Anvendelse af spatialregn til analysering af afløbssystemer

Kandidatspeciale udarbejdet af:

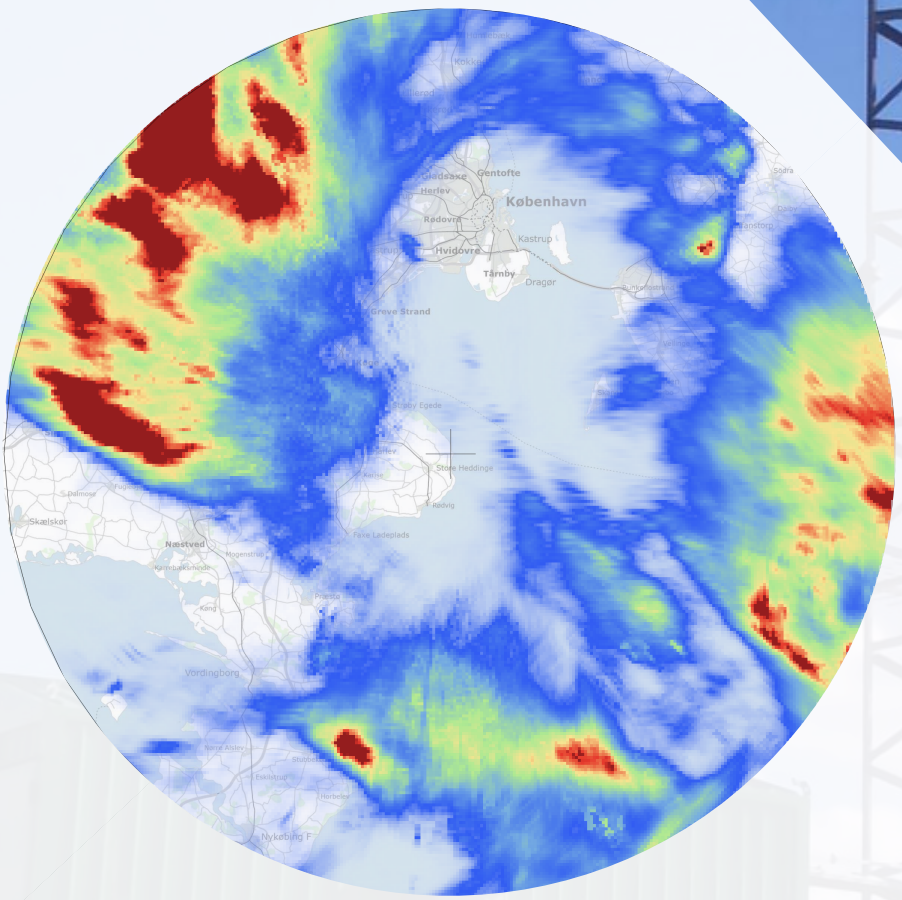
Anders Pinholt Hansen, Emil Bruun Mortensen, Søren Brunsgaard

Aalborg Universitet

Institut for Byggeri, By & Anlæg

Kandidatspeciale Vand & Miljø

Afsluttet 09/06-2023



AALBORG UNIVERSITET

STUDENTERRAPPORT

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Femte studieår på fakultet Engineering & Science
MSc in Water and Environmental Engineering
Thomas Manns Vej 23
9000 Aalborg
https://studieordninger.aau.dk/2021/29/2427

Titel:

Anvendelse af spatialregn til analysering af afløbssystemer

Projektperiode:

01/09-2022 - 09/06-2023

Projekt:

Kandidatspeciale

Deltagere:

Anders Pinholt Hansen
Emil Bruun Mortensen
Søren Brunsgaard

Vejledere:

Søren Liedtke Thorndahl
Christoffer Bang Andersen

Antal sider: 131
Afsluttet: 09/06/2023

Synopsis:

Nærværende studie omhandler anvendelsen af spatialregn til analysering af afløbssystemer. Dette gøres ud fra et caseområde omkring Utterslev Mose i København, og ud fra en hydraulisk model over området.
Studiet er inddelt i fire dele, hvoraf de tre første dele analyserer brugen af spatialregn. Den første del beskæftiger sig udelukkende med nedbørsanalyse, der sammenligner nedbøren målt af udvalgte regnmålere og C-bånds radaren, EKXS, placeret ved Stevns. Den anden del af rapporten omhandler en analyse af modelresponsen ved anvendelse af varierende grad af spatialregn og punktnedbør. Først undersøges en hel regnserie på cirka 15 års varighed. Herefter undersøgses regnseriens ekstremhændelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller mere. Tredje del af rapporten undersøger hvorvidt brugen af en arealreduktionsfaktor vil kunne beskrive regnens spatiale udbredelse, og dermed bruges i dimensioneringssammenhæng.
Igennem analyserne i dette studie fremgår det, at det har en væsentlig effekt at anvende spatialregn til analyse af en hydraulisk model. Analyserne viser generelt, at anvendelse af punktnedbør, som er den nuværende dimensioneringspraksis, formegentligt vil resultere i en overdimensionering af afløbssystemer. denne overdimensionering vil der kunne kompenseres for ved anvendelse af spatialregn.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af Anders Pinholt Hansen, Emil Bruun Mortensen og Søren Brunsgaard på studieretningen Vand & Miljø på Aalborg Universitet. Projektets overordnede tema omhandler den spatiale fordeling af nedbør.

Der skal lyde et stort tak til vejlederne Søren Liedtke Thorndahl og Christoffer Bang Andersen for løbende vejledning, samt hele Vand og Miljøs stab for sparring. Derudover skal der også lyde et stort tak til Daniel L. Brødbæk og Toke Sloth Illeris fra Hovedstadsområdets Forsyningsselskab (HOFOR) for løbende samarbejde samt udlevering af data og model over området omkring Utterslev Mose. Der rettes også stor tak til vores medstuderende, Maiken, Tanja, Frederik og Kristian for gode og konstruktive diskussioner.

Læsevejledning

Igennem rapporten vil der fremkomme kildehenvisninger, som er samlet sidst i rapporten. Kildehenvisningerne er angivet således, at først kommer efternavnet på forfatteren og dernæst udgivelsesåret [Efternavn, år].
Figurer, tabeller og ligninger er nummereret afhængigt af kapitlet disse befinder sig i. Eksempelvis vil første figur i kapitel 1 være angivet med nummer 1.1, første figur i kapitel 2 er nummereret 2.1 og så fremdeles.
Der er tilknyttet en række bilag til rapporten, der indeholder materiale til de forskellige kapitler. Der er henvist til bilagsmaterialet i de kapitler hvor bilagene er relevante.

Anders Pinholt Hansen	Emil Bruun Mortensen	Søren Brunsgaard

Abstract

The present study focuses on the application of spatial rainfall for the analysis of drainage systems. This is done based on a case area around Utterslev Mose in Copenhagen, including a hydraulic model of the area.

The study is divided into four parts, with the first three parts analyzing spatial rainfall. The first part solely deals with precipitation analysis, comparing the rainfall measured by the selected rain gauges and the C-band radar EKXS placed at Stevns. The second part of the report involves an analysis of model response using different spatial rainfall inputs and point rainfall. Initially, a complete rainfall series spanning around 15 years is examined, followed by an investigation of extreme events with a return period of 1 year or more. The third part of the report examines whether the use of an area reduction factor can describe the spatial distribution of rainfall and thus be used in the context of design.

Through the analyses in this study, it is evident that the application of spatial rainfall has a significant effect on the analysis of a hydraulic model. The analyses generally indicate that the use of point rainfall, which is the current design practice, is likely to result in an overestimation of drainage systems. This overestimation can be compensated for by using spatial rainfall.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledning **1**

Kapitel 2 Problemformulering **5**

Kapitel 3 Præsentation af projektområde og tilhørende model **7**
3.1 Lokation 7
3.2 Beskrivelse af hydraulisk model 8

Del I Beskrivelse og analyse af nedbørsdata **12**

Kapitel 4 Beskrivelse af nedbørsdata **13**
4.1 Radardata 13
4.2 Regnmålerdata 16
4.3 Implementering af regninput i hydraulisk model 18
4.4 Opsamling 21

Kapitel 5 Analyse af nedbørsdata **22**
5.1 Statiske parametre til analyser 23
5.2 Validering af radardata 24
5.3 Kalibrering af radardata med lokal biasfaktor 29
5.4 Validering af lokaltkorrigeret radardata 31
5.5 Analyse af maksimale regnintensiteter 32
5.6 Opsamling 35

Del II Analyse af modelrespons ved spatialt regninput **36**

Kapitel 6 Statistisk sammenligning af udvalgte parametre **38**
6.1 Udvælgelse af regnhændelser 38
6.2 Arealmidlet nedbør 39
6.3 Udløbsvolumen fra model 40
6.4 Overløbsvolumen 42
6.5 Opstuvning i brønde 43
6.6 Opsamling 44

Kapitel 7 Modelrespons ved ekstremhændelser **46**
7.1 Udvælgelse af regnhændelser 46

7.2 Arealmidlet nedbør 47
7.3 Udløbsvolumen fra model 49
7.4 Overløbsvolumen 51
7.5 Opstuvning i brønde 53
7.6 Opsamling 64

Del III Statistisk metode til beskrivelse af spatialregn 65

Kapitel 8 Anvendelse af arealreduktionsfaktor 66
8.1 Bestemmelse af arealreduktionsfaktor 66
8.2 Anvendelse i projektområdet 67
8.3 Anvendelse i deloplande 69
8.4 Opsamling 72

Del IV Afrunding af rapport 73

Kapitel 9 Diskussion 74
9.1 Fejlkilder ved brug af radardata 74
9.2 Fejlkilder ved brug af udvalgt regnmåler 75
9.3 Afvigelser ved udvælgelse af ekstremhændelser 76
9.4 Afvigelser ved døgnsimulering 78
9.5 Redigering af regnmålerregnserier 80
9.6 Problematikker ved arealreduktionsfaktoren 82

Kapitel 10 Konklusion 83

Kapitel 11 Perspektivering 85

Litteratur 86

Appendiks A Modelafvigelser 88

Appendiks B Udregning af biasfaktor 91
B.1 Z-R-relation 91
B.2 Bestemmelse af biasfaktor 91

Appendiks C Udfald i regnmålere 93

Appendiks D Udregning af statistiske parametre 94

Appendiks E Sammenligning af nedbørsdata 96
E.1 Undersøgelse af akkumuleret regn i SVK-målere og radar 96
E.2 Døgnsammenligning mellem SVK-målere og radar 98
E.3 Effekt af lokal bias på akkumuleret nedbør over hele perioden 101

Appendiks F Lokal biaskorrigering 102

Appendiks G Resultattabeller- og figurer for regnintensitet 103

G.1 Tabelværdier for maksimal intensitetsværdier 103

Appendiks H Analyse af ekstremhændelser 105
H.1 DTU Rainanalyst 105
H.2 Ekstremhændelser 106

Appendiks I Akkumuleret dagsnedbør i ekstremhændelser 107

Appendiks J Resultattabeller for tidslig variation 110
J.1 Tidslig variation i vandføring i forhold til radar 110
J.2 Tidslig variation i vandføring i forhold til radar 112

Appendiks K Summeret nedbør for ekstremhændelser 114

Appendiks L Figurer og tabelværdier anvendt til analyse af delfyldningsgrad i brønde ved ekstremhændelser 115
L.1 3 regnmålere 115
L.2 5 regnmålere 117
L.3 Tabeller for NSE og bias. 119

Appendiks M Bestemmelse af arealreduktionsfaktor 121
M.1 Udregning af arealreduktionsfaktor 121
M.2 Bestemmelse af koncentrationstid 121
M.3 Bestemmelse af fraktion mellem runoff og overløb 124
M.4 Koncentrationstid for mindre deloplande 125

Appendiks N Resultattabeller for modelparametre ved brug af otte individuelle regninput 127
N.1 Alle regnhændelser med punktnedbør, i forhold til radar 127
N.2 Alle regnhændelser med punktnedbør, i forhold til regnmåler 5694 129

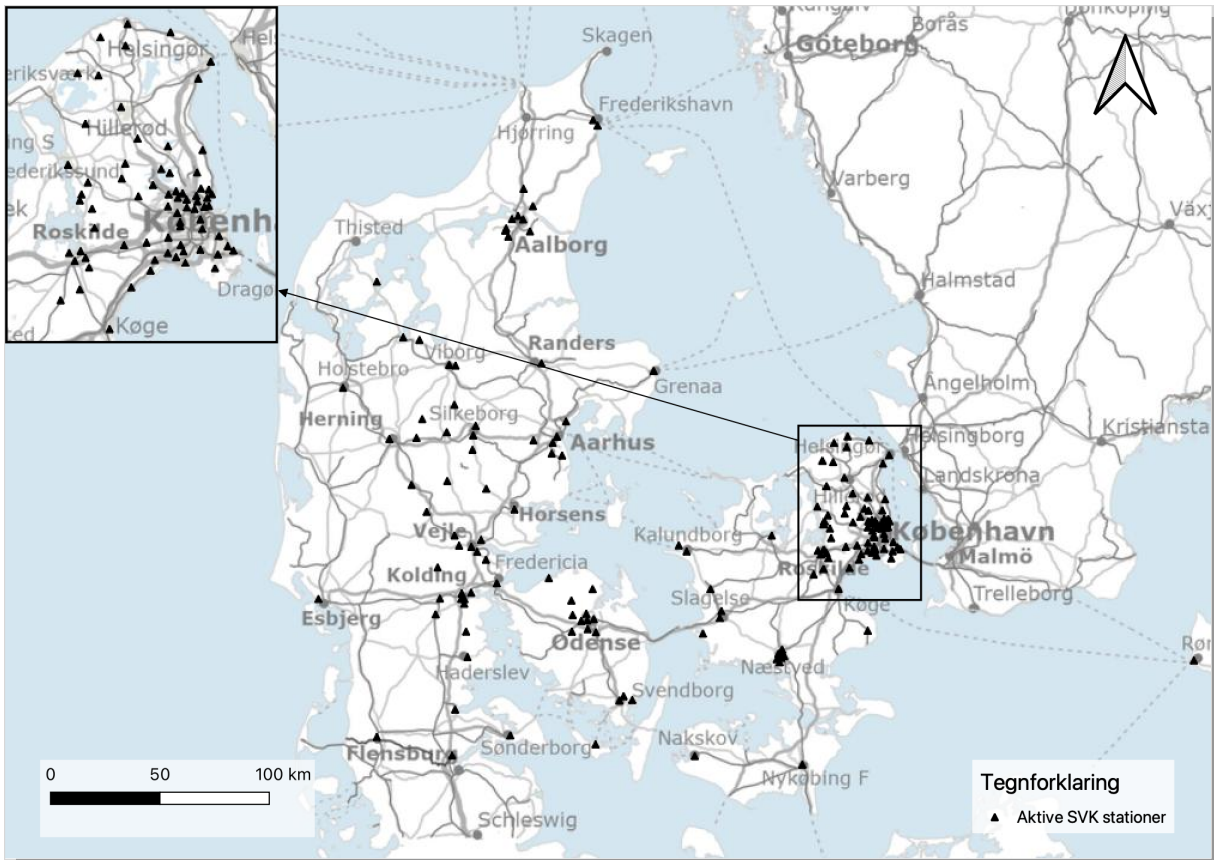
Appendiks O Elektroniske bilag 131

1 Indledning

Klimaforandringer, samt forandringer i nedbørsmønstre, stiller store krav til, hvordan nedbøren håndteres, og dermed store krav til korrekt dimensionering samt analysering af både nuværende- såvel som fremtidige afløbssystemer, således der sikres højst muligt serviceniveau [Harremöes et al., 2005]. Derudover medfører urbaniseringen større befæstede arealer, og dermed et behov for større afløbssystemer, der skal kunne håndtere nedbøren.

I Danmark arbejdes der generelt med tre forskellige beregningsniveauer til dimensionering af afløbssystemer. Beregningsniveau 1 og 2 er de simpleste niveauer, hvor den anvendte nedbør er en kunstig regn, henholdvis regnrækker/regnkurver og CDS regn [Harremöes et al., 2005]. I det tredje niveau bruges historisk regn i en hydraulisk model. Brugen af en hydraulisk model vil være hovedfokus i denne rapport. Regninputtet i den hydrauliske model er typisk en tilrettet historisk regnserie fra en regnmåler, eller en regnserie udarbejdet ved brug af den danske regionalmodel [Gregersen et al., 2014]. Regionalmodellen er et værktøj til at lave regnserier for ekstremregn, tilpasset den geografiske lokation, hvorfor denne bruges generelt.

I Danmark har Spildevandskomiteens regnmålerstyregruppe varetaget driften og udviklingen af det landsdækkende regnmålersystem siden 1979 [Spildevandskomiteen, 2022]. Regnmålersystemet består af vippekarsmålere, der er placereret rundt omkring i Danmark, hvilket er vist på Figur 1.1 på den følgende side. Regnmålersystemet anvendes i dag, som en del af det dimensionsgivende regninput i beregning- og analysering af afløbssystemer.

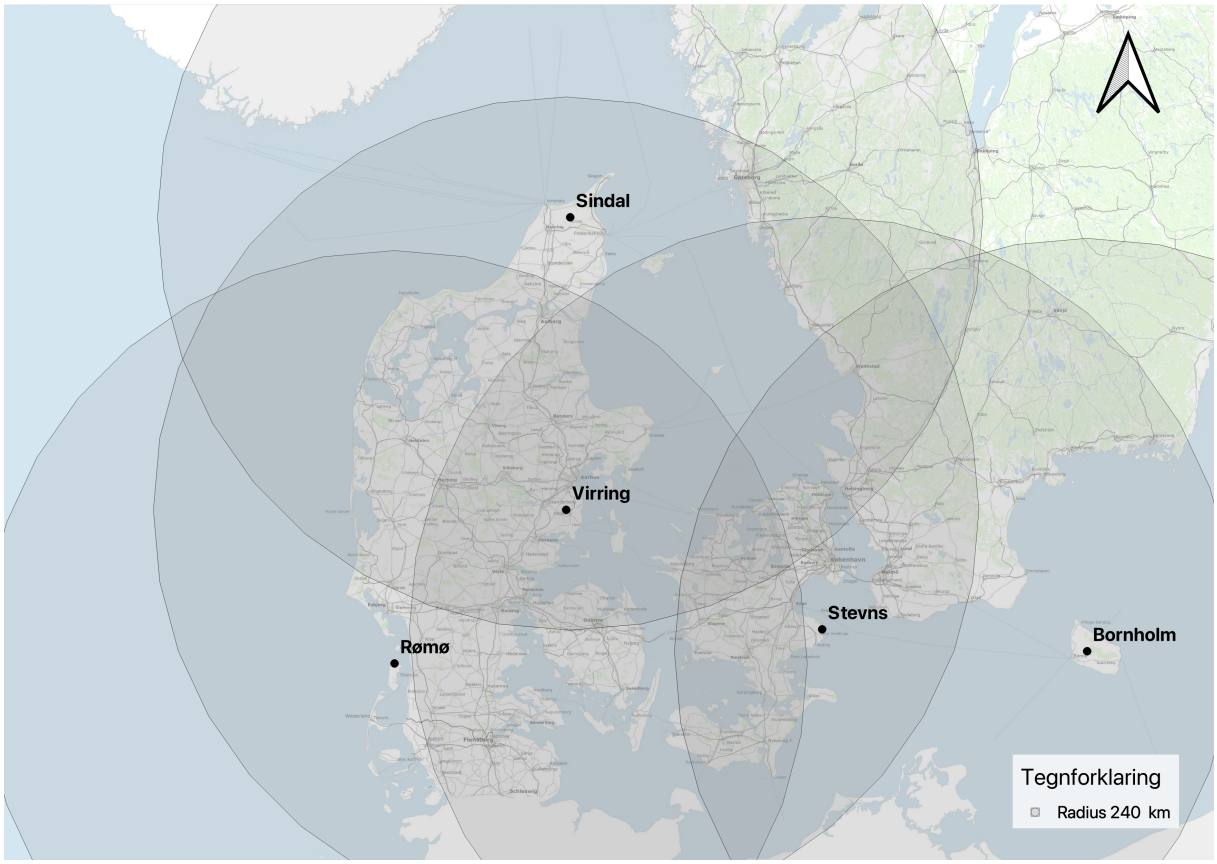


Figur 1.1. Lokation for alle aktive SVK-målestationer i Danmark. [Sarup, 2018]

Det fremgår af ovenstående billede, at det ikke er alle steder, der har en regnmåler i nærheden at referere til. Dette er generelt et problem i Vest- og Nordjylland, samt området mellem Aalborg og Aarhus. I disse tilfælde er normal praksis enten at anvende den nærmeste, såfremt den regnmåler ikke er placeret for langt derfra, eller som oftest gøres der brug af SVK's regneark, der bruger den regionale regnmodel [Gregersen et al., 2014].

En generel udfordring ved dimensionering og analysering af afløbssystemer er, at der anvendes en-dimensionel data for præcist det udvalgte punkt. Det betyder, at den spatiale udbredelse af regnen går tabt. En mulighed for at kompensere for dette, kunne være at bruge flere regnmålere i nærheden, som regninput. Dette er dog kun muligt i ganske få byer, specielt Københavnsområdet, hvilket fremgår af Figur 1.1. I resten af landet er der væsentligt større afstand mellem SVK-regnmålerne, hvorfor de ikke beskriver den spatiale udbredelse af regn, men mere sandsynligt separate regnhændelser.

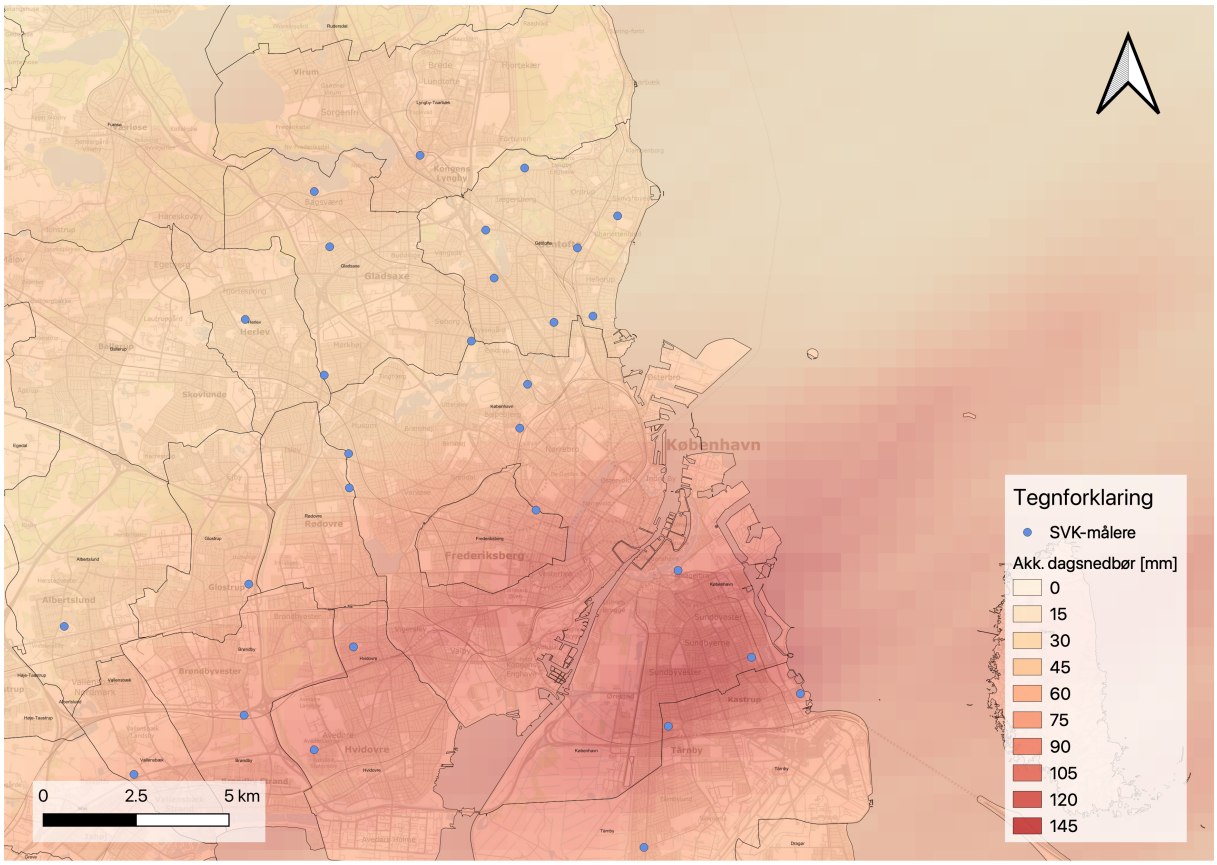
Et værktøj, som kan afhjælpe problematikken med den begrænsede spatiale udbredelse er radardata. I Danmark har DMI opstillet fem C-bånds radarer, som har indsamlet data siden 2002, hvilket betyder, at der er cirka 20 års data tilgængeligt. De fem radarer er placeret ved Sindal i Vendsyssel, Virring i Østjylland, på Rømø, Stevns på Sjælland og i Almindingen på Bornholm. Alle fem radarer har en rækkevidde på op til 240 kilometer, hvilket betyder de tilsammen dækker hele Danmark. Placeringen samt rækkevidden af de fem radarer fremgår af Figur 1.2 på den følgende side. [DMI, 2022]



Figur 1.2. Placering samt rækkevidde af de fem C-bånds radarer, der er opstillet i Danmark. [DMI, 2022]

Fordelene ved at gøre brug af et spatialt regninput, er i forbindelse med at dimensionere afløbssystemer, således der tilføres information om nedbørens udbredelse samt varierende intensitet. Det vil sandsynligvis ikke gøre en stor forskel for de lange regnhændelser, der forekommer i forbindelse med fronter, da disse regnhændelser typisk er ensartede over en stor geografisk udbredelse.
Der hvor det spatiale input kan gøre en forskel er derfor i forbindelse med korte intense regnhændelser, eksempelvis et skybrud. En sådan regn vil typisk have en begrænset udbredelse, hvorfor det kan lede til store afvigelser hvis den antages at påvirke ensartet over et helt opland, specielt i takt med, at oplandene, der modelleres i forbindelse med dimensionering bliver større. Desuden er det de korte og højintense regnhændelser, der typisk er de hændelser, som er de dimensionsgivende for et afløbssystem.

Et eksempel på en regnhændelse med store mængder nedbør samt høje regnintensiteter er den 02/07-2011 over København. Af Figur 1.3 på næste side fremgår et radarbillede over den akkumulerede dagsnedbør. Heraf kan det ses, hvordan den sydøstlige del af København især blev ramt af voldsomme mængder nedbør, mens andre områder ikke blev ramt ligeså slemt. Af samme figur fremgår det også, hvordan omkringliggende SVK-målere i Københavnsområdet vil have målt vidt forskellige nedbørsmængder, og dermed vil give vidt forskellige observationer den pågældende dag afhængigt af hvilken regnmåler, der vælges.



Figur 1.3. Radarbillede over akkumuleret dagsnedbør over København for den 02/07-2011, samt omkringliggende SVK-målere.

Figuren ovenfor viser tydeligt, hvorfor det er vigtigt at medtage regnens spatiale udbredelse. Netværket af SVK-målere i Københavnsområdet er trods alt så tæt, at det kan beskrive en del af regnens udbredelse af en hændelse som 02/07-2011. Men som tidligere beskrevet er dette langt fra tilfældet i resten af landet. I tilfældet af, at der kun var en enkelt regnmåler placeret i den nordvestlige del af København, ville den have præsenteret en helt anden regnhændelse end den virkelige.

I dette studie lægges der fokus på regninputtet i modelsammenhængen, således dette bliver mere virkelighedsnært. Herunder undersøges det hvilken effekt det har i modeltekniske sammenhænge at medtage regnens spatiale udbredelse. I næste kapitel beskrives projektets fokus mere detaljeret ud fra en problemformulering.

2 Problemformulering

Dette studie vil omhandle, hvordan spatial information om regn kan udnyttes til at dimensionere og analysere afløbssystemer mere præcist end den generelle praksis brugt i dag, hvor der anvendes punktmålinger fra regnmålere som regninput. Til dette vil der benyttes radardata fra DMI's C-bånds radar, EKXS, placeret ved Stevns samt et varierende antal regnmålere. Det vil desuden undersøges, om det er muligt at beskrive regnens spatiale udbredelse statistisk ved hjælp af en arealreduktionsfaktor.

Til undersøgelse af den spatiale udbredelse af regn er der opstillet følgende hypotese:

I forhold til punktnedbør, vil anvendelse af varierende grad af spatialt regninput medføre en signifikant ændring i modelresponsen fra hydrauliske modeller.

Til at understøtte ovenstående hypotese er der opstillet en række underspørgsmål, som vil blive undersøgt løbende igennem rapporten.

1. Forekommer der betydelig afvigelse imellem radarobservationer og punktnedbør målt i SVK-målere?
2. Hvilken effekt forekommer ved brug af varierende grad af spatialt regninput til hydrauliske modeller.
3. Hvilken effekt forekommer ved brug af varierende grad af spatialt regninput til hydrauliske modeller, ved analyse af ekstremhændelser?
4. Kan der tages hensyn til regnens spatiale udbredelse ved anvendelse af en arealreduktionsfaktor, som en statistisk metode?

Til at besvare ovenstående delspørgsmål og dermed hypotese, udarbejdes der en fremgangsmåde. Denne fremgår af følgende Afsnit.

Fremgangsmåde

Projektet vil i samarbejde med HOFOR, tage udgangspunkt i området omkring Utterslev Mose i København, hvor HOFOR har klargjort både data og udleveret en Mike Urban model. Jævnfør Københavns Kommune Københavns Kommunes Teknik- og Miljøforvaltningen [2018] skal aflastninger til Utterselv Mose reduceres til maksimalt én gang årligt, inden udgangen af 2026. HOFOR har uafhængigt af dette projekt lavet en analyse i forhold til det nødvendige bassinvolumen, som skal etableres for at kunne opnå kravet fra Københavns Kommunes Teknik- og Miljøforvaltningen [2018]. Til denne analyse er der anvendt forskellig spatial information om regnens udbredelse ved at anvende et forskelligt antal SVK-regnmålere. Ud fra denne analyse har HOFOR påvist, at der er en signifikant forskel i det nødvendige bassinvolumen for at opnå kravet fra Københavns Kommune, alt efter om der benyttes én eller flere regnmålere i analysen. I dette projekt vil den specifikke case med at reducere antallet af aflastninger til Utterslev Mose ikke blive undersøgt. I stedet vil dette projekt udelukkende beskæftige sig med effekten af at anvende spatialregn. Der er placeret en række regnmålere i- og omkring projektområdet, og der er samtidig tilgængeligt radardata fra Stevns radaren, EKXS, som vil blive anvendt i projektet.

Del I består af en redegørelse og en analyse af nedbørsdata fra både SVK-målere samt fra Stevns radaren. Her vil det udelukkende være forskellen ved brug af regnmålerne og radaren, som analyseres. Dette gøres for at se, hvorvidt der er en betydelig variation mellem nedbøren målt i regnmålerne og radaren.

Del II af projektet består af analyser, der afdækker effekten af at anvende varierende grader af spatialt regninput, henholdsvis fra regnmåler- og radardata. Analyserne er lavet på baggrund af modelresultaterne fra den udleverede model. Her er der udvalgt fire parametre, som analyseres ved anvendelse af forskellige regninput. Disse fire parametre er arealmidlet nedbør, udløbsvolumen, overløbsvolumen og opstuvning i brønde.
Der vil både være en analyse af en længere tidsserie, samt af udvalgte ekstremhændelser med henblik på dimensionering af afløbssystemer.

Del III vil bestå af en undersøgelse af, hvorvidt det er muligt, at anvende en arealreduktionsfaktor til at beskrive regnens spatiale udbredelse statisktisk.

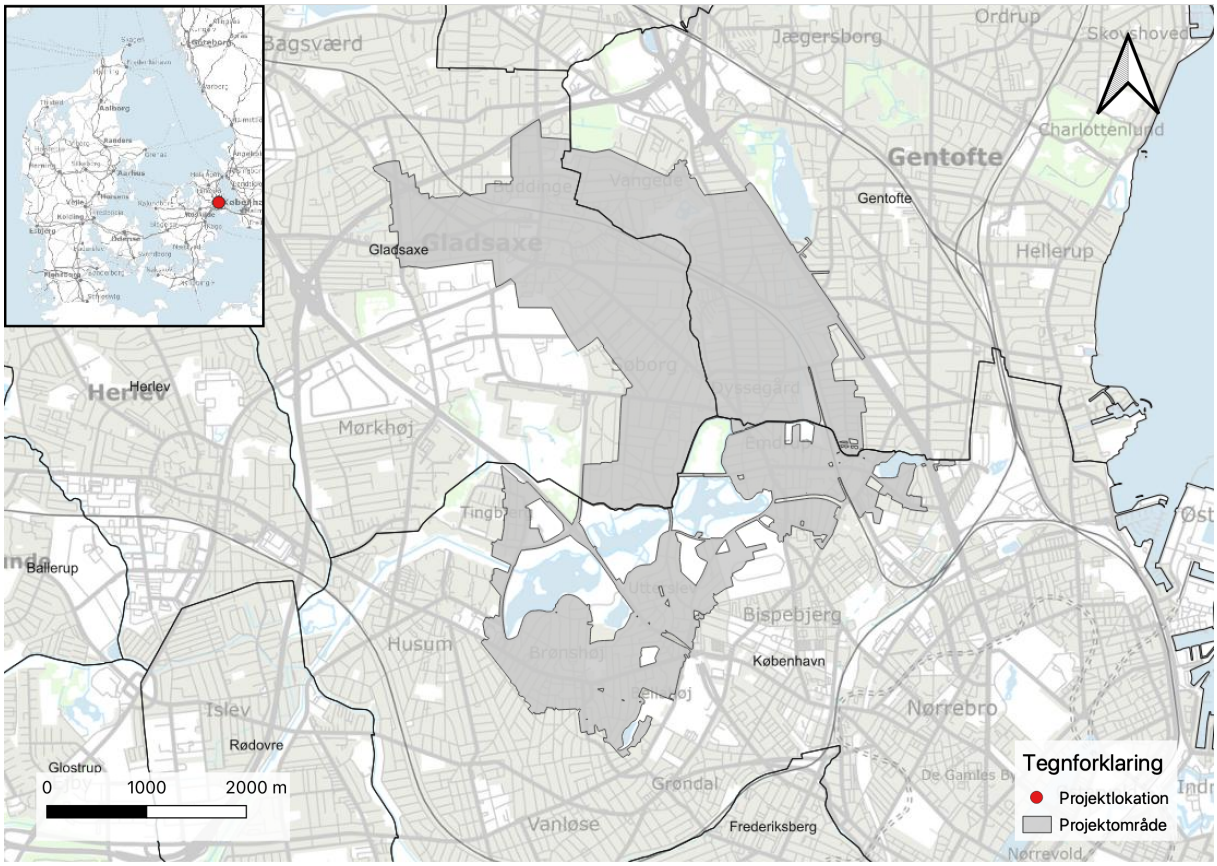
Del IV består af en afrunding af rapporten. Her vil rapportens indhold blive diskuteret i forhold til resultaterne og de bagvedliggende antagelser. Dette vil efterfølges af en konklusion på rapportens indhold og den opstillede hypotese. Til sidst i denne del vil der i en perspektivering blive påpeget, hvilke emner det kunne være interessant at arbejde videre med udover dette studies indhold.

3 Præsentation af projektområde og tilhørende model

I forrige kapitel blev det beskrevet, at dette studie vil tage udgangspunkt i et case-område omkring Utterslev Mose i København. Der vil i dette kapitel blive redegjort for områdets lokation og den udleverede model. Herunder vil der være en kort beskrivelse af modellens opbygning og overordnede struktur.

3.1 Lokation

Området er lokaliseret i Københavnsområdet, hvilket fremgår af Figur 3.1.

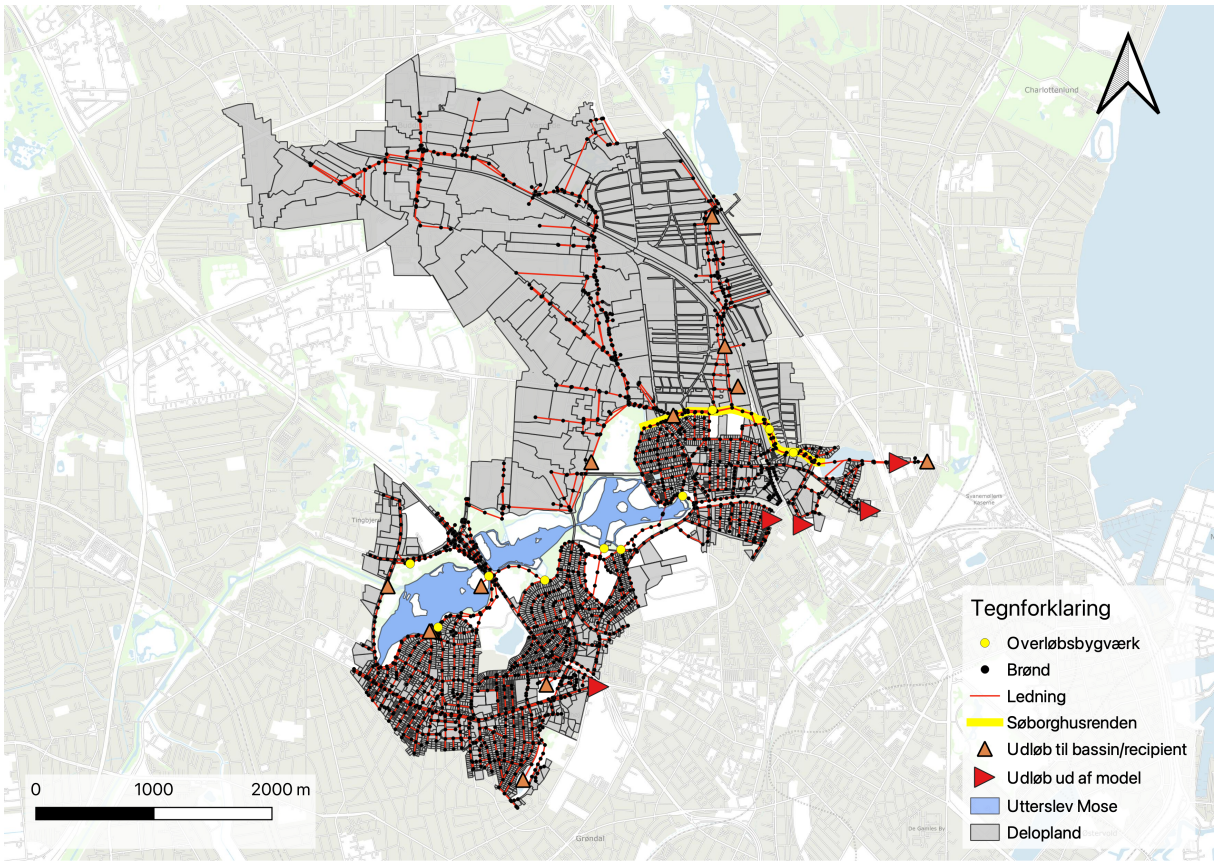


Figur 3.1. Lokation af området i Storkøbenhavn omkring Utterslev Mose.

Området har deloplande i kommunerne Gladsaxe, Gentofte samt København, og dermed dækker det også over forskellige bydele. Derfor benævnes oplandene som helhed fremover 'projektområdet'. Projektområdets oplande har en samlet størrelse på 1.248 hektar.

3.2 Beskrivelse af hydraulisk model

Dette projekt laves i samarbejde med Hovedstadsområdets Forsyningsselskab (HOFOR), som har udleveret en Mike Urban model, der skal bruges i forbindelse med at se, hvordan modellen responderer på forskellige regninput. Ved brug af denne model er det muligt, at få et indblik i, hvilken påvirkning forskellige regninput har på modelresultaterne. Modellen kan ses på figur 3.2, mens der i Tabel 3.1 fremgår en oversigt over antallet af brønde, ledninger og andre komponenter. Hele modellen består af fælleskloakerede systemer [COWI, 2023].



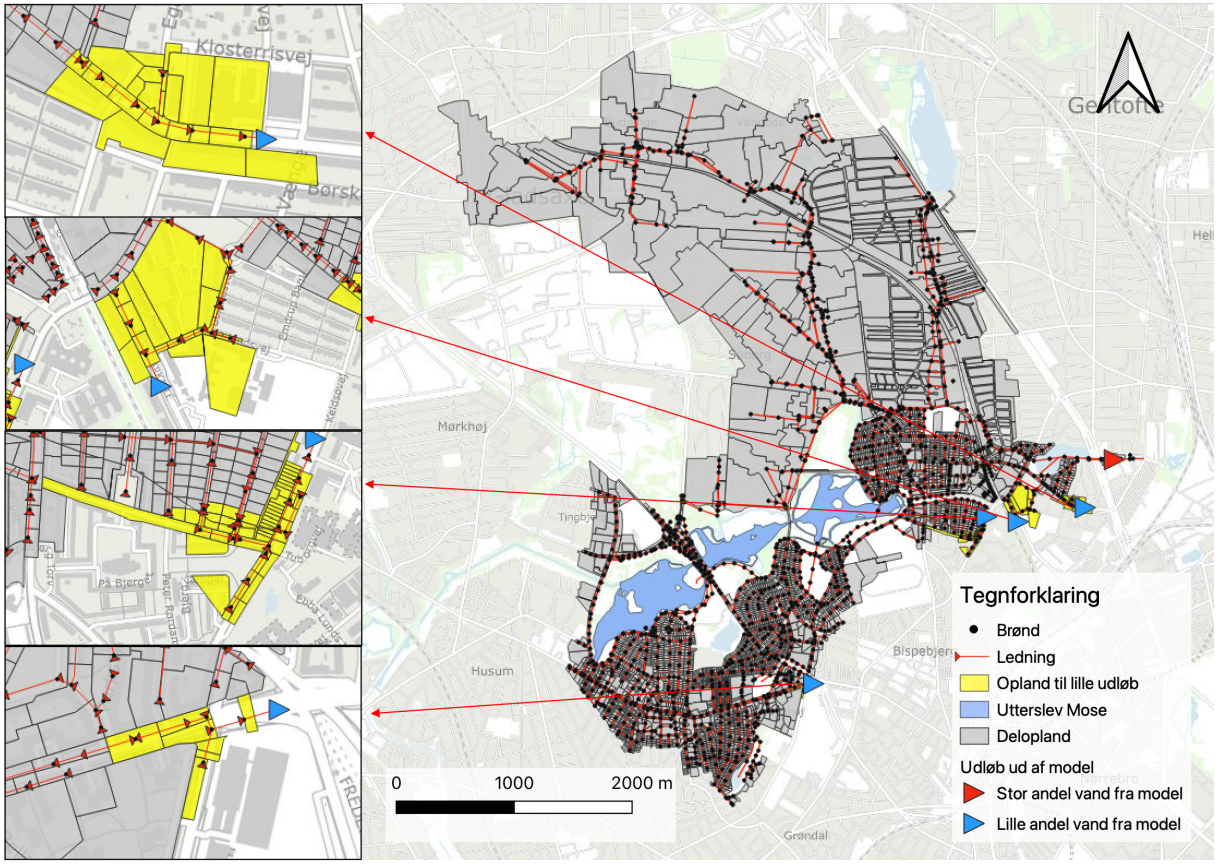
Figur 3.2. Overblik over indehold i MIKE Urban modellen for projektområdet.

Tabel 3.1. Antallet af afløbsspecifikke komponenter i Mike Urban modellen.

Brønde	Ledninger	Bassiner	Udløb	Overløb	Pumper	Spjæld	Oplande
1774	1880	35	5	83	6	21	5022

Under regnvejr er det muligt at aflaste til recipienten Utterslev Mose og Søborghusrenden, via respektive overløbsbygværker, som er vist på Figur 3.2.

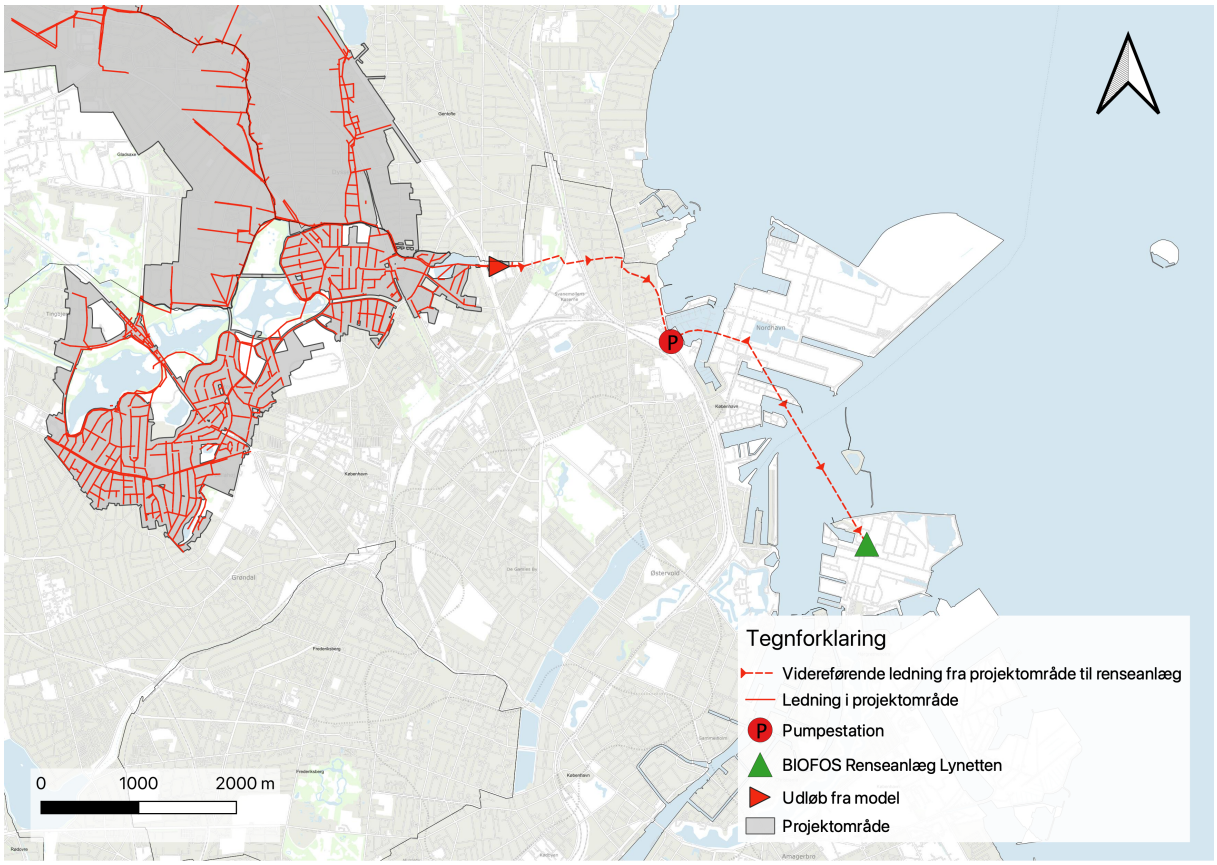
Det kan ses af Figur 3.2 på forrige side, at ledningssystemet leder vand ud af modellen flere steder. Størstedelen af vandet, som bliver udledt er ved den røde trekant, som er markeret på Figur 3.3 i den østlige del af modellen. Derudover bliver der også ledt små mængder vand ud af modellen fra fire mindre udløb, hvilket fremgår af samme figur, hvor de er markeret med blå trekanter.



Figur 3.3. Illustration af udløb i Mike Urban modellen.

Af ovenstående figur kan det ses, at de fire blå trekanter står for at udlede vand fra en lille andel af oplandende i forhold til hele projektområdets oplande. De fire udløb afleder i alt vand fra cirka 13 hektar oplandsareal, hvilket svarer til 1% af det totale oplandsareal for projektområdet.

Alt vandet, som udledes via den røde trekant på Figur 3.3 transporteres mod øst til en pumpestation, hvor det føres videre ud til BIOFOS Renseanlæg Lynetten. Transportruten af vandet fra projektområdet er illustreret på Figur 3.4 på næste side.

