheder og gentagelseperioder, frarådes det at benytte en gennemsnitlig korrektionsfaktor [Sørup og Gregersen 2023].

Den regionale model er repræsentativ for år 2000 og bør derfor ifølge skrift 32 Arnbjerg-Nielsen et al. [2023] klimafremskrives med en klimafaktor til det aktuelle dimensionerings år. Der er valgt at se bort fra denne anbefaling i projektets korrigerings, da det er vanskeligt at klimakorrigere løbende med længden af de lokale regnserier.

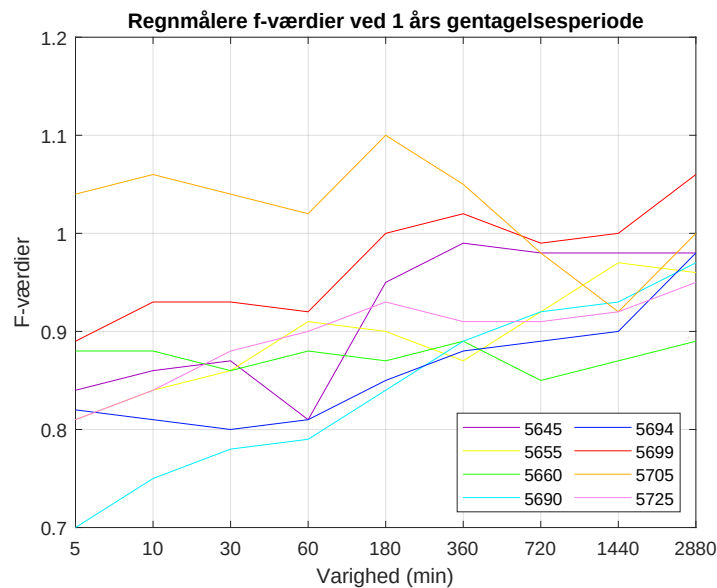
F-værdierne er beregnet i forhold til den regionale models regnintensitet over området. Et eksempel på variation i den regionale model over projektområdet kan ses på figur 12.1. Variation over området ændres i en mindre grad med varighed og gentagelsesperiode, men indenfor få procent point på tværs af oplandet. Eksempler ved andre varigheder kan ses i Bilag G.



Figur 12.1: Eksempel på variationen i regnintensitet ved den regionale model for projektområdets radarpixels. Her for 60 min varighed ved 1 års gentagelsesperiode. Beregnet med SVK regnrækkeværktøj [Arnbjerg-Nielsen et al. 2023].

12.2 F-værdier for originale regnserier

På baggrund af anbefalingerne og dimensioneringspraksis beskrevet i foregående afsnit, er der foretaget beregninger af f-værdier på de originale regnserier. Beregninger af f-værdier for følgende afsnit er foretaget ved brug af "Spildevandskomiteens Regnserieværktøj" dokumenteret i Sørup og Gregersen [2023]. Værktøjet beregner f-værdier ved at sammenligne de opstillede ekstremværdi-modeller for den lokale regnserie med den regionale model. På figur 12.2 kan de beregnede f-værdier for regnmålerne i projektområdet ses. Hver serie er evalueret mod den regionale model i de individuelle koordinater for regnmåler og pixelcentrum. Der er i afsnittet præsenteret f-værdier for hændelser med 1 års gentagelsesperiode, i henhold til kravet om et overløb per år i planperioden. F-værdier for andre gentagelsesperioder kan ses i Bilag G.

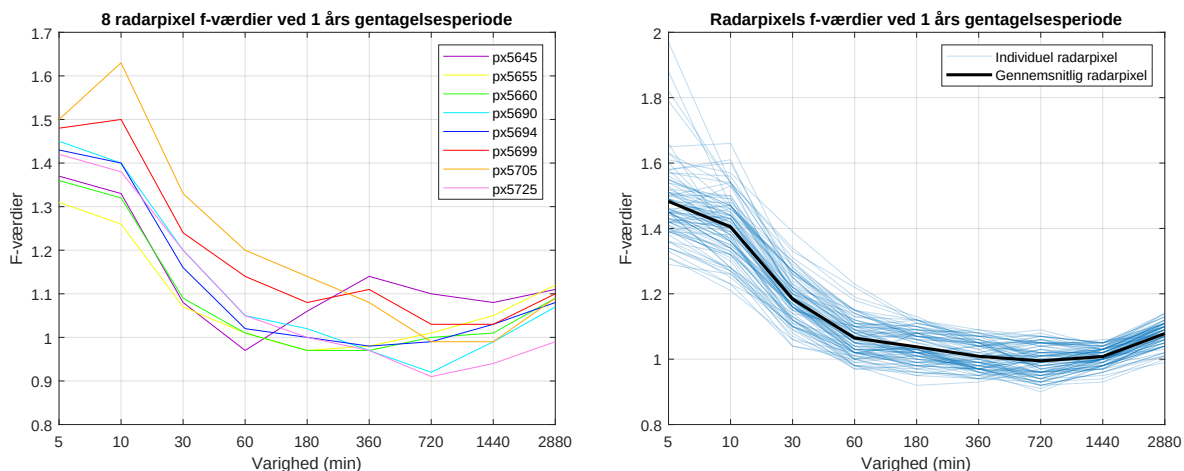


Figur 12.2: Beregnede f-værdier for 1 års gentagelsesperiode for de otte regnmålere.

Det kan observeres at størstedelen af målerne overestimerer regional modellen med f-værdier under 1, specielt i varigheder under en time. Det kan konstateres at måler 5705 har en modsat tendens, ved at undervurdere regionalmodellen i de korte varigheder og overvurdere de lange. F-værdierne for alle målere varierer meget med varigheden.

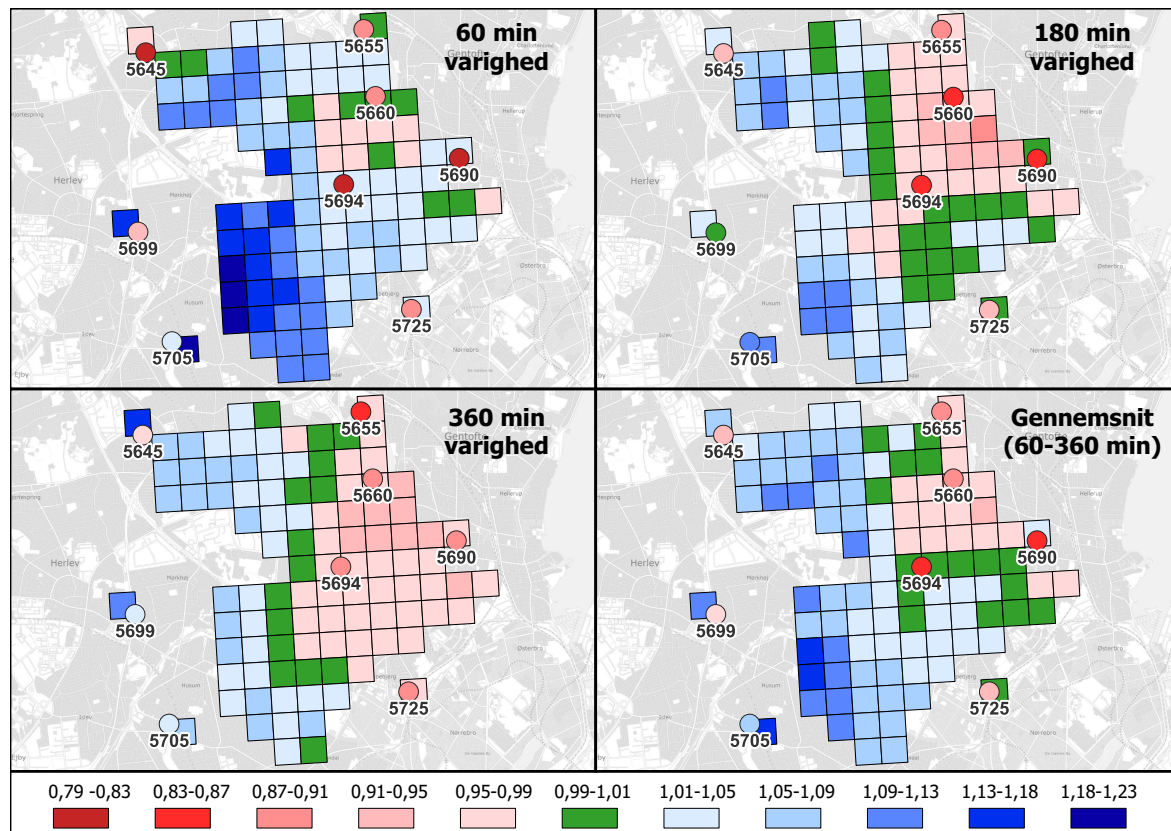
Yderligere er der foretaget beregninger af f-værdier på radarserierne, som kan ses på figur 12.3. Til venstre vises de otte målernes tilsvarende radarpixel og til højre vises de 95 radarpixels.

For at regnintensiteterne kan rangeres er radarserierne inddelt i hændelser efter tidspunkter med fiktive vip. Vip tidspunkter bestemmes hver gang der er akkumuleret 0,2 mm siden sidste vip. En hændelse bestemmes som minimum to vip på en time. Starttiden for hændelsen er defineret, som tiden ved første vip og sluttiden, som sidste vip registreret indenfor en time. Denne fremgangsmåde er benyttet da den er meget lignende hændelses registreringen brugt i SVK-målerne [Sarup 2023]. Med denne fremgangsmåde kan der være risiko for at meget små regnintensiteter er undladt fra hændelserne. Det vurderes dog at den samme risiko er gældende for målere serierne og samtidigt ikke vil påvirke regnseriernes ekstremstatistik væsentligt. Der vil være en usikkerhed på 2880 min varigheden da radardataen ikke er helt komplet, eftersom nogle dage er frasorteret på grund af fejl og meget lidt eller ingen regn.

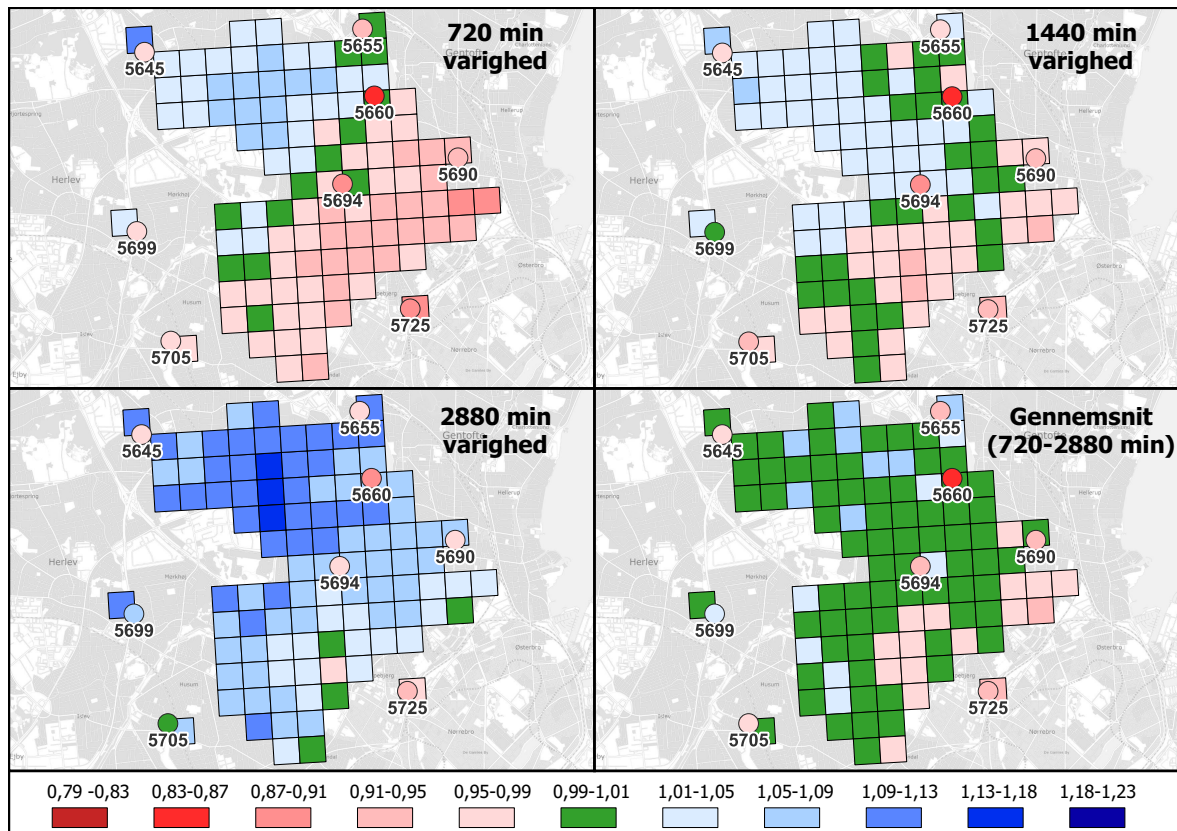


Figur 12.3: Beregnede f-værdier for 1 års gentagelsesperiode for de otte måleres tilsvarende radarpixel (venstre) og de 95 radarpixel på oplandet (højre).

Der kan observeres en generel tendens i radarserierne, at de korte varigheder underestimeres, mens hændelserne på omkring et døgn rammer tæt på 1. Det vurderes at dette er et indirekte resultat af bias-justeringsen foretaget på dagsbasis. En anden grund kan være arealmidlingen af intensiteten indenfor radarpixelen [Thorndahl et al. 2019]. Varigheden ved 10 min undervurderes væsentligt med mellem 20-60% i cellerne. Der kan observeres en spredning på datasættets f-værdier i forhold til gennemsnittet. Derfor er det undersøgt om der er en geografisk tendens over området. Dette kan ses på figur 12.4 og 12.5.



Figur 12.4: Den geografiske udbredelse af f-værdier på radarpixels og målere på 60-360 minutters varighed ved 1 års gentagelsesperiode.



Figur 12.5: Den geografiske udbredelse af f-værdier på radarpixels og målere på 720-2880 minutters varighed ved 1 års gentagelsesperiode.

Her er der præsenteret f-værdier for målere og radar ved varighederne 60, 180, 360, 720, 1440 og 2880 min, samt gennemsnit. Der kan ses en tendens til at radarpixels og målere undervurdere den regionale model i den vestligeretning for de korte varigheder. I den østlige retning mod kysten er der tendens til overvurdering af den regionale model for de korte varigheder. For de længere varigheder er der tendens til at den nord vestlige del af området undervurderes. Resultatet for andre gentagelsesperioder, ved samme øvelse kan ses i Bilag G.

På baggrund af resultaterne for den geografiske opdeling af f-værdierne både for målere og radar, kunne det tyde på at den regionale model ikke er særlig repræsentativ for området. En grund til dette kunne være lokale klimatologiske forhold ude ved kysten, som ikke er medtaget i den regionale model [Winther 2011]. I Bilag G er der lavet et eksempel på den regionale models variationen over området for to varigheder. Disse intensiteter har dannet grundlag for beregning af f-værdierne. Her kan der observeres, den omvendt tendens, at der er højest intensitet i den nord østlige del af området. Dog kan det aflæses at den regionale model kun varierer nogle få procentpoint over området, mens de beregnede f-værdier variere langt mere.

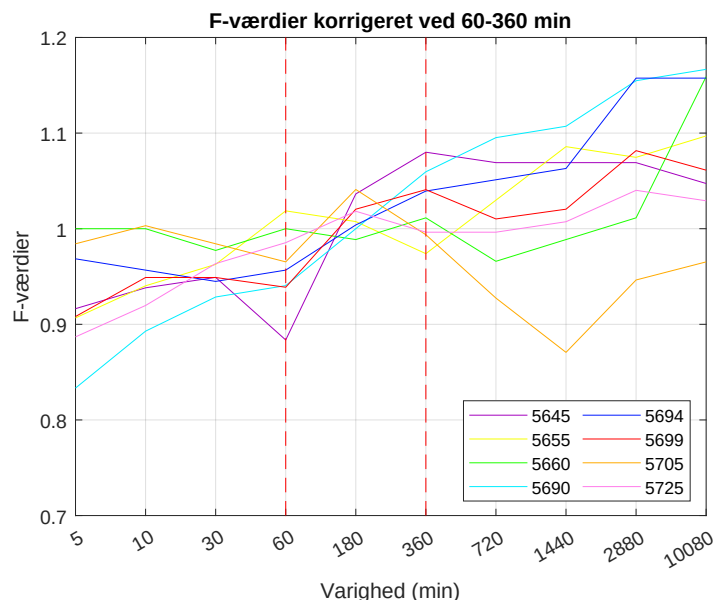
Med udgangspunkt i anbefalingerne er det valgt at korrigere serierne til den regionale model, da det vurderes at de beregnede f-værdier for de lokal serier er betydeligt fra den regionale model. Derfor udføres der i følgende afsnit en korrigering af regnserierne. Da det vurderes at afvigelsen vil have indflydelse på modellens respons og derved ekstremstatistikken på overløb.

13 | Korrigering af lokale regnserier til den regionale model

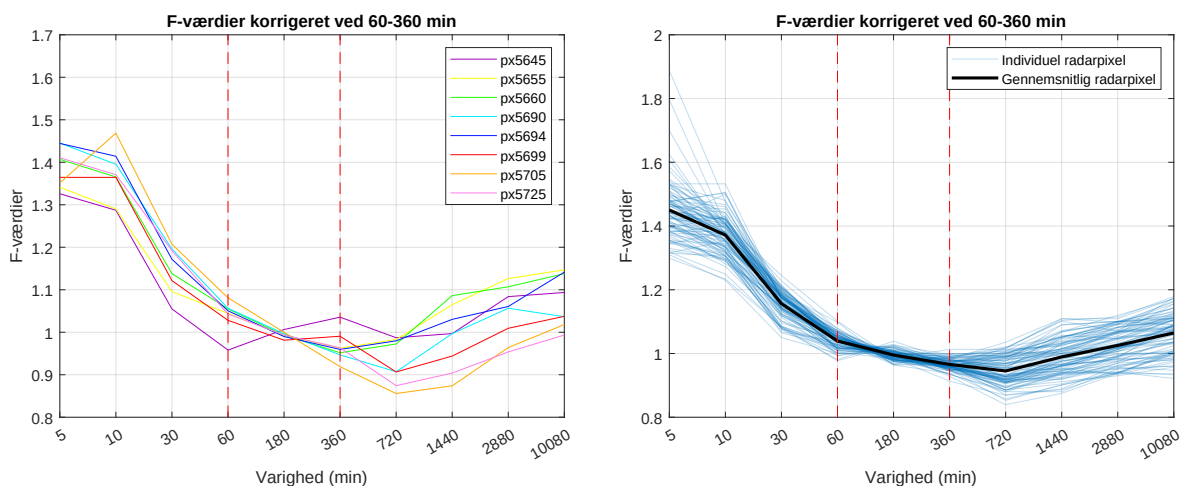
Der vil i dette afsnit foretages korrigering af de lokale regnseriers intensiteter til den regionale model. Formålet med korrigeringen er at justere de lokale serier, så de afgiver regnintensiteter svarende til den regionale model, som det anbefales i skrift 30 [Gregersen et al. 2014]. Ved LTS beregning anbefales det i SVK-usikkerhedprojekt [Arnbjerg-Nielsen og Illeris 2023], at man bør korrigere regnserien med en f-værdi tilsvarende den forventede koncentrationstid og gentagelsesperiode for dimensioneringssituationen. I projektets LTS analyse blev der fokuseret på overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode. Det vurderes at koncentrationstiden for modellens overløbsbygværker ligger i spændet 60-360 min.

13.1 Én faktor korrigering

På baggrund af anbefalingerne forklaret ovenstående er der foretaget en korrigering, med en f-værdi tilsvarende gennemsnittet af f-værdier for 60-360 min ved 1 års gentagelsesperiode, for regnmålerne og radarpixels. Resultatet af korrigering for regnmålerne med én faktor kan observeres på figur 13.1. Korrigeringen af alle radarpixels og målernes tilsvarende pixel kan ses på figur 13.2.



Figur 13.1: Regnmåler serier korregeret til den regionale model med én faktor for 60-360min varighed.



Figur 13.2: Radarserier korrigeret til den regionale model med én faktor for 60-360min varighed.

Da der er stor variation på f-værdierne med varigheden i målere serierne, resultere korrigering i at de lange hændelser undervurderes væsentligt. Mens de korrigerede radarserier overvurdere den regionale model ved de lange varigheder. Det vurderes at det ikke er tilfredsstillende at korrigere ind ved 60-360 min, da det påvirker de længere hændelser væsentlig væk fra den regionale model. Dette vil påvirke model responsen og ekstremstatistikken på overløbsvolumen.

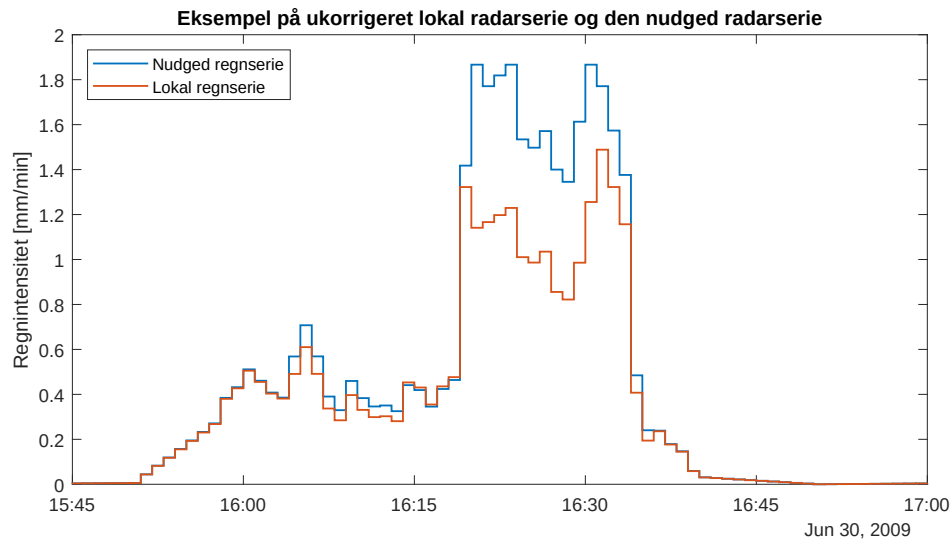
13.2 Korrigering med statistisk nudging metode

Grundet den store variation i varighederne for de beregnede f-værdier, vurderes det at usikkerheden mellem de enkelte målere og radarpixels har stor betydning for LTS resultatet. Derfor er der brugt metoden statistisk nudging af regnserier, til at forsøge at minimere usikkerhederne heriblandt variationen i varighederne, som ikke er muligt ved én faktor korrigeringen. Metoden er oprindeligt udviklet med henblik på generering af syntetiske regnserier i KLIMAKS projektet Thorndahl et al. [2020], men bliver her brugt til korrigering af historiske regnserier. Formålet med at bruge metoden i projektet, er at minimere usikkerhederne på serierne således de ikke overskygger den spatiale betydning fra dynamikken i tid og sted.

Statistisk nudging beskrevet i Thorndahl [2024] gør det muligt at justere hver af regnseriens enkelte hændelser ind til den regionale model. Hvor regnseriens ekstremværdier for varighederne 5 til 2880 minutter rangeres og tilgives gentagelsesperiode. For hver varighed og gentagelsesperiode beregnes en nudging faktor ved forskellen mellem lokal regnserie og den regionale model, hvorved hændelsen justeres. Justeringen sker ved double-sweep metoden hvor der justeres fra korteste til længste varigheder og tilbage igen, hvorefter det gentages for alle gentagelsesperioder i serien fra 0,1 år og op. Nudgingen er foretaget i forhold til den regionale model og er udført på hver enkelte serie, men dog for et centralt koordinat i oplandet. Dette vil give en mindre fejl, når der evalueres imod punkter fordelt over oplandet. [ibid.]

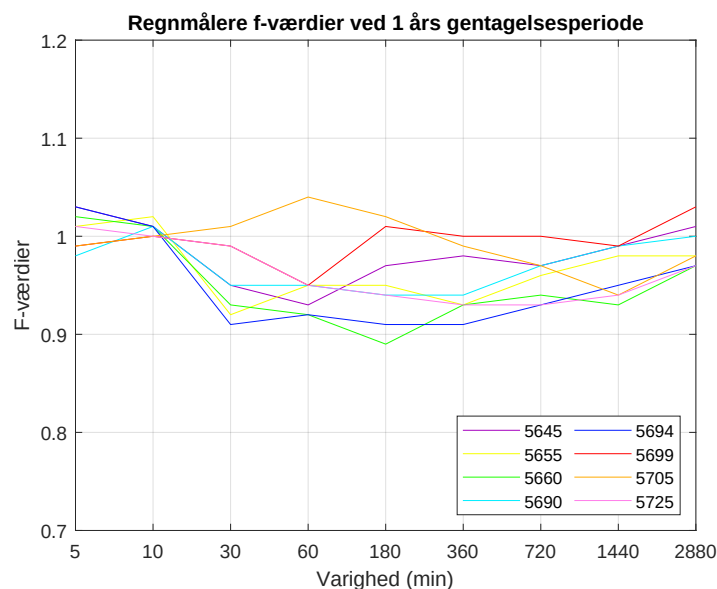
Eksempel på resultat fra nudging metoden på en hændelse fra en lokal radarserie kan ses på figur 13.3. Det kan observeres at der korrigeres flere varigheder indenfor hændelsen, dette sker på grund af double-sweep metoden. Eftersom radarserien undervurdere den regionale model i de korte varigheder er den nudgede serie korrigeret højere.

Det vurderes at nudging metoden med fordel kan benyttes når der anvendes historiske serier til LTS, da den resultaterende statistik er afhængige af de varierende varigheder og gentagelseperioder på hele regnserien.



Figur 13.3: Eksempel på resultat fra nudging metode på lokal radarserie.

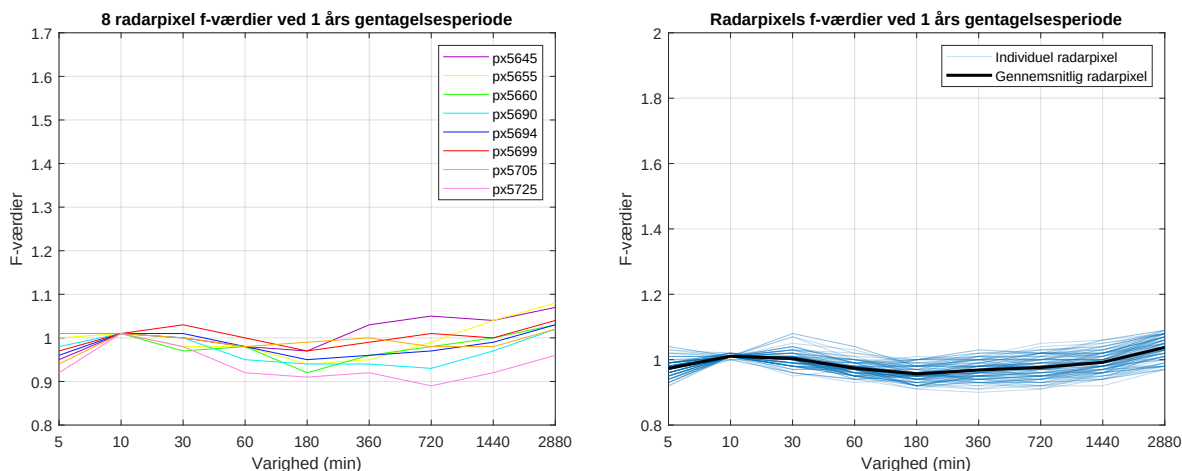
På figur 13.4 kan f-værdierne for de nudgede regnmålere serier ses. Dette kan sammenlignes med f-værdierne for de ukorrigerede serier på figur 12.2. Det kan observeres at linjerne nu er mere uniformt fordelt tættere på et. Der er mindre variationer mellem varighederne for hver måler. Der er stadig tendens til overvurdering af den regionale model, men i en mindre grad, indenfor 10%. F-værdier for nudgede serier ved andre gentagelsesperioder kan observeres i Bilag I.



Figur 13.4: Resulterende f-værdier for regnmålere serier korrigeret med nudging metoden.

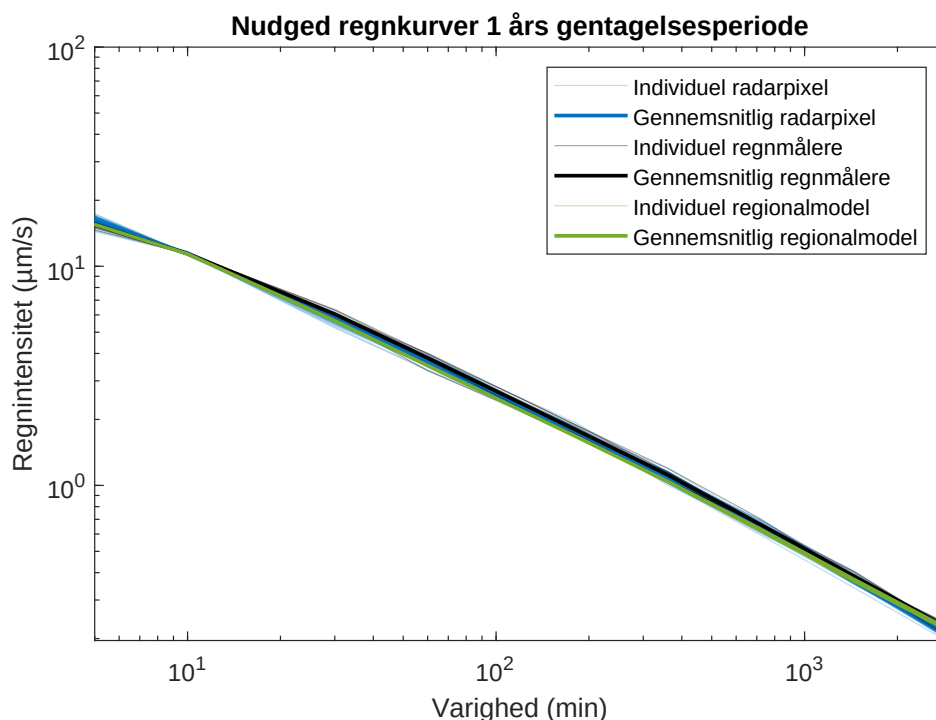
På figur 13.5 kan f-værdierne for de nudgede radarserier ses. Sammenlignes der med de ukorrigerede radarserier på figur 12.3, kan det observeres at særligt de korte varigheder har

flyttet sig tættere på et. Ligeledes kan der observeres en uniform fordeling på alle varigheder, hvor gennemsnittet ses placeret omkring et. Yderligere ses mindre spredning mellem de individuelle radarpixels sammenlignet med det ukorrigerede.



Figur 13.5: Resulterende f-værdier for radarserier korrigeret med nudging metode.

På figur 13.6 kan de nudgede seriers regnkurve, ved 1 års gentagelsesperiode, aflæses. Sammenlignes denne figur med den tidligere præsenterede figur 6.5 på side 33, kan det observeres at de nudgede serier er meget tættere på den regionale model end de ukorrigerede. specielt radarserierne ved de korte varigheder er blevet hævet op til den regionale models niveau. Dette er også i overensstemmelse med de beregnede f-værdier. Det kan samtidigt ses på figuren, at spredningen på de individuelle radar og regnmålere serier er meget mindre end for de ukorrigerede.

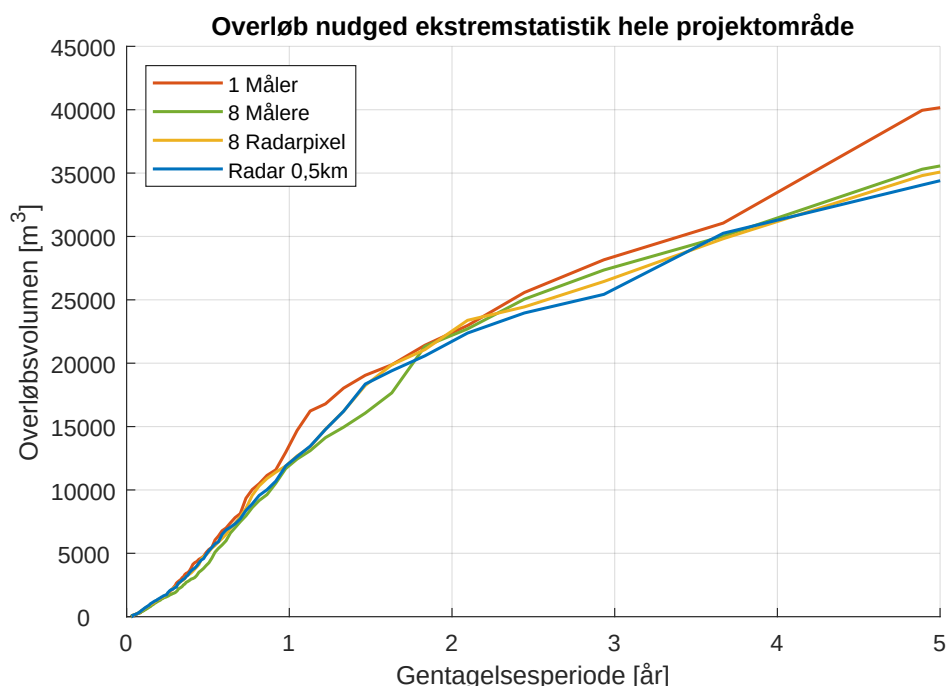


Figur 13.6: Nudged regnkurver for alle otte regnmålere og radarpixels i projektområdet, samt beregnet regnintensiteten for den regionale model i hver radarpixel. En gennemsnitlig regnkurve er udført på hvert regnprodukt.

