Analyse af regnens spatiale fordeling og bevægelse, i hydraulisk modellering af afløbssystemer



Kandidatspeciale Christoffer Bang Andersen Byggeri & Anlæg Aalborg Universitet Den 8. juni 2018



Titel:

Analyse af regnens spatiale fordeling

og bevægelse, i hydraulisk modellering af afløbssystemer

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

September 2017 - Juni 2018

Deltagere:

Christoffer Bang Andersen

Vejleder:

Søren Thorndahl

Oplagstal: 3 Sidetal: 92 Appendiks: 8 Afsluttet 08-06-2018 Kandidatspeciale v/ Teknat og Sund Byggeri og Anlæg Thomas Manns Vej 23 9220 Aalborg http://www.civil.aau.dk

Synopsis:

Det foreliggende studie, omhandler den spatiale variabilitet og bevægelsen af nedbørsfelter. Studiet udføres som et casestudie, hvor et modelopland i København, Danmark, anvendes som caseområde. Studiet er inddelt i tre hovedanalyser, der alle efterforsker den spatiale variabilitet af nedbørsfelter. Den første analyse sammenligner data fra en vejrradar med flere regnmålere, hvor det klargøres at begge systemer præsterer på omtrent samme niveau. Den efterfølgende analyse, efterforsker betydningen af nedbørsfeltets bevægelse, i hydrauliske afløbsmodeller, hvilket viser sig ikke at være målbart. Den sidste analyse, undersøger forskel i modelresultater fra forskellige stokastiske hændelser, hvor input volumen er fastholdt. Det bekræftes at den spatiale fordeling af nedbøren, kan have stor betydning for modelresultaterne.

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

ABSTRACT

The present study deals with the spatial variability and movement of precipitation fields. The study is conducted as a case study in which a hydraulic drainage models, centered in Copenhagen, Denmark, is used as a case area. The study is divided into three main analyzes, all exploring the spatial variability of precipitation fields. The first analysis compares data from a weather radar with multiple raingauges, which clarifies that both systems perform at about the same level. The subsequent analysis, investigates the importance of the rainfall movement, in hydraulic drainage models, which proves not to be measurable. The last analysis investigates difference in model results from different random events where input volume is maintained. It is confirmed that the spatial distribution of precipitation may be of major importance to the model results.

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Christoffer Bang Andersen som kandidatspeciale på kandidatuddannelse i Vand og Miljø på Aalborg Universitet, hvor den spatiale fordeling og bevægelse af nedbør har været det overordnet tema.

Der rettes stor tak til vejleder Søren Thorndahl for konstruktiv kritik og inspirerende vejledning. Der rettes også stor tak til Hovedstadsområdets Forsyningsselskab (HOFOR) for udlevering af den anvendte hydrauliske model, af rensningsanlægget Lynettens opland. Yderligere rettes der stor tak til Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) og spildevandskomiteen (SVK) for udlevering af anvendt radar- og anden nedbørsdata. Der rettes også stor tak, til mine medstuderende i rum 1.207, for gode faglige og konstruktive diskussioner.

Alt kort materiale er fra Geodatastyrelsen [2016], med mindre andet er angivet.

Læsevejledning

Der vil igennem rapporten fremtræde kildehenvisninger, og disse vil være samlet i en kildeliste bagerst i rapporten. Der er i rapporten anvendt kildehenvisning efter Harvardmetoden, så i teksten refereres en kilde med [Efternavn, År]. Denne henvisning fører til kildelisten, hvor bøger er angivet med forfatter, titel, udgave og forlag, mens Internetsider er angivet med forfatter, titel og dato. Figurer og tabeller er nummereret i henhold til kapitel, dvs. den første figur i kapitel 7 har nummer 7.1, den anden, nummer 7.2 osv. Forklarende tekst til figurer og tabeller findes under de givne figurer og tabeller.

Christoffer Bang Andersen

INDHOLDSFORTEGNELSE

Kapite 1.1	l 1 Indledning Projektbeskrivelse	1 3
Kapite 2.1 2.2	l 2 Caseområde Data beskrivelse	5 6 9
Kapite	l 3 Sammenligning af radar og regnmåler observationer	15
3.1	Antagelser og forudsætninger	15
3.2	Statistisk sammenligning af EKXS og SVK målere	16
	3.2.1 Døgnnedbør	16
	3.2.2 Regnintensiteter	20
	3.2.3 Sammenligning af regnmåler og radarpixel	21
	3.2.4 Delkonklusion	24
3.3	Sammenligning af radar og regnmåler i hydraulisk modellering	24
	3.3.1 Resultater	25
	3.3.2 Delkonklusion	29
3.4	Opsamling	29
Kapite	1.4 Analyse af regnens bevægelse og betydning for afløbssystemets	
	respons	31
4.1	Antagelser og forudsætninger	31
4.2	Bestemmelse af bevægelse	33
	4.2.1 Resultater	36
	4.2.2 Rotation af radarbilleder	37
4.3	Global undersøgelse af regnens bevægelse	39
	4.3.1 Bevægelsesretning	40
	4.3.2 Regnes bevægelseshastighed	45
	4.3.3 Delkonklusion af den globale analyse	50
4.4	Lokal undersøgelse af regnens bevægelse	51
	4.4.1 Sammenligning af udvalgte ledningsstrækninger	52
4.5	Opsamling	59
Kapite	l 5 Analyse af regnens spatiale variabilitet	61
5.1	Antagelser og forudsætninger	61

5.2	Metode	52
	5.2.1 Stokastisk transponering af regn	52
	5.2.2 Udvælgelse af regnhændelser fra radarbilleder	66
5.3	Analyse af spatial variabilitet af nedbørsfeltet	37
	5.3.1 Variabiliteten af nedbørsfeltet, indenfor Lynetteoplandet	67
	5.3.2 Variabiliteten af nedbørsfeltet indenfor det spatiale domæne	71
5.4	Validering af SST statistik	74
5.5	Effekt af spatial variabilitet i hydraulisk modellering	77
5.6	Opsamling	84
Kapite	el 6 Diskussion og perspektivering 8	37
6.1	Sammenligning af radar og regnmåler observationer	87
6.2	Analyse af regnens bevægelse og betydning for afløbssystemets respons	87
6.3	Analyse af regnens spatiale variabilitet	38
Kapite	el 7 Konklusion 8	39
Littera	atur)1
Appen	diks A Radarhændelses oversigt)3
Appen	diks B Kolmogorov–Smirnov test resultater) 9
B.1	Global analyse	99
	B.1.1 Andel af brønde der går over kritisk kote	99
	B.1.2 Vand til Lynetten	00
	B.1.3 Overløb	00
B.2	Lokal analyse	01
	B.2.1 Peak vandføring	01
	B.2.2 Peak vandvolumen	01

1

INDLEDNING

Det evigt skiftende klima, stiller forsat store krav til hvordan moderne afløbssystemer skal dimensioneres og hvordan eksisterende skal håndteres. Figur 1.1 viser et eksempel, på konsekvenserne af ekstremnedbør. Den hurtigt voksende urbanisering, gør imidlertid modeller mere komplekse og mere responsive overfor både tidslige og spatiale variationer af nedbør, hvilket giver et øget krav til indsamlingen af nedbørsdata.



Figur 1.1. Eksempel på regnbetinget oversvømmelse. [Colourbox, 2013]

I Danmark er der blevet indsamlet nedbørsdata siden år 1979, igennem Spildevandskommiteens (SVK) regnmåler netværk. Dette netværk benyttes til at generere dimensionsgivende regnintensiteter til både design og analyse af afløbssystemer. [Gregersen et al., 2014; Spildevandskomiteen, 2005]

Registrering af nedbør, ved brug af et regnmålernetværk, kommer med mange ulemper.

Forskellige klimatologiske forhold, kan medføre fejl på nedbørsestimatet, som for eksempel, kraftig vind over målersystemet. Yderligere kan udstyret i sig selv indføre diverse fejlkilder. Den største ulempe forekommer dog i, at nedbøren bliver registreret i et punkt, og den spatiale fordeling af regnen går dermed tabt. Der stilles derfor store krav til densiteten af målernetværket, hvis den spatiale fordeling af regnen skal bevares. Dette vurderes vanskeligt, især i urbane områder, hvor placeringen af regnmålere kan forekomme vanskelig. [Cristiano et al., 2017]. Et regnmåler netværk, vil i nogle tilfælde kunne registrere ekstremnedbør med høj præcision, men grundet manglende spatial information, underpræsterer regnmålere i konvektive hændelser, som er karakteriseret ved høj spatial variabilitet og høj regnintensitet [Goudenhoofdt et al., 2017].



Figur 1.2. Eksempel på nedbørshændelse, hvor størstedelen af nedbøren, ikke bliver opfanget af det opstillede regnmåler netværk. De røde prikker angiver aktive regnmålere.

Figur 1.2 viser en situation, hvor en nedbørshændelser, har haft en struktur, hvor de kritiske dele ikke bliver opfanget af det opstillede regnmålernetværk.

I det seneste årti, er der sket væsentlig fremgang og udvikling, inden for dataindsamling af nedbøren spatiale variabilitet. Vejrradarsystemer bliver i stigende grad benyttet til at registrere nedbør [Cristiano et al., 2017; Thorndahl et al., 2017b]. Afhængig af type, kan disse radarsystemer måle nedbør i opløsninger ned til 100×100 m. Systemerne har været aktive i så lang tid, at der er indsamlet tilstrækkelig data til, relevante analyser kan foretages [Thorndahl et al., 2017b; Ochoa-Rodriguez et al., 2017; Goudenhoofdt et al., 2017; Wright et al., 2013].

1.1 Projektbeskrivelse

I dette studie, ligger det primære fokus på, hvordan en hydraulisk afløbsmodel responderer, afhængigt af den spatiale fordeling af regninputtet. Derfor formuleres følgende hypotese, det foreliggende studie vil efterforske.

Sammenlignet med punktnedbør vil fordelt nedbør fra radar give et mere præcist regninput til afløbstekniske modeller og dermed være afgørende for afløbssystemets modellerede respons. Endvidere vil bevægelsesretningen og -hastigheden af nedbørsfeltet være betydende for responsen i afløbssystemet.

Der opstilles forskningsspørgsmål som supplement til den ovenstående hypotese.

- 1. Hvordan kan observation fra regnmålere og radar sammenlignes statistisk over et givent opland?
- 2. Hvilke forskelle i modelrespons kan identificeres ved brug af henholdsvis regnmålere og radar som input til afløbstekniske modeller?
- 3. Hvad betyder regnens bevægelsesretning og -hastighed for den modellerede afstrømning i afløbssystemet globalt og lokalt?
- 4. Kan regnens spatiale variabilitet udnyttes til at genrerer ekstrem statistik, længere end observationsperioden, for det gældende radardatasæt?
- 5. Hvad betyder regnens spatiale variabilitet for det modellerede afstrømningsforløb?

Studiet er inddelt i tre hovedanalyser, der skal efterforske den opstillede hypotese, og de ovenstående forskningsspørgsmål. Den første analyse, præsenteret i kapitel 3, forsøger at besvare punkt et og to. Efterfølgende efterforskes punkt tre, i kapitel 4. Eksempler på modelrespons i denne sammenhæng kunne være: andel af brønde der går over en prædefineret kritisk kote, modelleret overløb fra fælleskloakerede oplande til en given recipient eller modelleret afstrømning til et rensningsanlæg. Den sidste analyse, i kapitel 5, vil efterforske, punkt fire og fem.

Der udvælges et caseområde, således overstående analyser kan udføres og ovenstående hypotese kan testes. En forklaring af caseområdet, sker i kapitel, 2. Caseområdet vil blive benyttet til at teste og udvikle metoder, hvorpå data fra vejradar kan implementeres i en udvalgt hydraulisk model.

$\mathbf{2}$

CASEOMRÅDE

Caseområdet udvælges efter nogle specifikke parametre. Området skal indeholde, et radarsystem med en tilfredsstillende datakvalitet. Dataene vurderes at leve op til dette krav, hvis dataserien har en tilstrækkelig længde og få billeder er beskadiget af diverse former for støj. Yderligere vurderes det nødvendigt, at caseområdet ligeledes indeholder et opland, med en tilkoblet hydraulisk afløbsmodel, således effekten af diverse metoder kan observeres.

Området omkring Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) C-bånds radar, på Stevns, hvis tekniske betegnelse er EKXS, angivet på figur 2.1, vurderes at leve op til de opstillede krav. EKXS har data tilgængelig fra år 2002 til 2016. Yderligere indholder området, rensningsanlægget Lynttens opland, placeret i København, med en tilhørende hydraulisk afløbsmodel.



Figur 2.1. Placering af EKXS og Rensningsanlægget Lynttens opland.

I de følgende afsnit, uddybes hvilke data, som er tilgængelige og kvalitetssikringen af disse. Efterfølgende præsenteres den hydrauliske model, der er tilknyttet oplandet, samt

opsætningen af samme model.

2.1 Data beskrivelse

Radaren, der anvendes i studiet, er som tidligere nævnt, placeret ved Stevns, Danmark, og DMI er ansvarlig for den daglig drift af denne. Relevante specifikationer af EKXS kan ses i tabel 2.1. For dybere teknisk specifikation refereres der til Nielsen et al. [2013] og Thorndahl et al. [2014].

Tabel 2.1. Udvalgte radar specifikationer for EKXS.			
Maksimal rækkevidde [km]	Kvantitative rækkevidde [km]	Spatial opløsning [m]	
240	100-120	500×500	

Radaren har registret nedbør siden 2002. I dette studie, anvendes der data fra perioden 2002 til 2016, da det er disse, der er blevet foretaget kvalitetssikring på. Der er ikke tale om 14 års kontinueret dataserie, grundet udfald i radar, eller støjbetonet billeder.

Et radarbilleder, fra EKXS, består således af i alt 480 pixels. Hver pixel inderholder en værdi for regnintensiteten for det gældende tidsskridt. Et eksempel på et stilbillede kan ses på figur 2.2



Figur 2.2. Eksempel på et radarbillede.

Yderligere, kan der på figur 2.3 ses et eksempel på hvordan billederne ser ud i serie, således regnens bevægelse kan observeres.



Figur 2.3. Eksempel på hvordan radarbillederne kan se ud i serie.

Med disse data er det muligt at udtrække regnserier for samtlige radarpixels.

De rå data fra EKXS, gennemgår forskellige former for efterbehandling, for at opnå et kvalificeret nedbørstimat. Radardata i dette projekt gennemgår, udover andre, to specifikke typer af efterbehandling: biasjustering og advektiv interpolering.

Biasjustering af radarbillederne, har det formål at øge præcisionen af nedbørsestimatet. Rå radardata inderholder ikke en regnintensitet, men en reflektivitetsfaktor for den skannede atmosfære. Disse værdier kan omsættes til en regnintensitet. Denne omregning er dog stærkt afhæning af nedbørstypen [Marshall og Palmer, 1948; van de Beek et al., 2010; Smith et al., 2013]. Derfor indføres begrebet, biasjustering. Biasjusteringen, sker på baggrund af metoden beskrevet i Thorndahl et al. [2014]. Biasjusteringsfaktoren bestemmes ved formel 2.1:

$$B\left(\tau + \Delta\tau\right) = \frac{\sum_{n=1}^{N} \left(\sum_{t=\tau}^{\tau + \Delta\tau} \left(G\left(n, t\right)\right) \cdot \Delta t_{g}\right)}{\sum_{n=1}^{N} \left(\sum_{t=\tau}^{\tau + \Delta\tau} \left(R\left(n, t\right)\right) \cdot \Delta t_{r}\right)}$$
(2.1)

Hvor:

$B\left(\tau + \Delta \tau\right)$	Biasen i tids integration perioden, $\Delta \tau$.	[-]
G	Nedbør intensitet i regnmåler.	[mm]
R	Nedbør intensitet i radar.	[mm]
N	Total antal radar og regnmåler par.	[-]
Δt_g	Tidsskridt i regnmåler observationer.	$[\min]$
Δt_r	Tidsskridt i radar observationer.	$[\min]$

Ud fra formel 2.1, kan radarbillederne justeres efter formel (2.2).

$$R_{MFB}(x, y, t) = B(t) \cdot R((x, y, t))$$

$$(2.2)$$

De anvendte regnmålere til biasjusteringen kan ses på figur 2.4.



Figur 2.4. Regnmålere inden for radarens rækkevidde. [Thorndahl et al., 2014]

I Thorndahl et al. [2014], blev der kun biasjusteret efter regnmålere indenfor en radius af EKXS af 75 km, som vist på figur 2.4. Samme regnmålere anvendes i dette studie.