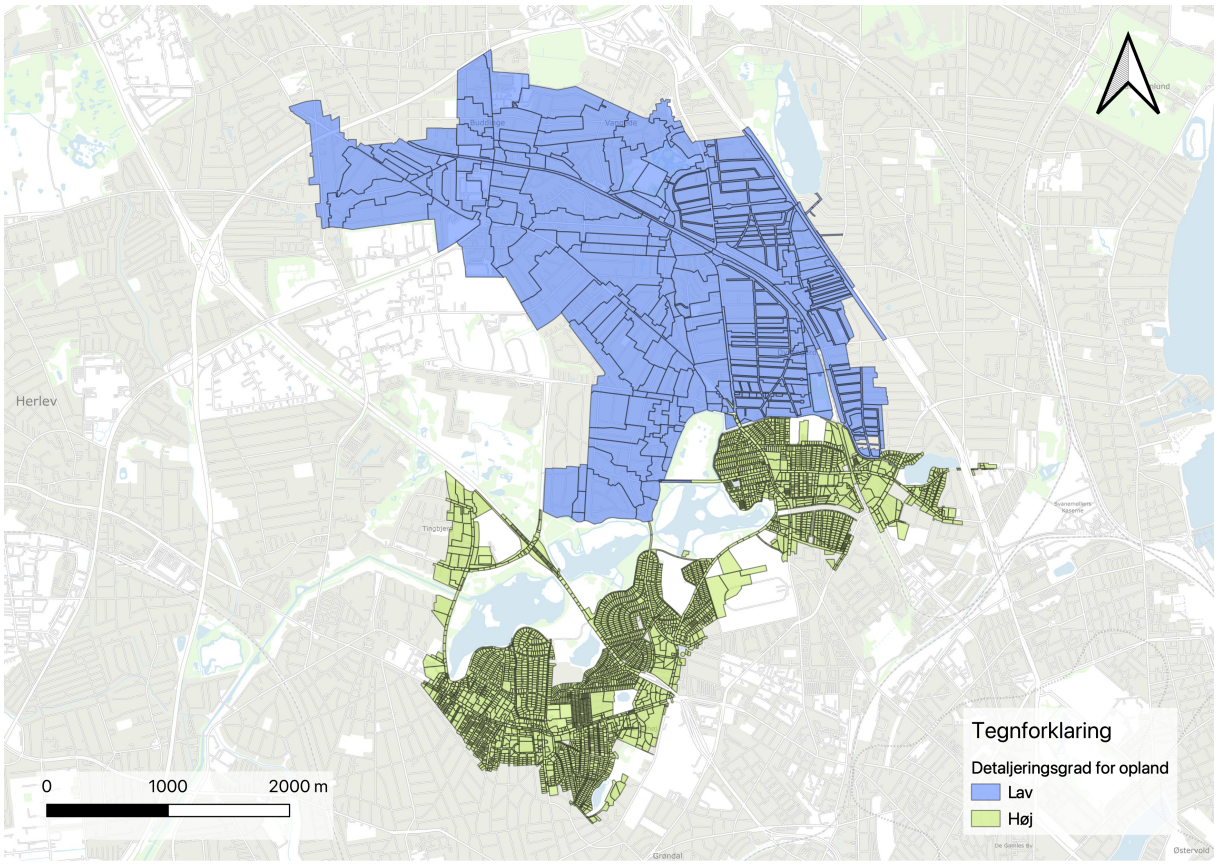


Figur 3.4. Overblik over afløbssystemts løbsretning fra projektområdet til BIOFOS Renseanlæg Lynetten.

Der vil dog ikke beskæftiges med områder udenfor den udleverede model i dette projekt.

3.2.1 Simplificering af model

Af Figur 3.1 på side 7 kan det ses, at hele den nordlige del af projektområdet, der er lokaliseret i Gentofte- og Gladsaxe Kommune, har en lav detaljeringsgrad i forhold til den sydelige del, der er lokaliseret i Københavns Kommune. Dette kan ses på størrelsen af oplandende, som er forholdsvis store og dækker over flere matrikler i den nordlige del, hvorimod for den sydlige del er hver enkelt matrikel angivet ved et opland. Den nordlige del er markeret på Figur 3.5 på næste side med blåt, og den sydlige del, som har en større detaljeringnsgrad er markeret med grønt. Den nordlige del har et areal på 852 hektar, mens den syglige del har et areal på 396 hektar.



Figur 3.5. Visualisering af projektområdets detaljeringsgrad.

Der er foretaget en analyse af modellens terrænkoter i forhold til Digital Elevation Model(DEM), hvilket er præsenteret og beskrevet i Bilag A på side 88. Denne analyse afdækker store afvigelser i det forsimplede nordlige område, når det kommer til brønde og terrænkoter.

Fremover i dette studie vil det blive specificeret, hvorvidt det er relevant at indrage den nordlige del af projektområdet, eller om denne udelades grundet den manglende detaljeringsgrad.

Del I

Beskrivelse og analyse af nedbørsdata

Del I af rapporten vil først omhandle en beskrivelse af nedbørsdataet, der vil blive anvendt fremadrettet i rapporten. Dette indebærer radardata fra DMI's C-bånds radar, EKXS, samt otte regnmålere fra SVK's regnmålersystem. Her vil det blive forklaret, hvordan rå radardata omdannes til nedbørsintensiteter, samt afdække hvilke perioder, hvor der er tilgængeligt data for både radaren og SVK-målerne. Ligeledes vil det blive beskrevet, hvordan nedbøren implementeres i Mike Urban modellen. Disse ting fremgår af Kapitel 4.
I Kapitel 5 vil nedbøren blive analyseret med fokus på en validering og kalibrering af radardataet. Herunder vil det blive undersøgt, hvilken forskel, der forekommer på den totale nedbør målt i radaren og SVK-målerne i de radarpixels, hvor de otte SVK-målere er placeret. Ydermere foretages der en analyse af sammenhængen mellem radar og regnmålere på daglig basis. Dette er gjort i forhold til den originale biaskorrigering, som er foretaget på radardataet, samt en lokal biaskorrigering ud fra de otte regnmålere, der analyseres i dette projekt.

Afslutningsvis vil der være en sammenligning mellem de originale- og lokale biasfaktorer ud fra to forskellige regnhændelser med forskellig karakteristika ved undersøgelse af modelrespons fra Mike Urban modellen.

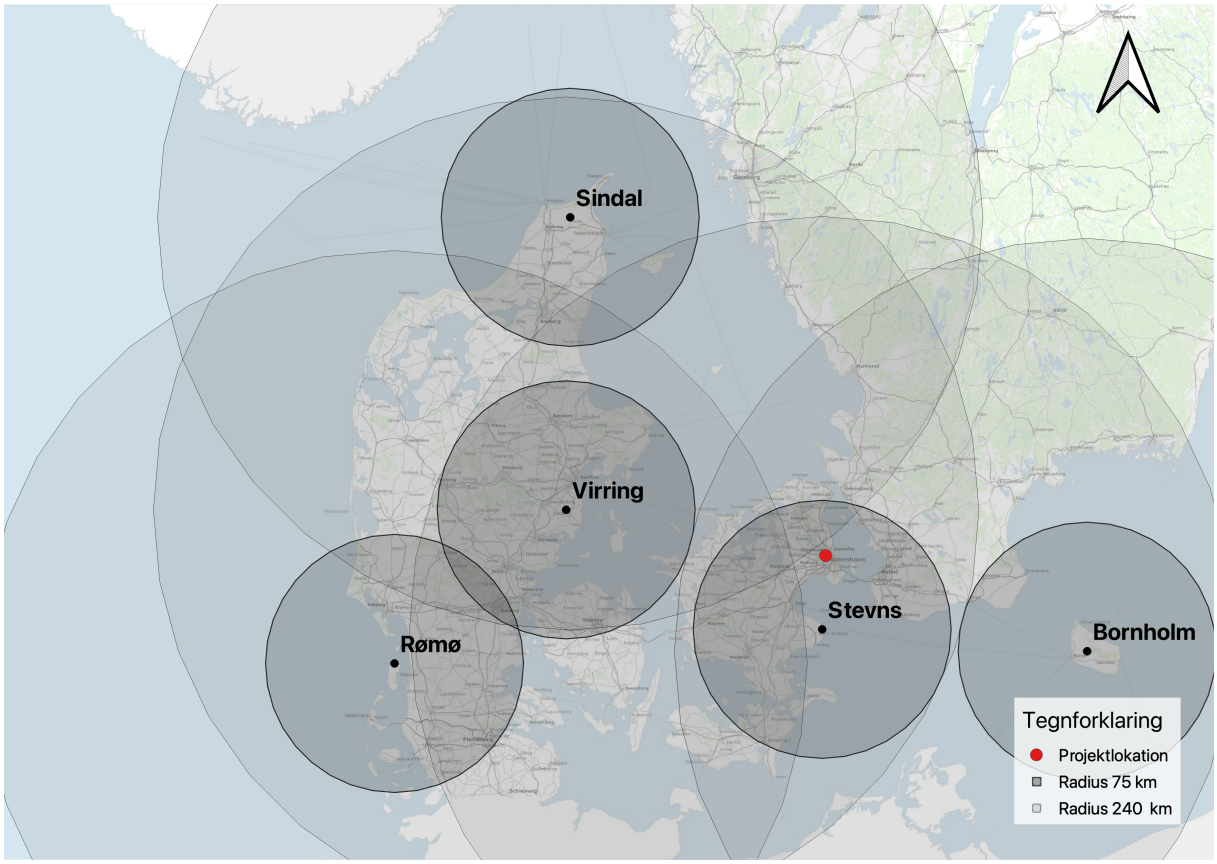
Til denne del af projektet knytter der sig fire bilag, Bilag B, C, D, E, F og G.

4 Beskrivelse af nedbørsdata

Rapportens fokus vil være på anvendelsen af varierende grad af spatialt regninput, som sammenlignes med punktnedbør, der anvendes i dimensioneringspraksis i dag. Disse er forskellige regninputs, men repræsenteres ens når de bruges i en model. Derfor vil der i dette kapitel redegøres for de to typer nedbørsdata, der vil blive anvendt igennem dette studie. Der vil være en kort beskrivelse af, hvordan nedbøren registreres i henholdsvis radar og regnmålere, samt hvilken periode, der benyttes data fra. Efterfølgende beskrives det, hvordan regninputtet implementeres i Mike Urban modellen over projektområdet.

4.1 Radardata

Et af de to typer regninput, der vil blive benyttet i forbindelse med dette projekt er radardata. For dette projekt vælges det, at benytte radardata fra C-Bånds radaren ved Stevns kaldet EKXS, som ligger cirka 40 kilometer syd for projektområdet. EKXS radaren er valgt, da projektområdet er lokaliseret indenfor en radius af 75 kilometer, hvilket er den maksimale rækkevidde for gode nedbørsmålinger [Rasmussen et al., 2009]. Projektlokationen i forhold til rækkevidderne på alle DMI's radarer er vist på Figur 4.1 på næste side.



Figur 4.1. Radius for de fem radarer i Danmark, samt projektloaktionen.

Som det fremgår af Figur 4.1, har EKXS radaren en maksimal rækkevidde på 240 kilometer, men radardata er sjældent brugt i den afstand grundet usikkerheder. Radardataet er indsamlet per tiende minut i cirka en kilometers højde og er organiseret i et kartesisk koordinatsystem bestående af 480x480 pixels med en opløsning på 500x500 meter. [Thorndahl et al., 2014]

Der er udleveret radardata for perioden år 2002 til og med 2022, dog med nogle udfald, hvor der ikke er registreret data grundet udstyret har været ude af drift.

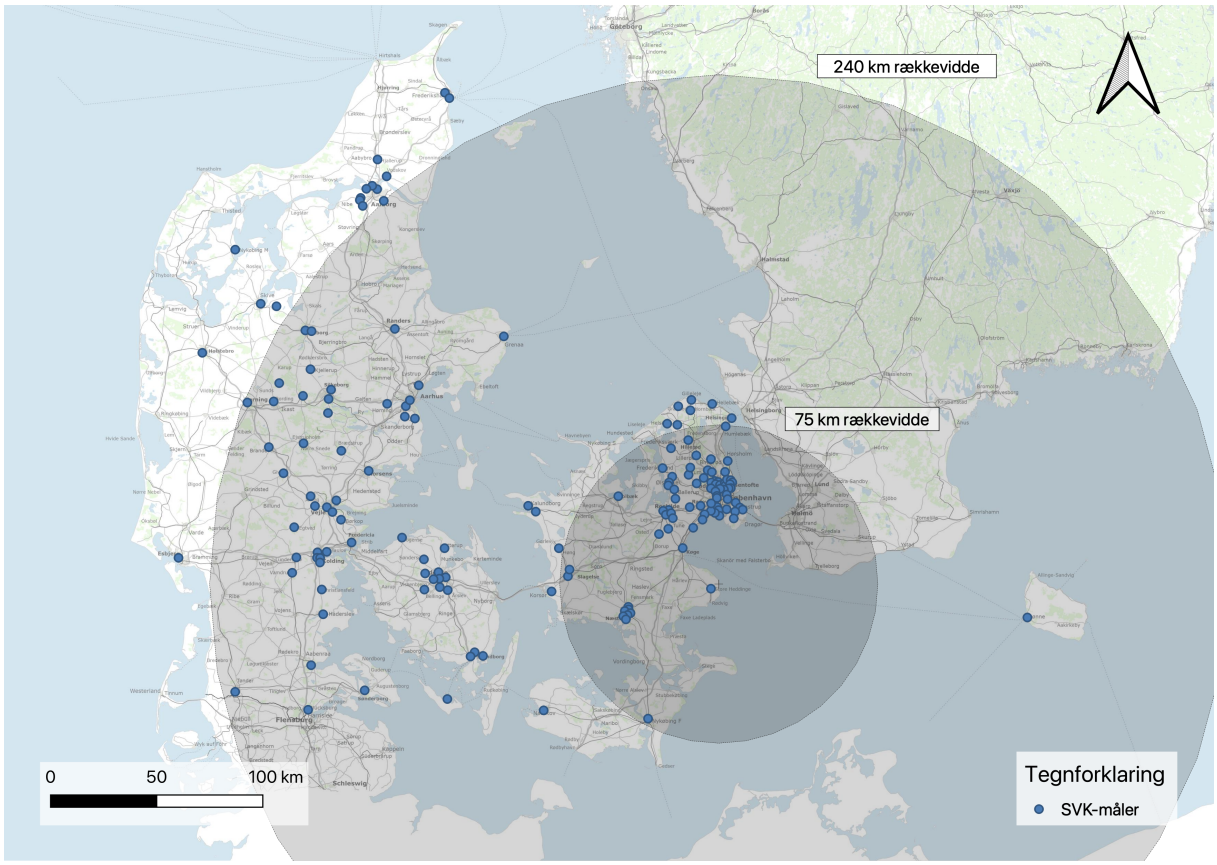
Radaren måler nedbør ved at udsende højfrekvenssignaler. Når disse signaler rammer et objekt, såsom regndråber, reflekteres signalet, hvilket modtages af radaren. Reflektansen, som måles i radaren, omregnes til regnintensiter ved anvendelse af en Z-R-relation. Udledningen af denne fremgår af Bilag B.1 på side 91.

Til at bestemme konstanterne A og B anvendes Marshall and Palmers standardparamtre på A=200 og B=1,6 hvilket også er beskrevet i Thorndahl et al. [2014]. Disse parametre er generelle værdier, som kan beskrive alle slags regn, og anvendes på trods af, at der kan bruges forskellige parametre alt efter typen af regnvejr. Brugen af de generelle parameterværdier gør det nødvendigt at foretage en biaskorrigering af de observerede radardata.

Radardataet biaskorrigeres ved at gange en biasfaktor på nedbøren i alle radarpixels. Denne korrigering foretages idet radaren kan opfange forstyrrelser eller på anden måde beskrive en misvisende regnmængde, hvorfor der ved at rette ind efter regnmålerne opnås en mere præcis beskrivelse af regnen. Biasfaktoren bestemmes ved forholdet imellem regnen, der er målt i

regnmålerne og regnen, der er målt i tilhørende radarpixels. Fremgangsmåden for biasjustering sker på baggrund af teorien beskrevet i Thorndahl et al. [2014], og fremgår også af Bilag B.2 på side 91.

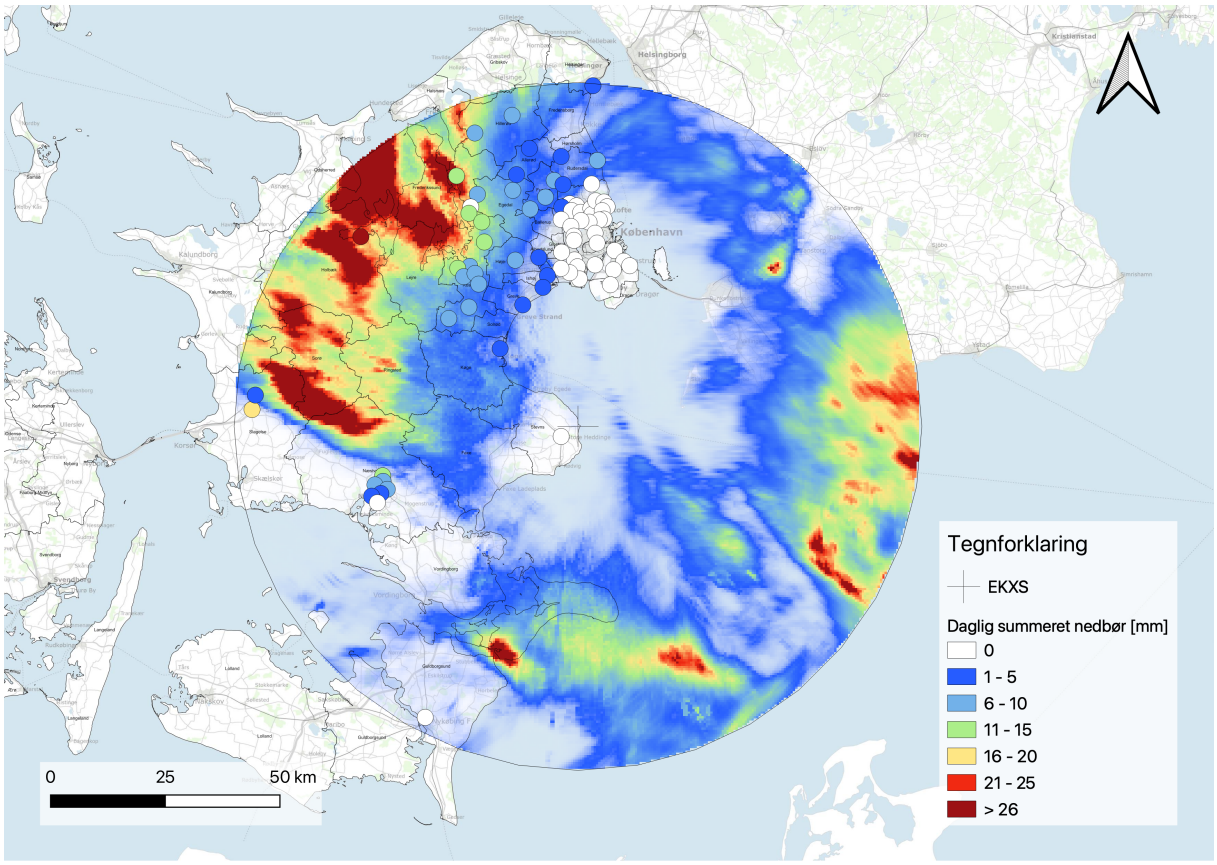
Til udregningen af biasfaktoren er der gjort brug af 78 aktive regnmålere indenfor en radius af 75 kilometer, ligesom i Thorndahl et al. [2014]. På Figur 4.2 er placeringen af regnmålere, som er benyttet til biaskorrigering indenfor en radius af 75 kilometer, vist samt placeringen af alle regnmålere indenfor en radius af 240 kilometer.



Figur 4.2. Illustration af regnmålere indenfor en radius af 75 kilometer, som er brugt til at biasjustere radarpixeldata. Samtlige regnmålere i hele Danmark er ligeledes vist.

Jævnfør Thorndahl et al. [2014] konkluderes det, at der vil være den bedste overensstemmelse mellem radar- og punktmålinger, hvis der biasjusteres over ét døgn, hvilket benævnes som en daglig-middel-biastjustering, hvilket benyttes i denne rapport.

Radarfilerne indeholder en regnintensitet for hver radarpixel per 10. minut. Af Figur 4.3 på den følgende side fremgår et eksempel af et radarbillede for d. 18. september 2022, indenfor en radius af 75 km fra EKXS. Heraf fremgår den akkumuleret daglige nedbør for både radaren, samt de aktive 78 SVK-målere.

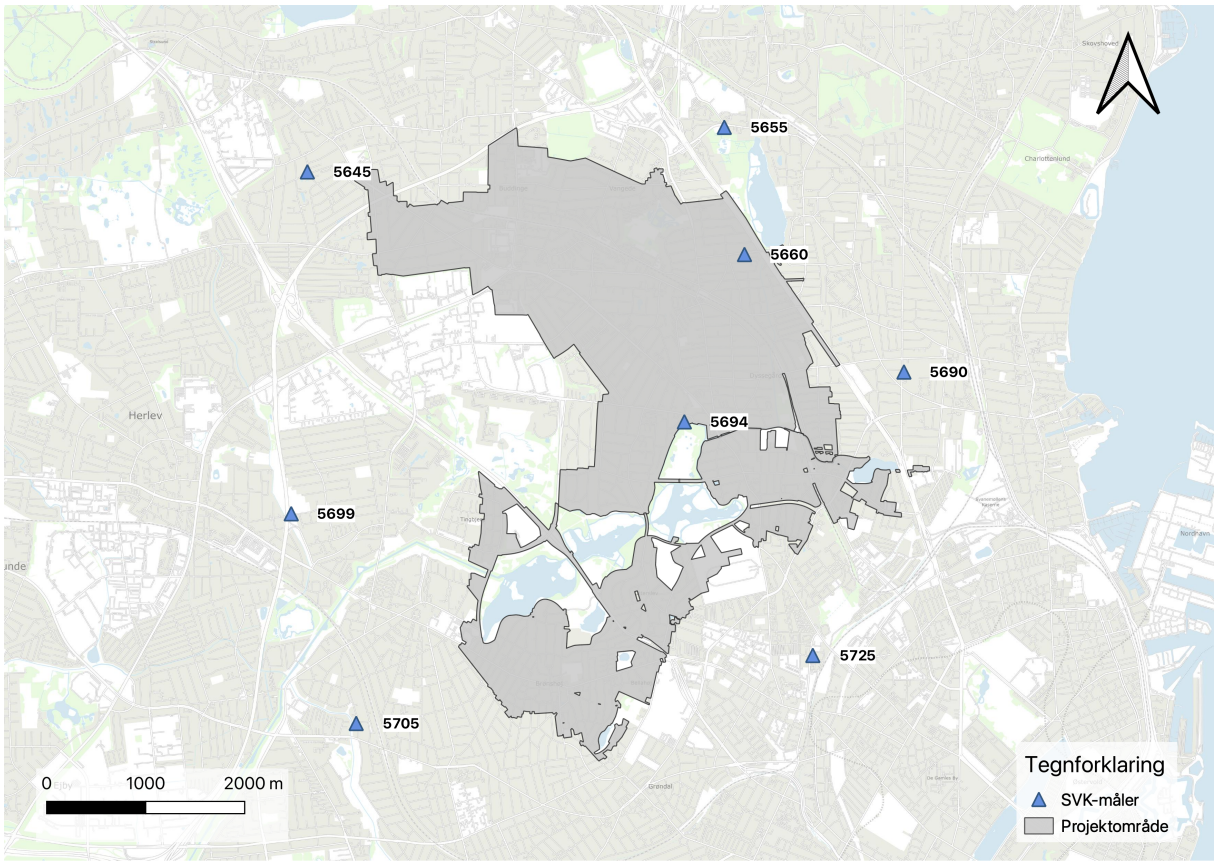


Figur 4.3. Eksempel på biasjusteret radardata indenfor 75 kilometers radius i forhold til EKXS radaren fra d. 18. september 2022. Prikkerne på billedet angiver SVK-regnmålere indenfor 75 kilometer og deres akkumuleret dagsnedbør.

I forbindelse med biaskorrigeringen, opdeles radardatasættet ikke i enkelte hændelser, men i stedet godkendte døgn hvori der forekommer en regnhændelse. I tilfælde af en regnhændelse, der strækker sig henover midnat, angives denne, som to separate døgn.

4.2 Regnmålerdata

Udover radardata vælges det også at inddrage data fra SVK-målerne. I dette projekt gøres der brug af otte regnmålere, som senere vil blive brugt i forbindelse med at analysere effekten ved simulering af forskellige antal regnmålere. De otte regnmålere, der benyttes er vist på Figur 4.4 på næste side i forhold til projektområdet.



Figur 4.4. Lokalitet for udvalgte SVK-målere, som bruges i forbindelse med regninput til MIKE Urban model.

De otte regnmålere, som fremgår af ovenstående figur, er sat op på forskellige tidspunkter. Alle otte målere er stadig aktive, dog har der været nogle udfald, hvor målerne har været ude af drift. Af Tabel 4.1 fremgår det, hvornår SVK-målerne første gang blev aktive.

Tabel 4.1. Startdatoer for SVK-målerne, som er knyttet til projektområdet [Sarup, 2018]. Alle stationer er stadig aktive.

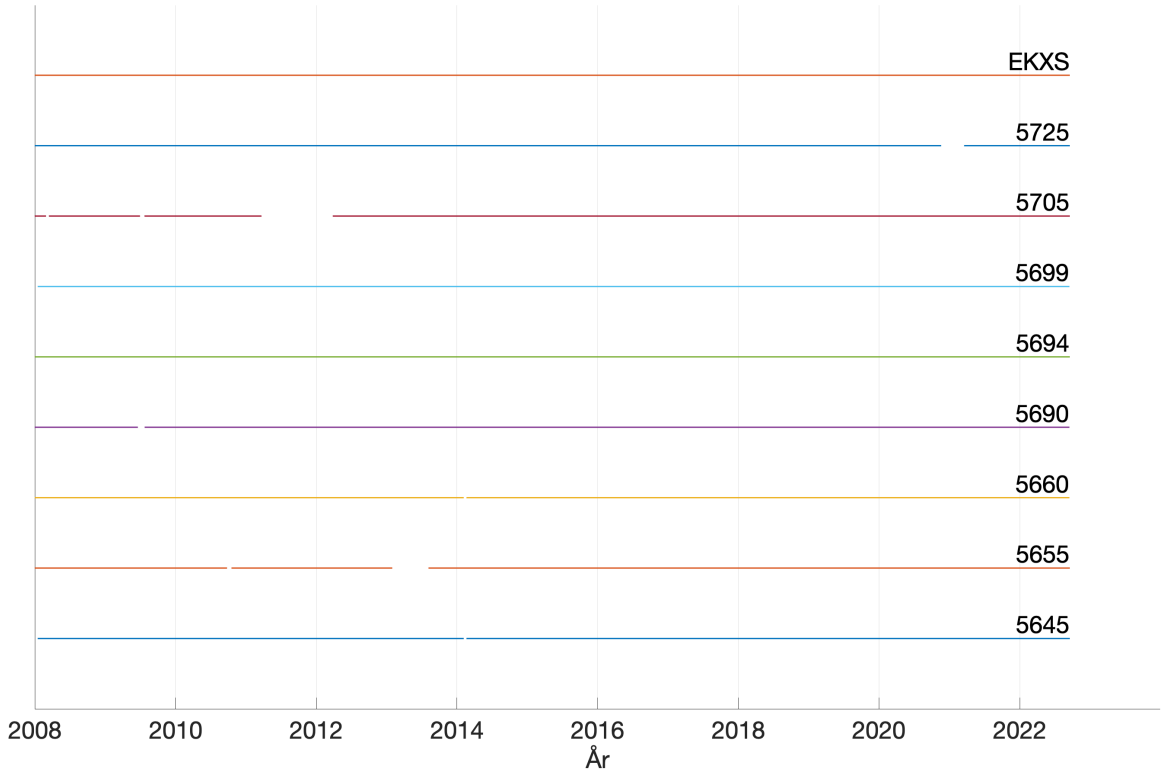
Stationsnavn	SVK ID	Startdato
Gladsaxe Vibevænget	5645	16/01-2008
Brogårdsbassin	5655	06/03-2006
Fuglegården	5660	13/03-2006
Hellerup Kirkegård	5690	13/03-2006
Søborg Vandværk	5694	01/01-1979
Gladsaxe Stavnsbjerg Alle	5699	16/01-2008
Åvendingen	5705	11/04-1995
Lygten	5725	25/11-1994

I dette projekt benyttes der regndata fra den 16/01-2008 til og med d. 18/09-2022 i forbindelse med simulering i Mike Urban. Dette skyldes, at SVK-måler, 5645, senest måler fra d. 16/01-2008, som det fremgår af Tabel 4.1. Derudover er der udleveret radardata til og med d. 18/09-2022.

I perioden fra d. 16/01-2008 til d. 18/09-2022 har der været enkelte udfald for nogle af SVK-

målerne. Der er udregnet korrektionsfaktorer, der kan bruges til at omregne regnmålerne til at være ækvivalente med dem uden nedbrud, dette fremgår af Bilag C på side 93.
Dette er kun i forhold til at sammenligne akkumulerede regn henover hele perioden, og vil medføre usikkerheder idet at regn generelt ikke er uniformt spredt henover året.

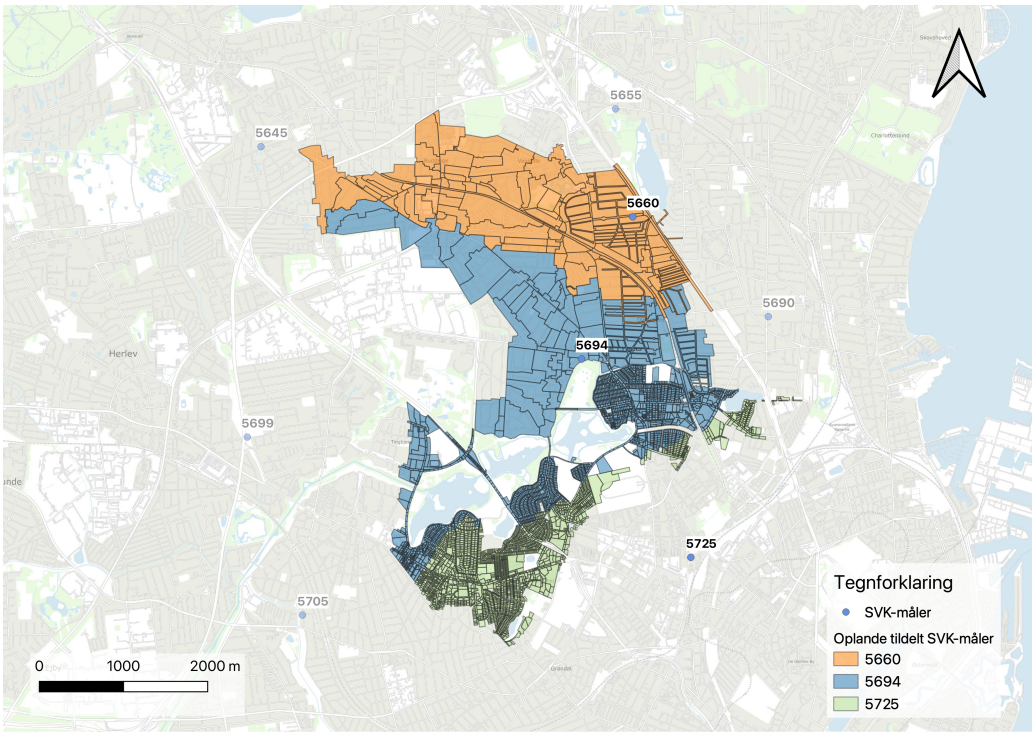
Af Figur 4.5 fremgår det illustrativt, hvornår der er data for de udvalgte SVK-målere, herunder med de enkelte udfald i perioden 16/1-2008 til d. 18/09-2022. Ligeledes ses EKXS radarens aktive periode af figuren.



Figur 4.5. Overblik over aktiv måleperiode for udvalgte SVK-målere, samt dataperiode for Radarmålinger.

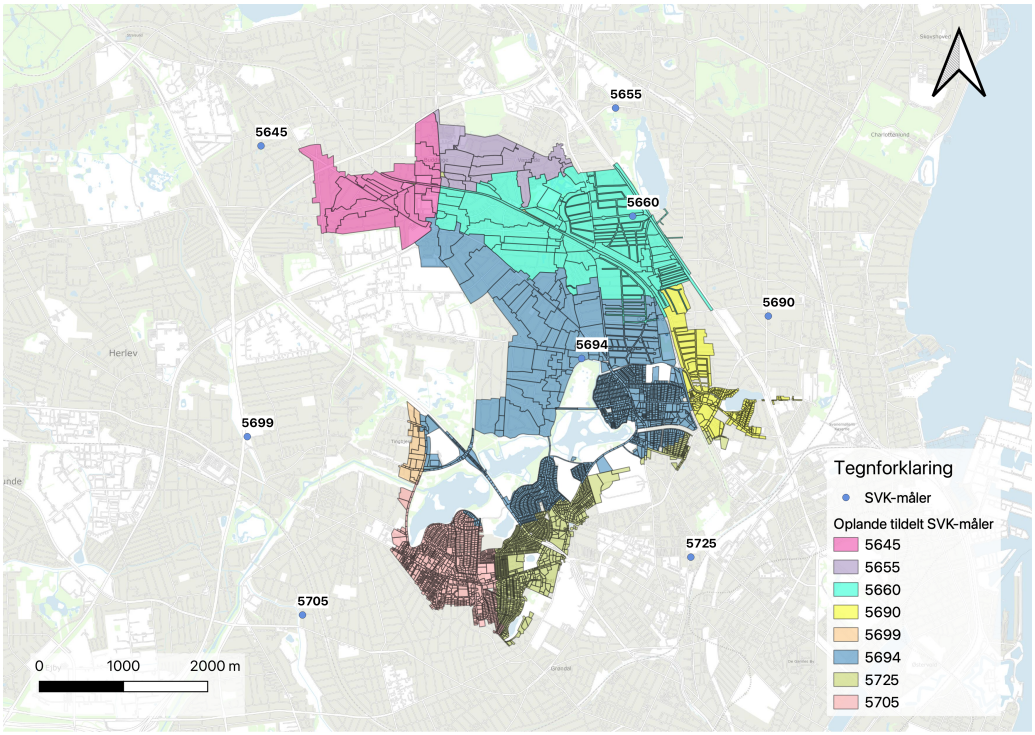
4.3 Implementering af regninput i hydraulisk model

I forbindelse med tilføjelse af regninput fra de omtalte SVK-målere og radarpixels, er MIKE Urban opsat således, at oplandende tilkobles det regninput, der er nærmestliggende på oplandets centrum. Dette betyder, at med én regnmåler, benyttes det samme regninput for hele projektområdet, som der er målt i den udvalgte regnmåler. Hvis der bruges flere regnmålere, vil oplandende i projektområdet blive tildelt forskellige regninput afhængigt af den korteste afstand til de pågældende SVK-målere. Af Figur 4.6 på den følgende side fremgår det illustrativt, hvilke oplande der er tilkoblet de respektive SVK-målere i et tilfælde hvor regnmålerne 5660, 5694 og 5725 er brugt som input.



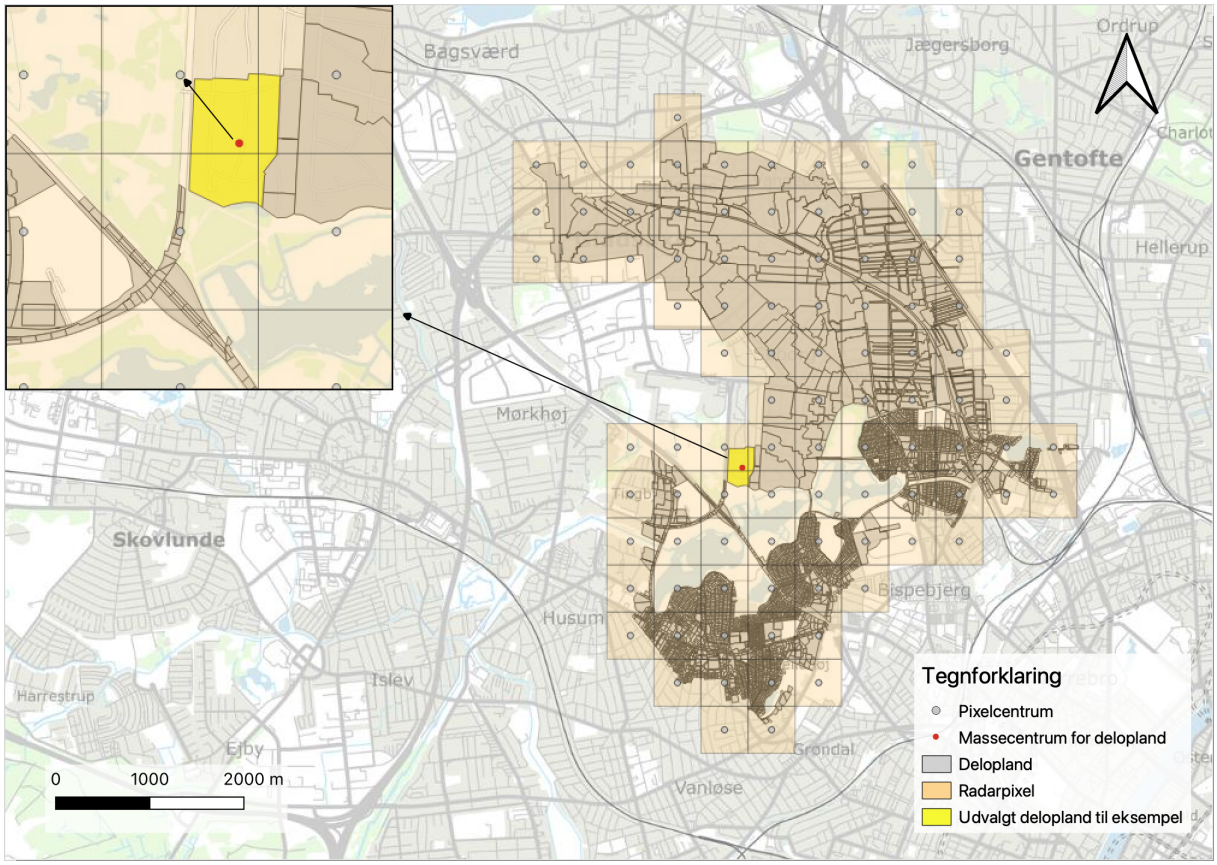
Figur 4.6. Eksempel med hvilke oplande der tildeles nærmest liggende regninput ved simulering med tre SVK-målere 5660, 5694 og 5725.

Af Figur 4.7 fremgår en oplandsopdeling hvis alle otte regnmålere bruges som input til modellen.



Figur 4.7. Illustration af, hvilke oplande, der tildeles nærmestliggende regninput ved simulering med alle otte SVK-målere.

Ved simulering i MIKE Urban med radardata indsættes der punktmålere, med koordinater svarende til centrum af radarpixels over projektområdet, hvoraf hvert punkt har et regninput. Princippet for hvordan et opland tildeles et regninput er det samme som for SVK-målerne, hvilket er, at oplandende tildeles regnninputtet fra det nærmestliggende punkt. For projesktområdet gør det sig gældende, at flere radarpixels dækker over det samme opland. I MIKE Urban håndteres dette ved, at oplandet tildeles regninputtet hvor afstanden er kortest mellem oplandets massemidtpunkt til pixelcentrum. Af Figur 4.8 fremgår et eksempel på dette, samt hvordan radarpixels er lokaliseret over projektområdet.



Figur 4.8. Illustration af radarpixels over projektområdet, samt eksempel af et oplands massemidtpunkt tildeles regninputtet fra den nærmeste radarpixelcentrum.

Det vurderes ikke at have nogen betydelig effekt på den spatiale udbredelse, at oplandende tilkobles regninputtet fra det nærmestliggende pixelcentrum. Dette skyldes oplandenes mindre størrelse, hvorfor den spatiale udbredelse mellem regninputtet fra de individuelle radarpixels ikke afviger betydeligt.

4.4 Opsamling

I dette kapitel er nedbørsdataet, som vil blive brugt fremadrettet i rapporten, beskrevet. Hertil blev det fastsat, at der kun benyttes nedbørsdata fra d. 16/01-2008 til d. 18/09-2022, grundet regnmålernes aktive perioder og, at der ikke er udleveret radardata for længere end d. 18/09-2022. Afslutningsvis er der redegjort for implementering af regninput fra regnmålere og radardata i Mike Urban modellen.

I det følgende Kapitel vil der foretages en validering, samt kalibrering af radardataet ved at sammenligne det med SVK-målerdataet. Dette gøres for, at undersøge om der forekomme markante forskelle i mellem regnmåler- og radarnedbør, som kan have betydning for modelresultaterne efterfølgende.

5 Analyse af nedbørsdata

Fokus i denne rapport er primært at bestemme effekten af spatial fordeling af nedbør, hvorfor det er essentielt at kunne isolere denne, og dermed ikke medtage afvigelser, der forekommer på baggrund af andre variationer i datasættene.

I dette kapitel er målet derfor at få bestemt, hvorvidt de præsenterede datasæt er kompatible, eller om der forekommer forskelle, der ikke kan tilskrives den spatiale variabilitet.
Kapitlet indledes derfor med en validering af det udleverede biaskorrigerede radardata, ved at sammenholde SVK-målere i forhold til deres respektive radarpixels. Dermed kan radardataet beskrives som en tilnærmelsesvis en-dimensionel regn, og sammenlignes på lige fod med regnmålerdataet.
I denne validering vil der indgå en analyse af de akkumulerede regnmængder henover perioden 16/01-2008 til 18/09-2022.
Derefter undersøges det om regnen forekommer ensartet på daglig basis, ved at sammenligne akkumuleret dagsnedbør.

I tilfælde af, at det udleverede biaskorrigerede radardata ikke kan valideres i forhold til regnmålerene i området, vil der efterfølgende foretages en kalibrering af radardatatet ved at benytte en lokal biaskorrigering ved brug af de otte udvalgte regnmålere fra forrige afsnit.
I det tilfælde skal den nye biaskorrigering af radardataet valideres, ved at foretage samme analyser på det nye datasæt som i starten af dette kapitel.

Da biaskorrigeringen påvirker alle pixels i radaren, og ikke kun dem, der er en del af analysen, vil det analyseres hvorvidt det nye radardata passer når alle radarpixels medtages. Til dette foretages der en analyse af vandføringen ud af modellen, ved forskellige scenarier.

Som tidligere beskrevet, vil det primært være modelresponsen, der dikterer resultaterne når effekten af regninput undersøges. I den forbindelse vil en ensartet akkumuleret dagsnedbør ikke nødvendigvis give ensartede resultater. Derimod er det typisk de maksimale intensiteter under regnhændelser, der er bestemmende for modellens respons. Derfor vil der til slut i dette kapitel foretages en analyse af de maksimale regnintensiteter i henholdsvis radardataet, og de tilsvarende radarpixels.

Til at beskrive den generelle sammenhæng imellem datasæt benyttes statistiske parametre, som er præsenteret i afsnittet herunder.

5.1 Statiske parametre til analyser

Til at analysere sammenhængen imellem SVK-målere og radardata, vil der generelt bruges følgende parametre:

- *Nash-Sutcliffe-Efficiency* (NSE)
- *Mean Absolute Error* (MAE)
- Procentvis afvigelse
- Antal hændelser
- Bias for datasættet

Ligningerne for ovenstående paramtre fremgår af Bilag D på side 94.

NSE-værdien beskriver hvor godt at det modellerede datasæt passer overens med observeret data. I denne rapport vil radardata generelt antages som observeret data, og regnmåler dataet som det modellerede, for at undersøge i hvor høj grad at regnmålerdataet kan beskrive respons på samme niveau som radardata.
NSE-værdierne er i intervallet [-∞ ;1]. En NSE-værdi på 1 betyder der er et perfekt match mellem modelleret- og observeret data. En NSE-værdi på 0 betyder, at de modellerede værdier svarer til middelværdien af de observerede data. En negativ NSE-værdi betyder, at det vil være mere præcist at anvende middelværdien af det observerede data end det modellerede data. [Nash og Sutcliffe, 1970]

MAE-værdien beskriver en gennemsnitlig afvigelse for datapunkterne, hvilket kan give anledning til problemer i datasæt med stor spredning. Hvis der er mange datapunkter, hvor der ikke er målt særlig meget nedbør vil disse være med til at give en lav MAE-værdi, hvilket generelt set vil indikere et næsten perfekt datasæt. For at kompensere for dette og give et indblik i den egentlige afvigelse, beregnes der også en procentvis gennemsnitlig afvigelse.

Den gennemsnitlige procentvise afvigelse vil, modsat brugen af MAE, indikere et datasæt med dårlig sammenhæng hvis der er mange små regnhændelser. Her vil ganske få millimeters forskel betyde meget store procentvise afvigelser. For at få et godt indblik i datasættets sammenhæng vil begge værdier benyttes begge parametre fremadrettet i rapporten.

Der udregnes hvor mange regnhændelser, der er relevante og dette angives på figurerne. Der frasorteres på baggrund af flere parametre, hvilket angives i de respektive analyser.
Derudover forekommer der også en del regnhændelser, hvor enten SVK-målerne eller radaren har målt nul nedbør, se eksempelvis Figur E.1 på side 98 i Bilag E på side 96. Døgnene, hvor enten SVK-måleren eller radaren ikke har målt regn, frasorteres idet formålet med analyserne er at sammenligne respons ved regnhændelser.
For hvert datasætpar, der analyseres, vil der fremgå et bias, som beskriver forholdet mellem dem.

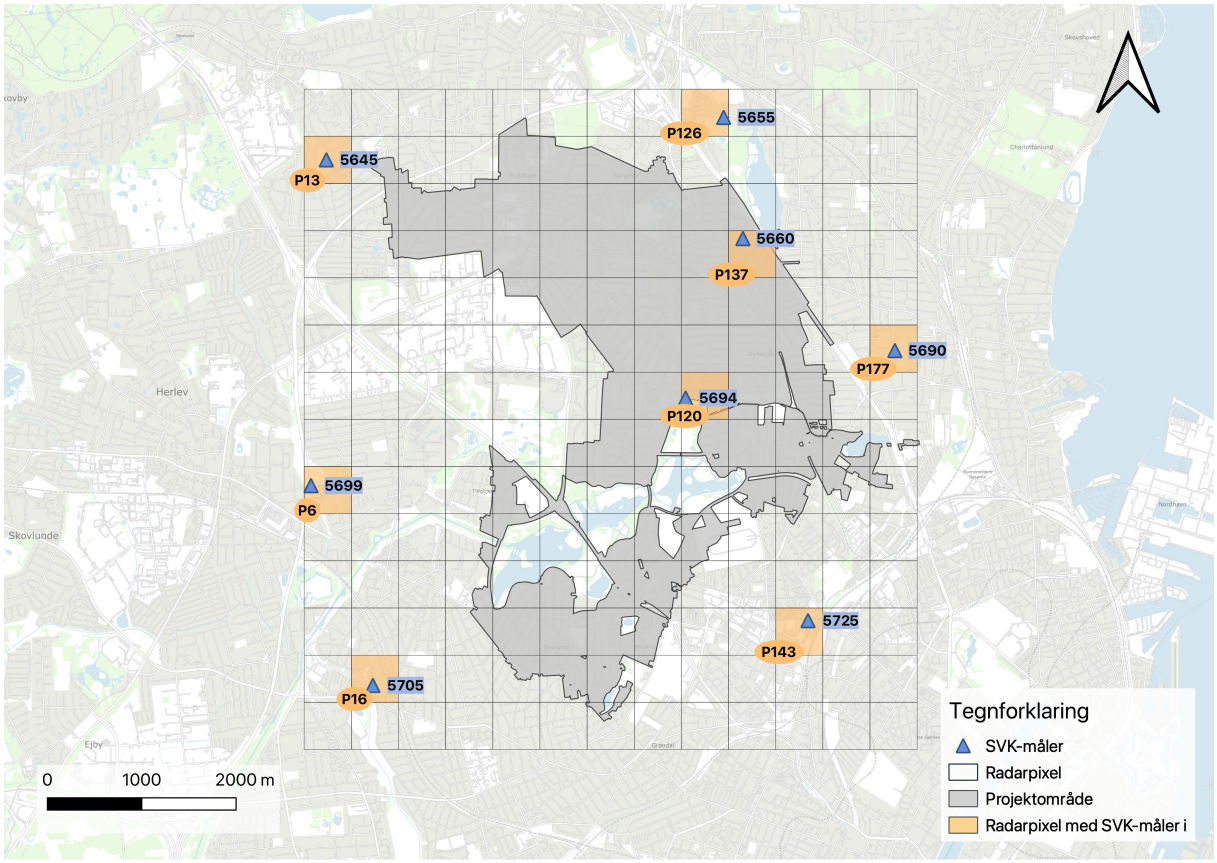
Parametrerne præsenteret i dette afsnit, bruges generelt igennem analyser i den resterende del af rapporten.

5.2 Validering af radardata

I Afsnit 4.1 på side 13 blev det beskrevet, hvordan de udleverede radardata er biaskorrigeret ved brug af alle SVK-målere indenfor en radius af 75 kilometer af radaren. Dette betyder, at de daglige biasfaktorer, som ganges på radardataet, er baseret på regndata fra 78 SVK-målere, som inkluderer de otte, der er udvalgt i forbindelse med nærværende projekt. Det undersøges derfor, om der er en betydelig variation mellem målt nedbør fra de udvalgte SVK-målere i forhold til det radarmålte nedbør. Der sammenlignes nedbør målt i den radarpixel, der tilsvarer målerens lokation, hvorved det antages at de måler ens. Dette undersøges både for akkumuleret- og daglig registreret nedbør for at validere biaskorrigeringen af radardataet.

5.2.1 Akkumuleret regn

Af Figur 5.1 er det vist, hvilke radarpixels, som benyttes i forhold til den pågældende SVK-måler. Et eksempel er, at nedbøren målt for SVK-måler 5705 sammenlignes med den radarmålte nedbør, der er fordelt ud i pixel, P16. På Figur 5.1 ses alle pixels over projektområdet samt de otte regnmålere i- og omkring projektområdet, som sammenlignes.