14 | Ekstremstatistik for korrigerede regnserier

I dette kapitel er der foretaget nye LTS-simuleringer i henhold til den tidligere beskrevne fremgangsmåde i kapitel 8 og 9. Her er formålet at undersøge om forholdet mellem regninput scenarierne ændres, når der er korrigeret for afvigelserne mellem de lokale regnserier og den regionale model. Der er i dette kapitel efterprøvet korrigering af regnserier på følgende scenarier:

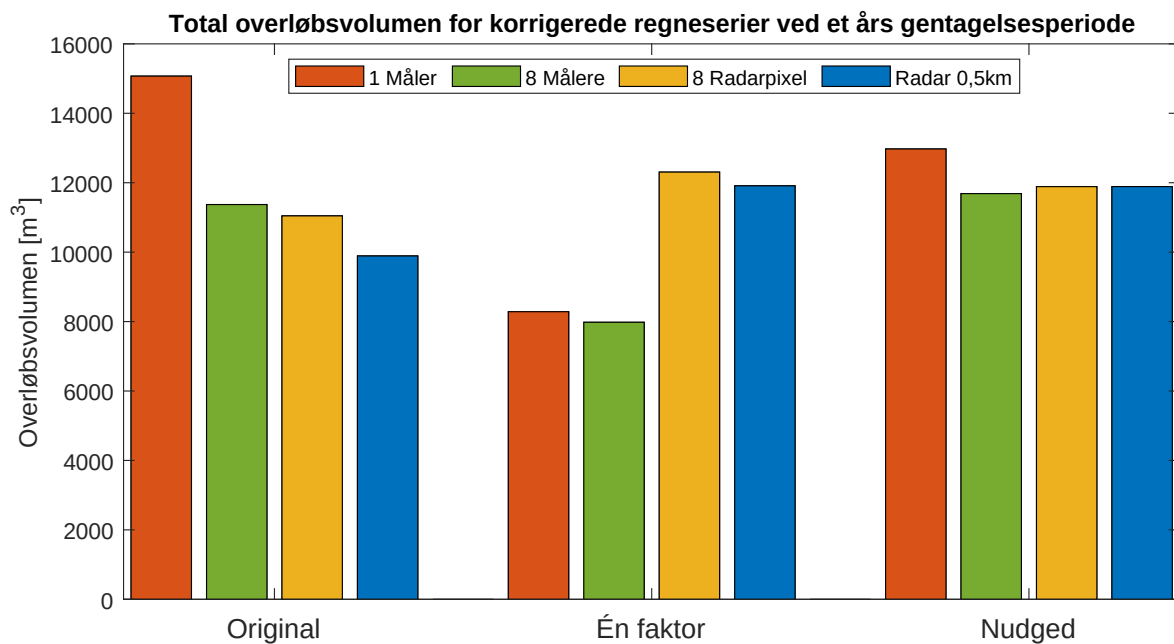
- Scenarie "1 Måler": Oplandets centrale regnmåler; Søborg Vandværk (5694).
- Scenarie "8 Målere": Alle 8 nærtliggende regnmålere for projektområdet.
- Scenarie "8 Radarpixel": De 8 regnmåleres tilsvarende radarpixel.
- Scenarie "Radar 0,5 km": Radardata i 0,5x0,5 km med 1 min opløsning.



Figur 14.1: Ekstremstatistik på overløbsvolumen for regnserier korrigeret med statistisk nudging metode.

På figur 14.1 kan ekstremstatistikken på overløb for scenarierne med regnserierne korrigeret med statistisk nudging metode aflæses. Hvis statistikken sammenlignes med de ukorrigerede serier på figur 10.1 på side 47, kan det observeres at scenarierne er tættere på hinanden. Her er særligt 1 Måler scenariet flyttet sig mod de andre scenarier, dog er den stadig højere ved nogle gentagelseperioder. Yderligere er der præsenteret ekstremstatistik for én faktor korrigeringen i Bilag H.

Der er igen præsenteret resultater for overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode, som kan sammenlignes med de originale resultater præsenteret i kapitel 10. På figur 14.2 er der præsenteret resultater for både én faktor korrigeringen og statistisk nudging metode.



Figur 14.2: Sammenligning af overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode for ukorrigerede og korrigerede regnserier.

Det kan observeres at der i én faktor korrigeringen er stor forskel på scenarierne baseret på regnmålere og radar. Forskellen mellem én faktor korrigeringen og det originale resultat vurderes at kunne begrundes i henholdsvis under- og overestimering af hændelser med lange varigheder for henholdsvis regnmåler og radar. Samme tendens kan ses ved andre gentagelseperioder i ekstremstatistikken.

Resultaterne for regnserier korrigeret med den statistiske nudging metode, er mere samlet omkring samme overløbsvolumen. Det kan dog observeres at 1 Måler giver højere volumen end de resterende, det vurderes dog at være grundet målerens lave f-værdi. Måler 5694 blev ligeledes vurderet i kapitel 10 til, at have stor overløbsvolumen. På baggrund af resultaterne, er sammenhængen mellem f-værdi og overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode undersøgt i følgende kapitel.

15 | Sensitivitetsanalyse af f-værdi

I dette kapitel udføres en sensitivitetsanalyse på f-værdi og den resulterende overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode.

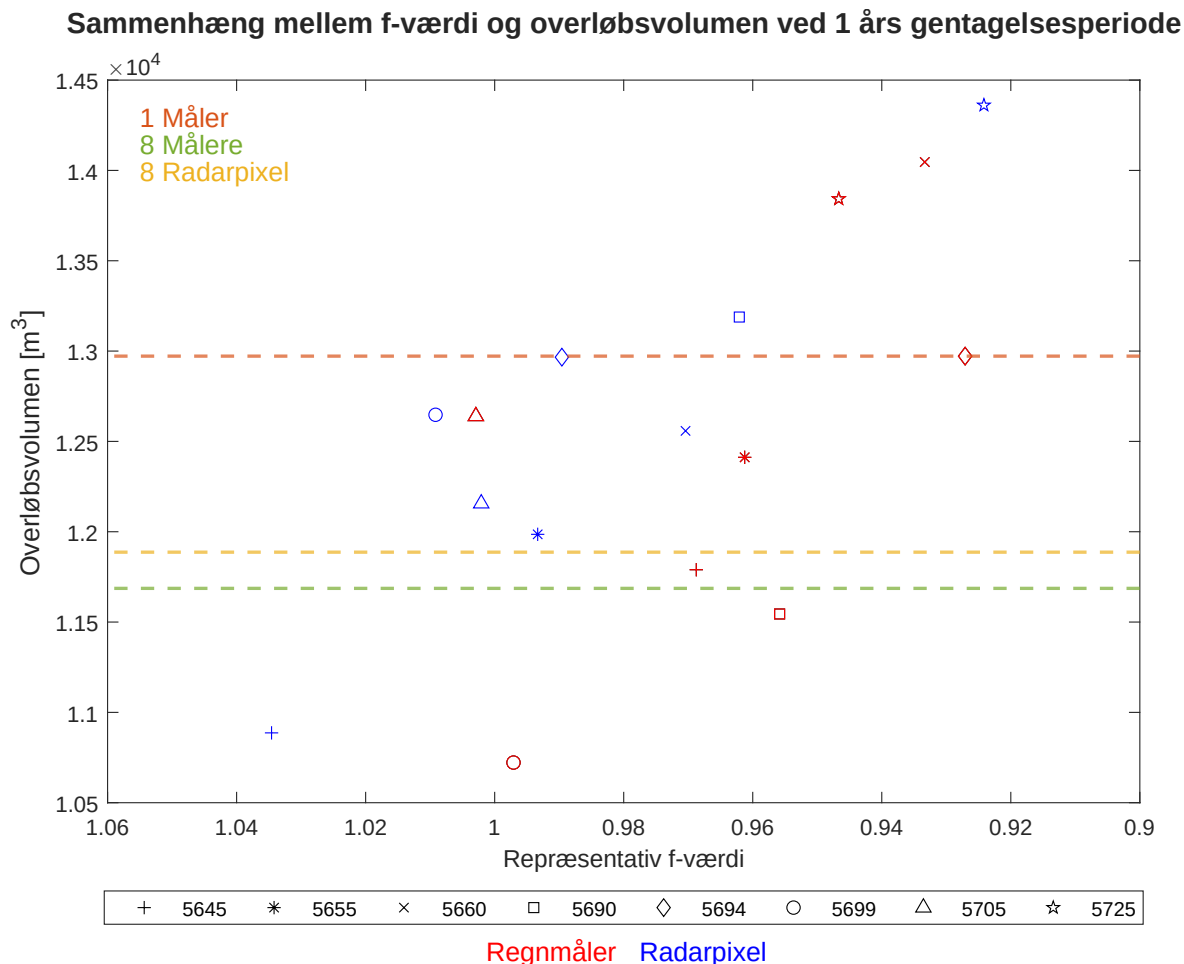
15.1 Metode til sensitivitetsanalyse

For at undersøge sammenhængen mellem regnseriers f-værdier og overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode for Utterslev Mose modellen, er der foretaget en sensitivitetsanalyse. Samtidigt vil forholdet mellem punktmålt regnininput ekstrapoleret over oplandet sammenlignes med ekstremstatistikken for overløb fra scenarierne med spatialt regnininput. Dette undersøges med henblik på at vurdere ekstrapolerings usikkerheden. Samtidig undersøges den usikkerhed, der er forbundet med valget af én serie som regnininput. I analysen er der kørt LTS-simuleringer med input af enkelte regnserier, som er ekstrapoleret udover hele oplandet. Der er altså kørt en LTS-simulering individuelt for hver af de otte regnmålere, otte tilsvarende radarpixel og de 95 radarpixels. Der er taget udgangspunkt i serierne korrigeret med den statistisk nudging metode, da det vurderes at dette forbedre serierne væsentligt på de korte hændelser.

Der er evalueret med en beregnet repræsentativ f-værdi, som en gennemsnitsværdi for gentagelsesperioderne 0,5 til 5 år og varighederne 30 til 1440 minutter. Selvom der præsenteres resultater for overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode, vurderes det at f-værdier ved forskellige gentagelseperioder og varigheder påvirker ekstremstatistikken. Der skal her gøres opmærksom på, at f-værdierne i dette kapitel ikke kan sammenlignes med f-værdierne præsenteret i ovenstående kapitler.

15.2 Resultater af sensitivitetsanalyse

På figur 15.1 kan oplandets totale overløbsvolumen ved LTS-simuleringer af hver enkelte regnmåler, radarpixels og deres repræsentative f-værdi observeres. Her er de resulterende overløbsvolumener fra de nudgede scenarier med 8 Målere og 8 Radarpixel fra figur 14.2 pålagt.



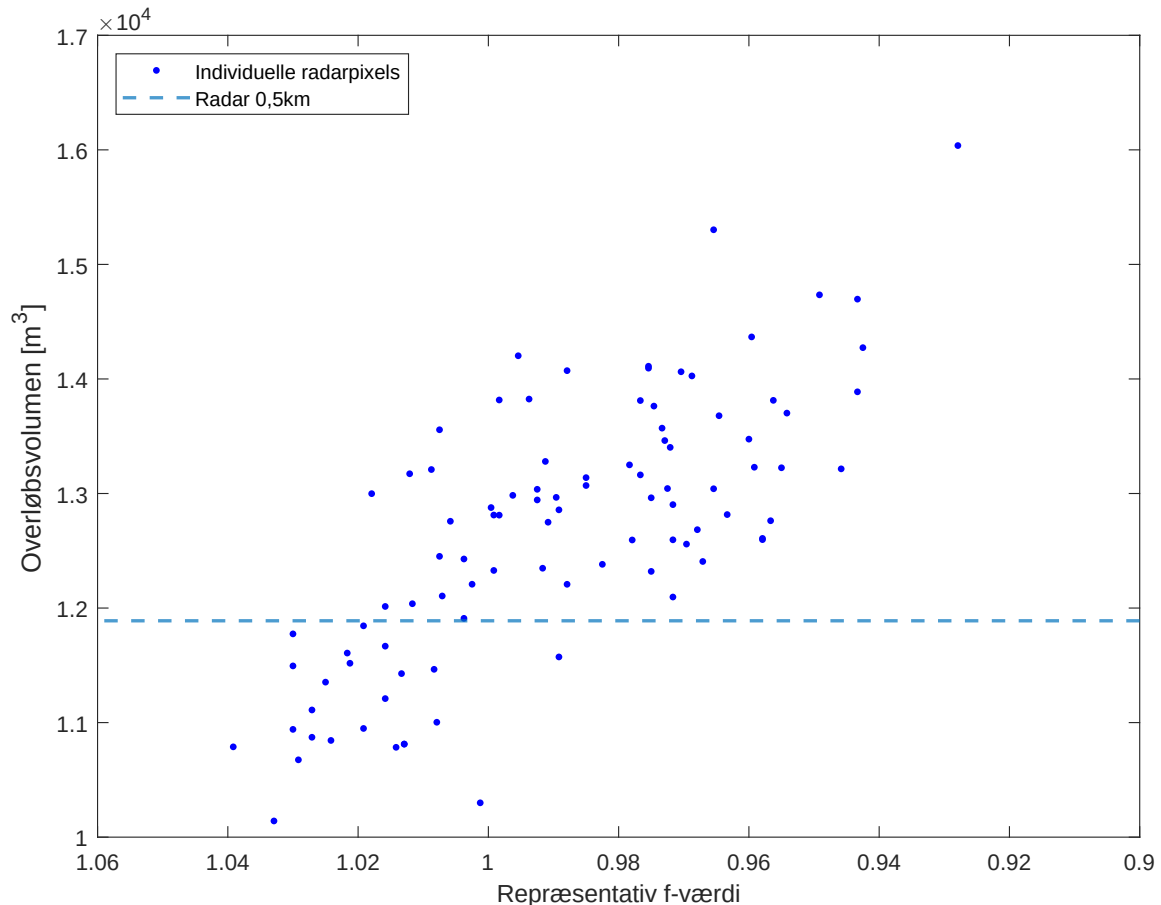
Figur 15.1: Sammenhæng mellem oplandets totale overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode og regnseriens repræsentativ f-værdi. Yderligere er resultaterne for scenariet med 8 Målere og 8 Radarpixels fra figur 14.2 indtegnet. Hvert punkt symbolisere en LTS-simulering, udført med en regnserie ekstrapoleret på hele oplandet.

På trods af at serierne er korrigeret med nudging metoden mod en f-værdi på 1, er der forholdsvis stor spredning på den repræsentative f-værdi. Der kan observeres en spredning mellem overløbsvolumen ved samme repræsentative f-værdi, for eksempel ved en f-værdi på omkring 1, hvor en volumen mellem punkterne på over 2.000 m^3 kan konstateres.

Hvis der fokuseres på resultaterne fra de enkelte regnmålere kan det observeres at seks af målerne resultere i højere volumen end 8 Målere scenariet. Denne tendens er ligeledes afspejlet i de otte tilsvarende radarpixel, hvor syv af serierne resulterer i højere volumen end 8 Radarpixel scenariet.

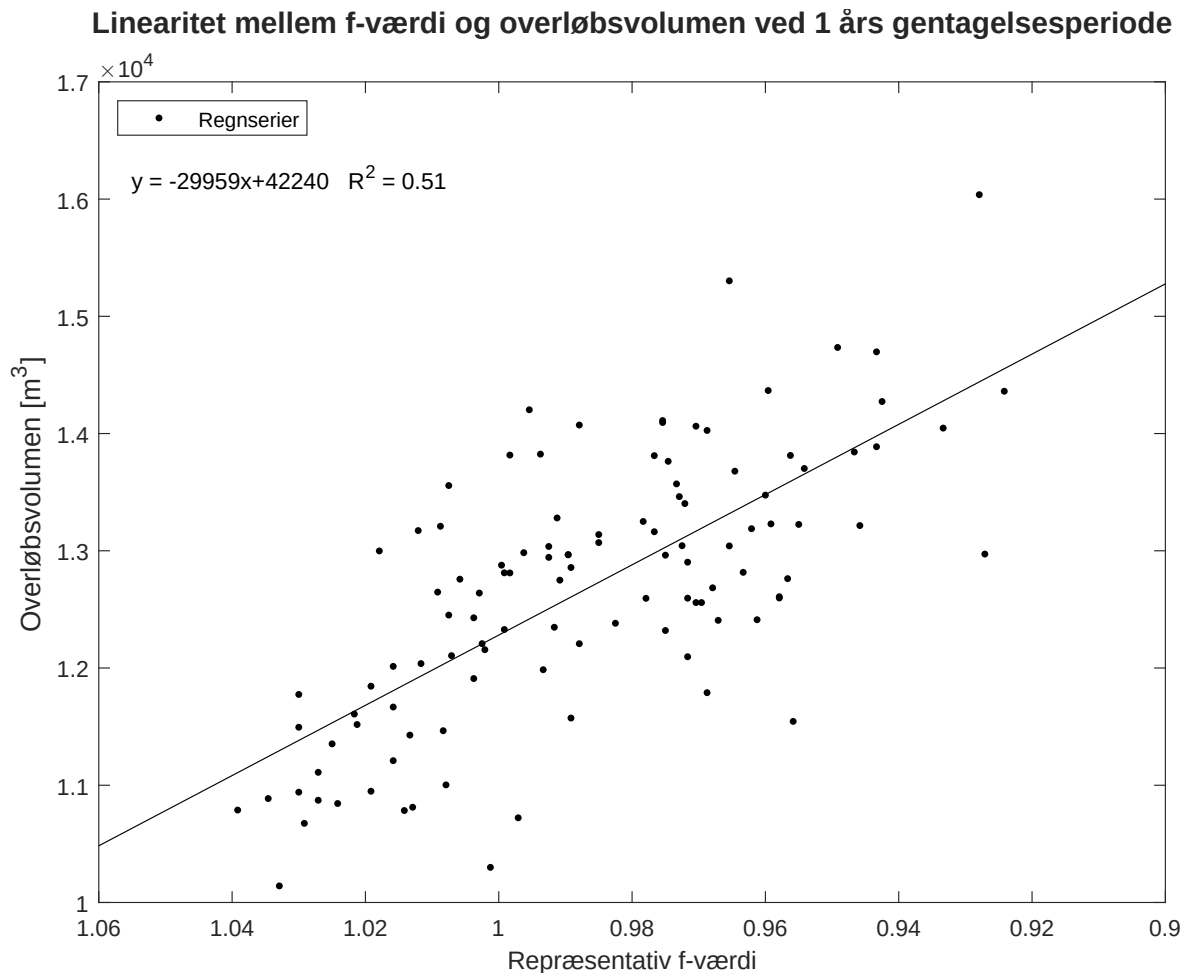
Samme øvelse er ligeledes udført på de 95 radarpixels, hvor sammenligningen mellem scenariet med Radar 0,5 km og de individuelle radarpixels kan ses på figur 15.2. Det kan her observeres en lignende tendens, hvor et overtal af de individuelle radarpixels er placeret over scenariet. Ligeledes kan en spredning på overløbsvolumen for radarserierne observeres ved samme repræsentative f-værdi.

Sammenhæng mellem f-værdi og overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode



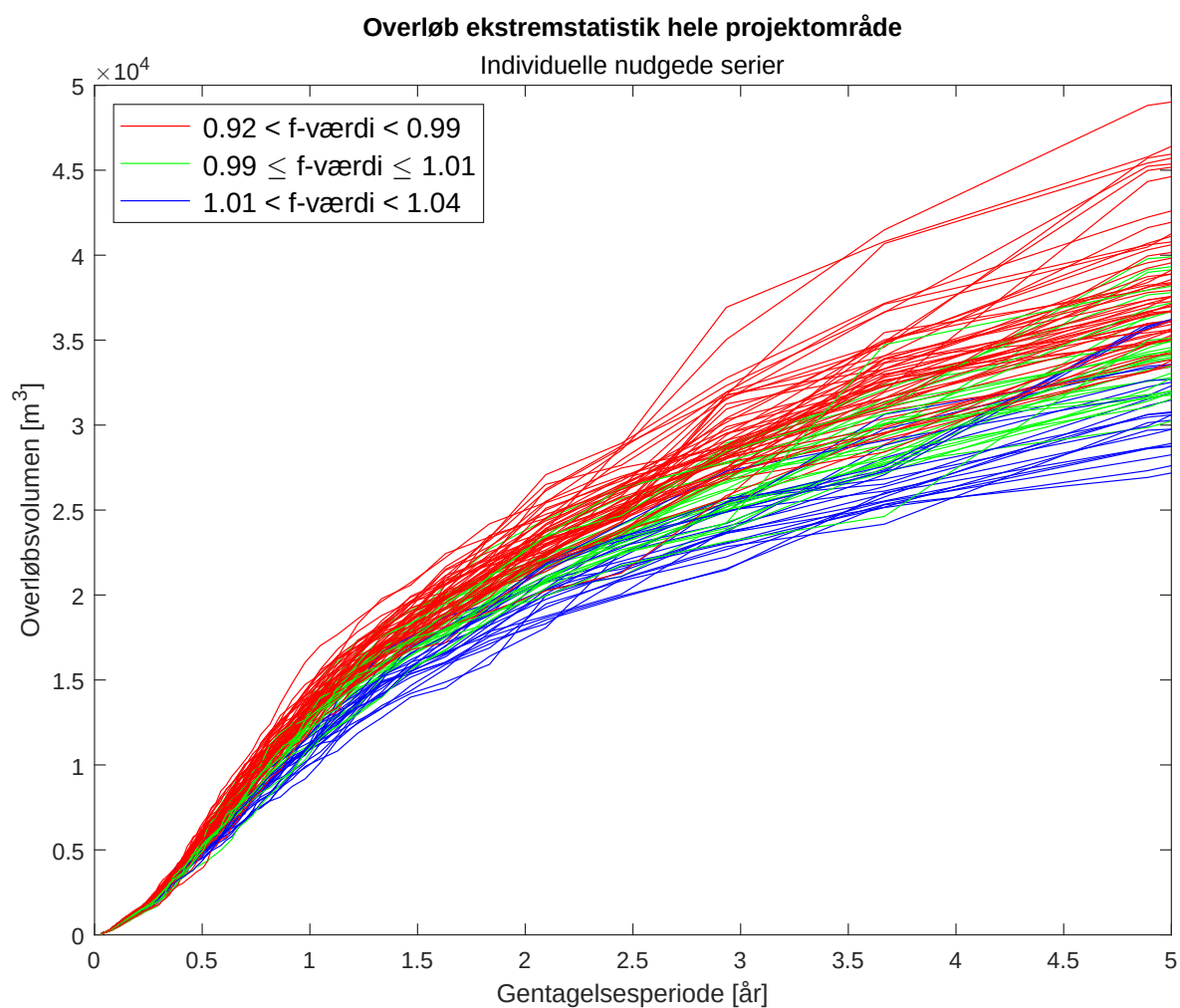
Figur 15.2: Sammenhæng mellem oplandets totale overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode og regnseriens repræsentativ f-værdi. Yderligere er resultatet for scenariet med Radar 0,5 km fra figur 14.2 indtegnet. Hvert punkt symbolisere en LTS-simulering, udført med en regnserie ekstrapoleret på hele oplandet.

På figur 15.3 præsenteres punkterne fra ovenstående figurer samlet, heraf otte regnmåler og 103 radarpixels. Her kan det aflæses at der er forholdsvis god linearitet mellem regnseriernes resulterende overløbsvolumen ved 1 års gentagelseperiode og den repræsentative f-værdi. Overløbsvolumen stiger ifølge regressionen med omkring 300 m^3 per 0,01 fald i f-værdi. Der kan dog observeres en forholdsvis stor spredning omkring regressionslinjen. På trods af at serierne er korregeret til den regionale model, er der op til 50% forskelle på resultaterne fra de forskellige serier.



Figur 15.3: Lineær regression for overløbsvolumen på alle 111 resultater og tilhørende repræsentativ f-værdi.

På baggrund af LTS-simuleringer er der optegnet ekstremstatistik på alle de individuelle serier. Dette kan observeres på figur 15.4, hvor serierne er farvekodet efter, om de ligger tæt på den regionale model, eller om de over- eller underestimerer. Det kan observeres at serierne som overestimerer samler sig i den øvre del af spændet, hvor serierne som underestimerer er placeret i bunden af spændet. Yderligere kan det observeres at serier der overestimerer den regionale model kan overlappe med serier der underestimerer. Ligeledes kan det konstateres at serierne tæt på den regionale model både overlapper serier som over og underestimerer. Spredningen mellem serierne stiger med gentagelsesperioden. Dette antages at være på grund af seriens længde, hvor der er usikkerheder på gentagelseperioder der optræder få gange i observationsperioden.



Figur 15.4: Ekstremstatistik på overløbsvolumen for alle individuelle nudgede serier, sammenlignet med tilhørende repræsentative f-værdi.

En diskussion om den ovenstående analyse og de observerede tendenser kan læses i næste kapitel.

16 | Diskussion - Del IV

I dette kapitel diskuteres resultaterne og den opnået viden fra denne del af rapporten. Hvor radar og regnmåler serierne er blevet sammenlignet og korrigeret til den regionale model.

Som tidligere nævnt er f-værdierne for oplandets regnmålere og radarpixel begge forholdvis langt fra den regionale model. SVK anbefaler som sagt at korrigere sin regnserie så effekterne er tilsvarende den regionale model. Det kan dog diskuteres om der skal korrigeres til den regionale model, da beregningsgrundlaget i så fald bevæger sig længere væk fra virkeligheden. Men hvis man omvendt undlader at korrigere, vil de lokale seriers individuelle fejl og bias overføres til modelberegningerne. Der bør derfor træffes et valg i dimensioneringsprocessen, om det er den regionale model eller det målte data, tiltroen er størst ved. Dele af forskellen mellem de lokale regnserier og den regionale model, som observeres i f-værdierne, kan begrundes i den regionale models fejl. For projektområdet er der en prediktionsusikkerhed på mellem 3-10% på intensiteterne af ekstremregn i den regionale model [Arnbjerg-Nielsen et al. 2023].

16.1 Diskussion af metoder til korrigering

I den beskrevne én faktor korrigering blev der taget udgangspunkt i anbefalingen i SVK-usikkerhedprojekt [Arnbjerg-Nielsen og Illeris 2023]. Her blev det anbefalet at regnserien ved LTS beregning, bør korrigeres med en f-værdi tilsvarende den forventede koncentrationstid og gentagelsesperiode for dimensioneringssituationen. Dette resulterede i at der var store forskelle på overløbsvolumen ved 1 års gentagelsesperiode i forhold til de ukorrigerede serier. Det blev vurderet at dette kunne begrundes i at de lange hændelser blev overvurderet i radarserierne og undervurderet i målereserierne. Det er problematisk at benytte denne korrigerings metode, da modellen ikke er lineær og har meget forskellige koncentrationstider til hvert overløb. Yderligere kan niveauet på alle varigheder være betydende når man kigger på total volumen. Det vurderes at én faktor korrigeringen nok er mest brugbar på simple modeller.

Der er valgt kun at korrigere hændelser over 0,1 års gentagelsesperiode med den brugte statistisk nudging metode. Dette kan medføre usikkerheder på hændelserne imellem ekstremregnene hvis der er generel tendens til over og underestimering i serierne. Samtidigt kan korrigeringen af en varighed påvirke den allerede udførte korrigering på en anden varighed, da der ofte vil være overlap. Der er observeret i radarserierne at den totale nedbørsmængde på en hændelse kan være øget for at ekstremintensiteterne kan passe med den regionale model. Samtidigt kan der være forskel mellem hvilken gentagelseperiode der er tildelt en hændelse mellem de enkelte radarpixels og målere. Det vurderes dog at disse problemer ikke vil have store indflydelser, på ekstremstatistikken for overløbsvolumen, over forløbet af en langtids simulering.

Ved ændring af hændelserne med nudging metoden justeres serien ind til at passe statistisk med den regionale model. Problematikken ved at ændre hændelserne, især når flere regnserier benyttes, er at de ikke nødvendigvis er sammenlignelige med den virkelige hændelse. Der kunne opstå en situation, hvor en hændelse er justeret op til at have en høj gentagelsesperiode i én måler og samtidig med at én anden måler er vurderet til at have en lav gentagelsesperiode.

Dette kan påvirke fordelingen af regnen i tid og sted over oplandet da nogle pixel kan være øget eller mindsket med nudging metoden. Dette kan derfor være længere væk fra de målte forhold i tid og sted over oplandet. Det vil derfor være vanskeligt at vurdere hvor virkeligheden befinder sig. Det kan diskuteres om en metode til at nudge hele radarbilledet samtidigt kunne benyttes, for at beholde dynamikken i tid og sted over oplandet. Dette ville være i modsætning til den nuværende metode med hver serie er nudged enkeltvis.

Yderligere kan det diskuteres om den stedlige variabilitet i regnens ekstremstatistik for radar scenariet bliver fjernet ved brug af statistisk nudging. Da serierne bliver korrigeret indtil at passe intensiteterne svarende til den regionale model. Det kan argumenteres at serierne korrigeres til, at efterligne den stedlig variabilitet der er i den regionale model. Som tidligere undersøgt og diskuteret er den stedlige variation på radarserierne og den regionale model ikke i overensstemmelse. Det kan derfor være problematisk at sige, om korrigeringen til den regionale model skaber et mere virkelighedsnært aftryk. Der bør derfor vurderes om tiltroen er på den regionale model eller det målte data.

Ved statistik nudging af regnserier, kan det diskuteres om regnserien blot bliver omskrevet til en syntetisk regnserie. Arbejdet i Danmark med syntetiske regnserier er beskrevet i blandt andet [Thorndahl et al. 2020] og [Sørup et al. 2016]. Brugen af syntetisk historiske regnserier går lidt imod den traditionelle fremgangsmåde for afløbsdimensionering i Danmark. De nudgede regnserier beholder stadig den tidsmæssige timing, som værende det virkelighedsnære, men størrelsen af hændelsen ændres. Men det samme princip gælder også ved tildeling af en f-værdi til en regnserie. Her vil nudging metoden dog ændre på et varierende niveau igennem regnserien.

Det kan ses at på trods af at der i projektet er benyttet en meget kompleks korrigerings metode, stadig er en væsentlige variation i f-værdier. Det kan derfor være vanskeligt at finde målereserier der er repræsentative for den regionale model i alle varigheder og gentagelseperioder.

Det kan observeres på de nudgede LTS resultater for de fire scenarier, at tre ud af de fire scenarier ligger meget stationært i overløbsvolumen. Her særligt at scenariet med 8 Radarpixel og 8 Målere, ligger meget tæt, hvilket kunne tyde på at usikkerheden mellem produkterne er blevet mindsket. Dette skyldes den statistiske korrigerende til den regionale model. Yderligere kan der observeres minimal forskel ved at forbedre den spatiale opløsning fra 8 Radarpixel til Radar 0,5 km. Det kan diskuteres om det blot er et tilfælde eller om oplandet er for lille til at bedre opløsning har betydning. For 1 Måler scenariet for den nudgede regnserie observeres en højere overløbsvolumen, end de resterende scenarier. Dette kunne i sensitivitetsanalysen vurderes at skyldes den høje repræsentative f-værdi, hvor måler 5694 er vurderet høj i forhold til de resterende målere. Se figur 15.1. Dog kan to andre måler (5660 og 5725) observeres til at afgive højere volumen.