I Thorndahl et al. [2014], konkluders det at, jo længere end periode, biasjusteringen sker over, desto bedre sammenhæng opleves der mellem radar og regnmåler, afhængigt af, hvor hurtigt de meteorologiske forhold ændre sig. Konklusionen i Thorndahl et al. [2014] er at, der opnås den bedste overenstemmelse mellem radar og regnmålere, hvis justeringen sker over et døgn. Derfor benyttes der i dette projekt en daglig middel biasjustering.



Figur 2.5. Akkumuleret døgnnedbør for henholdsvis regnmåler og radar. Figuren til venstre (a) er resultatet uden advektiv interpolation. Figuren til venstre (b) er resultatet med advektiv interpolation. Den stiplede linje, angiver vinkelhalverings linjen. De sorte cirkler angiver QQ plottet med 1% opløsning. [Thorndahl et al., 2014]

Figur 2.5 viser resultatet af biasjusteringen.

De originale radardata leveres, i en tidslig opløsning på 10 minutter. Dette vurderes til at være en utilstrækkelig opløsning, til hydrauliske formål. Derfor anvendes advektiv interpolation, som beskrevet i Nielsen et al. [2013]. Dette forbedrer den tidslige opløsning, således at der opnås en opløsning på 1 minut. Den advektive interpolation øger yderligere præcisionen af nedbørsestimatet, efter biasjusteringen, som vist på figur 2.5 [Thorndahl et al., 2014].

Da dette projekts hovedformål, er at benytte radardata til at observere effekten af regnens spatiale fordeling, udvikles der ikke videre på de ovenstående metoder.

2.2 Lynetten modelbeskrivelse

For at eftervise forskelle eller effekter, i forhold til indragelse af radar i hydraulisk simulering, benyttes en MIKE URBAN model, et numerisk simuleringsværktøj udviklet af Dansk Hydrologisk Institut (DHI), udleveret af Hovedstadsområdets Forsyningsselskab (HOFOR). Modellen dækker rensningsanlægget Lynettens opland, som vist på figur 2.6.



Figur 2.6. Rensningsanlægget Lynettens modelopland og placering af udløb i modellen.

Modellen er udleveret med prædefinerede brønde, ledninger, bassiner etc. I tabel 2.2 præsenters antallet af forskellige dele i afløbssystemet.

Tabel 2.2. Afløbs specifikke karakteristika.							
Brønde	Udløb	Bassiner	Ledninger	Oplande	Pumper	Overløb	Spjæld
4762	99	225	5325	2211	126	412	76

Forskellige oplandskarakteristika oplistes i tabel 2.3

Tabel 2.3. Oplandsspecifikke karakteristika. Tallene i parantes angiver standardafvigelsen				
Total areal [ha]	Gennemsnitlig delareal [ha]	Gennemsnitlig befæstelsegrad [%]		
8280	$3,75~(\pm 5,54)$	$48,2 \ (\pm 22,8)$		

. . . . 1 0 1

Tallene i henholdsvis tabel 2.2 og 2.3 antyder, at modellen både er kompleks og indeholder stor intern spatial variabilitet. Til trods for den antydede kompleksitet, er modellen blevet simplificeret for at mindske beregningstiden. Simplificeringen af modellen, foregår ved metoden beskrevet i Davidsen et al. [2017]. Metoden går ud på at mindske antallet af brønde i modellen og reducere ledningsstrækninger, således antallet af beregningspunkter mindskes uden, at modelresultatet ændrer sig signifikant.



Figur 2.7. Lynettens modelopland og placering af SVK målere implementeret i modeloplandet. Hver station er angivet med det tilhørende stations nummer.

Figur 2.7 viser således hvilke SVK målere, der er vurderet til at være repræsentative for Lynetteoplandet. De SVK målere er alle opsat på forskellige tidspunkter. Yderligere er de første datasæt fra EKXS tilgængelige fra 2002. Derfor præsenteres et overblik over hvilke datasæt der dækker hvilke perioder på figur 2.8.



Figur 2.8. Oversigt over, hvilke perioder de enkelte SVK-målere er aktive.

Da projektets hovedfokus ligger på at undersøge effekten af den spatiale fordeling af regnen, anses radaren som den begrænsende faktor. Derfor foretages analyserene kun i perioden 2002 til 2016. Figur 2.8 viser, at ikke alle SVK-målere er aktive i denne periode. Det vurderes, at dette ikke forekommer problematisk, da der til enhver tid, mindst er 10 SVK stationer aktive, hvilket anses for at være et tilstrækkeligt antal af målere.

Implementeringen af radar og SVK i modellen, sker ved at koble henholdsvis pixels og målere til deloplandene. Koblingen til deloplande, er bestemt på baggrund af afstanden fra henholdsvis radarpixels og SVK-målere, til et vilkårligt delopland. Den pixel/måler der er tættest på et givent opland, kobles til denne. Derfor kan en pixel/måler være koblet til flere forskellige oplande. Et eksempel på hvordan denne implementering foregår kan ses på figur 2.9.



Figur 2.9. Skitsering af hvordan regnmålerer kobles til diverse oplande, i den udleveret MIKE Urban model. De farvede cirkler angiver regnmålere. Hver regnmåler er tilkoblet de oplande der har samme farve som den pågældende regnmåler.

Figur 2.10 illustrere antallet af radarpixels, der ligger indenfor modeoplandet.



Figur 2.10. Radarpixels der dækker lynetteoplandet. Det totale antal af radarpixels, indenfor modeloplandet, er 524.

For at illustre forskellen på den spatiale opløsning, ved brug af henholdsvis regnmålere og radarpixels, bestemmes det gennemsnitlige tilkoblede deloplandsareal, i tabel 2.4.

	SVK regnmalere og radarpixels. Tal i parentes angiver standardafvigelsen.			
	Gennemsnitligt tilkoblet areal [ha]	Maks. tilkoblet areal [ha]	Min. tilkoblet areal [ha]	
SVK	$517 (\pm 356)$	1434	76,2	
EKXS	$14,1~(\pm 16,9)$	217	$0,\!179$	

 Tabel 2.4.
 Henholdsvis, gennemsnitlig, maksimum og minimum tilkoblet areal, for henholdsvis

 SVK regnmålere og radarpixels.
 Tal i parentes angiver standardafvigelsen.

Den spatiale opløsning af regninputtet, bliver signifikant forøget, angivet i tabel 2.4, når der anvendes radardata fremfor regnmålere data. Det observeres ydeligere at det gennemsnitlige areal tilkoblet til en radarpixel, er mindre end arealet for selv samme pixel (25 ha). Dette betyder, at metoden for tilkoblingen til arealerne anses for at være valid, og der ikke er behov for at foretage en arealvægtning til de enkelte oplande, i forhold til regninputtet, hvilket havde været nødvendigt hvis oplande i gennemsnit var større end den pågældende radarpixel.

Dette konkluderer beskrivelsen af det udvalgte caseområde. Der blev i dette kapitel fastslået af der er signifikant forskel, på den spatiale opløsning af nedbøren, når der anvendes henholdsvis data fra radar og regnmålere. Det næste kapitel, præsenterer en række analyser der vil forsøge at afklare hvilken effekt den spatiale opløsning af nedbøren, har for modellering af urban afstrømning og systemrespons.

SAMMENLIGNING AF RADAR OG REGNMÅLER OBSERVATIONER

Kapitlet efterforsker forskellen punktbaseret og spatial distribueret nedbør. Der foretages derfor to hovedanalyser, hvor data fra henholdsvis regnmålernetværk og vejrradarsystem sammenlignes. Der undersøges først om der forekommer overenstemmelse, mellem regn målt i regnmålernetværket og vejrradaren, på et statistisk plan. Efterfølgende undersøges hvilken forskel, den spatiale opløsning af et regninput har for modelresponsen.

3.1 Antagelser og forudsætninger

Sammenligningen af data fra henholdsvis EKXS radaren og SVK målerne, vil foregå over to forskellige analyser. Først undersøges de to datasæt på et statistisk plan, for efterfølgende at blive anvendt som regninput til den udleverede MIKE Urban model.

Den statistiske analyse, skal belyse om hvorvidt de to datasæt er sammenlignelige, således eventuelle forskelle i modelresultaterne, kan antages at være forårsaget af den spatiale opløsning af inputnedbøren. Yderligere anvendes denne analyse til at bestemme hvilke hændelser der vurderes relevante for de resterende analyser i studiet. Denne analyse foregår kun på regninputtet og ingen modellering foretages

Anden del af analysen skal derfor demonstrere om der er forskel på modelresultater, afhængigt af den spatiale opløsning af regninputtet.

Til disse analyser, opstilles følgende antagelser og forudsætninger.

- Der benyttes data fra EKXS radaren som beskrevet i afsnit 2.1.
- Der benyttes data fra SVK målerene som vist på figur 2.7 i afsnit 2.1.
 - Der ses kun på data fra i perioden 2002-2016, som er den overlappende periode mellem EKXS og SVK systemet.

Sammenligning af radar og regnmålere er ligeledes foretaget i Thorndahl et al. [2014] og Goudenhoofdt et al. [2017]. I Thorndahl et al. [2014], undersøges volumenforskelle mellem henholdsvis radar og regnmålere, og hvordan nedbørsestimatet kan forbedres, over samme område, som benyttes i dette studie. Konklusionen er at efter anvendt biasjustering,

som beskrevet i kapitel 2, forekommer der overensstemmelse mellem målt døgnnedbør i henholdsvis radar og regnmåler, hvorfor der forventes samme resultat for den foreliggende analyse. I Goudenhoofdt et al. [2017], sammenlignes ekstremnedbør registret i regnmålere og et radarsystem. Konklusionen af dette studie er at, et regnmålersystem oftest vil være tilstrækkeligt til at registrere ekstremnedbør, men underpræsterer under konvektive hændelser, med stor spatial variabilitet.

Til at vurdere forskel mellem radardata og regnmålere, benyttes modeleffektivitets koefficienten "Nash-Sutcliffe Efficiency" (NSE). Denne parametre beregnes som beskrevet i formel (3.1).

NSE = 1 -
$$\frac{\sum_{t=1}^{T} (M_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^{T} (O_t - \bar{O}_t)^2}$$
 (3.1)

Hvor:

O_t	Observeret data.	[mm]
\bar{O}_t	Middelværdi af observeret data.	[mm]
M_t	Modelleret data.	[mm]

I dette studie anses, nedbør målt i SVK-netværket, som værende observeret data og data fra EKXS som værende modelleret data. NSE-værdien, antager en værdi mellem $-\infty$ til 1. En værdi på 1, antyder perfekt match mellem de to datasæt. Værdier på 0 antyder at de modellerede værdier, er så nøjagtige som en middelværdi af de observerede data. Alle værdier under nul antyder, at en middelværdi af det observerede datasæt, er mere præcis end det modellerede. [Nash og Sutcliffe, 1970]

3.2 Statistisk sammenligning af EKXS og SVK målere

Der udvælges nogle statistiske parametre, som vil danne grundlag for sammenligningen af datasættene: døgnnedbør og regnintensiteter over udvalgte varigheder. Udover den statistiske tilgang til analysen, vil resultatet også blive benyttet til at bestemme hvilke hændelser, der skal simuleres i den anden del af analysen og den resterende del af studiet.

I analysen undersøges middel- og maksimumsværdier, således den totale spredning på sammenligningen kan konstateres. Minimum værdier undlades, da det vurderes at både radar og regnmåler er upræcise ved lave intensiteter og generelt findes uinteressant for analysen.

Sammenligningen sker på baggrund af den regn, der falder over Lynettens opland.

3.2.1 Døgnnedbør

Sammenligning af den arealmidlede døgnnedbør, sker ved at midle værdier fra henholdsvis radar og regnmåler, i forhold til Lynettens oplands areal. Arealmidlingen foregår ved at hver regnmåler/radarpixel bliver koblet til det tætteste opland og der foretages et vægtet gennemsnit, i forhold til koblet deloplandsareal.

Resultatet af arealmidlet ses på figur 3.1.



Figur 3.1. Arealmidlede nedbør over Lynetteoplandet. Den stiplede linje, angiver vinkelhalveringslinjen.

Figur 3.1 viser således, at der ved lave regndybder forekommer stor variation mellem radar og regnmåler. Ved nærmere inspektion af de pågældende radarbilleder, observeres der urealistisk høje værdier af nedbør samtidig med, at der er opfanget minimalt eller ingen nedbør i SVK-måler systemet.

Som nævnt i afsnit 2.1, bliver radarbillederne biasjusteret efter regnmålere, der ligger inden for, den kvantitative rækkevidde, vist på figur 2.4, af radarbilledet. I den processering, medtages kun regnmålere som har registreret mindst 1 mm nedbør, hvilket ikke nødvendigvis inkluderer de målere der er opsat i Lynetteoplandet, som vist på figur 2.7. Derfor filtreres alle dage fra, hvor der har været under 1 mm nedbør i SVK målerne, som er placeret i Lynetteoplandet. Resultatet af dette ses på figur 3.2.



Figur 3.2. Arealmidlet døgnnedbør over Lynettenoplandet. SVK værdier under 1 mm sorteret fra. Den stiplede linje, angiver vinkelhalveringslinjen.

Det ses, ud fra figur 3.2, at filtrering sorterer en del dårlige billeder fra. Imidlertid noteres der stadig enkelte hændelser, hvor der forekommer stor variation. Ud fra yderligere inspektion vurderes det, at nogle af billederen stadig indholder støj. For at filtrere yderligere i datasættet, fjernes alle hændelser med mindre end 5 mm. Denne værdi vælges da det vurderes, at hændelser lavere end denne vil være irrelevant for de efterfølgende analyser i dette kapitel, og den resterende del af studiet.



Figur 3.3. Arealmidlet døgnnedbør over Lynettenoplandet. SVK værdier under 5 mm sorteret fra. Den stiplede linje, angiver vinkelhalveringslinjen.

Resultatet af filtreringen med 5 mm ses på figur 3.3. Denne filtrering vil blive anvendt i

den resterende del af den statistiske analyse og vil danne grundlag for hvilke radardage, der vil blive benyttet senere i projektet, hvilket alt i alt dækker over 246 regndage. En oversigt af de udvalgte hændelse kan ses i appendiks A.

Der observeres nu en høj NSE-værdi for det arealmidlede døgnnedbør, hvilket antyder at der, set over hele Lynetteoplandet, er god overenstemmelse i total volumen. Dette var at forvente, da biasjusteringen, som beskrevet i afsnit 2.1, tager udgangspunkt i døgnnedbøren, målt i SVK-målerne, og justere radarbilledet efter dette.

Trods enkelte afvigelser, viser figur 3.3, at begge systemer opfanger nedbøren tilstrækkeligt.

Efterfølgende undersøges den maksimal registeret døgnnedbør i henholdsvis EKXS og SVK målerne. Der sammenlignes højeste pixelværdi mod højeste regnmålerværdi. Placeringen af dette vil derfor ikke nødvendigvis være det samme. Resultatet af dette kan ses på figur 3.4



Figur 3.4. Maksimal registeret nedbør i henholdsvis EKXS og SVK målere.

Der konstateres samme høje NSE-værdi, på figur 3.4, som den angivet på figur 3.3. Til trods for den høje NSE-værdi, konstateres der større spredning i dataene, især ved hændelser over 20 mm. Yderligere vurderes forskellen at fordele sig mere tilfældigt omkring vinkelhalveringslinjen, i forhold til fordeling af punkter på 3.3. Når EKXS registrerer mere nedbør end SVK-målerne, vil det med al sandsynlighed være på grund af situationer, som dem angivet på figur 1.2.

Ud fra figur 3.3, er det muligt at konkludere, at de to datasæt kan antages til at være sammenlignelige. Eventuelle total volumen forskelle, når regnen bliver benyttet som randbetingelse, i afsnit 3.3, vil derfor eventuel kunne forklares ud fra figur 3.3. Det forventes, at der vil forekomme forskel, da der qua figur 3.4, opleves stedlig variabilitet i maksimal registret døgnnedbør, over oplandet, jævnfør spredningen konstateret ved hændelser over 20 mm. For at underbygge denne påstand, undersøges ekstrem nedbøren yderligere, ved at efterforske forskel i registrerede regnintensiteter i de to datasæt.

3.2.2 Regnintensiteter

Resultaterne fra figur 3.3, giver antydning til, at regnen fordeler sig relativt jævnt over oplandet, hvorimod resultaterne fra 3.4, giver en antydning om spatial variabilitet. Det undersøges derfor om regnintensiteten, viser tegn på tilstedeværelse af stedlig variabilitet. Der udføres derfor en analyse, hvor maksimalt regisitrede, midlede 10 og 60 minutters regnintensiteter, over Lynetten oplandet, fra henholdsvis EKXS og SVK, sammenlignes. Ligeledes, som ved analysen af maksimal registret døgnnedbør, foretages analysen over hele oplandet. Derfor vil resultatet fra regnmålerne og radaren ikke nødvendigvis være fra samme punkt.