Figur 5.1. Illustration af SVK-målere og tilhørende radarpixels.

I forbindelse med at analysere akkumuleret nedbørsmængde mellem SVK-målere og tilhørende radarpixels, er der gjort brug af forskellige regnmålerregnserier. Først er der undersøgt for alle regnhændelser, registreret i SVK-målerne i perioden 16/01-2008 til d. 16/09-2022. Hertil viste det sig, at regnmålerne gennemsnitligt registrerede 50% mere nedbør end radaren. Efterfølgende blev radardataet sammenlignet med alle SVK-godkendte hændelser, hvilket resulterede i en

gennemsnitlig summeret nedbørsmængde på 22% mere regn i regnmålerne i forhold til radaren. Derefter blev sammenligningen begrænset til kun at være de døgn, hvor der var opgivet radardata, hvorefter regnmålerne målte cirka 24% mindre regn end tilhørende radarpixel, stadig kun medtaget SVK-godkendte hændelser. Alle disse resultater kan findes i Afsnit E.1 på side 96 i Bilag E på side 96.

Afvigelserne mellem SVK-målerne og radaren kan stamme fra udvælgelsesprocessen, som SVK-målerne gennemgår når den godkendte regnserie laves. Her forkastes både hændelser, der ikke stemmer overens med omkringliggende regnmålere, samt hændelser der forekommer imens der er tekniske problemer med regnmåleren. Derudover forkastes hændelser, der forekommer når temperaturen er under 3 grader, hvor regnmålerens varmelegeme er tændt. Der bliver også kørt en udvælgelsesproces over de ekstreme hændelser, hvor de enten medtages eller forkastes. [Sarup, 2021]

Der er i forbindelse med dette projekt foretaget en redigering af den godkendte regnserie. Her tilføjes de ekstreme hændelser samt hændelser, der forekommer imens regnmåleren er opvarmet. Hændelser under tekniske problemer samt hændelser, der ikke passer overens med omkringliggende målere, forbliver frasorteret. De resulterende regnserier er sammenlignet med radardataet i Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Sammenligning imellem regnmængderne i SVK-målerne og tilsvarende radarpixels, kun medtaget redigeret data fra SVK-måleren på samme dage som der er radardata. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til 18/09-2022.

SVK-måler/pixel	Akk. Radarregn [mm]	Akk. Tilrettet Regnmålerregn [mm]	Afvigelse [%]
5645 / P13	6.048	5.611	-7,2
5655 / P126	5.957	5.537	-7,1
5660 / P137	6.074	5.856	-3,6
5690 / P177	6.198	5.069	-18,2
5694 / P120	6.100	5.623	-7,8
5699 / P6	6.118	5.183	-15,3
5705 / P16	6.088	5.105	-16,2
5725 / P143	6.309	5.345	-15,3
Gennemsnit	6.112	5.255	-11,3

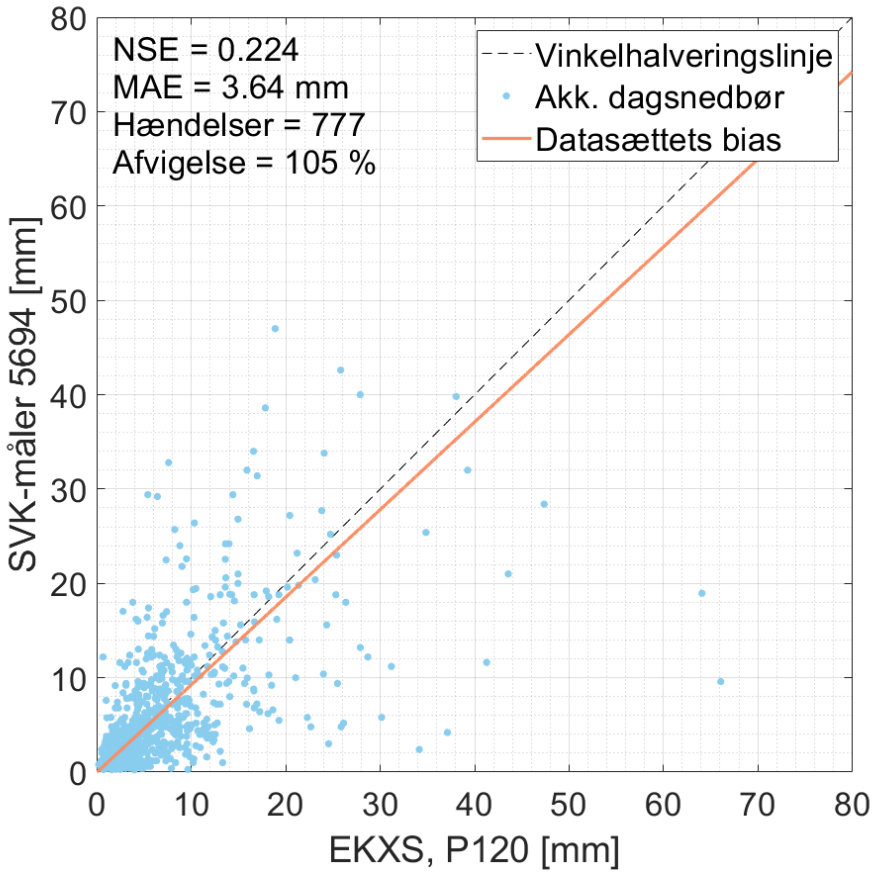
De tilrettede regnserier medfører både lavere afvigelse, samt medtager ekstremhændelser, der kan være af interesse til analyse af modelrespons. Derfor vil disse bruges fremover i projektet.

5.2.2 Daglig nedbør

På baggrund af ovenstående analyse af forskellen mellem total registret nedbør i SVK-målere og tilhørende radarpixels, undersøges sammenhængen mellem radardata og SVK-målere på daglig basis.

I introen til dette kapitel blev det beskrevet, at alle regnhændelser under nul millimeter i enten SVK-målerne eller radaren ikke er interessante for projektet, da formålet er at undersøge modelrespons. Disse analyser er dog udarbejdet og kan findes i Afsnit E.2 på side 98 i Bilag E på side 96.

Af Figur 5.2 fremgår et scatterplot for den akkumulerede døgnnedbør for alle hændelser, hvor der er registret nedbør.



Figur 5.2. Scatterplot for akkumuleret dagsnedbør med hændelser over nul mm for SVK-måler 5694 og radarpixel P120. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier samt antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Det fremgår af ovenstående figur, at der forekommer en bias i forhold til radaren, som forventet ud fra den foregående analyse, se Tabel 5.1 på foregående side. Det fremgår også, at langt størstedelen af hændelserne er under ti millimeter. I dette spænd forekommer der også et mindre bias til radaren. Derudover ses der en generelt stor spredning i hændelserne, specielt de største hændelser passer dårligt overens.

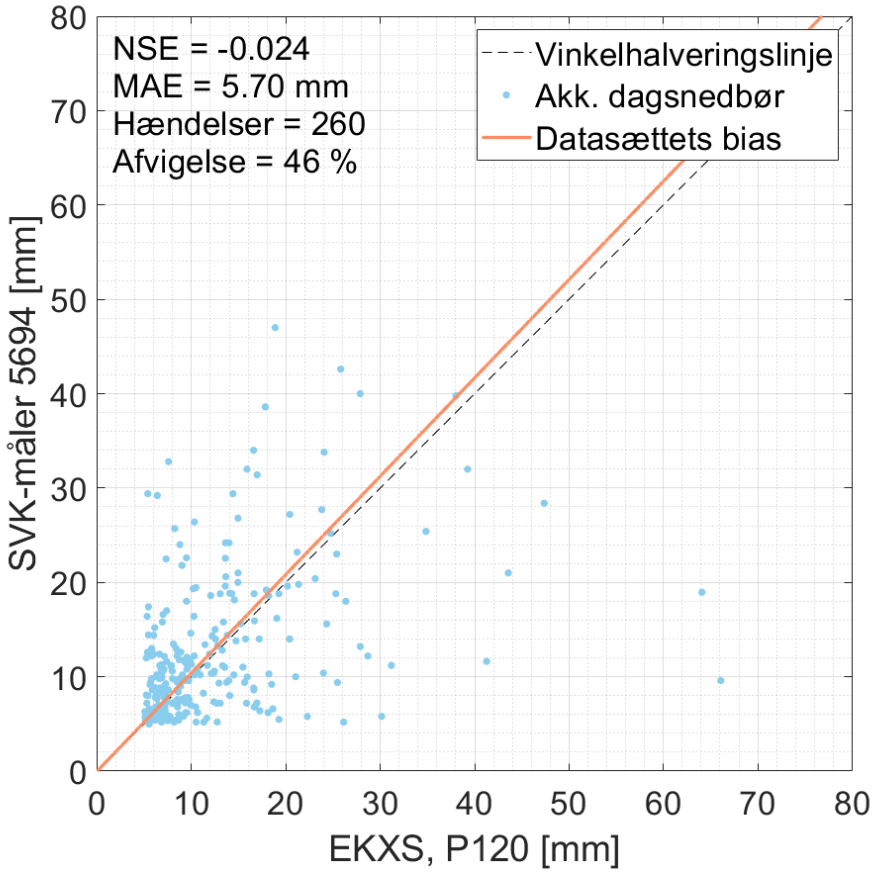
Af Tabel 5.2 på den følgende side fremgår NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias for akkumuleret dagsnedbør.

Tabel 5.2. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias, for den akkumulerede dagsnedbør i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022. Hændelser, hvor enten SVK-målerne eller tilhørende radarpixels har målt nul mm er frasorteret.

SVK / Pixel	**NSE [-]**	**MAE [mm]**	**Hændelser [antal]**	**Afvigelse [%]**	**Bias [-]**
5645 / P13	0,302	3,52	788	232	0,91
5655 / P126	0,293	3,60	723	119	0,93
5660 / P137	0,180	3,64	684	122	0,91
5690 / P177	0,179	3,59	702	162	0,85
5694 / P120	0,224	3,64	777	105	0,93
5699 / P6	0,372	3,33	791	112	0,84
5705 / P16	0,299	3,38	681	136	0,85
5725 / P143	0,285	3,55	766	122	0,85
Gennemsnit	0,267	3,53	739	139	0,88

Af ovenstående tabel forekommer der en generelt dårlig overensstemmelse imellem Radarpixel og tilsvarende regnmåler. Med en gennemsnitlig NSE-værdi på 0,267 passer dataene kun marginalt/lidt bedre overens, end kun at sammenligne med middelværdien. Derudover er det forventet at have lavere MAE-værdier samt afvigelser, for at kunne validerer Radardataet.
De høje afvigelser kan være grundet afvigelser i de små målinger, hvorfor det vælges at undersøge hvilken effekt det har, hvis alle regnhændelser, hvor der er registreret under fem mm nedbør i enten radarpixel eller SVK-måleren frasorteres.

Af Figur 5.3 på næste side fremgår et scatterplot af alle hændelser, hvor der er registreret over fem mm i både SVK-måler 5694 og radarpixel P120, samt tilhørende NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias.



Figur 5.3. Scatterplot for akkumuleret dagsnedbør målt i SVK-måler 5694 i forhold til radarpixel nummer P120. Alle regnhændelser, hvor der er registreret under fem mm i enten SVK-måleren eller tilhørende radarpixel er frasorteret. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier samt antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Heraf fremgår der en reduktion i NSE, en stigning i MAE, og en reduktion i afvigelsesprocent. Reduktionen i afvigelseprocent kan tilskrives, at det styrende for afvigelsesprocenten er de hændelser hvor der er registreret få millimeter nedbør, hvorfor en lille afvigelse svarer til en stor procentvis afvigelse. Derudover ses det også, at bias nu har skiftet over til at pege imod regnmåleren, om end meget lidt. Data for de resterende radarpixel regnmåler par, fremgår af Tabel 5.3 på den følgende side.

Tabel 5.3. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias, for den akkumulerede dagsnedbør i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022. Hændelser, hvor enten SVK-målerne eller tilhørende radarpixels har målt fem mm er frasorteret.

SVK / Pixel	NSE [-]	MAE [mm]	Hændelser [antal]	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645 / P13	0,112	5,43	254	46	0,99
5655 / P126	0,138	5,40	238	41	1,06
5660 / P137	-0,066	5,48	230	41	1,09
5690 / P177	-0,061	5,25	230	44	1,00
5694 / P120	-0,024	5,70	260	46	1,04
5699 / P6	0,218	5,02	256	48	0,91
5705 / P16	0,154	5,07	220	45	0,96
5725 / P143	0,098	5,62	245	49	0,96
Gennemsnit	0,070	5,37	242	45	1,00

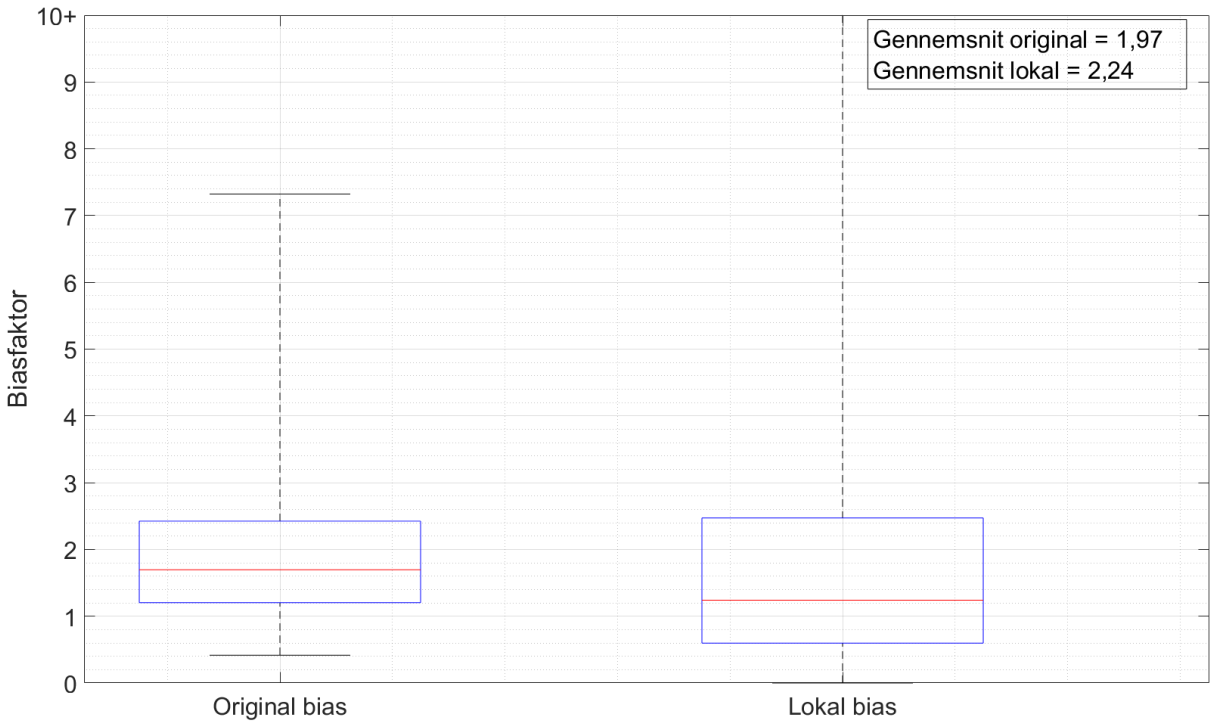
Heraf kan det konkluderes at den tendens, der blev set på Figur 5.3 på foregående side, også gør sig gældende for de resterende regnmåler/radarpixel par. Når der fjernes yderligere datapunkter, hvor der er registreret under 5 mm regn enten i regnmålerne eller af radaren, bliver både NSE- og MAE-værdierne væsentligt forringet i forhold til tidligere resultater.
Dette skyldes, at en meget stor del af datasættet ligger nede i den lave ende af plottet og dermed bliver frasorteret. Ved regnhændelser over ti millimeter, ses der en tendens til større spredning mellem datapunkterne, hvilket giver den dårlige sammenhæng. Det ses også, at der for regnmålerne 5660, 5690 og 5694 forekommer negative NSE-værdier, hvilket blot understreger, at sammenhængen bliver væsentligt forringet ved at fjerne punkterne mindre end fem millimeter.

I valideringen af radardataet er der fundet en sammenhæng, på baggrund af NSE-værdierne over 0. Der fremgår dog stadig markante forskelle i målt nedbør, som ses af Figur 5.2 på side 26, hvorfor det vil forsøges at forbedre sammenhængen imellem regnmålerdata og radardata.
En mulig grund til afvigelserne, der er fundet kan skyldes den biaskorrigering af radardataet, der er foretaget. Derfor vil radardataet blive forsøgt kalibreret og efterfølgende analyseret, ud fra en ny biaskorrigering, i næste afsnit. Derved kan det bestemmes om sammenhængen er forbedret.

5.3 Kalibrering af radardata med lokal biasfaktor

Ud fra forrige afsnit blev det besluttet, at det kunne være grundet den originale biaskorrigering, at der forekommer afvigelser imellem nedbør målt i henholdsvis radaren og de otte regnmålere. Derfor vil der i dette afsnit udarbejdes en lokal biaskorrigering på baggrund af de otte SVK-målere, for at kalibrere radardataet op mod regnmålerdataet. Ved at målrette biaskorrigering op imod regnmålerne, som radaren sammenlignes med, antages sammenhængen at forbedres.

Biaskorrigeringen laves på baggrund af tidligere beskrevne teori fra Thorndahl et al. [2014] og ligninger er præsenteret i Bilag B på side 91. Dertil vil der stadig anvendes døgnværdier til bestemmelse af de nye biasfaktorer, ud fra de ootte regnmålere i området. På Figur 5.4 på den følgende side fremgår to boksplots over de originale- og de lokale biasfaktorer.



Figur 5.4. Boksplot over de originale- og de lokale biasfaktorer.

Af ovenstående figur fremgår det, at det nederste kvartil af den lokale biaskorrigering er væsentligt lavere end det originale. Hertil ses det desuden, at den nye biaskorrigering indeholder nulværdier, mens den mindste originale biasfaktor er cirka 0,4. Det ses også, at medianen for de lokale biasfaktorer er lavere end de originale på trods af, at gennemsnittet for den lokale biaskorrigering er størst. Dette kan begrundes med, at de lokale faktorer indeholder enkelte værdier, der er mange gange større end maksimalværdien på lidt over syv for de originale biasfaktorer. Det ses, at de øverste kvartiler cirka er det samme, hvorfor det specielt er spredningen af de største faktorer, der er med til at trække gennemsnittet for de lokale biasfaktorer op. De relevante værdier fra Figur 5.4 fremgår af Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Værdier anvendt til fremstilling af boksplots for originale- og lokale biasfaktorer.

Biasfaktor	**Min.**	**25%-fraktil**	**Median**	**Gennemsnit**	**75%-fraktil**	**Maks.**
Originale	0,42	1,20	1,70	1,97	2,42	7,32
Lokal	0	0,60	1,24	2,24	2,47	38,00

I et forsøg på at bestemme, om der forekommer klare tendenser i ændringerne, der er foretaget af biassættet, er hvert døgns biasfaktor plottet mod hinanden. Dette fremgår af Bilag F på side 102. Af denne analyse fremgår der en generel tendens, i at de store biasfaktorer i den originale biasjustering, stadigvæk er store i den lokale biasjustering.

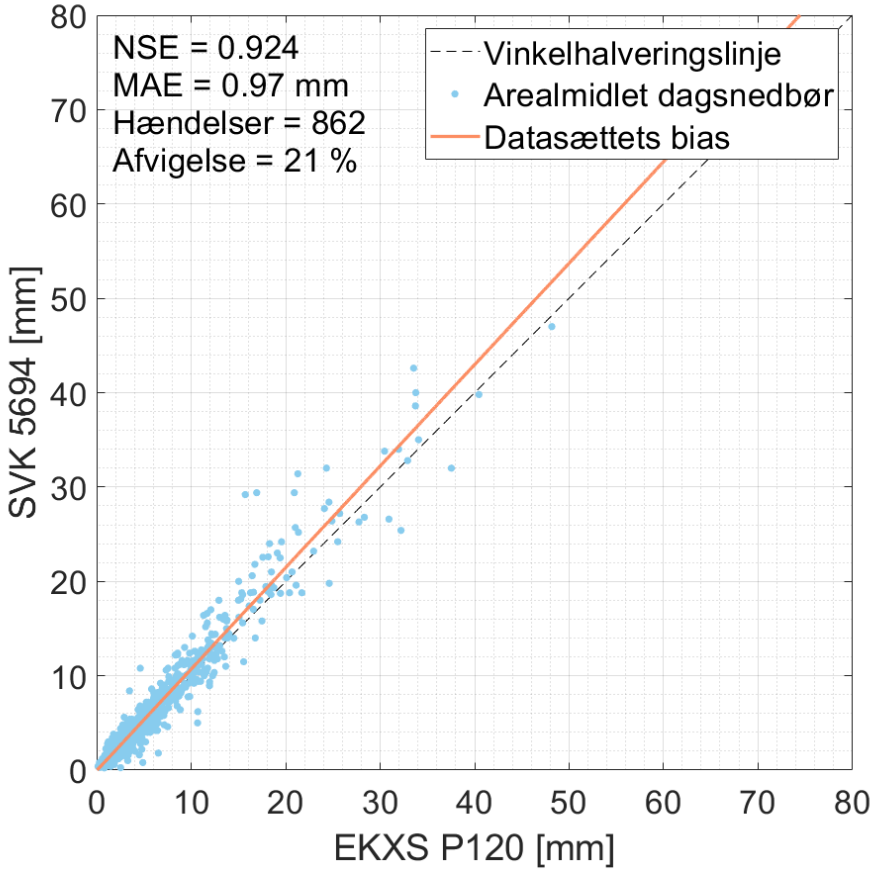
I det følgende afsnit vil de lokale biasfaktorer valideres.

5.4 Validering af lokaltkorrigeret radardata

Tidligere blev der foretaget en validering af det originale radardata, hvor det blev bestemt at det ikke kunne valideres i forhold til regnmålerdata. I dette afsnit vil der foretages samme analyse som tidligere, i forsøget på at validere det lokalkorrigerede radardata.

Grundet den lokale biasfaktor er beregnet ud fra alle otte regnmålere, vil der stadig forekomme hændelser hvor der er registreret nedbør i en radarpixel, men der ikke er registreret nedbør i den tilsvarende regnmåler. Disse er ligesom tidligere frasorteret i analyser, men kan findes i Bilag E på side 96.

Af Figur 5.5, fremgår der en sammenligning af døgnnedbør imellem SVK-måler 5694 og tilsvarende radarpixel. Af samme tabel fremgår også antal medtaget hændelser, gennemsnitlig afvigelse same bias mellem pågældende datasæt.



Figur 5.5. Scatterplot for akkumuleret dagsnedbør målt i SVK-måler 5694 i forhold til radarpixel P120. Alle regnhændelser, hvor der er registreret nul mm i enten SVK-måleren eller af radaren er frasorteret. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Af ovenstående figur fremgår der en markant bedre sammenhæng imellem radardata og regnmåler end tidligere. NSE-værdien viser en god sammenhæng, samt en klar reduktion i MAE og afvigelsesprocenten end med det originale datasæt. I forhold til det originale radardata, er datasættets bias imellem 5694 og P120 skiftet over til, at regnmåleren registrerer mest nedbør.

Data for de resterende regnmåler/radarpixel par kan findes i Tabel 5.5.

Tabel 5.5. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias, for den akkumulerede dagsnedbør i den redigerede godkendte regnserie i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels. Der er frasorteret hændelser, hvor enten radaren eller SVK-målerne har målt nul millimeter.

SVK / Pixel	NSE [-]	MAE [mm]	Hændelser [antal]	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645 / P13	0,871	1,27	888	35	1,10
5655 / P126	0,918	1,07	843	24	1,06
5660 / P137	0,920	0,99	858	21	1,03
5690 / P177	0,886	1,14	839	23	0,96
5694 / P120	0,924	0,97	862	21	1,07
5699 / P6	0,921	1,05	880	29	1,01
5705 / P16	0,926	0,99	807	29	1,02
5725 / P143	0,887	1,19	857	28	0,99
Gennemsnit	0,907	1,08	854	26	1,03

Der forekommer samme tendens som af Figur 5.5 på foregående side, for de resterende regnmåler/radarpixel par. Herunder en markant forbedring i gennemsnitlig NSE-værdi i forhold til det originale radardata, som fremgår af Tabel 5.2 på side 27. Derudover er både MAE og procentvis afvigelse reduceret til mindre end 25% af hvad det var tidligere.
Der ses også en reduktion i biasfaktor imellem radarpixels og regnmålere, hvor det passer bedre overens.

Ligesom for det originalt korrigerede radardata, er der igen undersøgt i hvor høj grad den akkumulerede nedbør passer overens imellem regnmåler/radarpixel par henover hele perioden. Her blev der fundet en gennemsnitlig afvigelse på under 1%. Denne analyse kan findes i Afsnit E.3 på side 101 i Bilag E på side 96.

Ud fra dette afsnit er det blevet vist, at en lokal biasjustering af radardataet ud fra de otte regnmålere i- og omkring projektområdet forbedrer sammenhængen mellem de udvalgte regnmålere og tilhørende radarpixels markant.

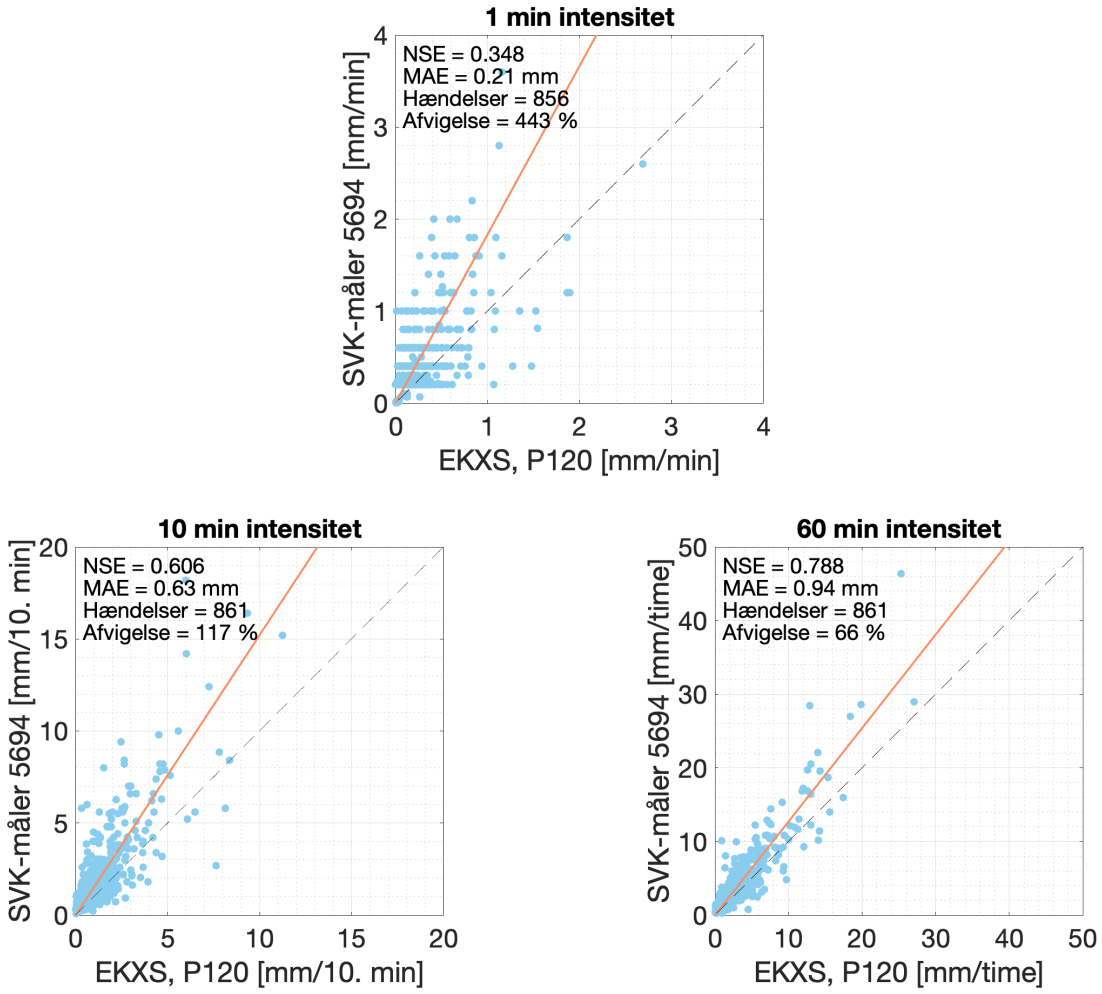
Ud fra døgnværdier er det lokaltbiaskorrigerede radardata nu valideret. Det er dog ikke kun døgnværdier der er betydende for dimensionering og analysering af afløbssystemer.
Derfor foretages der i næste afsnit en analyse af, om der kan være udfordringer forbundet med registrering af maksimale regnintensiteter. Dette analyseres, grundet en vurdering af, at højintense kortvarige regnhændelser kan være udfordrende for opstuvning i brønde samt ledninger. Hvis der forekommer betydelige forskelle mellem regnmåler- og radardata vil dette også kunne afspejles i modelresultaterne.

5.5 Analyse af maksimale regnintensiteter

Udover at analysere forskelle i både totale- og daglige nedbørsmængder, analyseres forskellen i maksimale intensiteter også imellem regnmåler og radardata. Hertil vælges det først at sammenligne den maksimale regnintensitet for henholdsvis 1-, 10- og 60 minutter. Dette gøres for

alle regnhændelser i samme periode, som tidligere beskrevet, fra d. 16/01-2008 til d. 18/09-2022. Hændelser, der resulterer i en intensitet på 0 mm i enten rader eller regnmåler, frasorteres.

Af Figur 5.6 fremgår tre scatterplots for den maksimale 1-, 10- og 60 minutters regnintensitet målt i SVK-måler 5694 og tilhørende radarpixel P120.



Figur 5.6. Scatterplot for den maksimale 1-, 10- og 60 minutters intensitet per døgn målt i SVK-måler 5694 i forhold til radarpixel P120 for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022. Hændelser, der resulterer i en intensitet på 0 mm i enten rader eller regnmåler frasorteres for de tre maksimale regnintensiteter. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier samt antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Det kan ses af ovenstående figur, at regnmåleren generelt registrerer væsentligt højere regnintensiteter end EKXS, specielt på kortere varigheder. Dette formodes at være på grund af, at radaren midler regnintensiteten ud over et areal på 500x500 meter, hvorimod regnmålere registrerer nedbøren i ét specifikt punkt.
Det kan ligeledes ses af de tre scatterplots, at midlingen af nedbøren i radaren bliver mindre betydelig jo højere den tidslige intensitet bliver, da den orange streg, som indikerer datasættets bias, er tættere på vinkelhalveringslinjen ved 60 minutters intensiteterne i forhold til 10- og 1

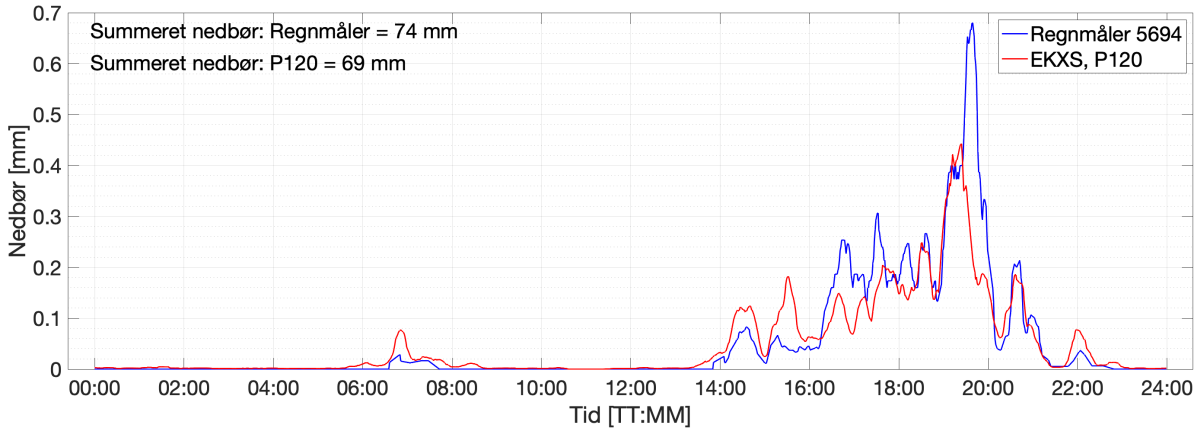
minuts intensiteterne. Udover effekten fra den spatiale midling, forekommer der også en tidslig midling idet radaren måler i 10 minutters intervaller, hvor regnmåleren registrerer vip per minut.

Den samme tendens mellem regnmålere/radarpixel par gør sig gældende for de resterende syv par, hvilket fremgår af tabellerne i Bilag G på side 103 for 1-, 10- og 60 minutters maksimale intensiteter.
Af Tabel 5.6 fremgår gennemsnitsværdierne for de tre tabeller fra Bilag G på side 103 for maksimal 1-, 10- og 60 minuttersintensitet.

Tabel 5.6. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias, for den maksimale 1-, 10- og 60 minutters regnintensitet for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels. Ligeledes fremgår datasættets bias.

Tid [min]	NSE [-]	MAE [mm/tid]	Hændelser [antal]	Afvigelse [%]	Data Bias [-]
1	0,387	0,21	854	388	1,99
10	0,549	0,61	854	118	1,44
60	0,734	0,96	855	73	1,23

Det fremgår af Tabel 5.6, at NSE-værdien generelt er lav, for de tre intensiteter, dog med en forbedring jo længere tid der analyseres over. Ydermere kan det af tabellen ses, at datasættets gennemsnitlige bias varierer mellem 1,99 og 1,23 for de tre intensiteter, hvilket indikerer, at regnmålerne resulterer i højere regnintensiteter.
Derfor kan det konkluderes, at regnmålerne giver anledning til højere regnintensiteter, hvilket som tidligere beskrevet, formodes at være på grund af radarens spatiale opløsning i forhold til punktmålerne. Dette giver anledning til, at der generelt registreres højere peaks i regnintensitet for regnmålere end radaren, men der cirka måles den samme mængde nedbør over regnhændelsen, hvilket svare til cirka samme areal under hver kurve. Dette er er illustreret på Figur 5.7 for d. 14/08-2010 for regnmåler 5694 og radarpixel, P120. Ydermere fremgår den daglige summerede nedbør af figurens øvre venstre hjørne.



Figur 5.7. Hyetograf over nedbør målt i regnmåler 5694 og radarpixel, P120. Ligeledes fremgår den summerede nedbør for de to målemetoder.

Af ovenstående figur er det tydeligt at se, hvordan regnmåleren registrerer højere peaks, specielt omkring klokken 19:30, hvor der er relativt stor forskel imellem regnmåler og EKXS. Dog kan det ses, at de to målemetoder resulterer i cirka den samme mængde summeret nedbør. Hermed kan udfordringerne ses ved at registrere de samme peaks i radaren i forhold til regnmåleren. Dette skyldes blandt andet den måde radaren opsamler data. Der vil være en forskel i det målte nedbør opsamlet i en regnmåler tæt på jordoverfladen og radaren, som måler nedbøren i cirka en kilometers højde.

5.6 Opsamling

I dette kapitel er der lavet en sammenligning af totale mængder nedbør og døgnværdier imellem SVK- og radardata. Alle sammenligninger imellem SVK-dataet og radardata er foretaget i den tilsvarende pixel til SVK-målerens placering. Dette er gjort med fokus på at besvare det første delspørgsmål til rapportens opstillede hypotese i Kapitel 2 på side 5, som fremgår af følgende:

- Forekommer der betydelige afvigelser imellem radarobservationer og punktnedbør målt i SVK-målere?

I analysen af de totale regnmængder blev radardataet sammenlignet med SVK-data. Her blev det påvist at regnmålerne i gennemsnit måler 11% mindre regn over perioden, når der kun sammenlignes dage med radardata.

I dette kapitel blev det vurderet mest relevant kun at analysere alle regnhændelser, hvor der var målt over nul millimeter i både regnmålere og radaren i den pågældende periode. Hertil blev der påvist en gennemsnitlig NSE-værdi på 0,224 med det originale bias. På baggrund af denne dårlige sammenhæng blev der foretaget en kalibrering af radardataet med en ny lokal biaskorrigering af ud fra de otte udvalgte regnmålere, i- og omkring projektområdet. Dette resulterede i en gennemsnitlig NSE-værdi på 0,924.
Ud fra dette er det besluttet, at der fremover i dette projekt vil blive anvendt radardata, som er biaskorrigeret udelukkende efter de otte regnmålere i- og omkring projektområdet, da dette giver en signifikant bedre sammenhæng mellem nedbøren målt af radar og regnmålere.

Der blev også undersøgt afvigelse i forhold til de maksimale intensiteter målt i henholdsvis radar og regnmåler. Hertil blev det påvist, at regnmålere generelt giver anledning til højere regnintensiteter i forhold til radardataet. Dette antages at være grundet den spatiale opløsning på radaren i forhold til regnmålerne, som måler i en finere opløsning.

I Del II af rapporten vil der blive gjort brug den udleverede Mike Urban model til at analysere effekten af de to beskrevne og analyserede regninput i løbet af Del I. Dette indbære regnmålerregn ved brug af varierende antal SVK-målere, samt den nye kalibrede radarkorrigeret regn. Dette er beskrevet yderligere i det følgende.

Del II

Analyse af modelrespons ved spatialt regninput

I denne del af rapporten vil effekten af hensyntagen til regnens spatiale udbredelse blive undersøgt ved hjælp af Mike Urban modellen over projektområdet.
Effekten ved anvendelsen af radardata vil analyseres ved undersøgelse af i alt fire regnmålerscenarier, som sammenlignes med radaren. Disse fire scenarier er:

- Scenarie 1: Én regnmåler (5694)
- Scenarie 2: Tre regnmålere (5690, 5699, 5725)
- Scenarie 3: Fem regnmålere (5660, 5690, 5699, 5705, 5725)
- Scenarie 4: Otte regnmålere (5645, 5655, 5660, 5690, 5694, 5699, 5705, 5725)

Analysen foretages i forhold til fire forskellige parametre fra Mike Urban modellen:

- Arealmidlet nedbør
- Udløbsvolumen
- Overløbsvolumen
- Opstuvning i brønde

I forbindelse med at analysere ovenstående vil følgende analyseværdier anvendes:

- *Nash-Sutcliffe-Efficiency*-koefficient (NSE)
- *Mean Absolute Error* (MAE)
- Procentvise afvigelse
- Antal regnhændelser angivet som døgn
- Generel biasfaktor mellem to respektive datasæt

Beskrivelsen af ovenstående analytiske værdier fremgår i intro til Kapitel 5 og ligninger til udregning er angivet i Bilag D.

Denne del er opdelt i tre kapitler, hvor Kapitel 6 indeholder en kvantitativ analyse af størstedelen af alle regnhændelser for perioden 16/01-2008 til d. 18/09-2022 i forbindelse med de præsenterede scenarier og modelparametre.
I forbindelse med kravet om at reducere aflastningerne til Utterslev Mose til maksimalt én gang om året jævnfør Københavns Kommunes Teknik- og Miljøforvaltningen [2018], er der i Kapitel 7 undersøgt ekstremhændelser. Til dette er der foretaget en analyse af den akkumulerede daglige nedbør, og Mike Urban modellen er igen undersøgt ud fra de fire tidligere beskrevne modelparametre.
Til denne del er Bilag D, H, I, J, K og Bilag L tilknyttet.

6 Statistisk sammenligning af udvalgte parametre

I forrige del af rapporten blev der foretaget en ny biaskorrigering af radardataet, som blev valideret ved brug af Mike Urban modellen.

I dette kapitel er formålet at undersøge effekten af at benytte varierende grad af spatialt regninput i Mike Urban modellen over projektområdet. Til at undersøge effekten vil radardataet med den nye biaskorrigering blive sammenlignet med et varierende antal regnmålere. Til at isolere effekten af anvendelse af spatialregn er der udvalgt fire modelparametre, hvor de forskellige regninput anvendes, hvilket er præsenteret i Del II på forrige side.

Alle analyserne af modelresultater vil være relative sammenligninger mellem de forskellige regninput.

6.1 Udvælgelse af regnhændelser

Grundet afvigelser mellem, hvornår hændelserne er registreret af radaren og i regnmålerne, er alle simuleringerne kørt over hele døgn.

Til den statistiske analyse vælges det at frasortere alle regnhændelser svarende til en arealmidlet nedbør under 1 mm. Ved at gøre dette frasorteres der forskellige antal døgn afhængigt af, om EKXS resultaterne sammenlignes med resultaterne fra én-, tre-, fem- eller otte regnmålere. Af Tabel 6.1 fremgår antallet af døgn, som opfylder det valgte krav til 1 mm ud af 982 døgn ved sammenligning af EKXS med de fire regnmålerscenarier.

Tabel 6.1. Antal døgn der medtages til analyse af parametrene i Mike Urban modellen i forhold til det totale antal på 982 døgn.

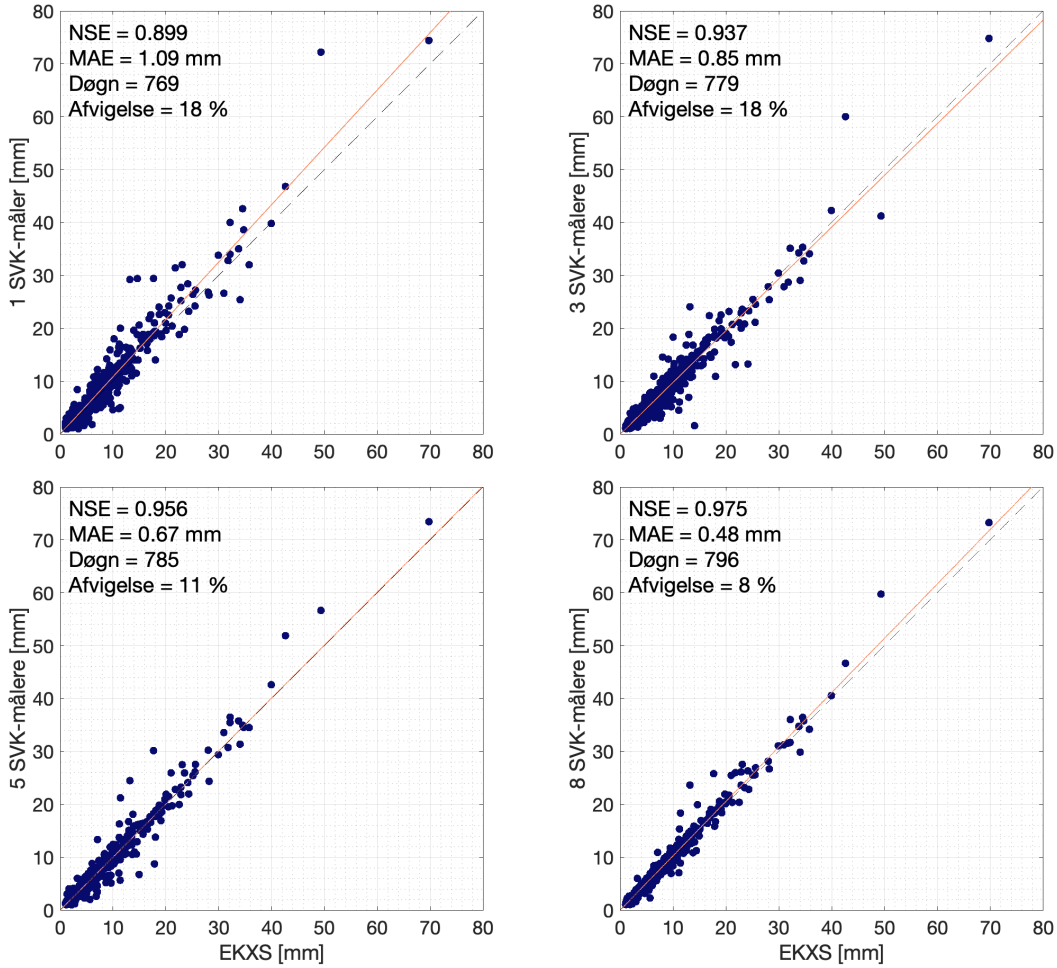
EKXS i forhold til	**Medtagne døgn/Totale antal døgn**
1 regnmåler	769/982
3 regnmålere	779/982
5 regnmålere	785/982
8 regnmålere	796/982

Af ovenstående tabel kan det ses, at der cirka frasorteres 100 døgn baseret på det fastsatte krav. Grunden til, at antallet af døgn varierer fra scenerierne kan skyldes, at jo flere regnmålere, der medtages, jo bedre beskrives den spatiale udbredelse og dermed opfanges der flere regnhændelser.

I forbindelse med at simulere ét døgn, kan der forekomme afvigelser i forhold til overløbs- og udløbsvolmner ved regnhændelser umiddelbart før midnat, da der stadig kan være igangværende udløb når simuleringen afsluttes.
Til at reducere betydningen af dette udregnes udløbsvolumenet, som den totale indførte regnmængde, fratrukket overløbende vand. Dette vil dog stadig medføre en afvigelse i tilfælde hvor overløb fortsætter efter døgnet slutter.

6.2 Arealmidlet nedbør

Til at sammenligne arealmidlet nedbør benyttes nettoregnmængden, som registreres i modellen baseret på regninputtet, og midles ud over det totale oplandsareal. Dette vurderes ikke at give nogen negativ effekt i forhold til, at den nordlige del er simplificeret, da det primært er rørmodellen, der er påvirket af dette. Af Figur 6.1 fremgår fire scatterplots, ét for hvert scenarie med SVK-målerne op af y-aksen i forhold til EKXS hen ad x-aksen.



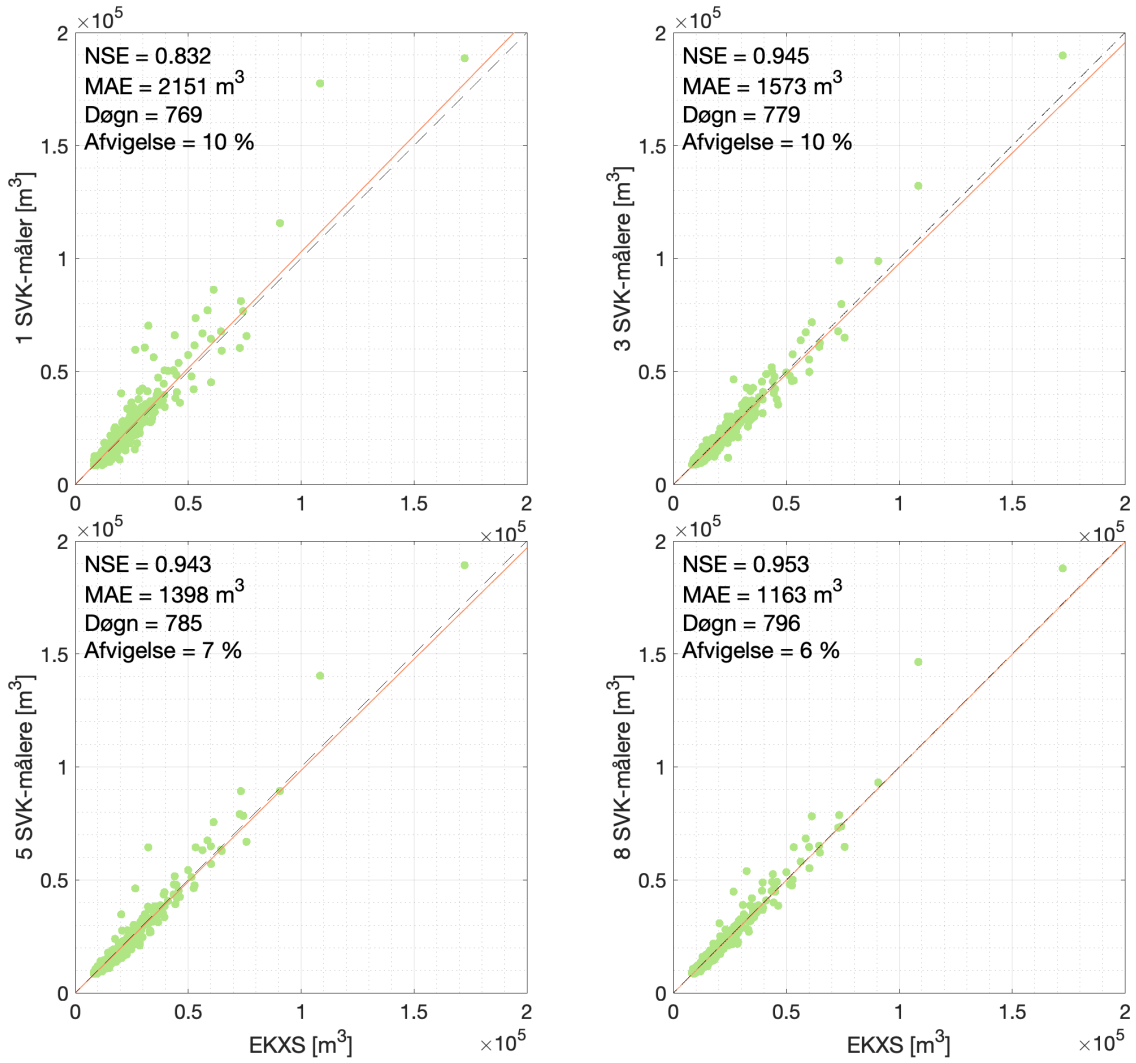
Figur 6.1. Fire scatterplot af arealmidlet nedbør over projektområdet med de fire scenarier for SVK-målere op ad y-aksen i forhold til EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Af ovenstående scatterplots kan det ses, at NSE-værdien forbedres jo flere SVK-målere, der benyttes som regninput. Det fremgår, at én regnmåler passer godt overens med radardataet, men der findes en tendens til at regnmålerne konvergerer imod radardata, i forbindelse med at flere regnmålere medtages.
Ydermere kan det ses af Figur 6.1 på foregående side, at MAE-værdierne reduceres, hvilket angiver, at usikkerheden mellem hver hændelse gennemsnitligt reduceres ved brug af flere regnmålere i forhold EKXS.