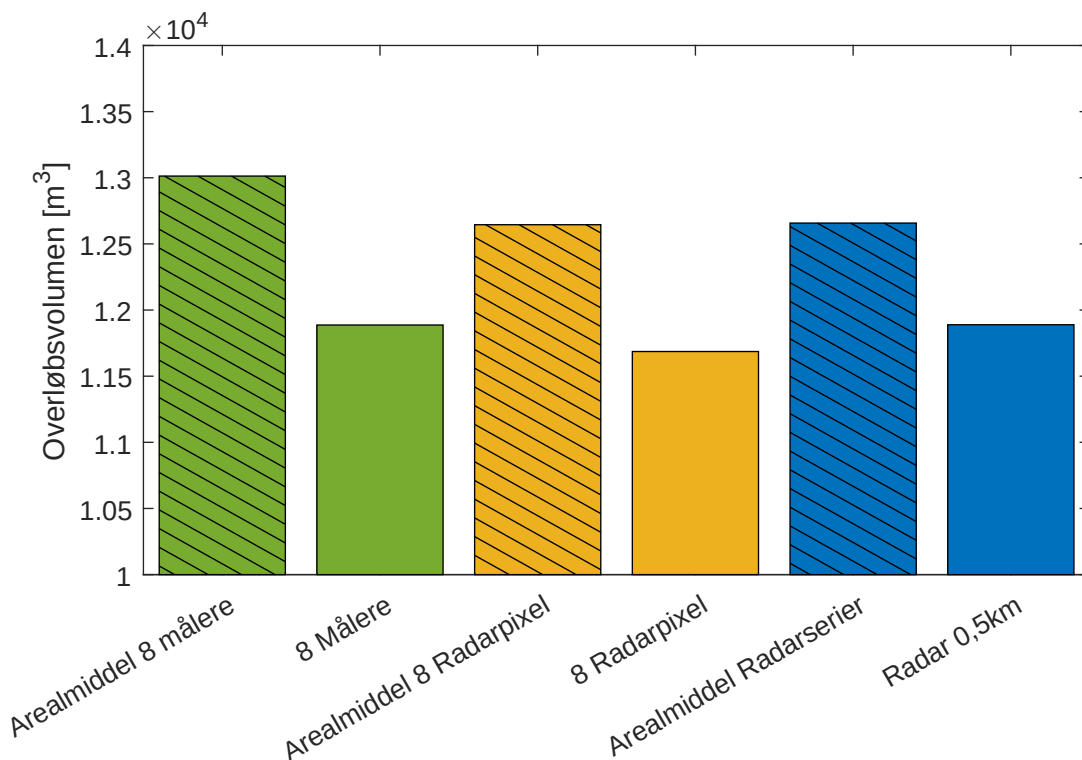
16.2 Diskussion af sensitivitetsanalysen på f-værdi

Ud fra resultaterne i sensitivitetsanalysen kan det observeres at 1 Måler scenariet kan variere meget, hvis en anden regnmåler end den centrale i området er brugt. Derfor kan det være problematisk at udvælge den "rigtige" måler, som afspejler virkeligheden bedst. Hvis man antager at alle målere i området er lige sandsynlige får man et stort løsningsinterval for 1 Måler scenariet. Derfor er der stor usikkerhed på den fundne overløbsvolumen. Denne usikkerhed samt den spatiale usikkerhed kan ifølge Maier et al. [2020] og Zeng et al. [2018] reduceres

ved brug af flere målere. Det kan diskuteres om det er grunden til at 8 Målere scenariet er betydeligt lavere end 1 Måler scenariet.

I sensitivitetsanalysen havde seks ud af otte målerier højere overløbsvolumen end 8 Målere scenariet. Det kan observeres at punkterne under linjen er 5699 og 5690, som har en meget lille arealudbredelse i 8 Målere scenariet. Se tabel 9.1 på side 43. Derfor bør disse serier ikke have stor påvirkning på resultatet af 8 Målere scenariet. Samme tendens blev observeret i blandt de otte tilsvarende radarpixels, hvor syv havde højere overløbsvolumen end 8 Radarpixel scenariet. Ligeledes kan samme tendens observeres på de 95 radarpixels, hvor et overtal er placeret over Radar 0,5 km scenariet. På figur 16.1 kan der ses en sammenligning mellem en arealmidlet værdi for de individuelle serier og de spatiale scenarier. Her ved arealmidlingen er de individuelle resultater fra radarpixel og regnmåler vægtet på baggrund størrelsen af tilknyttet areal. En arealmidlet værdi er dog et forsimplet sammenligningsgrundlag, da det ikke tager højde for modeldynamikken. Men det vurderes som bedre sammenlignings grundlag end blot at tage et gennemsnit af simuleringresultaterne.

Arealmidlet af ekstrapolerede regnserier mod scenarier med stedlig opløsning



Figur 16.1: Overløbsvolumen for de nudgede scenarier; 8 Målere, 8 Radarpixel og Radar 0,5 km, scenarierne er sammenlignet med den arealmidlet volumen for de individuelle punkter.

Det vurderes at en af årsagerne til forskellen mellem søjlerne kan begrundes i den mindskede usikkerhed ved brugen af spatialt udbredt regn. Fordi der i højere grad kan tages højde for dynamikken i tid og sted over oplandet og usikkerheden derfor er mindsket. I modsætning til den ekstrapolerings usikkerhed der er ved brugen af en punktmålt serie, som i de individuelle punkter i sensitivitetsanalysen. Der er mellem 6,5 til 9,5 % større overløbsvolumen ved de arealmidlede resultater end de stedlige udbrede scenarier.

Som resultat af sensitivitetsanalysen kan der observeres en variation i overløbsvolumen ved

samme repræsentative f -værdi. Denne spredning kan skyldes timingen i hændelsesdynamikken, for eksempel tiden mellem koblede hændelser. En anden forklaring kan ligge i variationen i f -værdi ved forskellige varigheder og gentagelsesperioder, som tidligere er blevet mindsket ved statistisk nudging. En variation kan dog stadig observeres, og formodes at have en effekt på overløbsvolumen. Hvorledes timingen er skyld i spredningen er problematisk at afgøre, når en variation i f -værdi på varighed og gentagelsesperiode er tilstede. Hvis samme øvelse med sensitivitetsanalyse gentages på de ikke korrigerede serier, forventes en større spredning i overløbsvolumen. Dette vil være et resultat af en større variation af f -værdier på de ukorrigerede serier.

Yderligere kan det forventes at forskellige kombinationer af f -værdier kan resultere i den samme repræsentative f -værdi. Eftersom den repræsentative f -værdi er beregnet, som et gennemsnit af udvalgte varigheder og gentagelsesperioder. Dette giver anledning til diskussion om hvorvidt der bør indføres en vægtning, ved beregning af den repræsentative f -værdi, efter bestemte gentagelsesperioder og varigheder. Her bør længden og formålet med dataserien inkluderes, for at tilpasse vægtningen til den pågældende dimensioneringssituation.

På 15.3 blev en lineær regression mellem overløbsvolumen og repræsentative f -værdi præsenteret. Det kan diskuteres om en mere lineær tendens ville være fundet hvis analysen var udført på en mere simpel model. Her ville der være større sammenhæng mellem belastningen og resulterende effekter. En analyse af hvilken formulering af en repræsentative f -værdi der vil give bedst linearitet kunne udføres. Dette kunne give et præg om hvilke varigheder der er mest betydende for de resulterede effekter i denne model.

Som beskrevet i Skrift 32 [Arnbjerg-Nielsen et al. 2023], har der været et ønske om, at udarbejde en generel vejledning til hvordan repræsentative regnserier kunne udvælges og korrigeres med en f -værdi. Det var imidlertid ikke lykkedes at komme med en generel anbefaling, da regnserier ofte anvendes til forskellige formål.

Disse erfaringer er meget i overensstemmelse med det fundne i dette projekt. I nærværende projekt har resultaterne af både én faktor korrigeringen og den statistiske nudging metode vist at det er vanskeligt at korrigere til den regionale model og selv små afvigelser mellem de korrigerede regnserier kan have stor effekt på den resulterende ekstremstatistik. Dette indikere en stor usikkerhed vedhæftet, hvordan der skal foretages korrigerende af regnserier til den regionale model.

17 | Opsamling af Del IV

I Del IV blev der beregnet f -værdier på lokale serier for både regnmålere og radar, i sammenligning med den danske regionale model fra skrift 32 [ibid.]. Der er for f -værdierne præsenteret en geografiske fordeling over oplandet for forskellige varigheder. Der er observeret en generel variation på f -værdier over området både i radar og målere.

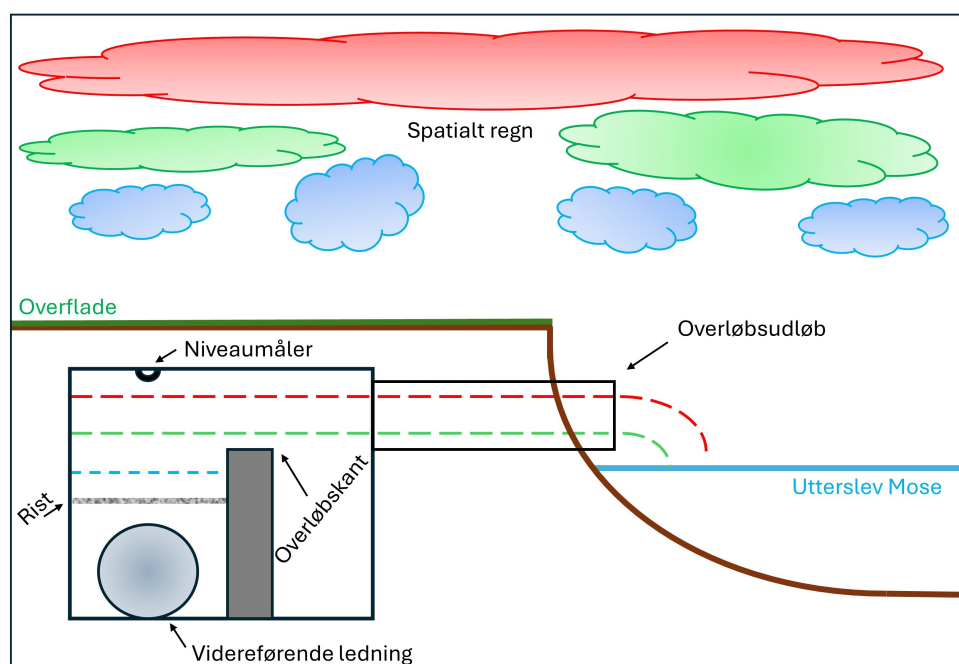
Der er præsenteret to metoder til korrigerende af lokale serier til den regionale model. Her er der anvendt en metode med én faktor korrigerende og en statistisk nudging metode. I én faktor korrigerende, hvor der er ganget en værdi på tidsserien, blev der fundet problemer med over- og underestimering af de lange hændelser. Dette påvirkende overløbsvolumen ved 1 års gentagelseperiode væsentligt. Resultatet af den statistisk nudging metode afspejlede i langt højere grad den regionale model ved forskellige varigheder og gentagelseperioder. Regnkurverne for de forskellige serier er betydeligt mere samlet end for de ukorrigerede. Metoden har medført at forskellen i ekstremstatistikken på overløb mellem radar og målereserier mindskes meget.

Yderligere blev der udført en sensitivitetsanalyse på de nudgede serier, hvor forholdet mellem overløbsvolumen og repræsentativ f -værdi er undersøgt. Her blev serierne undersøgt, som punktmålinger ekstrapoleret over oplandet. Der blev fundet en lineær sammenhæng, dog med en spredning på punkterne. Der blev observeret en tendens til at scenarierne med spatial udbredelse resulterede i mindre overløbsvolumen end de individuelle punkter. Dette vurderes blandt andet at være på grund af at usikkerheden på regninputtet er blevet mindsket.

Del V

Stokastisk kalibreringsanalyse på hydrologisk reduktionsfaktor

I denne del udføres der en stokastisk kalibreringsanalyse på hydrologisk reduktionsfaktor. I modsætning til overstående analyser arbejdes der her med mange simuleringer af udvalgte enkelthændelser. Her er det primære problemformulerings spørgsmål: "Hvordan ændrer den hydrologisk reduktionsfaktor sig med regninput af forskellige grader af stedlig opløsning?". Som nævnt i kapitel 1 bør der ved ændring af regninput ske en ny modelkalibrering. Her hypoteseres det at når ekstrapolerings usikkerheden på regninputtet falder vil der opnås en højere reduktionsfaktor ved kalibrering.



18 | Metode til kalibreringsanalyse

Der udføres en stokastisk kalibreringsanalyse med formålet at undersøge ændringen i kalibreringsparameter ved forskellige spatiale regninput. Der undersøges derfor om der kan opnås en højere sammenhæng med målte data ved brug af forskellige hydrologiske reduktionsfaktorer på overløbsoplandene. Se figur 18.1.

Der er udvalgt en stokastisk tilgang med variation på én parameter på grund af områdets dynamiske sammenspil mellem overløbsbygværkerne. Derudover undersøges om overløbsoplandene skal have forskellige kombinationer af reduktionsfaktorer, for at opnå bedre model performance end blot én kalibreret værdi. Analysen udføres i henhold til formålet defineret i problemformuleringen, hvor ekstrapolerings usikkerheden kan mindskes ved brug af spatialt regninput.

Til denne analyse, benyttes modelopsætning af Utterslev Mose tidligere beskrevet i kapitel 2. Til udførelsen af analysen er der gjort brug af modelkørsler i iterations loop med parallel computing. Til denne del af rapporten arbejdes videre med følgende scenarier, hvor de ukorrigerede serier benyttes:

- Scenarie "1 Måler": Oplandets centrale regnmåler; Søborg Vandværk (5694).
- Scenarie "8 Målere": Alle 8 nærtliggende regnmålere for projektområdet.
- Scenarie "8 Radarpixel": De 8 regnmåleres tilsvarende radarpixel.
- Scenarie "Radar 0,5 km": Radardata i 0,5x0,5 km med 1 min opløsning.

I denne analyse benyttes metoden "Generalized likelihood uncertainty estimation" (GLUE), udarbejdet af Beven og Binley [1992], til analyse af hydrologisk reduktionsfaktorens ændring ved forskellige regninput scenarier. Metoden fungerer ved at et større antal modeller simuleres for udvalgte parameter med tilfældige størrelser. Alle modelresultaterne bliver så vurderet ud fra hvilke parameter sammensætninger, der performer bedst i forhold til en observation.

Metoden åbner derfor op til at flere parameter sammensætninger kan være lige sandsynlig for en god model performance. Resultatet af denne del bliver præsenteret, som et interval af optimale hydrologisk reduktionsfaktorer. I denne analyse er der valgt at fokusere på projektområdets detaljerede oplande i syd, som er indenfor HOFORs forsyningsområde, se figur 18.1.

I den præsenterede fremgangsmåde for GLUE er der i Beven og Binley [ibid.] opstillet tre procedure punkter der skal følges:

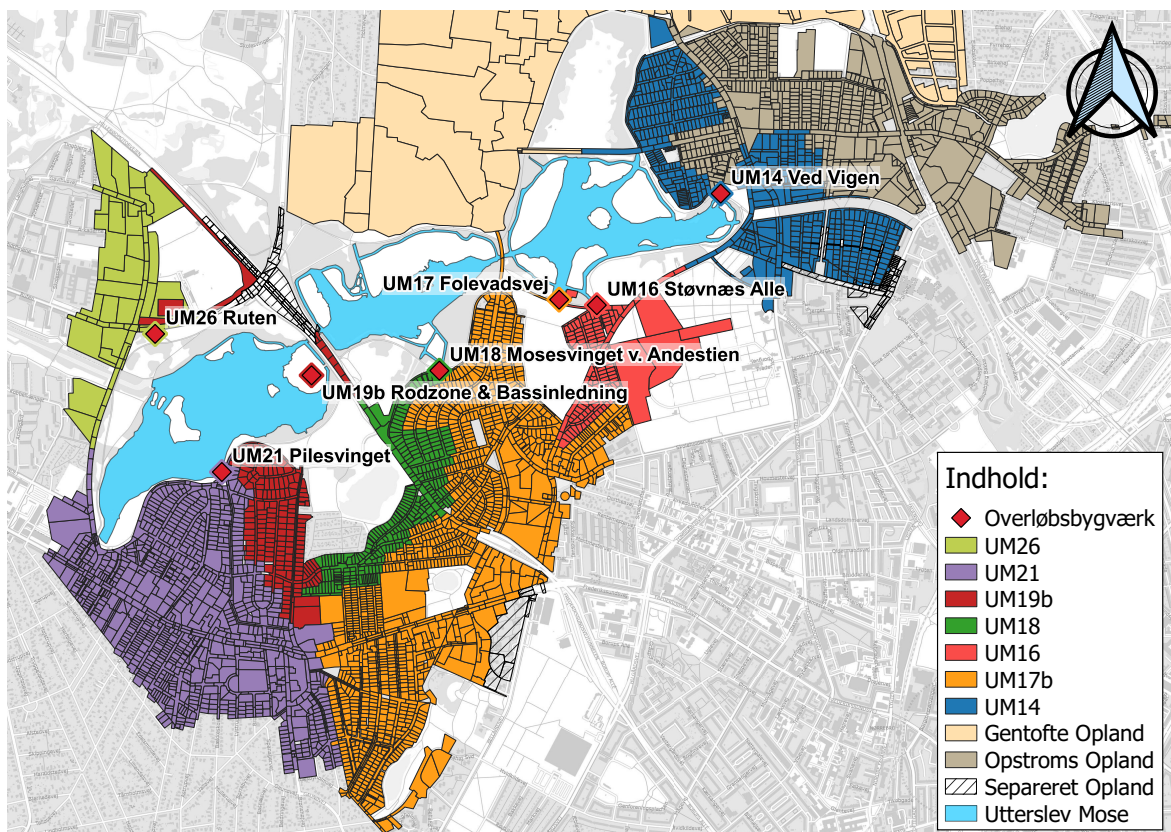
1. Definition af likelihood mål.
2. Definition af interval og fordeling af parameter variable.
3. Procedure til at bruge likelihood mål til usikkerheds estimation.

1. I dette projekts GLUE analyse benyttes Nash Sutcliffe Efficiency "NSE" som likelihood mål, formel for denne kan ses i Bilag B. Et likelihood mål skal vurdere hvor godt model simuleringerne passer over ens med observationen, dette kunne være performance parameter eller funktioner. Her er NSE valgt da denne performance parameter er velkendt til brug i

hydrauliske analyser [Beven 2008]. Det vurderes at dette likelihood mål er velegnet til formålet med at sammenligne modellerede og observeret serier.

2. For analysen er den varierende parameter variabel udvalgt til at være den hydrologisk reduktionsfaktor, som tilfældigt genereres i intervallet 0,6 - 1 ud fra en uniform fordeling. Denne tilfældige uniform generering foretages på hvert overløbsopland, som kan ses fordelt på figur 18.1. Hvor intervallet (0,6 - 1) er udvalgt på baggrund af anbefalingerne angivet i skrift 27 [Harremoës et al. 2005], derudover har HOFOR vurderet at modellen er kalibreret ved en reduktionsfaktor på 0,8. Da 0,8 optræder som gennemsnittet af fordelingen for de generede parameter variable betragtes dette som et godt udgangspunkt. Det vurderes at mindre forbedringer på model performance kan opnås ved ændring af flere parametre. Men der vurderes at den hydrologisk reduktionsfaktor er mest styrende i modeller af denne størrelse.

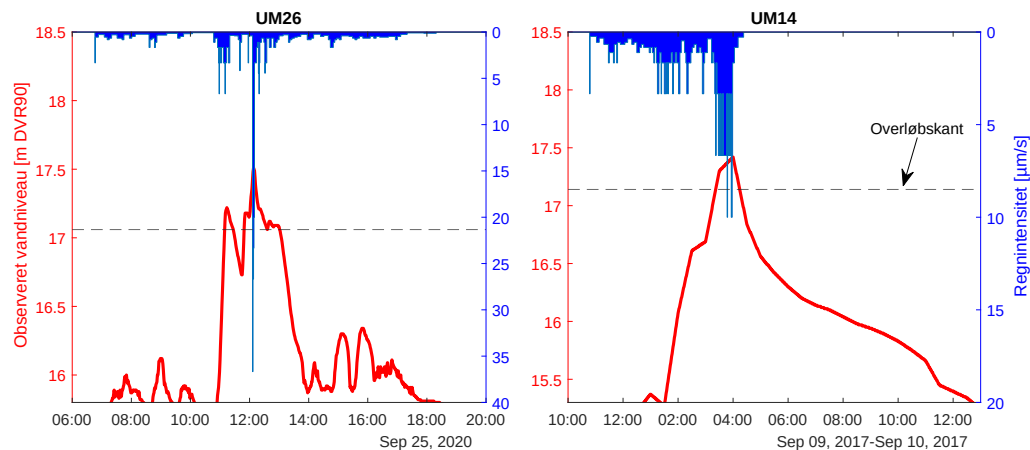
3. For at bruge likelihood mål til usikkerheds estimation er der valgt at acceptere 10 % fraktilen af højest performende likelihood mål for hvert overløb. Her er formålet at opstille empiriske fordelinger af de accepterede iterationers hydrologisk reduktionsfaktor, samt beregne statistiske parametre. Herved antages det at 10 % fraktilen er repræsentabel for optimale hydrologisk reduktionsfaktor, dette valg diskuteres senere. Disse sammenlignes mellem de fire regninput scenarier.



Figur 18.1: Fordeling af overløbsoplande for den sydlige del af projektområdet.

Indenfor HOFORs forsyningsområde i projektområdet er der syv overløbsbygværker, som udleder til Utterslev Mose, som kan ses markeret på figur 18.1. Der er til analysen udleveret niveaumålinger fra HOFORs SRO system for seks overløbsbygværker. Da der er nedbrud på måleren i UM16 er denne ikke medtaget i analysen. Yderligere er der udleveret niveaumålinger

fra to steder omkring et rodzone bassin: en bassinledning (UM19b) og niveauet i rodzonen (UM19r). Niveaumålingerne er foretaget med non-kontakt lasermålere, som er monteret højt og før overløbskanten i hvert overløbsbygværk. Da det kan være svært at beskrive vandbalancen med niveaumålinger, danner disse data ikke det bedst grundlag for kalibreringsanalysen. Men da der ikke er bedre alternativer til niveaumålingerne er disse brugt i kalibreringsanalysen. Et eksempel på niveaumålingerne fra to overløbsbygværker kan ses på figur 18.2. Der kan samtidigt observeres væsentlige forskelle på koncentrationstiden til overløbsbygværkerne op- og nedstrøms i modellen.



Figur 18.2: Eksempel på niveaumålinger i overløbsbygværk og nedbøren målt i regnmåler 5694.

Der er foretaget en korrigerende af det observerede data for at grundlaget for sammenligning med modellen er bedre. De fleste af niveaumålerne i overløbene skyder på en overløbsrist. Derfor er det kun dataet over niveauet for overløbsristen, der kan evalueres mod modellen. Samtidig er det valgt, at huller i serierne fra nedbrud ikke skal medtages i det beregnede likelihood mål.

Til analysen er der udvalgt fire regnhændelser, som kan ses i tabel 18.1. De udvalgte regnhændelser har i LTS-analysen været tilsvarende en overløbsvolumen med gentagelsesperioder i intervallet 0,2 - 2,5 år. Det vurderes at hændelserne kan bruges til denne analyse da de er distribuerede over året og har gentagelsesperioder der er relevante for projektet.

Start [UTC]	Varighed [min]	Regndybde [mm]	Gentag. UM18 [år]
28-04-2017 23:58	528	22,8	0,40
23-06-2017 12:02	395	33,4	0,51
09-09-2017 10:47	336	32,0	1,47
25-09-2020 06:46	693	32,0	0,98

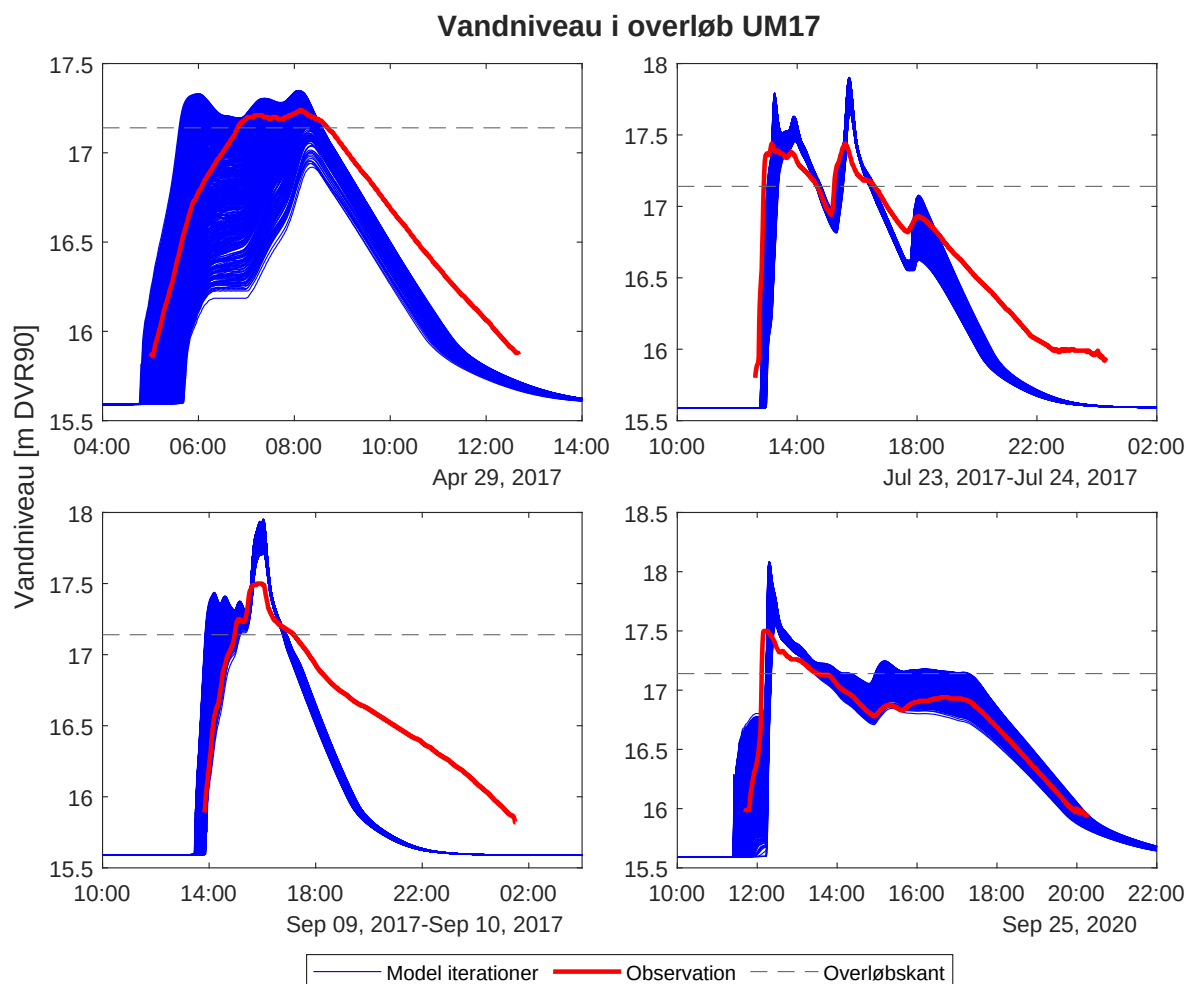
Tabel 18.1: Nedbørshændelser udvalgt til analysen. Data baseret på regnmåler 5694, men vil variere mellem scenarierne. Yderligere er den modellerede gentagelsesperiode for overløbsvolumen tilføjet, den vil dog variere mellem overløbsbygværkerne.

Analysen udføres ved at der foretages 1000 modelsimuleringer med tilfældige genererede reduktionsfaktorer, for de fire udvalgte dage. Dette gentages for alle fire regnininput scenarier. Herefter alle model iterationer evalueres efter likelihood målet og de bedst performende accepteres. Fordelingen af de accepterede iterationer sammenlignes mellem de fire regnininput scenarier.

19 | Resultater til kalibreringsanalyse

I dette kapitel er resultaterne fra den stokastisk kalibreringsanalyse præsenteret. På grund af omfanget af denne analyse er det ikke muligt at inkludere en detaljeret gennemgang af samtlige resultater for hver af de fire regninput scenarier. Da der er evalueret på tidsserier for 1000 iterationer, i hver af de syv overløb, under hver af de fire udvalgte regnhændelser. Derfor præsenteres der blot udvalgte eksempler på resultaterne fra de indledende beregninger.

Et eksempel på vandniveau i overløb UM17 er præsenteret under de fire udvalgte regnhændelser på figur 19.1. Det kan observeres at nogle af model iterationerne afspejler god sammenhæng med det måltedata, hvor andre er længere fra.

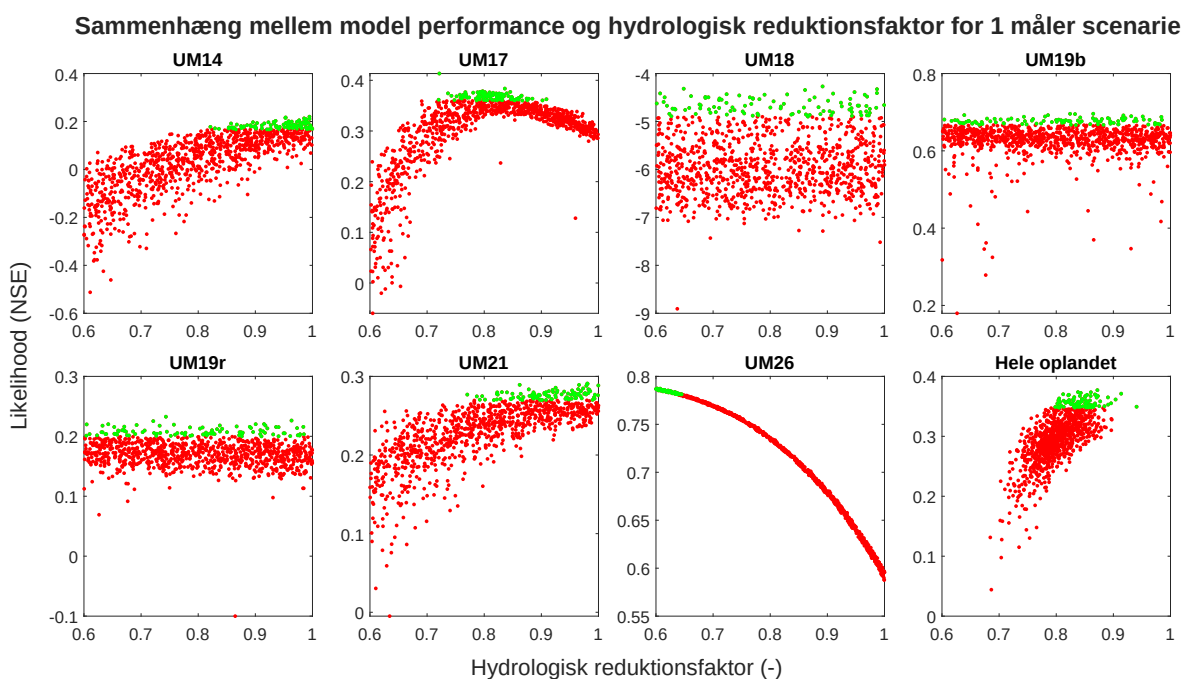


Figur 19.1: Eksempel på alle model iterationer og observeret vandniveau i overløbsbygværk UM17 ved 1 Måler scenariet.

Der er generelt dårligere sammenhæng når dataserien er nedadgående tilsidste i afstrømningen, dette kan skyldes overestimering af den videreførende lednings kapacitet i modellen. Samtidig kan usikkerheder fra uvedkommende vand fra blandt andet infiltration og ikke oplyste dræn

forringe model performancen [Miljøstyrelsen 2018]. Modellen har tendens til at overestimerer peak vandniveauet i forhold til det observerede. Dette kan skyldes at der er en generel usikkerhed som følge af overløbskanten, der er forsimplet i modellen. Samtidig er der usikkerhed omkring placeringen og kantkoten angivet i henholdsvis modellen og dokumentationen. Denne usikkerhed skyldes at navne og kantkote er angivet forskelligt i de udleverede dokumentationer.

Et eksempel på hvorledes iterationerne er evalueret med likelihood målet i forhold til det observerede data kan ses på figur 19.2. Dette eksempel er for regninput scenariet med 1 Måler. På x-aksen er overløbsoplandets hydrologiske reduktionsfaktor, med undtagelses af figuren "Hele oplandet" som er baseret på den gennemsnitlige reduktionsfaktor for hele oplandet. En samlet NSE for de fire regnhændelser er beregnet ved at kombiner de fire serier til en samlet serie. Dette udarbejdes for både modelleret og observeret hvorefter de evalueres. I Bilag J kan tilsvarende figurer for de andre regninput scenarier ses.