Figur 3.5. Maksimal gennemsnitlig 10 minutters regnintensitet, over Lynette oplandet, fra henholdsvis SVK og EKXS. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Figur 3.5, viser sammenligning af maksimal registret 10 minutters intensitet over modeloplandet. Der er tegn på, at der forekommer stor spatial variabilitet i nedbørsfeltet. Det vurderes at SVK-netværket generelt registrerer de kraftigste intensiteter. Selvom at vejrradar, øger den spatiale forstålese af nedbøren, er resultatet stadig meget begrænset af, hvilken spatial opløsning radaren, leverer dataene i. I dette studie, anvendes en C-bånds radar, med en opløsning på 500×500 m. Det vurderes derfor urealistisk, at en radar pixel, ville kunne gengive samme resultat, som en regnmåler, der måler nedbør i en signifikant mindre størrelsesorden. Yderligere vurderes det også årsagen, til resultatet på figur 3.5. I afsnit 3.2.3 vil den spatiale variabilitet mellem radarceller og regnmåler par, bliver undersøgt nærmere.



Figur 3.6. Maksimal, gennemsnitlig 60 minutters regnintensitet, over Lynette oplandet, fra henholdsvis SVK og EKXS. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Figur 3.6, præsenterer sammenligning mellem maksimal registret 60 minutters intensitet, i model oplandet. Samme tegn, på spatial variabilitet som på figur 3.5. Som udgangspunkt, registrerer SVK-netværket generelt højere intensiteter.

Det næste afsnit, vil forsøge at eftervise, den spatiale variabilitet, der forekommer indenfor en radarpixel.

3.2.3 Sammenligning af regnmåler og radarpixel

Figur 3.5 og figur 3.6, antyder høj spatial variabilitet, indenfor selve radarpixelen. Der udføres derfor en analyse for at afklare dette. Det vælges det at undersøge følgende nedbørs parametre: Maksimal 1 minuts intensitet, maksimal 10 minutters intensitet, maksimal 60 minutters intensitet og døgnnedbør, for hver af de 18 radar-regnmåler par. Der præsenteres kun resultater fra et radarpixel-regnmåler par, (station 5694 og tilhørende pixel), for overskuelighedens skyld og da resultaterne omtrent er identiske for de andre radarpixel-regnmåler par.



Maksimal 1 minuts-intensitet

Figur 3.7. Sammenligning mellem en udvalgt regnmålere og den tilhørende radarcelle, i forhold til maksimal et minuts regnintensitet. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Figur 3.7 viser, et minuts maksimal-intensitet for henholdsvis radarpixel og regnmåler. Det er tydeligt på denne tidsskala, at der forekommer stor spatial variabilitet inden for selve radarpixelen. Dette er at forvente, da måden vejrradaren registrerer nedbøren på, ender ud i et middel af nedbøren, over radarens spatiale opløsning, i dette tilfælde 500×500 m. Dette er væsentlig større område, end hvad en regnmåler dækker.

Maksimal 10 minutters-intensitet



Figur 3.8. Sammenligning mellem en udvalgt regnmålere og den tilhørende radarcelle, i forhold til maksimal 10 minutters regnintensitet. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Ligeledes på figur 3.8, observeres der stor variation mellem regnmåler og radarpixel. Variationen vurderes til at forekomme mindre markant en den observeret på figur 3.9. Dette er også konklusionen i Thorndahl et al. [2014]. Udjævningen, der er forårsaget af opløsningen af radaren, forventes at blive mindre betydelig, som den tidslige skala blive større, hvilket også er evident på figur 3.8, i forhold til de, udvalgte, statistiske parametre.



Maksimal 60 minutters intensitet

Figur 3.9. Sammenligning mellem en udvalgt regnmålere og den tilhørende radarcelle, i forhold til maksimal 60 minutters regnintensitet. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Konklusionen, fra Thorndahl et al. [2014], forsætter med at være evident, på figur 3.9. Det ses dog stadig, at regnmålerne generelt registrerer højere intensitet end dem der er målt i radarsystemet.

Døgnnedbør



Figur 3.10. Sammenligning mellem en udvalgt regnmålere og den tilhørende radarcelle, i forhold til døgnnedbør. Den stiplede linje angiver vinkel halverings linjen.

Figur 3.10, viser således at, over et døgn er de spatiale variationer udjævnet.

Resultaterne i dette afsnit, bekræfter hypotesen fremstillet i afsnit 3.2.2, at der forekommer stor spatial variabilitet, indenfor de individuelle pixels.

3.2.4 Delkonklusion

To ting konkluderes i denne del af analysen. Ud fra døgnnedbøren, vurderes det at der generelt opfanges samme mængde nedbør i henholdsvis radar og regnmålere. Resultaterne muliggør ligeledes at vurdere om forskelle i resultater, der observeres i analysen, hvor radar og regnmålere anvendes som input til den hydrauliske afløbsmodel, skyldes spatial fordeling af regn eller om det er de relativ lave volumen forskelle der observeres.

3.3 Sammenligning af radar og regnmåler i hydraulisk modellering

Med den statistiske analyse af SVK- og radardata afsluttet, udføres nu anden del af analysen, hvor de to datasæt bliver benyttet som regninput, til MIKE Urban modellen til Lynette oplandet, som præsenteret i afsnit 2.1. Følgende antagelser og forudsætninger gør sig gældende for denne del af analysen.

- Der benyttes den hydrauliske afløbsmodel, med samme modifikationer og setup, som beskrevet i kapitel 2.1.
- Det anerkendes, at der ses på relative sammenligninger mellem de to input typer, således valideres resultaterne ikke med målte afstrømnings data.
- Hændelserne simuleres som hele døgn.

Hændelserne vælges at simuleres som hele døgn, da der på nuværende tidspunkt ikke foreligger en procedure for at kvantificere enkeltstående hændelser i radarbilleder, dette aspekt udforskes i kapitel 5. Dette kan betyde, at hændelser, der går over til et nyt døgn, bliver afbrudt. Forudsætningen gælder for både radar og regnmåler input, således vurderes forudsætningen ikke kritisk, da der i forvejen er tale om relative sammenligner.

For at kunne lave en sammenligning af resultaterne, udvælges tre parametre, som vurderes at have relation til betydningen af den spatiale fordeling af regn. Parametrene der vælges er således: andele af brønde der går over kritisk kote, defineret som terrænkoten, volumenet af vand der løber til rensningsanlægget og modelleret overløb til recipient. Det noteres at modellen, som beskrevet i kapitel 2.1, er en simplificeret model. Dette betyder, at der kun forekommer ledninger og brønde, på modellens hovedstrækninger. Dette anses ikke som et problem for den videre analyse, da hele sammenligningen foregår på et relativt plan.

Modellen, der foreligger for rensningsanlægget Lynetten, er underlagt nogle særlige omstændigheder. Der er høj densitet af regnmålere i selve oplandet, hvilket vurderes at være ekstraordinært, i forhold til danske standarder. Det vælges derfor, at foretage en analyse, hvor kun en regnmåler bruges som input til modellen. Dette repræsenterer en situation, der ses mange steder i Danmark, hvor der ikke forekommer lige så høj densitet af regnmålere, som er tilfældet ved Lynette oplandet. Det vælges at anvende regnmåleren 5725, som vist på figur 2.6, da denne er placeret midt i oplandet, og derfor vurderes til at være repræsentativ for hele oplandet. Resultaterne af disse simuleringer præsenteres umiddelbart efter resultaterne fra simuleringer, med alle aktive stationer, således en sammenligning kan foretages.

3.3.1 Resultater

Dette afsnit vil præsentere de udtrukket resultater, af de 246 simuleringer foretaget i MIKE Urban modellen, med henholdsvis SVK måler og EKXS som input.



Figur 3.11. Andele af brønde der går over en valgt kritisk kote. Samtlige regnmålere i oplandet er med taget i denne analyse. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Figur 3.11 viser sammenligningen af andele af brønde der går over kritisk kote. Der forekommer stor spredningen i resultatet. Yderligere viser figur 3.11, at SVK systemet generelt returnerer højere værdier end det ved EKXS. Det mistænkes, at den grove spatiale opløsning i SVK-systemet, er grund til denne forskel. Hvis en måler, for eksempel, fanger en kort høj intens hændelser, der har en lav arealmæssig udbredelse, ville dette resultere i en overestimering af hændelsen. Radaren kan derimod fange pixelen der indeholde den intense nedbør, men stadig bevare den stedlig fordeling, hvorfor den intense hændelser ikke spredes til flere deloplande end nødvendigt.



Figur 3.12. Andele af brønde der går over en valgt kritisk kote. I denne analyse er kun station 5725 med taget. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

På figur 3.12, præsenteres resultaterne fra, simuleringerne med blot station 5725, som input. Det ses at NSE-parametren falder betydeligt. Yderligere ses det også, at den største værdi, for SVK-netværket nu er ændret fra omkring 0,6 til omkring 0,8. Den ene regnmåler vil derfor overestimer nedbøren over hele oplandet, hvorimod radaren giver en bedre repræsentation af den spatiale fordeling af nedbørsfeltet.


Figur 3.13. Indøbsmængden til Lynnetten, med samtlige regnmålere tilgængelig. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Indløbsmængden til rensningsanlægget Lynetten kan ses på figur 3.13. Der observeres en tildens til, at EKXS leverer mere vand til rensningsanlægget end SVK-inputtet. Volumen forskellene, ses at være væsentlig anderledes end dem vist på figur 3.3. Det tyder derfor på, at regninputtets spatiale opløsning har stor indflydelse på resultatet.

Hvor der på figur 3.11 kan være tegn på, at regnmålerne kan overestimerer ekstremnedbøren, kan det tolkes ud fra figur 3.13, at de samtidig kan underestimerer total voluminer. Det er ikke utænkeligt, at et regnmåler system ikke kan redegøre for den totale variabilitet indenfor et givet område, hvorfor noget nedbør muligvis ikke opfanges af systemet.



Figur 3.14. Indøbsmængden til Lynnetten, hvor kun station 5725 er benyttet som input. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Dette udsagn bliver endvidere forstærket på figur 3.14, der præsenterer resultaterne, fra simuleringerne, hvor kun station 5725 er medtaget. Ved denne parametre ses der en signifikant nedsættelse af NSE-værdien, i forhold til den præsenteret på figur 3.13. Yderligere ses flere hændelser, på figur 3.14, hvor SVK-inputtet stort set ikke resulterer noget vand ved Lynetten, mens EKXS resulterer i et væsentligt omfang, registrerer større vandvolumen.



Figur 3.15. Modelleret overløbsvolumen til recipient, i den udleveret MIKE Urban model, med samtlige SVK-målere som input. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Resultatet af den sidste sammenligningsparameter, modelleret overløbsvolumen til recipient, kan ses på figur 3.15. Her konstateres der en høj NSE-værdi for de to typer af input, hvilket tyder på, at begge systemer, præsterer på omtrent samme niveau. Til trods for den høje NSE-værdi, viser det sig, at SVK-systemet generelt resulterer i højere værdier af overløbsvolumner. Dette tænkes at kunne kobles sammen, med konklusionen til figur 3.11. Hvis en ekstremhændelse, udbredes til flere oplande end nødvendigt, kan det resultere, at mere vand vil ende i overløbet.



Figur 3.16. Modelleret overløbsvolumen til recipient, i den udleveret MIKE Urban model, hvor kun station 5725 er anvendt som input. Den stiplede linje angiver vinkelhalveringslinjen.

Figur 3.16, præsenterer resultatet, af simuleringerne med kun en aktiv station, 5725. Der observeres et mindre fald i NSE værdien, der dog stadig ligger på et relativt højt niveau. Yderligere observeres der, at nogle af de kraftigste hændelser på figur 3.15, i forhold til SVK, giver væsentlig kraftigere respons på figur 3.16. Årsagen til dette vurderes at være lige den konklusion der bliver draget til figur 3.11 og ligeledes som nævnt tidligere. At ved så lav spatial opløsning på nedbør inputtet, vil kraftigere hændelser, spredes til flere oplande og derved forårsage kraftigere respons.

3.3.2 Delkonklusion

Den indledende hypotese til dette afsnit var, at volumenmæssigt burde radar og regnmålere stemmer relativt meget overens, eventuelle forskelle ville være forskyldt af spatial variation af nedbørsmængde. Resultaterne i dette afsnit efterviser, at den spatiale opløsning af regninputtet har stor effekt på resultatet. Dette kan især konstateres, jævnfør figur 3.13, hvis tendens ikke kan sammenlignes med den vist på figur 3.3.

3.4 Opsamling

I indledningen til dette studie, blev der opstillet en hypotese, der blev suppleret med nogle forskningsspørgsmål. Dette kapitlets analyser, efterforskede følgende spørgsmål:

- 1. Hvordan kan observation fra regnmålere og radar sammenlignes statistik over et givent opland?
- 2. Hvilke forskelle i modelrespons kan identificeres ved brug af henholdsvis regnmålere og radar som input til afløbstekniske modeller?

Analyserne i dette kapitel blev delt op i to hovedgrupper, således de præsenterede spørgsmål kan besvares.

Den første hovedanalyse gik på, at sammenligne nedbørsdata, fra et regnmålernetværk med data fra et vejradarsystem. De to datasæt sammenlignes på to forskellige parametre, henholdsvis døgnnedbør op intensiteter over forskellige varigheder. Det konkluderes at, sammenlignes arealmidlede døgnnedbør, observeres der god overenstemmelse i mellem de to systemer, jævnfør resultaterne på figur 3.3. Yderligere blev der analyseret på, maksimal registret døgnnedbør i henholdsvis radar og regnmåler. Her er det tydeligt at regnmåler systemet ikke altid kan opfange de mest kritiske dele af et nedbørsfelt, jævnfør resultaterne på figur 3.4.

I analyserne omkring regnintensiteterne, blev det klart, at der indenfor en radarpixel forekommer stor spatial variabilitet på nedbørsfeltet, især på korte varigheder.

Derfor konkluderes det på den første del, at set over hele arealet, forekommer der god overenstemmelse, mellem de to datasæt. På mere lokalt plan, er der jævnfør resultaterne i afsnit 3.2.3, væsentlig mere forskel.

Anden hovedanalyse, gik på at sammenligne modelresultater fra den udleverede hydrauliske model, hvor der udføres et sæt simulering for hvert datasæt. Yderligere blev der foretaget en analyse, hvor kun en regnmåler blev brugt som input, dels så betydningen af regniputtes spatiale opløsning kan understreges, men også da dette er scenarie, der optræder hyppigere, for andre oplande i Danmark. For at måle effekten af regninputtets spatiale opløsning, blev der valgt tre sammenlignings parametre. Ved den første parameter, brønde over kritisk kote, blev det klart, at en lav spatial opløsning på regninputtet, med al sandsynlighed vil overestimerer resultatet. Hvis en regnmåler opfanger en kritisk hændelser, ville denne blive bredt ud over flere oplande end nødvendigt, hvor imod et radarinput, ville fordele nedbøren mere korrekt. Den anden parameter, modelleret vandvolumen til Lynetten viser at, lav spatial opløsning vil føre til underestimering af vandvolumenet. Dette antages at være forårsaget af, at radaren kan opfange nedbør, der går forbi de opstillede regnmålere. Den sidste parameter, modelleret overløbsvolumen til recipient viser generelt lille fejl mellem de to systemer.

Konklusionen for den anden hovedanalyse er derfor, at der kan observeres væsentlig forskelle på modelresultat, afhængigt af den spatiale fordeling af regninputtet til modellen.

4

ANALYSE AF REGNENS BEVÆGELSE OG BETYDNING FOR AFLØBSSYSTEMETS RESPONS

Konklusionen fra kapitel 3 viste, at den spatial variationen på nedbøren kan have stor betydning for afløbssystemets respons. Målet med dette kapitel er derfor at analysere de pågældende radarbilleder i forhold til regnens bevægelse, og hvilken effekt dette har på resultaterne af den hydrauliske afløbsmodel. Der udføres først en række analyser for at kvantificere regnens bevægelse. Efterfølgende undersøges effekten af bevægelsen på et globalt og lokalt plan.

4.1 Antagelser og forudsætninger

Formålet med dette kapitel er at efterforske, hvorvidt regnens bevægelse har betydning for hvordan afløbssystemet responderer. Bevægelse defineres i denne sammenhæng, som både retning og hastighed. Den indledende hypotese er at: systemet vil respondere signifikant anderledes, hvis bevægelsesretningen går imod systemets dominerende flowretning, som vist på figur 4.1. Yderligere antages det, at bevægelseshastigheden af nedbøren ligeledes kan være styrende for modelresponsen, da et langsomt bevægende nedbørsfelt, vil tillade mere nedbør at falde over oplandet.



Figur 4.1. Skitsering af Lynette oplandets dominerende flowretninger.