Det fremgår også, at spredningen imellem punkterne reduceres i forbindelse med, at der medtages flere regnmålere, hvor specielt outliers reduceres betydeligt.

6.3 Udløbsvolumen fra model

Den anden parameter, som undersøges er forskellen i det totale udløbsvolumen. Som beskrevet i afsnit 6.1 på side 38 er udløbsvolumenet udregnet ved at fratrække det totale overløbsvolumen i modellen fra det totale regninput.
Ligesom for den arealmidlede nedbør benyttes hele projektområdet ved undersøgelse af udløbsvolumen. Eventuelle usikkerheder i modellen er igen relative, hvorfor hvert døgn vil være påvirket af dette.
Af Figur 6.2 på næste side fremgår fire scatterplots, ét for hvert scenarie med SVK-målerne op af y-aksen i forhold til EKXS hen ad x-aksen.

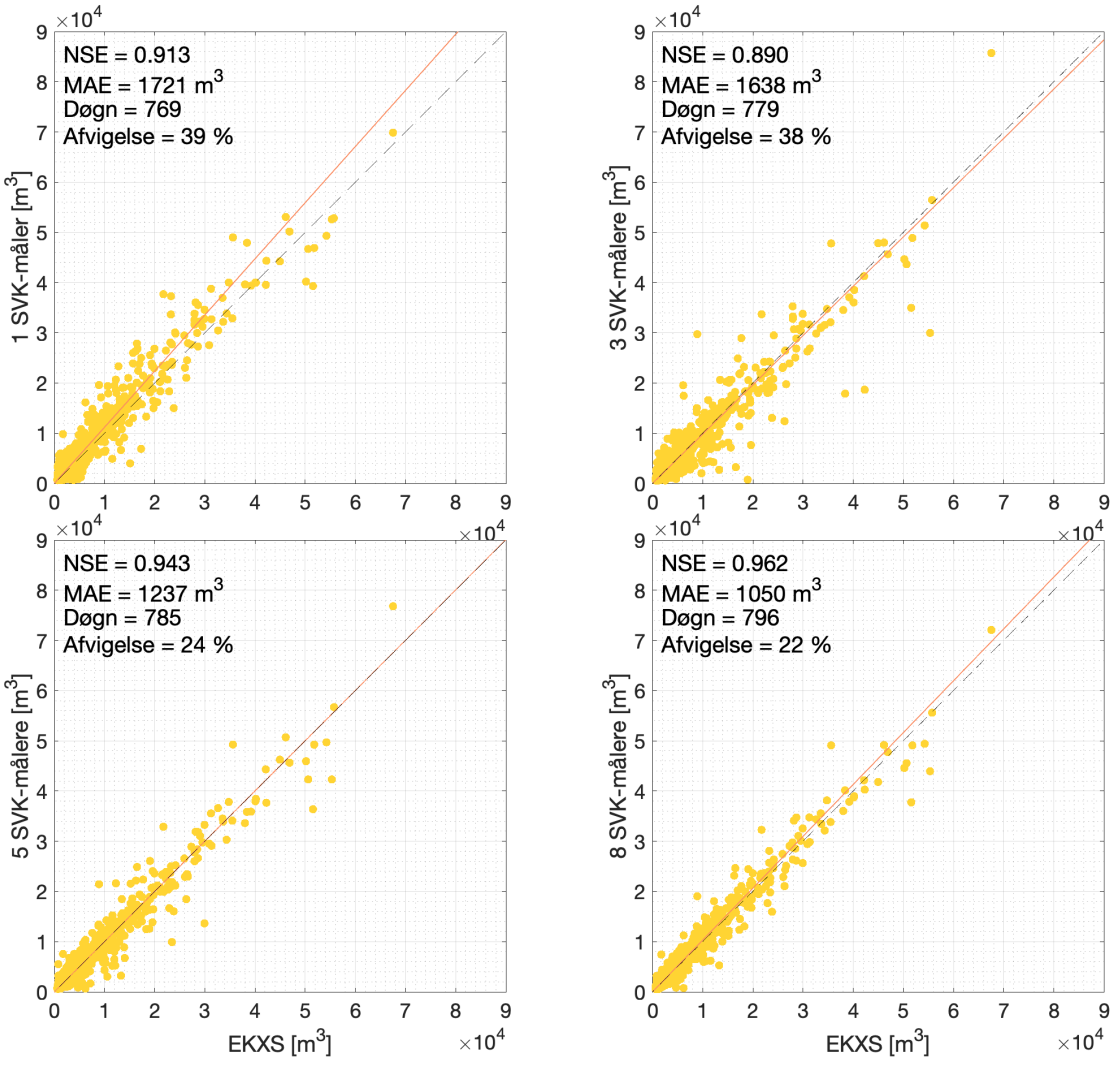


Figur 6.2. Fire scatterplot af udløbvolumen i Mike Urban modellen med de fire scenarier for SVK-målere op ad y-aksen i forhold til EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Af ovenstående figur kan det ses, at det samme gør sig gældende, som for resultaterne fra forrige parameter med det arealmidlede nedbør. Anvendelsen af flere regnmålere giver bedre resultater i forhold til højere NSE-værdier og lavere MAE-værdier, samt en mindre afvigelse. Størstedelen af forbedringen forekommer ved ændring fra én- til tre regnmålere, hvor de fleste outliers er reduceret.
Det fremgår af Figur 6.2, at der forekommer en afvigelse på 10% for én- og tre regnmålere, men en forbedring i NSE- og MAE-værdien. Dette skyldes, at den procentvise afvigelse har den største betydning for små regnhændelser.

6.4 Overløbsvolumen

Den tredje parameter er det totale overløbsvolumen for projektområdet. For at se placeringen og antallet af overløb i modellen henvises der til Figur 3.2 på side 8. Af Figur 6.3 fremgår fire scatterplots for overløbsvolumner for de respektive døgn ved brug af de pågældende scenarier.



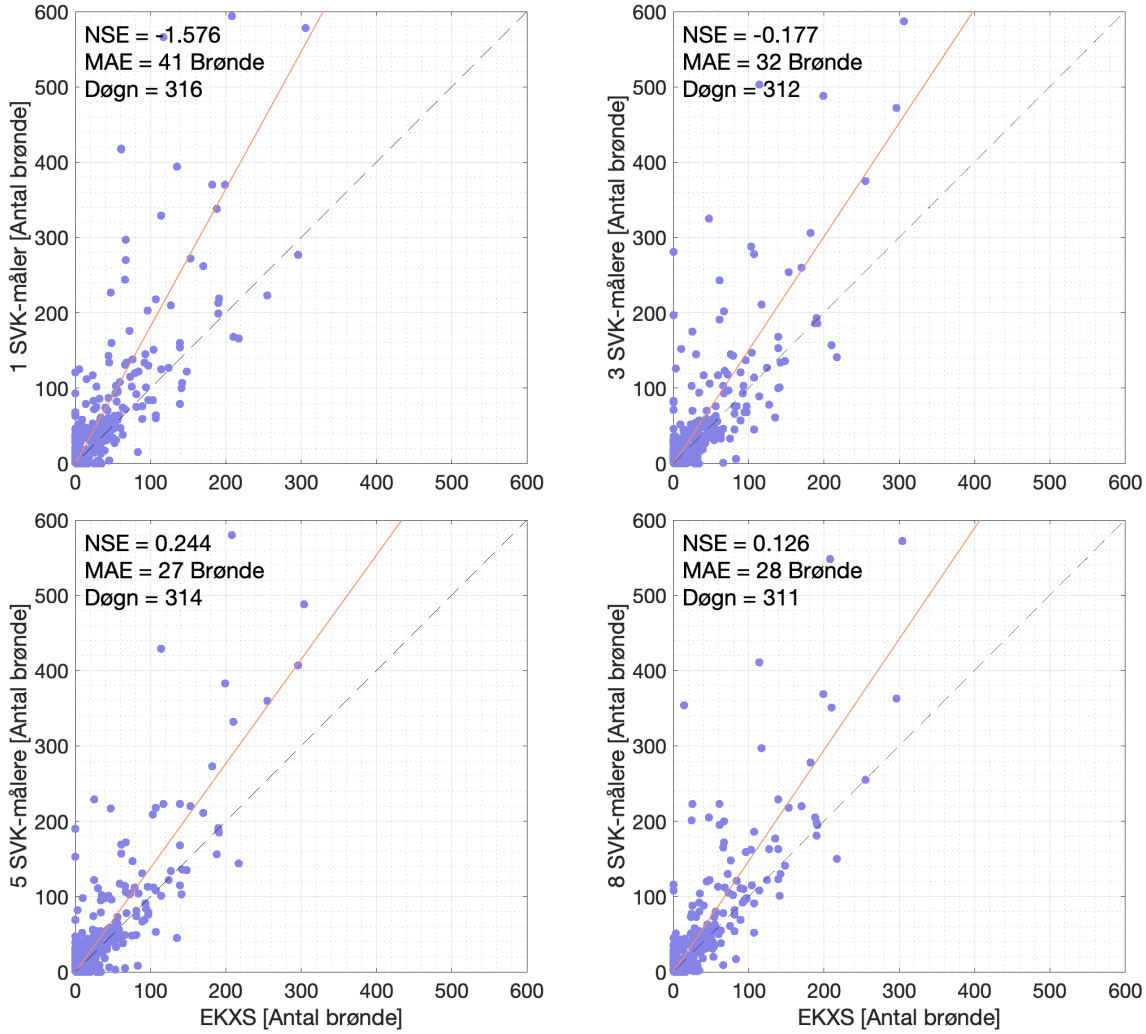
Figur 6.3. Fire scatterplot med total overløbsvolumen med de fire scenarier for SVK-målere op ad y-aksen i forhold til EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Af ovenstående scatterplots kan det ses, at der generelt er den samme tendens i forhold til brugen af flere regnmålere ligesom ved analyserne af de to forrige parametre. Spredningen mellem regnmåler og EKXS reduceres, og det samme er gældende for MAE og den procentvise afvigelse. Det kan blandt andet ses, at forskellen imellem at bruge fem- og otte regnmålere ikke er så markant, men der forekommer stadig forbedringer i alle parametre.
Ydermere fremgår det igen, at der generelt registreres højere overløbsvolumener ved brug af én regnmåler, da den orange biaslinje er over vinkelhalveringslinjen.

6.5 Opstuvning i brønde

Den sidste parameter er opstuvning i brønde, herunder kun brøndene i den sydlige del af modellen, hvilket er begrundet i Bilag A på side 88. Det er valgt at benytte en delfyldningsgrad på 50%. Dette skyldes, at ved denne delfyldningsgrad antages der ikke at forekomme fuldtløbende rør i hele modellen, men samtidig resulterer dette i en forholdsvis kritisk respons for afløbssystemet. Til analyse af brønde med delfyldningsgrad på over 50% frasorteres alle regnhændelser, hvor både radar- og regnmålersceanrier resulterer i nulværdier.

Af Figur 6.4 fremgår fire scatterplots, hvor antallet af brønde, der opnår en delfyldningsgrad på mindst 50% for hver regnhændelse for enten radar- eller regnmålerscenarier, fremgår. Der er ikke udregnet procentvis afvigelse mellem datapunkterne, grundet nogle regnhændelser giver anledning til nul brønde, som overskrider 50% ved enten regnmåler- eller radarscenariet.



Figur 6.4. Fire scatterplot af antal af brønde hvori der er en delfyldningsgrad på mere end 50% i løbet af døgnet, med de fire scenarier for SVK-målere op ad y-aksen og EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Det kan ses af Figur 6.4 på foregående side, at der forekommer en væsentlig større spredning af datapunkterne end ved de tre tidligere parametre. Dog kan det ses, at spredningen reduceres markant ved at benytte flere regnmålere i modellen.

Generelt fremgår det af ovenstående fire scatterplots i Figur 6.4 på forrige side, at regnmålerinput giver anledning til et højere antal brønde, som opnår en delfyldningsgrad på 50% end radarinput. Dette skyldes formegentligt, at opstuvning i brønde vil være meget følsom overfor højintens nedbør. I Afsnit 5.5 på side 32, hvor maksimale regnintensiteter blev analyseret, kunne det ses, at der var en betydelig forskel mellem radar- og regnmålinger. Heraf kunne det ses, at regnintensiteten generelt var højest for regnmålerdata.
Baseret på ovenstående må det også formodes, at de tre tidligere parametre ikke er så styret af højintens nedbør som opstuvning i brønde.

Af de fire plots på Figur 6.4 på forrige side vides det ikke, om det er de samme brønde, der opstuver for de pågældende regnhændelser, eller om det varierer. Dette analyseres i Afsnit 7.5.1 på side 55, hvoraf der samtidig undersøges for effekten af den spatiale udbredelse af nedbøren ved brug af de forskellige scenarier.

6.6 Opsamling

I Kapitel 2 på side 5, hvor projektets hypotese blev opstillet, blev der ligeledes udarbejdet underspørgsmål til at kunne besvare den. I dette kapitel er følgende spørgsmål analyseret:

- Hvor stor effekt resulterer brugen af forskellige spatiale regninput i en Mike Urban model sammenlignet med punktnedbør?

Til at analysere ovenstående spørgsmål blev der i Del II på side 37 opsat fire forskellige regnmålerscenarier til simulering i Mike Urban modellen. Hertil blev det fastsat, at der undersøges for et totalt antal regnhændelser mellem 769 og 796, afhængigt af hvilket regnmålerscenarie, der benyttes.

Modelresultaterne blev brugt til at analysere på de fire modelparametre præsenteret i Del II på side 37, for at undersøge hvilken effekt det vil have at medtage forskellige niveauer af den spatiale udbredelse. Analysen dækkede arealmidlet nedbør, total udløbs- og overløbsvolumenet samt antal brønde med over 50% delfyldningsgrad. For antallet af brønde med 50% delfyldningsgrad er det kun den sydlige del af modellen, som blev anvendt, grundet usikkerheder forbundet med rørmodellen i den nordlige del, hvilket er beskrevet i Bilag A på side 88.

Baseret på statistiske analyser af de fire modelparametre kan det ses, at det har en positiv effekt, at medtage flere regnmålere til at beskrive den spatiale udbredelse af regnen. Dette er specielt tydeligt for de tre første parametre omhandlende arealmidlet nedbør og total udløbs- og overløbsvolumen. Her var det tydeligt, at regnmålerne generelt registrerer højere værdier end EKXS.

I forhold til undersøgelsen af antal brønde med en delfyldningsgrad på over 50% forekom der en tydelig sammenhæng, ved brug af flere regnmålere for nærmere at beskrive det spatiale input. Der forekommer en vis afvigelse, hvor den generelle tendens er at regnmålerinput medfører et større antal af brønde med 50% opstuvning, hvilket antages at være grundet radarens generelt lavere maksimale intensiteter som beskrevet i Afsnit 5.5 på side 32.

Baseret på ovenstående kan det altså konkluderes, at det har en positiv effekt at medtage flere regninput i modelteknisk sammenhæng til at beskrive den spatiale udbredelse. Dog kan det også konkluderes, at der opstår nogle udfordringer i henhold til opstuvning i brønde, grundet effekten af korte, men høje regnintensiteter, som radaren ikke opfanger ligeså godt som regnmålere.

Det vælges i næste kapitel kun at analysere ekstreme regnhændelser for at undersøge om effekten er den sammen, eller om større regnhændelser har en anden effekt.

7 Modelrespons ved ekstremhændelser

I forrige kapitel blev effekten ved at anvende forskellige spatiale regninput undersøgt. Dette blev gjort ud fra størstedelen af alle regnhændelser i den udvalgte periode fra 16/01-2008 til 18/09-2022. I forbindelse med kravet fra Københavns Kommunes Teknik- og Miljøforvaltningen [2018] om, maksimalt én aflastning til Utterslev Mose per år ved udgangen af 2026, vil der i dette kapitel blive undersøgt regnhændelser med gentagelsesperiode på 1 år eller mere. Dette gøres med fokus på at bestemme, hvorvidt anvendelsen af spatialt regninput for de ekstreme regnhændelser viser den samme effekt, som ved undersøgelsen af samtlige regnhændelser.

Først vil der være en analyse af den akkumulerede daglige nedbør, hvor nedbøren målt i de otte udvalgte SVK-målere sammenlignes med radardata målt i tilhørende radarpixels. Dette gøres, ligesom tidligere, for at sikre, at effekten isoleres til det spatiale input, og ikke decideret forskelle i regnhændelserne, der bruges.

Herefter vil de fire udvalgte modelparametre igen blive sammenlignet ud fra de forskellige regninputscenarier. Dermed kan det undersøges om der forekommer tendenser i forbindelse med ændringer i den spatiale variabilitet.
Hertil vil der være tilknyttet yderligere analyser, hvor den tidslige variation henover døgnet undersøges, for at bestemme hvorvidt der forekommer markante forskelle. Dette gøres da der tidligere har været tendens til at radardataet måler anderledes henover døgnet, antageligt grundet afvigende maksimalintensitet.

Til sidst vil det analyseres hvorhenne i projektområdet opstuvningen i brøndene sker, og i denne forbindelse hvorvidt at radar og regnmålere har tendens til at opstuve i samme områder.
Inden der foretages analyser i nærværende kapitel, redegøres der først for hvilke ekstremhændelser, der benyttes og udvælgelsen af disse.

7.1 Udvælgelse af regnhændelser

Til at fastsætte hvilke regnhændelser, der har en gentagelsesperiode på 1 år eller mere, er der anvendt DTU Rainanalyst, som er et program tilknyttet Spildevandskomitéens skrift 30 [Gregersen et al., 2014]. Programmet kan benyttes til at lave statistik på regnmålerdatasæt, sammenligne historiske regnserier med regionalmodellen samt rangere alle hændelser, og derved angive gentagelsesperioder for alle regnhændelser. En mere detaljeret gennemgang af DTU Rainanalyst fremgår af Afsnit H.1 på side 105 i Bilag H på side 105.
Af tilsvarende bilag fremgår også resultattabeller for f-værdier, som benyttes i DTU Rainanalyst. Heraf fremgår det, at SVK-måler 5705 i gennemsnit måler lavere end regionlamodellen og at SVK-måler 5699 i gennemsnit passer perfekt med regionalmodellen, samt de resterende seks

regnmålere i gennemsnit stemmer overens med regionalmodellen.
Generelt er der dog rimelig god overensstemmelse mellem de otte regnmålere og regionalmodellen.

Længden af hele regnserien er 14,68 år, og derfor bliver der aldrig opnået en gentagelsesperiode på præcist 1 år, men i stedet en på 0,98 år, hvilket anses for at være tilfredsstillende til denne analyse.
Når regnhændelserne rangeres i DTU Rainanalyst gøres dette ud fra regnintensiteten ved forskellige regnvarigheder (1, 2, 5, 10, 30, 60, 180, 360, 720, 1440 og 2880 minutter) samt varigheden- og regndybden af hændelserne. Derfor vil det ofte ikke være den samme regnhændelse, hvis intensitet svarer til en 1-års gentagelsesperiode ved en regnvarighed på eksempelvis 10 minutter og 360 minutter.

I et forsøg på at dække eventuelt kritiske varigheder for den hydrauliske model, udvælges hændelser, der svarer til en 1-års gentagelsesperiode ud fra regnvarighederne 60, 180 og 360 minutter, samt den samlede regndybde.

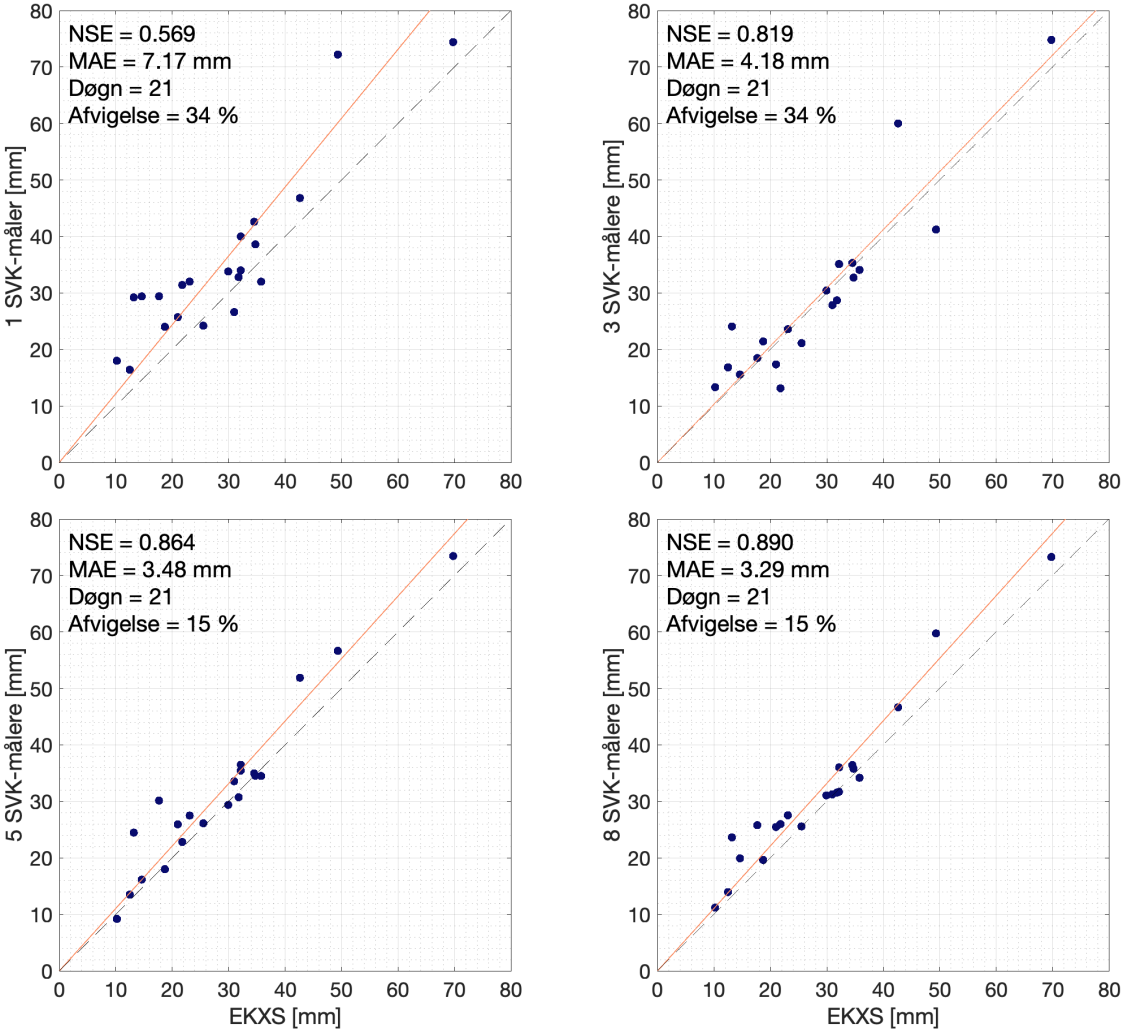
Der vil i det følgende anvendes nedbørsdata fra SVK-måler 5694 da denne er den mest centralt beliggende regnmåler i projektområdet. Placeringen af SVK-målerne fremgår af Figur 4.4 på side 17.
Af Bilag H på side 105 fremgår det via f-værdierne, at SVK-5694 er den regnmåler, der i gennemsnit har målt mest regn af de otte regnmålere sammenlignet med regionalmodellen. Denne vurderes dog stadig at være mest repræsentativ for området grundet placeringen af denne. Af samme bilag fremgår regnhændelser svarende til en gentagelsesperiode større end eller lig med et år ud fra førnævnte varigheder samt regndybde. Der er i alt fundet 21 forskellige hændelser.
Ved at udvælge regnhændelser, baseret på regndata fra SVK-måler 5694, vil det kunne forekomme, at nogle hændelser vil være defineret med en anden gentagelsesperiode i de resterende syv regnmålere.

Der er foretaget en analyse af akkumuleret dagsnedbør målt i de otte SVK-målere og tilhørende radarpixels for de 21 ekstremhændelser. Denne analyse fremgår af Bilag I på side 107, og er foretaget for at undersøge om nogle af de otte regnmålere har registreret betydeligt forskellige mængder nedbør end den tilhørende radarpixel. Denne analyse viste, at der for de fleste radar/regnmåler par er en god sammenhæng i akkumuleret dagsnedbør, dog med undtagelse af SVK-måler 5705 og radarpixel P16, hvor der var nogle hændelser i perioden, hvor regnmåleren var ude af drift.

Til at vurdere hvilken effekt det har at benytte et spatialt regninput for ekstremhændelserne udvalgt i det ovenstående, vil sammenligningen dække over samme scenarier og modelparametre som i Kapitel 6 på side 38.

7.2 Arealmidlet nedbør

Af Figur 7.1 på næste side fremgår fire scatterplots, ét for hvert scenarie med forskelligt antal SVK-målere, som sammenlignes med radaren i de tilhørende radarpixels i forhold til arealmidlet nedbør over hele projektområdet.

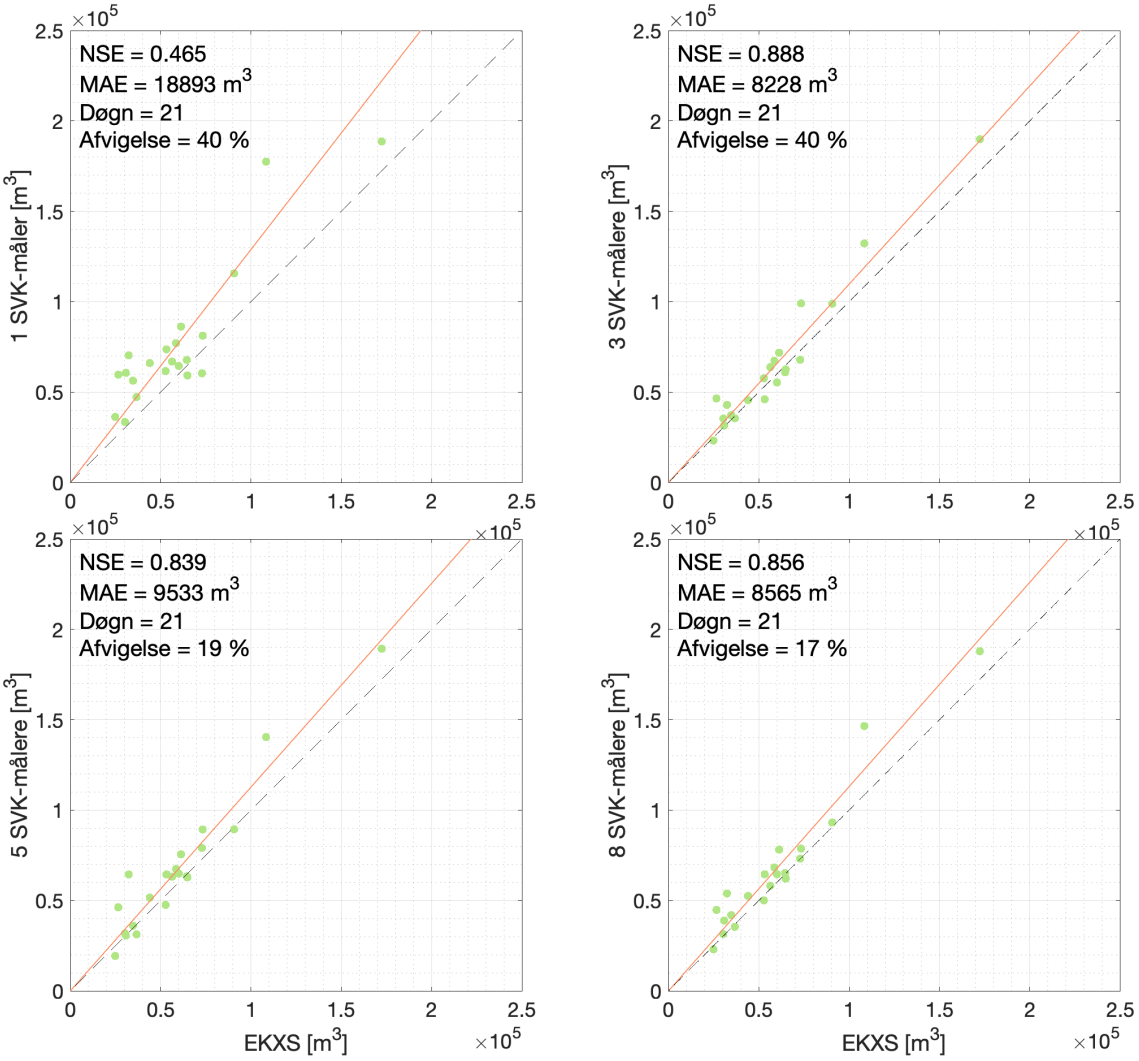


Figur 7.1. Fire scatterplots af arealmidlet nedbør over hele projektområdet for regnhændelserne med gentagelsesperiode på 1 år eller mere. De fire scenarier for SVK-målere er op ad y-aksen og EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Det fremgår af ovenstående figur, at der generelt er en god overensstemmelse mellem alle fire regnmålerscenarier og radaren. NSE-værdierne forøges og MAE-værdierne samt afvigelsen reduceres væsentligt.
Det ses, at sammenligningen mellem én regnmåler og radaren både har en væsentligt ringere NSE- og MAE-værdi sammenlignet med de tre andre plots. Det ses også, at én regnmåler generelt overestimerer regnhændelserne i forhold til radaren, men ved anvendelse af flere regnmålere reduceres spredningen betydeligt. Ved sammenligningen mellem én SVK-måler og radaren ses det også, at datasættets bias generelt hælder mod SVK-måleren sammenlignet med de andre plots.

7.3 Udløbsvolumen fra model

Af Figur 7.2 fremgår fire scatterplots, ét for hvert scenarie, som sammenlignes med radaren i de tilhørende radarpixels i forhold til udløbsvolumenet ud af modellen.



Figur 7.2. Fire scatterplots af udløbsvolumenet ud af modellen for regnhændelserne med gentagelsesperiode på 1 år eller mere. De fire scenarier for SVK-målere er op ad y-aksen og EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Af ovenstående figur ses det, ligesom analysen af arealmidlet nedbør, at der generelt er en god sammenhæng mellem udløbsvolumenet ud fra simuleringer med SVK-målerne og radaren. Igen ses det, at én SVK-måler har en væsentligt større afvigelse i udløbsvolumenerne, og generelt resulterer i større udløbsvolumener end radaren. De tre andre regnmålerscenarier med tre-, fem- og otte regnmålere har høje NSE-værdier hvilket viser, at der er en god sammenhæng mellem flere regnmålere og radaren i forbindelse med udløbsvolumenerne.

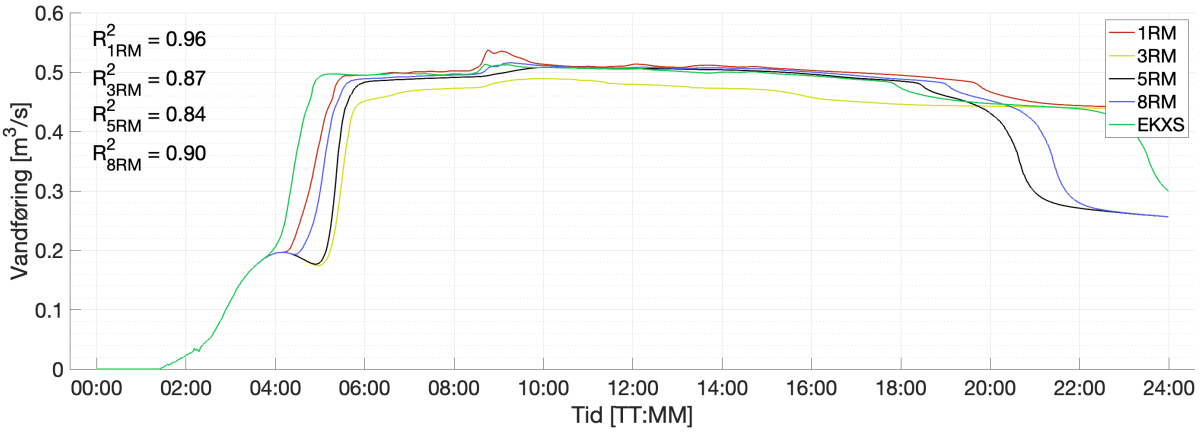
Af ovenstående analyse ses kun summeret værdier for regnhændelserne, hvorfor den tidslige

variation af nedbøren ikke ses. Det vides derfor ikke, om der forekommer umiddelbare variationer henover regnhændelsen for hvert scenarie. Derfor analyseres dette i følgende afsnit.

7.3.1 Tidslig variation i udløbsvandføring

Til denne analyse undersøges vandføringen for udløbet placeret længst mod øst, som er vist på Figur 3.2 på side 8. Til at dokumentere sammenhængen mellem vandføringerne benyttes R^2 koefficienten, som kan variere mellem 0 og 1, hvor 1 er et perfekt match. I forhold til R^2 holdes alle regnmålerscenarier op i mod EKXS.

Af Figur 7.3 fremgår et eksempel for udløbsvandføringen for d. 07/06-2010 med fem grafer, én for hvert scenarie. Af figuren fremgår også R^2-værdier for hvert regnmålerscenarie i forhold til radaren.



Figur 7.3. Udløbsvandføring for udløbet placeret længst mod øst i modellen, se Figur 3.2 på side 8, for de fem udvalgte scanarier for d. 07/06-2010.

Af ovenstående kan det ses, at der forekommer en lille variation mellem de fem scenarier, Ud over scenariet med tre regnmålere, hvilket ligger under de resterende scenarier. Der fremgår også forskelle i udløbsvandføringen i slutningen af døgnet, hvor vandføringen i fem- og otte regnmålere scenarierne falder drastisk. Der forekommer generelt nogle atypiske ændringer i vandføring, for alle de forskellige scenarier, hvilet antages at være grundet flow-regulerende komponenter.
I Bilag J på side 110 fremgår R^2-værdier for hvert regninputscenarie i forhold til alle 21 ekstremhændelser, og af Tabel 7.1 fremgår gennemsnitsværdierne for hvert regnmålerscenarie.

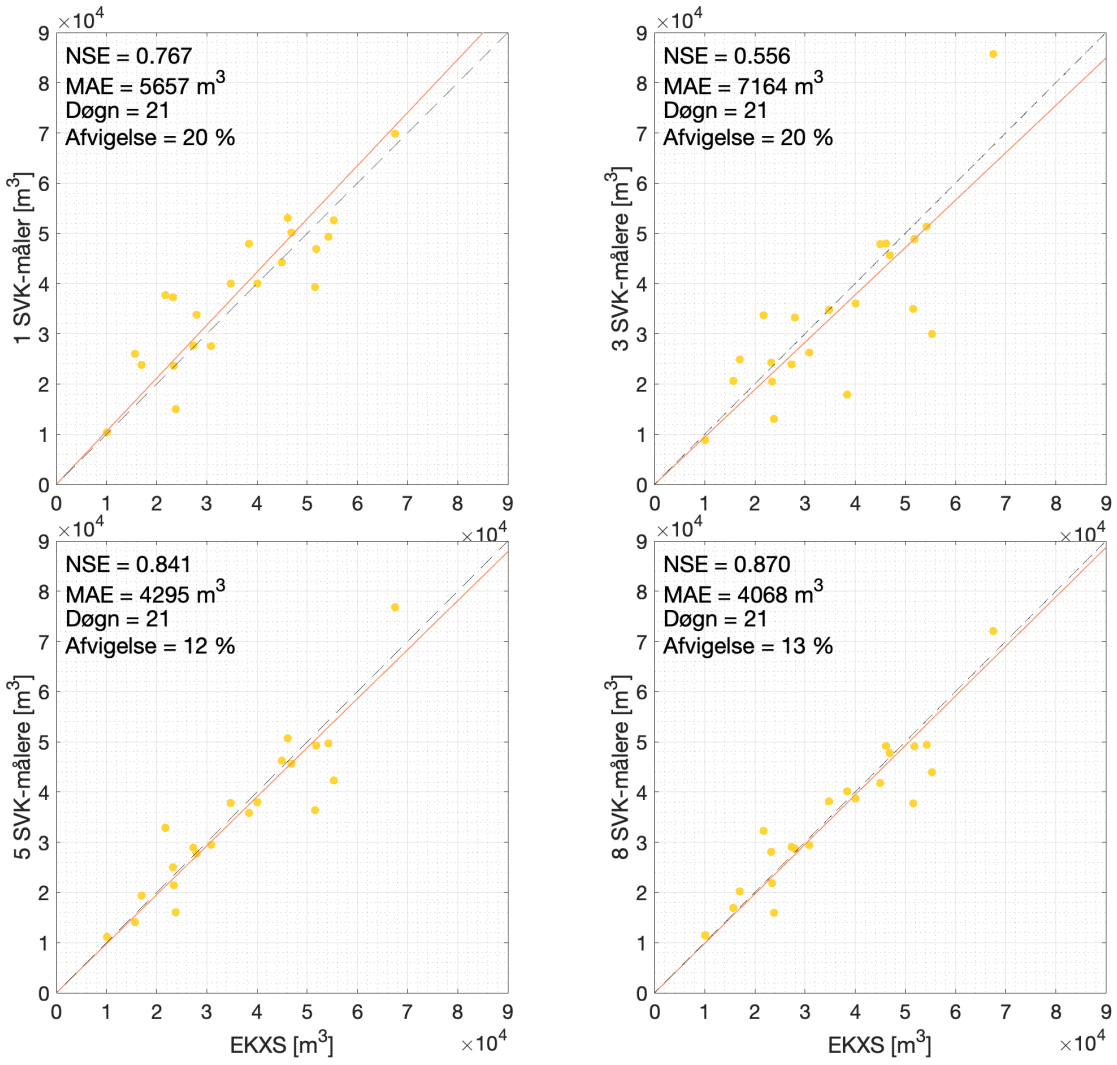
Tabel 7.1. Gennemsnitlige R^2-værdier for udløbsvandføringer fra modellen for de 21 ekstremhændelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller højere. Gennemsnitsværdierne består af værdierne fra Bilag J på side 110.

Symbol	1RM	3RM	5RM	8RM
R^2 [-]	0,86	0,83	0,82	0,83

Af ovenstående tabel kan det ses, at der er en forholdsvis lille forskel i R^2-værdierne når resultaterne fra de forskellige regnmålerscenarier holdes op mod radarresultaterne. Dette formodes at være grundet en overløbskant umiddelbart før udløbet, der resulterer i, at vandføringen sjældent overstiger 0,5 m^3/s. Dette kan også ses af Figur 7.3.

7.4 Overløbsvolumen

Af Figur 7.4 fremgår fire scatterplots, ét for hvert scenarie med forskellig antal SVK-målere, som sammenlignes med radaren i de tilhørende radarpixels i forhold til det totale overløbsvolumen i modellen.



Figur 7.4. Fire scatterplots af total overløbsvolumen for projektområdet for regnhændelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller mere. HDe fire scenarier for SVK-målere er op ad y-aksen og EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Overløbsvolumenerne viser samme tendens, som de to forrige sammenligninger med arealmidlet nedbør og udløbsvolumenet. Én regnmåler resulterer i et større overløbsvolumen end ved anvendelse af flere regnmålere. Til forskel fra tidligere analyser er NSE-værdien for 3 SVK-målere ikke forbedret i forhold til én regnmåler, og datapunkterne ligger med meget stor spredning fra vinkelhalveringslinjen. Dette tiltænkes at være kombinationen med de tre regnmålere, som resultere i denne spredning.
Når der simuleres med både fem- og otte regnmålere ses der igen at være en god sammenhæng

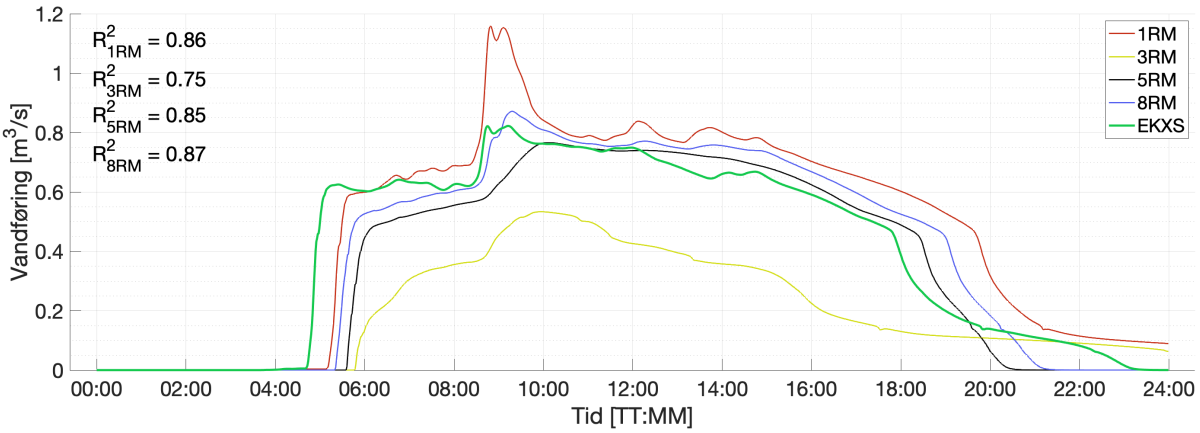
med radaren, hvor regnmålerne stadig generelt resulterer i større overløbsvolumener end radaren.

Ligesom den tidligere analyse for udløbsvandføringen kan der ligeledes af denne analyse ikke ses den tidslige variation af nedbøren. Dette vil undersøges i det følgende.

7.4.1 Tidslig variation i overløbsvandføring

Der benyttes samme analysemetode, som i analysen for vandføringen i udløbet ved brug af R^2-værdier. Der undersøges for overløbet, som er placeret lige før udløbet, der blev analyseret i Afsnit 7.3 på side 49.

Af Figur 7.5 fremgår et eksempel for overløbsvandføringen for d. 07/06-2010 med fem grafer, én for hvert scenarie. Af figuren fremgår også R^2-værdier for hvert regnmålerscenarie i forhold til radaren.



Figur 7.5. Vandføring for overløbet inden udløbet fra Mike Urban modellen for de fem udvalgte scanarier for d. 07/06-2010.

Af ovenstående kan det ses, at der forekommer umiddelbare variationer mellem de respektive scenarier. Det ses, at én regnmåler resulterer i den højeste overløbsvandføringen og, at scenariet med tre regnmålere giver den mindste vandføring.
I Bilag K på side 114 fremgår akkumulerede nedbørsmængder for de 21 regnhændelser. Heraf kan det ses, at 5694 fra scenarie 1 har målt 31 mm, og at SVK-måler 5690, der indgår i scenarie 3, har målt 0 mm. Dette betyder, at der er en stor mængde oplande, der ikke tildeles noget nedbør, hvilket forklarer hvorfor scenarie 3 giver den laveste vandføring.
Af dette kan det ses hvilke afvigelser, der kan forekomme i forbindelse med regninput fra regnmålere.

I Bilag J på side 110 fremgår R^2-værdier for alle 21 regnhændelser, og af Tabel 7.2 ses gennemsnitsværdierne for hvert regnmålerscenarie.

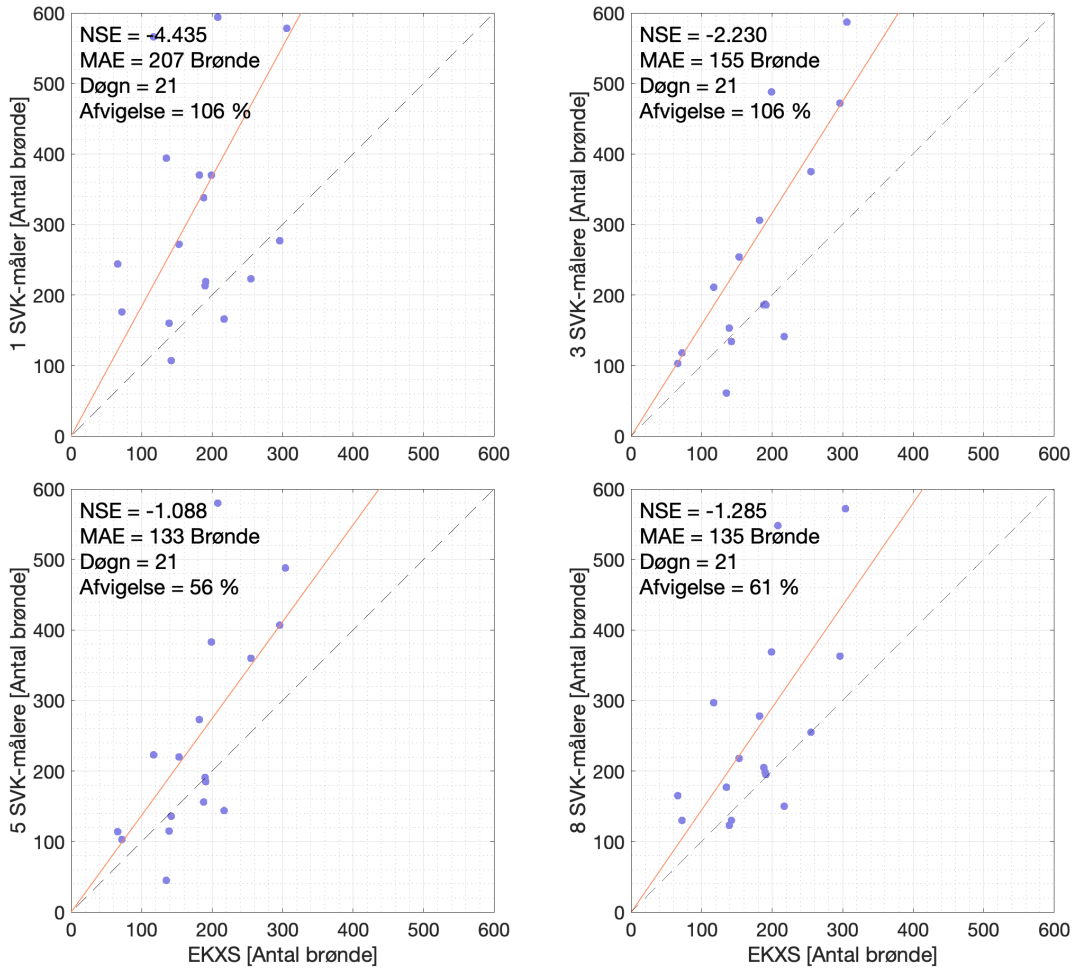
Tabel 7.2. Gennemsnitlige R^2-værdier for overløbsvandføring ved udløbet af modellen for de 21 største regnhæmndelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller højere. Gennemsnitsværdierne består af værdierne fra Bilag J på side 110.

Symbol	1RM	3RM	5RM	8RM
R^2 [-]	0,81	0,78	0,80	0,82

Det fremgår af Tabel 7.2 på forrige side, at der ikke forekommer en betydelig forskel i gennemsnitlige R^2 for de forskellige scenarier ved at se på overløbet inden modellens udløb. Forventningen var, at scenariet med en enkelt regnmåler ville give den laveste R^2-værdi og dermed afvige mest fra radaren, ligesom det generelt har været for analyserne i nærværende rapport.
Årsagen til, at der umiddelbart ikke kan ses forskelle i vandføringerne fra scenarierne, formodes at være på grund af Mike Urban modellens opsætning med flow-regulerende komponenter.

7.5 Opstuvning i brønde

Til analyse af opstuvning i brøndene vil der, ligesom i Afsnit 6.5 på side 43, kun blive undersøgt for brøndene i den sydlige del af projektområdet. En detaljeret begrundelse af dette fremgår af Bilag A på side 88. Analysen vil igen dække en delfyldningsgrad på over 50%. Af Figur 7.6 på næste side fremgår fire scatterplots, ét for hvert scenarie med forskellig antal SVK-målere, som sammenlignes med radaren i de tilhørende radarpixels.