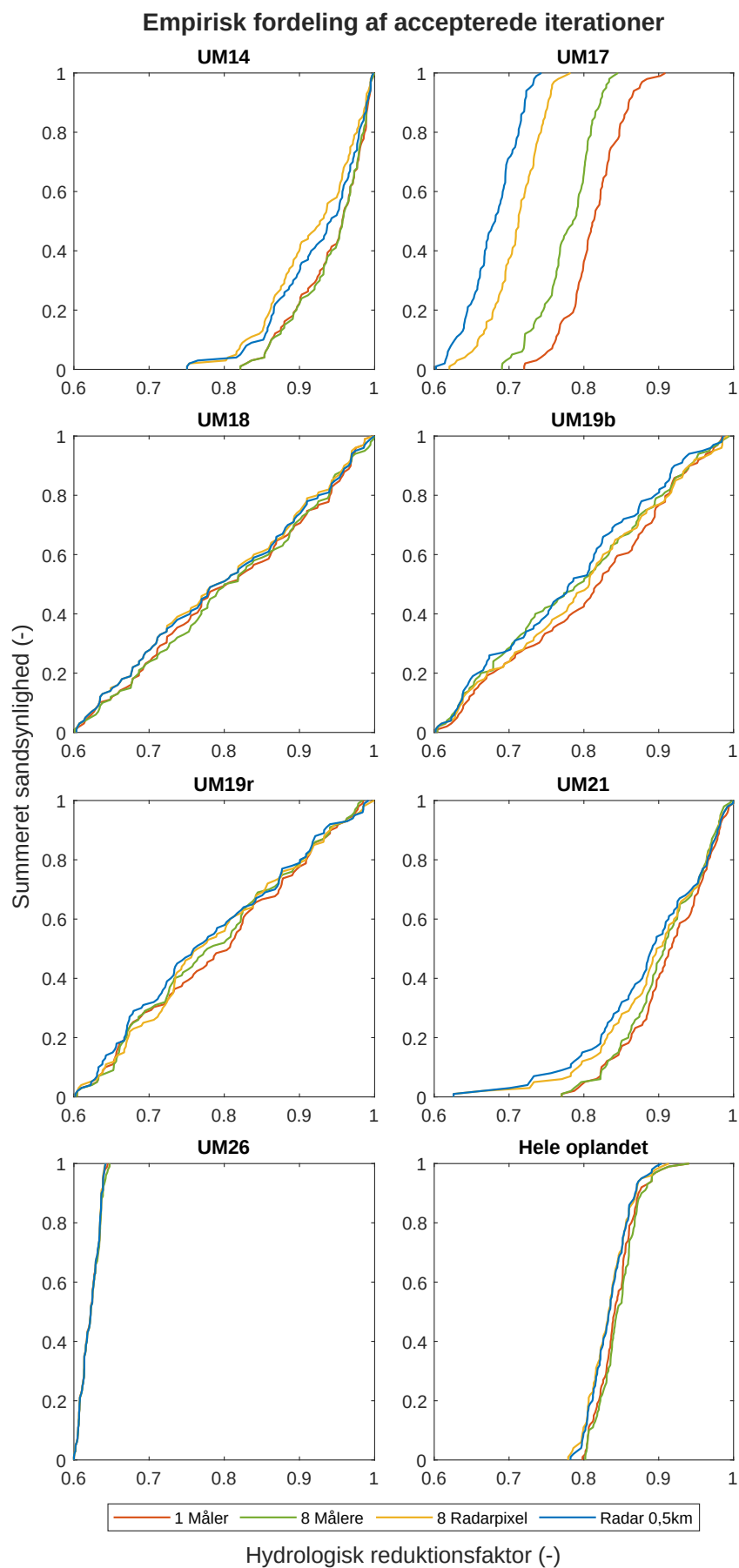


Figur 19.2: Eksempel på model iterationer evalueret med likelihood målet for regninput scenariet med 1 Måler. Bemærk at y-akserne ændres for hver figur. Grøn: Accepterede iterationer Rød: Forkastet iterationer.

Det kan observeres på figuren at der i nogle overløb er tendens til at der er en konvergerende peak med højest likelihood mål og et lille interval af reduktionsfaktor. For eksempel UM14, UM17 og UM26. Hvorimod der ved andre overløb ikke er stor sammenhæng mellem oplandets reduktionsfaktor og model performance. For eksempel UM18, UM19b og UM19r som er flade. Dette kan begrundes i at oplandene til disse overløb er små og derfor har resten af modellens parametre større indflydelse.

Fokuseres der på spredning af punkterne kan der ses en tendens til at overløbene mest nedstrøms i modellen har størst spredning. Dette er på grund af den sammenhængende dynamik med overløbene opstrøms. Kigges der i stedet for på UM26 og UM21, som er de mest opstrøms overløb, er spredningen mindre. Dette er fordi der er mindre dynamik med oplandene nedstrøms.

Det kan ses på figur 19.2, at der er relativ stor forskel på hvor høj NSE der er beregnet ved de forskellige overløbsbygværker. Det anslåges at for eksempel UM18, som opnår negativ NSE, er grundet betydelige forsimplinger omkring overløbet mellem virkeligheden og modellen. Tilgængæld opnår iterationerne for UM26 en høj NSE værdi, som vurderes at skyldes oplandets meget lineær opbygning, samtidig med den mindre dynamik med resten af projektområdet. For de resterende overløbsbygværker opnås blot en NSE-værdi i intervallet 0 til 0,5, som formodes at være begrundet i modellens problem med at afspejle afstrømnings dynamikken i overløbsbygværket. For hele oplandet er reduktionsfaktoren for de accepterede iterationer i intervallet 0,8 til 0,9. Spredningen på punkterne i y-retningen indikere dog at det ikke er alle kombinationer af gennemsnitlig reduktionsfaktor der performer godt.



Figur 19.3: Empirisk fordelinger af hydrologisk reduktionsfaktor for de accepterede iterationer sammenlignet for de fire regninput scenarier.

På figur 19.3 kan de empiriske fordelinger af de accepterede iterationer for hver af de fire regninput scenarier ses. Der er en generel tendens til at de radarbaserede scenarier opnår mindre reduktionsfaktorer end de målerbaserede.

Her kan det observeres at en del er meget uniformt fordelt, for eksempel UM18, UM19b og UM19r. Dette var de samme overløb hvor der ikke blev fundet sammenhæng mellem oplandets reduktionsfaktor og model performance på forrige figur. Her er samtidig meget lidt forskel på fordelingerne mellem regninput scenarierne.

For overløb UM14, UM17, UM21 kan der observeres at der er større forskel mellem fordelingerne ved forskellige regninput scenarierne. Her skiller UM17 sig betydeligt ud med store forskelle. Overløb UM26 er derimod næsten ens for alle scenarier. På tabel 19.1 kan de statistiske parametre på hydrologisk reduktionsfaktor, standardafvigelse og middelværdi for fordelingerne aflæses. Kigges der på fordelingerne for hele oplandet i forhold til den gennemsnitlige reduktionsfaktorer er der ikke meget forskel. Her ligger gennemsnittet omkring 0,84, som er lidt højere end HOFORs originale kalibrering på 0,80.

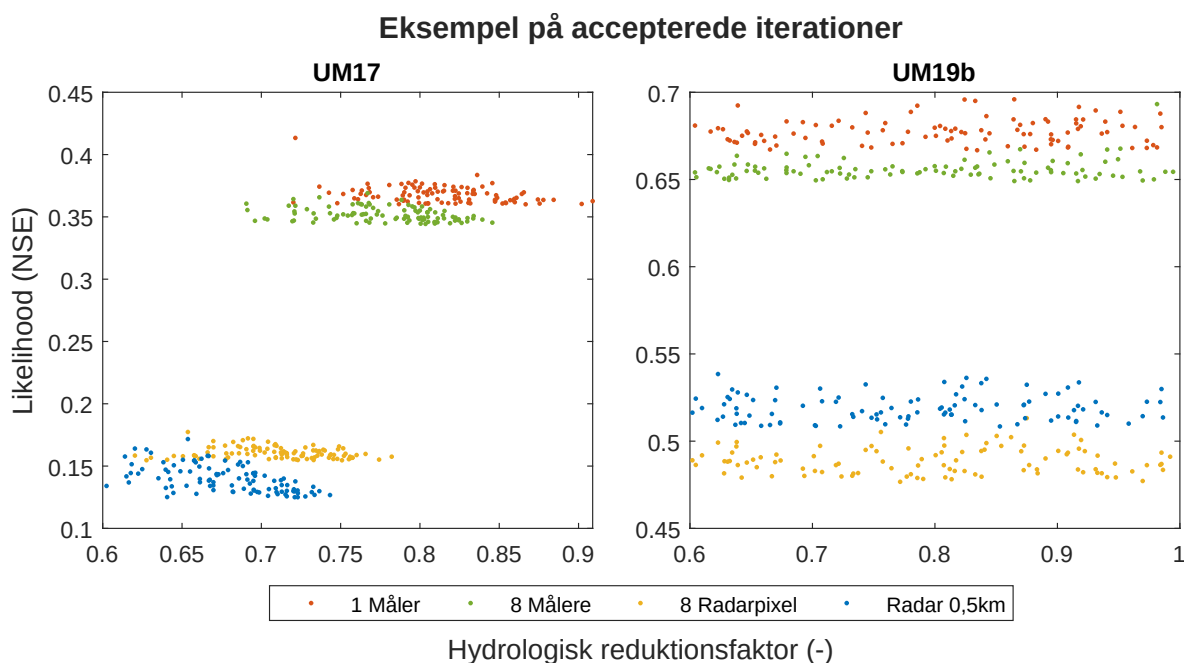
Scenarie		UM14	UM17	UM18	UM19b	UM19r	UM21	UM26	Hele
1 Måler	Middel	0,943	0,814	0,809	0,805	0,795	0,913	0,622	0,844
	STD	0,047	0,038	0,118	0,111	0,113	0,057	0,012	0,027
8 Måler	Middel	0,943	0,778	0,810	0,790	0,788	0,907	0,622	0,847
	STD	0,047	0,037	0,118	0,114	0,111	0,056	0,012	0,027
8 Pixels	Middel	0,918	0,710	0,796	0,796	0,787	0,893	0,622	0,834
	STD	0,060	0,035	0,120	0,112	0,111	0,075	0,012	0,025
Radar	Middel	0,926	0,679	0,800	0,782	0,780	0,886	0,622	0,835
	STD	0,060	0,034	0,121	0,109	0,114	0,081	0,012	0,026

Tabel 19.1: Statistiske parameter, heraf Standardafvigelsen (STD) og Middel værdien, som er tilknyttet de empiriske fordelinger for hydrologisk reduktionsfaktor på figur 19.3 for de fire regninput scenarier.

Resultaterne af den stokastiske kalibreringsanalysen diskuteres i følgende kapitel.

20 | Diskussion til kalibreringsanalyse

I dette kapitel vil metoden og resultaterne fra ovenstående kapitler blive diskuteret. Der blev på figur 19.3 præsenteret fordelinger af de accepterede iterationer for hver af de fire regninput scenarier. På trods af at de accepterede reduktionsfaktorer er meget ens, er der ikke opnået den samme model performance for alle scenarier.



Figur 20.1: Eksempel på forskelle mellem accepterede iterationer ved de fire regninput scenarier.

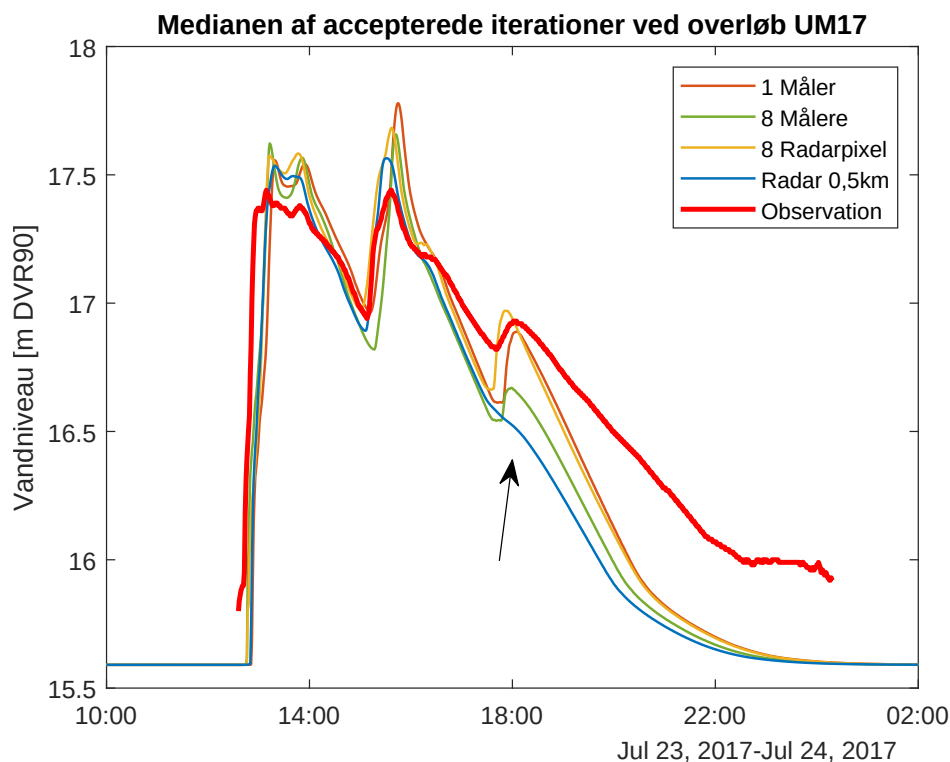
På figur 20.1 kan en sammenligning mellem de accepterede iterationer fra hvert regninput scenarie ses. Her kan det aflæses at de radarbaserede regninput, '8 Radarpixel' og 'Radar 0,5 km', generelt opnår mindre model performance.

Det vurderes at dette hovedsageligt er begrundet i fejl i timing og intensitet. En af grundene til dette kan være radarens tendens til at undervurdere på de korte varigheder i forhold til målerne, som tidligere præsenteret på figur 6.5 på side 33. Samtidigt vurderes det at et arealmiddel over 0,25 km² målt 1 km over jorden, kan have betydelige skala forskelle til nedbøren observeret på overfladen og i afløbssystemet.

Et eksempel på dårligere model performance for radarserierne kan ses på figur 20.2. Her kan der observeres at stigningen i niveau omkring klokken 18:00 kun er svagt afbildet i Radar 0,5 km scenariet. Dette vil medføre en dårligere model performance for radardataet.

På figur 20.1 kan det også observeres i overløb UM17 at de accepterede iterationer fra de radarbaserede scenarier opnår lavere reduktionsfaktorer. En af grundene til dette kan skyldes

den foregående beskrevne timing fejl, hvor iterationerne med lavere reduktionsfaktorer vil passe bedre i gennemsnittet og derved opnå bedre model performance.



Figur 20.2: Forskel mellem medianen af de accepterede iterationer for de fire regninput scenarier

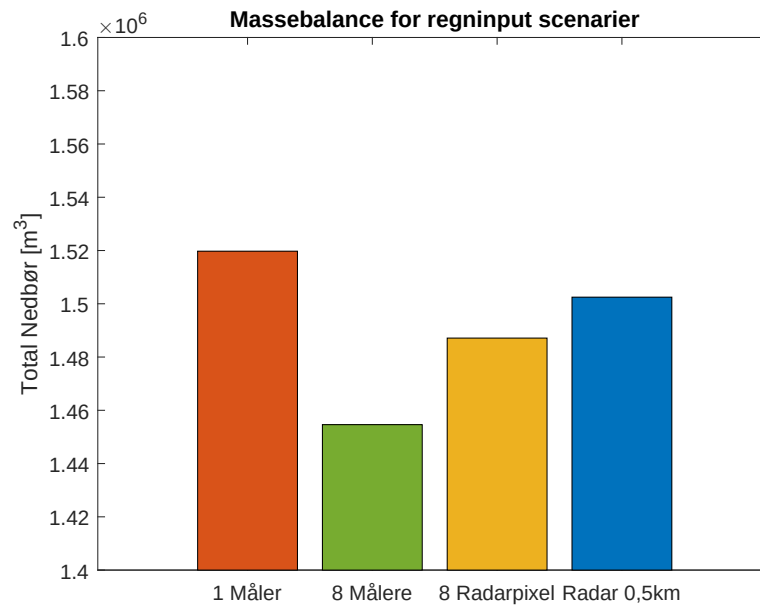
Det kan diskuteres om der bør benyttes et andet likelihood mål der i højere grad kunne belønne iterationer, hvor timing og variationerne i vandniveauet passer bedre og fejl på gennemsnittet er af mindre betydning. Der i projektet forsøgt at evaluere med forskellige andre performance kriterier, dog uden at finde noget idealt til analysens formål. Yderligere er der foretaget betragtninger om hvorledes en større fraktil burde accepteres. Det vil flytte på enderne af fordelingerne, men det er vurderet til ikke at have betydelig effekt på midlerne på fordelingerne, se figur 19.3.

Normalt ved vurdering af model iterationer i GLUE analyser, benyttes en fast likelihood grænse for hvornår en iteration accepteres. Dette er ikke tilfældet i denne analyse, hvilket er udvalgt grundet den store forskel i NSE-performance mellem overløbene. Hvert overløb bør ses individuelt, da modelusikkerhederne ved for eksempel pumper og sluser er forsimplet betydeligt i modellen. Hvilket særligt er tilfældet ved UM18 og UM19r ved rodzone bassinet. Dette gør det problematisk at opnå en samlet likelihood grænse for accepterede for alle overløbene. Derudover er model performancen særligt præget af den manglede evne til at estimerer afstrømningen væk fra overløbet. Som tidligere benævnt kan være på grund af usikkerheder med uvedkommende vand.

Sammenlignes fordelingerne af hydrologisk reduktionsfaktor med den forventede hypotese er der observeret den omvendte tendens end forventet. Hypotesen for analysen, er at reduktionsfaktoren skal være højere for bedre opløsninger af regn da ekstrapolerings usikkerhed på regnen mindskes. Men på baggrund af resultaterne, se tabel 19.1, opnås den omvendte sammenhæng. Sammenlignes resultatet af analysen med LTS-resultaterne i kapitel 10 opnås

også den omvendt tendens. Hvor raderserierne opnår lave reduktionsfaktorer på trods af at serierne resulterede i mindre overløbsvolumen i ekstremstatistikken. Det var forventet at en lille overløbsvolumen ville resultere i en højere hydrologisk reduktionsfaktor.

Beregnes total nedbøren over de fire regnhændelser fås fordeling, på figur 20.3, for regnininput scenarierne. Det kan observeres at der forekommer forskelle, men indfor nogle få procentpoint relativt til hinanden. Det vurderes dog at differencen mellem scenarierne kan have indflydelse på fordeling af de fundene reduktionsfaktorer.



Figur 20.3: Total nedbør på oplandet for de fire regnhændelser uden korrigering for befæstelsegrad og hydrologisk reduktionsfaktor.

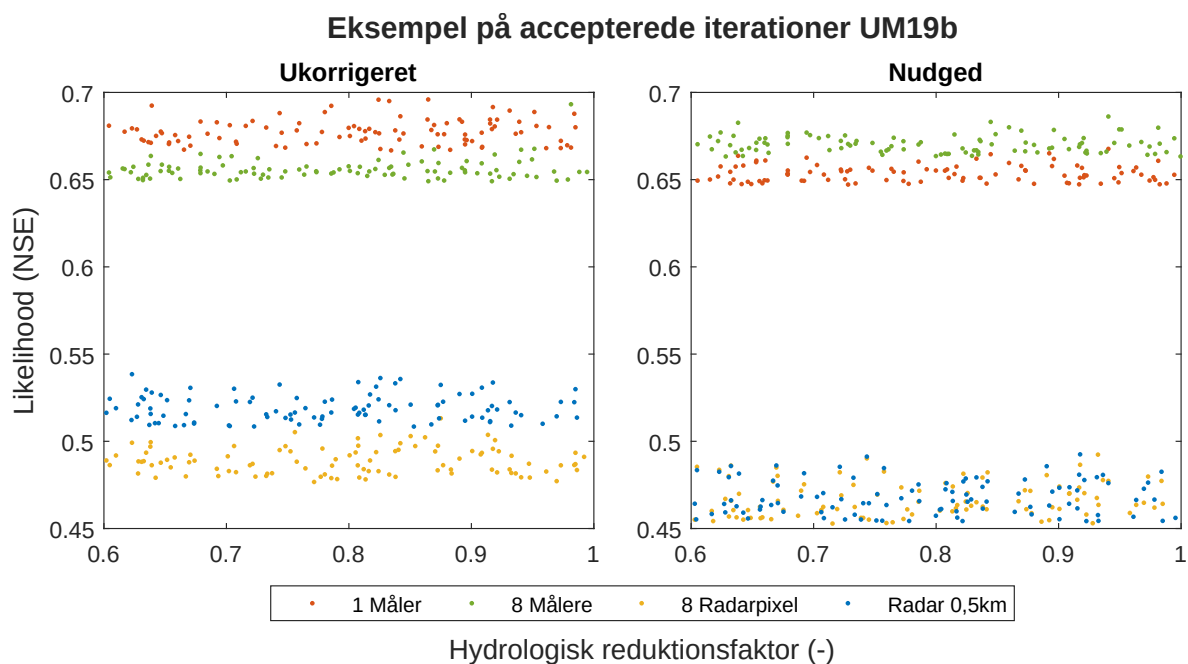
Eftersom der er observeret den omvendte sammenhæng i forhold til den forventede hypotese og forskelle i massebalancen, kan det diskuteres om hændelserne er repræsentative for analysen. Alle hændelser har en varighed på over 300 minutter, som er vurderet fornuftig da radardataet undervurderer væsentlig i varigheder korter end det. Dog kunne det have været interessant at undersøge en kort hændelse på 60 til 360 minutter som tidligere er vurderet, til at være spændet for modellens overløbs koncentrationstid. Ydermere kan regnserierne for hændelserne være påvirket af dårligere ydeevne på bias-justering samt nedbrud og forstyrrelser med mere.

Det vurderes at det ville have været mere idealt for projektets analyse hvis vandføringsmålinger var tilgængelige ved overløbene. Da massebalancerne i så fald kunne lukkes mellem udløb og overløbene i modellen, som det også anbefales i [Harremoës et al. 2005]. Dette er dog ikke praktisk muligt eller nødvendigt indenfor den nuværende overvågningsstrategi på området [Mark 2017]. Det introducerer en del problemer at bruge vandniveau målingerne til analysen, da overløbsvandføringen i modellen bestemmes ud fra simple niveau-flow formler med usikkerheder på kantkvote, kantbredde og overløbs-koefficient [ibid.]. Usikkerheden på overløbsvandføringen overføres til det modellerede vandniveau i overløbene. Det ville have været at foretrække hvis det var muligt, at lave mere præcise betragtninger om vandbalancen fra de observerede data. Da den hydrologisk reduktionsfaktor er proportionel med mængden af vand i modellen medfører dette usikkerhed på de fundne fordelinger.

I kapitel 13 blev statistisk nudging metode brugt på de fire regninput scenarier for at kunne korrigere serierne til den regionale model. Her var det muligt at finjustere regnserierne ind til den regionale model hvor f-værdien blev relativ stationær mellem varighederne. Derfor er der også udført en stokastisk kalibreringsanalyse på de fire scenarier med nudgede serier, med håbet om at mindske forskellen mellem radar- og målerproduktet. Resultaterne for denne analyse kan ses i Bilag K.

Set på resultaterne for kalibreringen med de nudgede serier, kan det observeres at det har en negativ effekt og derved er blevet ringere end de ukorrigerede serier. Set på massebalancen for de nudgede serier ses nu en stor forskel på vandmængden mellem de radar og måler baserede serier. Dette tyder på målerserierne er blevet skruet ned mens radarserierne er skruet op. En potentielt forklaring kunne være forskellen i fordelingen af gentagelsesperioden for serierne, da den samme regnhændelse ikke nødvendigvis vil have samme gentagelsesperiode i serierne. Ligeledes vil nudging på hændelsen ændre på dynamikken og derfor timingen i afløbssystemet, som i dette tilfælde kunne have forværret modellens performance.

På figur kan en sammenligning mellem de ukorrigerede og nudgede serier ses for overløb UM19b. Her kan aflæses at scenarierne "1 Måler" "8 Radarpixel" og "Radar 0,5 km" har mindsket model performance i det nudgede serier i forhold til de ukorrigerede.



Figur 20.4: Sammenligning mellem ukorrigeret og nudged model performance for accepterede iterationer.

En anden forklaring kan ligge i korrigeringen til den regionale model, som i kapitel 12 blev vurderet til ikke at passe særlig godt på projektområdet. I denne sammenhæng vil situationen forværres, hvis de ukorrigerede regnserier er blevet justeret til et niveau, der ikke passer særlig godt til området og derved det observerede data.

Generelt bør f-værdier ikke benyttes på enkelte hændelser ifølge anbefalingerne i Sørup og Gregersen [2023], hvor hændelsen i stedet bør analyseres. Eftersom de enkelte hændelser vil variere mellem den regionale model og den lokale model.

Generelt blev der observeret betydelige forskelle i den gennemsnitlige reduktionsfaktor mellem de fire scenarier for UM17, både i de ukorrigerede (se figur 19.3) og de korrigerede (se Bilag K) fordelinger. Ligeledes blev næsten ingen forskel observeret mellem scenarierne for UM26, og kun minimale forskelle blev fundet for UM14 og UM21. En eventuel forklaring kunne være størrelsen af overløbsoplandene, hvor UM17 betragtes som det største opland, mens UM26 er væsentligt mindre, se figur 18.1. Dette kunne tyde på at mange af overløbsoplandene er for små til at se betydningen af spatialt regn.

Set på fordelingen af den gennemsnitlige hydrologisk reduktionsfaktor for hele oplandet, ses meget minimal forskel mellem scenarierne. Dette indikerer, at der muligvis ikke er betydelig effekt ved anvendelse af bedre opløsning af regninput på projektområdet. Dette kunne antyde, at området er for lille til at påvise effekten af den mindskede usikkerhed ved brug af spatial regn. Det vurderes at usikkerheden mellem målemetoderne for regnmålere og radar muligvis er større end den mindskning af usikkerhed, der opnås ved at anvende spatial regn. Dette kan medføre at hypotesen; "Når usikkerheden på regninputtet falder vil der opnås en højere reduktionsfaktor ved kalibrering." ikke er i overensstemmelse med de opnåede resultater i denne analyse.

21 | Opsamling af Del V

I Del V er der gjort brug af GLUE metoden til at undersøge hvordan fordelingen af optimale hydrologisk reduktionsfaktor ændre sig med input af forskellige spatiale regnserier. Analysen er foretaget med observerede niveaumålinger fra syv overløbsbygværker, udleveret fra HOFORs SRO system. Der er valgt at arbejde videre med fire regninput scenarier, hvor der er udvalgt fire regnhændelser med overløbsvolumen tilsvarende en gentagelsesperiode i intervallet 0,2 - 2,5 år.

Til GLUE analysen er NSE udvalgt som likelihood mål til evaluering mellem målt og modelleret. Den hydrologisk reduktionsfaktor er valgt, som den varierende parameter i intervallet 0,6 - 1. Reduktionsfaktorer er generede for hver af de syv overløbsoplande. Der er foretaget 1000 iterationer for hver regninput scenarie.

I resultaterne er der opstillet fordelinger af 10% fraktilen af bedst performende iterationer. Det kunne observeres at der i nogle overløb var forskelle mellem de fire regninput scenarier mens der i andre overløb ikke var forskelle. Den optimale reduktionsfaktor variere mellem overløbsoplandene men, som gennemsnit for hele oplandet var et interval på mellem 0,8 - 0,9 optimalt for alle scenarier. Resultaterne levede ikke op til den forventede hypotese da der ikke opnås højere reduktionsfaktor med regnserier med højere spatialt opløsning.

Samme øvelse blev udført på de nudgede serier, med forventningen om at korrigeringen ville forbedre resultatet, men dette var ikke tilfældet. Det blev diskuteret om usikkerheden der opstår når radar og regnmåler sammenlignes, er større end den usikkerhed der bliver mindsket ved at bruge spatialt regn på dette opland og disse fire regnhændelser.

Del VI

Afrunding af rapport

22 | Overordnet diskussion

Resultaterne fra de ovenstående dele kan give anledning til diskussion om indvirkningen af spatialt regn på modelresultaterne og korrektion til den regionale model.

Det kan diskuteres om hvor ideelt oplandet omkring Utterslev Mose er til analyserne foretaget i dette projekt. Til de individuelle overløbsbygværker i modellen er der meget forskellige koncentrationstider. Oplandet er afløbsteknisk komplekst, med mange spjæld, koblede bassiner og realtidsstyring. Dette kan medføre at det er vanskeligt at isolere ændringer i model respons udelukkede fra regninputtet. Det kan argumenteres at det ville have været bedre for analysen med et mere lineært opland hvor indflydelsen af regninputtet, kan have været mere tydelige, når forudsætningerne ikke ændre sig med for eksempel realtidsstyring. Men samtidigt må det antages som vanskeligt at finde et ikke komplekst opland, i samme størrelsesorden, i et tætbebygget område.

Det vurderes at oplande til projektets analyse skal have et stort areal for at ekstrapoleringens usikkerheden mellem en punktmåling og regnininput med stedlig opløsning er observerbart. Samtidigt er der ikke mange oplande i Danmark der har flere regnmålere tilgængelige, som kan bidrage til at beskrive dynamikken af regnen bedre i tid og sted. Derfor er dette ikke en generel løsning der kan overføres til andre oplande for at mindske ekstrapoleringens usikkerheden. Her er regnininput med stedlig opløsning fra radar mere realistisk at implementere på andre oplande, da der allerede findes data for store dele af Danmarks areal.

En ulempe med radardata er at før det kan benyttes i modellering og i dimensionering, er der en del udfordringer som skal håndteres. Her bør der foretages en bias-justering i forhold til målerne, under den antagelse at de måler rigtigt. Yderligere kan der med fordel foretages advektion interpolering af radardataet for at opnå en bedre tidslig opløsning. Begge af disse procedure kræver store tekniske færdigheder og datagrundlag fra både målere og radarbilleder. Samtidigt kan datagrundlaget være meget store filer, som kan være vanskelige at administrere.

En anden udfordring er blandt andet afvigelserne mellem målemetoder for regnmåler og radardata, hvor betydelige forskelle er fundet, særligt i de korte varigheder. Målemetoderne er forskellige hvor radaren måler nedbøren i 1 km højde i 0,5 km celler, og regnmåleren registrer i et punkt på jorden. Dette kan have betydelig indflydelse på dimensioneringen af oplande med mindre koncentrationstider. I dette projekt er der forsøgt at godtgøre for dette ved statistisk nudging, da de højintense hændelser oftest er af korte varigheder. Disse udfordringer kan være skyld i, at der ikke er omfattende brug af radarobservationer til hydrauliske modeller i branchen.

Ved brug af radardata foretages stadig en ekstrapolering over oplandet, som i dette tilfælde har opløsning på 0,5x0,5km. Bedre stedlig opløsning er mulig at opnå ved brug af andre radarer med mindre rækkevidde og bedre opløsning. Problematikken ved dette er dog at det kræver en finer opløsning af modelarbejdet, som for eksempel ikke vil være tilstrækkeligt for det nordlige opland i projektet.

Som tidligere beskrevet var der både i serierne fra regnmåler og radar differencer til den regionale model på tværs af varigheder. Dette kan danne grundlag for diskussion, om man i modelarbejdet har mest tiltro til intensiteterne i de målte data eller den regionale model. Samtidigt opnåede de ukorrigerede regnserier, som beskrevet i kapitel 20, bedre model performance i forhold til observeret data end de korrigerede. Dele af denne forskel kan begrundes i prediktionsusikkerheden på den regionale models regnintensitet, som er 3-10% for projektområdet.

Arbejdet med f-værdier og korrektion til den regionale model i dette projekt har støttet den generelle erfaring, hvor der er stor usikkerhed på hvordan man korrigerer historiske regnserier til den regionale model mest hensigtsmæssig. Som beskrevet i kapitel 14 var der store afvigelser mellem scenarierne i én faktor korrigering. Én faktor korrigering er udført i henhold til anbefalingerne i Arnbjerg-Nielsen og Illeris [2023]. Afhængigt af størrelsen af den virkelige overløbsvolumen, kan dette have store konsekvenser, især ved oplande med mange forskellige koncentrationstider. Det kan diskuteres om der som alternativ til korrektion til den regionale model, i stedet bør udvælgelses regnserier der overvurdere den regionale model på alle varigheder og gentagelsesperioder. Ud fra en betragtning om at være på den sikre side, ved f-værdier under 1 eller u-værdier over 0. Et andet alternativ kunne i fremtiden være syntetiske regnserier, som tidligere beskrevet. Forfatterne har ikke kendskab til syntetiske regnserier hvor den stedlige udbredelse også er inkorporeret.

Fremgangsmåden i den stokastisk kalibreringsanalyse vurderes som brugbar, men som før nævnt er det observerede datagrundlag for analysen ikke optimalt. En større undersøgelse om hvordan kalibrering af modeller skal håndteres når andet regninput benyttes kunne foretages. Ved bedre datagrundlag for observeret data, kan modeller forbedres i forhold til at afspejle virkeligheden, ved at kunne lukke massebalancen. Dette kunne have forbedret resultaterne og tiltroen til hvor virkeligheden befinder sig. Hvis en model som brugt i dette projekt skal afspejle virkeligheden i en højere grad, er en større måleindsats i overløbsbygværker nødvendig.