De dominerende flowretninger er bestemt ud fra øjemål, da systemets opbygning vanskeliggøre det at bestemme én direkte flowretning på anden vis. Opdelingen af hele oplandet, i nord og syd, er sket ved brug af MIKE Urbans værktøj, *Backwards Flowtracing*. To hovedledninger blev identificeret, og det anvendte værktøj identificerede hvilke ledningstrækninger var forbundet med hovedledningerne.

For at efterforske de opstillede hypoteser, kvantificeres regnens bevægelse, hvor der efterfølgende udføres to analyser. Den første analyse, undersøger systemets respons på et globalt plan. Den efterfølgende analyse vil foregå på lokalt plan. Den globale analyse, skal belyse om der observeres en generel tendens i respons, afhængig af regnens retning og hastighed. Den lokale analyse fortages, da systemet ikke har én klar defineret flowretning, men flere forskellige, som angivet på figur 4.1. Det vurderes derfor, at en lokal analyse kan komplimentere de resultater der opnås i den globale analyse.

Til disse analyser opstilles følgende antagelser og forudsætninger:

- Der anvendes data fra Stevns radaren(EKXS), som præsenteret i kapitel 2.1.
 - Der benyttes kun data, fra de 246 hændelser, som bestemt i kapitel 3.
- Der benyttes den MIKE Urban model, der er beskrevet i kapitel 2, med samme modifikationer.
- Regnens bevægelse, kan fordele sig efter en uniform fordeling.

Forudsætningen om, at regn kan fordele sig efter en uniform fordeling, vurderes nødvendig, da resultater fra afsnit 4.2 viser at, bevægelsesretningen i overvejende grad er mod nordnordøst. Dette efterlader en del resultater fra de andre retninger, hvilket besværliggør processringen af resultaterne. Derfor udvikles en metode i afsnit 4.2.2, der kan rotere radarbilleder, således en uniform fordeling af bevægelsesretningen kan genereres.

Det følgende afsnit vil beskrive den metode, der kvantificerer regnens bevægelse og udviklingen af den procedure, der roterer radarbilleder.

4.2 Bestemmelse af bevægelse

Til at bestemme regnens bevægelse, benyttes en globale vektorestimeringsmetode; en metode, der krydskorrelerer to radarbilleder og derved bestemmer en bevægelsesvektor, der kan omsættes til en hastighed og retning. Fremgangsmåden for denne metode kan listes op på følgende måde:

- 1. Udvælg hændelse, hvis bevægelse skal bestemmes.
- 2. Beskær radarbilledet, således eventuelle fejl og støj i billedet bliver sorteret fra.
- 3. Opdel billedet i t og t + dt par.
- 4. Udvælg afskæringsværdi og binariser billedeparene.
- 5. Kryds-korreler billedene fra punkt 4.
- 6. Bestem bevægelse ud fra resultatet i punkt 5.
- 7. Bestem en dominerende bevægelse, ud fra resultat i punkt 6.

Enkelte billeder er, især i kanten, fyldt med NaN værdier (Not-a-Number). Disse værdier benyttes til at markere fejl i billedet. I løbet af undersøgelsen blev det klart, at disse værdier kunne influere negativt i forhold til at bestemme bevægelsen.



Figur 4.2. Udstræk af originalt radarbillede (blå) og beskåret radarbillede (rød).

Igennem analysen blev det klart at beskæringen, som angivet på figur 4.2, var tilstrækkelig til at bestemme regnens bevægelse, i alle anvendte billeder, hvorfor denne anvendes til samtlige 246 hændelser.

Det vælges at opdele radarbillederne i par, med 10 minutters mellemrum. Som nævnt i kapitel 2, er de udleverede radarbilleder blevet interpoleret fra 10 minutters billeder til 1 minuts billeder. Metoden til denne interpolation, CO-TREC (CO-Tracking of Echos), som

beskrevet i Nielsen et al. [2013], er en mere avanceret version af global vektorestimeringen. Derfor anses det ikke nødvendigt at bestemme bevægelsen i mellem alle de udleverede radarbilleder.

Under implementeringen af proceduren, blev det gjort klart, at en afskæringsværdi på $0.1 \,\mathrm{mm/t}$, var nok til at bestemme bevægelsen. Afskæringsværdien ses nødvendig, da der i radarbilledet forekommer lave regnintensiter, som både kan anses at være reelle, men også mistænkes, at kunne være støj. Disse lave værdier kan derfor skjule den egentlige stormmasse, som er interessant for analysen.



Figur 4.3. Originalt radarbillede (venstre) og binariseret radarbillede (højre).

Afskæringsværdien benyttes yderligere til at binarisere radarbillederne, således at billederne kun antager to værdier, som vist på figur 4.3. Dette simplificerer kvantificeringen af bevægelsen, da ændringer i regnintensitet over tid, ikke ændrer på billedet og forstyrrer bevægelsesbestemmelsen.

Kryds-korreleringen af de to radarbilleder, fra punkt 4, giver således en bevægelsesvektor. Ud fra denne vektor er det muligt at bestemme en generel retning og hastighed af regnen. Et eksempel på resultatet af metoden, kan ses på figur 4.4.



Figur 4.4. Resultat er bevægelsesbestemmelse. Figuren til venstre, illustrer resultatet uden filtrering. Figuren til højere viser resultatet, med enkelte billeder sorteret fra.

Som det angår af figur 4.4, sker der er en filtrering af resultatet. Hastigheder på $0 \,\mathrm{m/s}$ og over $50 \,\mathrm{m/s}$ anses begge for at være urealistiske og sorteres derfor fra.

Figur 4.4, viser et tilfælde, hvor der er én tydelig generel retning. Dette er dog ikke altid tilfældet. Nogle hændelser har en roterende bevægelse, vist på figur 4.5, som kan vanskeliggøre kvantificeringen af den dominerende bevægelsesretning.



Figur 4.5. Bevægelsesestimeringen på en roterende hændelse.

Den dominerende bevægelsesretning, bestemmes ved at summere alle vektorenes x og y komponenter og derved danne en resulterende vektor. Dette sikrer, at eventuelle outliers, se figur 4.4, ikke påvirker det endelige resultat. Outliers, som dem der observeres på figur 4.4, skyldes, at der i radarbilledet ind i mellem forekommer støj der ikke er blevet fjernet af foregående filtrering eller billeder med meget lidt, eller ingen, nedbør. Yderligere hjælper, denne fremgangsmåde, til at bestemme en generel retning for hændelser som den angivet på figur 4.5. Anvendes fremgangsmåde, med at summere henholdsvis x og y komponenterne, på resultaterne præsenteret på figur 4.4 og 4.5, opnås en dominerende retning på henholdsvis $36,9^{\circ}$ og 334° , hvad der svare til omtrent nordøst og sydøst. Bestemmelsen af den dominerende hastighed, sker ved at midle, de hastighedsfiltrede, hastighedsværdier.

Den almindelige praksis, i forhold til benævnelse af bevægelsesretning, i forhold til vind, er at beskrive hvilken retning vinden kommer fra. Der vælges i dette studie at benævne bevægelse, som den retningen nedbøren bevæger sig imod. Dette gøres, da de efterfølgende analyser, vil sætte bevægelsen relativ til afløbssystemets generelle flowretniger.

4.2.1 Resultater

Ved at påføre den globale vektorestimering, på de 246 hændelser, som beskrevet i kapitel 3, bestemmes følgende fordelinger af henholdsvis dominerende bevægelsesretning, figur 4.6 og midlet hastighed, figur 4.7. Disse værdier kan også findes, for hver enkelt af de 246 hændelser, i appendiks A.



Figur 4.6. Fordelingen af dominerende bevægelsesretning, for de 246 hændelser.

Ud fra figur 4.6 observeres en tendens til, at regnen bevæger sig mod nord/nordøst, hvilket er at forvente i et land som Danmark, hvor en stor del af vinden kommer fra syd/sydvest.



Figur 4.7. Fordeling af den midlet hastighed, for de 246 hændelser.

Modsat fordelingen på figur 4.6, viser figur 4.7 at den midlede hastighed forekommer mere jævnt fordelt.

Fordelingen af bevægelsesretninger, som præsenteret på figur 4.6, vurderes umiddelbart problematisk for den videre analyse. Størstedelen af de retninger, der går imod systemets formodet flowretning, som angivet på figur 4.1, er ikke repræsenteret. Derfor udvikles en metode til at rotere radarbilleder, således det kan afklares om disse retninger giver signifikant anderledes modelresultater, end andre retninger.

4.2.2 Rotation af radarbilleder

Roterring af inhomogene fænomener som nedbørsfelter, der bevæger sig over ligeså inhomogene oplande, forekommer mere vanskeligt end forventet. Roteres et radarbillede, som angivet på figur 4.8, uden nogen form for post-processring, ændres dynamikken af regnhændelsen signifikant.



Figur 4.8. Resultat af roterings proceduren. Billedet til højre viser det originale billede. Det til venstre viser det roterede billede. Den røde kasse angiver modeloplandet til Lynetten.

Figur 4.8 viser et eksempel, på hvordan resultatet af proceduren kan se ud. Det er tydeligt, at store dele af nedbøren er blevet transponeret ud af oplandet, hvilket giver anledning til signifikant ændring af nedbørsdynamikken, som vist på figur 4.9.



Figur 4.9. A realmidlet regnintensitet over Lynetteoplandet for billedet med og uden rotation. Den anvendte rotation er 45°

Figur 4.9 viser således hvordan rotationen af billedet kan ændre på dynamikken drastisk. For at nedsætte denne forskel, udvikles en ny roteringsprocedure, som består af følgende trin.

- 1. Udvælg centerpunkt for rotation.
- 2. Flyt billede rundt stokastisk.

Centerpunktet for rotationen, bliver udvalgt ud fra den radarpixel, der indenfor Lynetteoplandet, har registret mest nedbør i løbet af den pågældende hændelse. Denne

rotation er i sig selv ikke tilstrækkelig til at genskabe den orignale hændelse. Selve roteringen, kan flytte nedbør, enten ind i oplandet eller ud af oplandet. Derfor flyttes alle de pågældende radarbilleder stokastisk rundt, indtil der opnås tilfredsstillende overenstemmelse mellem de originale arealmidlede intensiteter og de roterede. Denne proces optimeres med den genetiske algoritme [Schmitt, 2001]. Den genetiske algoritme, genrerer, stokastisk, et sæt parameter, også kaldet "*populationen*", i den her sammenhæng, hvor meget de pågældende radarbilleder skal transponeres, i henholdsvis x og y retningen, benævnt dx og dy. For hver transponering, sammenlignes den arealmidlede regnintenstet med den originale, ved kryds-korrelation. De bedste dx og dy par, beholdes til næste generation i algoritmen og resten kassseres. Denne process gentages ind til der opnås et optimum. Resultatet af dette kan ses på figur 4.10.



Figur 4.10. A realmidlet regnintensitet over Lynette oplandet, hvor radarbilled et flyttes rundt efter rotation. Den anvendte rotation er 45°

Figur 4.10 viser således resultatet af den endelige rotationsprocedure. Der ses god overenstemmelse mellem den oprindelige dynamik og den rekonstrueret. Dette vurderes at være tilstrækkeligt til at give et godt sammenlignings grundlag for de resterende analyser.

Med bevægelse kvantificeret og roteringsprocedure udviklet, påbegyndes nu analysen af, betydning af regnens bevægelse i forhold til modelrespons.

4.3 Global undersøgelse af regnens bevægelse

Den globale analyse, af regnens bevægelse, skal afklare om der observeres generelle tendenser i modelrespons, afhængig af enten regnens hastighed eller retning. Til dette udvælges nogle parametre, der vurderes at være repræsentative til dette formål. Der vælges samme parametre som i kapitel 3: fraktion af brønde der går over den definerede kritiske kote, vandvolumen, der tilstrømmer rensningsanlægget Lynetten og modelleret overløbsvolumen til recipient. De to sidste parametre, gøres relative i forhold til den mængden vandvolumen, der bruges som input til modellen, således resultaterne bliver sammenlignelige. Det noteres, at resultaterne fra parameteren, fraktion af brønde over kritisk kote, ikke nødvendigvis er retvisende for den resterende del af analyse, da parameteren ikke kan gøres relativ, som de to efterfølgende parametre.

Ved begge analyser, foretages et sæt stokastiske simuleringer, for at udligne de skæve fordelinger, i forhold til retning og hastighed af regnen, som vist på figur 4.6 og figur 4.7. Hvordan disse stokastiske simuleringer bliver genereret, præsenteres i de respektive afsnit. Om der optræder tendenser i de stokastiske simuleringer, vurderes efter to metoder: visuel inspektion af modelresultater og en Kolmogorov–Smirnov test. Udførelsen af Kolmogorov–Smirnov (KS) testen, sker ved at inddele modelresultaterne i forskellige intervaller. Nul hypotesen for denne test, vil således være, at dataene i disse intervaller, stammer fra samme fordeling. Den omvendte hypotese er, at de komme fra forskellige fordelinger. På denne måde vurderes det muligt at analysere om der er tale om tendenser i modelresultaterne, eller blot tilfældighed. Resultaterne af KS testen, for de enkelte parametre kan findes som tabeller i appendiks B

Først præsenteres resultater i forhold til bevægelsesretning og efterfølgende bevægelseshastighed.

4.3.1 Bevægelsesretning

På figur 4.4, ses meget få datapunkter i retningerne syd til nordvest, retninger, som vurderes at være interessante, da dette er modsat den formodede dominerende flowretning i systemet, som vist på figur 4.1. Derfor udføres der et nyt sæt simuleringer, hvor der tilfældigt udvælges en bevægelsesretning, fra en uniform fordeling. Efterfølgende udvælges en af de 246 hændelser tilfældigt, ligeledes fra en uniform fordeling, og denne roteres, med den nyudviklet procedure beskrevet i afsnit 4.2.2, således, at retningen bliver lig med den tilfældigt udvalgte retning. Det vælges at udføre 1000 simuleringer. I forhold til at anvende KS test, for at undersøge efter tendenser, opdeles resultaterne i otte intervaller. Intervallerne følger mønstrene: nord-nordøst, øst-sydøst og så videre.

Fraktion af brønde over kritisk kote

Resultaterne fra de 246 oprindelige hændelser, kan ses på figur 4.11.



Figur 4.11. Andel af brønde, der går over den definerede kritiske kote, i forhold til dominerende bevægelsesretning.

Der observeres, som udgangspunkt, ikke nogen klar relation. Der er tendenser til, at flere brønde går over kritisk kote, hvis den dominerende retning ligger mellem nord og øst, hvis der ses bort fra manglende data i retningen syd til sydvest og de fire hændelser mellem sydvest og nordvest. Der er stærkere tegn på, at opstuvningen i brøndende afhænger mere af spatial variabilitet end selve regnens bevægelsesretning.

Resultatet af de 1000 stokastiske simuleringer, med tilfældigt bestemt retning, præsenteres på figur 4.12.



Figur 4.12. Andele af brønde, der går over den definerede kritiske kote, i forhold til dominerende bevægelsesretning, fordelt efter en uniform fordeling.

Det ses, at mængden af datapunkter, omkring retningerne øst til vest, er blevet signifikant forøget. Til trods for dette, observeres der stadig ikke nogle tendenser, om hvorvidt systemet responderer anderledes i forhold til bevægelsesretningen. Det vurderes derfor, at andre faktorer er dominerende for opstuvning, end regnens bevægelsesretning, som for eksempel, systemkapacitet eller spatial variabilitet. Især den spatiale variabilitet, vurderes som værende en kritisk parameter.

KS testen afslører, som vist i tabel B.1, i appendiks B, at kun få af intervallerne kommer fra samme fordeling. Dette tyder på at, hvis der blev udført flere modelsimuleringer, ville de tendenser der muligvis er tilstede, blive udjævnet. Det vurderes derfor at resultaterne på figur 4.12, fordeler sig tilfældigt.

Vandvolumen til Lynetten

Figur 4.13, præsenterer den relative vandvolumen, der modelleres ved Lynetten, fra de oprindelige 246 hændelser. Der observeres samme mangel på tydelig tendens, som ved den forrige parameter.



Figur 4.13. Relativ afstrømning til Lynetten, i forhold til dominerende bevægelsesretning.

Mangel på relation vurderes til ikke at komme som en overraskelse. Da proceduren, der roterer radarbillederne, replikerer hændelserne efter bedste evne, må det forventes at regninputtet ligeledes vil forekomme, tæt på. uændret. Det eneste der skulle påvirke resultatet, vil være hvis retningen havde betydning for om, hvorvidt systemets kapacitet vil blive opbrugt, hurtigere eller langsommere og derved skabe flere overløb. Ud fra resultatet præsenteret på figur 4.13, vurderes dette ikke til at være tilfældet. Disse tegn observeres endvidere også på figur 4.14, der er resultatet af de stokastiske simuleringer.