Figur 7.6. Fire scatterplots af antallet af brønde med en delfyldningsgrad på over 50% i løbet af regnhændelserne med gentagelsesperiode på 1 år eller mere. De fire scenarier for SVK-målere er op ad y-aksen og EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

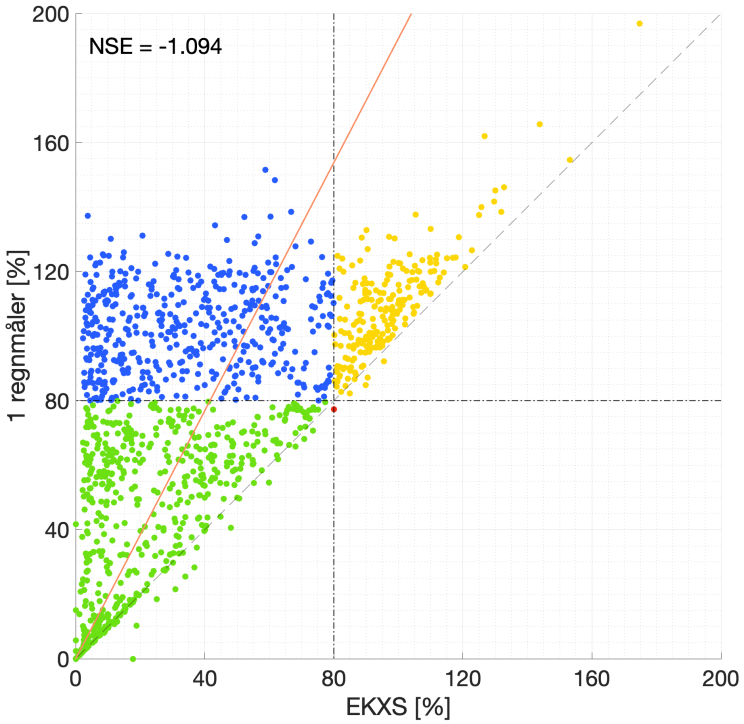
Det fremgår af Figur 7.6 at der er en stor spredning mellem regnmåler- og radarresultaterne i forhold til de tre tidligere parametre, hvoraf alle scenarier giver negative NSE-værdier.
Det ses, at jo flere regnmålere der medtages, jo tættere på vinkelhalveringslinjen er den generelle bias, med undtagen fra fem- til otte regnmålere. Det fremgår, at det er regnmålerscenarierne, som giver anledning til flest antal brønde, der opnår en delfyldningsgrad på 50%. Dette vurderes, ligesom i Afsnit 6.5 på side 43, at være på grund af forskellen i maksimale regnintensiteter, der registreres i henholdsvis regnmålere og radaren, hvilket er analyseret i Afsnit 5.5 på side 32.

I denne analyse er det ikke undersøgt, hvorvidt det er de samme brønde, der opstuver imellem scenarierne, men i stedet er der kun fokuseret på den totale mængde af brønde. Derfor vil der i det følgende Afsnit foretages en analyse af opstuvning i de enkelte brønde ved at anvende de 21 ekstremhændelser mellem de fem regninputscenarier.

7.5.1 Stedslig variation af opstuvning i brønde

I dette afsnit analyseres opstuvning i de enkelte brønde i mellem regnmålerscenarier i forhold til EKXS, for de 21 ekstremhændelser. Der undersøges kun for brøndene i den sydlige del af projektområdet. Begrundelsen for dette er beskrevet i Kapitel 3 på side 7.
Det er valgt at undersøge en delfyldningsgrad på 80% i stedet for 50% grundet dette kapitel er baseret på regnhændelser med gentagelsesperiode på 1 år eller mere. Ved 50% delfyldningsgrad vil det, grundet store rørdimensioner, ikke være alle rør, der er fuldtløbende, men ved 80% delfyldningsgrad antages det, at størstedelen af alle rør vil være fuldtløbende. En opstuvning på 80% antages at være kritisk i forbindelse med opstuvning til terræn.

Det vælges kun at benytte NSE-værdier og den generelle bias mellem regnmåler- og radardata til at analysere effekten i de enkelte brønde.
Af Figur 7.7 fremgår et scatterplot for d. 04/09-2015, hvoraf NSE-værdien og biasfaktoren mellem de to datasæt er markeret. Ydermere er grænserne for delfyldningsgraden på 80% illustreret via stiplede linjer.
brøndene, hvor både regnmålere og radar resulterer i en delfyldningsgrad over eller under 80% er markeret med henholdsvis gul eller grøn. Brønde, hvor enten regnmålere eller radar resulterer i en delfyldningsgrad over 80% er markeret med henholdsvis blå eller rød, afhængigt af om, det er regnmåler- eller radarscenariet det forekommer ved.



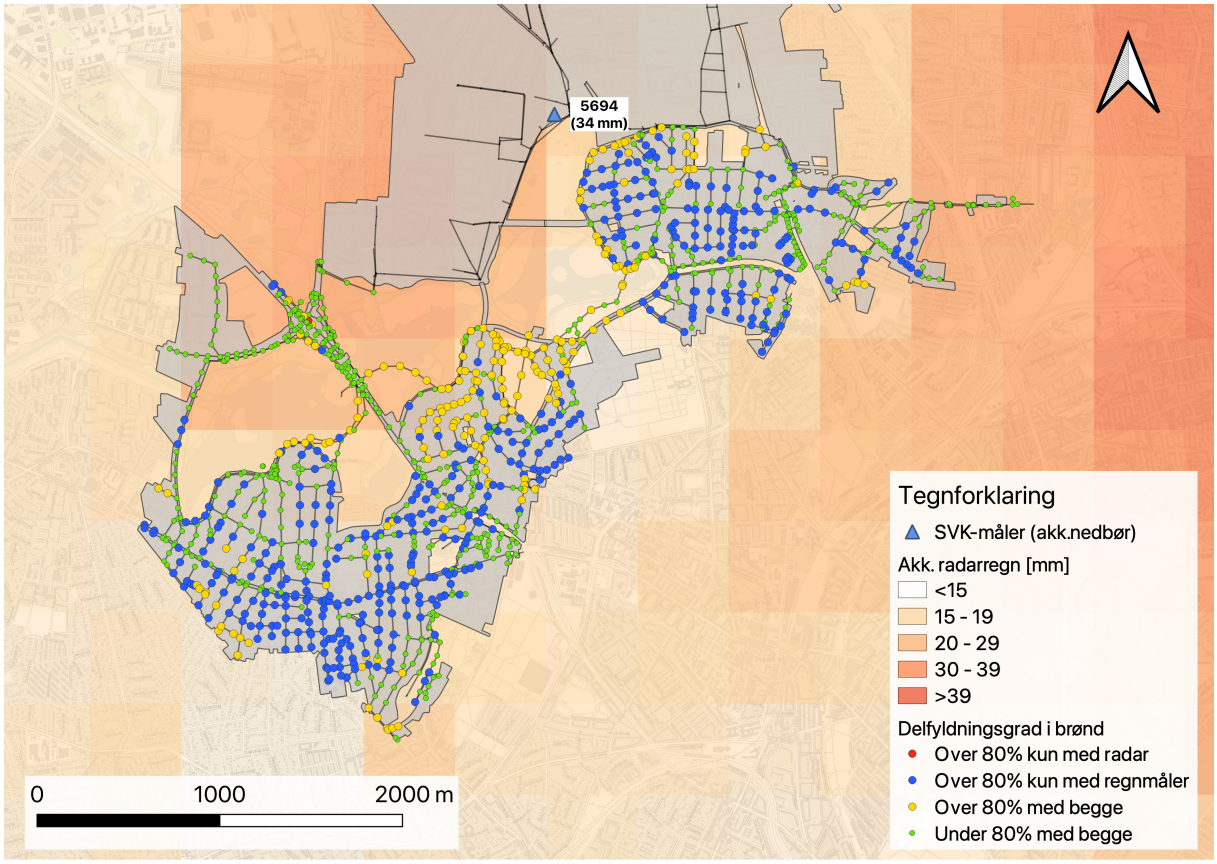
Figur 7.7. Scatterplot over delfydlningsgraden ved sammenligning af SVK-måler 5694 og radaren d. 04/09-2015. Plottet er opdelt i fire zoner med forskellige farver for at indikere hvorledes det er regnmåleren, radaren, begge eller ingen af dem, som resulterer i delfyldningsgrad på mere end 80%. Af plottet fremgår datasættets NSE-værdi samt bias.

Af Figur 7.7 kan det ses, at scenariet med én regnmåler, resulterer i højere værdier for

delfyldningsgraden end radaren for alle brønde undtagen én.

Dette kan skyldes at den pågældende hændelse havde en relativt stor variation i nedbørsmængde over projektområdet. Derfor, ved kun at benytte én regnmåler til hele oplandet, vil denne overvurdere regnmængderne i den resterende del af modellen, ud over der hvor regnen i virkeligheden forekommer. Derfor ses der også en rimelig mængde punkter lige omkring vinkelhalveringslinjen, hvilket antages at være der hvor radaren også har målt regnen.
Deraf må det også antages at de blå brønde primært må være placeret der hvor radaren har målt mindre regn end regnmåleren.

På Figur 7.8 fremgår den sydlige del af projektområdet, hvoraf det ses, hvilke brønde, som resulterer i delfyldningsgraderne præsenteret på Figur 7.7 på foregående side med tilsvarende farver. Ligeledes fremgår den akkumulerede nedbør estimeret med EKXS og SVK-måler 5694.



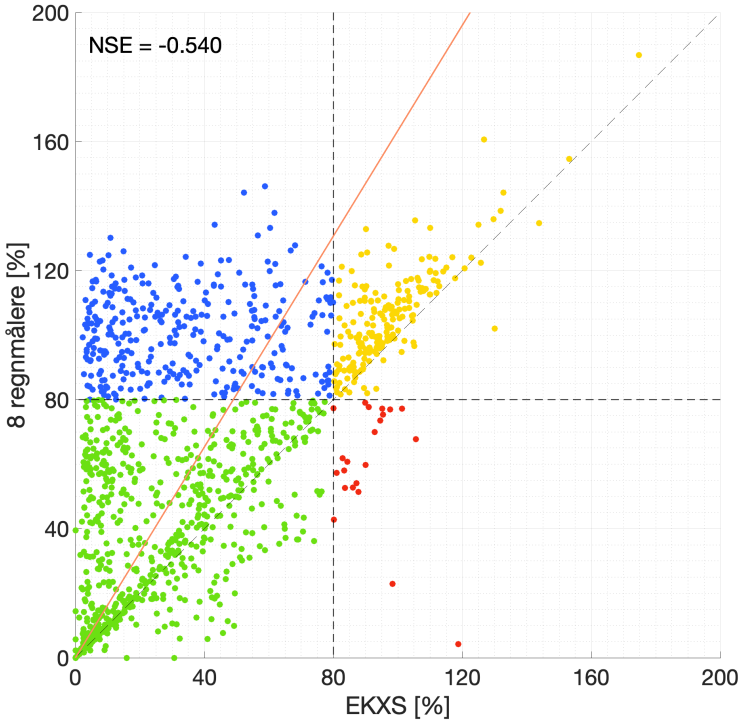
Figur 7.8. Illustration af hvor i den sydlige del af projektområdet brønde med delfyldningsgrad over- og under 80% er placeret ved sammenligning af SVK-måler 5694 og radaren for regnhændelsen d. 04/09-2015.

Ud fra ovenstående figur, fremgår det af den akkumulerede radarregn, at projektområdet ligger i et område, hvor der måles markant mindre nedbør end i regnmåleren. Dette medfører, at regnmåleren, projekterer regnmængder ind i området, der ikke forekommer ifølge radaren.

Som antaget, forekommer der overensstemmelse i opstuvningen imellem regnmåler og radar de steder hvor nedbøren, målt i regnmåleren, også findes i samme grad i virkeligheden. Derimod forekommer det tydeligt, at regnmåleren overvurderer graden af opstuvning, i de områder hvor

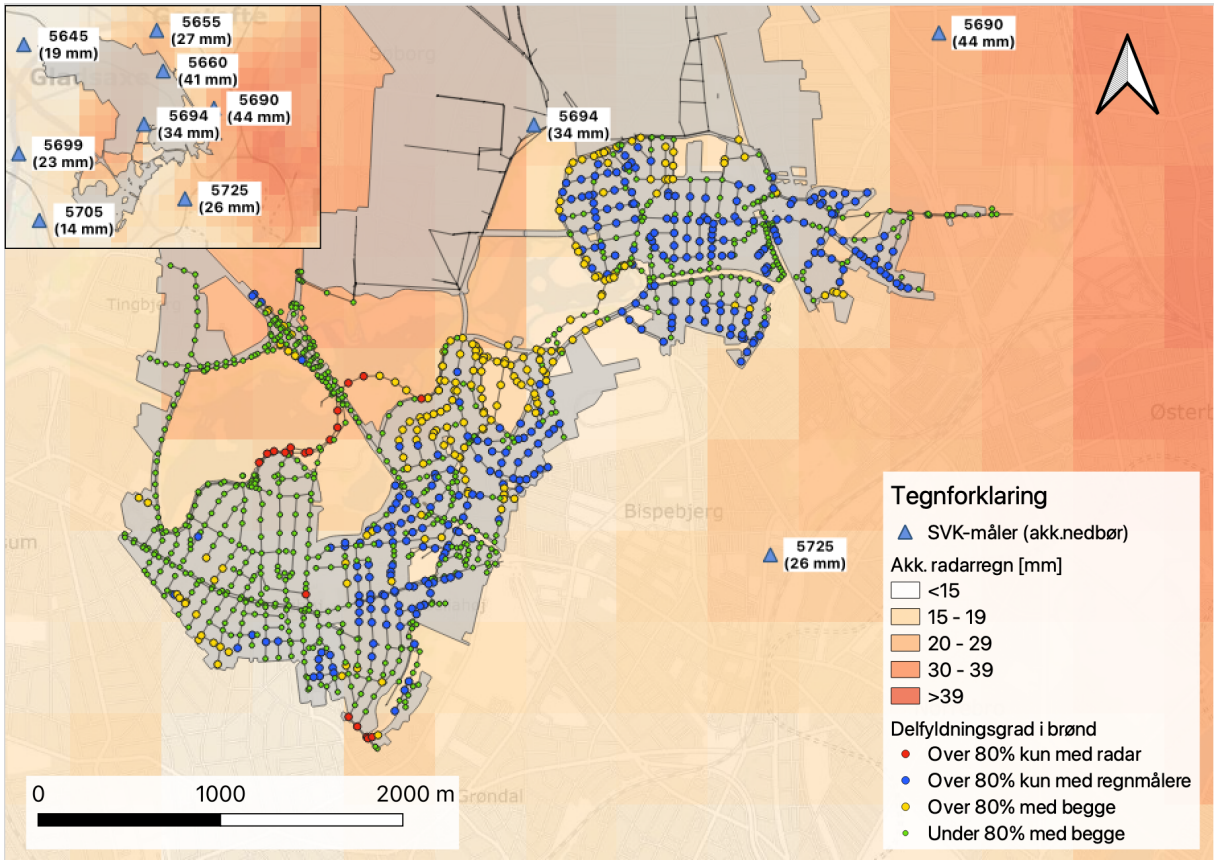
der ikke var registreret samme mængde nedbør i radaren.
Omvendt ses det, at der ikke er nogle radarpixels, hvor der er registreret væsentlig mere regn end SVK-måler 5694, hvorfor radaren ikke resulterer i opstuvninger højere end regnmåleren.

Det vælges at foretage samme fremgangsmåde, som ovenstående for regninputscenarierne. Regnmålerscenarierne med 3 og 5, fremgår af Bilag L på side 115. Af det følgende præsenteres scenariet med otte regnmålere i forhold til radaren. Herved er det muligt at se, om der for den pågældende regnhændelse er en betydelig effekt ved at medtage den spatiale udbredelse via regnmålere.
Af Figur 7.9 fremgår et scatterplot af delfyldningsgraden i hver brønd for otte regnmålere og radaren.



Figur 7.9. Scatterplot over delfydlningsgraden ved sammenligning af alle 8 SVK-målere og radaren ved regnhændelsen d. 04/09-2015. Plottet er opdelt i fire zoner med forskellige farver for at indikere hvorledes det er regnmåleren, radaren, begge eller ingen af dem, som resulterer i delfyldningsgrad på mere end 80%. Af plottet fremgår datasættets NSE-værdi samt bias.

Af ovenstående figur forekommer samme tendenser som tidligere beskrevet for scenariet med én regnmåler. Her er der dog steder hvor radaren resulterer i størst delfyldningsgrad, hvorfor det må antages, at der projekteres regn ind fra en regnmåler, der har målt mindre end der forekommer i det givne opland ifølge radaren.
For at se placeringen af brøndene med de forskellige farvekoder fra ovenstående figur, henvises til Figur 7.10 på den følgende side.



Figur 7.10. Illustration af hvor i den sydlige del af projektområdet brønde med delfyldningsgrad over- og under 80% er placeret ved sammenligning af alle 8 SVK-målere og radaren for regnhændelsen d. 04/09-2015.

Ud fra ovenstående figur, fremgår det af den akkumulerede radarregn, at den nordøstlige del af projektområdet ligger i et område, hvor der måles markant mindre nedbør i radaren, end omkringliggende regnmålere. Dette medfører, at regnmålerne, der er placeret udenfor projektområdet, projekterer regnmængder ind i området, der ikke forekommer ifølge radaren. I den nordvestlige del af området, er der derfor ikke stor overensstemmelse imellem radar og regnmålere, ligesom i scenariet med én regnmåler.
I den sydvestlige del kan det ses, at der forekommer større overensstemmelse i opstuvningsgraden. Dette skyldes, at de sydvestlige oplande tilknyttes regninput fra 5705, som har målt cirka det samme, som radaren i det pågældende område.

Der er udregnet NSE-værdier og bias i forhold til opstuvning til 80% ud fra alle 21 regnhændelser og respektive regnmålerscenarier i forhold til radaren. Disse værdier fremgår af Bilag L på side 115, i én tabel med NSE-værdier og én tabel med bias værdier. Af Tabel 7.3 på den følgende side fremgår gennemsnitsværdierne fra de to førnævnte tabeller.

Tabel 7.3. Gennemsnitlige NSE-værdier og biasfaktorer, for delfyldningsgrad i brøndene lokaliseret i den sydlige del af projektområdet. Dette er gældende for de 21 største ekstremhændelser til de respektive regnmålerscenarier, som alle er i forhold til EKXS. Af Bilag L på side 115 fremgår alle værdier til beregning af gennemsnitsværdierne i denne tabel.

	1RM	**3RM**	**5RM**	**8RM**
NSE	-0,352	-0,128	0,035	0,179
Bias for datasæt	1,85	1,71	1,55	1,53

Det fremgår af Tabel 7.3, at gennemsnitsværdierne afviger betydeligt fra de præsenterede eksempler. Dette antages at være grundet den spatiale udbredelse af nedbøren. Heri forekom der generelt lavere nedbørsmængder i radarpixels over projektområdet. Dette blev ikke opfanget i regnmålerne, da de var placeret udenfor området, der blev undersøgt.

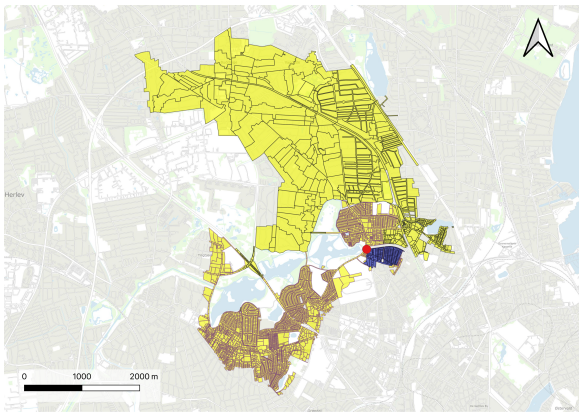
Det ses af Tabel 7.3, at der generelt er en tendens til en stor variation af delfyldningsgraden i hver brønd mellem radar- og regnmålerresultater. Det ses ligeledes i form af biasfaktorer over 1, at der er tendens til, at brøndene generelt opnår højere delfyldningsgrad ved brug af regnmålerregn. Dette formodes at være på grund af forskellen i regnintensiteter i regnmåler- og radardata. Dog kan det af Tabel 7.3 ses, at der forekommer en lille forbedring mellem radar- og regnmålerscenarierne ved at de gennemsnitlige NSE-værdier forøges og biasfaktoren går mod 1.

Baseret på ovenstående analyse kan der ses en tendens til, at en stigning i regnmålere vil beskrive den spatiale udbredelse bedre. Det forekommer dog stadig af det præsenterede eksempel, at selv ved otte regnmålere vil der være hændelser hvor regnmålerne ikke opfanger den spatiale udbredelse, idet der kan være store variationer i nedbør imellem regnmålerne.

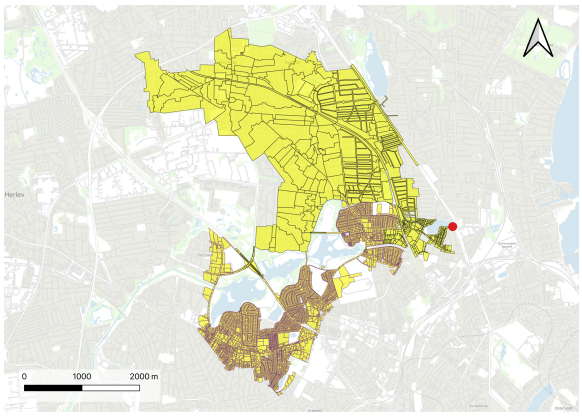
Givet den relativt store afvigelse imellem regnmålerscenarier og radarregn, undersøges det nærmere hvori denne afvigelse forekommer. Ud fra 5.5 på side 32 må denne antageligt komme grundet en forskel i maksimal intensitet, hvorfor dette undersøges i næste afsnit.

7.5.2 Tidslig variation af vandstand i udvalgte brønde

Til denne analyse udvælges der to brønde med varierende oplandsareal. Hertil undersøges der for én brønd med et lille delopland og én brønd med et stort delopland. Placeringen af de to brønde og de tilknyttede deloplande fremgår af Figur 7.11 på næste side.



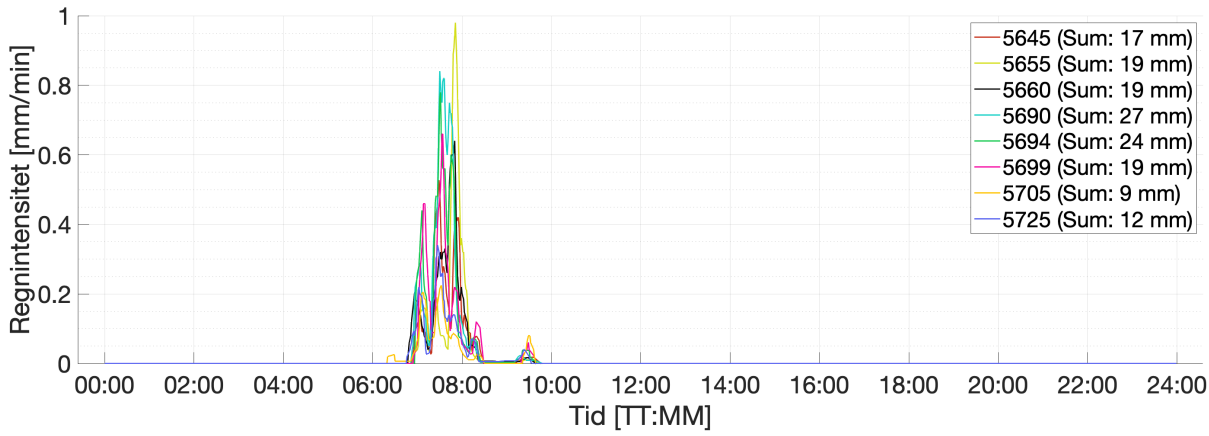
(1) Lille delopland (16 ha), brønd 1 markeret med rød prik



(2) Stort delopland (1.232 ha), brønd 2 markeret med rød prik

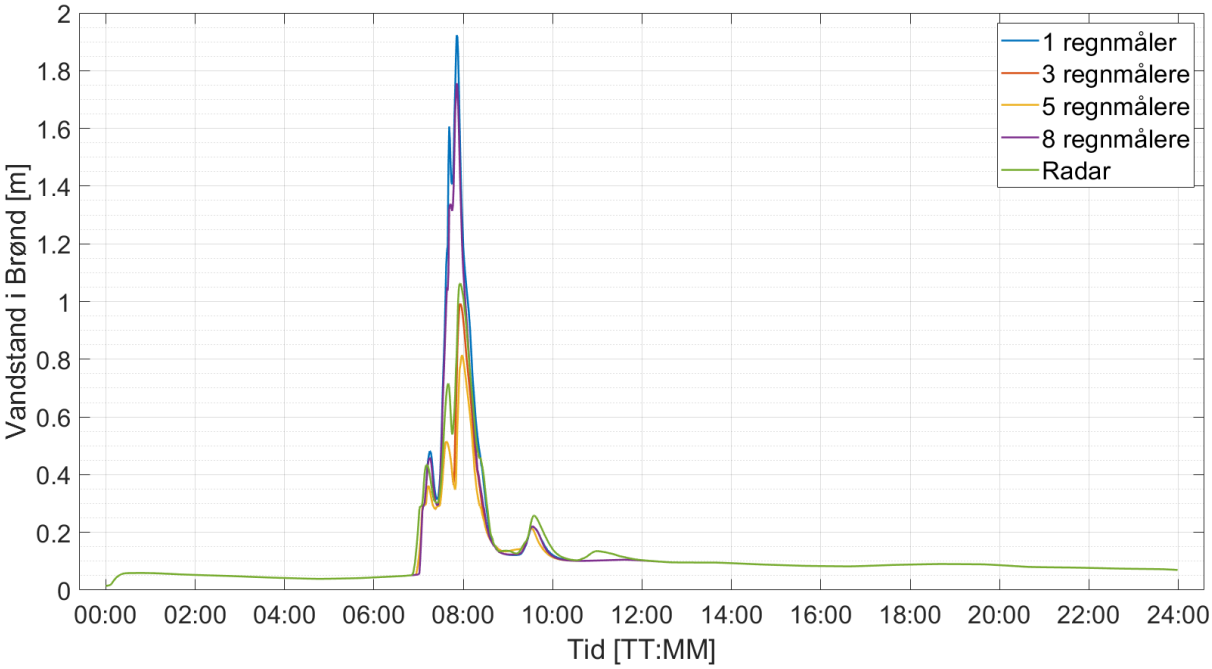
Figur 7.11. Markering af brønde der analyseres samt tilhørende oplande.

Alle 21 ekstremhændelser er undersøgt, men i dette afsnit præsenteres kun figurer fra regnhændelsen d. 28/07-2019, mens generelle tendenser kommenteres. Denne hændelse fremgår af Figur 7.12, hvor regnintensiteterne er plottet for alle otte regnmålere.



Figur 7.12. Intensiteter for regnhændelsen d. 28/07-2019 målt i de otte udvalgte regnmålere.

Ud fra ovenstående hændelse vil det undersøges, hvorvidt der kan ses en signifikant forskel, i de forskellige regninputscenarier og oplandsstørelser, når der undersøges vandstand over tid. På Figur 7.13 på næste side fremgår et plot over vandstanden i Brønd 1 d. 28/07-2019 ved regninputs fra både radaren og de forskellige antal regnmålere.

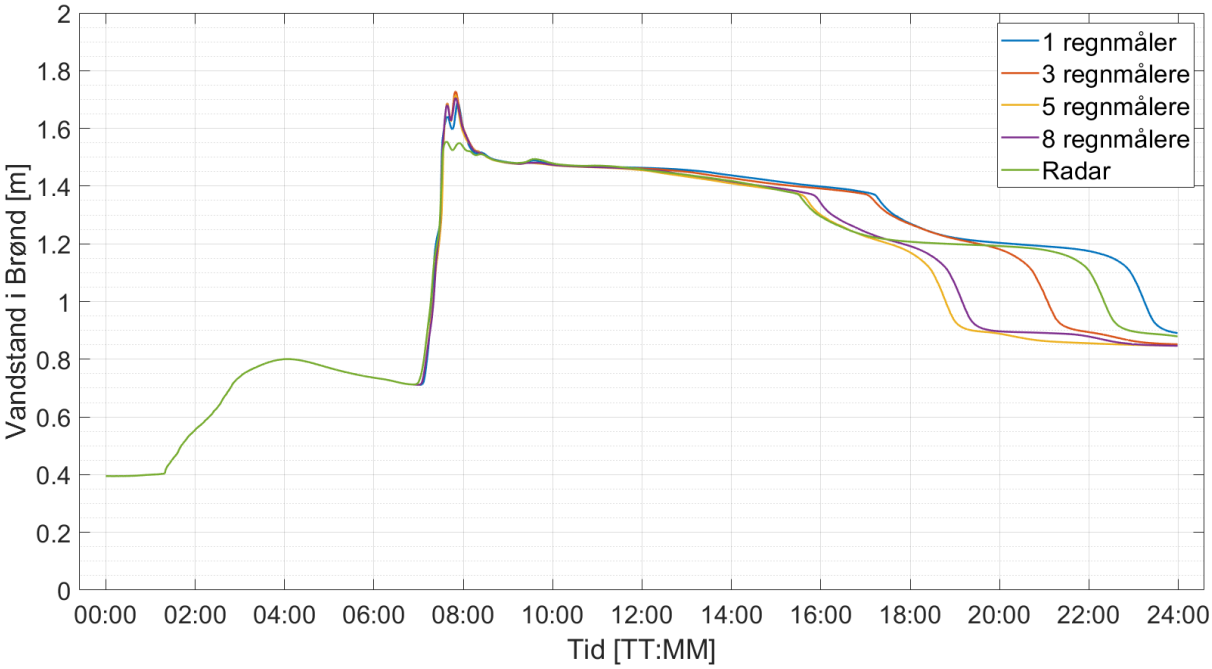


Figur 7.13. Vandstand i brønd 1 (lille opland) ved anvendelse af 1, 3, 5 og otte regnmålere samt EKXS radaren. Simuleringen er foretaget over d. 28/07-2019. Terrænkoten svarer til en vandstand på 3,51 meter.

På ovenstående figur ses det, hvordan der er stor forskel på vandstanden imellem regninput, hvor specielt én og otte regnmålere måler markant højere end resten. Dette skyldes at det lille opland i disse scenarier næsten udelukkende dækkes af regnmåler 5694, som set af Figur 4.7 på side 19, som var den regnmåler der havde målt næstemest regn i denne hændelse.

Det fremgår også af figuren, at der ved anvendelse af tre og fem regnmålere observeres lavest vandstand. Ved anvendelse af disse to scenarier vil det være nedbøren fra regnmåler 5725 som fordeles ud på deloplandet, og derfor måles der væsentligt lavere vandstand i brønden ved disse to scenarier.
Det ses, at ved anvendelse af radarregn observeres der en væsentligt lavere vandstand end ved anvendelse af en eller otte regnmålere. Dette stemmer overens med undersøgelsen af maksimalintensiteter i Afsnit 5.5 på side 32, hvor det blev påvist, at radaren ikke måler ligeså høje maksimalintensiteter som regnmålerne.

Det vælges nu at undersøge, hvordan vandstanden ser ud for samme regnhændelse, men i en brønd med et væsentligt større opstrømsareal. Denne fremgår af Figur 7.14 på den følgende side.



Figur 7.14. Vandstand i brønd 2 (store opland) ved anvendelse af én-, tre-, fem- og otte regnmålere samt EKXS radaren. Simuleringen er foretaget over d. 28/07-2019. Terrænkoten svarer til en vandstand på 4,05 meter.

Af ovenstående figur ses det, at alle regnmålerne resulterer i mere eller mindre den samme vandstand i brønden. Der er flere årsager til, at den resulterende vandstand ikke varierer ligeså meget mellem regnmålerscenarierne. Dette skyldes blandt andet, at regnen i langt større grad vil blive midlet ud over et stort opland. Midlingen sker blandt andet på grund af den væsentligt større koncentrationstid, der er gældende for hele projektområdet sammenlignet med det lille delopland opstrøms brønd 1.

Det ses stadig, at brug af radarregn resulterer i en lavere vandstand end ved anvendelse af forskellige kombinationer af regnmålere. Dog er der en væsentligt mindre afvigelse i mellem radaren og regnmålerscenarierne. Dette skyldes, at midlingen af nedbøren vil være en fordel for radaren da denne, som tidligere beskrevet, ikke rammer peaks ligeså godt som regnmålerne, men beskriver den samlede mængde nedbør med tilsvarende præcision som regnmålerne.

Udover midlingen af nedbøren har det også en stor påvirkning, at der opstrøms for brønd 2 forekommer flow-regulerende komponenter. Det ses tydeligt, at når vandstanden kommer lige under 1,4 meter, falder vandstanden på samme måde uanset om der anvendes regninput fra regnmålere eller fra radaren. Det samme ses igen når vandstanden i brønden når 1,2 meter. Dette er igen et tegn på, at modellen er opsat med en flowbegrænsning, formegentligt i bassiner eller nogle deloplande.

Udover det viste eksempel for d. 28/07-2019 er den generelle tendens, at hændelserne resulterer i samme forskelle i vandstande. For størstedelen af hændelserne ses det, at ved det lille delopland resulterer en- og otte regnmålere i den højeste vandstand. Ved det store delopland ses, som vist på Figur 7.14, at der er væsentligt mindre afvigelse mellem vandstandene ved de forskellige regninput. Det ses desuden tydeligt, hvordan der er flowregulerende komponenter i modellen.

Ved en mindre del af hændelserne ses der ikke noget mønster i, at vandstanden ser ud på en bestemt måde. Dette vil ikke blive undersøgt mere dybdegående, da størstedelen af hændelserne ser ud som beskrevet igennem dette afsnit.

7.6 Opsamling

Formålet med det kapitel har været at besvare følgende delspørgsmål, som blev opstillet i forbindelse med rapportens hypotese i Kapitel 2 på side 5:

- Hvilken effekt forekommer ved brug af varierende grad af spatialt regninput til hydrauliske modeller, ved analyse af ekstremhændelser?

Kapitlet blev indledt med en udvælgelse af dimensionsgivende regnhændelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller højere ud fra regnvarigheder med 60-, 180- og 360 minutter samt den samlede regndybde. Regnhændelserne er udvalgt via DTU-rainanalyst og er baseret på regndata fra SVK-måler 5694 i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022. Dette resulterer i 21 regnhændelser, som efterfølgende blev brugt i forbindelse med at analysere effekt af den spatiale udbredelse for kritiske regnhændelse ud fra de fire modelparametre.

Først er den akkumulerede daglige nedbør målt i regnmålere og tilhørende radarpixels sammenlignet. Denne analyse viste en forholdsvis god sammenhæng mellem regnmålere og radarpixels, dog vist det sig, at SVK-måler 5705 gav ringe resultater. Dette skyldes blandt andet perioder hvor målerne har været ude af drift samt hændelser, der ikke blev opfanget i måleren.

Efterfølgende blev der foretaget lignende analyser af de fire modelparametre, som i forrige kapitel. Ud fra disse analyser blev der påvist samme tendens, som i Kapitel 6 på side 38, at ved medtagelse af flere regnmålere forbedres sammenhængen mellem radar og regnmålere væsentligt.
Der blev i denne forbindelse lavet en analyse henover døgnet, hvori der ikke fremkom tydelige tendenser, der kan tilskrives forskelle imellem radar og regnmålerinputtet.

Ved undersøgelsen af 50% delfyldningsgrad i brøndene blev der igen observeret dårlig sammenhæng mellem regnmålere og radar uanset antallet af regnmålere ligesom i Kapitel 6 på side 38. Dog blev resultaterne bedre fra scenariet med én regnmåler til otte regnmålere. Af opstuvningsanalysen var der en tydelig tendens til at regnmålerscenarier generelt giver anledning til flere brønde, der stuver op i forhold til radardata. Dette antages at være grundet forskelle i maksimale intensiteter, beskrevet i Afsnit 5.5 på side 32.

Ligesom i Kapitel 6 på side 38 kunne det heller ikke af denne analyse vides, om det er de samme brønde, der opstuver mellem regnmålerscenarier og radaren. Derfor blev der foretaget en kvalitativ analyse ved, at se på delfyldningnsgraden i alle brøndene for de 21 regnhændelser i den sydlige del af projektområdet. Heraf fremgik det, at regnmålerscenarierne generelt gav anledning til højere delfyldningsgrad i de enkelte brønde. Dog kunne det ses, at jo flere regnmålere, der bliver medtaget i analysen, jo flere brønde var der, hvor radaren gav anledning til højere delfyldninsgrad end regnmålerscenarierne. Dette skyldes, at de yderligere regnmålere, der blev medtaget i regnmålerscenarierne, havde regninput, der var differentieret i forhold til hinanden, og bedre beskrev den spatiale udbredelse af nedbøren. Det kan også skyldes, at de 21 regnhændelser er valgt ud fra SVK-måler 5694, hvorfor disse hændelser potentielt ikke er ligeså store i de andre regnmålere.

Ud fra dette kapitel kan det konkluderes, at der ses samme tendens, som i Kapitel 6 på side 38, dog tydeligere variationer, da der kun undersøges for hændelser med gentagelsesperiode på 1 år eller mere. Det har dog også vist sig, at regnmålerne giver anledning til mere ekstrem modelrespons for analyserne.

Del III

Statistisk metode til beskrivelse af spatialregn

Del III af rapporten undersøger en alternativ løsning til at implementere spatialt regninput i en numerisk model, uden brug af radar- eller regnmålerdata. Her vil der i stedet undersøges en arealreduktionsfaktor. Til denne del er Bilag M tilknyttet.

8 Anvendelse af arealreduktionsfaktor

I modsætning til de tidligere analyser af spatialregn vil dette kapitel ikke beskæftige sig med forskellige spatiale regninput. Der vil i stedet blive undersøgt en arealreduktionsfaktor (ARF) med det formål at undersøge, hvorvidt det er muligt at tage højde for regnens arealfordeling på en statistisk måde end tidligere præsenteret i dette studie.

8.1 Bestemmelse af arealreduktionsfaktor

ARF beskriver forholdet imellem punktregnen, og den spatiale regn, der dækker et givent oplandsareal. Dette betyder, at ARF er mellem 0 og 1, hvor 0 betyder at der ingen regn forekommer i forhold til punktregnen, og 1 betyder, at der forekommer samme regn som målt i punktregnen over hele oplandet. Punktregnen kan være både en kunstig regn eller en historisk regn. [Thorndahl, 2017]

ARF kan anvendes til analyse af afløbssystemer ved den rationelle metode, som benytter regnkurver/regnrækker som regninput, hvor en ARF vil kunne multipliceres på den udvalgte regnintensitet. ARF vil også kunne anvendes i en dynamisk model, såsom en Mike Urban model, sammen med syntetiske regn (CDS-regn). [Thorndahl et al., 2019]

I Thorndahl [2017] og Thorndahl et al. [2019] er det beskrevet, hvorledes ARF kan beregnes ved at undersøge ARF's afhængighed af blandt andet en korrelationslængde. Af Bilag M.1 på side 121 fremgår, hvordan ARF bestemmes samt relevante konstanter, der skal anvendes.

Oplandsstørrelsen, som skal anvendes for at bestemme en ARF, skal bestemmes til hver enkelt brønd i projektområdet således, at oplandsarealet svarer til opstrømsarealet for det punkt, der ønskes undersøgt.
Først vil det forsøges at bestemme en ARF for hele projektområdets areal for at undersøge, hvor meget regninputtet vil skulle reduceres for at medtage den spatiale fordeling af regn.
Bagefter vil der blive undersøgt udvalgte repræsentative deloplande med varierende oplandsstørrelser.

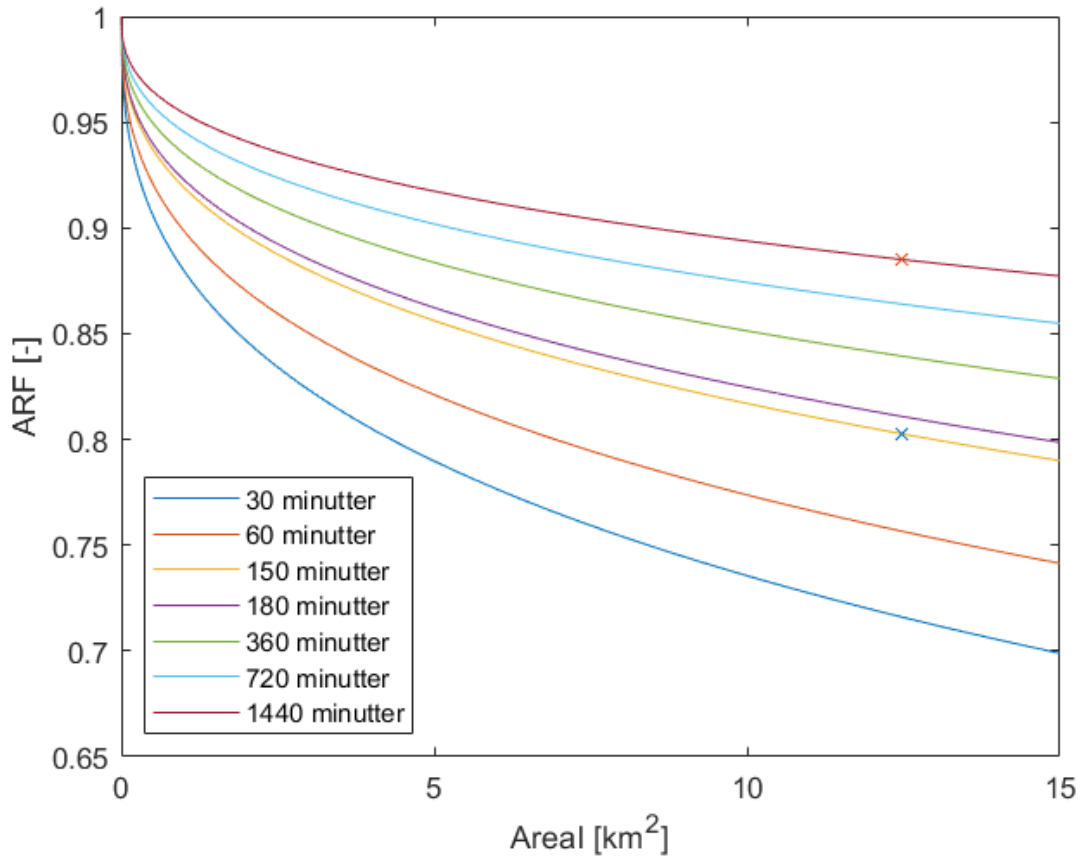
8.2 Anvendelse i projektområdet

Oplandsstørrelsen på projektområdet er, som tidligere beskrevet, 1.248 hektar. Ud over oplandsstørelsen afhænger ARF også af regnvarigheden, som varierer imellem regnhændelser. Der kan derfor bestemmes en ARF for alle forskellige regnvarigheder, hvilket medfører mange forskellige ARF'ere og dermed ikke simplificerer brugen af denne i stor grad. Derfor vil den mest kritiske regnvarighed bestemmes og efterfølgende arealreduceres. Den kritiske regnvarighed antages at være lig koncentrationtiden, under samme antagelse som den rationelle metode. Her antages det, at maksimal vandføring opnås når regnvarigheden svarer til koncentrationstiden. Bestemmelsen af koncentrationstiden for projektområdet fremgår af Bilag M.2 på side 121, og denne blev bestemt til 150 minutter.

Ud fra denne analyse fremgår det, at antagelsen om maksimal vandføring opnås når regnvarigheden svarer til koncentrationstiden, ikke er opfyldt. Dette vurderes at være på grund af flow regulerende komponenter, der er opsat i modellen.
For at kompensere for dette vil der i stedet blive undersøgt for volumenet ud af modellen, som leder til Renseanlæg Lynetten, hvilket fremgår af Figur 3.4 på side 10.

Volumenet ud af modellen vil blive bestemt som en relativ forskel, hvor der tages fraktionen mellem runoff fra overfladerne og mængden af vand, der løber ud af modellen. Dette gøres for at undersøge om der er en anden koncentrationstid for oplandet end de 150 minutter, som blev bestemt tidligere i afsnittet. Dette fremgår ligesom bestemmelsen af koncentrationstiden i Bilag M.2 på side 121.

Det blev ved analysen af fraktionen mellem runoff fra overfladerne og udløbsvolumenet bestemt, at en koncentrationstid på 1440 minutter vil være det mest kritiske for afløbssystemet. Dette stemmer ikke overens med den tidligere analyse af vandføringen ud af udløbet. Der kan altså ikke definitivt bestemmes en endelig koncentrationstid for hele projektområdet. Dette skyldes formegentligt, at modellen er sat op med flow-regulerende real time control. For at undersøge forskellen mellem en koncentrationstid på 150 minutter fra første analyse samt 1440 minutter fra den sidste analyse, er der beregnet en ARF ved de forskellige koncentrationstider. Af Figur 8.1 på den følgende side fremgår en graf over ARF ved givne varigheder. Af samme figur fremgår en markering for ARF ved koncentrationstiden på 150 og 1440 minutter for et oplandsareal på 1.248 hektar, hvilket svarer til projektområdets oplandsareal.

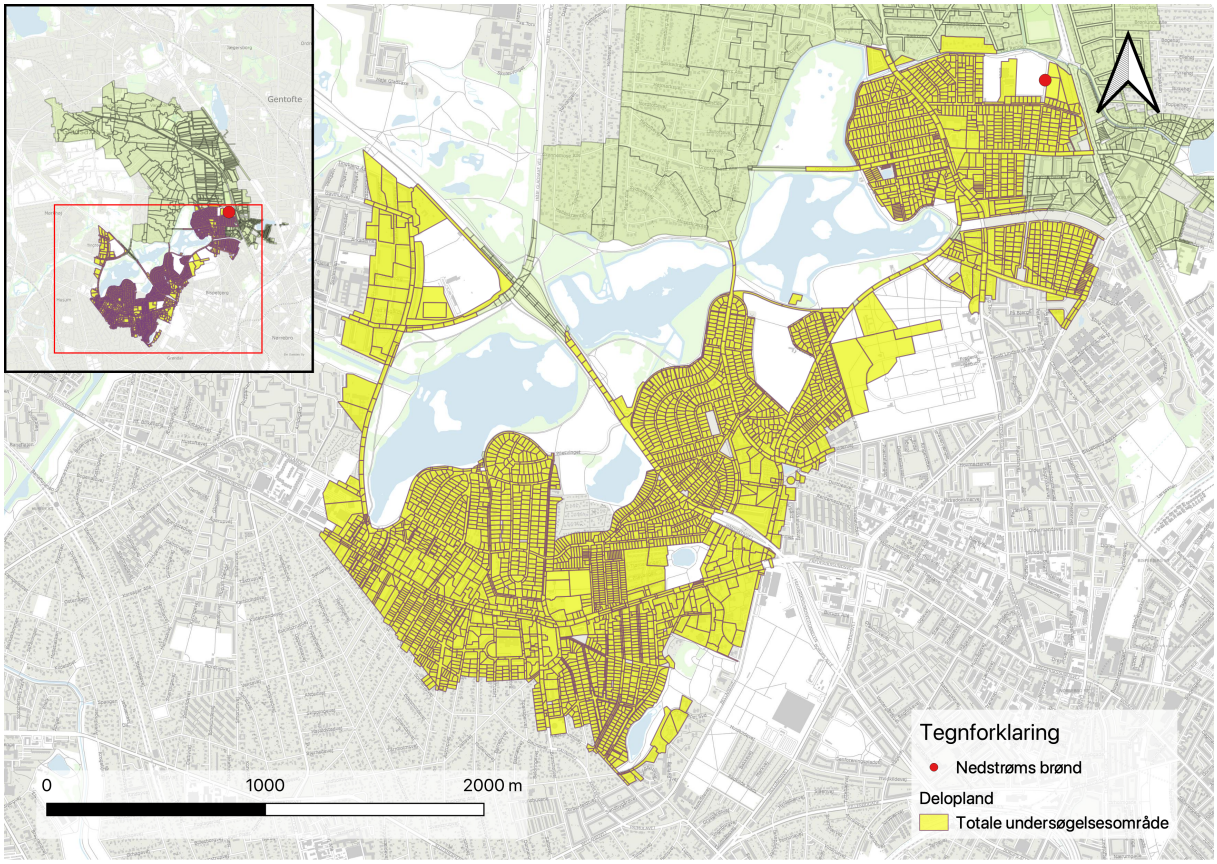


Figur 8.1. ARF-kurver for forskellige regnvarigheder. På figuren angiver det blå kryds ARF for en koncentrationstid på 150 minutter og det røde kryds angiver ARF for en koncentrationstid på 1440 minutter. Begge ved et oplandsareal på 1.248 hektar, svarende til projektområdets oplandsareal.

Af ovenstående figur fremgår det, at et opland med et areal på 1.248 hektar og koncentrationstider på 150 og 1440 minutter vil have en ARF på henholdsvis 0,80 og 0,89. Disse faktorer vil kun være gældende for udløbet af modellen og brøndene lige omkring. Der er altså en relativt stor forskel på hvilken af de to koncentrationstider, som anvendes. Dette indikerer også, at anvendelsen af en ARF på så stort og komplekst et afløbssystem ikke er muligt. Derfor vil projektområdet i følgende afsnit opdeles i mindre deloplande.

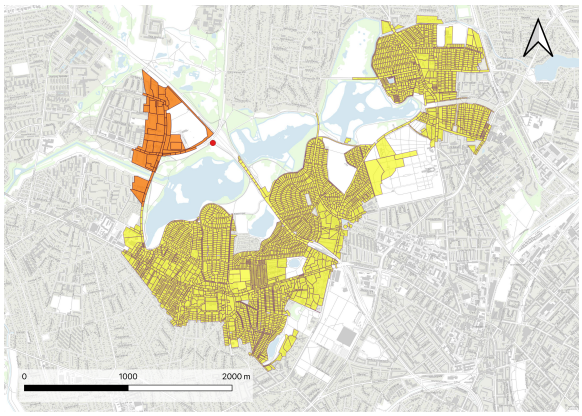
8.3 Anvendelse i deloplande

Til at undersøge arealreduktionsfaktorer for mindre deloplande er det valgt at undersøge fire udvalgte deloplande for projektområdet med varierende oplandsstørrelse. Dette er valgt at undersøge for størstedelen af den sydlige del af projektområdet, hvor ledingssystemet ikke er blevet simplificeret, som det blev beskrevet i Afsnit 3.2 på side 8. Det udvalgte område fremgår af Figur 8.2 med gul skravering.