For dimensionering ved brug af én regnmåler ekstrapoleret ud på hele oplandet, bør man være varsom om hvilken måler der udvælges. Som der blev præsenteret i kapitel 15 er der stor variation på model responsen, ved brug af regnserierne inden for projektets opland. Selvom serierne er statistisk nudged til den regionale model og afgiver f-værdi på 1 er der stadig betydelige forskelle på resultatet. Det kan diskuteres om det er timingen på nedbøren under hændelserne som har betydning. Det kan derfor være vanskeligt at udvælge den regnserie som er mest repræsentativ for det virkelige scenarie.

Ved dimensioneringssituationer med brug af én regnmåler, bør der foretages betragtninger omkring usikkerheden. Da store usikkerheder på regnserierne er fundet i projektet, kan det have store økonomiske konsekvenser blot at udvælge én måler, uden at foretage yderligere betragtninger. Med erfaring fra projektets ekstremstatistik for overløb på de individuelle nudgede serier (se figur 15.4 på side 75), kan man diskutere om en serie som måler mere end den regionale model bør udvælgendes, for at være på den sikre side. Eller om der bør foretages en usikkerhedsfordeling på baggrund af ekstremstatistikken, med antagelsen om at virkeligheden befinder sig indenfor spændet.

En mindskning af ekstrapolerings usikkerheden ved brug af spatialt regn har resulteret i en overløbsvolumen, i den nedre del af intervallet i forhold til de individuelle punktserier udbredt ud over oplandet, som beskrevet i kapitel 15. Det kan derfor diskuteres om resultatet fra

analyserne, kan give anbefaling til en mere udbredt brug af regnininput med beskrivelse af regnens dynamik i tid og sted. Resultaterne ved brug af spatiale regnininput har i dette projekt ved mindskning af ekstrapolerings usikkerheden vist mindre overløbsvolumen. Hvorvidt samme tendenser forholder sig på andre oplande er uvist.

Det kan diskuteres om resultaterne af analyserne kan bruges til at mindske spredningen på belastningen. Dette skulle følge de nuværende anbefalinger i skrift 27 Harremoës et al. [2005] til håndtering af usikkerheder. Hvis en formulering for mindre usikkerhed på belastningen kunne findes, ville beregningen kunne udføres med et mindre sikkerhedstillæg. Der ville i så fald være store økonomiske fordele ved at kunne mindske usikkerheden. Hvordan dette praktisk skulle kunne implementeres i en dimensioneringssituationen har forfatterne fundet vanskeligt at vurdere.

23 | Konklusion

I dette kapitel afrundes projektrapporten ved at besvare problemformuleringen og de tilhørende underspørgsmål. Spørgsmålene besvares på baggrund af rapportens betragtninger og undersøgelser.

Der er foretaget en bias-justering, hvor en god sammenhæng mellem døgnnedbøren i radar og regnmålere blev fundet. Ved sammenligning af ekstremregn intensiteter undervurderede radarserierne betydeligt i de korte varigheder. Det blev dog konkluderet at regnmåler og radarserierne er af høj nok kvalitet til brug i hydrauliske modeller for perioden og til videre anvendelse i projektet.

På baggrund af et stort omfang af nedbørsdata for området, blev der fundet forskelle mellem overløbsvolumen ved 1 år gentagelsesperiode ved forskellige scenarier af spatialt regn. Her er der generel tendens til at regninput med højere stedlig opløsning, giver mindre overløbsvolumen i ekstremstatistikken.

Afvielser mellem de lokale regnserier og den regionale model blev undersøgt. Der blev fundet store afvielser på f-værdier ved ukorrigerede serier. Specielt regnmålere serierne havde tendens til at overvurdere den regionale model. Derudover er det fundet at den stedlige variation over oplandet mellem radarserierne og den regionale model ikke er i overensstemmelse. Der var uoverensstemmelse ved alle varigheder, men specielt for de korte.

Der blev benyttet to korrigerings metoder til brug af f-værdier, hvor metoden statistik nudging opnåede intensiteter tættest på den regionale model på tværs af varighederne. Hvor den anbefalede én faktor korrigerende ikke var tilfredsstillende for projektets opland. Der forelægger stadig uvished om den statistik nudging metode er velegnet til håndtering af afvielser ved lokale regnserier.

Overløbsvolumen fra de korrigerede serier resulterede i mindre forskelle mellem scenarierne med regninput med stedlig opløsning. Yderligere betragtninger om sammenhængen mellem f-værdier og overløbsvolumen blev foretaget ved en sensitivitetsanalyse. Her blev fundet en lineær tendens til højere overløbsvolumen ved lavere f-værdi. Samtidigt blev en stor spredning ved samme f-værdi opnået, som indikerer en stor usikkerhed på valget af regninput. Ved sammenligning mellem punktserierne og de spatiale regninput blev der fundet mindre overløbsvolumen ved de spatiale scenarier.

I kalibreringsanalysen blev der fundet tendens til lavere hydrologisk reduktionsfaktor ved de radarbaserede scenarier kontra de regnmålerbaserede. På baggrund af analysen kan det konkluderes at den hydrologiske reduktionsfaktor, vil ændres ved input af regn med stedlig opløsning. Dog blev ingen klar tendens fundet for dette opland og de udvalgte regnhændelser. Hypotesen om at en højere stedlige fordeling på regnen, ville medføre en højere hydrologisk reduktionsfaktor har ikke kunnet påvises.

På baggrund af projektet kan det konkluderes at regndata med stedlig opløsning kan mindske usikkerheden på regninputtet. Afvigelser mellem den lokale regnserie og den regionale model kan have stor indvirkning på ekstremstatistikken på overløbsvolumen. Projektet kan skabe grundlag for en anbefaling om at skabe bedre kendskab til usikkerheden på regnserier. Da store konsekvenser kan være forbundet, ved blindt at udvælge én serie. Der forstår dog stadig store usikkerheder på hvordan problematikkerne forearbejdet i denne rapport mindskes mest hensigtsmæssigt i en dimensioneringssituationen.

Bibliografi

- Andersen, Christoffer Bang (2018). *Analyse af regnens spatiale fordeling af bevægelse, i hydraulisk modellering af afløbssystemer*. <https://projekter.aau.dk/projekter/files/281553149/Rapport.pdf>.
- Arnbjerg-Nielsen, Karsten og Toke Sloth Illeris (2023). *Rapport om håndtering af usikkerheder ved beregning af regnafstrømning i byer. Del 1: Begrebsafklaring og problembeskrivelse*. <https://spildevandskomiteen.dk/wp-content/uploads/Usikkerhedsprojekt-Del-1-Begrebsafklaring-og-problembeskrivelse.pdf>.
- Arnbjerg-Nielsen, Karsten, Ida Bülow Gregersen, Henrik Madsen og Hjalte Jomo Danielsen Sørup (2023). *Skrift nr. 32*. <https://spildevandskomiteen.dk/wp-content/uploads/Skrift-32.pdf>.
- Berndtsson, Ronny og Janusz Niemczynowicz (1988). *Spatial and Temporal Scales in Rainfall Analysis-Some Aspects and Future Perspectives*. https://www.researchgate.net/publication/222087114_Spatial_and_Temporal_Scales_in_Rainfall_Analysis-Some_Aspects_and_Future_Perspectives.
- Beven, Keith (2008). *Environmental Modelling – An Uncertain Future?* ISSN: 978-0-415-46302-7, 163-170. Routledge: London, 2008.
- Beven, Keith og Andrew Binley (1992). *THE FUTURE OF DISTRIBUTED MODELS: MODEL CALIBRATION AND UNCERTAINTY PREDICTION*. ISSN: 0885-6087, VOL. 6, 279-298. Centre for Research on Environmental Systems, Lancaster University.
- BIOFOS (2019). *Samstyring mellem renseanlæg og opland samt udbygningsplan 2035+*. <http://www.evanet.dk/wp-content/uploads/2019/03/Samstyring-mellem-renseanl%C3%A6g-og-opland-samt-udbygningsplan-2035.pdf>.
- Brødbæk, Daniel L. (2023). *Notat: Hydrauliske analyse vedr. reduktion af aflastninger til Ueterslev Mose*.
- DHI (2019). *Mike Urban Documentation*. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2019/MIKE_URBAN.htm.
- DMI (2023). *Maj varmer op til skybrudssæsonen*. <https://www.dmi.dk/nyheder/2023/maj-varmer-op-til-skybrudssasonen>.
- Einfalt, Thomas, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Claudia Golz, Niels-Einar Jensen, Markus Quirnbach, Guido Vaes og Baxter Vieux (2004). *Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404003658>.
- Gregersen, Ida Bülow, Henrik Madsen, Jens Jørgen Linde og Karsten Arnbjerg-Nielsen (2014). *Skrift nr. 30*. https://spildevandskomiteen.dk/wp-content/uploads/svk_skrift30_0.pdf.

- Hansen, Anders Pinholt, Emil Bruun Mortensen og Søren Brunsgaard (2023). *Anvendelse af spatialregn til analyse af afløbssystemer*. https://vbn.aau.dk/ws/files/535867468/Speciale_Final.pdf.
- Hansen, Erik (2020). *Bliv klog på usikkerheden i vejruddisigten - DMI*. <https://www.dmi.dk/nyheder/2020/bliv-klog-paa-usikkerheden-i-vejruddisigten>.
- Harremoës, Poul, Claus Møller Pedersen, Anne Laustsen, Sonia Sørensen, Bo Laden, Kristian Friis, Helle Katrine Andersen, Jens Jørgen Linde, Peter Steen Mikkelsen og Carsten Jakobsen (2005). *Skrift nr. 27*. <https://ida.dk/media/2992/skrift27funktionspraksisforafløbssystemerunderregn.pdf>.
- Heick, Alex (2023). *Utterslev Mose God økologisk tilstand i 2027 Hvordan*. <https://mosevenner.dk/wp-content/uploads/2023/03/Utterslev-Mose.-Ren-soe-2027.-Hvordan.-Bispebjerg-og-Broenshoej-Husum-Lokaludvalg-2023.-Denne-fil-maa-deles.-AH.pdf>.
- HOFOR (2024). *Svanemøllen Skybrudstunnel*. <https://www.hofor.dk/baeredygtige-byer/udviklingsprojekter/skybrudssikring/svanemoelle-skybrudstunnel/>.
- Københavns Kommune (2018). *Spildevandsplan 2018-2028*. <https://planer.kk.dk/spildevandsplan-2018>.
- Københavns Kommunes (2018). *Københavns Kommunes Spildevandsplan 2018 Bilag 2*. <https://www.kk.dk/sites/default/files/agenda/fae62511-37a9-40d3-8887-c1f98e9c5e01/315ee58e-df84-44e9-9dfc-f86bba778a6f-bilag-2.pdf>.
- Lantmateriet (2023). *Geodesy - Map-projections - Utm*. <https://www.lantmateriet.se/en/geodata/gps-geodesi-och-swepos/geodesy/map-projections/utm/>.
- Maier, Roman, Gerald Krebs, Markus Pichler, Dirk Muschalla og Guenter Gruber (2020). *Spatial Rainfall Variability in Urban Environments-High-Density Precipitation Measurements on a City-Scale*. https://www.researchgate.net/publication/340811883_Spatial_Rainfall_Variability_in_Urban_Environments-High-Density_Precipitation_Measurements_on_a_City-Scale.
- Mark, Ole (2017). *Best Practice til kortlægning samt reduktion af overløb fra fælleskloakerede afløbssystemer*. <https://mst.dk/media/p2xixrs/best-practice-kortlaegning-sam-reduktion-af-overloeb-fra-faelleskloakerede-afløbssystemer.pdf>.
- (2019). *Deterministic Modelling of Urban Stormwater and Sewer Systems*. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/317802127/Deterministic_Modelling_of_Urban_Stormwater_and_Sewer_Systems_ONLINE.pdf.
- Marshall, J.S. og W.M. Palmer (1948). *Journal of Atmospheric Science* 5, s. 165–166.
- Marshall, John Stewart, Walter Hirschfeld og K.L.S. Gunn (1955). *Advances in Radar Weather, Advances in Geophysics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065268708603106>.
- Mikkelsen, Peter Steen, Henrik Madsen, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Hanne Kjær Jørgensen, Dan Rosbjerg og Poul Harremoës (1999). *Regional variation af ekstremregn i Danmark*. https://ida.dk/media/2951/26regional-variation-af-ekstremregn-i-danmark.pdf?fbclid=IwAR3_-GzV7a76g5qA0PqBHuhH9yGkTfJCLXzRvGpVJBs-WQoFNuU0H5vP_OI.

- Miljøstyrelsen (2018). *Bedre viden om uvedkommende vand*. <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2018/05/978-87-93710-21-4.pdf>.
- (2024). *Kilder til spildevandsforurening*. <https://mst.dk/erhverv/rent-miljoe-og-sikker-forsyning/spildevand/kilder-til-spildevandsforurening>.
- Nash, J.E. og J.V. Sutcliffe (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169470902556>.
- Nielsen, Jesper E., Søren Thorndahl og Michael R. Rasmussen (2014). *A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809513002883>.
- Ochoa-Rodriguez, Susana, Li-Pen Wang, Auguste Gires, Rui Daniel Pina, Ricardo Reinoso-Rondinel, Guendalina Bruni, Abdellah Ichiba, Santiago Gaitan, Elena Cristiano, Johan van Assel, Stefan Kroll, Damian Murlà-Tuyls, Bruno Tisser, Daniel Schertzer, Ioulia Tchiguirinskaia, Christian Onof, Patrick Willems og Marie-Claire ten Veldhuis (2015). *Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169415003856>.
- Rosbjerg, Dan og Henrik Madsen (2019). *Initial design of urban drainage systems for extreme rainfall events using intensity-duration-area (IDA) curves and Chicago design storms (CDS)*. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2019.1645958>.
- Rothenborg, Michael (2023). *Nyt, utraditionelt forslag til at rense en af Danmarks mest forurenede søer*. <https://pro.ing.dk/watertech/artikel/nyt-utraditionelt-forslag-til-rensen-en-af-danmarks-mest-forurenede-soer>.
- Sarup, Kim (2022). *Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem Årsnotat 2021*. https://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/2022/DMI_Report_22-03.pdf.
- (2023). *Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem Årsnotat 2022*. https://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/2023/DMI_Report_23_03_.pdf.
- Smith, James A. og Witold F. Krajewski (1991). *Estimation of the Mean Field Bias of Radar Rainfall Estimates*. https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/30/4/1520-0450_1991_030_0397_eotmfb_2_0_co_2.xml?tab_body=pdf.
- Sokol, Zbyněk, Jan Szturc, Johanna Orellana-Alvear, Jana Popová, Anna Jurczyk og Rolando Céleri (2021). *The Role of Weather Radar in Rainfall Estimation and Its Application in Meteorological and Hydrological Modelling—A Review*. https://www.researchgate.net/publication/348656757_The_Role_of_Weather_Radar_in_Rainfall_Estimation_and_Its_Application_in_Meteorological_and_Hydrological_Modelling-A_Review.
- Sørup, Hjalte Jomo Danielsen og Ida Bülow Gregersen (2023). *Brugervejledning og teknisk dokumentation til "Spildevandskomiteens Regnserieværktøj" – version 2023*. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/337040860/Brugermanual-SVKs-regnserievaerktoej-v2023.pdf>.

- Sørup, Hjalte Jomo Danielsen, Ida Bülow Gregersen og Karsten Arnbjerg-Nielsen (2016). *Modificering af regnserier så de reflekterer et ændret klima*. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/128309938/DanskVand2016_Abstract_hjds.pdf.
- Thomassen, Emma Dybro, Søren Liedtke Thorndahl, Christoffer Bang Andersen, Ida Bülow Gregersen, Karsten Arnbjerg-Nielsen og Hjalte Jomo Danielsen Sørup (2023). *Analyse af spatiale korrelationslængder mellem SVK-stationer, vejr-radar og klimamodeller*. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/temaartikel-analyse-af-spatiale-korrelationsl%C3%A6ngder-mellem-svk-st>.
- Thorndahl, Søren (2024). *Draft: Technical Note: Statistical nudging of rainseries*.
- (2008). *Uncertainty Assessment in Long Term Urban Drainage Modelling*. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/549441240/Uncertainty_Assessment_in_Long_Term_Urban_Drainage_Modelling.
- Thorndahl, Søren, Lene Bassø Duus, Preben Dam Simonsen, Christoffer Bang Andersen, Lene Lykke Kraglund og Fredrik Boberg (2020). *Klimafremskrivning af målt nedbør til afløbsteknisk anvendelse klimaks*. <https://www.danva.dk/media/9041/klimaks-slutrapport.pdf>.
- Thorndahl, Søren, Jesper Ellerbæk Nielsen og Michael R. Rasmussen (2019). *Estimation of Storm-Centred Areal Reduction Factors from Radar Rainfall for Design in Urban Hydrology*. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/6/1120>.
- Thorndahl, Søren L., Thomas Einfalt, Patrick Willems, Jesper E. Nielsen, Marie-Claire ten Veldhuis, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Michael R. Rasmussen og Peter Molnar (2017). *Weather radar rainfall data in urban hydrology*. https://www.researchgate.net/publication/314300564_Weather_radar_rainfall_data_in_urban_hydrology?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7InBhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbIIsInByZXZpb3VzUGFnZSI6bnVsbH19.
- Thorndahl, Søren L., Jesper E. Nielsen og Michael R. Rasmussen (2014). *Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169413008160?via%3Dihub>.
- Thorndahl, Søren Liedtke (2017). *Regnininput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde*. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/267566893/Regnininput_til_regnvandsdisponering_i_Aarhus_Vands_forsyningsomr_de.pdf.
- Thorndahl, Søren Liedtke og Michael R. Rasmussen (2010). *Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg*. https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/42745808/Vejrradarbaseret_styring_af_spildevandsanl_g.pdf.
- Winther, Leif (2011). *Afløbsteknik*. Paperback ISBN: 9788750210153. Polyteknisk Forlag.
- Zeng, Qiang, Hua Chen, Chong-Yu Xu, Meng-Xuan Jie, Jie Chen, Sheng-Lian Guo og Jie Liu (2018). *The effect of rain gauge density and distribution on runoff simulation using a lumped hydrological modelling approach*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169418303858>.

Del VII

Bilag

A | Radardata korrigering

Z-R Relation

Formlen for relationen mellem reflektivitet og regnintensitet kan ses i ligning (A.1). Denne formel bruges til at beregne radarmålt reflektivitet om til en regnintensitet. [Thorndahl et al. 2014]

$$Z = A \cdot R^B \quad (\text{A.1})$$

Hvor:

Z	Reflektans [dBZ]
$A \text{ \& } B$	Konstanter [–]
R	Regnintensitet [mm/t]

Bestemmelse af daglig biasfaktor

Udregning af de daglige biasfaktorer for alle radar/regnmåler par sker ved brug af ligning (A.2). Denne formel bruges til at korrigere radarmålt data til regnmåler data, således de på gennemsnit måler det samme. [ibid.]

$$B(\tau + \Delta\tau) = \frac{\sum_{n=1}^N (\sum_{t=\tau}^{\tau+\Delta\tau} (G(n,t)) \cdot \Delta t_g)}{\sum_{n=1}^N (\sum_{t=\tau}^{\tau+\Delta\tau} (R(n,t)) \cdot \Delta t_r)} \quad (\text{A.2})$$

Hvor:

$B(\tau + \Delta\tau)$	Bias i tidsintegrations perioden $\Delta\tau$ (Her en dag) [–]
G	Regnmåler intensitet [mm/tidstep]
R	Radar målt intensitet [mm/tidstep]
N	Total antal radar regnmåler par [–]
Δt_g	Tidstep for regnmåler observationer [tidstep]
Δt_r	Tidstep for radar observationer [tidstep]

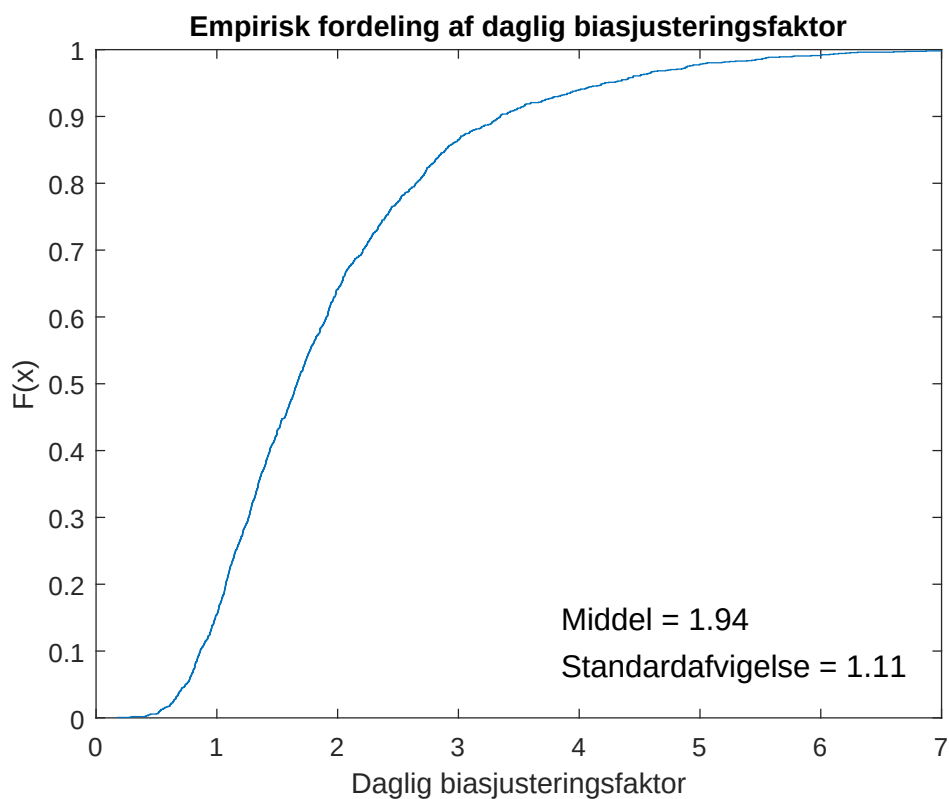
I ligning (A.3), pålægges den daglige biasfaktor hver enkelte pixel.

$$R_{MFB}(x,y,t) = B(t) \cdot R(x,y,t) \quad (\text{A.3})$$

Hvor:

R_{MFB}	Bias korrigerede radar intensitet [mm/tidstep]
$B(t)$	Biasfaktor for angivet periode her en dag [–]
(x,y,t)	x og y beskriver den specifikke pixel og t er tiden [–]

En fordeling af alle de beregnede bias-justeringsfaktor for radardataen i projektperioden, kan se på figur A.1. Her er størstedelen indenfor intervallet 1-4 og i gennemsnit en faktor to større end regnintensiteten fundet ved Z-R relationen.



Figur A.1: Fordeling for beregnede bias-justeringsfaktor for radardata. Periode over 16-01-2008 - 17-09-2022.

B | Performance parameter

Dette bilag viser formlerne for performance parametrene brugt til sammenligningen af radar- og regnmåler data samt modelperformance. Parametrene benyttes til at vurdere sammenhængen mellem observeret og estimeret data.

Formlen for beregningen af Nash-Sutcliffe-Efficiency (NSE) kan ses i ligning (B.1). Parameteren fortæller noget om hvor god forudsigelse modellen har [Nash og Sutcliffe 1970]. Hvor en NSE værdi på 1 angiver et perfekt match, hvor en værdi på 0 vil svare til at tage gennemsnittet af det observerede data. Værdier under 0 til minus uendeligt angiver en dårlig forudsigelse.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (O_n - M_n)^2}{\sum_{n=1}^N (O_n - \bar{O})^2} \quad (\text{B.1})$$

Hvor:

O_n	Observeret data for døgn n [mm]
$\bar{O}$	Middelværdi for observeret data [mm]
M_n	Modelleret data for døgn n (Radar) [mm]

Mean Absolut Error (MAE) beregnes ved ligning B.2. Parameteren fortæller hvor stor den gennemsnitlige afvigelse er mellem de to produkter, hvor et perfekt match vil give en MAE på 0.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |O_n - M_n| \quad (\text{B.2})$$

Hvor:

MAE	Mean Absolute Error [mm]
-------	--------------------------

En Bias faktor beregnes ved ligning B.3. Parameteren fortæller om forhold mellem et datasæt og et andet. Hvis datasættene er lige store opnås en bias på 1.

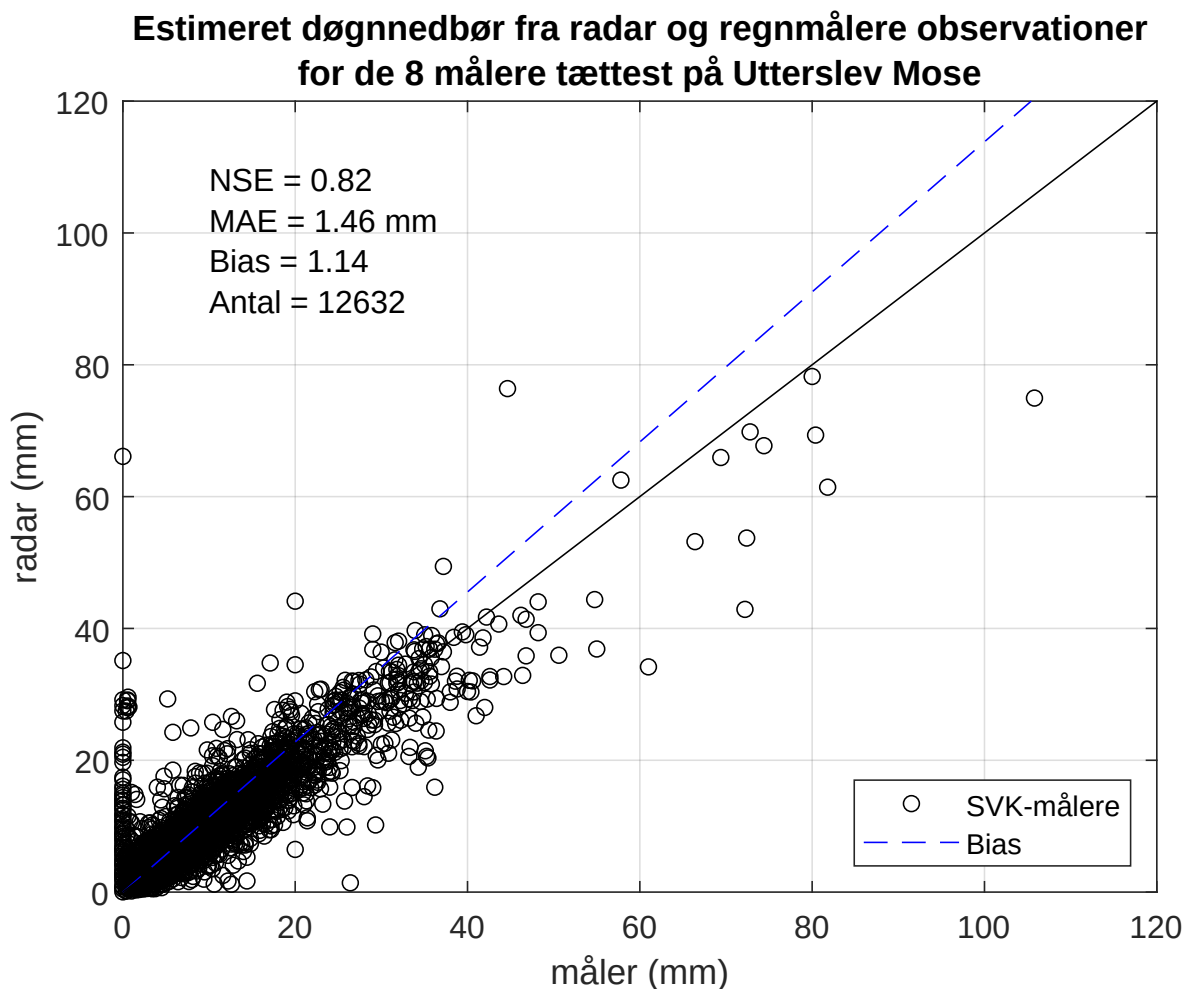
$$Bf = \frac{\sum(M_n)}{\sum(O_n)} \quad (\text{B.3})$$

Hvor:

Bf	Bias faktor for datasættet [–]
------	--------------------------------

C | Regnmåler nedbrudsanalyse

På figur C.1 er den estimerede døgnedbøren fra radar og den målte i SVK-målere sammenlignet. Det forventes at en stor del af punkterne på figuren, hvor der er registreret nedbør på radaren med nul i måleren skyldes nedbrud eller fejl på måleren. Disse punkter kan ses langs y-aksen på figuren.



Figur C.1: Den estimerede døgnedbør fra radar og den målte i SVK-målere. Her med hele datasættet.

Som nævnt i kapitel 5 er det muligt at udtrække perioder med nedbrud fra SVK-databasen [Sarup 2023]. Bortkastes disse dage fra datasættet opnås figur C.2. En oversigt over dage med nedbrud og fejl er tidligere præsenteret på figur 5.2 på side 28. Dette inkludere dage hvor der forekommer hændelser markeret som:

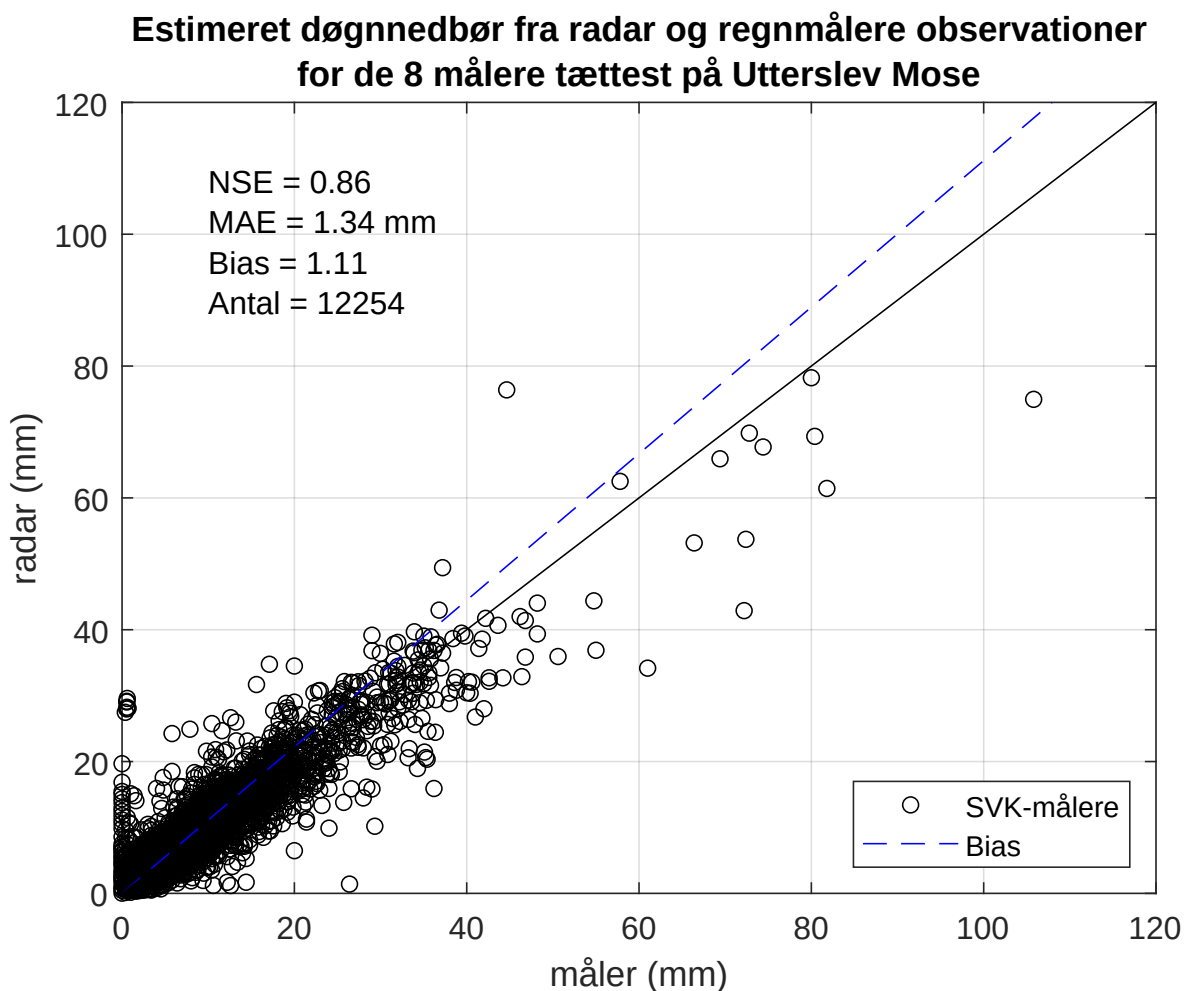
- t = Tekniske fejl på regnmåleren
- d = Større afvigelse fra nærmeste målere
- e = Ekstrem nedbørintensitet med suspekterede værdier

I perioden over 16-01-2008 - 17-09-2022 er der i det udlevede data 1579 dage med radardata tilgængelig. Heraf bortkastes et antal dage med fejl og nedbrud på målere, se tabel C.1.