Figur 4.14. Relativt afstrømning til Lynetten i forhold til dominerende bevægelsesretning, hvor bevægelsesretningen er fordelt efter en uniform fordeling.

Til trods for, at fordelingen af bevægelsesretningen nu forekommer mere jævnt fordelt, end den angivet på figur 4.13, forekommer resultatet på figur 4.14, uden nogen tendens til, at enkelte retninger, giver signifikant anderledes respons end andre. Det kan derfor ikke entydigt konkluderes, at regnens bevægelsesretning har nogen umiddelbar påvirkning på det tilstrømmende volumen ved rensningsanlægget.

Når KS-testen anvendes på disse data, opnås der den konklusion at dataene fordeler sig tilfældigt, og understøtter derfor den visuelle inspektion. Resultatet af KS-testen kan ses i tabel B.2, i appendiks B.

Overløbsvolumen

Sidste parameter, der undersøges, er relativt modelleret overløbsvolumen, til recipient. Figur 4.15 viser resultaterne af de originale 246 hændelser.



Figur 4.15. Relativt overløbsvolumen i forhold til dominerende bevægelsesretning.

Resultaterne på figur 4.15 forekommer tilfældigt fordelt, uden nogen tydelige relation eller mønstre. Den tætte samling af punkter, omkring retningerne nord til øst, skyldes omstændighederne nævnt tidligere i kapitlet. Dette imødekommes på figur 4.16, hvor resultater fra de 1000 stokastiske simuleringer præsenteres.



Figur 4.16. Relativt overløbsvolumen i forhold til dominerende bevægelsesretning.

Resultaterne, illustreret på figur 4.16, understøtter samme tendens, observeret i de to foregående analyser, at bevægelsesretningen har meget lidt indflydelse på modelresponsen. Yderligere bliver dette understøttet af KS-testen, præsenteret i tabel B.3, i appendiks B.

Delkonklusion af analyse af bevægelsesretning og modelrespons

Alle de tre ovenstående analyser, peger imod, at bevægelsesretningen af regnen ikke influerer på modelresponsen. Ved alle parametre, vurderes de præsenteret resultater at forekomme tilfældigt fordelt uden nogle tegn på tendenser eller mønstre, for hvilke retninger, der kan vurderes til at have signifikant anderledes respons.

Bevægelse blev tidligere i kapitlet defineret både som retning og hastighed. Derfor undersøges det, om der kan observeres relation mellem modelrespons og regnens bevægelseshastighed.

4.3.2 Regnes bevægelseshastighed

Der benyttes samme parametre, som ved analysen af bevægelsesretningen. Modsat bevægelsesretningen, opleves der færre huller i datasættet, jævnfør figur 4.7. Resultaterne forekommer tilnærmelsesvist normalfordelt, omkring en middelværdi på 10 m/s. Det vurderes derfor nødvendigt at foretage et sæt stokastiske simuleringer, lig dem fra afsnit 4.3.1. Da der ikke foreligger en procedure for ændringen af regnens hastighed, opstilles en ny udvælges procedure. Der udtrækkes en tilfældig værdi, i samme spænd som angivet på figur 4.7, fra en uniform fordeling, for regnens hastighed. Den tilfældigt valgte hastighed benyttes til at udvælge en hændelse, der har tilsvarende hastighed. Ligeledes udtrækkes også en tilfældig værdi for bevægelsesretningen, som i forrige afsnit, også fra en uniform fordeling.

Resultaterne præsenteres således, at de originale simuleringer præsenteres og analyseres først. Efterfølgende præsenteres resultaterne for, de 1000 stokastiske generede hændelser og der analyseres om eventuelle tendenser fra de originale simuleringer, videreføres til de stokastiske.

Inden analysen af modelresponsen påbegyndes, udføres en undersøgelse af, arealmidlede døgnnedbør over Lynette oplandet og den midlede hastighed. Det tænkes, at der vil forekomme en tendens, hvor hændelser med lav hastighed, vil opleve større døgnnedbør, da den langsomme bevægelse vil tillade mere nedbør at falde over oplandet. Resultatet af undersøgelsen kan ses på figur 4.17.



Figur 4.17. Regnens midlet bevægelseshastighed i forhold til arealmidlet døgnnedbør.

Det ses, jævnfør figur 4.17, at den ovenstående hypotese bekræftes. Dette resultat vil indgå, når der analyseres på modelresponsen. Derfor vælges det at graduere datapunkterne ud fra bevægelsesretningen, for at undersøge om der forekommer en relation mellem hastighed, retning og modelrespons.

Fraktion af brønde over kritisk kote

Figur 4.18, præsenterer resultaterne for andele af brønde der går over den kritiske kote.



Figur 4.18. Andele af brønde der går over kritisk kote, i forhold til regnens hastighed og bevægelsesretning.

Umiddelbart vurderes det, at der forekommer en tendens, hvor der ved lavere hastigheder

observeres kraftigere respons. Det vurderes, at resultaterne præsenteret på figur 4.17 er forklaring på dette. Der forekommer yderligere, ved visuel inspektion, en tendens, hvor kombinationen af lav hastighed og bevægelse mod nordvest, viser kraftigere respons. Det undersøges om dette er et tilfælde, igennem de 1000 stokastisk genererede simuleringer, hvor hastighed og bevægelsesretning trækkes tilfældigt, som vist på figur 4.19.



Figur 4.19. Andele af brønde der går over kritisk kote, med hastigheder og bevægelsesretning stokastisk genereret fra en uniform fordeling

Af figur 4.19, fremgår samme tendens, som den observeret på figur 4.18, hvor lavere hastigheder viser kraftigere respons. Tendensen med, kombination af specifikke retninger og lave hastigheder, er ikke længere synlig, og tendensen på figur 4.18 vurderes at være forårsaget af tilfældigheder.

Overløbsvolumen

Næste analyse, undersøger sammenhængen mellem hastigheden af regnen og overløb i modellen. Resultatet kan ses på figur 4.20.



Figur 4.20. Relativ overløbsvolumen, i forhold til regnens midlet hastighed

Der forekommer omtrent samme tendens, på figur 4.20 som den konstateret på figur 4.18. Endvidere noteres det også, at der forekommer en tendens, hvor der ved lav hastighed og retninger imod syd til nordvest, som antages at være imod systemets flowretning, angivet på figur 4.1, forekommer de største relative overløb. Hvorvidt dette skyldes fordelingen af bevægelsesretningen, kan ikke endegyldigt udelukkes. Resultaterne på figur 4.21, vil belyse om hvorvidt der er tale om tilfældighed eller en reel tendens.



Figur 4.21. Andele af brønde der går over kritisk kote, med hastigheder og bevægelsesretning stokastisk genereret fra en uniform fordeling

Tendensen med, at lavere hastighed, og kraftigere modelrespons, forsætter på figur 4.21. Når både hastighed og bevægelsesretning, genereres stokastisk, ud fra en uniform fordeling, bliver tendensen, hvor en kombination af lav hastighed og retninger imod den dominerende flowretning, returnerer kraftigere modelrespons, mindre tydelig.

Vandvolumen til Lynetten

Sidste analyse, er vandvolumen der strømmer til Lynetten i modellen. Som ved bevægelsesretningen, forventes det ikke at observere nogle umiddelbar tendens, da roterings proceduren beskrevet i afsnit 4.2.2, som sagt stræber efter at opnå samme dynamik i forhold til original hændelsen. Resultatet kan ses på figur 4.22



Figur 4.22. Relativ vandvolumen modelleret ved Lynetten, i forhold til regnens midlet hastighed.

Som forventet, observeres ikke nogen umiddelbar relation eller tendens, i forhold til regnens hastighed og mængden af vand til Lynetten.



Figur 4.23. Andele af brønde der går over kritisk kote, med hastigheder og bevægelsesretning stokastisk genereret fra en uniform fordeling

Figur 4.23, viser resultatet af de 1000 stokastiske simuleringer. Der vurderes ikke, at forekomme nogen tendens eller mønstre.

4.3.3 Delkonklusion af den globale analyse

To analyser af modelrespons, i forhold til regnens bevægelse, blev foretaget i dette afsnit. Den første gik på at undersøge om der foreligger en relation mellem regnens bevægelsesretning og modelrespons. Der blev ikke konstateret nogen relation. Alle resultater forekom at fordele sig tilfældigt.

I den anden analyse, hvor det efterforskes om der forekommer en relation mellem hastighed og modelrespons, opnås til en vis grad, modsat konklusion. Det vurderes, at der forekommer tendenser hvor lave hastigheder, resulterer i kraftigere modelrespons. Dette kan ikke entydigt konkluderes, da der i samme ombæring også præsenteres, at der forekommer en relation mellem hastighed og arealmidlet døgnnedbør. Ydeligere blev bevægelsesretningen også taget med, i analysen om hastighed og modelrespons, hvor det vurderes at en kombination af lav hastighed og retning mod syd til nordvest, generelt producere kraftigere modelrespons. De stokastiske simuleringer afkræfter denne konklusion, da der ikke vurderes at optræde nogen tendens, og modelresponsen vurderes at fordele sig tilfældigt.

Modellens opbygning kan ikke ignoreres i disse analyser. Da modellen dækker et så stort et område, vurderes det ikke usandsynligt, at modellen i sig selv, midler nogle af de parameter, som blev undersøgt i afsnittet. Endvidere vurderes det, at opbygningen af modellen, hvor rensningsanlægget ligger i midten af oplandet medfører, at systemet som helhed ikke har én klar dominerende flowretning. Derfor vurderes det nødvendigt at udføre en mere lokal undersøgelse af modelresponsen.

4.4 Lokal undersøgelse af regnens bevægelse

I afsnit 4.3, fremstår tegn på, at modellens opbygning, midler de undersøgte parametre, og derfor ikke viser tegn på relation mellem bevægelse og modelrespons. Derfor undersøges modelresponsen på et lokalt plan, da det antages, at udjævningen af responsen vil være mindre signifikant på dette plan. Analysen vil derfor belyse om der kan spores relation mellem bevægelse og modelrespons, når der analyseres på lokale områder i oplandet. Derfor udtrækkes hydrografer fra ledninger opstrøms fra rensningsanlægget, som vist på figur 4.24.



Figur 4.24. De udvalgte ledningsstrækninger. Den røde linje er hovedlinje for det nordlig område. Den grønne linje er hovedlinje for det sydlig område.

Disse ledninger er udvalgt, da de repræsenterer afstrømningen fra henholdsvis den nordlig og sydlig del af oplandet, som vist på figur 4.1.

Inden den lokale effekt af nedbørens bevægelse undersøges, udføres en korrelationsanalyse, af hydrograferne for de to ledninger, præsenteret på figur 4.24. Analysen, foretages ved at køre et sæt simulering, først med original retning og efterfølgende direkte modsat retning. Der udføres herefter en korrelationsanalyse, hvor hydrograferne, for henholdsvis original retningen og den roteret, korreleres, for henholdsvis den nord- og sydlig ledning, således det kan efterforskes om retningen har betydning for den enkelte lednings hydrograf.

Efterfølgende analyseres, relevant data fra hydrograferne. Her vælges det at undersøge: maksimal peakflow værdi på hydrograferne og 60 minutters største vandvolumen, for den nord- og sydlig ledning. For begge analyser, fortages et sæt stokastiske simuleringer, lig dem foretaget i afsnit 4.3, hvor hastighed og bevægelsesretningen er trukket fra en uniform fordeling, således samtlige retninger og hastigheder, inden for grænserne angivet på figur 4.7 og 4.7, er repræsenteret lige hyppigt. Disse analyser sættes i relation til de bestemte retninger og udvalgte hastigheder, således der kan undersøges, om der optræder tendenser eller mønstre i modelresponsen. For analyserne vedrørende bevægelsesretningen, efterforskes eventuelle tendenser ved visuel inspektion af punktdiagrammerne og med KS- test, lignede dem i afsnit 4.3, for samme udvalgte intervaller (N-NØ med NØ-Ø og så videre). Analyserne vedrørende bevægelseshastigheden, gradueres yderligere i forhold til bevægelsesretningen, således det kan efterforskes om kombinationen af visse retninger og hastigheder, viser tendenser på specifik modelrespons. Der præsenteres kun resultater for de stokastiske simuleringer, og ikke de originale 246 kørsler, da der, jævnfør resultaterne i afsnit 4.3, ikke forventes at spore nogen tendens.

Da antallet af undersøgelses parametre i den lokale analyse er væsentlig lavere end dem i afsnit 4.3, præsenteres resulter, i forhold til retning og hastighed sammen.

4.4.1 Sammenligning af udvalgte ledningsstrækninger

Der foretages et sæt indledende analyser, af hydrograferne for de udvalgte strækninger, der skal belyse, om en ændring af bevægelses retningen, vil være tydelig på de udvalgte hydrografer. Der udføres derfor et sæt simuleringer, med original hændelserne, og efterfølgende et sæt, hvor bevægelsesretningen er vendt 180 grader. Et eksempel på sådan en analyse kan ses på figur 4.25.



Figur 4.25. Hydrografer for den nordlig, ledningsstrækning. Den blå streg angiver hydrografen for den originale hændelse. Den orange streg angiver hydrografen for den roterede hændelse. Korrelations-koefficienten, er noteret med "r".

Det er tydeligt, at bevægelsesretningen kan ændre hydrografen betydeligt. Derfor gentages denne procedure for samtlige 246 regndage. Resultaterne for henholdsvis den nord- og sydlig strækning, kan ses på figur 4.26 og 4.27.



Figur 4.26. Resultatet af korrelations analysen for den nordlig ledningsstrækning.



Figur 4.27. Resultatet af korrelations analysen for den nordlig ledningsstrækning.

Resultaterne på figur 4.26 og 4.27 viser, at tendensen der optræder på figur 4.25, kan spottes på andre hændelser. Dette antyder, at retningen kan have indflydelse på hydrografen. For at undersøge signifikansen af forskellen på hydrograferne, udføres en analyse, hvor peak belastninger bliver taget i betragtning. Der vælges at kigge på største volumen akkumuleret over en time, samt peak værdi på hydrograferne. Der udføres nye sæt simuleringer således, bevægelsesretning og hastighed fordeler sig efter en uniform fordeling. På denne facon vurderes, at eventuelle bias, i resultaterne vil blive fjernet, og hvis der skulle forekommer relation mellem bevægelse, både retning og hastighed, og modelrespons, ville disse simuleringer tydeliggøre dem.

Peak vandføring

På figur 4.28 og 4.29, præsenteres de modelleret peak værdier, for vandføringen i de udvalgte ledningsstrækninger.



Figur 4.28. Modelleret peakvandføringer, modeller ved den nordlige ledningsstrækning, i relation til regnens bevægelsesretning.



Figur 4.29. Modelleret peakvandføringer, modeller ved den sydlige ledningsstrækning, i relation til regnens bevægelsesretning.

Der observeres umiddelbart hverken nogen tendens eller relation mellem regnens bevægelsesretning og modelrespons. Det noteres, at på figur 4.28, forekommer to hændelser, der responderer væsentlig krafttigere. Samme respons registeres ikke på figur 4.29, hvorfor det ikke umiddelbart kan afskrives som en modelfejl. Det vurderes dog stadig at forekomme tilfældigt og uden nogen relation til bevægelsen, og anses som outlier, for den resterende analyse. Resultaterne af KS testene, kan ses i appendiks B, i tabel B.4 og B.5. Som udgangs punkt accepteres nulhypotesen i for størstedelen af intervallerne. Dette understøtter udsagnet om, at resultaterne forekommer uden tendens.

På figur 4.30 og 4.31, præsenteres relationer mellem regnes hastighed og modelleret peak vandføring, ved de udvalgte ledningsstrækninger.



Figur 4.30. Modelleret peakvandføringer, modeller ved den nordlige ledningsstrækning, i relation til regnens bevægelsesretning.



Figur 4.31. Modelleret peakvandføringer, modeller ved den sydlige ledningsstrækning, i relation til regnens bevægelsesretning.

I den globale analyse, blev det fastslået at der forekommer en tendens, hvor langsomt

bevægende regn, har større arealmidlet døgnnedbør, jævnfør figur 4.17 og, at modelresponsen generelt er kraftigere. Denne tendens vurderes ikke at optræde på figur 4.30 og 4.31. Generelt vurderes der ikke, at forekomme nogen tendens eller relation på figur 4.30 og 4.31. Ligeledes registreres ingen sammenhæng, hvor bestemte kombinationer af retning og hastighed, giver kraftigere respons.

Samme to peakflow værdier, der variere signifikant fra de andre, som også var tilfældet på figur 4.28, observeres også på figur 4.30. Det mistænkes, at proceduren der roterer radarbillederne, ikke udføre roterringen perfekt, og derfor rotere mere nedbør ind over oplandet. Dette bekræfter tildels konklusionen i den globale analyse, at nedbørens spatiale variabilitet har større indflydelse end selve bevægelsen.