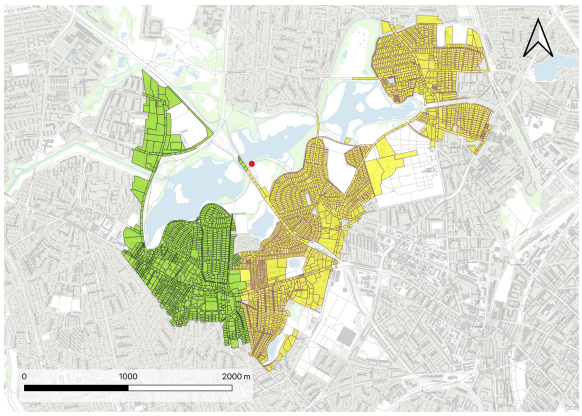


Figur 8.2. Totale delopland til undersøgelse.

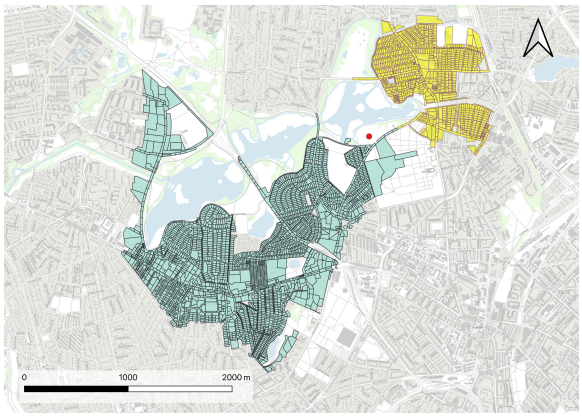
Af Figur 8.3 på næste side fremgår en markering af de fire udvalgte deloplande. Størrelsen af de fire deloplande fremgår af Tabel 8.1 på den følgende side.



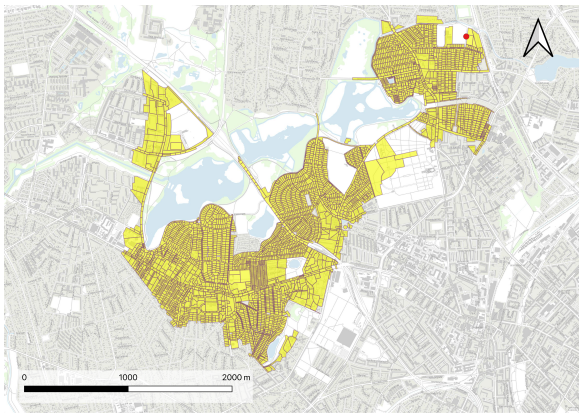
(1) Delopland 1 markeret med orange.



(2) Delopland 2 markeret med grøn.



(3) Delopland 3 markeret med blå.



(4) Delopland 4 markeret med gult.

Figur 8.3. Udvalgte deloplande, som bruges til bestemmelse af ARF. På hver figur fremgår en rød prik, hvilket markere nedstrøms brønd for hvert delopland.

Tabel 8.1. Størrelsen på de fire deloplande markeret på Figur 8.3.

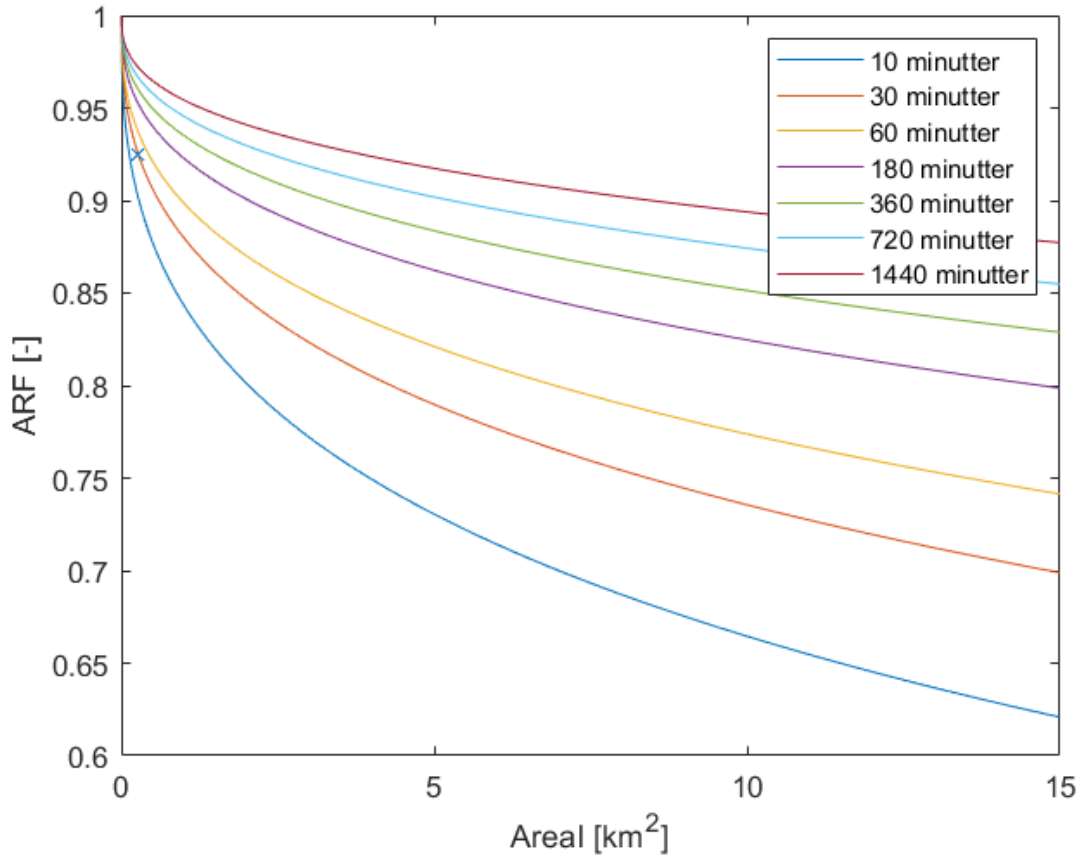
Delopland	1	2	3	4
Areal [km^2]	0,27	1,26	2,67	3,49

Der vil blive foretaget samme analyse som i forrige afsnit, hvor vandføringen i udløbet blev undersøgt. Her vil det dog være nedstrøms brønde for hvert delopland markeret med en rød prik på Figur 8.3, som undersøges. Dette vil igen blive gjort i forhold til de tidligere præsenterede kasseregn i Tabel M.2 på side 122. Ud fra denne analyse er der bestemt en koncentrationstider for de fire deloplande, hvilket er gjort ud fra figurerne nederst i Bilag M på side 121. Af Tabel 8.2 fremgår de kritiske koncentrationstider for de respektive deloplande.

Tabel 8.2. Koncentrationstiden for de fire deloplande markeret på Figur 8.3. Koncentrationstiderne stammer fra figurerne i Bilag M på side 121.

Delopland	1	2	3	4
Koncentrationstid jf. vandføring [min]	30	720	30	30

Det ses af ovenstående tabel, at der for deloplandene ikke er nogen sammenhæng mellem koncentrationstiderne bestemt ud fra vandføringen. Som tidligere beskrevet forventes koncentrationstiden stige som oplandsarealet stiger, men dette er ikke tilfældet for de fire deloplande, hvor Delopland 1 har den mindste koncentrationstid sammen med Delopland 3 og 4. Der er altså heller ikke den nødvendige linearitet mellem oplandsstørrelse og koncentrationstilfælde ud fra denne analyse. Da Delopland 1 har det mindste areal, og kun indeholder et enkelt overløb, som leder ud til Utterslev Mose, og ikke har yderligere komponenter, såsom bassiner eller pumper, er der den nødvendige linearitet i dette delopland. Dermed er det muligt at bestemme en ARF for delopland 1. ARF for Delopland 1 er vist på Figur 8.4.



Figur 8.4. ARF for delopland 1 med et areal svarende til 27 hektar og en koncentrationstid på 30 minutter. ARF er angivet med et blåt kryds og er lig 0,93.

Af ovenstående figur fremgår det, at ARF for delopland 1 er lig 0,93. Dette er en relativ lille reduktion af regninputtet, der skal implementeres for at medtage den spatiale fordeling af regnen. Derfor kan det også diskuteres, hvorvidt det er umagen værd, at bestemme denne i forhold til andre usikkerheder, som kan forekomme ved dimensionering- eller analysering af et afløbssystem.

8.4 Opsamling

I dette kapitel er følgende delspørgsmål fra Kapitel 2 på side 5 forsøgt besvaret:

- Kan der tages hensyn til regnens spatiale udbredelse ved anvendelse af en arealreduktionsfaktor, som en statistisk metode?

Der blev i dette kapitel foretaget en analyse, hvori det blev forsøgt at bruge ARF til at beskrive den spatiale udbredelse regnen i modellen. Dette blev gjort med det formål, at beskrive regnens spatiale udbredelse på en statistisk måde.

Ved bestemmelsen af ARF for hele projektområdet blev der påvist store usikkerheder i forbindelse med bestemmelsen af koncentrationstiden for afløbssystemet. Dette formodes, at være på baggrund af de flowregulerende komponenter som eksempelvis bassiner. Dette resulterede i, at der ikke kunne bestemmes en endegyldig faktor for hele projektområdet.
Der blev i stedet undersøgt for udvalgte deloplande, hvor det var muligt, at bestemme en ARF for det mindste undersøgte delopland. Dette blev muligt, da dette delopland har den fornødne linearitet og ikke har flowregulerende komponenter. Denne faktor er dog af så lille betydning, at denne ikke vurderes egnet til dimensionspraksis grundet usikkerhederne i bestemmelsen af denne.

Del IV

Afrunding af rapport

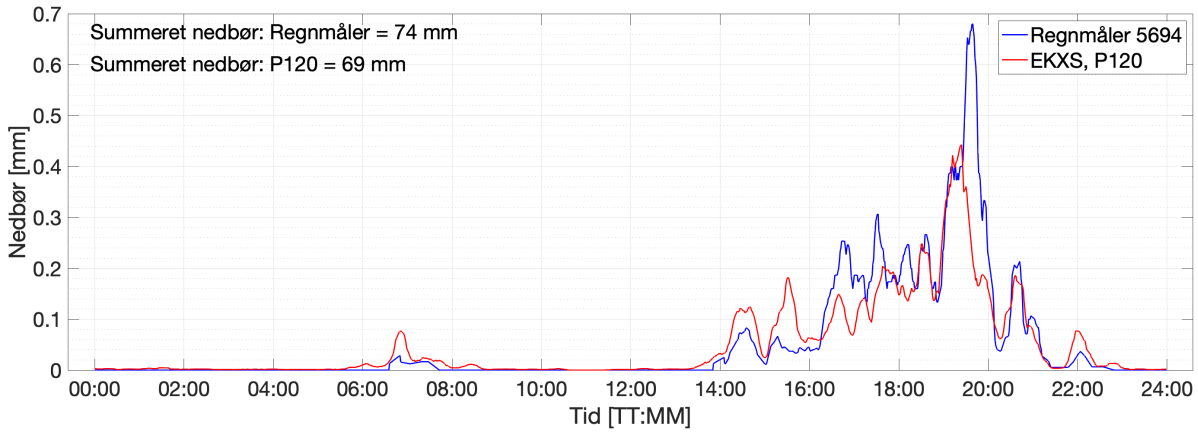
Del IV af rapporten består af en diskussion af de antagelser og metoder, der er gjort i forbindelse med at analysere anvendelsen af spatialt regninput i stedet for punktmålinger. Det vil desuden blive påpeget, hvilke emner det kunne være interessant at arbejde mere dybdegående med. Afslutningsvis i denne del vil der blive konkluderet på den overordnede problemformulering. Til dennne del er Bilag N tilknyttet.

9 Diskussion

I dette kapitel foretages en diskussion af resultater og antagelser, der er gjort igennem rapporten. Under relevante emner, vil det påpeges hvilke ting, der kunne være relevante at undersøge yderligere.

9.1 Fejlkilder ved brug af radardata

Igennem Kapitel 5 på side 22 er radarregn sammenlignet med regnen målt i SVK-målerne. Her er der generelt vist gode overensstemmelser mellem de to regninput efter den lokale biaskorrigering. I Afsnit 5.5 på side 32 blev det undersøgt, hvorvidt radaren og SVK-måler 5694 målte samme intensiteter i radarpixel P120, hvor 5694 er placeret. Af Figur 9.1 fremgår et eksempel for dette i P120 og SVK-måler 5694 for d. 14/08-2010.



Figur 9.1. Hyetograf over nedbør målt i regnmåler 5694 og radarpixel, P120, d. 14/08-2010. Ligeledes fremgår den summerede nedbør for de to målemetoder.

Af ovenstående figur ses det, at radar- og regnmålerintensiteter samt den summerede nedbør er relativt tæt på hinanden. Udfordringen er dog, at radaren generelt måler lavere maksintensiteter sammenlignet med SVK-måleren. Dette skyldes formegentligt radarens spatiale opløsning, hvor nedbøren midles ud på et areal svarende til 500x500 meter.

Derudover fremgår det også af figuren, at peaket, der er målt cirka 19:30 i regnmåleren, ikke fremkommer af radardataet. Dette kan være relateret til den tidslige opløsning for radaren, hvilket kan resultere i at peaket registreres i én af de andre radarpixels omkring den pågældende pixel, P120.

Radaren måler nedbøren i cirka en kilometers højde, hvorfor der potentielt kunne forekomme en afvigelse mellem nedbøren målt i en punktmåler og i radaren, grundet den horisontale bevægelse. Hvis dette er tilfældet, vurderes det ikke at medføre signifikante afvigelser givet, at i de egentlige undersøgelser medtages alle radarpixels i simuleringen. Derfor vil eventuel horisontal bevægelse, stadig være medtaget i simuleringen, med undtagelse af de yderste pixels.
På trods af dette kunne det have været interessant at undersøge, om der ville være bedre overensstemmelse mellem regnmålere og radaren, hvis sammenligningen blev lavet på omkringliggende radarpixels. Herved kunne det undersøges, om der forekommer en bedre overensstemmelse mellem summeret nedbør og intensiteter for omkringliggende radarpixels. Dette er undersøgt i Schleiss et al. [2020], hvor der undersøges radarpixels udenom regnmålere, for at vælge de værdier, som stemmer bedst overens med regnmålerne.

9.2 Fejlkilder ved brug af udvalgt regnmåler

I rapporten blev der fundet relativt store afvigelser ved regnmålerscenariet med én regnmåler (SVK-5694), når det holdes op imod radardata i forhold til de tre andre regnmålerscenarier. I forbindelse med, at der blev medtaget flere regnmålere, blev afvigelsen reduceret, hvorfor det blev konkluderet, at flere regnmålere måtte være et mere virkelighedsnært regninput.
Det blev i Kapitel 5 på side 22 fundet at SVK-måler 5694 målte mest regn i forhold til radardataet af de undersøgte otte regnmålere. Deraf kan det diskuteres, om brugen af SVK-måler 5694 til regnmålercenarie 1, har været årsagen til at give de relative store afvigelser mellem regnmålerscenarie 1- og EKXS resultater, eller om det har været den manglende spatiale beskrivelse af nedbøren.

På Baggrund af ovenstående usikkerhed i betydningen af brugen af SVK-måler 5694 til regninputscenariet med én regnmåler, er der foretaget samme analyser for modelparametre, som i tidligere kapitler. Dog er der foretaget simuleringer med alle otte regnmålere, som individuelt regninput til simuleringer i modellen.
Derved kan det undersøges i hvilken grad de syv andre regnmålere end 5694 medfører afvigelse fra radaren.

Alle otte regnmålerresultater er holdt op i mod resultater fra radaren, for at kunne se en relativ forskel, i forhold til denne. Af Tabel 9.1 fremgår den arealmidlede nedbør.

Tabel 9.1. Resultater for arealmidlet nedbør ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med hver af de otte SVK-målere projekteret ud på alle oplande. Værdierne er holdt op i mod radarresultater.

SVK-måler ift. EKXS	NSE [-]	MAE [-]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,839	1,50	769	28	1,08
5655	0,898	1,24	737	21	1,05
5660	0,864	1,22	760	19	1,04
5690	0,787	1,30	725	20	1,01
5694	0,899	1,09	769	18	1,08
5699	0,885	1,26	761	23	1,01
5705	0,863	1,37	689	24	1,01
5725	0,777	1,53	738	25	1,03
Gennemsnit	0,851	1,13	744	22	1,04

Af ovenstående tabel fremgår det at 5694 resulterer i den højeste NSE-værdi, laveste MAE samt laveste gennemsnitlige procentvise afvigelse, på trods af at have det højeste bias i forhold til radardataet. Dette indikerer, at det ville være mest rigtigt at benytte SVK-måler 5694 til regninputscenariet med én regnmåler i forhold til de andre regnmålere.

Af Bilag N på side 127 forekommer lignende tabeller, i forhold til udløbsvolumen, overløbsvolumen samt antal brønde med en delfyldningsgrad over 50%.
For både udløb- og overløbsvolumener forekommer samme tendens, hvor at regnmåler 5694 vurderes til at være den regnmåler af de 8, der stemmer bedst overens med radardataet i forhold til de resterende syv regnmålere.

Deraf må det antages at fordelen ved at have en regnmåler placeret midt i oplandet, og dermed beskrive regnen der forekommer tættest muligt på projektområdet, opvejer det at der i regnmåler 5694 forekommer mere regn end radaren måler.

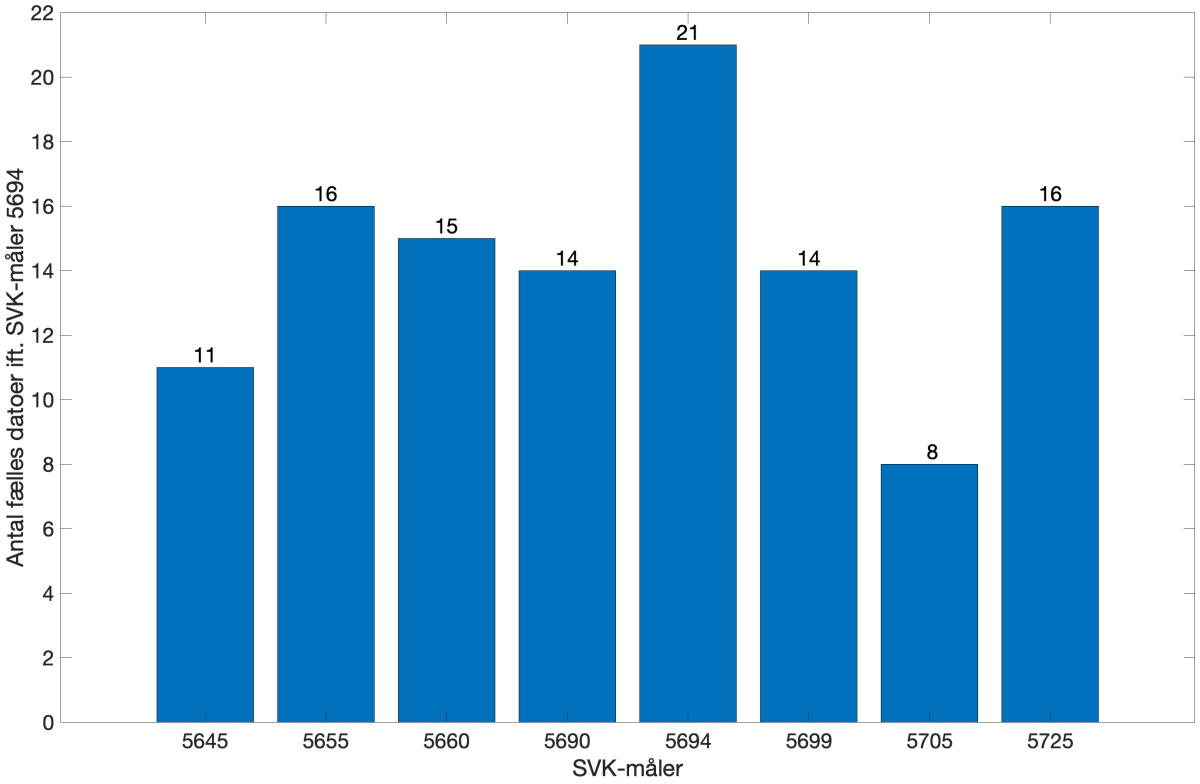
Der forekom ikke samme tendens i antal brønde med delfyldningsgrad over 50%, hvor regnmåler 5699 og 5705 passede bedre overens med radaren. Dette er dog ikke nødvendigvis fordelagtigt, givet at denne analyse viser en tendens til at afvigelserne kan skyldes forskellene i maksimale intensiteter der generelt forkommer imellem regnmålere og radar, hvorfor der ikke forventes god korrelation imellem regnmåler og radar.

Ud fra denne analyse, konkluderes det at brugen af regnmåler 5694, og det bias der forekommer i denne i forbindelse med regnmængder, ikke har bidraget til yderligere afvigelse, men derimod er den regnmåler der passer bedst overens, ud af de undersøgte regnmålere i dette studie.

9.3 Afvigelser ved udvælgelse af ekstremhændelser

I Kapitel 7 på side 46 blev der udvalgt 21 ekstremhændelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller mere, baseret på regndata fra SVK-måler 5694. Dette kan medføre usikkerheder, da målet med undersøgelsen er at analysere på selve projektområdet, hvorfor det ville have været optimalt at udvælge ekstreme regnhændelser for hele projektområdet, og ikke for én regnmåler, som i dette studie har været SVK-måler 5694. Denne regnmåler blev udvalgt grundet dens centrale placering, hvorfor denne forventes at beskrive nedbøren bedst for oplandet.

I et forsøg på at bestemme om de udvalgte ekstremhændelser er repræsentative for området, er der foretaget en analyse af hvor mange af de 21 ekstremhændelser der forekommer med gentagelsesperioder på et år eller mere, i de resterende regnmålere. Af Figur 9.2 på den følgende side, fremgår antallet af hændelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller mere, for hver regnmåler i forhold til SVK-måler 5694.



Figur 9.2. Illustration af antal ekstremhændelser udvalgt på baggrund af 5694, som går igen i forhold til de resterende syv regnmålere.

Det kan ses af ovenstående figur, at der forekommer en forholdsvis dårlig sammenhæng mellem antallet er ekstremhændelser i de omkringliggende regnmålere. Dette øger usikkerheden yderligere i forhold til om de udvalgte hændelser er ekstremhændelser for hele projektområdet, eller om de er mere lokale.

I forbindelse med dette er det undersøgt, hvor mange af de 21 regnhændelser, udvalgt på baggrund af 5694, som går igen for alle SVK-målere. Heraf forsøges det at bestemme antallet af hændelser der forekommer, som ekstremhændelser over hele projektområdet. Heraf blev der fundet tre regnhændelser, som fremgår af følgende.

- 14/08-2010
- 04/09-2015
- 25/09-2020

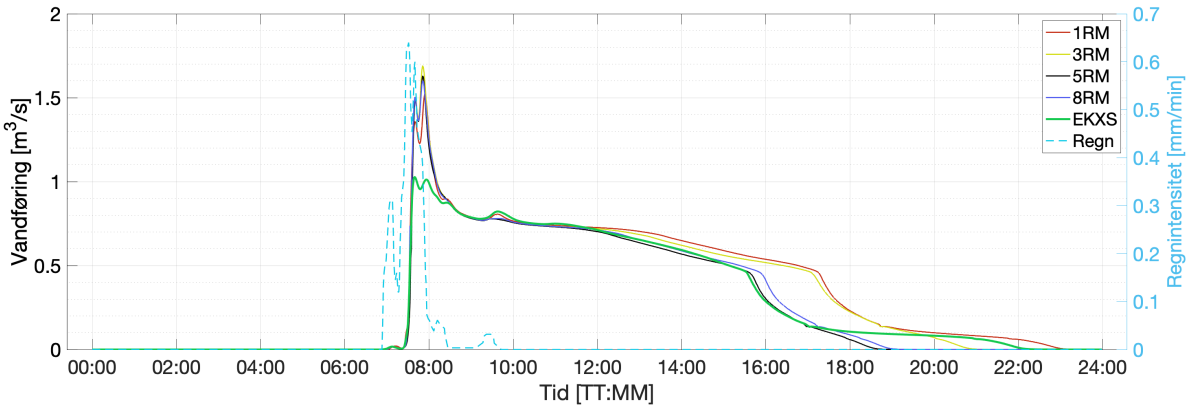
Ved at der kun forekommer tre ens hændelser med en gentagelsesperiode på over 1 år i alle regnmålere, og dermed antageligt hele projektområdet, kan det give anledning til afvigelser. Idet at analysen der er foretaget i forbindelse med ekstremhændelser, ikke bygger på samme grundlag for alle regnmålere.

Disse afvigelser kan dog tilskrives den manglende spatiale udbredelse ved brug af punktnedbør, idet forventningen var, at specielt ekstremhændelser fundet på baggrund af 1 regnmåler vil være misvisende, når den projekteres ud på et opland i størrelsesordenen af projektområdet.

En eventuel løsning kunne være at bruge radardata til at bestemme ekstremhændelser for projektområdet, hvorfor sammenligningsgrundlaget vil være det samme for de forskellige regnmålere.

9.4 Afvigelser ved døgnsimulering

Der er igennem rapporten kun simuleret for 1 døgn, hvorfor dette kan medføre afvigelser i overløbs- og udløbsvolumener, hvis der forekommer overløb når simuleringen stoppes. Ved nærmere undersøgelse af specielt overløbsgraferne er det påvist, at ved de ekstreme hændelser opstår der overløb i lang tid efter selve regnhændelsen stopper. Dette antages at være på baggrund af flow-regulerende komponenter. Denne antagelse er lavet på baggrund af analyse af overløbsgrafer, hvor det eksempelvis af Figur 9.3 ses, at der er overløb i 8 til 12 timer efter regnhændelsen er stoppet. Denne graf dækker over en regnhændelse på 155 minutter, som starter lidt over 7 om morgenen.



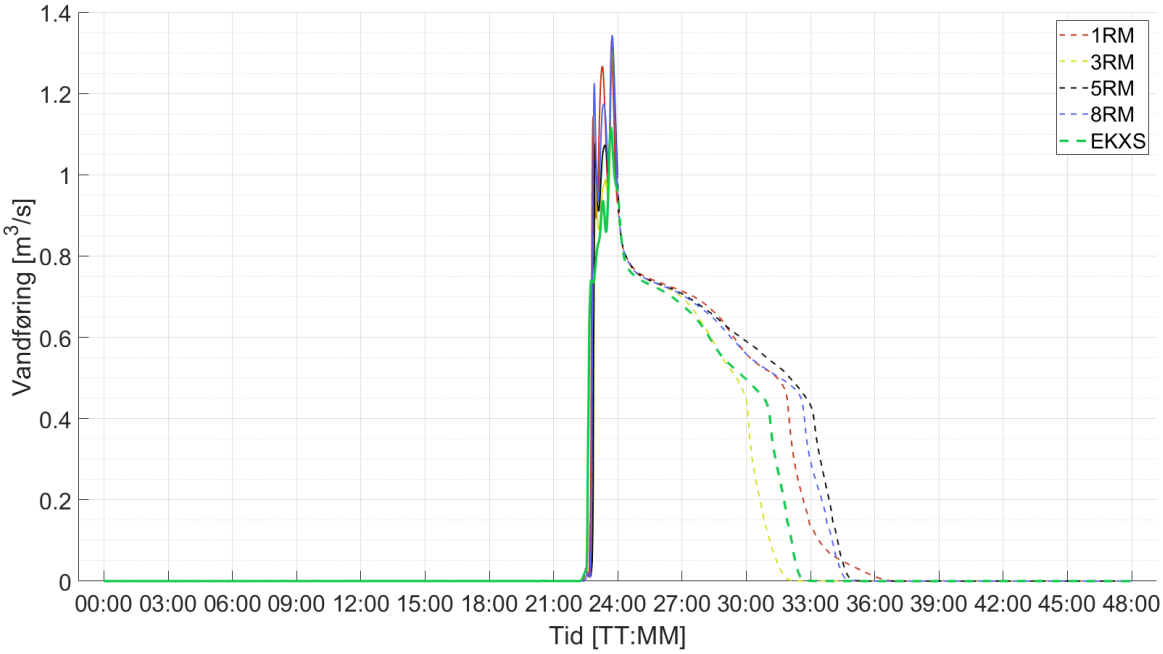
Figur 9.3. Hydrograf over overløbende vandføring. Indført på anden akse er regnintensitet over hændelsen målt i regnmåler 5694. Datoen er den 28/07-2019.

På baggrund af overløbet fortsætter lang tid efter regnhændelsens sluttidspunkt antages det at medføre en større afvigelse ved specielt store regnhændelser, når der undersøges udløbs- samt overløbsvolumener. I et forsøg på at bestemme afvigelsen ved kun at have simuleret et døgn for de 21 største hændelser målt i 5694, er disse simuleret med et ekstra døgn, og forskellen er bestemt, hvilket fremgår af Tabel 9.2 på den følgende side.

Tabel 9.2. Oversigt over hvor meget ekstra udløb og overløb, henholdsvis 'U' og 'O', der forekommer ved at simulerer et ekstra døgn, angivet i %. Hvis der er under 1% forskel, er det markeret med '-'.

Dato	**1RM**		**3RM**		**5RM**		**8RM**		**RADAR**	
	O	U	O	U	O	U	O	U	O	U
20/05-2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07/06-2010	1	-1	1	-	-	-	-	-	-	-
14/08-2010	76	-20	70	-19	73	-19	74	-19	57	-18
02/07-2011	61	-18	26	-6	54	-16	53	-16	25	-13
14/07-2011	1	-1	1	-1	-	-	-	-	1	-1
14/08-2011	120	-25	109	-23	104	-25	105	-25	85	-22
08/08-2014	5	-3	1	-1	-	-	1	-1	-	-
31/08-2014	1	-1	3	-3	1	-1	1	-1	1	-1
04/09-2015	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-1
21/11-2015	45	-20	49	-19	59	-22	52	-21	44	-19
16/06-2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10/07-2016	100	-23	105	-25	113	-28	108	-27	54	-21
02/08-2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22/06-2017	199	-28	178	-34	201	-35	186	-33	172	-33
14/07-2017	35	-14	10	-6	35	-16	24	-13	6	-5
23/07-2017	13	-8	9	-5	13	-8	13	-8	9	-6
09/09-2017	10	-6	2	-2	7	-5	5	-3	2	-2
17/09-2017	2	-1	-	-	-	-	-	-	-	-
28/07-2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/10-2019	35	-16	31	-15	32	-16	31	-15	-	-
25/09-2020	2	-2	4	-3	4	-3	5	-4	3	-3
Gennemsnit	45	-10	39	-10	43	-10	40	-10	21	-9

Af Tabel 9.2 fremgår det, at det har en markant effekt at stoppe simuleringen efter 1 døgn, i stedet for to døgn. Specielt enkelte hændelser som 10/07-2016, 14/08-2011 og 22/06-2017 øger gennemsnittet. Det fremgår også, at afvigelsen i overløbsvolumen er markant højere end udløbsvolumen og, at der kun forekommer en ændring i udløbsvolumen når overløbet ændres. Dette er grundet måden udløbsvolumenet blev bestemt, hvor den totale vandmængde i rørsystemet fratrækkes det overløbende volumen. Dette betyder, at det kun er i tilfælde hvor overløbet fortsætter henover midnat, at der vil forekomme afvigelser. Derfor må værdierne ovenfor også antages at være dem med størst afvigelse, da det er de største hændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022.
Ved simuleringstid på to døgn blev der kun påvist en effekt på opstuvningen i brønde for hændelsen, der fremgår af Figur 9.4 på den følgende side. Denne hændelse blev også bestemt til at være den mest misvisende i forhold til overløb og udløb.

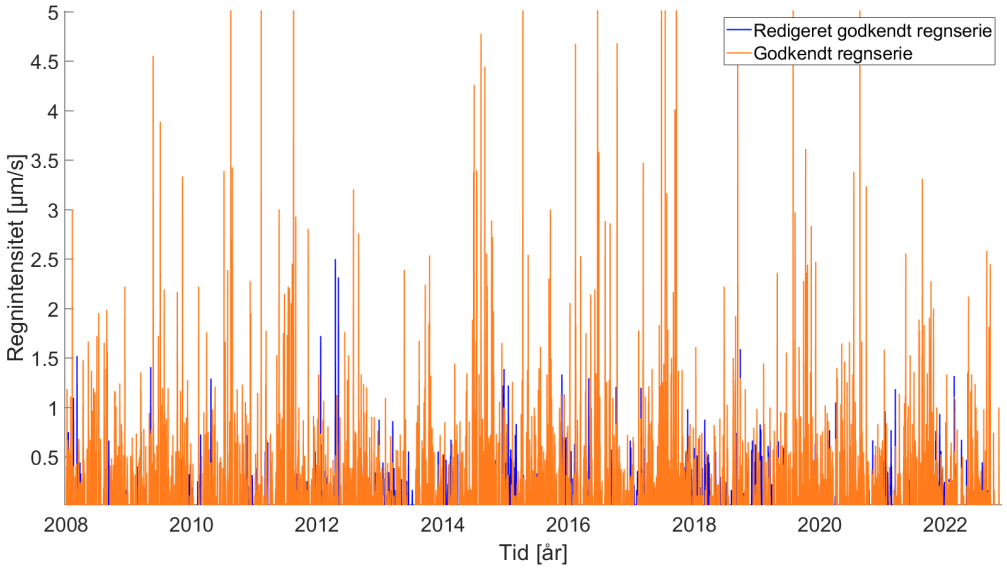


Figur 9.4. Hydrograf for overløbende vandføring, for den 22/06-2017. Den originalt simulerede vandføring er markeret med fuldtoptrukket streg, og stiplet i andet døgn.

I fremtiden vil det være fordelagtigt at simulere alle hændelserne med ekstra tid, for at få hele overløbet medregnet. Hvorvidt det er et helt døgn der er nødvendigt, eller 6-12 timer kan diskuteres, men som det kan ses af Figur 9.3 på side 78, medfører en kort regnhændelse en langvarig respons i systemet.

9.5 Redigering af regnmålerregnserier

I Kapitel 5 på side 22 blev nedbørsdata fra de otte udvalgte SVK-måler samt Stevns radaren, EKXS, analyseret i forhold til hinanden. Dette blev gjort ved at sammenligne data fra respektive regnmåler/radarpixel par. Her blev der påvist en dårlig sammenhæng mellem radar- og regnmålerobservationer, hvorfor der blev foretaget en ny biaskorrigering af radardataet ud fra de otte udvalgte SVK-målere.
Analysen af sammenhængen mellem radardata og tilsvarende regnmålerdata blev undersøgt i forhold til flere forskellige regnserier, henholdsvis godkendt, ikke godkendt samt en tilrettet godkendt serie. Disse opdelinger havde alle stor effekt i hvor meget regn, der blev målt i regnmåleren.
I denne rapport blev der fundet den mindst afvigelse mellem radar og regnmålere ved brug af en tilrettet godkendt regnserie i forhold til en godkendt regnserie. Begge regnserier fremgår af Figur 9.5 på næste side.



Figur 9.5. Glidende gennemsnit over 60 minutter af nedbør målt i regnmåler 5694. Det godkendte data er markeret med orange, og det redigerede data er markeret med blåt.

Da det tilrettet godkendte dataset indeholder alle de hændelser, som den godkendte regnserie, samt de ekstra, der er tilføjet, illustrerer det blå på figuren det ekstra regn, der er medtaget ved at medtage nogle af de ikke godkendte hændelser. Af analysen i Kapitel 5 på side 22, samt ovenstående figur, forekommer det, at der er medtaget en relativt stor mængde ekstra regnhændelser, hvoraf afvigelsen mellem akkumuleret regn i regnmåleren og radarpixel bliver reduceret med næsten 10%.

Formålet med analyse var at reducere afvigelsen mellem regnmåler/radarpixel par, men på trods af en relativt lille afvigelse i akkumuleret regn, blev der generelt fundet en dårlig overensstemmelse mellem de valgte regnserier og de tilsvarende radarpixels. Dette ledte til en ny biaskorrigering af radardataet.
Det kan diskuteres hvorvidt dette var den optimale løsning, eller om det kunne have været bedre at forsøge at fremskaffe det regnmålerdata, som den originale biaskorrigering var lavet på baggrund af.
På den måde kunne effekten af en lokal biaskorrigering isoleres i forhold til den, der er foretaget på baggrund af alle regnmålere indenfor 75 km radius af radaren.
I denne rapport er der chance for, at meget af forbedringen, der forekommer ved en lokal biaskorrigering, kun forekommer grundet en ændring i datasættet hvorpå biasfaktorerne er udregnet.

9.6 Problematikker ved arealreduktionsfaktoren

I Kapitel 8 på side 66 blev det undersøgt, hvorvidt det er muligt, at anvende en arealreduktionsfaktor til at beskrive den spatiale udbredelse af regnen. Dette blev gjort med udgangspunkt i, at det ville være en statistisk metode, at medtage regnens spatiale udbredelse ved en enkelt faktor, sammenlignet med anvendelsen af radardata. Da metoden er statistisk har den også en række udfordringer og usikkerheder forbundet med sig.

Ved bestemmelsen af en arealreduktionsfaktor for hele projektområdet blev det påvist, at det ikke var muligt at bestemme en ARF for så stort og komplekst et afløbssystem. Det var til gengæld muligt at bestemme en ARF for et lille delopland. Dette gav dog en ARF, som svarer til en reducering af regninputtet med cirka 7%. Dette er, som tidligere beskrevet, en relativt lille reducering af regninputtet. Det kan derfor diskuteres, hvorvidt det giver mening at beregne en ARF, når der er flere usikkerheder forbundet med bestemmelsen af denne.

Tidligere blev det beskrevet, at der kan være betydelig forskel på, hvor meget nedbør regnmålerne har registreret indbyrdes. Heraf ses det, at det har en væsentlig betydning, om regninputtet eksempelvis kommer fra 5694, som måler 11 % mere regn end regionalmodellen, eller om regninputtet kommer fra 5705, som har målt 6% mindre end regionalmodellen. Sammenlignet med en ARF på 0,93 vil valget af regnmåler altså kunne have en væsentligt større betydning.

10 Konklusion

I Kapitel 2 på side 5 blev følgende hypotese opstillet:

I forhold til punktnedbør, vil anvendelse af variende grad af spatialt regninput medføre en signifikant ændring i modelrespons.

Til denne hypotese blev følgende underspørgsmål opstillet.

1. Forekommer der betydelig afvigelse imellem radarobservationer og punktnedbør målt i SVK-målere?
2. Hvilken effekt forekommer ved brug af varierende grad af spatialt regninput til hydrauliske modeller.
3. Hvilken effekt forekommer ved brug af varierende grad af spatialt regninput til hydrauliske modeller, ved analyse af ekstremhændelser?
4. Kan der tages hensyn til regnens spatiale udbredelse ved anvendelse af en arealreduktionsfaktor, som en statistisk metode?

De første analyser påviste store afvigelser imellem regnmåler- og radardata. I forbindelse med at isolere effekten af spatial variabilitet blev der foretaget en ny lokal biaskorrigering, hvoraf afvigelserne blev reduceret markant, dog stadig med en tendens til at radaren målte lavere maksimale intensiteter end regnmåleren.

Deraf blev der fundet en sammenhæng imellem ændringen i modelrespons i forhold til hvilken grad af spatial variabilitet regninputtet havde. I analysen for alle regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, blev der fundet et mindre bias i forhold til generelt højere værdier ved brug af punktnedbør, og en generel konvergens imod radardataet, ved bedre beskrivelse af regnens spatiale udbredelse ved flere regnmålere.

I forhold til ekstremhændelser, blev der fundet et tydeligt bias i forbindelse med overestimering ved brug af punktnedbør, i forhold til radardata. Den generelle tendens var en markant reduktion i dette bias i forbindelse med at medtage flere regnmålere.
Ved undersøgelse af delfyldningsgraden fremkom en væsentligt dårligere sammenhæng end ved andre parametre. Dette skyldes formegentligt, at opstuvningen er mere følsom overfor højintens nedbør, hvor der er en stor afvigelse imellem radar- og regnmålerdata.

Der er foretaget analyser i forbindelse med at bestemme om overløb og opstuvning varierer alt efter den spatiale variabilitet. Der blev ikke fundet en generel sammenhæng i ændring på overløbsvolumener, ud over en generel dårlig korrelation imellem radar og de forskellige regnmåler scenarier.
I forbindelse med opstuvning i brønde, var der en tendens til større opstuvning ved brug af punktnedbør, ved små opstrømsliggende oplande. Større oplande, med mindre grad af linearitet, så ikke samme tendens.

Som en konklusion på hypotesen kan det konkluderes, at anvendelse af spatialt regninput medfører en signifikant ændring i modelrespons. I forbindelse med, at der medtages flere regnmålere til at beskrive regnen, findes der en generel konvergens imod radardata, hvorfor det antages, at virkeligheden er bedst repræsenteret ved at bruge spatialt regninput. Ud fra, at dette studie bygger på relative sammenligninger, kan det ikke konkluderes hvilket af scenarierne, der er mest virkelighedsnært, imellem 8 regnmålere og radardata, hvorfor det antages at være et sted imellem disse.

Baseret på dette studie vil anbefalingen være, at i tilfælde, hvor der er et stort antal regnmålere indenfor en relativ kort afstand til det pågældende opland, vil det være fordelagtigt at benytte regnmålere til regninput. Dette skyldes, at ved at medtage flere regnmålere, beskriver disse den spatiale udbredelse relativt godt, og kræver markant mindre arbejde at implementere i en Mike Urban Model end radardata.

For scenarier, hvor der ikke forfindes regnmålerdata tæt på oplandet, samt et begrænset antal regnmålere, vil radardata være at fortrække, specielt for store oplande.
For relativt små oplande vil det være tilstrækkeligt at benytte punktnedbør som regninput, grundet der ikke findes en betydelig spatial variabilitet indenfor oplandet.

For små lineære afløbssystemer er det muligt at gøre brug af den statisktiske metode, arealreduktionsfaktoren, til at beskrive den spatiale udbredelse af regnen.

11 Perspektivering

Denne rapport analyserer anvendelsen af spatialregn til analysering af afløbssystemer. I denne forbindelse er der undersøgt den relative ændring i modelrespons i et forsøg på at konkludere effekten af et varierende spatialt regninput. Heri er der en række analyser, der ikke er foretaget, som vil være fordelagtige at arbejde videre med, og som antages at kunne konkludere på effekten af det spatiale input.

Andet videre arbejde er brugen af enkelte radarpixels som quasi-regnmålere. Som beskrevet i Kapitel 4 på side 13, er radarregn implementeret i Mike Urban modellen på samme måde som regnmålere, blot placeret i centrum af hver pixel. Deraf kunne det være interessant at undersøge hvorvidt det at bruge enkelte spredte radarpixels, vil kunne fungere som spredte regnmålere og give gode resultater. Dette vil også medføre, at der kan fremskaffes spatialt regninput i områder hvor dette ellers ikke vil være tilgængeligt grundet placeringen af regnmålere.
Ved brug af udvalgt radarpixels, som værende punktmålere for et opland, hvor der ikke forefindes SVK-målere, vil det være muligt at kunne udvælge relevante ekstremhændelser for det pågældende område til analyse af oplandet.

Brugen af radarinput i dimensioneringsøjemed kunne være et interessant videre arbejde. Dermed medtages den spatiale udbredelse, hvorfor en eventuelt overdimensionering kunne reduceres. Dette er dog et mere omfattende arbejde, end den nuværende fremgangsmåde.

I forbindelse med arbejdet i Mike Urban modellen er der undersøgt fire modelparametre; arealmidlet nedbør, udløbsvolumen, overløbsvolumen samt opstuvning i brønde. Ingen af modelparametrene er sammenlignet med virkelige målinger fra eksempelvis SRO-systemer i overløbsbygværker. Der er i stedet benyttet relative sammenligninger af modelresultater fra radaren og fra det forskellige antal regnmålere. Dermed har det været umuligt at konkludere hvorvidt resultaterne som helhed er retvisende. Derimod kunne det også være meget fordelagtigt at medtage virkelige målinger i forbindelse med at konkluderer hvorvidt radar eller for eksempel 8 regnmålere er tættest på de virkelige forhold.

Litteratur

COWI, **2023**. COWI. *København spildevandsplan*. https://webgis.digitaleplaner.dk/app/koebenhavn/spildevandsplan,skybrudsplan/#stamenTonerLite/11/12.5052/55.6836/spildevandsplan.kloakoplande_status,public.kommunegraense, 2023. Besøgt: 31-05-2023.

DMI, **2022**. DMI. *Strategi for energirenovering af bygninger*. https://www.dmi.dk/dmis-vejrprodukter/radar/, 2022. Downloadet: 21-09-2022.

DMI, **2023**. DMI. *BESTILLING AF SVK DATA*. http://svk.dmi.dk/dmi/RainEvents/bestilling/*.bestilling, 2023. Besøgt: 10-02-2023.

Gregersen et al., **2014**. Ida Bülow Gregersen, Henrik Madsen, Jens Jørgen Linde, Krüger og Karsten Arnbjerg-Nielsen. *Skrift nr. 30 Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter*, IDA Spildevandskomitéen, 2014.

Harremöes et al., **2005**. Poul Harremöes, Claus Møller Pedersen, Anne Laustsen, Sonia Sørensen, Bo Laden, Karsten Friis, Helle Katrine Andersen, Jens Jørgen Linde, Peter Steen Mikkelsen og Carsten Jakobsen. *Skrift nr. 27 Funktionspraksis for afløbssystemer under regn*, IDA Spildevandskomitéent, 2005.

Københavns Kommunes Teknik- og Miljøforvaltningen, **2018**. Københavns Kommunes Teknik- og Miljøforvaltningen. *Københavns Kommunes Spildevandsplan 2018*. https://www.kk.dk/sites/default/files/agenda/fae62511-37a9-40d3-8887-c1f98e9c5e01/315ee58e-df84-44e9-9dfc-f86bba778a6f-bilag-2.pdf, 2018. Downloadet: 04-10-2022.

Mikkelsen et al., **1999**. Peter Steen Mikkelsen, Henrik Madsen, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Hanne Kjær Jørgensen, Dan Rosbjerg og Poul Harremoës. *Skrift nr. 26 Regional Variation af ekstremregn i Danmark*, IDA Spildevandskomitéent, 1999.

Nash og Sutcliffe, **1970**. J.E. Nash og J. V. Sutcliffe. *RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART I - A DISCUSSION OF PRINCIPLES*. Journal of Hydrology, Journal 10, s. 282–290, 1970.

Rasmussen et al., **2009**. Michael R. Rasmussen, Søren Liedtke Thorndahl, Morten Grum, Sune Neve og Morten Borup. *Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg*, DTU, 2009.

Sarup, **2021**. Kim Sarup. *Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem - Årsnotat 2021*, DMI, 2021.

Sarup, **2018**. Kim Sarup. *Drift af Spildevandskomitéens Regnmålersystem*. `https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Rapporter/TR/2018/DMI_Report_18_3.pdf`, 2018. Downloadet: 07-11-2022.

Schleiss et al., **2020**. Marc Schleiss, Jonas Olsson, Peter Bjerg, Tero Niemi, Teemu Kokkonen, Søren Liedtke Thorndahl, Rasmus Nielsen, Jesper Ellerbæk Nielsen, Denica Bozhinova og Seppo Pulkkinen. *The accuracy of weather radar in heavy rain*. Hydrology and Earth System Sciences, 24, s. 3159–3160, 2020.

Spildevandskomiteen, **2022**. Spildevandskomiteen. *Styregruppen for regnmåler-systemet*. `https://spildevandskomiteen.dk/organisation/regnmaalersystemet/`, 2022. Downloadet: 21-09-2022.

Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur, **2022**. Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur. *Terrænkort*. `https://sdfi.dk`, 2022. Downloadet: 30-01-2023.

Thorndahl, **2017**. Søren Liedtke Thorndahl. *Regninput til regnvandsdisponering i Aarhus Vands forsyningsområde*. DCE Technical Memorandum, No. 67, 2017.

Thorndahl et al., **2014**. Søren Liedtke Thorndahl, Jesper E. Nielsen og Michael R. Rasmussen. *Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series*. Journal of Hydrology, 508, s. 214–226, 2014.

Thorndahl et al., **2019**. Søren Liedtke Thorndahl, Jesper Ellerbæk Nielsen og Michael Romdrup Rasmussen. *Estimation of Storm-Centred Areal Reduction Factors from Radar Rainfall for Design in Urban Hydrology*. Water, 11, 2019.