SVK-ID	Antal dage bortkastet
5645	1
5655	66
5660	26
5690	57
5694	28
5699	14
5705	135
5725	51

Tabel C.1: Antal dage bortkastet grundet nedbrud og fejl.

Heraf er der 311 unikke dage med fejl og nedbrud. Disse dage fjernes når der bliver udvalgt hændelser til LTS i de hydrauliske undersøgelser.



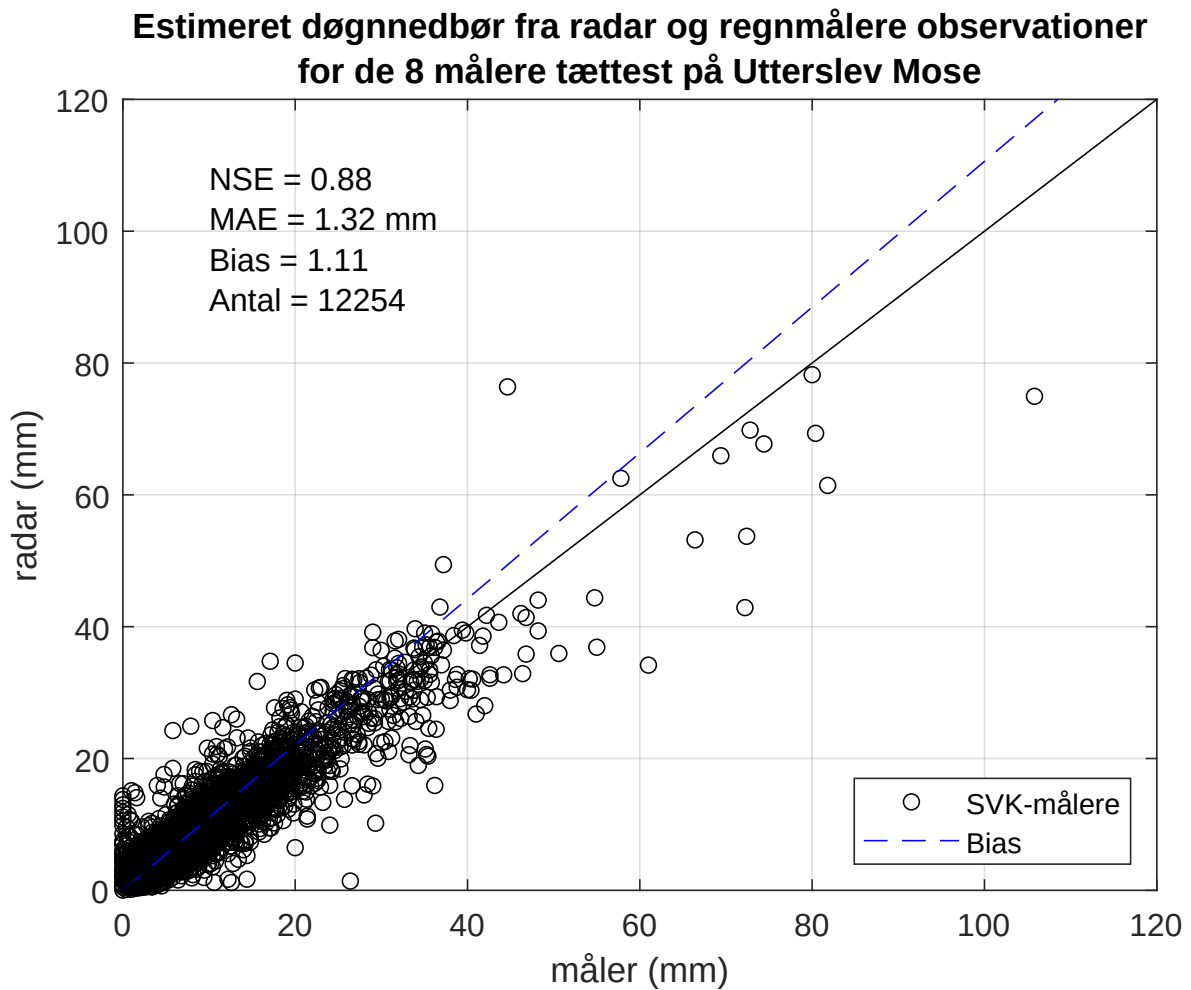
Figur C.2: Den estimerede døgngnedbør fra radar og den målte i SVK-målere. Her er dage med nedbrud og fejl fjernet fra datasættet.

Yderligere er der fjernet fem dage fra radardata sættet hvor der er meget dårlig sammenhæng

mellem flere af målerne og radar. Følgende dage er fjernet:

- 07-05-2010
- 14-09-2013
- 01-10-2013
- 28-07-2015
- 21-02-2020

Med de fem dage fjernet opnås figur C.3. De fem dage fjernes også i de hydrauliske undersøgelser.



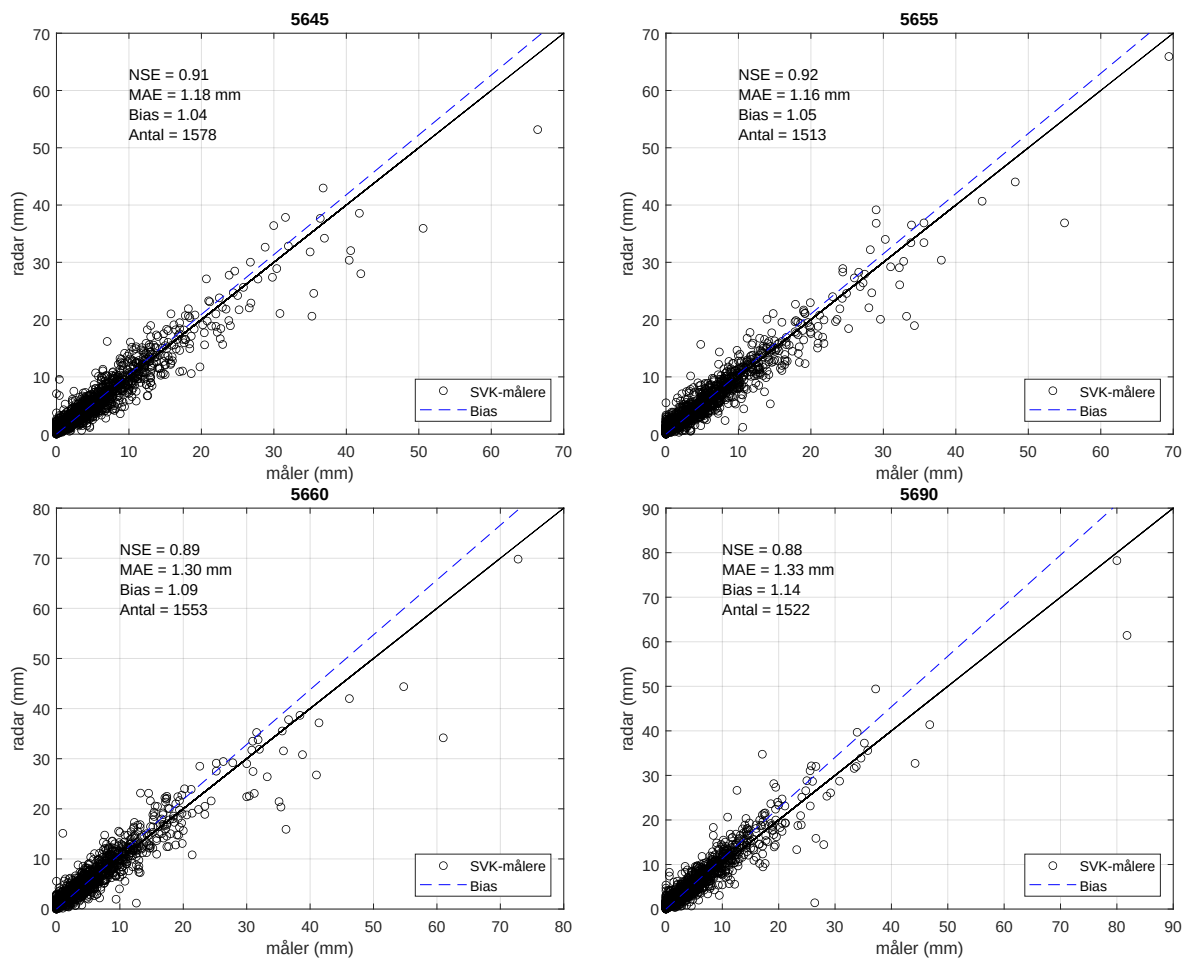
Figur C.3: Den estimerede døgnnedbør fra radar og den målte i SVK-målere. Her er de fem dage med dårlig sammenhæng fjernet, samt nedbrud og fejl dage.

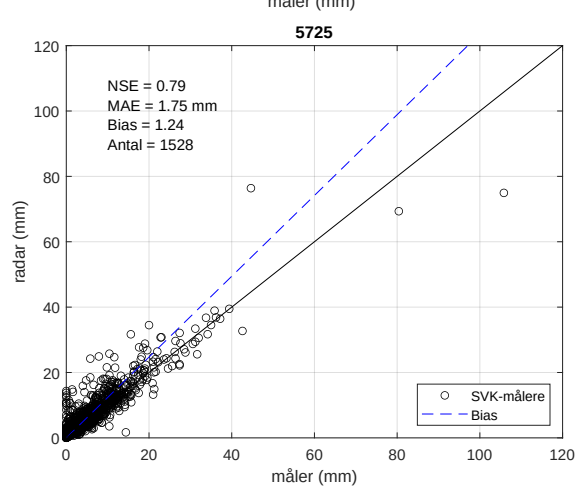
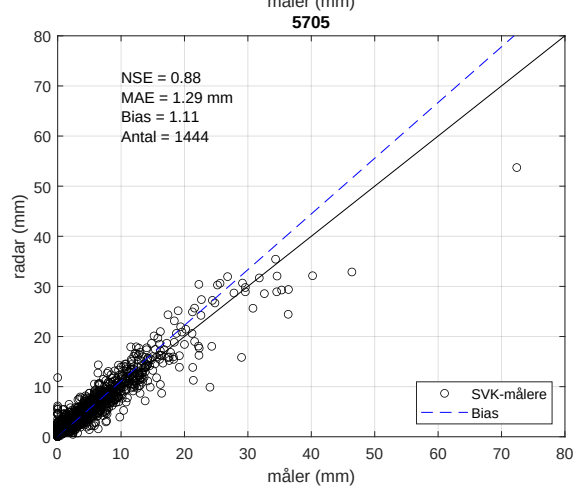
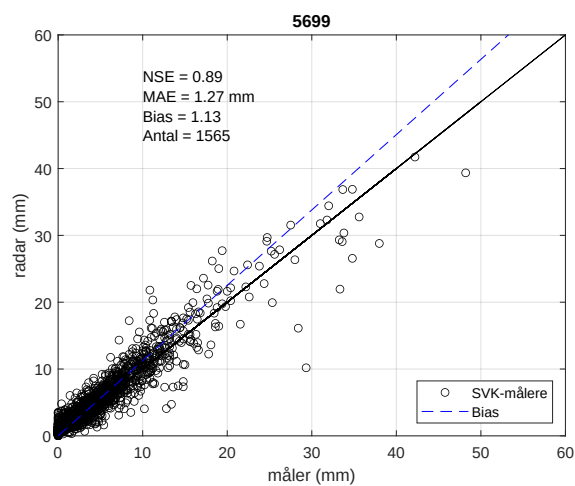
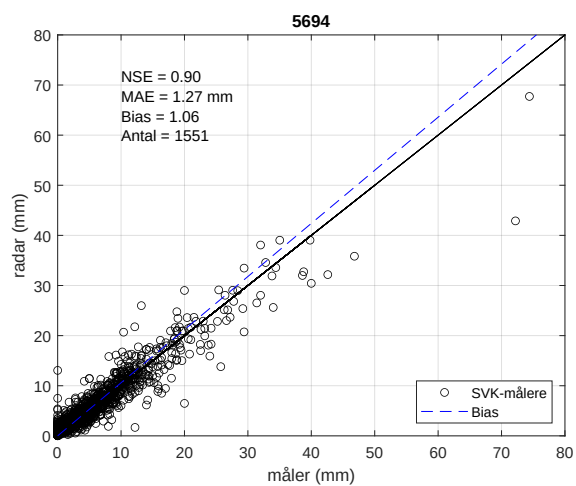
Det overstående data er fra før perioderne substitueres som i beskrevet tabel 8.1.

D | Sammenhæng mellem individuel målere og radarpixels

I dette bilag er projektområdets otte regnmålere sammenlignet individuelt med de tilsvarende radarpixel. Der er generelt en lidt svagere sammenhæng mellem måler 5725 og radarproduktet. Der er en svag bias mod at radaren overestimere ved alle målere.

På figurene er dage med nedbrud og fejl på målerne fjernet, samt de fem bortkastede dage fra radarserien omtalt i Bilag C.





E | LTS-regndage

De 602 udvalgte regndage medtaget i LTS-simuleringerne					
23-01-2008	03-12-2008	08-08-2010	21-07-2011	25-06-2012	14-08-2013
26-01-2008	04-12-2008	11-08-2010	22-07-2011	29-06-2012	17-08-2013
06-02-2008	09-12-2008	12-08-2010	23-07-2011	06-07-2012	10-09-2013
20-03-2008	18-01-2009	14-08-2010	24-07-2011	26-08-2012	15-09-2013
21-03-2008	07-02-2009	17-08-2010	31-07-2011	30-08-2012	18-09-2013
01-04-2008	16-03-2009	14-09-2010	01-08-2011	24-09-2012	13-10-2013
05-04-2008	26-03-2009	20-09-2010	07-08-2011	25-09-2012	19-10-2013
30-04-2008	27-03-2009	24-09-2010	08-08-2011	26-09-2012	20-10-2013
01-05-2008	07-04-2009	07-10-2010	09-08-2011	05-10-2012	21-10-2013
02-05-2008	08-04-2009	22-10-2010	11-08-2011	08-10-2012	31-10-2013
19-05-2008	08-05-2009	23-10-2010	14-08-2011	09-10-2012	02-11-2013
13-06-2008	20-05-2009	04-11-2010	27-08-2011	12-10-2012	04-11-2013
16-06-2008	22-05-2009	19-11-2010	28-08-2011	13-10-2012	09-11-2013
20-06-2008	27-05-2009	22-11-2010	05-09-2011	15-10-2012	10-11-2013
27-06-2008	04-06-2009	23-11-2010	06-09-2011	04-11-2012	29-11-2013
06-07-2008	03-08-2009	14-01-2011	08-09-2011	05-11-2012	05-12-2013
07-07-2008	10-08-2009	15-01-2011	11-09-2011	11-11-2012	08-12-2013
11-07-2008	15-08-2009	17-01-2011	06-10-2011	25-11-2012	13-12-2013
12-07-2008	03-09-2009	04-02-2011	09-10-2011	09-12-2012	27-12-2013
18-07-2008	03-10-2009	06-02-2011	10-10-2011	15-12-2012	02-01-2014
03-08-2008	16-10-2009	10-03-2011	18-10-2011	17-12-2012	09-01-2014
04-08-2008	24-10-2009	17-03-2011	03-12-2011	23-12-2012	11-01-2014
05-08-2008	26-10-2009	31-03-2011	08-12-2011	03-01-2013	17-01-2014
07-08-2008	02-11-2009	12-04-2011	13-12-2011	08-01-2013	01-02-2014
08-08-2008	04-11-2009	01-05-2011	14-12-2011	29-01-2013	20-02-2014
10-08-2008	09-11-2009	03-05-2011	01-01-2012	30-01-2013	16-03-2014
18-08-2008	13-11-2009	17-05-2011	03-01-2012	25-04-2013	21-03-2014
23-08-2008	18-11-2009	22-05-2011	04-01-2012	08-05-2013	17-04-2014
27-08-2008	06-12-2009	28-05-2011	07-01-2012	19-05-2013	07-05-2014
05-09-2008	25-12-2009	06-06-2011	18-01-2012	21-05-2013	08-05-2014
06-09-2008	19-02-2010	07-06-2011	19-01-2012	22-05-2013	14-05-2014
20-09-2008	25-02-2010	08-06-2011	21-01-2012	25-05-2013	18-05-2014
26-10-2008	20-03-2010	16-06-2011	16-02-2012	26-05-2013	11-06-2014
10-11-2008	26-03-2010	19-06-2011	13-04-2012	13-06-2013	20-06-2014
11-11-2008	27-03-2010	22-06-2011	24-04-2012	01-07-2013	24-06-2014
14-11-2008	04-04-2010	02-07-2011	25-04-2012	30-07-2013	26-06-2014
18-11-2008	21-04-2010	03-07-2011	01-06-2012	31-07-2013	28-06-2014
29-11-2008	30-04-2010	08-07-2011	08-06-2012	08-08-2013	29-06-2014
01-12-2008	15-06-2010	11-07-2011	16-06-2012	10-08-2013	14-07-2014
02-12-2008	02-08-2010	14-07-2011	22-06-2012	13-08-2013	03-08-2014

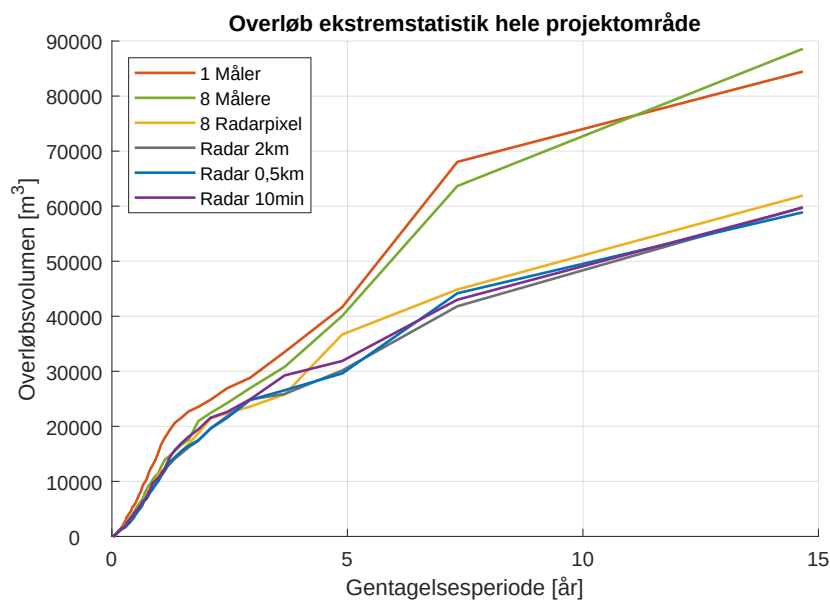
04-08-2014	09-07-2015	22-08-2016	13-09-2017	09-02-2019	16-02-2020
08-08-2014	19-07-2015	28-08-2016	14-09-2017	10-02-2019	20-02-2020
10-08-2014	04-08-2015	04-09-2016	15-09-2017	20-02-2019	22-02-2020
12-08-2014	11-08-2015	30-09-2016	17-09-2017	03-03-2019	24-02-2020
17-08-2014	16-08-2015	02-10-2016	19-09-2017	04-03-2019	25-02-2020
29-08-2014	15-09-2015	03-10-2016	28-09-2017	05-03-2019	14-07-2020
30-08-2014	20-09-2015	10-10-2016	02-10-2017	06-03-2019	15-07-2020
31-08-2014	22-09-2015	15-10-2016	04-10-2017	12-03-2019	23-07-2020
09-09-2014	23-09-2015	20-10-2016	01-11-2017	15-03-2019	18-08-2020
13-09-2014	13-10-2015	21-10-2016	22-11-2017	16-03-2019	19-08-2020
14-09-2014	07-11-2015	04-11-2016	27-11-2017	27-04-2019	20-08-2020
01-10-2014	09-11-2015	05-11-2016	28-11-2017	09-05-2019	27-08-2020
07-10-2014	10-11-2015	11-01-2017	06-12-2017	17-05-2019	28-08-2020
12-10-2014	11-11-2015	20-02-2017	11-12-2017	26-05-2019	29-08-2020
13-10-2014	16-11-2015	22-02-2017	14-12-2017	02-06-2019	30-08-2020
14-10-2014	17-11-2015	23-02-2017	24-12-2017	08-06-2019	25-09-2020
16-10-2014	18-11-2015	25-02-2017	30-12-2017	11-06-2019	04-10-2020
17-10-2014	21-11-2015	18-03-2017	03-01-2018	12-06-2019	05-10-2020
19-10-2014	22-11-2015	20-03-2017	15-01-2018	18-06-2019	07-10-2020
21-10-2014	28-11-2015	11-04-2017	27-01-2018	04-07-2019	08-10-2020
05-11-2014	29-11-2015	15-04-2017	31-01-2018	06-07-2019	21-10-2020
24-11-2014	12-12-2015	26-04-2017	09-03-2018	08-07-2019	25-10-2020
07-12-2014	13-12-2015	28-04-2017	12-03-2018	22-07-2019	02-11-2020
12-12-2014	14-12-2015	29-04-2017	03-04-2018	28-07-2019	15-12-2020
20-12-2014	22-12-2015	09-05-2017	25-04-2018	01-08-2019	22-12-2020
21-12-2014	09-02-2016	11-05-2017	26-05-2018	18-08-2019	27-12-2020
22-12-2014	10-02-2016	30-05-2017	28-05-2018	28-08-2019	06-01-2021
24-12-2014	21-02-2016	04-06-2017	22-06-2018	31-08-2019	19-01-2021
25-12-2014	02-03-2016	06-06-2017	18-07-2018	04-09-2019	22-01-2021
09-01-2015	05-03-2016	07-06-2017	01-08-2018	06-09-2019	16-02-2021
10-01-2015	06-03-2016	15-06-2017	11-08-2018	10-09-2019	11-03-2021
14-01-2015	30-03-2016	16-06-2017	12-08-2018	11-09-2019	12-03-2021
15-01-2015	05-04-2016	22-06-2017	13-08-2018	17-09-2019	13-03-2021
20-01-2015	25-04-2016	24-06-2017	14-08-2018	18-09-2019	05-04-2021
26-01-2015	26-04-2016	29-06-2017	24-08-2018	27-09-2019	11-04-2021
20-02-2015	30-05-2016	30-06-2017	25-08-2018	02-10-2019	09-05-2021
21-02-2015	31-05-2016	03-07-2017	27-08-2018	08-10-2019	13-05-2021
29-03-2015	16-06-2016	14-07-2017	24-09-2018	11-10-2019	25-05-2021
30-03-2015	17-06-2016	16-07-2017	02-10-2018	14-10-2019	26-05-2021
31-03-2015	23-06-2016	20-07-2017	06-10-2018	16-10-2019	27-05-2021
12-04-2015	01-07-2016	21-07-2017	22-10-2018	19-10-2019	30-06-2021
03-05-2015	02-07-2016	23-07-2017	23-10-2018	02-11-2019	01-07-2021
05-05-2015	03-07-2016	30-07-2017	11-11-2018	16-11-2019	06-07-2021
12-05-2015	05-07-2016	03-08-2017	12-11-2018	22-11-2019	09-07-2021
31-05-2015	06-07-2016	04-08-2017	29-11-2018	08-12-2019	10-07-2021
01-06-2015	08-07-2016	17-08-2017	02-12-2018	04-01-2020	28-07-2021
02-06-2015	10-07-2016	21-08-2017	21-12-2018	09-01-2020	29-07-2021
17-06-2015	12-07-2016	30-08-2017	23-12-2018	12-01-2020	31-07-2021
19-06-2015	18-07-2016	31-08-2017	29-12-2018	14-01-2020	09-08-2021
22-06-2015	30-07-2016	06-09-2017	17-01-2019	30-01-2020	15-08-2021
05-07-2015	02-08-2016	07-09-2017	27-01-2019	09-02-2020	16-08-2021
07-07-2015	03-08-2016	09-09-2017	06-02-2019	11-02-2020	17-08-2021

27-08-2021	20-10-2021	01-01-2022	21-02-2022	29-05-2022	26-08-2022
28-08-2021	21-10-2021	02-01-2022	22-02-2022	30-05-2022	27-08-2022
15-09-2021	06-11-2021	29-01-2022	06-04-2022	31-05-2022	08-09-2022
27-09-2021	25-11-2021	01-02-2022	07-04-2022	01-06-2022	09-09-2022
28-09-2021	26-11-2021	03-02-2022	10-05-2022	12-06-2022	16-09-2022
29-09-2021	01-12-2021	04-02-2022	11-05-2022	19-06-2022	
05-10-2021	03-12-2021	16-02-2022	13-05-2022	20-06-2022	
15-10-2021	10-12-2021	18-02-2022	25-05-2022	25-07-2022	
19-10-2021	31-12-2021	20-02-2022	28-05-2022	05-08-2022	

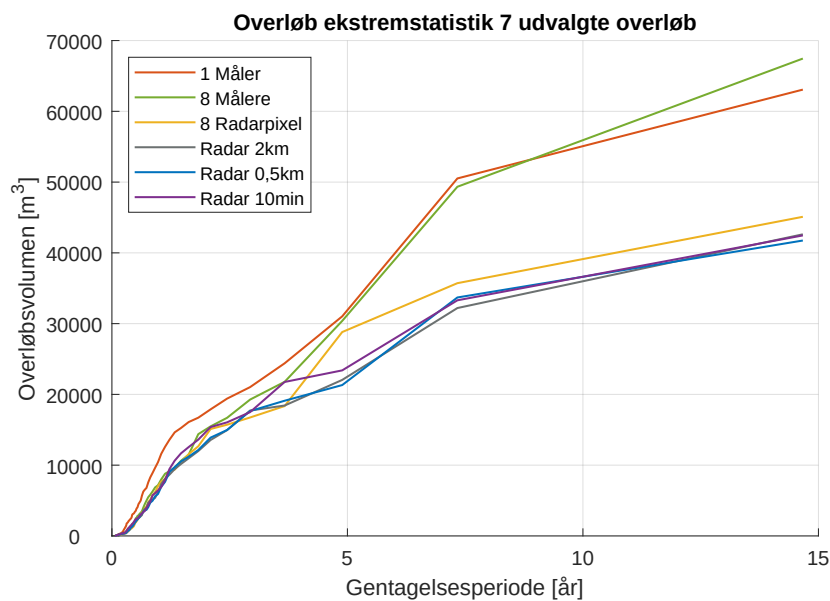
F | Yderligere resultater fra den relative sammenligning

Dette bilag består af yderligere LTS-resultaterne fra projektets relative analyse af model respons.

Komplet ekstremstatistik



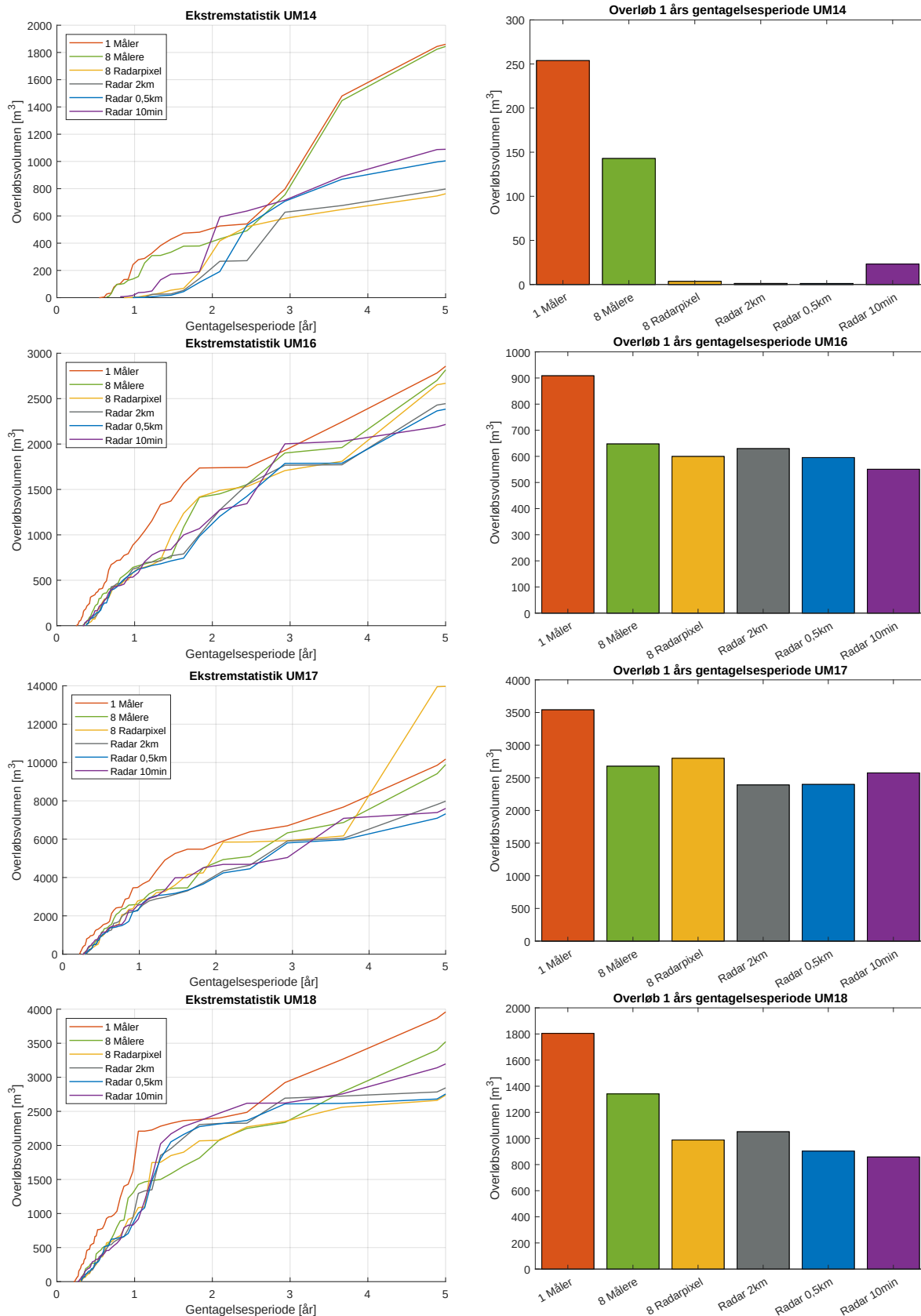
Figur F.1: Komplet ekstremstatistik på total overløbsvolum for hele projektområde.