Peak vandvolumen

Der foretages en analyse af maksimal akkumuleret vandvolumen, over en time. Akkumuleringen foretages som en glidende sum. Da den anvendte hydrauliske model, forekommer kompleks og dækker et stort areal, forventes det, at koncentrationstiden, vil forekomme høj. Analysen skal derfor belyse, om der kan observeres tendenser, i forhold til bevægelse, når der observeres over en længere varighed, end blot et enkelt tidsskidt, som var tilfældet i den foregående analyse. Resultaterne for peak vandvolumen, ved en akkumulering på 60 minutter, præsenteres på figur 4.32 og 4.33.



Figur 4.32. Maksimal time volumen modelleret ved den nordlig ledningsstrækning, i forhold til bevægelsesretningen.



Figur 4.33. Maksimal time volumen modelleret ved den sydlig ledningsstrækning, i forhold til bevægelsesretningen.

Modelresponsen, illustreret på henholdsvis figur 4.32 og 4.33, har omtrent samme struktur. Der observeres ingen mønstre i forhold til respons og bevægelsesretning. Der observeres ved enkelte retninger, for eksempel retninger mellem øst og sydøst, snævre spænd i modelrespons. Dette vurderes at være forårsaget af, mængden af simuleringer. Den generelle struktur af responsen forekommer tilfældig, så hvis flere simuleringer blev foretaget, ville disse spænd sandsynligvis udjævnes, og optage samme tilfældige struktur som resten af datasættet. Resultaterne af KS testene, kan ses i appendiks B, i tabel B.6 og B.7. Ligeledes, observeres det, at de fleste intervaller accepterer nulhypotesen, hvorfor det formodes at alle intervaller kommer fra samme fordeling. Dette vurderes derfor at understrege den manglende tendens.

Ligeledes foretages samme analyse for regnens bevægelseshastighed og modelrespons, hvor datapunkterne gradueres efter bevægelsesretningen. Disse resultater kan ses på figur 4.34 og 4.35.



Figur 4.34. Maksimal time volumen modelleret ved den nordlige ledningsstrækning, i forhold til bevægelsesretningen. Datapunkterne er gradueret i forhold til bevægelsesretningen.



Figur 4.35. Maksimal time volumen modelleret ved den sydlige ledningsstrækning, i forhold til den midlede hastighed. Datapunkterne er gradueret i forhold til bevægelsesretningen.

Det vurderes, at der ikke optræder nogen relation på figur 4.34 og figur 4.35. Mønsteret med at lave hastigheder giver kraftigere respons forsætter dog, men forventes at skyldes forholdende, som beskrevet i den globale analyse.

4.5 Opsamling

Dette kapitel har beskæftiget sig hovedsagligt, med analysen af nedbørsfeltets bevægelse, og effekten af denne i hydrauliske afløbsmodeller. Afsnittet forsøger at svare på punkt 3, af de opstillede forskningsspørgsmål i kapitel 1, som lød:

• Hvad betyder regnens bevægelsesretning og -hastighed for den modellerede afstrømning i afløbssystemet globalt og lokalt?

For at svare på spørgsmålet, blev kapitlet delt op i to hovedanalyser. En analyse af modelresponsen på global plan, efterfulgt af lokale analyser af modelresponsen.

Inden analyserne blev foretaget, blev der implementeret en procedure til at kvantificere regnens bevægelse, med henblik på retning og hastighed. Resultaterne af denne analyse, viste at regnen generelt bevæger sig mod nordøst, jævnfør resultaterne på figur 4.7. For at udligne dette, blev der udviklet en metode til at roterer radarbilleder, således alle retninger kunne repræsenteres i de efterfølgende analyser.

Den globale analyse blev yderligere inddelt i diverse underanalyser. For at måle responsen, blev der anvendt tre hovedparameter: andele af brønde over kritisk kote, modelleret afstrømning til Lynetten og modeller overløb til recipient. Den første af disse gik på at undersøge responsen i forhold til nedbørsfeltets bevægelsesretning. Her blev det klart, at der ikke forekommer nogle sammenhæng mellem bevægelsesretningen af regnen og modelrespons, jævnfør resultaterne på figur 4.12, 4.14 og 4.16. Den efterfølgende analyse, gik på at sammenholde regnens hastighed, med modelresponsen. Her forekommer en tendens, at lav hastighed forårsager kraftigere modelrespons, jævnfør resultaterne på figur 4.19, 4.21 og 4.23. Dette vurderes dog at være forårsaget af, at hændelser med lav hastighed, oftest vil have høj hændelsesnedbør, da den lave hastighed tillader mere nedbør at ramme oplandet. Det vurderes derfor at der ikke forekommer nogle tydelig tendens.

Efterfølgende blev der udført analyser på et mere lokalt plan. Her blev der udvalgt to ledningsstrækninger, hvis hydrografer undergik tre forskellige analyser. Den første analyse, undersøgte effekten af drastisk ændring af regnens bevægelsesretning, igennem en korrelationsanalyse. Her blev det klart, jævnfør resultaterne på figur 4.26 og 4.27, at en drastisk ændring af bevægelsesretningen, kan have signifikant effekt på strukturen af hydrografen. Efterfølgende blev peak vandføringer undersøgt, i forhold til retning og hastighed. Der observeres ikke nogle relation eller tendens, jævnfør resultaterne på figur 4.28 og 4.29, på at bestemte retninger skulle forårsage signifikant forskellige værdier. Det samme gælder for hastigheden, jævnfør figur 4.30 og 4.31. Den sidste analyse, undersøgte peak vandvolumen, over varigheden 60 minutter. Denne analyse viste ingen tegn på tendens eller relation i forhold til retning eller hastighed, jævnfør figur 4.32, 4.33, 4.34 og 4.35.

ANALYSE AF REGNENS SPATIALE VARIABILITET

De foregående analyser, i kapitel 3 og 4, viser tegn på at den spatiale fordeling af nedbøren, kan have signifikant betydning for hvordan hydrauliske afløbsmodeller responderer. Dette kapitel foretager analyser af nedbørsfeltet spatiale variabilitet på et statistisk plan. Efterfølgende anvendes hændelser, med bevaret spatial fordeling, som input til den udleverede MIKE Urban model og effekten af den spatiale variabilitet undersøges.

5.1 Antagelser og forudsætninger

I kapitel 4, blev regnens bevægelsesmønstre analyseret og om hvorvidt dette havde indflydelse på modelresponsen. Konklusion blev, at modellen responder ens, uagtet bevægelse. Under udførelsen af analysen, blev der observeret tendenser, hvor modellen kan responder forskelligt afhængigt af regnens spatiale variabilitet. Dette kapitel vil derfor udføre tre analyser, der vil undersøge den spatiale variabilitet af regnen og hvordan effekten af denne kan observeres i den udleverede hydrauliske afløbsmodel.

Til disse analyser, opstilles følgende antagelser og forudsætninger.

- Der benyttes data fra Stevns radaren, som beskrevet i kapitel 2.
- Der benyttes MIKE Urban modellen, der dækker over rensningsanlægget Lynettens opland, som beskrevet i kapitel 2.
- Metoden, stokastisk transponering af regnhændelser, anvendes til at vurdere effekten af nedbørens spatiale variabilitet. Metoden præsenteres i afsnit 5.2.1, med tilhørende antagelser og forudsætninger.
- Der kan identificeres enkeltstående hændelser, i de udleverede radarsæt, ved blot at observerer den arealmidlede regnintensitet. Fremgangsmåden for dette præsenteres i afsnit 5.2.

Den første analyse går på at efterforske variabiliteten af nedbørsfeltet, på to niveauer. Først undersøges, hvordan nedbøren fordeler sig indenfor selve modeloplandet. Efterfølgende undersøges hvor meget nedbørsfeltet kan varierer, inden for et område der er signifikant større end modeloplandet. Analysen vil belyse, om de hændelser der originalt blev registreret over Lynnetten oplandet repræsenterer et "*worst case*" scenarie eller om nedbørsfeltet indeholder hændelser der forekommer mere kritiske end de originalt observerede.

Den efterfølgende analyse, undersøger om den spatiale fordeling af nedbørsfeltet, kan udnyttes, således der kan genereres statistik for ekstremnedbøren, der går udover den oprindelige observationsperiode, ved brug af den stokastiske transponering af regn. Dette foregår i forlængelse af den forrige analyse, hvor der identificeres hændelser, i de udleverede radarbilleder, der ikke nødvendigvis faldt over Lynetteoplandet. Denne analyse vil derfor yderligere bekræfte om de hændelser, statistisk set, kunne være faldet over Lynette oplandet i stedet.

Den sidste analyse, vil koble dele af de to foregående analyser sammen, således der kan genreres stokastiske regnhændelser, med samme volumen, således effekten af den spatiale variabilitet, kan observeres i den udleverede hydrauliske afløbsmodel.

Inden analyserne foretages, præsenteres de to metoder, der anvendes i kapitlet.

5.2 Metode

Metoderne der anvendes i dette kapitel forklares i dette afsnit. Der anvendes en procedure, kaldet "*Stochastic Storm Transposition*" (SST), som beskrevet i Wright et al. [2013]. Yderligere udvikles en procedure, til at identificere hændelser, i de 246 udvalgte regndage, fra kapitel 3. Dette anvendes i sammenhæng med SST proceduren, til at kunne, stokastisk, generer et større antal hændelser, med forskellige karakteristika, så som: regnvarighed, intensiteter og hændelsesnedbør, samtidig med at den spatiale fordeling af nedbøren bevares.

5.2.1 Stokastisk transponering af regn

Stokastisk transponering af regnhændelser ("*Stochastic Storm Transposition*", SST), bruges som et middel til at rekonstruer en langsigtet statistik af ekstremnedbør, over et givent opland [Wright et al., 2013]. Metoden præsenteres i [Wright et al., 2013], men en forklaringen af proceduren, samt valg og antagelser, beskrives i dette afsnit. Figur 5.1, skitserer den overordnet struktur af proceduren.


Figur 5.1. Fremgangsmåde for SST proceduren.

Valget af spatialt domæne er underlagt to krav. Domænet skal indeholde oplandet, der ønskes at bestemme statistik for og ekstremnedbørs klimatologien bør forekomme homogen. Valget af domæne, falder på et område af $900 \,\mathrm{km}^2$, centreret omkring rensningsanlægget Lynettens opland, se figur 5.2.



Figur 5.2. Udvalgt spatialt domæne. Den røde kasse er model området. Den blå stiplede linje er det udvalgte spatiale domæne.

For at bestemme hvorvidt klimatologien over det udvalgte domæne forekommer homogent, kan forskellige parametre benyttes, for eksempel: årsnedbær, antallet af regnhændelser etc. Det antages i dette studie, at klimatologien er homogen.

Det vælges at medtage samtlige 246 regndage, som beskrevet i kapitel 3, i stormkataloget for dette studie. I Wright et al. [2013] vælges det at lave et katalog for udvalgte regnintensiteter med specifikke varigheder. De anvendte radardata i Wright et al. [2013], dækker et væsentlig større område, end dem anvendt i dette studie. Derfor var det nødvendigt at lave forskellige stormkataloger for forskellige hændelsestyper. Dette er ikke tilfældet for dette studie, hvorfor det vurderes validt at tilføje samtlige 246 regndage til stormkataloget.

Da det er antaget, at klimatologien for det udvalgte spatiale domæne, forekommer homogent, kan det endvidere antages at en regnhændelse kan falde, med lige stor sandsynlighed, andet steds over det valgte domæne. Derfor transponeres den tilfældigt udvalgte hændelse, en tilfældig værdi, trukket fra en uniform fordeling (± 15 km), for henholdsvis x og y retningen. Et eksempel på transponeringen kan ses på figur 5.3.



Figur 5.3. Eksempel på den stokastiske transponering af regnen. Den blå stiplede linje, angiver det udvalgte spatiale domæne. Den røde kasse angiver modelområdet. De sorte cirkler, med markede linjer, illustrerer bevægelsen af den originale regnhændelse. De sorte cirkler, med stiplede linjer, illustrerer den transponerede hændelse.

Alle tidsskridt i hændelsen transponeres med samme værdi, således udbredelsen af nedbøren er det eneste der er ændret, i forhold til den oprindelige hændelse. Der påføres yderligere den roterrings procedure, som beskrevet i kapitel 4. Der antages samme fordeling af bevægelsesretninger, som den angivet på figur 4.6 i kapitel 4.

Der udregnes statistik for følgende parametre:

• Regnintensiteter over varighederne: 10, 60 og 1440 minutter.

Disse parametre vurderes at være relevante for afløbstekniske formål.

Antallet af årlige regnhændelser, udtrækkes tilfældigt fra en Poisson fordeling, med $\lambda = \frac{m}{n}$, hvor m er antallet af regnhændelser i stormkataloget og n er antal år der registreret nedbør. Dette giver et gennemsnit af hændelser pr. år på $\lambda = \frac{246}{n} \approx 17$.

Af totale antal år, der skal udtrækkes værdier for, vælges der 100 år. For hver af de 100 år, udtrækkes et årligt maksima, som benyttes til at bestemme gentagelsesperioder, for de udvalgte statistiske parametre. I dette studie vælges det at bestemme gentagelsesperioden, ved at rangere hændelser fra størst til lavest, således den største hændelse antages at have en gentagelsesperiode på 100 år, den næst største på 50 år og så fremdeles.

5.2.2 Udvælgelse af regnhændelser fra radarbilleder

I kapitel 3, udvælges 246 hændelser. Disse foreligger som regndage, men blev betraget som hele hændelser. I dette afsnit, præsenteres en procedure for at identificere enkeltstående hændelser i disse 246 radardage. Denne procedure kan efterfølgende kobles sammen med SST proceduren, således der kan genreres signifikant flere hændelser, ud af et begrænset datasæt, i forhold til observationsperioden.

I Danmark, anvendes SVK hændelsesdefinition for det pågældende regnmåler netværk [Spildevandskommiteen, 2018]. Konceptet videreføres til bestemmelse af hændelser med spatialt fordelt regn. Det vælges at betragte regnen som et middel af regneintensiteter over Lynette oplandet, som vist på figur 5.4.



Figur 5.4. Eksempel på arealmidlede regnintensitet.

Som det angår af figur 5.4 kan der anes hændelser, i løbet af det pågældende regndøgn. En direkte hændelsesdefinition, vanskeliggøres grundet meget lav intens regn eller støj i radarbilledet. Der observeres derfor få tidsskridt, hvor regnintensiteten antager en absolut nulværdi. Det vælges derfor, at en hændelse starter når der observeres en areamidlede regnintensitet på $0.3 \,\mathrm{mm/time}$. Det vælges, at hændelsen slutter, når der sammenhængende, registreres arealmidlede regnintensitet på under $0.3 \,\mathrm{mm/time}$, i 60 minutter. Et eksempel kan ses på figur 5.5



Figur 5.5. Eksempel på hændelse identificering.

Som det fremstår på figur 5.5, opfanger proceduren udover, hændelser der vurderes at være relevante, også hændelser, der mistænkes at være støj. I det videre forløb, sorteres hændelser fra, der genrerer mindre en 1 mm nedbør. Med denne hændelsesdefinition, identificeres 403 enkeltstående hændelser, i de alt 246 regndage.

5.3 Analyse af spatial variabilitet af nedbørsfeltet

Dette afsnit vil undersøge den spatiale variabilitet af nedbørsfeltet i to stadier. Først undersøges hvor meget nedbøren kan varierer indenfor Lynettens modelopland. Efterfølgende vil det undersøges hvor meget nedbøren kan varierer inden for det valgte spatiale domæne, som angivet på figur 5.2.

5.3.1 Variabiliteten af nedbørsfeltet, indenfor Lynetteoplandet

Spatial variabilitet kan være svært at kvantificerer ned til én parameter. På figur 5.6, præsenteres et ensemble af regnintensiteter for samtlige radarpixels, indenfor Lynettens modelopland, for en enkelt hændelse den 2. juli 2011.



Figur 5.6. Ensemble for regnintensiteter i modeloplandet. Den markerede røde streg angiver middel regnintensiteten. De stiplede linjer angiver. CV angiver variationskoefficienten, for hændelses 10 minutters intensiteter.

Variationskoefficienten på figur 5.6, antyder lav spatial variabilitet. Dette udsagn er til en hvis grad også understøttet af ensemblet på figur 5.6. Det ses, at spredningen fra middelværdien og til 95% fraktilen er relativ lille. Der forekommer enkelte pixels, der varierer signifikant fra middelværdien, hvilket kan være tegn på, at den spatiale variabilitet muligvis er højere end hvad variationskoefficienten viser. Figur 5.7, viser den spatiale fordeling af 10 minutters intensiteten, indenfor modeloplandet, for et enkelt tidsskidt, fra samme hændelse, som vist på figur 5.6.