A Modelafvigelser

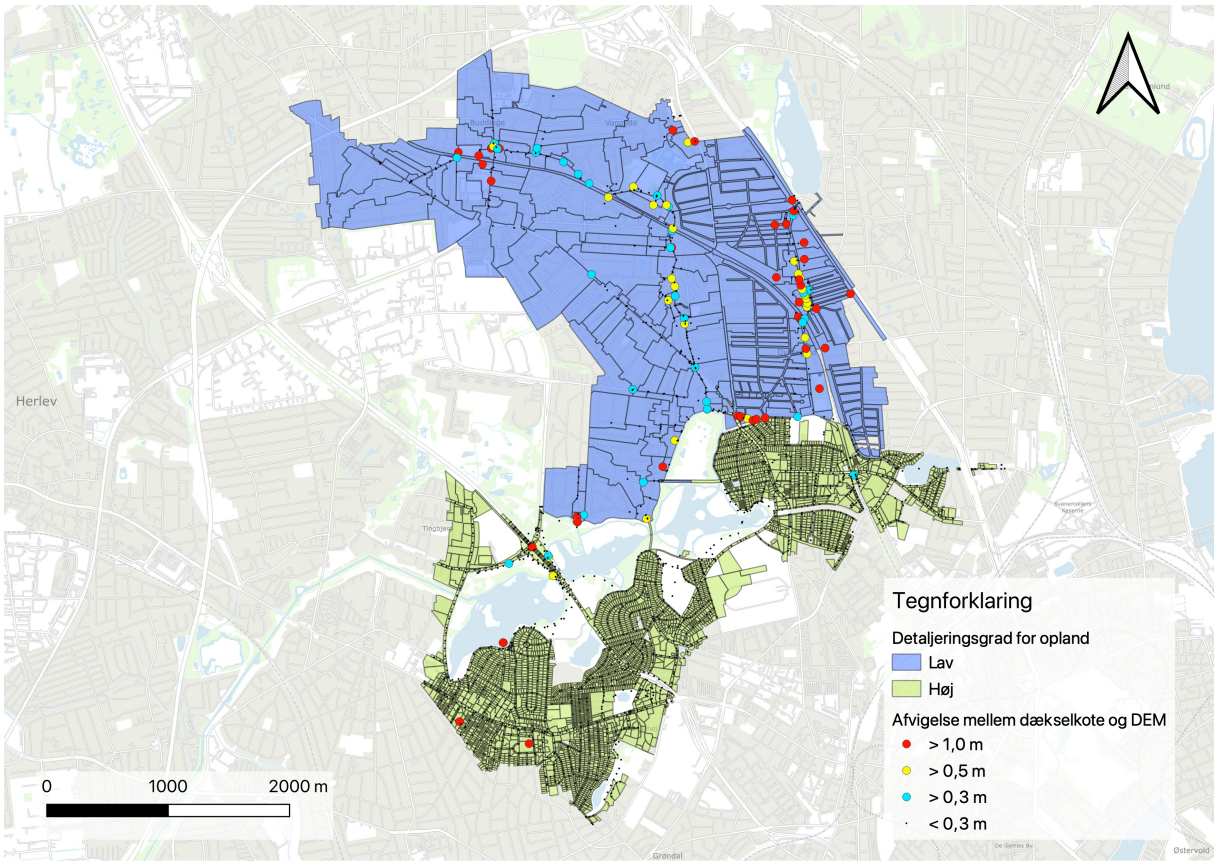
I forbindelse med at foretage simuleringer i MIKE Urban var der mistanke om modeltekniske fejl, grundet simuleringer uden regn i modellen resulterede i, at der var forskellige antal brønde som overløb. Udover dette resulterede simuleringer med forskellige regnhændelser i, at der var varierende antal brønde, hvor der ikke blev registreret et maksimale vandspejl i resultatfilerne i brøndene benævnt (H_{max}), som beskriver den maksimale vandstand i en brønd over en regnhændelse. Dette resulterer i, at modellen medregner alle brønde uden en H_{max}, som brønde der overløber, hvilket nødvendigvis ikke er rigtigt.

På Baggrund af ovenstående usikkerheder er det valgt, at undersøge afvigelsen mellem brøndenes indtastede terrænkoter i Mike Urban med DEM'en, som er downloadet fra Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur [2022]. Dette gøres med henblik på, at undersøge, om der er nogle brønde, som skal fratages i analysen om opstuvning i brønde. Hertil udvælges det at undersøge hvor mange dækselkoter, der afviger fra DEM'en ved tre forskellige værdier. Dette fremgår af Tabel A.1.

Tabel A.1. Afvigelse mellem dækselkote og DEM ud fra tre værdier.

Dækselkote ift. DEM	**Antal brønde**	**Afvigelse [%]**
$>$ 1,0 meter	42	2,42
$>$ 0,5 meter	72	4,14
$>$ 0,3 meter	105	6,04
$<$ 0,3	1634	-

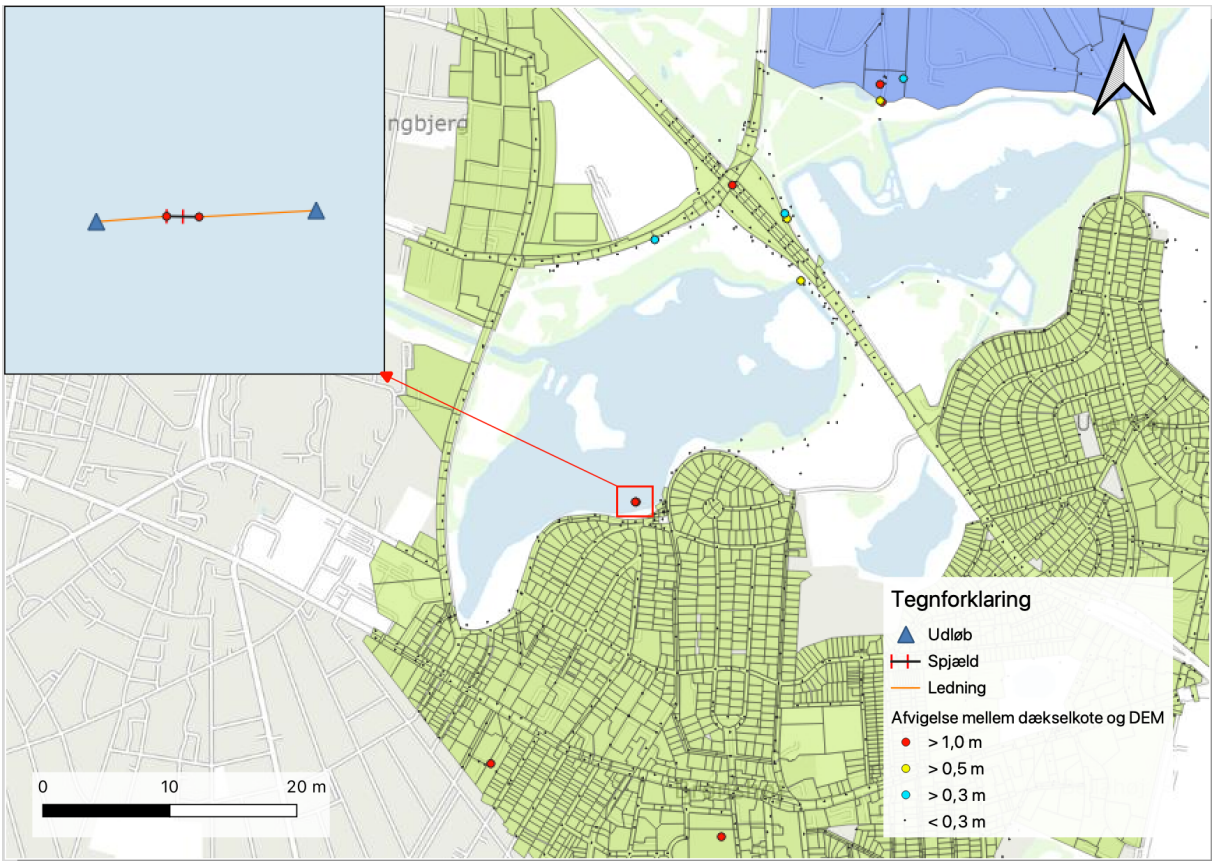
Af Figur A.1 fremgår det, hvilke brønde, der har en dækselkote, som overgår de tre valgte værdier i forhold til DEM'en, som er vist i Tabel A.1.



Figur A.1. Markering af brønde i Mike Urban modellen, hvor der er en afvigelse på mere end en meter mellem brøndenes terrænkoter og en Digital Elevation Model udarbejdet af Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur [2022].

Som det kan ses på Figur A.1, så er størstedelen af de dækselkoter, der overskrider DEM'en, lokaliseret i den nordlige del af projektområdet, hvilket er den del som er simplificeret. Der er i alt 95 brønde ud af de 105 brønde, som har en afvigelse på mere end 0,3 meter, som er lokaliseret i det nordlige område, hvor der i alt er 464 brønde. Dette svarer til, at cirka 23% af brøndene har en afvigelse på mere end 0,3 meter mellem dækselkote og DEM'en.

I MIKE Urban modellen er der placeret to brønde i Utterslev Mose, som er separeret fra system, hvilket kan ses på Figur A.2. Disse benyttes i forbindelse med 'Real time Control' i modellen, som bruges til at kontrollere åbning og lukning af spjæld i modellen. Derfor vil de to brønde, vist på figuren, ikke være repræsentative.



Figur A.2. Illustration af brønde separeret fra projektområdets ledningssytem, som har forbindelse via spjældfunktion i Mike Urban. Spjældfunktionen styrer mængden af vand, der kan transporteres igennem et ledningnstværsnit ved at sænke og hæve et fiktivt spjæld.

Det vælges ikke at ændre på dækselkoterne for brøndene i det sydlige opland med en høj detaljeringsgrad, da det altid vil være en relativ forskel og derfor samme fejl for alle simuleringer. Ydermere er det få brønde, hvor der er en afvigelse, hvilket vurderes ikke at have betydning for helheden af det sydlige opland i forhold til det nordlige opland, hvor der er relativt mange brønde med afvigelse.

B Udregning af biasfaktor

B.1 Z-R-relation

Z-R-relationen fremgår af Ligning (B.1).

$$Z = A \cdot R^B \tag{B.1}$$

Hvor:

Z	Reflektans [dBZ]
R	Regnintensitet [mm t^{-1}]
A og B	Konstanter [-]

B.2 Bestemmelse af biasfaktor

Udregningen af biasfaktorer sker jævnfør Thorndahl et al. [2014] ud fra Ligning (B.2):

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

Hvor:

$B(\tau + \Delta t)$	Bias i tidsintegrationsperioden, $\Delta\ \tau$ [-]
G	Regnmålerintensitet [mm/tidsstep]
R	Intensitet for radar [mm/tidsstep]
N	Total antal radar-regnmåler par [-]
Δt_g	Tidsstep for regnmåler observationer [tidsstep]
Δt_r	Tidsstep for radarobsvervationer [tidsstep]

På baggrund af Ligning (B.2) kan de gennemsnitlige biaskorrigerede radarregnintensiteter beregnes ved brug af Ligning (B.3), som også er angivet i Thorndahl et al. [2014]:

$$\mathrm{R}_{MFB}(\mathrm{x,y,t}) = B(t) \cdot \mathrm{R(x,y,t)} \tag{B.3}$$

Hvor:

x,y	Indikerer en specifik radarpixel placering [-]
B(t)	Tidsskridtfunktion af bias med et tidsskridt svarende til integrationstiden, $\Delta\ \tau$ [-]

C Udfald i regnmålere

Af Tabel C.1 fremgår en samlet varighed for udfaldet i SVK-målerne, i den undersøgte periode fra d. 16/01-2008 til 18/09-2022. Desuden fremgår en korrektionsfaktor, som vil blive benyttet til at korrigere SVK-data i mod det antal dage, hvor der har været udfald. Det antages, at regnen er spredt ud over perioden homogent, hvorfor der ikke tages højde for hvornår på året der har været udfald. Derimod regnes SVK-målernes regnmængde om til en korrigeret værdi tilsvarende en regnmængde uden downtime, ud fra Ligning (C.1).

$$\text{Korrigeret SVK-regnmængde} = \text{SVK-regnmængde} \cdot \frac{\text{Total måletid}}{\text{Total måletid - udfald}} \tag{C.1}$$

Tabel C.1. Oversigt over måletid for SVK-målere og radar samt udfald for SVK-målere. Ud fra disse tider og Ligning (C.1) er der beregnet korrektionsfaktorer. [Sarup, 2018]

Stationsnavn	SVK ID	Samlet udfald	Samlet indsamling	Korrigeringsfaktor
Gladsaxe Vibevænget	5645	0 dage	5.359 dage	1,000
Brogårdsbassin	5655	210 dage	5.149 dage	1,041
Fuglegården	5660	13 dage	5.346 dage	1,002
Hellerup Kirkegård	5690	44 dage	5.315 dage	1,008
Søborg Vandværk	5694	22 dage	5.337 dage	1,004
Gladsaxe Stavnsbjerg Alle	5699	10 dage	5.349 dage	1,002
Åvendingen	5705	410 dage	4.949 dage	1,083
Lygten	5725	119 dage	5.240 dage	1,023
Stevns radar, EKXS	-	0 dage	5.359 dage	-

D Udregning af statistiske parametre

Herunder fremgår ligningerne brugt til udregning af NSE, MAE og procentvis afvigelse, samt biasfaktor mellem to datasæt.

NSE-værdien beskriver hvor godt det modellerede datasæt passer overens med det observerede data:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{n-1}^{N}(O_n - M_n)^2}{\sum_{n-1}^{N}(O_n - \overline{O})^2} \tag{D.1}$$

Hvor:

O_n	Observeret data til døgn, n [mm]
M_n	Modelleret data til døgn, n [mm]
$\overline{O}$	Middelværdi af observeret data [mm]

MAE beskriver den gennemsnitlige afvigelse imellem det modellerede- og observerede datasæt og beregnes ud fra Ligning (D.2).

$$\text{MAE} = \frac{1}{N}\sum_{n-1}^{N}|O_n - M_n| \tag{D.2}$$

Hvor:

MAE	Mean Absolute Error [mm]

Den procentvise afvigelse regnes i forhold til det observerede datasæt, ligesom NSE.

$$\text{A} = \frac{1}{N}\sum_{n-1}^{N}\left(\frac{\text{abs}(O_n - M_n)}{O_n}\right) \cdot 100 \tag{D.3}$$

Hvor:

A	Afvigelse i datasættet [%]

Biasfaktor for datasæt beregnes således:

$$\mathrm{Bf} = \frac{\sum(M_n)}{\sum(O_n)} \tag{D.4}$$

Hvor:

Bf	Datasættets bias [-]

E Sammenligning af nedbørsdata

E.1 Undersøgelse af akkumuleret regn i SVK-målere og radar

Dette afsnit indeholder de forskellige sammenligninger der er foretaget imellem akkumuleret radarregn, samt forskellige regnmålerserier:

Alle regn målt (ugodkendt)

Af Tabel E.1 ses en sammenligning mellem regnmængden i SVK-målere og dertilhørende radarpixels. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, som beskrevet i Afsnit 4.2.

Tabel E.1. Sammenligning mellem regnmængden, der er faldet i en radarpixel, i forhold til SVK-målere samme sted. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til d. 18/09-2022.

SVK-måler/pixel	Akk. Radarregn [mm]	Akk. Regnmåler regn [mm]	Afvigelse [%]
5645 / P13	6.048	9.851	62,9
5655 / P126	5.957	9.734	63,4
5660 / P137	6.074	9.273	52,7
5690 / P177	6.198	9.212	48,6
5694 / P120	6.100	10.008	64,1
5699 / P6	6.097	9.209	51,0
5705 / P16	6.088	9.223	51,5
5725 / P143	6.309	9.584	51,9
Gennemsnit	6.112	9.512	55,8

Af Tabel E.1 fremgår det, at regnmålerne måler markant mere regn henover perioden. Dette antages primært at være grundet brugen af det allerede biaskorrigerede radardata, hvori der kun er medtaget godkendte hændelser, og derfor ikke alt målt regndata i perioden som i regnmålerne. Derfor undersøges det hvilket forhold der er imellem radardataet og SVK-målerne, hvis der kun medtages de godkendte hændelser i SVK-datasættet. Det godkendte SVK-datasæt kan findes på deres hjemmeside, hvor udvælgelsesprocessen er foretaget af den officielle instans. [DMI, 2023]

Alle regn målt (godkendt)

Som tidligere beskrevet har nogle af regnmålerne dog haft nedbrud i perioden, hvorfor der er foretaget en korrigering af dataet ud fra Tabel C.1 på side 93. Sammenligningen mellem radardata og de korrigerede SVK-data kan ses i Tabel E.2.

Tabel E.2. Sammenligning imellem regnmængde der er faldet i en radarpixel i forhold til SVK-måler samme sted, kun medtaget godkendt data fra SVK-måleren. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til d. 18/09-2022.

SVK-måler/pixel	Akk. Radarregn [mm]	Akk. Godkendt Regnmålerregn [mm]	Afvigelse [%]
5645 / P13	6.048	8.033	32,8
5655 / P126	5.957	7.782	30,6
*5660 / P137	6.074	6.648	9,5
*5690 / P177	6.198	6.659	7,4
5694 / P120	6.100	8.331	36,6
5699 / P6	6.118	7.567	23,7
5705 / P16	6.088	6.995	14,9
5725 / P143	6.309	7.602	20,5
Gennemsnit	5.990	6.073	22,0

* Ingen godkendte hændelser fra 15/01/2008 til 01/05/2008.

Af ovenstående tabel fremgår der stadig en relativ stor afvigelse imellem registreret regnmålerdata i forhold til radardataet. Det antages, at udvælgelsen i radardataet, hvor der kun er medtaget udvalgte døgn, har været årsagen til den relativt store afvigelse. Denne udvælgelsesproces har regnmålerne ikke været udsat for.

Samme dages regn (godkendt)

I forhold til at sammenholde radarregnen og SVK-regndataet senere, undersøges det også hvor godt de to passer overens hvis der kun sammenlignes regndata fra de døgn hvor der er radardata. Det er stadig det godkendte SVK-regnmålerdatasæt, der anvendes. Denne sammenligning er angivet i Tabel E.3.

Tabel E.3. Sammenligning imellem regnmængde der er faldet i en radarpixel i forhold til SVK-måler samme sted, kun medtaget godkendt data fra SVK-måleren på samme dage som der er radardata. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til d. 18/09-2022.

SVK-måler/pixel	Akk. Radarregn [mm]	Akk. Tilrettet Regnmålerregn [mm]	Afvigelse [%]
5645 / P13	6.048	4.924	-18,6
5655 / P126	5.956	4.834	-18,8
*5660 / P137	6.074	4.394	-27,7
*5690 / P177	6.198	4.276	-31,0
5694 / P120	6.100	5.053	-17,2
5699 / P6	6.097	4.610	-24,4
5705 / P16	6.088	4.309	-29,2
5725 / P143	6.309	4.696	-25,6
Gennemsnit	6.109	4.637	-24,1

* Ingen godkendte hændelser fra 15/01-2008 til 01/05-2008.

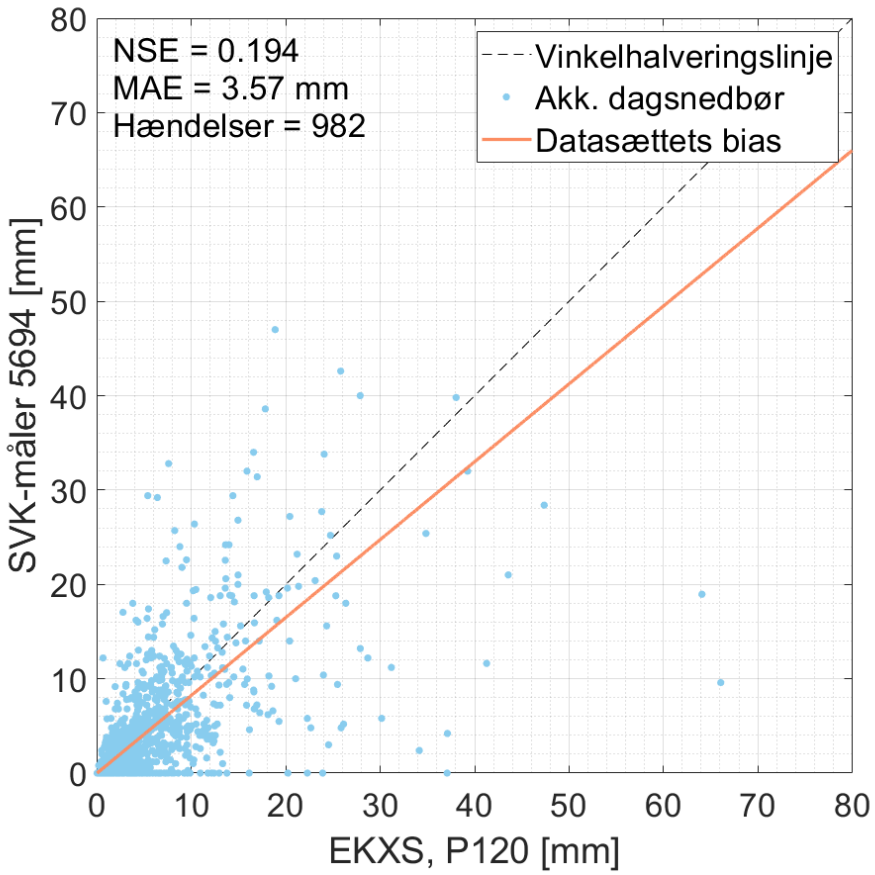
Ud fra sammenligningen imellem radardata og regnmålerdata på de dage hvor der er opgivet radardata, fremgår det, at regnmålerne måler en del mindre regn end den tilsvarende radarpixel.

Dette kan skyldes radarens biaskorrigering eller, at regnmålerne ikke måler alt det regn, der falder grundet en uoptimal placering af regnmålerne.

E.2 Døgnsammenligning mellem SVK-målere og radar

Original biaskorrigering

Af Figur E.1 fremgår et scatterplot for den akkumulerede døgnnedbør for alle hændelser, som også er medtaget i Tabel E.2, for SVK-måler 5694 og den tilhørende radarpixel, P120. Op ad y-aksen fremgår data fra SVK-målere og henad x-aksen fremgår radardata.



Figur E.1. Scatterplot for akkumuleret dagsnedbør målt i SVK-måler 5694 i forhold til radardata i radarpixel nummer P120. Af figuren fremgår NSE-værdien, MAE-værdien, antallet af hændelser samt datasættets bias.

Af ovenstående figur fremgår det, at der er en forholdsvis stor spredning i datasættet mellem de enkelte værdier for dagsnedbøren, hvilket også fremgår af NSE-værdien på 0,264. Den resulterende MAE-værdi på 3,57 mm kan give anledning til problemer ved små regnhændelser, hvor 3,57 mm svarer til en stor afvigelse. Dette vurderes dog ikke at være situationen her, hvor der generelt for de små hændelser er en lille afvigelse, og en stor afvigelse ved de større hændelser.

Af Figuren kan det ses, at datapunkterne er mest koncentreret over vinkelhalveringslinjen, hvilket skyldes, at EKXS generelt måler mere regn i radarpixel P120 i forhold til SVK-måler 5694. Dette

er generelt for alle SVK-målere i forhold til de pågældende radarpixel.
Der er udregnet en NSE- og MAE-værdier for alle SVK-målere i forhold til den pågældende radarpixel. Disse fremgår sammen med antallet af hændelser af Tabel E.4.

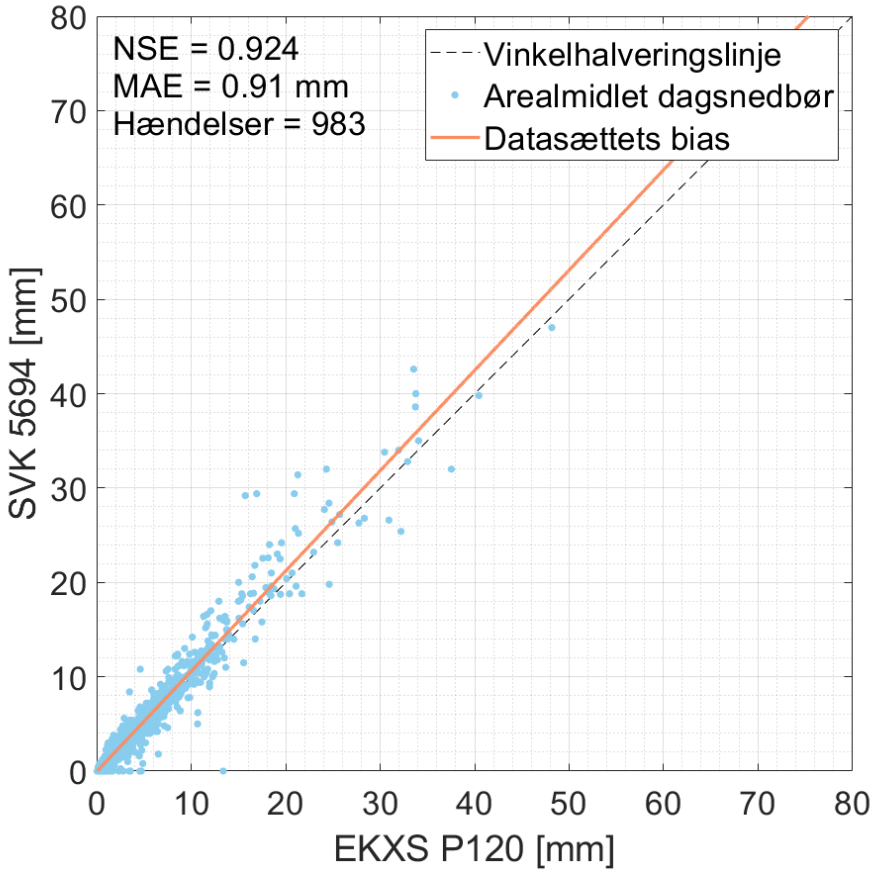
Tabel E.4. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser samt datasættets bias, for den akkumuleret dagsnedbøren for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels.

SVK / Pixel	**NSE [-]**	**MAE [mm]**	**Hændelser [antal]**	**Bias [-]**
5645 / P13	0,267	3,46	982	0,81
5655 / P126	0,190	3,63	982	0,78
5660 / P137	0,049	3,83	982	0,73
5690 / P177	0,051	3,82	982	0,69
5694 / P120	0,194	3,57	982	0,82
5699 / P6	0,319	3,34	982	0,75
5705 / P16	0,108	3,79	982	0,65
5725 / P143	0,203	3,68	982	0,73
Gennemsnit	0,173	3,63	982	0,75

Som det fremgår af ovenstående tabel, er der en stor variation i NSE-værdierne afhængigt af hvilken SVK-måler og radarpixel, der kigges på, hvilket resulterer i en gennemsnitlig NSE-værdi på 0,157 og dermed en generel spredning af dataene. Ydermere ses der en stigende spredning, jo længere væk fra origo der betragtes, hvilket formegentligt svarer til regnhændelser med stigende gentagelsesperioder.

E.2.1 Lokal biaskorrigering

Af Figur E.2 fremgår et scatterplot over sammenligningen mellem SVK 5694 og radarpixel P120 med den nye biaskorrigering. Af Tabel E.5 fremgår en sammenligning mellem regnmængden i de udvalgte SVK-målere og de dertilhørende radarpixels.



Figur E.2. Plot for akkumuleret dagsnedbør målt i SVK-måler 5694 i forhold til radarpixel P120.

Tabel E.5. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser samt datasættets bias for den akkumulerede dagsnedbør for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels.

SVK / Pixel	**NSE [-]**	**MAE [mm]**	**Hændelser [antal]**	**Bias [-]**
5645 / P13	0,879	1,17	982	1,10
5655 / P126	0,905	1,06	982	1,07
5660 / P137	0,918	0,94	982	1,02
5690 / P177	0,852	1,19	982	0,92
5694 / P120	0,924	0,91	982	1,06
5699 / P6	0,911	1,00	982	1,00
5705 / P16	0,710	1,38	982	0,91
5725 / P143	0,876	1,18	982	0,96
Gennemsnit	0,872	1,10	982	1,01

Som det fremgår af ovenstående figur og tabel ses det, at der er en væsentligt forbedring af sammenhængen mellem SVK-målerne og dertilhørende radarpixels. syv ud af otte NSE-værdier er kommet over 0,8 og den gennemsnitlige NSE-værdi for alle sammenligninger er på 0,872. For MAE ses der også en væsentligt forbedring, og alle afvigelserne mellem SVK-målerne og radaren er gennemsnitligt 1,10 mm. Betragtes plottet på Figur E.2 ses det også, at datapunkterne ligger

fint fordelt omkring vinkelhalveringslinjen, og der er næsten ikke nogle punkter, hvor der er målt væsentligt mere eller mindre i enten radar eller SVK-måler.

E.3 Effekt af lokal bias på akkumuleret nedbør over hele perioden

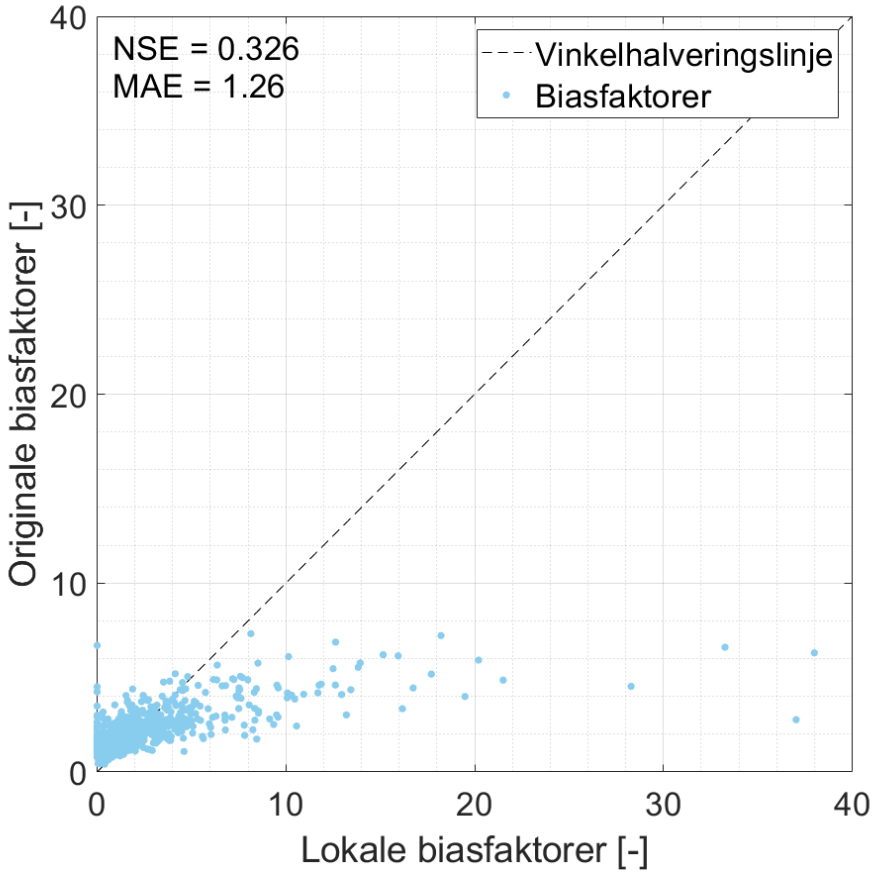
Det vil undersøges hvilken effekt det har haft på den totale regnmængde, der forekommer over perioden. Idet den lokale biaskorrigering er bestemt ud fra den originale regnserie og ikke den downtime-korrigerede, fremgår der på tabel E.6 en sammenligning med regnmængderne uden en downtime korrigering.

Tabel E.6. Sammenligning imellem den faldne regnmængde i SVK-måler og tilsvarende lokaltbiaskorrigerede radarpixel, kun medtaget redigeret data fra SVK-måleren på samme dage som der er radardata. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til d. 18/09-2022.

SVK-måler/pixel	**Akk. Radarregn [mm]**	**Akk. Tilrettet Regnmålerregn [mm]**	**Afvigelse [%]**
5645 / P13	5.099	5.611	10,0
5655 / P126	5.154	5.320	3,2
5660 / P137	5.270	5.370	1,9
5690 / P177	5.440	5.027	-7,6
5694 / P120	5.275	5.600	6,2
5699 / P6	5.169	5.173	0,1
5705 / P16	5.196	4.714	-9,3
5725 / P143	5.441	5.226	-4,0
Gennemsnit	5.255	5.255	0,07

F Lokal biaskorrigering

Af Figur F.1 fremgår et scatterplot, hvor de originale biasfaktorer er plottet mod de lokale biasfaktorer.



Figur F.1. Scatterplot af de originale- og de lokaltkorrigerede biasfaktorer.

Af ovenstående figur ses det, at der er en dårlig sammenhæng mellem de originale og de lokale biasfaktorer. Det kan ses, at ved hændelserne, hvor den originale biasfaktor er i intervallet 0-2 er der generelt fundet en lavere lokal biasfaktor. Det fremgår også, at ved hændelser med faktorer større end 3 vil de lokale biasfaktorer generelt blive højere end de originale. Dette stemmer overens med Figur 5.4, hvor det kan ses, at de originale biasfaktorer altid er mindre end 7.

G Resultattabeller- og figurer for regnintensitet

G.1 Tabelværdier for maksimal intensitetsværdier

Tabel G.1. NSE- og MAE-værdier samt procentvis afvigelse for den maksimale 1 minutters regnintensitet for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels. Ligeledes fremgår datasættets bias. Hændelser med 0 mm/min i enten radar eller regnmålere er frasorteret.

SVK / Pixel	NSE [-]	MAE [mm]	Hændelser [antal]	Afvigelse [%]	Data Bias [-]
5645 / P13	0,337	0,22	887	421	2,13
5655 / P126	0,382	0,20	843	366	2,01
5660 / P137	0,410	0,19	858	324	1,92
5690 / P177	0,402	0,21	839	400	1,92
5694 / P120	0,389	0,22	861	344	2,07
5699 / P6	0,281	0,21	880	441	2,03
5705 / P16	0,316	0,19	806	470	2,04
5725 / P143	0,348	0,21	856	443	1,83
Gennemsnit	0,387	0,21	854	388	1,99

Tabel G.2. NSE- og MAE-værdier samt procentvis afvigelse for den maksimale 10 minutters regnintensitet for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels. Ligeledes fremgår datasættets bias. Hændelser med 0 mm/10. minut i enten radar eller regnmålere er frasorteret.

SVK / Pixel	NSE [-]	MAE [mm]	Hændelser [antal]	Afvigelse [%]	Data Bias [-]
5645 / P13	0,487	0,68	887	141	1,55
5655 / P126	0,549	0,61	843	115	1,47
5660 / P137	0,583	0,59	858	106	1,44
5690 / P177	0,520	0,61	839	111	1,31
5694 / P120	0,606	0,63	861	117	1,52
5699 / P6	0,490	0,61	880	133	1,43
5705 / P16	0,535	0,56	806	140	1,44
5725 / P143	0,577	0,60	856	149	1,38
Gennemsnit	0,549	0,61	854	118	1,44

Tabel G.3. NSE- og MAE-værdier samt procentvis afvigelse for den maksimale timeintensitet for alle godkendte regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels. Ligeledes fremgår datasættets bias. Hændelser med 0 mm/time i enten radar eller regnmålere er frasorteret.

SVK / Pixel	**NSE [-]**	**MAE [mm]**	**Hændelser [antal]**	**Afvigelse [%]**	**Data Bias [-]**
5645 / P13	0,660	1,10	887	89	1,32
5655 / P126	0,737	1,00	843	68	1,25
5660 / P137	0,784	0,93	858	64	1,22
5690 / P177	0,717	0,96	839	63	1,13
5694 / P120	0,788	0,94	861	66	1,27
5699 / P6	0,739	0,93	880	84	1,24
5705 / P16	0,720	0,85	806	80	1,23
5725 / P143	0,694	0,98	856	84	1,20
Gennemsnit	0,734	0,96	855	73	1,23

H Analyse af ekstremhændelser

H.1 DTU Rainanalyst

DTU Rainanalyst kan bruges til at bestemme f-værdier. Denne parameter beskriver, hvor godt den regnserie, der analyseres, passer overens med regionalmodellen. F-værdien er en korrektionsfaktor, som kan anvendes til at tilpasse en given regnserie, så den passer med regionalmodellen. En f-værdi på 1 betyder, ligesom en u-værdi på 0, et perfekt match mellem en given regnserie og regionalmodllen, og der er ikke behov for at korrigere serien. Hvis der observeres en f-værdi >1 vil der være mindre ekstreme regnhændelser i regnserien end i regionalmodellen og omvendt for f-værdier <1. Af Tabel H.1 fremgår f-værdier for de otte regnmålere ud fra en 1-års gentagelsesperiode.

Tabel H.1. F-værdier for de otte SVK-målere i- og omkring projektområdet lavet ved hjælp af DTU Rainanalyst. Der er undersøgt for perioden 16/01-2008 til d. 18/09-2022.

SVK-ID	**Varighed [min]**											**Gns.**
	1	2	5	10	30	60	180	360	720	1440	2880	
5645	0,93	0,92	0,87	0,86	0,84	0,84	0,97	1,04	1,01	1,02	1,01	0,94
5655	0,89	0,90	0,85	0,84	0,85	0,86	0,91	0,88	0,93	0,98	0,96	0,90
5660	0,95	0,93	0,93	0,86	0,86	0,88	0,86	0,91	0,87	0,93	0,94	0,90
5690	0,90	0,86	0,90	0,87	0,86	0,86	0,93	0,98	0,99	1,00	1,05	0,93
5694	0,88	0,91	0,88	0,86	0,81	0,84	0,89	0,91	0,91	0,93	0,98	0,89
5699	0,97	0,94	0,93	0,94	0,96	0,94	1,09	1,06	1,05	1,06	1,11	1,00
5705	1,07	1,08	1,06	1,06	1,05	1,12	1,09	1,08	1,01	1,00	1,04	1,06
5725	0,89	0,91	0,88	0,87	0,88	0,88	0,96	0,94	0,94	0,95	0,97	0,92

Når DTU Rainanalyst bestemmer gentagelsesperioder alle regnseriens hændelser gøres dette ud fra Ligning (H.1) [Mikkelsen et al., 1999].

$$T = \frac{t}{R} \tag{H.1}$$

Hvor:

T	Gentagelsesperiode [år]
t	Længden af hele regnserien [år]
R	Rangeringen af en given hændelse [-]

H.2 Ekstremhændelser

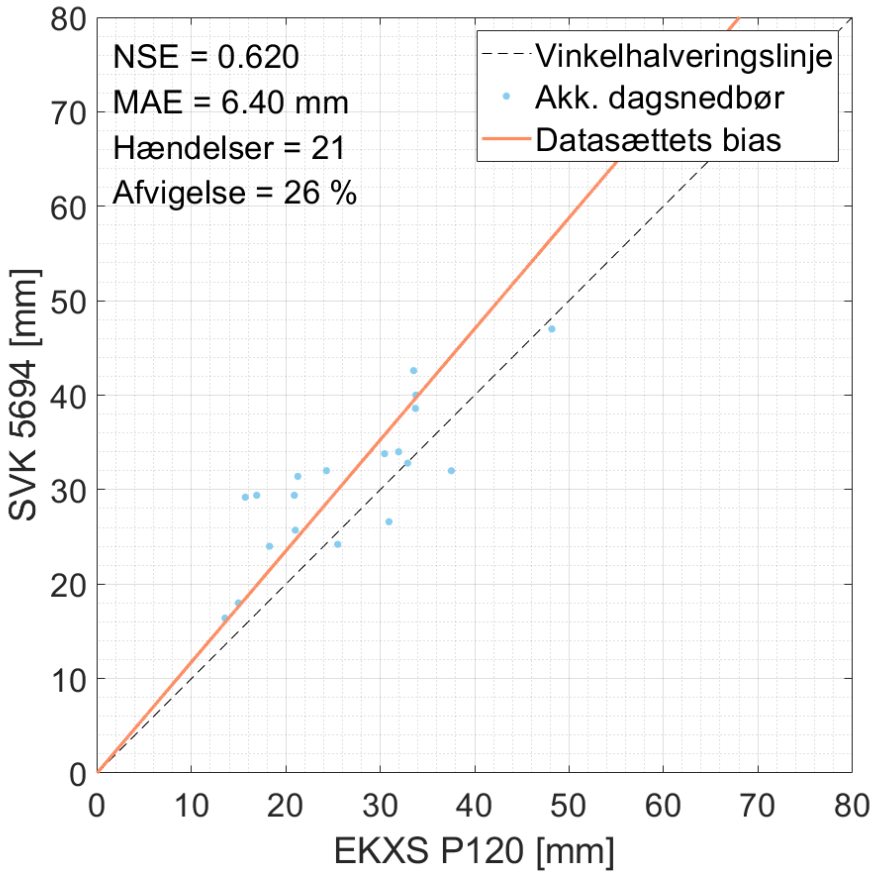
Tabel H.2. Regnhændelserne med en gentagelsesperiode større end eller lig 1 år fundet ved DTU Rainanalyst ud fra SVK-måler 5694. Regnhændelserne er bestemt ud fra varigheder på 60, 180 og 360 minutter samt den samlede regndybde af hændelsen.

Hændelsesdato
20/05-2009
07/06-2010
14/08-2010
02/07-2011
14/07-2011
14/08-2011
08/08-2014
31/08-2014
04/09-2015
21/11-2015
16/06-2016
10/07-2016
02/08-2016
22/06-2017
14/07-2017
23/07-2017
09/09-2017
17/09-2017
28/07-2019
11/10-2019
25/09-2020

I Akkumuleret dagsnedbør i ekstremhændelser

I dette afsnit analyseres den akkumulerede daglige nedbør målt i SVK-målerne og tilhørende radarpixels. Dette gøres for de 21 regnhændelser.

Af Figur I.1 fremgår et scatterplot for den akkumulerede dagsnedbør for de 21 største regnhændelser målt med SVK-måler 5694 og i radarpixel P120.



Figur I.1. Scatterplot af akkumuleret dagsnedbør over projektområdet målt i SVK-måler 5694 i forhold til radarpixel P120 for de 21 største regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022. SVK-måleren er op ad y-aksen i forhold til EKXS henad x-aksen. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

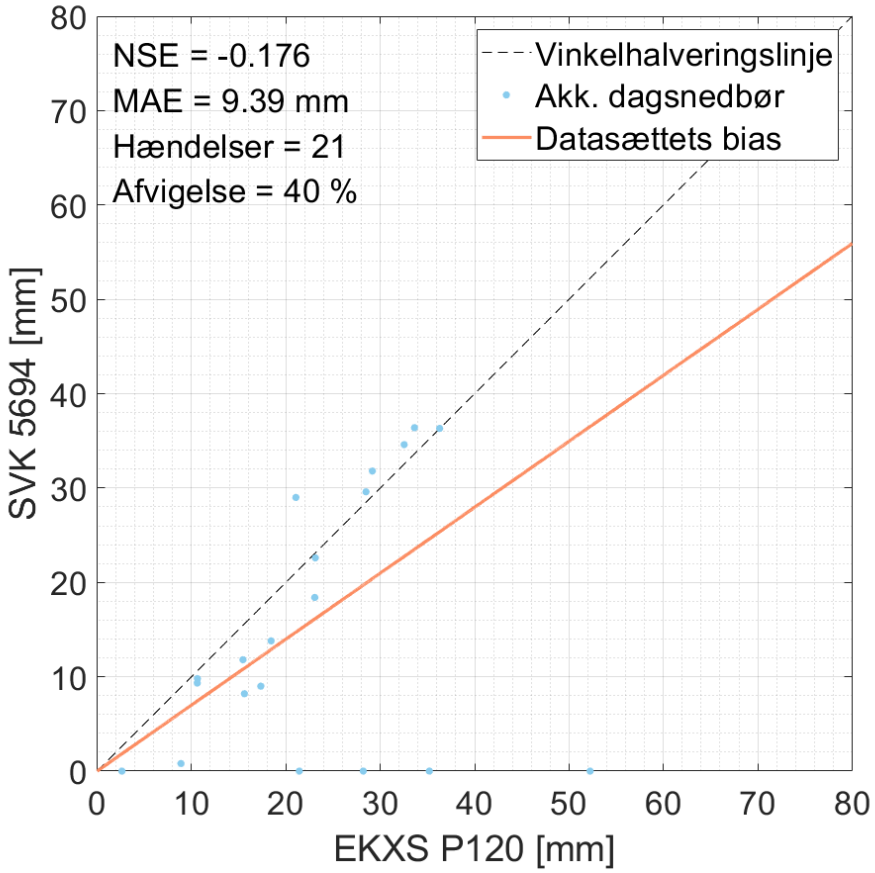
Af ovenstående scatterplot ses det, at der forekommer en forholdsvis god sammenhæng mellem akkumuleret dagsnedbør for de 21 regnhændelser mellem radaren og SVK-måler 5694 via NSE-værdien. Der forekommer dog stadig markant flere hændelser med mest målt regn i regnmåleren, hvilket også fremgår af bias der hælder markant mere imod regnmåleren.

Data for de resterende regnmåler/radarpixel par kan findes Tabel I.1.

Tabel I.1. NSE-værdier, MAE-værdier, antallet af hændelser, den procentvise afvigelse samt datasættets bias, for den akkumulerede dagsnedbør for de 21 største regnhændelser i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022 målt i SVK-målere og tilhørende radarpixels.

SVK / Pixel	**NSE [-]**	**MAE [mm]**	**Afvigelse [%]**	**Datasættets bias [-]**
5645 / P13	0,851	4,87	48	1,06
5655 / P126	0,805	4,97	18	1,05
5660 / P137	0,851	4,46	13	1,13
5690 / P177	0,405	7,82	34	0,89
5694 / P120	0,620	6,40	19	1,18
5699 / P6	0,888	4,07	34	1,00
5705 / P16	-0,176	9,39	85	0,70
5725 / P143	0,540	7,27	30	0,98
Gennemsnit	0,598	6,16	35	1,00

Det fremgår af ovenstående tabel, at der er en forholdsvis god sammenhæng mellem den akkumulerede daglige nedbør målt i regnmålerne og de respektive radarpixels for de 21 regnhændelser. Det fremgår dog, at der forekommer en lille NSE-værdi samt stor afvigelse mellem SVK-måler 5705 og radarpixel P16. Scatterplottet for denne fremgår af Figur I.2.



Figur I.2. Plot for akkumuleret dagsnedbør målt i SVK-måler 5705 i forhold til radarpixel P16 for de 21 største regnhændelser i perioden 16/01-2008 til og med 18/09-2022. Af figuren fremgår NSE- og MAE-værdier, antal hændelser, gennemsnitlig afvigelse mellem datapunkter samt bias mellem datasæt.

Som det kan ses af ovenstående figur, er der for fem af de 21 regnhændelser registreret 0 mm nedbør i SVK-måleren. Dette skyldes blandt andet, at tre af regnhændelserne er fra 2011, hvor måleren har været ude af drift det meste af året, som det kan ses af Figur 4.5 på side 18.
Grundet disse 0-værdier fra SVK-måleren ses datasættets bias at hælde væsentligt mod radardataet.

J Resultattabeller for tidslig variation

J.1 Tidslig variation i vandføring i forhold til radar

J.1.1 Udløbsvandføring

Tabel J.1. R^2-værdier for udløbsvandføringer fra modellen for de 21 største regnhæmndelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller højere for regnmålerresultater i forhold til radarresultater. Det er for perioden 2008 til og med 2022. Enheder er angivet i [-].

Dato	1RM	3RM	5RM	8RM
20/05-2009	0,83	0,80	0,90	0,89
07/06-2010	0,86	0,75	0,85	0,87
14/08-2010	0,90	0,90	0,90	0,90
02/07-2011	0,71	0,76	0,76	0,77
14/07-2011	0,92	0,92	0,90	0,88
08/08-2014	0,60	0,79	0,77	0,74
14/08-2011	0,86	0,86	0,86	0,86
31/08-2014	0,87	0,09	0,17	0,43
04/09-2015	0,77	0,64	0,64	0,69
21/11-2015	0,96	0,94	0,95	0,96
16/06-2016	0,88	0,95	0,93	0,97
10/07-2016	0,69	0,65	0,69	0,68
02/08-2016	0,75	0,77	0,90	0,91
22/06-2017	0,94	0,89	0,90	0,92
14/07-2017	0,95	0,82	0,87	0,90
23/07-2017	0,98	0,93	0,93	0,96
09/09-2017	0,90	0,91	0,88	0,91
17/09-2017	0,64	0,84	0,82	0,79
28/07-2019	0,93	0,93	0,97	0,97
11/10-2019	0,23	0,21	0,21	0,19
25/09-2020	0,94	0,93	0,93	0,93
Gennemsnit	0,81	0,78	0,80	0,82

J.1.2 Overløbsvandføring

Tabel J.2. R^2-værdier for overløbsvandføring ved udløbet af modellen for de 21 største regnhæmndelser med en gentagelsesperiode på 1 år eller højere for regnmålerresultater i forhold til radarresultater. Det er for perioden 2008 til og med 2022. Enheder er angivet i [-].