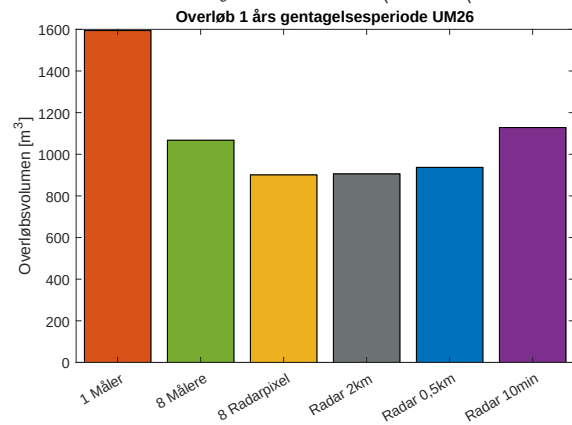
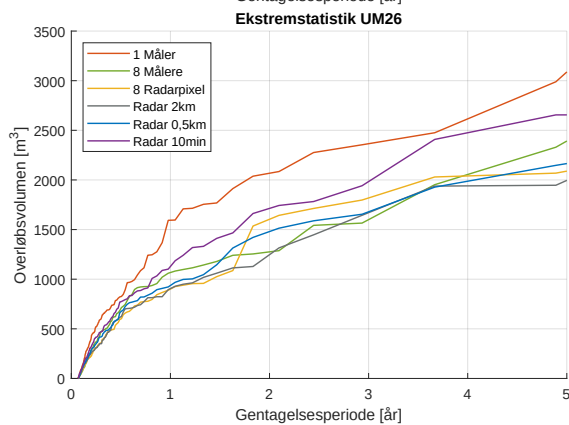
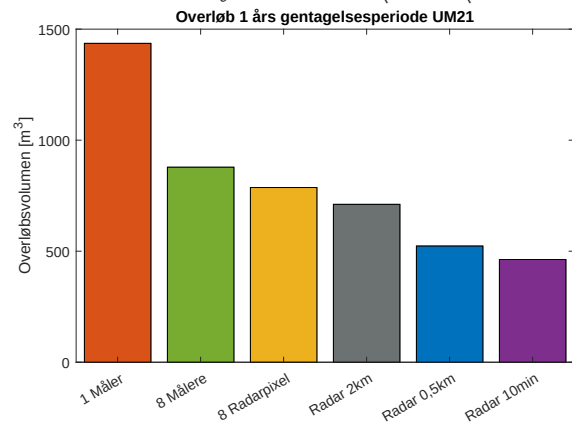
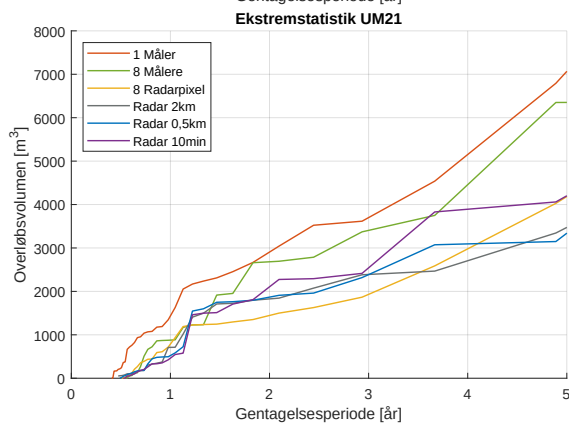
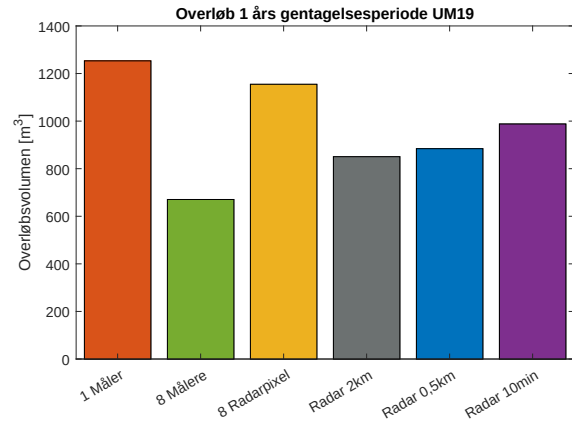
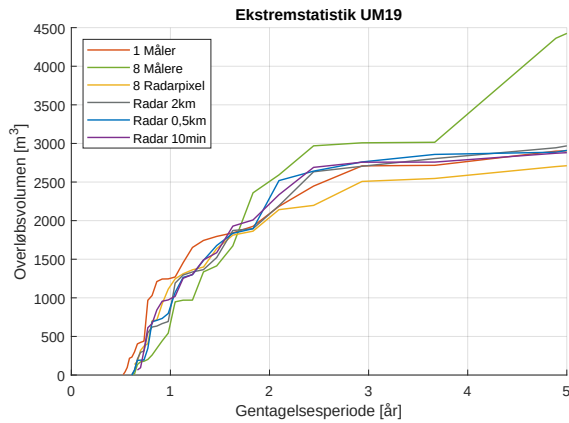


Figur F.2: Komplet ekstremstatistik på total overløbsvolum for 7 udvalgte overløbsbygværker.

Ekstremstatistik for individuelle overløbsbygværker

Ekstremstatistik på de individuelle overløbsbygværker, som er tilknyttet Københavns Kommune samt overløbsvolume ved 1 års gentagelsesperiode kan ses herunder:

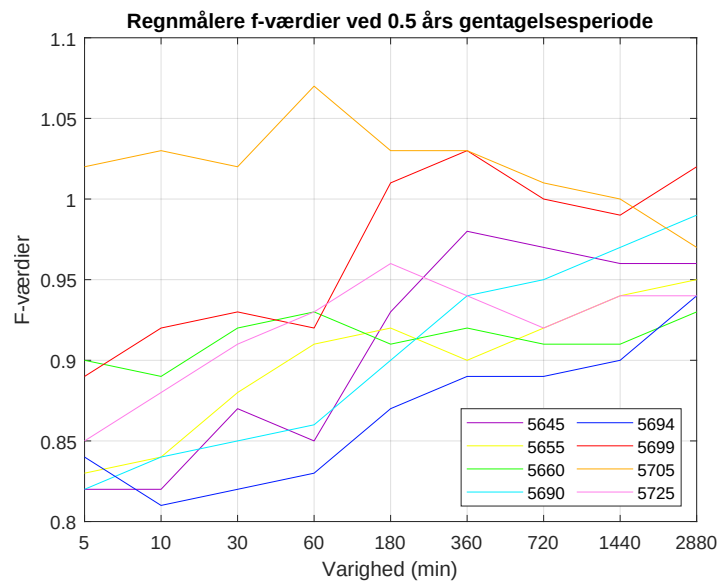




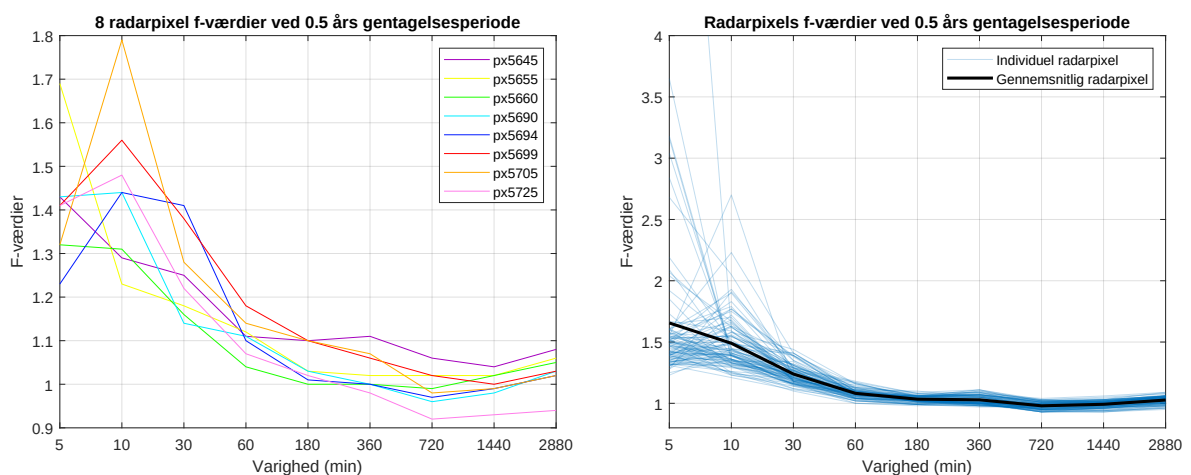
G | F-værdier for ukorrigerede serier

Dette bilag indeholde f-værdier for ukorrigerede serier for gentagelsesperioderne; 0,5, 2, 5 år. Til slut er et eksempel på variation af den regionale model over området.

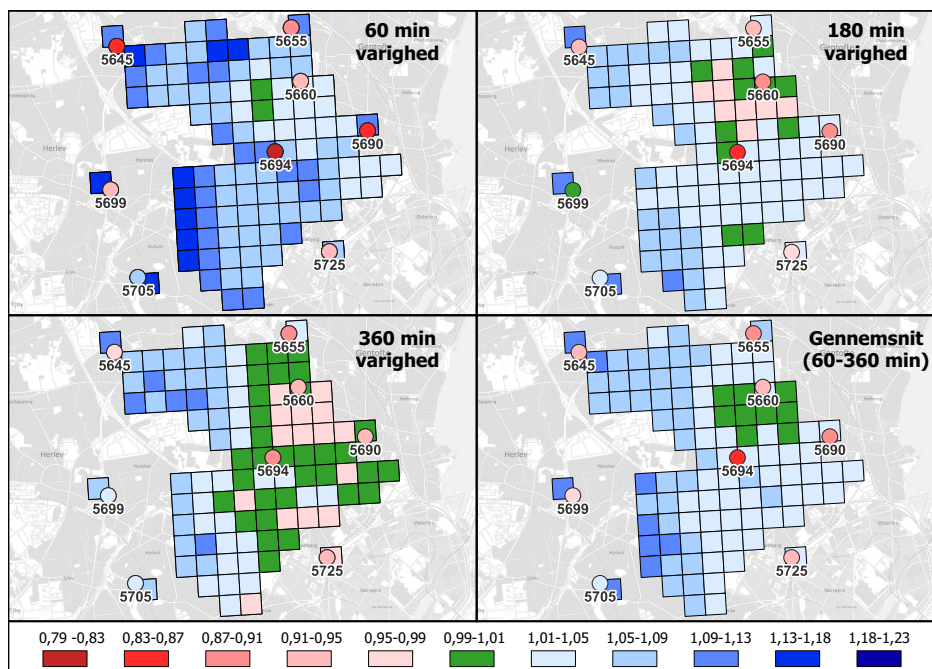
0,5 års gentagelsesperiode



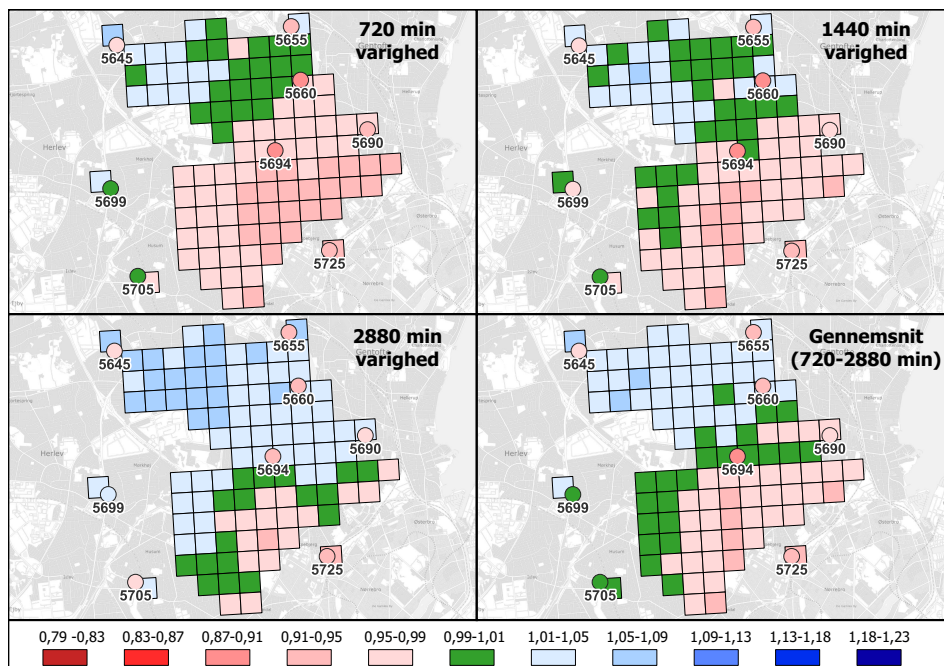
Figur G.1: F-værdier for ukorrigeret regnmåler serier ved 0,5 års gentagelseperiode.



Figur G.2: F-værdier for ukorrigeret radarserier ved 0,5 års gentagelseperiode.

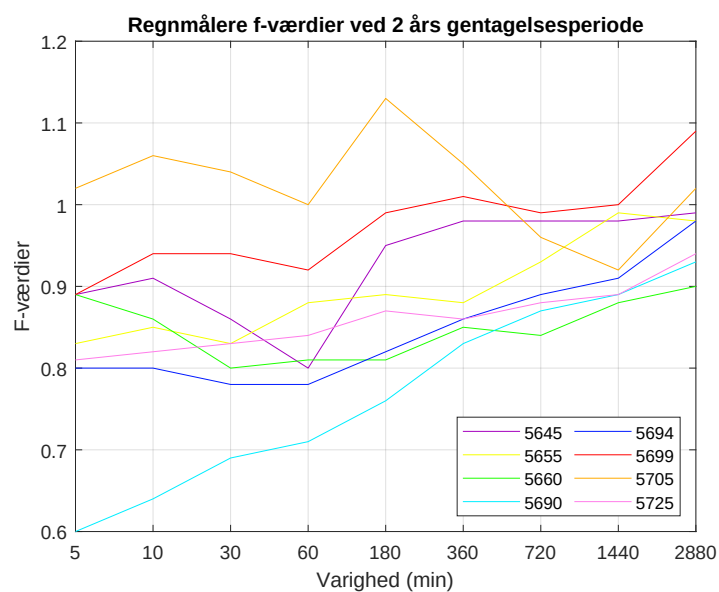


Figur G.3: F-værdier på radarpixels på 60-360 minutters varighed ved 0,5 års gentagelsesperiode.

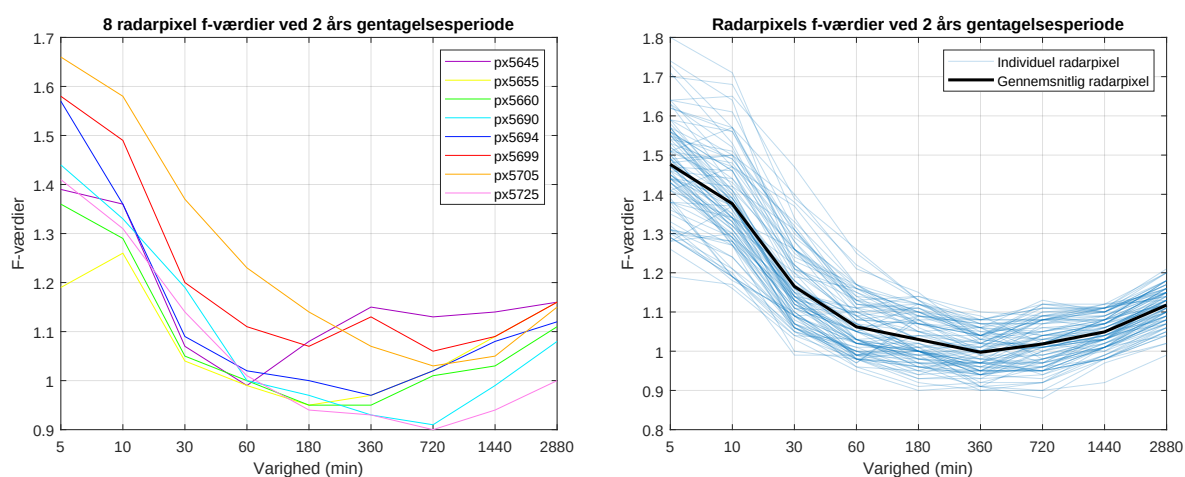


Figur G.4: F-værdier på radarpixels på 720-2880 minutters varighed ved 0,5 års gentagelsesperiode.

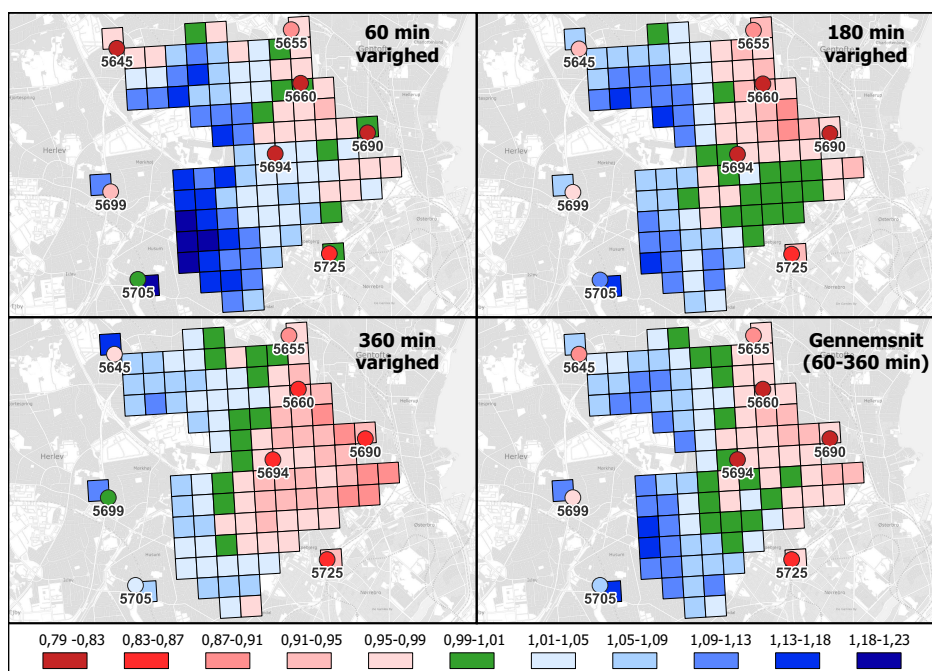
2 års gentagelsesperiode



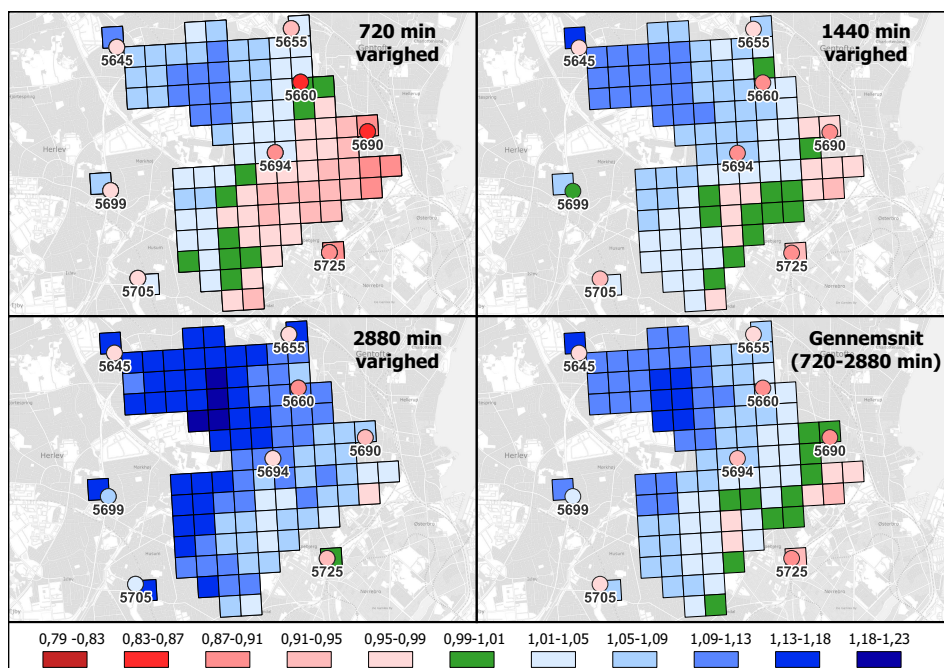
Figur G.5: F-værdier for ukorrigeret regnmåler serier ved 2 års gentagelseperiode.



Figur G.6: F-værdier for ukorrigeret radarserier ved 2 års gentagelseperiode.

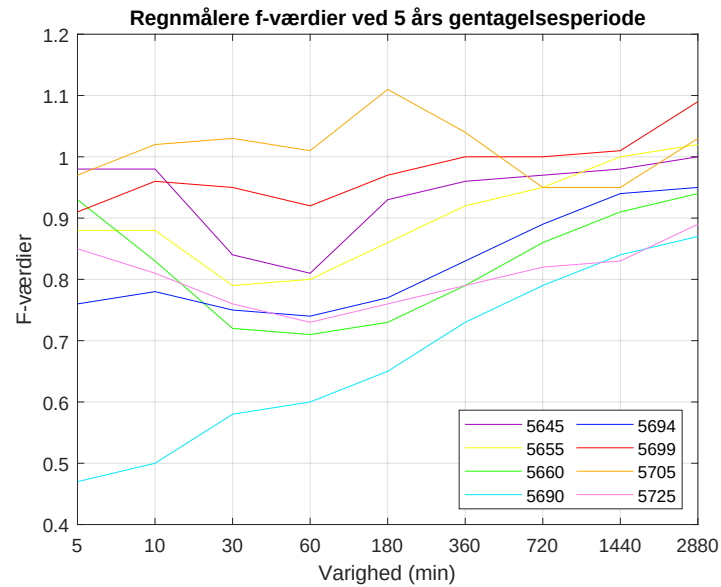


Figur G.7: F-værdier på radarpixels på 60-360 minutters varighed ved 2 års gentagelsesperiode.

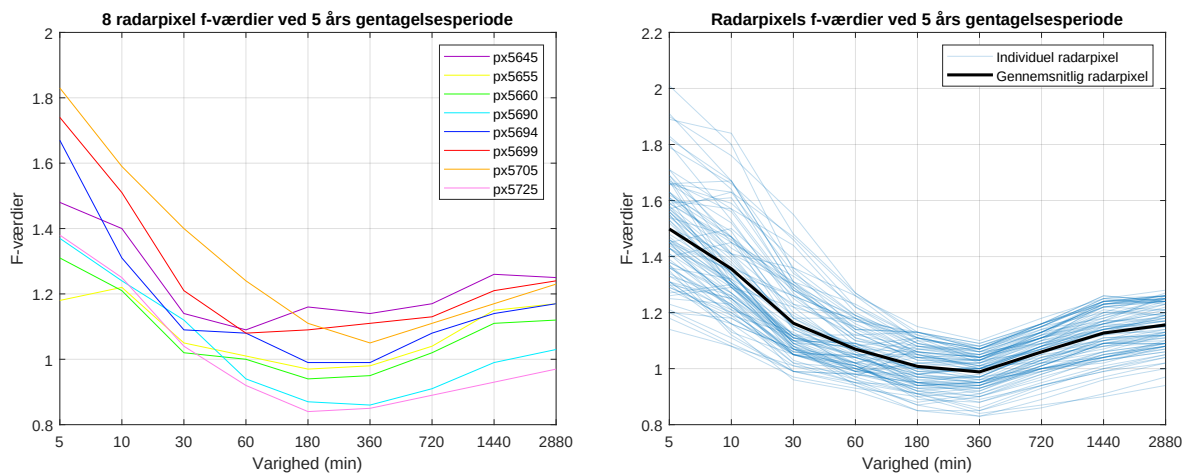


Figur G.8: F-værdier på radarpixels på 720-2880 minutters varighed ved 2 års gentagelsesperiode.

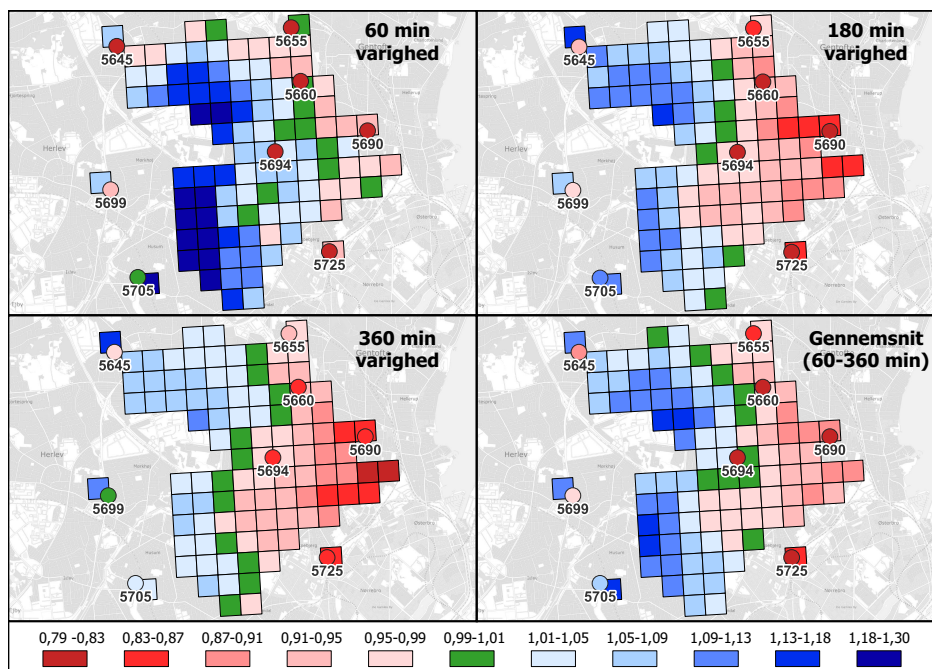
5 års gentagelsesperiode



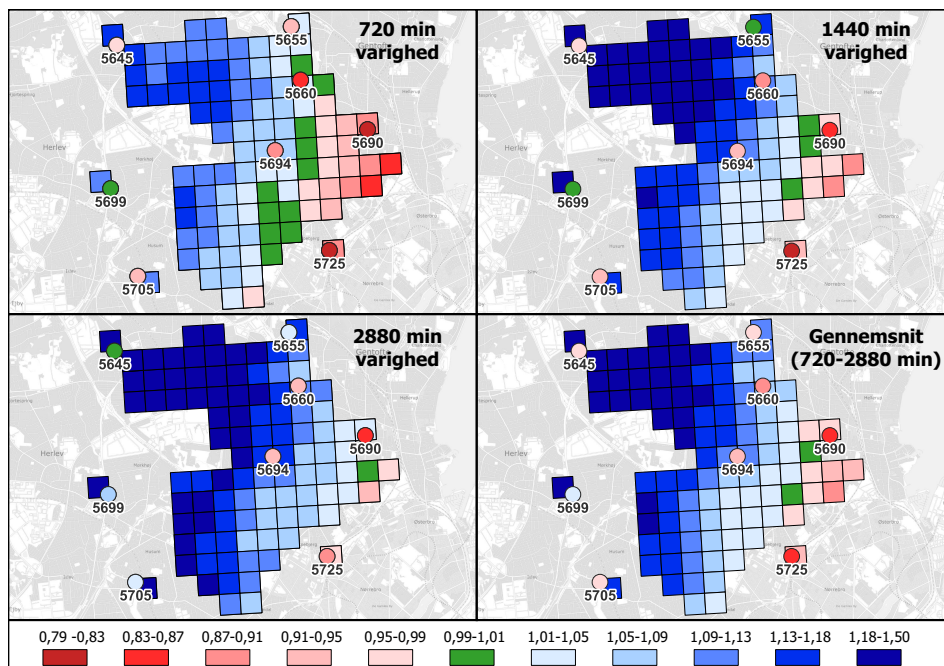
Figur G.9: F-værdier for ukorrigeret regnmåler serier ved 5 års gentagelseperiode.



Figur G.10: F-værdier for ukorrigeret radarserier ved 5 års gentagelseperiode.

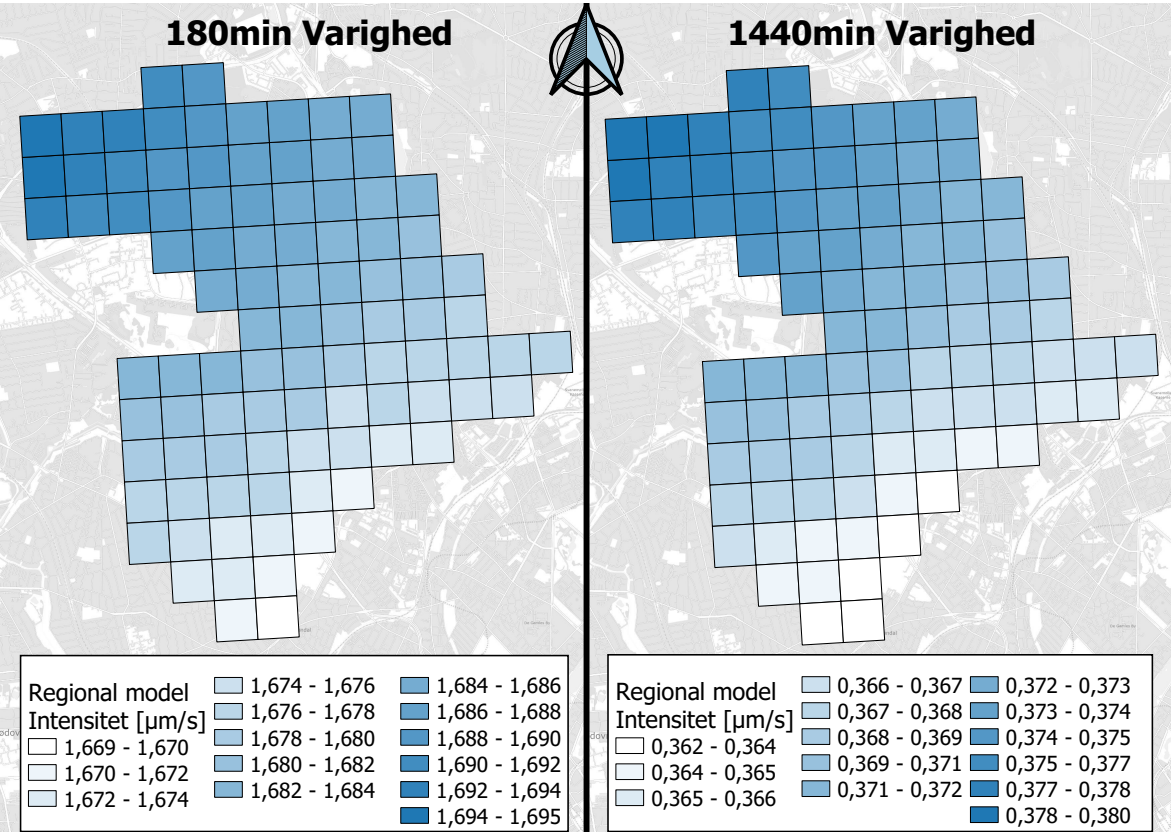


Figur G.11: F-værdier på radarpixels på 60-360 minutters varighed ved 5 års gentagelsesperiode.



Figur G.12: F-værdier på radarpixels på 720-2880 minutters varighed ved 5 års gentagelsesperiode.

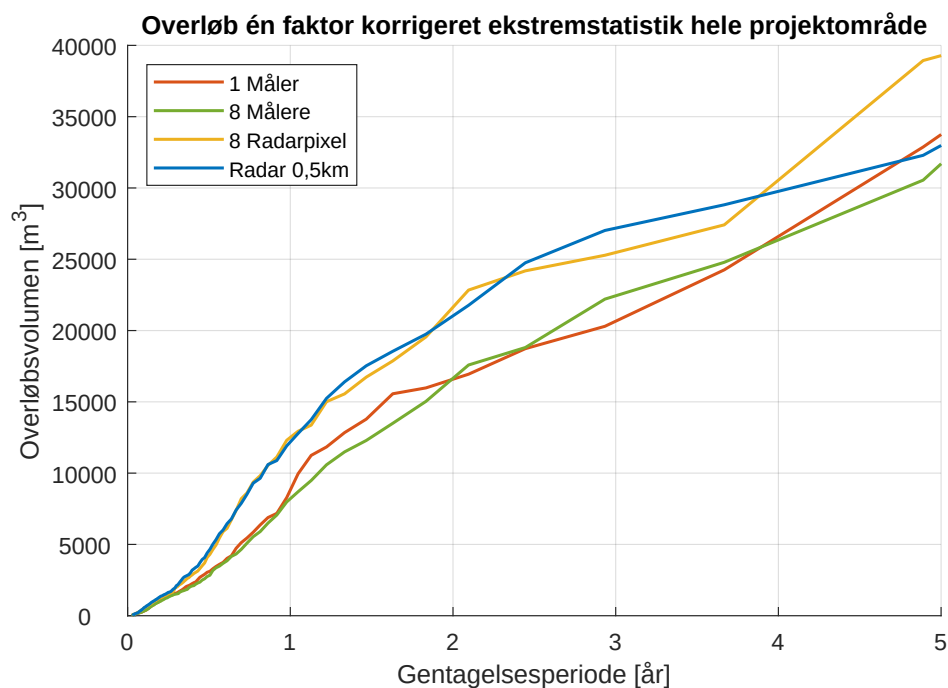
Variation i den regionale model



Figur G.13: Variationen i regnintensitet for projektområdets radarpixels for to varigheder ved 1 års gentagelsesperiode. Beregnet med SVK regnrækkeværktøj [Arnbjerg-Nielsen et al. 2023].

H | Én faktor korrigerig

Dette bilag består af overløbs ekstremstatistikken på korrigeringen af måler og radar regnserierne ved brug af én faktor korrigerig ved 1 års gentagelseperiode.

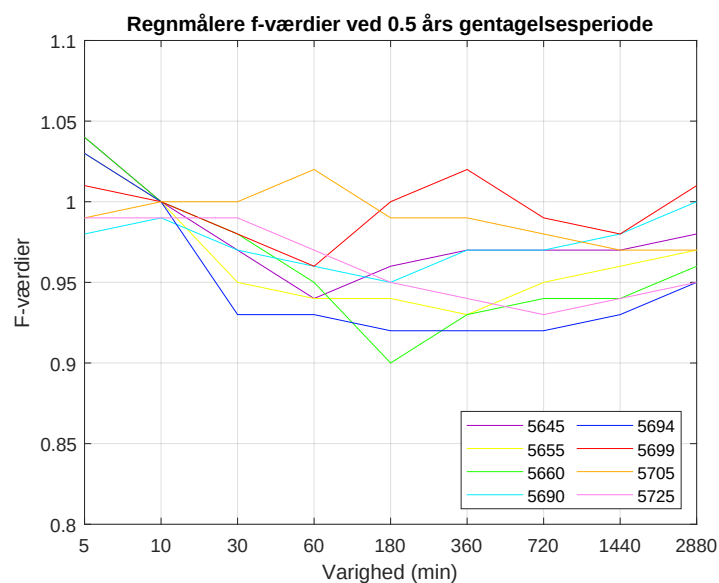


Figur H.1: Ekstremstatistik for overløbsvolumen fra hele projektområdet ved serierne korrigeret med én faktor.