Figur 5.7. Maksimal 10 minutters intensiteter, for samtlige pixels indenfor Lynette oplandet.

For at undersøge variabiliteten indenfor modeloplandet yderligere, bestemmes maksimal 10 minutters intensitet, for alle radarpixels. Efterfølgende bestemmes bestemmes middelværdi og spredning for, de udregnede 10 minutters intensiteter, hvilket benyttes til at bestemme variationskoefficienten. Dette vil give indblik i hvor meget, 10 minutters intensiteten varierer indenfor modeloplandet. Dette gentages for alle 403 hændelser. Resultatet af dette kan ses på figur 5.8.



Figur 5.8. Variationskoefficienter for de 403 hændelsers maksimal 10 minutters intensitet.

En lav variationskoefficienten, tyder på at spredningen på datasættet er relativ lav, i forhold til middelværdien og omvendt illustrerer en høj variationskoefficient, at spredningen, relativt til middelværdien er høj. Derfor vurderes det, at lave variationskoefficienter er tegn på jævnt fordelt regn. Omvendt vil høje variationskoefficienter være tegn på nedbør, med høj spatial variabilitet. Resultaterne på figur 5.8, viser derfor at nedbøren, i overvejende grad forekommer jævnt fordelt. Spredningen forekommer væsentlig, hvilket tyder på enkelte hændelser forekommer med stor spatial variabilitet.

Resultaterne på figur 5.8 og 5.6, viser at der er væsentlig spatial variabilitet til stede i nedbørsfeltet. Det vurderes nødvendigt at tage forbehold for denne variabilitet i de resterende analyse for kapitlet. Dette gøres ved at midle de valgte statistiske parametre (10, 60 og 1440 minutters intensitet), som et vægtet middel. Denne vægtede middel, sker ved at udregne vægtningsgrader ud fra maksimal værdien, af den parametre der undersøges, således at maksimal værdien af den pågældende parameter vægtes 100%, en intensitet halvt så stor som maksimalværdien vægtes 50% og så fremdeles. Dette sikre at lave 10 minutters intensiteter, som dem vist på figur 5.7, ikke forstyrrer de efterfølgende analyser. Et eksempel på betydningen kan ses på figur 5.9.



Figur 5.9. Eksempel på, hvordan analysen af 10 minutters regnintensitet ville se ud, med og uden vægtning af intensiteten.

Som det fremgår af figur 5.9, ville en almindelig middel af parameteren, signifikant underestimerer intensiteten. Derfor anvendes denne metode i den resterende del af kapitlet, når der analyseres på arealvægtede regnparametre.

Dette konkluderer analysen af den spatiale variabilitet inden for Lynetteoplandet. Efterfølgende udføres en analyse, hvor SST metoden, beskrevet i afsnit 5.2, anvendes på de oprindelige 246 regndage.

5.3.2 Variabiliteten af nedbørsfeltet indenfor det spatiale domæne

Denne analyse vil belyse, hvor stor den spatiale variabilitet af nedbørsfeltet er, indenfor det valgte spatiale domæne. SST proceduren modificeres således, at der ikke udføres et specifikt antal hændelser pr. år, men metoden anvendes på de originale hændelser kronologisk. Det vælges at gentage dette for 500 realiseringer. Resultaterne fra hver realisering rangeres fra største værdi til laveste værdi, og gentagelsesperiode, for resultaterne, bestemmes herefter. Det noteres at gentagelsesperioden ikke i sig selv indeholder nyttig information, og blot anvendes til at præsenterer resultater. Der præsenteres resultater for arealvægtede regnintensiteter, over Lynetteoplandet, ved varighederne: 10, 60 og 1440 minutter, således den totale spredning kan undersøges. Der præsenteres først resultater, for 10 minutters intensiteterne.



Figur 5.10. Empiriske bestemte gentagelsesperioder, for regnintensiteter ved 10 minutters varighed. De blå linje angiver de 500 realiseringer, fra den modificerede SST analyse. Den røde linje angiver middelværdien for de 500 realiseringer. Den grønne linje angiver resultatet for det originale datasæt.

Figur 5.10, viser således resultatet af den modificerede SST metode, for 10 minutters regnintensiteterne. Generelt ligger de originale data over middlen af de 500 realiseringer. Yderligere ligger de originale data generelt væsentlig højere end SST realiseringerne ved de lave gentagelsesperioder. Omkring en gentagelsesperiode på 4 år, observeres der en stagnering af de orignale data, hvilket antyder at der maksimalt er registeret en regnintensitet på omkring 60 mm/time. SST realiseringerne afslører, at nedbørsfeltet indeholder kraftigere hændelser, end dem der er obseveret over Lynetteoplandet, i det oprindelig datasæt.

Den spatiale variabilitet af nedbørsfeltet, inden for det valgte spatiale domæne, bliver ligeledes tydeliggjort på figur 5.10. Især ved gentagelsesperioder på over 2 år, begynder spredningen på realiseringerne at bliver markante.

Samme tendenser observeres på figur 5.11, der præsenterer resultaterne for regnintensiteter ved en varighed på 60 minutter.



Figur 5.11. Empiriske bestemte gentagelsesperioder, for regnintensiteter ved 60 minutters varighed. De blå linje angiver de 500 realiseringer, fra den modificerede SST analyse. Den røde linje angiver middelværdien for de 500 realiseringer. Den grønne linje angiver resultatet for det originale datasæt.

Ligeledes ses det på figur 5.11, at de originale data, generelt ligger over middle værdien, for de 500 realiseringer. Der observeres ingen stagnering af intensiteten, af det originale datasæt, som på figur 5.10, hvilet antyder at de originalt registreret hændelser, har repræsenteret et relativt kritisk scenarie, når det angår 60 minutters regnintensitet.

Der observeres yderligere relativ stor spatial fordeling af nedbørsfeltet, inden for det spatiale domæne. Spredningen vurderes dog væsentlig mere snæver, end den observeret på figur 5.10, hvor der observeres væsentlig spredning på de høje gentagelsesperioder.

Sidste parameter der analyseres, er regnintensitet, ved en varighed på 24 timer, præsenteret på figur 5.12.



Figur 5.12. Empiriske bestemte gentagelsesperioder, for regnintensiteter ved 24 timers varighed. De blå linje angiver de 500 realiseringer, fra den modificerede SST analyse. Den røde linje angiver middelværdien for de 500 realiseringer. Den grønne linje angiver resultatet for det originale datasæt.

Det ses igen, at de originale data, ligger over middelværdien for realiseringerne, hvilket understøtter det førnævnte udsagn om, at de oprindelige data har repræsenteret et relativt kritisk scenarie.

Ligeledes på figur 5.12, observeres der stor spredning på realiseringerne, hvilket antyder spatial variabilitet i nedbørsfeltet.

Figur 5.10, 5.11 og 5.12, viser alle signifikant spredning på alle realiseringerne. Dette tolkes som, at set på det spatiale domæne, forekommer der væsentlig variabilitet af nedbørsfeltet. Dette betyder endvidere, at der i det totale nedbørs felt, kan identificeres flere hændelser, end dem der nødvendigvis faldt over Lynetteoplandet. Om dette er tilfældet undersøges i afsnit 5.4.

5.4 Validering af SST statistik

Resultaterne fra afsnit 5.3 viste, at SST metoden, kunne identificerer flere hændelser over Lynetteoplandet, end oprindeligt observeret. I dette afsnit, vil statistik genereret ud fra SST metoden, blive sammenlignet med statistik fra de opstillede SVK regnmålere i Lynetteoplandet og statistik fra SVK's skrift 30. Det vurderes derfor, at SST metoden kan genererer stokastiske, men sandsynlige, hændelser, hvis den kan reproducere samme nedbørsstatistik, som udvalgte SVK regnmålere og SVK's regionsregnerækker for Lynetteoplandet. Det vælges at sammenligne med station: 5765, 5755, 5740, 5710 og 5694, som angivet på figur 2.7. Disse vælges, da observationsperioden for disse er på mindst 30 år. Regnintensiter fra disse stationer, rangeres fra størst til lavest værdi, og gentagelsesperioden bestemmes herefter. Statistik fra SVK skrift 30, præsenteres som regninstesiteter for gentagelsesperiode fra 1 til 100 år og med tilhørende 95% konfidensintervaller.



Figur 5.13. Gentagelsesperioder for 10 minutters regnintensitet. De blå streger angiver alle SST realiseringer. Den markerede røde streg, medianen for SVK statistikken og de stiplede linjer angiver 95% konfidensintervallet.

Figur 5.13, præsenterer resultaterne for intensiteter, med en varighed på 10 minutter. Det ses at, ved lave gentagelsesperioder, underestimerer SST proceduren regnintensiteten, sammenlignet med SVK målerne og SVK statistikken. Dette antages at være forårsaget af den spatiale variabilitet, der forekommer mellem radarpixel og regnmålere, som beskrevet i kapitel 3. Det vurderes endvidere også at være forklaringen på hvorfor der forekommer signifikant forskel på SST statistikken og statistikken for SVK målerne. Ved højere gentagelsesperioder, falder SST statistikken indenfor konfidensbåndet for SVK statistikken. Ligeledes ligger statistikken, for de udvalgte regnmålere, inden for SST realiseringerne.



Figur 5.14. Gentagelsesperioder for 60 minutters regnintensitet. De blå streger angiver alle SST realiseringer. Den markerede røde streg, medianen for SVK statistikken og de stiplede linjer angiver 95% konfidensintervallet.

Figur 5.14, viser statstikken for 60 minutters regnintensitet. Modsat resultaterne på figur 5.13, forekommer der bedre overenstemmelse, ved de lave gentagelsesperioder, i forhold til SST, SVK og regnmåler statistik. Det observeres også, at fire ud af fem regnmålere ligger indenfor SST realiseringerne. Yderligere ligger SVK medianen også indenfor SST statistikkens konfidensinterval, især ved de lave gentagelsesperioder. Ved de højere gentagelsesperioder, 20 år og op, overestimerer SST statistikken intensiteterne, i forhold til SVK statistikkens median, men ligger stadig inden for konfidensintervallet, med kun få realiseringer uden for SVK statistikkens konfindensinterval.



Figur 5.15. Gentagelsesperioder for 1440 minutters regnintensitet. De blå streger angiver alle SST realiseringer. Den markerede røde streg, medianen for SVK statistikken og de stiplede linjer angiver 95% konfidensintervallet.

Figur 5.15, præsenterer statistikken for den sidste parameter, regnintensitet af varighed på 24 timer. Der observeres overenstemmelse, mellem alle datasæt. Dette var at forvente, jævnfør resultaterne i kapitel 3, hvor det blev konkluderet at radar og regnmålere, er tæt på identiske over lange varigheder.

5.5 Effekt af spatial variabilitet i hydraulisk modellering

I dette afsnit, anvendes spatial fordelt nedbør, som input til den udleverede MIKE Urban model. Lignende analyse blev foretaget i kapitel 3, hvor regninput fra radar og regnmålere sammenlignes, og effekten af modelresultater undersøges. Her bekræftes det, at den spatiale fordeling af nedbøren, kan have en hvis betydning for modelresponsen, når der sammenlignes med jævnt fordelt nedbør. Analysen i dette afsnit, adskiller sig ved, at fokuserer mere på betydningen af den spatiale fordeling af nedbøren. Radarhændelses identifikations proceduren, som beskrevet i afsnit 5.2, koblet med SST proceduren, anvendes til at genererer et sæt antal stokastiske hændelser. Hændelserne genereres således, de alle har samme arealmidlet hændelsesnedbør. Dette skal belyse om den spatiale fordeling af nedbørsfeltet, kan resulterer i signifikant forskellig modelrespons. Det vælges at generere 100 hændelser, stokastisk, for hændelsesnedbør på 5 mm. Denne værdi vælges, da dette er den mængende nedbør afløbssystemer forventes at kunne håndtere, i forhold til overløbsvolumen til recipient. Det vælges at holde nedbørsvolumen, som den eneste faste parameter, og de stokastiske hændelser, vil derfor være af forskellige varigheder og regnintensiteter. Derfor forventes der spredning i modelresultaterne. For at bekræfte, spredningen er forårsaget af den spatiale fordeling, og ikke den tidslige dynamik af nedbøren, udføres et sæt simuleringer, hvor hændelser fra en enkelt SVK målern bruges som input. Dette sørger for, at den tidslige dynamik er bevaret, men der forekommer ingen spatial fordeling af nedbøren. Der vælges hændelser, hvor

fordelingen af nedbørskarakteriska (10, 60 minutters intensiteter og varighed), matcher de stokastisk genereret, således resultaterne bliver sammenlignelige. Ligeledes matcher hændelsesnedbøren fra den udvalgte SVK måler, som anvendes til det jævnt fordelte input, de samme 5 mm.

Disse hændelser, anvendes som regninput i den udleverede MIKE Urban model. Modelresponsen måles på de samme parametre, som blev benyttet i kapitel 3 og 4: Andele af brønde der går over kritisk kote, afstrømning til Lynetten og modelleret overløb til recipient. Yderligere præsenteres også resultater for total modelleret afstrømmet volumen. Da udvælgelseskriteriet for de stokastisk genereret hændelser, bygger på arealmidlet nedbør, er det ikke garanteret, at der modelleres samme afstrømmet volumen, for alle hændelserne. Derfor vurderes det nødvendigt at præsentere resultater for den totale afstrømning, således det kan konkluderes om spredning i de udvalgte parametre, er forårsaget af spatial fordeling af nedbøren, eller blot volumen forskelle.

Resultater præsenteres først med, relative frekvens histogrammer af modelresultaterne, for de kørsler med spatialt regninput. Endvidere præsenteres middelværdi, standardafvigelse og variationskoefficenterne for disse kørsler, således den totale spredningen af modelresultaterne kan undersøges. Efterfølgende præsenteres resultater for kørsler, med jævnt fordelt regninput, sammen med resultater af den spatial fordelt regninput i et "*boksplot*". Boksplottet viser datasættenes medianværdi, angivet med en rød streg. Boksens øvre- og nedregrænse repræsenterer henholdsvis 25- og 75% fraktilen af datasættet. Halerne på boksplottet, markede med stiplede linjer, viser maksimal og minimum værdier i datasættet, som ikke betragtes som outliers. Punkter, der betrages som outliers, markeres med et kryds. Et punkt bliver betraget som outlier, hvis dette ligger 1,5 gang væk fra den interkvantile rækkevidde (boksens grænser).

De første resultater der præsenteres, er modelleret afstrømning, vist på figur 5.16. Disse resultater bruges som reference punkt, for de resterende analyser.



Figur 5.16. Fordeling af modelleret afstrømning, af de stokastiske hændelser. Middelværdi er angivet med μ . Spredning er angivet med σ . Variationskoefficienten er angivet med CV.

Figur 5.16 præsenterer fordelingen af modelleret afstrømning i modellen, med de stokastiske hændelser som regninput. Spredningen på datasættet, bekræfter mistanken om, at den arealmidlede nedbør ikke nødvendigvis repræsenterer den totale modelleret afstrømning. Tiltrods for dette, illustrerer variationskoefficienten, at spredningen på datasættet er relativ ubetydelig. Det vurderes derfor som udgangspunkt at variation i modelresultaterne, vil være forårsaget af nedbørens spatiale fordeling.

På figur 5.17, præsenteres boksplottet, for resultaterne med spatialt og jævnt fordelt nedbør.



Figur 5.17. Boksplot af modelleret total afstrømning, for henholdsvis spatialt fordelt nedbør (venstre) og jævnt fordelt nedbør(højre).

Ud fra resultaterne på figur 5.17, vurderes det, at kørslerne med henholdsvis spatialt og jævnt fordelt nedbør, er foretaget med omtrent samme vandinput. Dette muliggøre det at sammenligne de relevante modelresultater, således eventuelle spredning kan antages at være forårsaget af regninputtets spatiale fordeling.

Figur 5.18, præsenterer resultaterne for andele af brønde over kritisk kote, for spatial fordelt nedbør.



Figur 5.18. Fordeling af brønde over kritisk kote, med spatialt fordelt nedbør. Middelværdi er angivet med μ . Spredning er angivet med σ . Variationskoefficienten er angivet med CV.