Dato	**1RM**	**3RM**	**5RM**	**8RM**
25/09-2020	0,94	0,93	0,93	0,93
11/10-2019	0,23	0,21	0,21	0,19
28/07-2019	0,93	0,93	0,97	0,97
17/09-2017	0,64	0,84	0,82	0,79
09/09-2017	0,90	0,91	0,88	0,91
23/07-2017	0,98	0,93	0,93	0,96
14/07-2017	0,95	0,82	0,87	0,90
22/06-2017	0,94	0,89	0,90	0,92
02/08-2016	0,75	0,77	0,90	0,91
10/07-2016	0,69	0,65	0,69	0,68
16/06-2016	0,88	0,95	0,93	0,97
21/11-2015	0,96	0,94	0,95	0,96
04/09-2015	0,77	0,64	0,64	0,69
31/08-2014	0,87	0,09	0,17	0,43
08/08-2014	0,6	0,79	0,77	0,74
14/08-2011	0,86	0,86	0,86	0,86
14/07-2011	0,92	0,92	0,90	0,88
02/07-2011	0,71	0,76	0,76	0,77
14/08-2010	0,90	0,90	0,90	0,90
07/06-2010	0,86	0,75	0,85	0,87
20/05-2009	0,83	0,80	0,90	0,89
Gennemsnit	0,81	0,78	0,80	0,82

J.2 Tidslig variation i vandføring i forhold til radar

Tabel J.3. Udløb ift. 8 RM

Dato	1 regnmåler	3 regnmålere	5 regnmålere
20/05-2009	0,92	0,94	0,99
07/06-2010	0,91	0,85	0,97
14/08-2010	1,00	1,00	1,00
02/07-2011	0,93	0,84	1,00
14/07-2011	0,97	0,97	1,00
14/08-2011	1,00	1,00	1,00
08/08-2014	0,99	1,00	1,00
31/08-2014	0,77	0,97	0,99
04/09-2015	0,98	0,96	0,97
21/11-2015	1,00	1,00	1,00
16/06-2016	0,98	0,97	0,98
10/07-2016	0,97	0,99	0,98
02/08-2016	0,73	0,95	0,94
22/06-2017	0,99	1,00	1,00
14/07-2017	1,00	1,00	1,00
23/07-2017	1,00	1,00	1,00
09/09-2017	1,00	1,00	1,00
17/09-2017	0,92	0,98	0,99
28/07-2019	0,93	0,97	1,00
11/10-2019	0,99	0,99	1,00
25/09-2020	1,00	1,00	1,00
Gennemsnit	0,95	0,97	0,99

Tabel J.4. Overløb ift. 8 RM

Dato	**1 regnmåler**	**3 regnmålere**	**5 regnmålere**
20/05-2009	0,96	0,96	0,99
07/06-2010	0,96	0,81	0,97
14/08-2010	0,99	1,00	1,00
02/07-2011	0,90	0,84	0,97
14/07-2011	0,99	0,97	0,98
14/08-2011	0,99	1,00	1,00
08/08-2014	0,88	0,97	0,98
31/08-2014	0,58	0,77	0,87
04/09-2015	0,89	0,89	0,91
21/11-2015	1,00	0,99	1,00
16/06-2016	0,91	0,99	0,97
10/07-2016	0,98	0,98	0,98
02/08-2016	0,84	0,90	0,97
22/06-2017	0,98	0,96	0,97
14/07-2017	0,98	0,97	0,99
23/07-2017	0,99	0,99	0,99
09/09-2017	0,99	0,98	0,99
17/09-2017	0,89	0,97	0,97
28/07-2019	0,96	0,96	1,00
11/10-2019	0,99	0,99	0,99
25/09-2020	0,98	1,00	1,00
Gennemsnit	0,94	0,95	0,98

K Summeret nedbør for ekstremhændelser

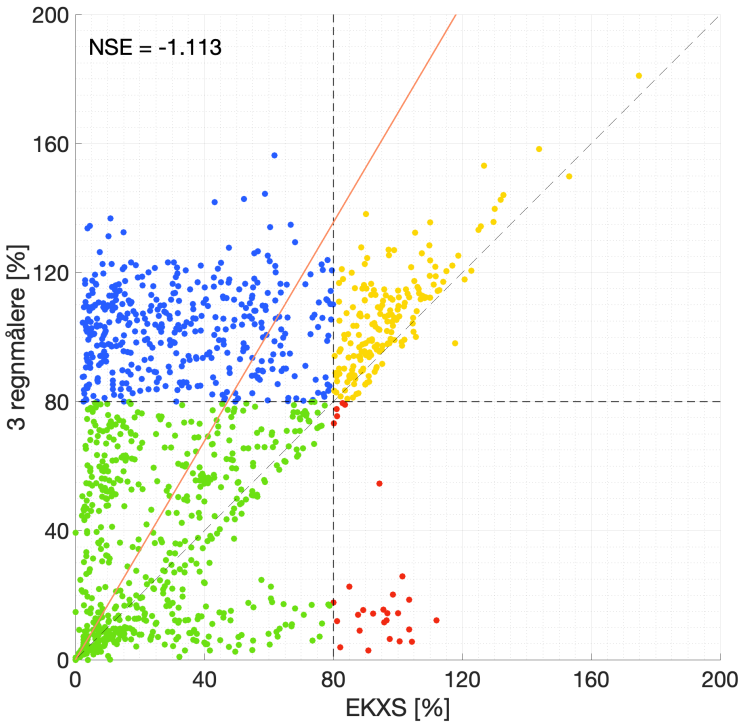
Tabel K.1. Oversigt over akkumuleret nedbør i de otte udvalgte regnmålere. Alle værdier er angivet i millimeter.

Dato	**5645**	**5655**	**5660**	**5690**	**5694**	**5699**	**5705**	**5725**
20/05-2009	8	11	11	18	16	11	12	21
07/06-2010	30	31	28	0	31	28	0	29
14/08-2010	66	69	73	80	74	58	72	80
02/07-2011	51	55	61	11	72	48	0*	106
14/07-2011	42	33	32	27	34	35	0*	35
14/08-2011	35	38	39	34	43	32	0*	43
08/08-2014	11	11	17	15	29	15	10	18
31/08-2014	27	44	55	83	47	25	36	45
04/09-2015	19	27	41	44	34	23	14	26
21/11-2015	35	34	35	24	27	33	36	32
16/06-2016	26	29	38	37	40	28	29	37
10/07-2016	30	28	30	21	24	24	23	18
02/08-2016	3	3	9	17	18	15	8	3
22/06-2017	31	24	35	24	26	7	9	12
14/07-2017	0	32	41	23	29	0	0	26
23/07-2017	32	30	31	26	33	31	30	34
09/09-2017	16	26	31	26	32	16	18	26
17/09-2017	2	33	30	35	29	0	1	23
28/07-2019	17	19	19	27	24	19	9	12
11/10-2019	32	36	36	33	39	32	35	32
25/09-2020	42	36	36	35	32	36	32	31

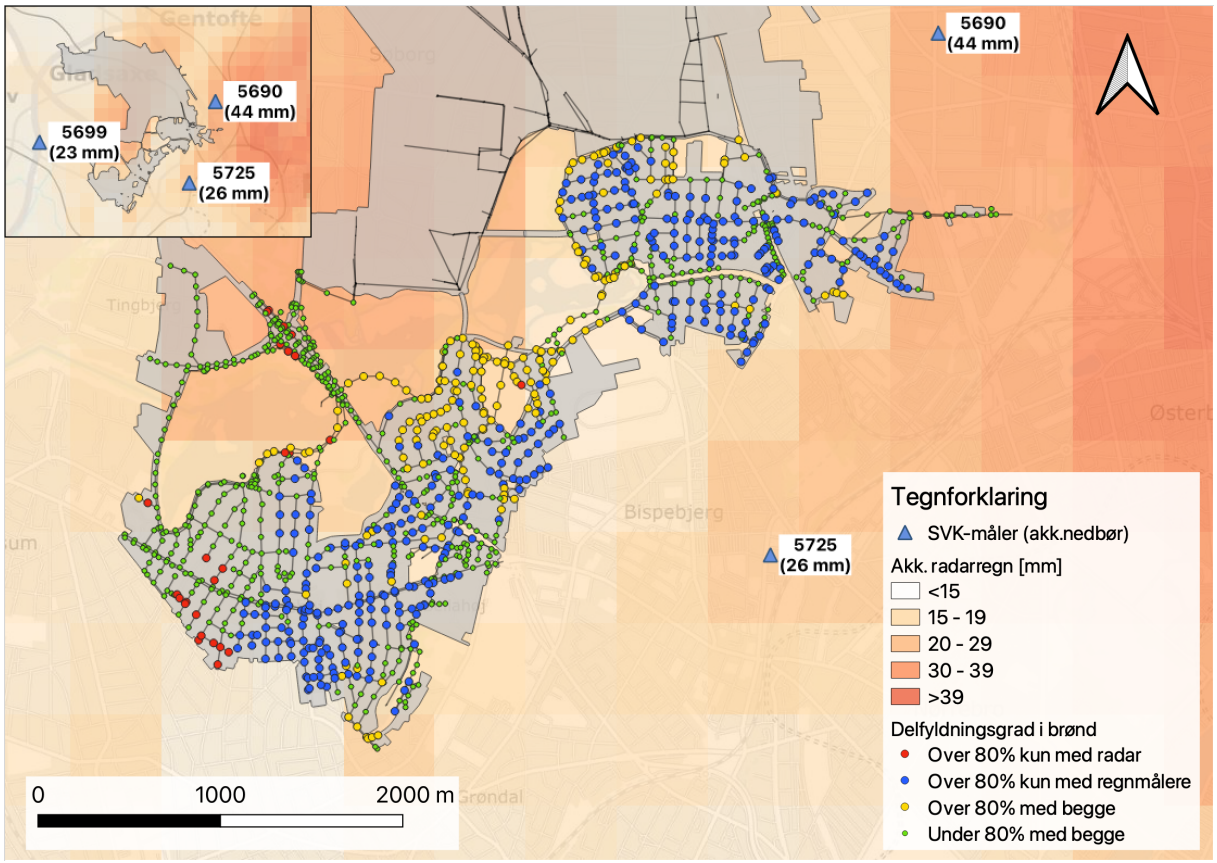
*SVK-måler har været ude af drift

L Figurer og tabelværdier anvendt til analyse af delfyldningsgrad i brønde ved ekstremhændelser

L.1 3 regnmålere

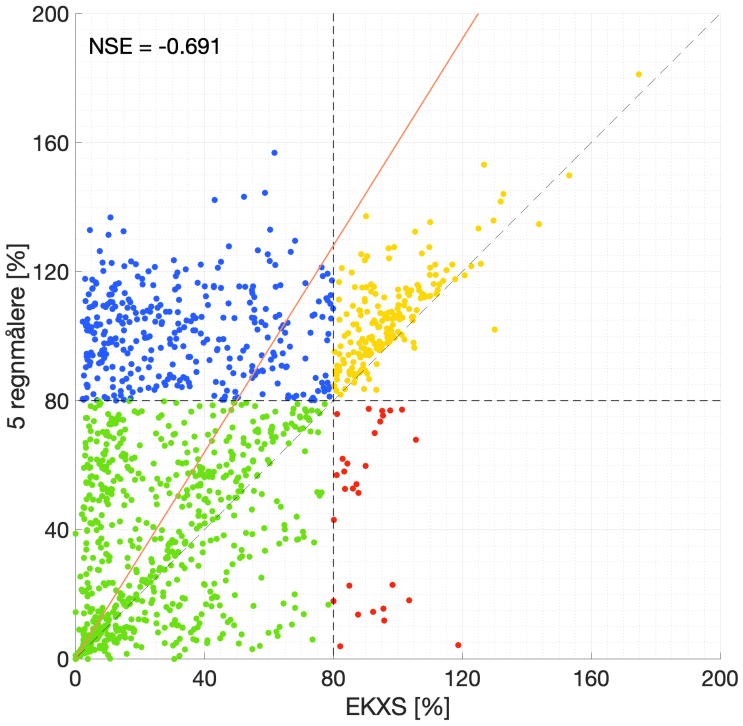


Figur L.1. Scatterplot over delfydlningsgraden ved sammenligning af SVK-målerne 5690, 5699 og 5725 og radaren ved regnhændelsen d. 04/09-2015. Plottet er opdelt i fire zoner med forskellige farver for at indikere hvorledes der er regnmåleren, radaren, begge eller ingen af dem, som resulterer i delfyldningsgrad på mere end 80%. Af plottet fremgår datasættets NSE-værdi samt bias.

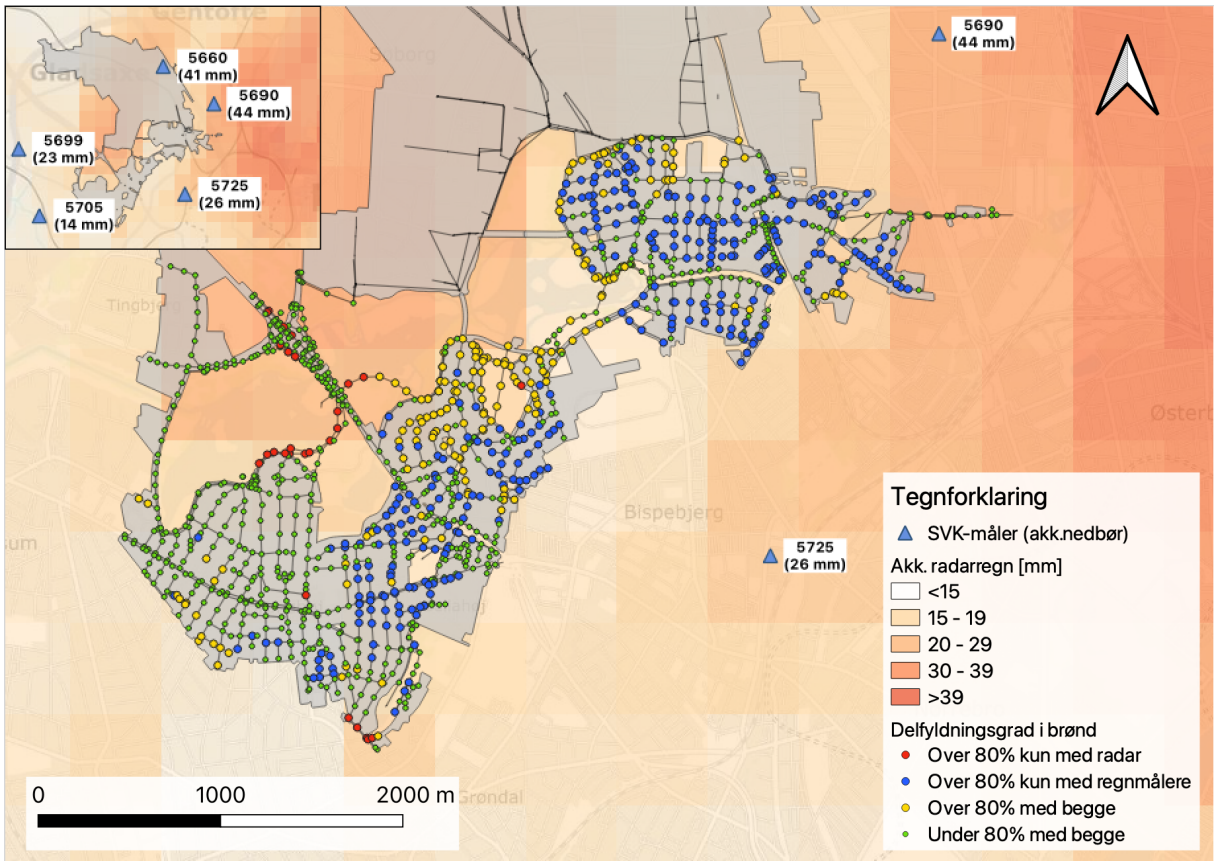


Figur L.2. Illustration af hvor i den sydlige del af projektområdet brønde med delfyldningsgrad over- og under 80% er placeret ved sammenligning af SVK-målerne 5690, 5699 og 5705 og radaren for regnhændelsen d. 04/09-2015.

L.2 5 regnmålere



Figur L.3. Scatterplot over delfydlningsgraden ved sammenligning af SVK-målerne 5660, 5690, 5699, 5705 og 5725 og radaren ved regnhændelsen d. 04/09-2015. Plottet er opdelt i fire zoner med forskellige farver for at indikere hvorledes der er regnmåleren, radaren, begge eller ingen af dem, som resulterer i delfyldningsgrad på mere end 80%. Af plottet fremgår datasættets NSE-værdi samt bias.



Figur L.4. Illustration af hvor i den sydlige del af projektområdet brønde med delfyldningsgrad over- og under 80% er placeret ved sammenligning af SVK-målerne 5660, 5690, 5699, 5705 og 5725 og radaren for regnhændelsen d. 04/09-2015.

L.3 Tabeller for NSE og bias.

Tabel L.1. NSE-værdier for delfyldningsgrad for de 21 største regnhændelser til de respektive regnmålerscenarier, som alle er i forhold til EKXS.

Dato	**1RM**	**3RM**	**5RM**	**8RM**
20/05-2009	-0,839	-1,877	-1,021	-0,729
07/06-2010	0,006	0,371	0,531	0,294
14/08-2010	0,265	0,163	-0,389	-0,366
02/07-2011	-2,375	-2,425	-1,490	-1,723
14/07-2011	0,954	0,975	0,920	0,908
14/08-2011	0,902	0,891	0,004	0,093
08/08-2014	0,288	-1,718	-0,735	-0,122
31/08-2014	0,796	0,394	0,462	0,764
04/09-2015	-1,094	-1,113	-0,691	-0,540
21/11-2015	0,768	0,993	0,991	0,988
16/06-2016	0,728	0,307	0,540	0,588
10/07-2016	-3,506	0,217	0,164	-0,624
02/08-2016	-0,789	0,478	-0,433	0,556
22/06-2017	-2,272	0,090	-0,062	-0,408
14/07-2017	0,204	0,175	0,481	0,540
23/07-2017	0,958	0,964	0,956	0,966
09/09-2017	0,923	0,993	0,983	0,976
17/09-2017	-2,175	-0,749	-0,063	-0,345
28/07-2019	0,341	0,383	0,412	0,484
11/10/2019	0,677	0,599	0,607	0,640
25/09/2020	-0,067	0,133	0,377	0,464
Gennemsnit	-0,352	-0,128	0,035	0,179

Tabel L.2. Datasæt bias for delfyldningsgrad for de 21 største regnhændelser til de respektive regnmålerscenarier, som alle er i forhold til EKXS.

Dato	**1RM**	**3RM**	**5RM**	**8RM**
20/05-2009	1,99	2,31	2,01	1,92
07/06-2010	1,79	1,4	1,13	1,36
14/08-2010	1,58	1,62	1,81	1,78
02/07-2011	2,42	2,16	1,59	1,77
14/07-2011	1,13	1,08	0,86	0,91
14/08-2011	0,95	0,91	0,61	0,65
08/08-2014	1,62	1,92	1,58	1,57
31/08-2014	0,99	1,35	1,28	1,03
04/09-2015	1,92	1,69	1,6	1,63
21/11-2015	0,79	0,97	0,98	0,94
16/06-2016	0,93	1,34	1,22	1,12
10/07-2016	3,03	1,54	1,64	1,97
02/08-2016	2,18	0,67	0,61	1,16
22/06-2017	2,68	1,45	1,52	1,89
14/07-2017	1,66	1,46	1,22	1,29
23/07-2017	1,09	1,03	1,03	1,05
09/09-2017	1,16	0,96	0,97	1,03
17/09-2017	2,53	1,75	1,42	1,66
28/07-2019	1,60	1,03	0,92	1,06
11/10-2019	0,70	0,61	0,62	0,65
25/09-2020	1,85	1,71	1,55	1,53
Gennemsnit	1,85	1,71	1,55	1,53

M Bestemmelse af arealreduktionsfaktor

M.1 Udregning af arealreduktionsfaktor

ARF regnes ud fra en række konstanter, hvilket fremgår ved Ligning (M.1).

$$ARF(d, A) = \exp\Big[- b_1 \frac{A^{b_2}}{d^{b_3}} \Big] \tag{M.1}$$

Hvor:

b_1, b_2, b_3	Konstanter [-]
A	Oplandsareal [km^2]
d	Regnvarighed [min]

Konstanterne i Ligning M.1 er kalibreret i Thorndahl et al. [2019] ved brug af et udvalg af forskellige typer regnhændelser. Heraf benyttes middelværdierne, som fremgår af Tabel M.1 sammen med middelværdierne ± en standard afvigelse.

Tabel M.1. Parameterværdier for konstanterne i Ligning (M.1). [Thorndahl et al., 2019]

Parameter	b_1	b_2	b_3
Middelværdi [-]	0,31	0,38	0,26
Middelværdi - 1 std. afv. [-]	0,21	0,45	0,36
Middelværdi + 1 std. afv. [-]	0,47	0,37	0,17

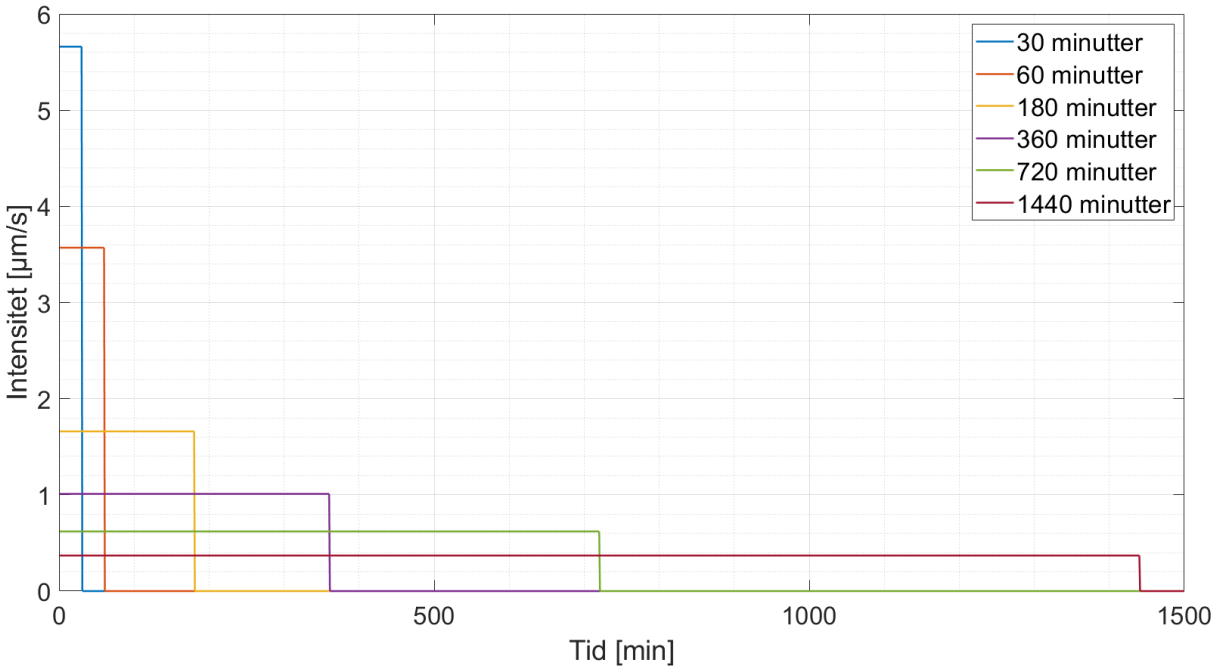
Ovenstående konstanter kan indsættes i Ligning (M.1), sammen med oplandsareal af projektområdet, hvorved der beregnes en tilsvarende ARF.

M.2 Bestemmelse af koncentrationstid

Til at undersøge koncentrationstiden for projektområdet benyttes kasseregn med regnvarigheder på 30, 60, 180, 360, 720 og 1440 minutter. Kasseregnen er lavet ud fra regnearket, som er bilag til SVK skrift 30 [Gregersen et al., 2014]. Her er der anvendt data fra SVK målestation 5694 ved Søborg Vandværk med en gentagelsesperiode på 1 år og en sikkerhedsfaktor på 1,0. Varigheder og tilhørende regnintensiteter er angivet i Tabel M.2, og er visualiseret på Figur M.1.

Tabel M.2. Varigheder og intensiteter for seks kasseregn med en gentagelsesperiode på 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0. Lokationen er for SVK måler 5694, Søborg Vandværk, som er vist på Figur 4.4 på side 17.

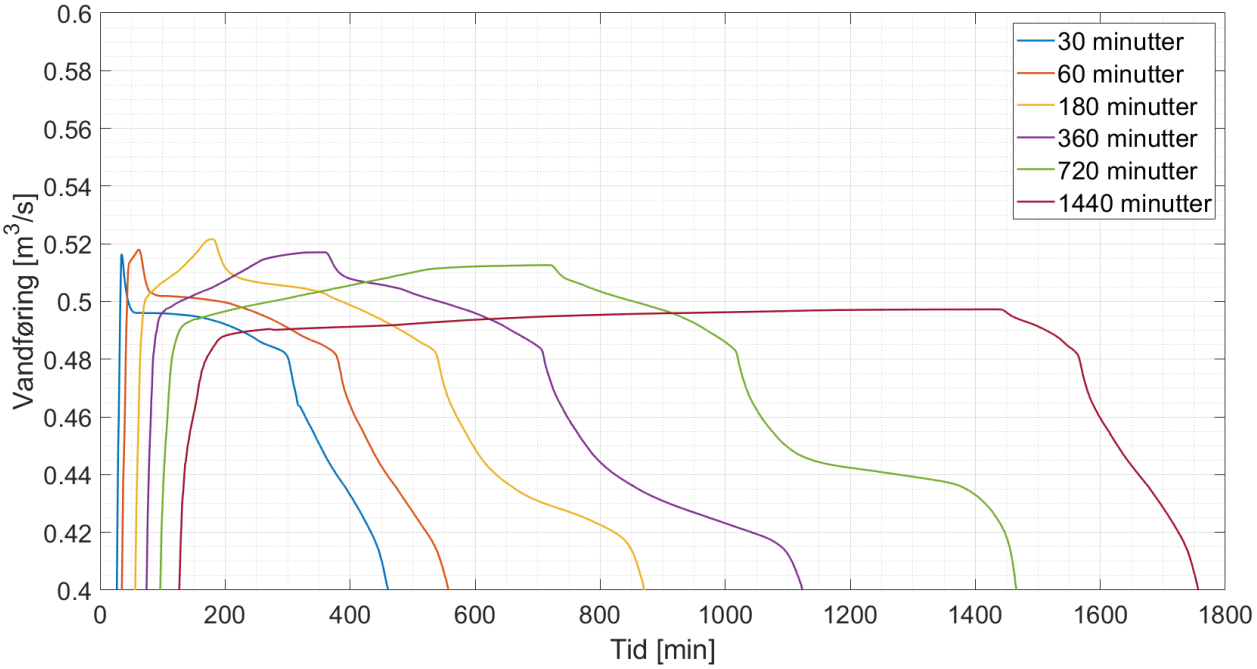
Varighed [min]	30	60	180	360	720	1440
Intensiteter [μm/s]	5,66	3,57	1,66	1,01	0,62	0,37



Figur M.1. Kasseregn for seks forskellige varigheder med en gentagelsesperiode på 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0 for SVK måler 5694, Søborg Vandværk, som fremgår på Figur 4.4 på side 17.

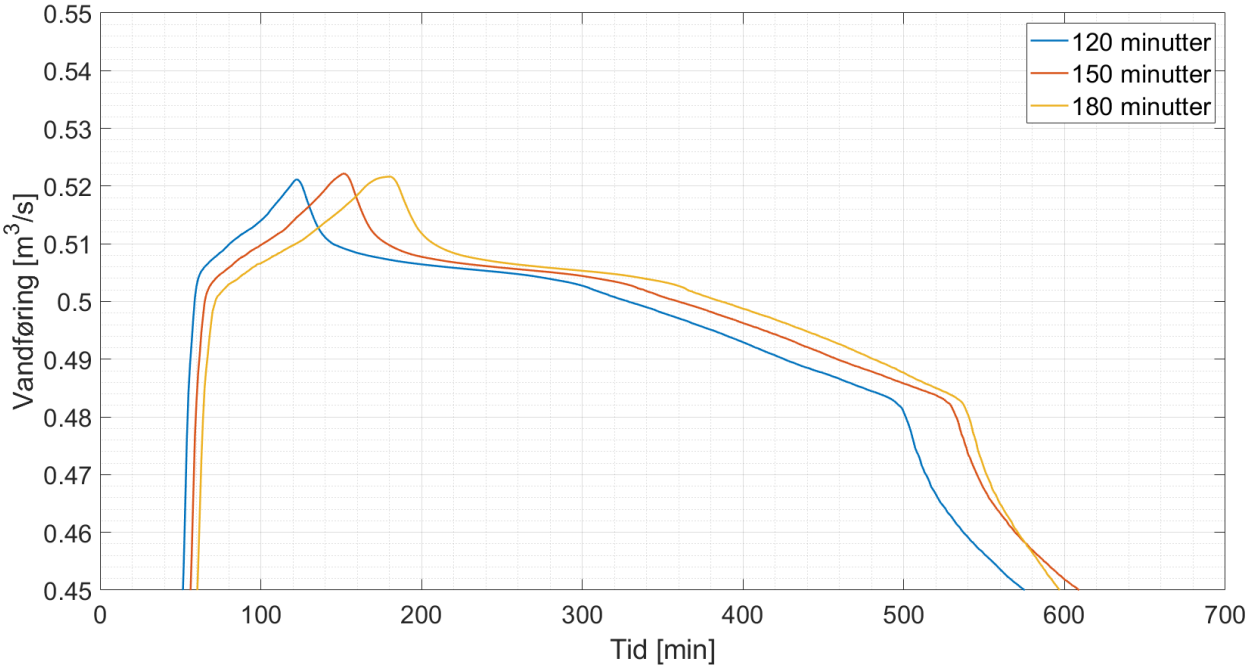
Ud fra de seks kasseregn er det nu muligt at undersøge hvilken regnvarighed, der svarer til koncentrationstiden for hele projektområdet.
Dette undersøges ved at undersøge hvilken af de seks kasseregn, som resulterer i den største vandføring i udløbet ud af modellen mod Renseanlæg Lynetten, som er markeret på Figur 3.4.

Af Figur M.2 fremgår et plot af vandføringen i udløbet ud fra de seks kasseregn. Af figuren ses det, at alle kasseregn har samme simuleringstid. Dette skyldes, at der er simuleret over to døgn, for at være sikker på systemet er tømt for regnvand.



Figur M.2. Vandføringen i udløbet af Mike Urban modellen ved seks forskellige kasseregn angivet i Tabel M.2 for SVK-måler 5694, Søborg Vandværk, med gentagelsesperiode 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0.

Af ovenstående figur fremgår det, at en regnvarighed på 180 minutter resulterer i den største vandføring ud af modellen. Det er muligt, at den største vandføring vil forekomme ved en koncentrationstid lavere end 180 minutter. Dette undersøges ud fra to kasseregn på 120 og 150 minutters varighed og intensiteter på 2,21 µm/s og 1,89 µm/s. Af Figur M.3 fremgår vandføringen ud af udløbet af modellen ud fra de to kasseregn.



Figur M.3. Vandføringen i udløbet af Mike Urban modellen ved kasseregn med varighed på 120 og 150 minutter med intensiteter på henholdsvis 2,21 μm/s og 1,89 μm/s lavet ud fra SVK-måler 5694, Søborg Vandværk, med gentagelsesperiode 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0.

Ud fra ovenstående figur ses det, at kasseregnen med en varighed på 150 minutter resulterer i den største vandføring, og dette antages at være koncentrationstiden for hele projektområdet.

M.3 Bestemmelse af fraktion mellem runoff og overløb

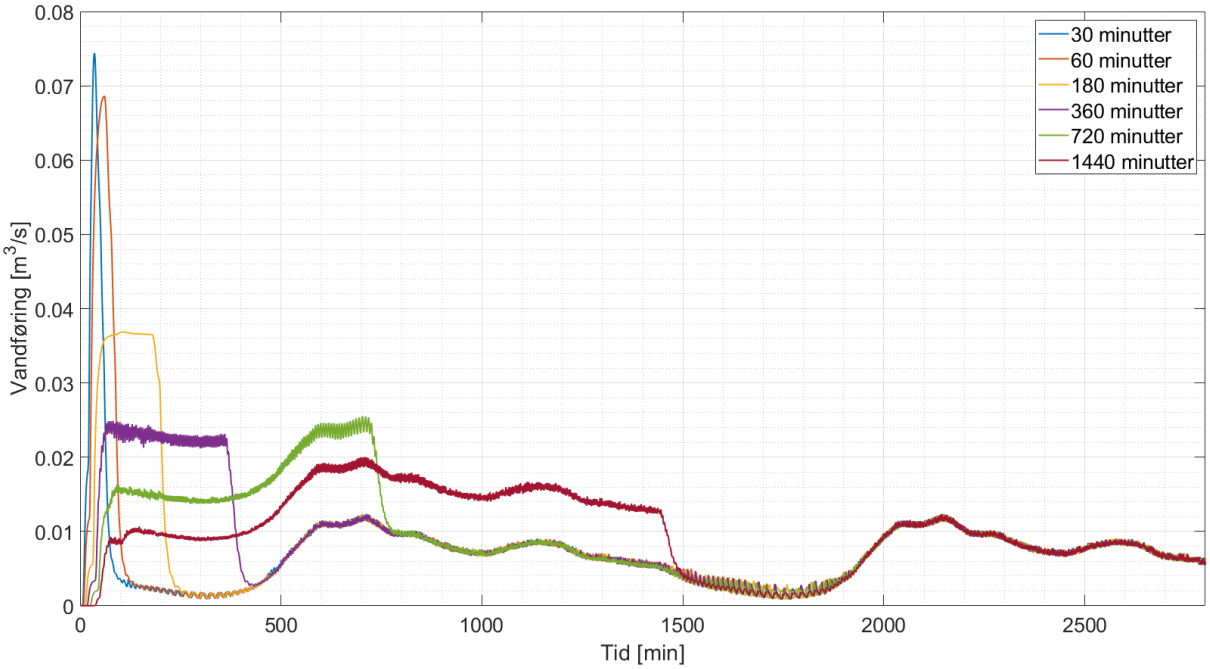
Af Tabel M.3 fremgår fraktionen mellem runoff fra overfladerne og volumenet ud af det udvalgte udløb.

Tabel M.3. Relativ sammenligning mellem volumen ud af udløbet markeret på Figur 3.2 på side 8 og runoff fra overfladerne.

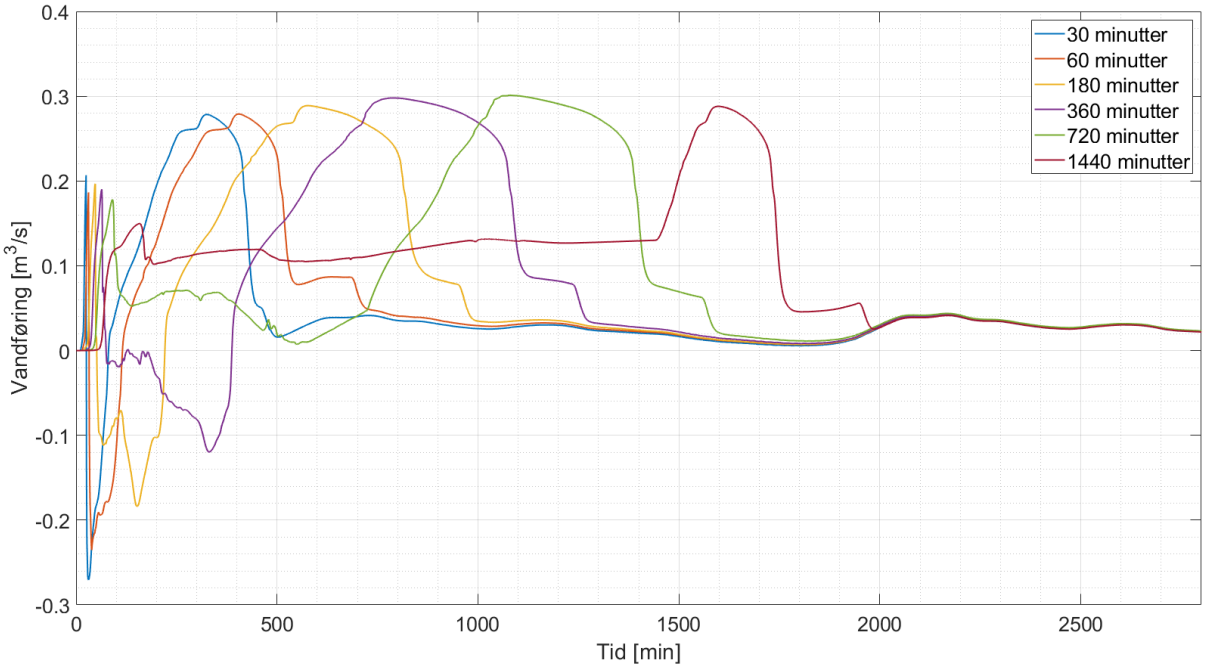
Varighed af kasseregn [min]	30	60	180	360	720	1440
Volumen ud af udløb / runoff [-]	0,84	0,76	0,59	0,60	0,56	0,53

Som det fremgår af ovenstående tabel over fraktionen mellem volumenet ud af udløbet og runoff fra overfladerne, at det er kasseregnen med en varighed på 30 minutter, der resulterer i den største fraktion. Denne relative sammenligning viser, at jo mere vand, der ledes ud af modellens udløb des mindre vand må der også løbe ud fra de andre udløb i modellen samt fra overløbsbygværker. Derfor må det antages, at det er den mindste fraktion, der resulterer i det mest kritiske tilfælde, hvorfor det må være kasseregnen med en varighed på 1440 minutter, der er den mest kritiske for systemet.

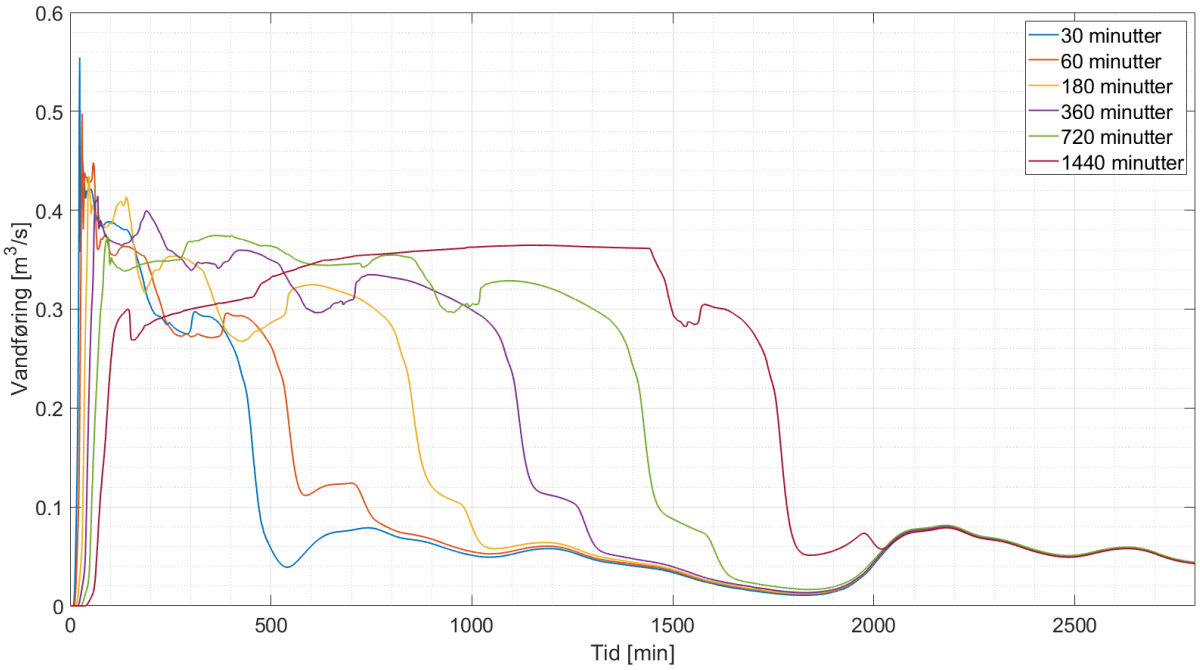
M.4 Koncentrationstid for mindre deloplande



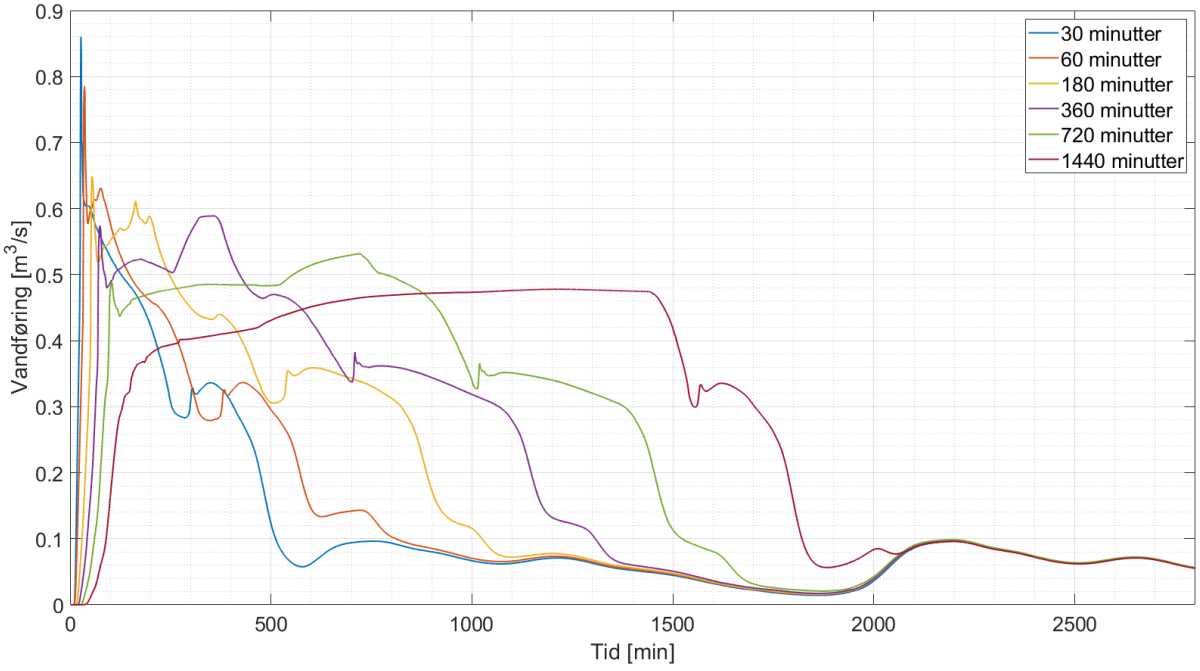
Figur M.4. Vandføring for delopland 1 ved seks forskellige kasseregn angivet i Tabel M.2 for SVK-måler 5694 Søborg Vandværk, med gentagelsesperiode 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0.



Figur M.5. Vandføring for delopland 2 ved seks forskellige kasseregn angivet i Tabel M.2 for SVK-måler 5694 Søborg Vandværk, med gentagelsesperiode 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0.



Figur M.6. Vandføring for delopland 3 ved seks forskellige kasseregn angivet i Tabel M.2 for SVK-måler 5694 Søborg Vandværk, med gentagelsesperiode 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0.



Figur M.7. Vandføring for delopland 4 ved seks forskellige kasseregn angivet i Tabel M.2 for SVK-måler 5694 Søborg Vandværk, med gentagelsesperiode 1 år og sikkerhedsfaktor på 1,0.

N Resultattabeller for modelparametre ved brug af otte individuelle regninput

Dette bilag indeholder resulterende data, på baggrund af en analyse af effekten ved at medtage SVK-målere som punktdata, i simuleringen af modellen. Først forekommer alle regnmålerne i forhold til radaren.
Derefter fremgår der en relativ sammenligning af de resterende syv regnmålere, i forhold til regnmåler 5694 der er brugt i rapporten.

N.1 Alle regnhændelser med punktnedbør, i forhold til radar

Tabel N.1. Resultater for arealmidlet nedbør ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med hver af de otte SVK-målere projekteret ud på alle oplande. Værdierne er holdt op i mod radarresultater.

SVK-måler ift. EKXS	NSE [-]	MAE [-]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,839	1,50	769	28	1,08
5655	0,898	1,24	737	21	1,05
5660	0,864	1,22	760	19	1,04
5690	0,787	1,30	725	20	1,01
5694	0,899	1,09	769	18	1,08
5699	0,885	1,26	761	23	1,01
5705	0,863	1,37	689	24	1,01
5725	0,777	1,53	738	25	1,03
Gennemsnit	0,851	1,13	744	22	1,04

Tabel N.2. Resultater for udløbsvolumen ud af modellen ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med hver af de otte SVK-målere projekteret ud på alle oplande. Værdierne er holdt op i mod radarresultater.

SVK-måler ift. EKXS	NSE [-]	MAE [-]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,815	2.695	769	13	1,02
5655	0,854	2.430	737	12	1,01
5660	0,768	2.532	760	12	1,01
5690	0,686	2.598	725	11	0,98
5694	0,832	2.151	769	10	1,03
5699	0,871	2.360	761	12	0,98
5705	0,848	2.464	689	12	0,98
5725	0,625	2.759	738	12	1,00
Gennemsnit	0,787	2.499	744	12	1,00

Tabel N.3. Resultater for overløbsvolumen ud af modellen ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med hver af de otte SVK-målere projekteret ud på alle oplande. Værdierne er holdt op i mod radarresultater.

SVK-måler ift. EKXS	NSE [-]	MAE [-]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,803	2.476	769	62	1,13
5655	0,887	2.004	737	42	1,07
5660	0,891	1.824	760	36	1,07
5690	0,849	1.942	725	38	1,03
5694	0,913	1.721	769	39	1,12
5699	0,870	2.027	761	46	1,03
5705	0,864	2.077	689	43	1,03
5725	0,859	2.197	738	50	1,05
Gennemsnit	0,867	2.034	744	45	1,07

Tabel N.4. Resultater for antal brønde med den delfyldningsgrad over 50% ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med hver af de otte SVK-målere projekteret ud på alle oplande. Værdierne er holdt op i mod radarresultater.

SVK-måler ift. EKXS	NSE [-]	MAE [-]	Døgn	Bias [-]
5645	-1,624	48	347	1,75
5655	-1,934	46	315	1,72
5660	-1,727	43	311	1,69
5690	-2,103	47	291	1,64
5694	-1,575	41	318	1,82
5699	-0,797	40	309	1,46
5705	-0,687	36	294	1,19
5725	-1,113	40	310	1,60
Gennemsnit	-1,445	43	312	1,61

N.2 Alle regnhændelser med punktnedbør, i forhold til regnmåler 5694

Tabel N.5. Resultater for arealmidlet nedbør ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med alle SVK-målere der er medtaget i denne rapport undtagen SVK-måler 5694. Værdierne er holdt op i mod resultater fra SVK-måler 5694.

SVK-måler	NSE [-]	MAE [mm]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,762	1,96	742	33	0,99
5655	0,888	1,52	725	26	0,96
5660	0,905	1,39	743	23	0,96
5690	0,786	1,49	713	23	0,93
5699	0,808	1,79	737	29	0,93
5705	0,784	1,84	671	30	0,95
5725	0,849	1,64	722	27	0,95
Gennemsnit	0,826	1,66	722	27	0,95

Tabel N.6. Resultater for udløbsvolumen ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med alle SVK-målere der er medtaget i denne rapport undtagen SVK-måler 5694. Værdierne er holdt op i mod resultater fra SVK-måler 5694.

SVK-måler ift	NSE [-]	MAE [m^3]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,768	3.329	742	15	0,99
5655	0,899	2.558	725	12	0,98
5660	0,901	2.387	743	11	0,98
5690	0,698	2.668	713	11	0,96
5699	0,788	3.098	737	14	0,95
5705	0,759	3.099	671	14	0,97
5725	0,847	2.727	722	12	0,97
Gennemsnit	0,809	2.838	722	13	0,97

Tabel N.7. Resultater for overløbsvolumen ved brug af alle regnhændelser over 1 mm i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med alle SVK-målere der er medtaget i denne rapport undtagen SVK-måler 5694. Værdierne er holdt op i mod resultater fra SVK-måler 5694.

SVK-måler	NSE [-]	MAE [m^3]	Døgn	Afvigelse [%]	Bias [-]
5645	0,76	2.732	742	56	0,99
5655	0,873	2.133	725	41	0,96
5660	0,908	1.876	743	35	0,95
5690	0,882	1.943	713	33	0,92
5699	0,823	2.458	737	48	0,92
5705	0,805	2.565	671	50	0,93
5725	0,842	2.337	722	47	0,94
Gennemsnit	0,842	2.292	722	44	0,94

Tabel N.8. Resultater for delfyldningsgrad over 50% ved brug af alle regnhændelser, hvor én af pågældende datasæt måler over 0 brønde i perioden 16/01-2008 til 18/09-2022, simuleret individuelt med alle SVK-målere der er medtaget i denne rapport undtagen SVK-måler 5694. Værdierne er holdt op i mod resultater fra SVK-måler 5694.

SVK-maler	**NSE [-]**	**MAE [Brønde]**	**Dogn**	**Bias [-]**
5645	0,214	51	369	0,97
5655	0,694	36	327	0,95
5660	0,807	30	323	0,93
5690	0,217	47	314	0,90
5699	0,203	51	339	0,80
5705	-0,027	56	337	0,65
5725	0,503	39	336	0,88
Gennemsnit	0,373	44	335	0,87

O Elektroniske bilag