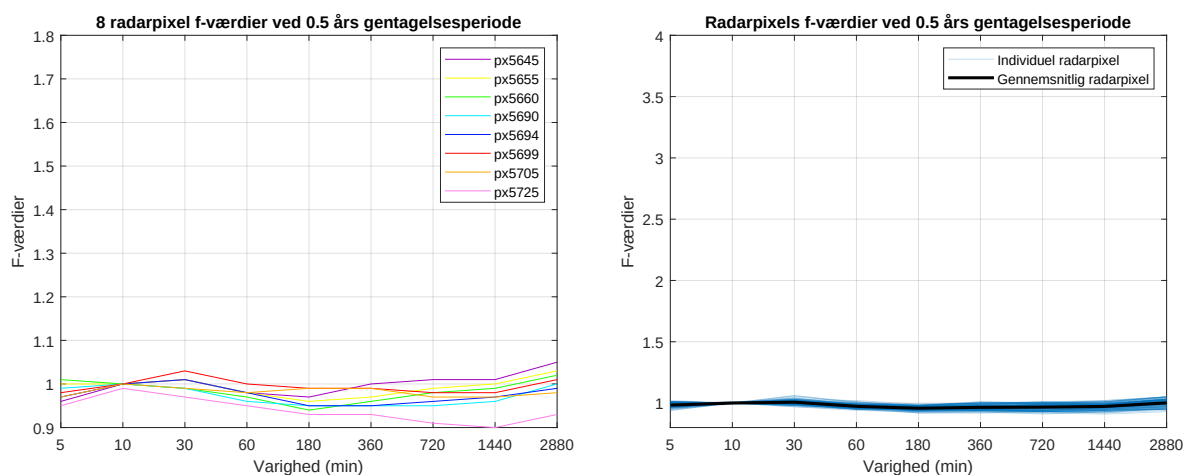
I | Statistisk nudging metode f-værdier

Dette bilag indeholder f-værdier for nudging korrigerede serier for gentagelsesperioderne; 0,5, 2, 5 år.

0,5 års gentagelsesperiode

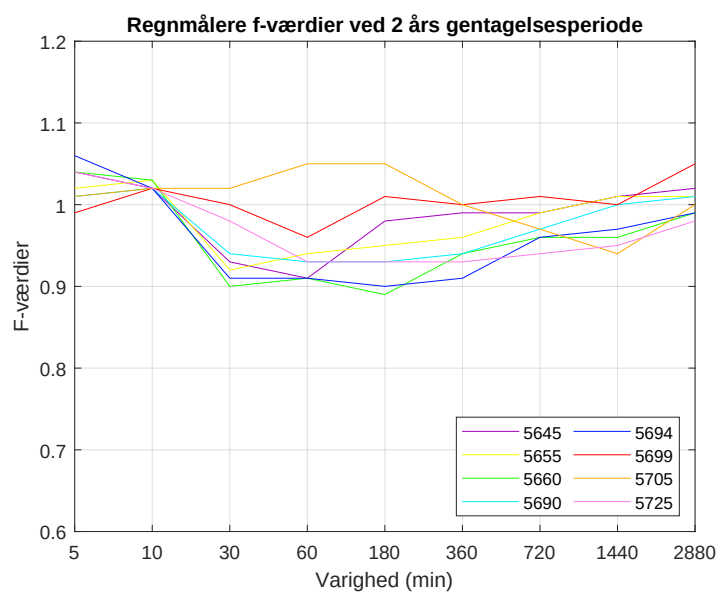


Figur I.1: F-værdier for nudgede regnmåler serier ved 0,5 års gentagelseperiode.

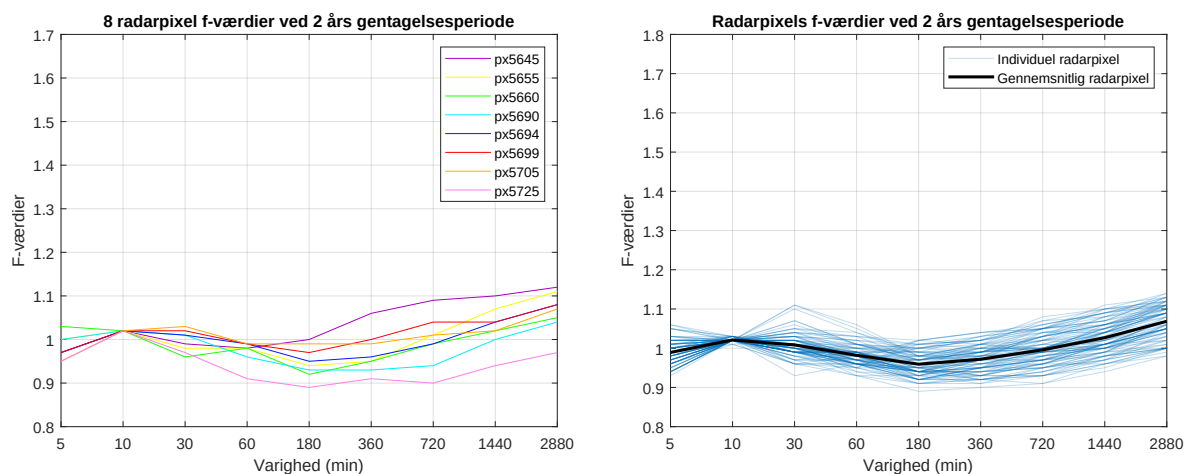


Figur I.2: F-værdier for nudgede radarserier ved 0,5 års gentagelseperiode.

2 års gentagelsesperiode

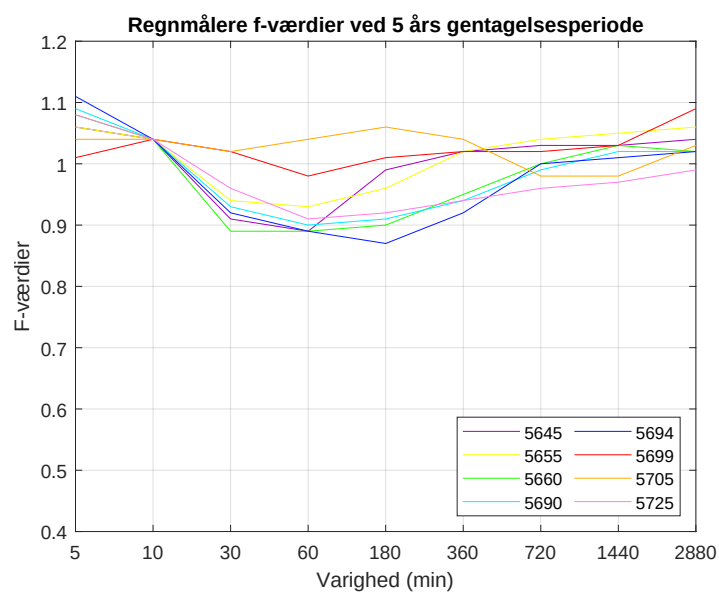


Figur I.3: F-værdier for nudgede regnmåler serier ved 2 års gentagelsesperiode.

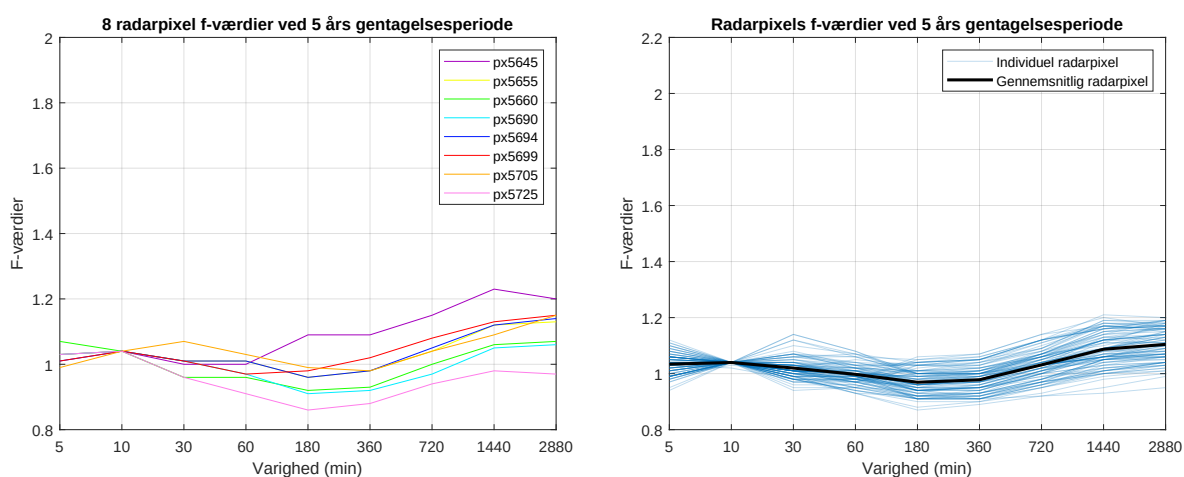


Figur I.4: F-værdier for nudgede radarserier ved 2 års gentagelsesperiode.

5 års gentagelsesperiode



Figur I.5: F-værdier for nudgede regnmåler serier ved 5 års gentagelseperiode.

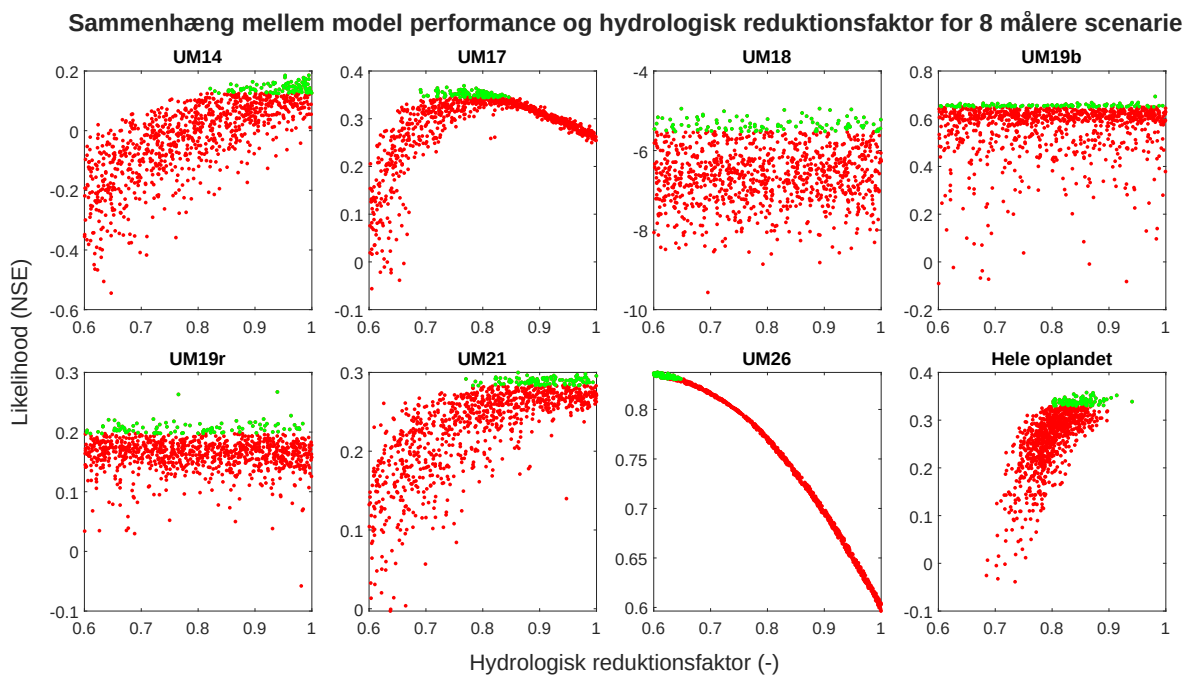


Figur I.6: F-værdier for nudgede radarserier ved 5 års gentagelseperiode.

J | Kalibreringsanalyse

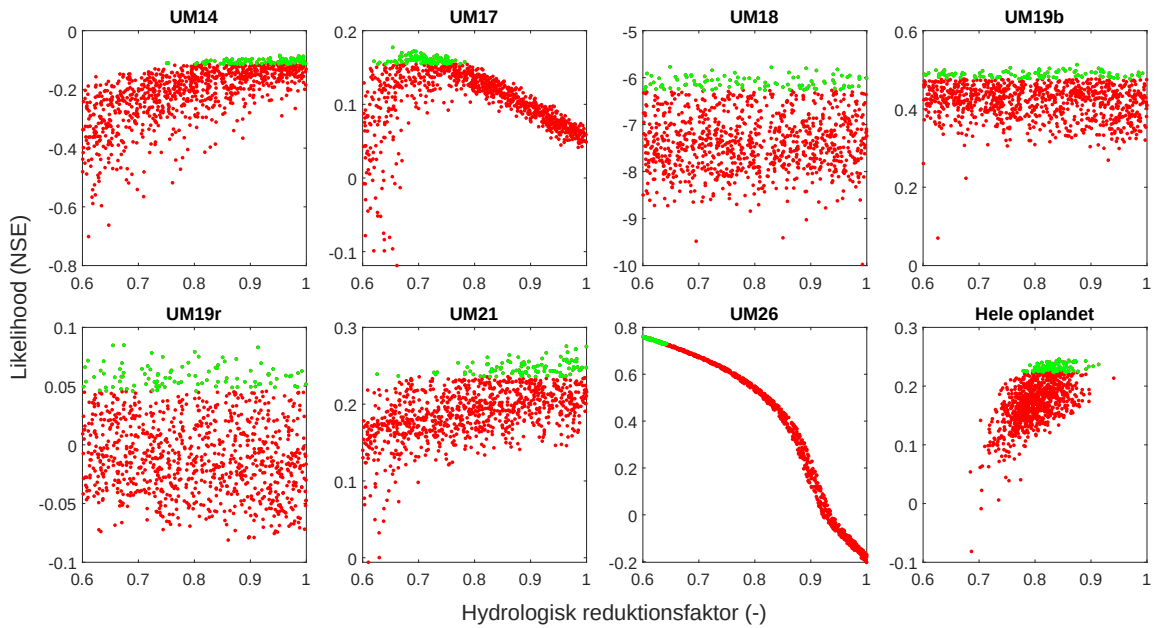
Her er sammenhængen mellem model performance og hydrologisk reduktionsfaktor præsenteret for scenarierne; 8 Målere, 8 Radarpixels og Radar 0,5 km.

8 Målere



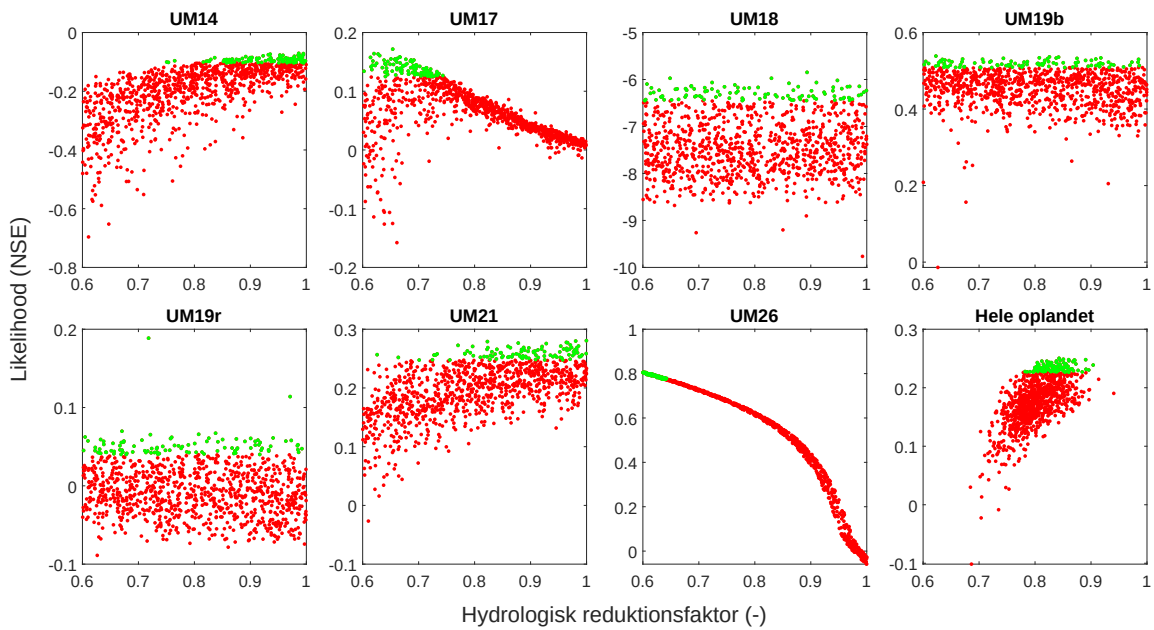
8 Radarpixels

Sammenhæng mellem model performance og hydrologisk reduktionsfaktor for 8 radarpixel scenarie



Radar 0,5km

Sammenhæng mellem model performance og hydrologisk reduktionsfaktor for radar 0,5km scenarie

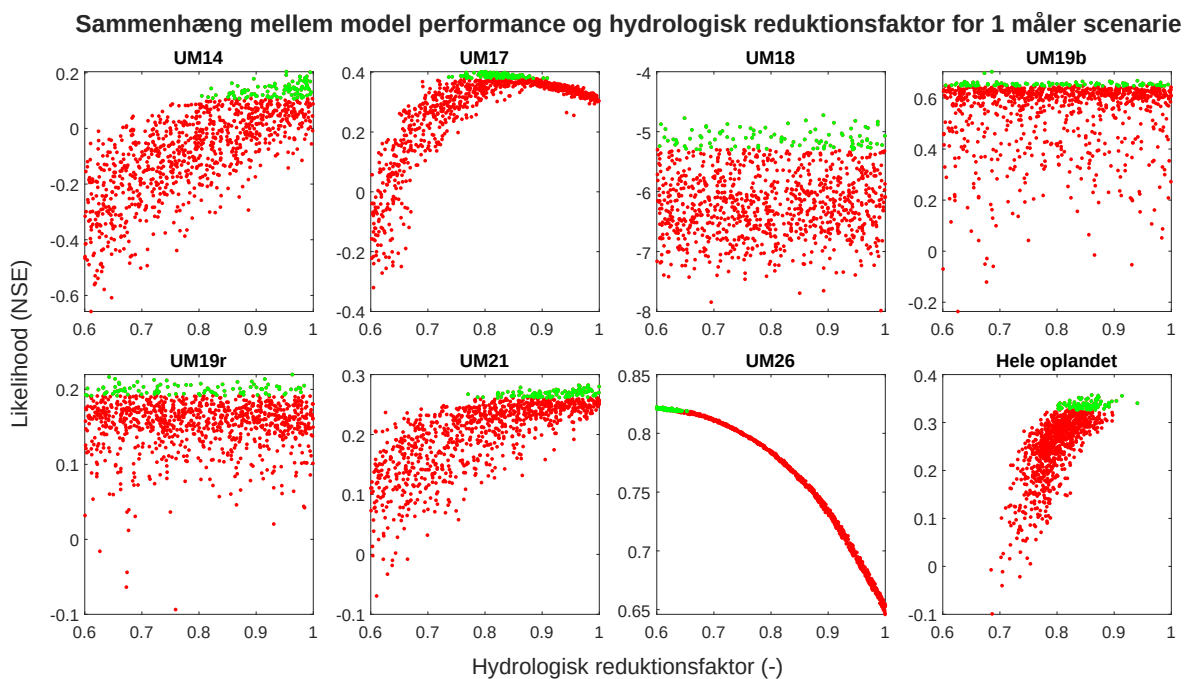


K | Nudged Kalibreringsanalyse

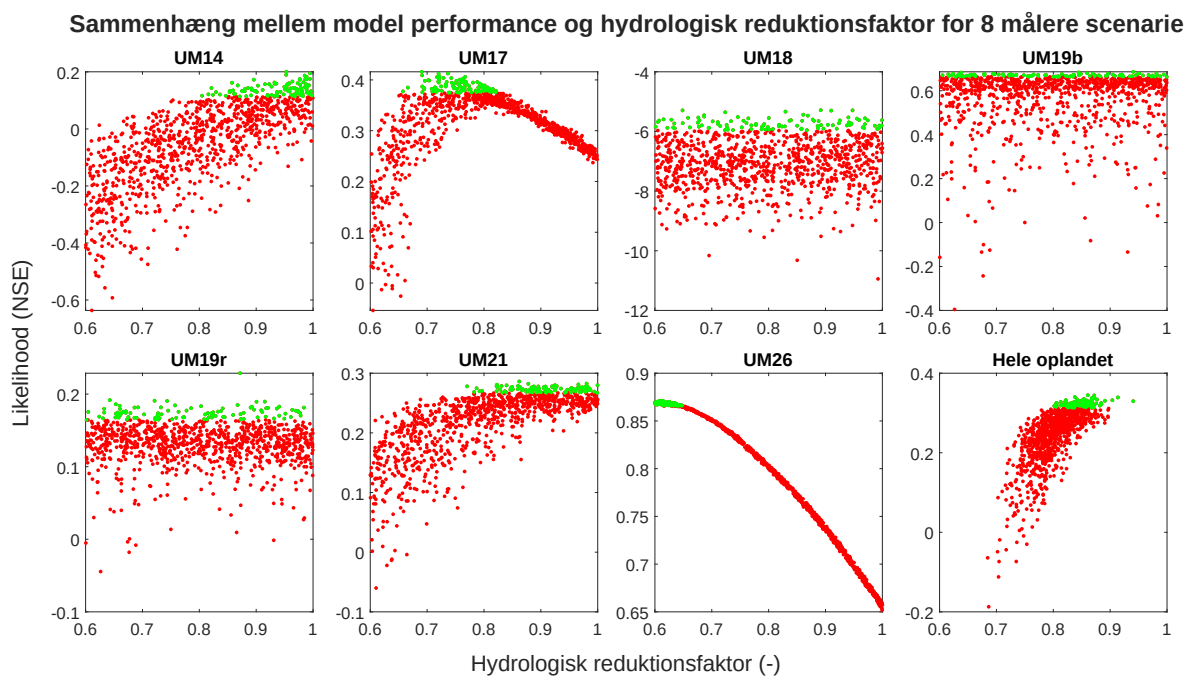
Dette bilag indeholder udvalgte resultater fra den stokastiske kalibreringsanalyse som er udført på serierne korrigeret med den statistisk nudging metode. Her præsenteres resultaterne for alle de fire nudgede regninput scenarier.

Sammenhæng mellem model performance og hydrologisk reduktionsfaktor

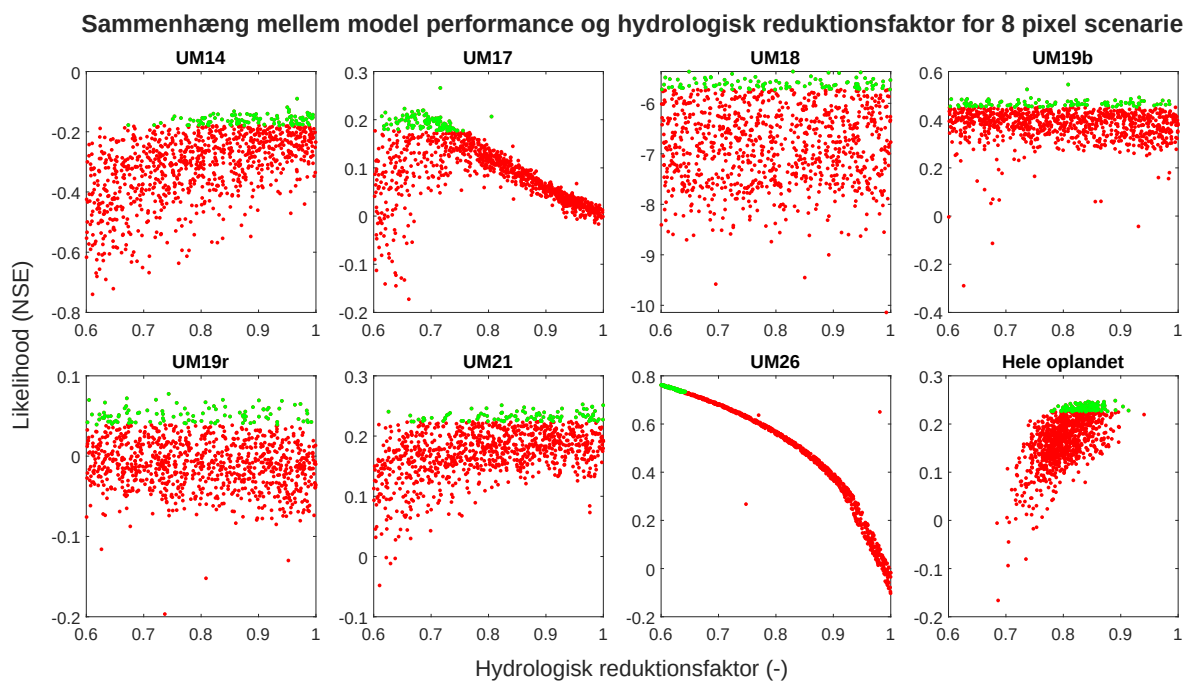
1 Måler



8 Målere

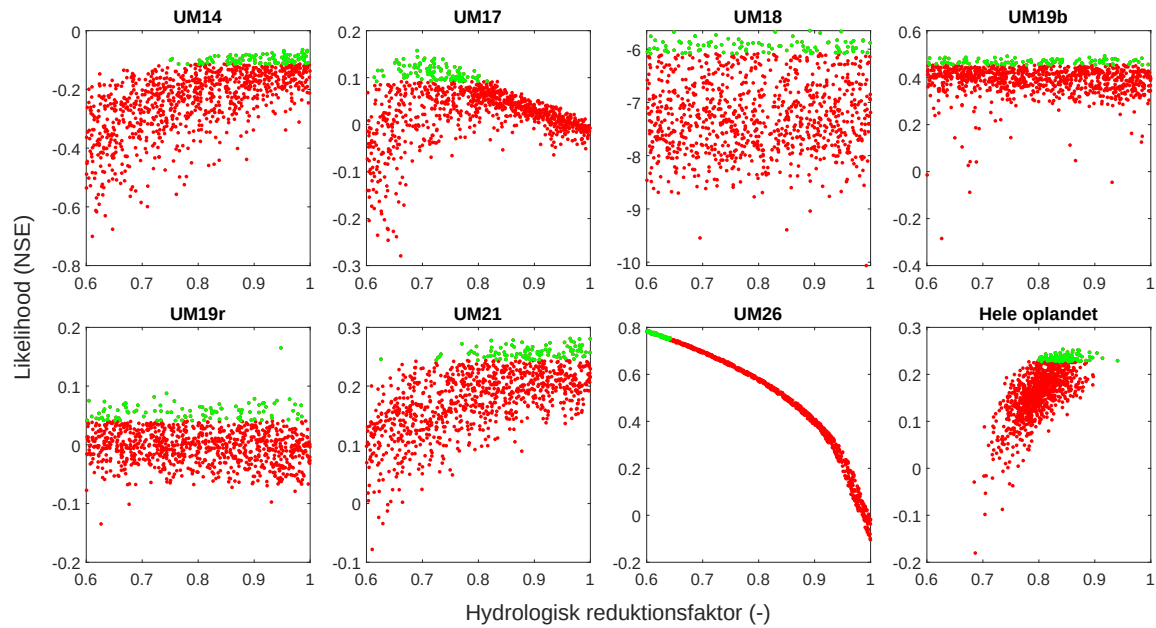


8 Radarpixels

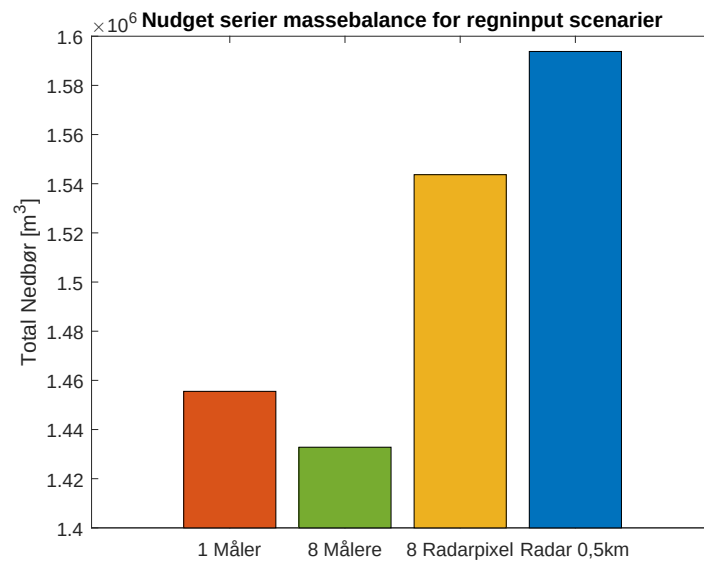


Radar 0,5km

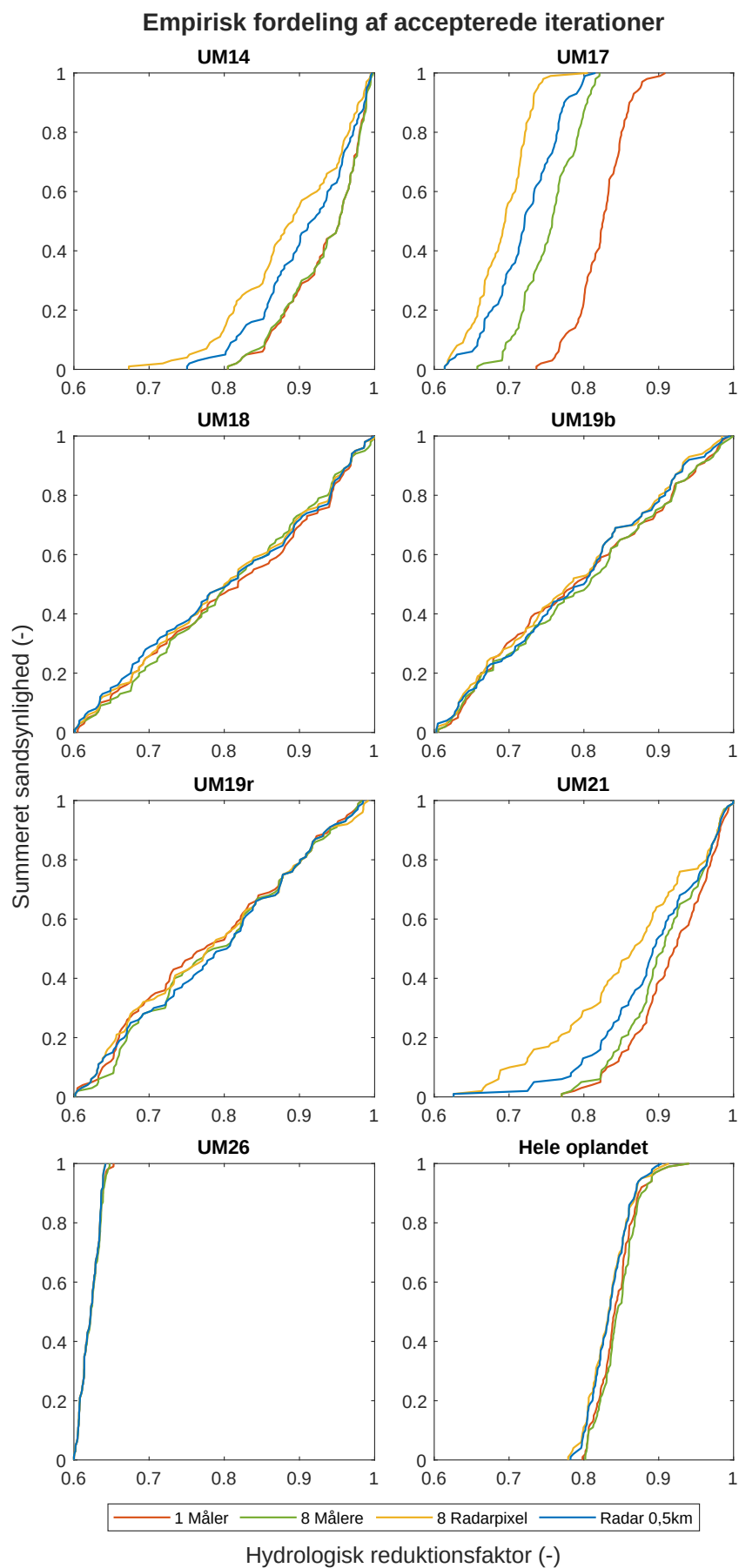
Sammenhæng mellem model performance og hydrologisk reduktionsfaktor for radar 0,5km scenarie



Massebalance for nudgede serier



Figur K.1: Massebalance for de fire regn input scenarier som er blevet korrigeret med statistisk nudging metoden.



Figur K.2: Empirisk fordelinger af hydrologisk reduktionsfaktor for de accepterede iterationer sammenlignet for de fire nudgede regninput scenarier.