Sammenlignes variationskoefficienten på figur 5.18 med den på figur 5.16, ses der signifikant forskel. Dette vurderes at betyde, at den spatiale fordeling af nedbøren, kan forårsage væsentlig forskellige modelrespons, til trods for samme input volumen. For at efterforske om denne spredning på resultatet er forårsaget af nedbøren spatiale fordeling, sammenlignes med resultater fra jævnt fordelt regninput. Dette præsenteres på figur 5.19



 $\label{eq:figur 5.19.} \textit{Figur 5.19.} \textit{Modelleret brønde over kritisk kote, for henholdsvis spatialt fordelt nedbør (venstre) og jævnt fordelt nedbør(højre).}$

Median værdierne, for de to datasæt, angivet på figur 5.19, er omtrent identiske, hvor imod spredning forekommer forskellige. Der observeres større spredning for den spatialt fordelte nedbør. Det vurderes at denne parameter er sensitiv overfor for høj intense regn. Derfor vil regninput fra regnmålere indføre bias i resultaterne, når der sammenlignes med input fra radar, da regnmålere generelt registrerer højre intensiteter, især ved lavere varighed, som beskrevet i kapitel 3. Derfor vurderes det, at den spatiale fordeling har signifikant indflydelse på modelresponsen, da spredningen forekommer mere væsentlig, end ved den jævnt fordelte regn.

Næste parameter der analyseres, er afstrømning til Lynetten. Figur 5.20 illustrer resultaterne, med spatial fordelt regninput.



Figur 5.20. Fordeling af modelleret afstrømning til Lynetten, med spatialt fordelt nedbør. Middelværdi er angivet med μ . Spredning er angivet med σ . Variationskoefficienten er angivet med CV.

Der observeres stor spredning af resultaterne jævnfør en variations koefficient på ca. 33%, hvilket, antyder at den spatiale fordelingen af nedbøren har signifikant betydning for modelresponsen. Den høje variationskoefficient, sammenlignet med den på figur 5.16 antyder, at den spatiale fordeling af nedbøren, kan forårsage væsentlig spredning i modelresultaterne. Resultaterne på figur 5.21, undersøger dette udsagn dybere.



Figur 5.21. Modelleret afstrømning til Lynetten, for henholdsvis spatialt fordelt nedbør (venstre) og jævnt fordelt nedbør(højre).

Betydningen af den spatiale fordeling, bliver forstærket ud fra resultaterne præsenteret på

figur 5.21. I og med, det antages at det totale regn volumen for de to sæt simuleringer, forekommer ens, vurderes det derfor, at den spatiale fordeling af nedbøren har betydelig effekt for modelresponsen. Dette vurderes, da spredningen af dataene, for den spatial fordelte regn, forekommer væsentlig mere signifikant end den observeret, for den jævnt fordelte regn.

Sidste parameter der undersøges, er modelleret overløb til recipient. På figur 5.22 præsenteres resultaterne, fra simuleringerne med spatialt fordelt nedbør.



Figur 5.22. Fordeling af modelleret overløbsvolumen, med spatialt fordelt nedbør. Middelværdi er angivet med μ . Spredning er angivet med σ . Variationskoefficienten er angivet med CV.

Spredningen af resultaterne, præsenteret på figur 5.22 antyder, at den spatiale fordeling af nedbøren ligeledes har en effekt på overløbs volumen i modellen, som også har været evident ved de andre parametre. For at bekræfte, at det er den spatiale fordelingen af nedbøren, der er årsagen til spredningen, sammenlignes der med modelresultater, vist på figur 5.23, med jævnt fordelt regninput.



Figur 5.23, viser evidens for, at den spatiale fordeling af nedbøren, kan medførere væsentlig spredning i modelresultaterne. Der forekommer også spredning ved resultaterne med jævnt fordelt nedbør, men det vurderes, at spredningen for det spatialt fordelt nedbør forekommer mere signifikant. Derfor vurderes der at være evidens for at den spatiale fordeling af nedbøren, vil forårsage væsentlig spredning i modelresultater.

Det kan ud fra de ovenstående analyser konkluderes, at der forekommer evidens for, at den spatiale fordeling af nedbøren, kan være styrende for hvordan en hydraulisk afløbsmodel responderer. De ovenstående analyser, viser kun resulter for et scenarie, hvor hændelsesnedbøren er fastholdt på 5 mm. Det forventes at andre mængder nedbør ville producere samme resultater.

5.6 Opsamling

I kapitel 1, opstilles nogle supplerende forskningsspørgsmål, til den opstillede hypotese. I dette kapitel, blev der udført analyser der skulle forsøge at svare på punkt fire og fem, som lød:

- Kan regnens spatiale variabilitet udnyttes til at genrerer ekstrem statistik, længere end observationsperioden, for det gældende radardatasæt?
- Hvad betyder regnens spatiale variabilitet for det modellerede afstrømningsforløb?

Det første punkt undersøges i afsnit 5.3 og 5.4. Analyserne i afsnit 5.3, forsøger at kvantificere variabiliteten af nedbørsfeltet. Der blev foretaget analyser af variationskoefficienten for maksimal 10 minutters regnintensitet, præsenteret på figur 5.8. Analysen viste, at de fleste nedbørshændelser, umiddelbart forekommer som relativt jævnt fordelt nedbørsfelt. Efterfølgende, blev regnintensiteter, for samtlige radarpixles, illustreret på figur 5.6. Denne analyse viser, at variationskoefficienten ikke nødvendigvis er retvisende for nedbørsfeltets variabilitet, da den udregnede variationskoefficient på figur 5.6, antydede et jævnt fordelt nedbørsfeltet, men den visuelle inspektion af ensemblet af regnintensiteter modsagde dette udsagn. Konklusionen af analyserne blev, at det er nødvendigt at tage forbehold for regnens spatiale variabilitet. Dette gøres ved at foretage beregning af statistik for oplandet, som et vægtet middel.

De efterfølgende analyser, undersøgte det totale nedbørsfelts variabilitet, ved brug af SST metoden. Her blev det klart, jævnfør figur 5.10, 5.11 og 5.12, at de originale hændelser generelt repræsenterede et relativt kritisk scenarie. Yderligere blev det klart, at der i selve nedbørsfeltet, kunne identificeres hændelser, med væsentlig anderledes karakteristika, end dem der nødvendigvis originalt faldt over Lynetteoplandet. Validiteten af disse hændelser blev undersøgt i afsnit 5.4 og det bekræftes, at disse hændelser, sandsynligvis kunne have ramt Lynetteoplandet. Dette konkluderes, da SST proceduren vurderes at kunne genskabe statistik, som vurderes at være sammenlignelig, med punkt målinger der har væsentlig længere observationsperiode, end radardatasættet.

Det andet punkt undersøges i afsnit 5.5. Her blev SST proceduren, koblet med den forslået procedure for hændelsesidentifikation, således der kunne genereres stokastiske hændelser, hvor den spatiale fordeling af nedbøren var bevaret. For at undersøge effekten, af nedbørens spatiale fordeling i hydraulisk modellering, blev der genereret 100 hændelser, der havde omtrent samme hændelsesnedbør, ca. 5 mm. Denne fremgangsmåde skulle sikre at spredning i modelresultater, ville være forårsaget af variabiliteten af nedbørsfeltet. Dette viste sig at være tilfældet, da den relative spredning på modelleret afstrømningsvolumen, vist på figur 5.16, var væsentlig lavere end dem på figur 5.18, 5.20 og 5.22. For at eftervise at det var den spatiale fordeling der var årsag for denne spredning, blev der udført simuleringer med jævnt fordelt nedbør, trukket fra en af den opstillede regnmålere. Konklusionen bliver her, at selvom der observeres spredning på modelresultater, med jævnt fordelt nedbør, er spredningen mere signifikant på resultaterne med spatialt fordelt nedbør.

DISKUSSION OG PERSPEKTIVERING

Igennem rapporten, er der foretaget forskellige former for valg. Disse valg har forskellige konsekvenser. Disse valg tages op i dette kapitel og bliver diskuteret. Yderligere påpeges hvilke ting, kunne være et hovedfokus i eventuelt fremtidig arbejde.

6.1 Sammenligning af radar og regnmåler observationer

I kapitel 3, hvor data fra henholdsvis radar og regnmåler bliver sammenlignet, på statistiskog modelplan, udføres en analyse, hvor inputtet fra én enkelt regnmåler, sammenlignes med et helt radarbillede, i den hydrauliske modellering. Dette forekommer som en kraftig simplificeringen af situationen, da kvaliteten af radarbilledet i den grad afhænger af antallet af regnmålere, indenfor radarens rækkevidde. Dette bliver ikke taget højde for i analysen, foretaget i kapitel 3, da der ikke ændres på det anvendte biasjustering, efter der kun sammenlignes med en regnmåler.

6.2 Analyse af regnens bevægelse og betydning for afløbssystemets respons

I kapitel 4, udvikles en procedure til at roterer radarbilleder. Denne procedure, roterer billederne ved først at bestemme et centerpunkt for radarbilledet, indenfor modeloplandet, ud fra maksimal døgnnedbør. Efterfølgende roteres billedet rundt, så den arealmidlede regnintensitet stemmer overens med den oprindelige. Denne fremgangsmåde forekommer ikke optimal for alle hændelser. Hændelser hvor den maksimale døgnnedbør ligger på modelgrænsen, kan medføre at der bliver roteret mere, eller mindre, nedbør ud af oplandet, og på den måde ændre dynamikken og det samlede volumen. Metoden burde derfor ændres, således individuelle stormmasser, kunne identificeres i radarbilledet. På denne måde vil deres bevægelseslinje blive tydeliggjort og derfor gøre rotationen simplere.

I kapitel 4 bliver det konkluderet, at bevægelsen ikke er styrende for modelresponsen. Denne konklusion er draget på de analyser der er foretaget i kapitlet, som alle er foretaget under den antagelse, at system kapaciteten ikke er afgørende. Konklusionen af kapitlet, indebærer, at modellen netop er styret af kapaciteten. De regnhændelser, der blev udvalgt til analysen, forekommer alle som hele regndage. Yderligere er det regndage, med mindst 5 mm, hvorfor de udførte simuleringer med al sandsynlighed, altid ville foregå under opbrugt kapacitet. Der bør derfor foretages analyser, med hændelser der ikke fuldt udnytter systemets kapacitet.

6.3 Analyse af regnens spatiale variabilitet

I kapitel 5, er en af de store hovedantagelser, at klimatologien indenfor det valgte spatiale domæne, forekommer homogent, det vil sige, med samme statistiske egenskaber. Dette er en forudsætning, der er vigtig, for at anvende SST metoden. Hvis klimatologien ikke forekom homogen, ville det ikke kunne antages, at nedbøren kunne falde, med lige stor sandsynlighed, indenfor det valgte spatiale domæne. Det vurderes, at klimatologien, må forekomme nogenlunde homogen eftersom, at SST statistikken, vurderes at være sammenlignelig med statistik, fra dataserier med betydelig længere observationsperiode. En analyse af klimatologien, for oplandet ville dog endegyldigt bekræfte om dette er sandt. Yderligere, kunne der foretages sammenligning af ekstremnedbør klimatologien, andets sted, for at undersøge muligheden for at anvende, radardatasættet fra Stevens, end nødvendigvis over sjælland, i Danmark.

Der blev yderligere i kapitlet udviklet en procedure, til at identificerer enkeltstående hændelser, i de udvalgte 246 radar regnhændelser. Dette blev koblet til SST metoden, således der kunne, stokastisk generes hændelser, med samme regndybde. Dette tænkes at kunne kobles sammen med SVK skrift 27 beregningsniveauer. I disse anvendes statistiske regn til at dimensionerer afløbssystemer. Disse regn, tager ikke højde for den spatiale fordeling af nedbøren, som jævnfør kapitel 5, viser sig at være kritisk for systemets respons. Derfor forslås det at anvende den førnævnte fremgangsmåde, koblet med SST metoden, til at kunne genrere dimensionsgivende hændelser, hvor den spatiale fordeling af nedbøren er bevaret.

Yderligere tænkes det muligt, at koble hændelsesidentificeringen med nuværende klimafremskrivningsmetoder ([Thorndahl et al., 2017a]), således der kan genereres tidsserier, der kan anvendes til skrift 27 beregningsniveau tre, hvor der skal laves langtidsstatistik for modelresponsen.

KONKLUSION

I den indledende del af studiet, blev følgende hypotese opstillet:

Sammenlignet med punktnedbør vil fordelt nedbør fra radar give et mere præcist regninput til afløbstekniske modeller og dermed være afgørende for afløbssystemets modellerede respons. Endvidere vil bevægelsesretningen og -hastigheden af nedbørsfeltet være betydende for responsen i afløbssystemet.

Yderligere blev følgende forskningsspørgsmål opstillet, for at supplere den ovenstående hypotese.

- 1. Hvordan kan observation fra regnmålere og radar sammenlignes statistik over et givent opland?
- 2. Hvilke forskelle i modelrespons kan identificeres ved brug af henholdsvis regnmålere og radar som input til afløbstekniske modeller?
- 3. Hvad betyder regnens bevægelsesretning og -hastighed for den modellerede afstrømning i afløbssystemet globalt og lokalt?
- 4. Kan regnens spatiale variabilitet udnyttes til at genrerer ekstrem statistik, længere end observationsperioden, for det gældende radardatasæt?
- 5. Hvad betyder regnens spatiale variabilitet for det modellerede afstrømningsforløb?

Analyserne foretaget i det her studie, viste at over en hvis oplandsstørrelse, vil statistik fra henholdsvis regnmåler og radar, være sammenlignelige. Hvis der analyseres mere lokalt, blev det erfaret at regnmålere kan underpræstere, i forhold til at opfange specifik nedbør. Sammenlignes radarpixel og regnmåler par, blev det dog klart, at den spatiale opløsning af radarpixelene, midler den regisitrede nedbør, på lave tidskalaerer.

Yderligere blev det klart, at hydrauliske afløbsmodeller responderer signifikant forskelligt, afhængigt af den spatiale opløsning på regninputtet. I forhold til opstuvning til terræn, blev det klart at lav spatial opløsning på regninputtet, med al sandsynlighed vil overestimere resultaterne. Angående modelleret afstrømning til det pågældende rensningsanlæg, blev det klart at lav spatial opløsning på regninputtet, ville medføre en underestimering, da regnmåler netværket, ikke opfange al nedbør inden for modelområdet.

Der blev foretaget flere analyser, for at afklare om selve bevægelsen af regnen kunne influere modelresponsen. Alle resultater viste, at bevægelsen ingen indflydelse har på hvordan den hydrauliske model responderer.

Den spatiale variabilitet, blev kvantificeret ved brug af metoden stokastisk transponering af regn. Ud fra denne kvantificering, blev det klart at der i selve nedbørsfeltet, forekommer hændelser, der antages, med al sandsynlighed kunne have faldet over det pågældende model opland. Dette bekræftes ved at sammenligne med punkt statistik for området, med den stokastisk genererede statistik.

Regnens spatiale variabilitet, blev eftervist til at kunne give en signifikant spredning i modelresultater. Dette blev eftervist med jævnt fordelt regn, der ligeledes viste spredning i resultaterne, men vurderes ikke at være lige så signifikant, som ved den spatiale fordelte nedbør.

Dette leder til den endelige konklusion, at spatialt fordelt nedbør vil, med al sandsynlighed, give et mere realistisk regninput til hydrauliske afløbsmodeller og vurderes at være styrende for modelresponsen. Det kan ikke entydigt konkluderes, i dette studie, at selve bevægelsen af regnen har betydning for modelresponsen, da alle resultater vurderes at fordele sig helt tilfældigt.

LITTERATUR

- Colourbox, 2013. Colourbox. Flooded city, stock photo. https://www.colourbox.com/image/flooded-city-image-6982575, 2013. Downloadet: 27-05-2018.
- Cristiano et al., 2017. Elena Cristiano, Marie claire ten Veldhuis og Nick van de Giesen. Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas – a review. Hydrology and Earth System Sciences, Journal 21/2017, 2017.
- Davidsen et al., 2017. Steffen Davidsen, Roland Löwe1, Cecilie Thrysøe1 og Karsten Arnbjerg-Nielsen. A Simplification of one-dimensional hydraulic networksby automated processes evaluated on 1D/2D deterministic flood models. Journal of Hydroinformatics, 2017.
- Geodatastyrelsen, 2016. Geodatastyrelsen. Kortforsyningen. http://kortforsyningen.dk, 2016.
- **Goudenhoofdt et al.**, **2017**. Edouard Goudenhoofdt, Laurent Delobbe og Patrick Willems. *At-site and regional frequency analysis of extreme precipitation from radar-based estimates*. Hydrology and Earth System Sciences, Under review, 2017.
- **Gregersen et al.**, **2014**. Ida Bülow Gregersen, Henrik Madsen, Jens Jørgen Linde og Karsten Arnbjerg-Nielsen. Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter Spildevandskomiteen, Skrift nr. 30. 2014.
- Marshall og Palmer, 1948. J.S Marshall og W.M Palmer. The distribution of raindrops with size. Journal of Atmospheric Science, Journal 5/1948, 165–166, 1948.
- 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, 10(3), 282 290, 1970. ISSN 0022-1694. doi: https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556.
- Nielsen et al., 2013. Jesper E. Nielsen, Søren Thorndahl og Michael R. Rasmussen. A numerical method to generate high temporal resolution precipitation time series by combining weather radar measurements with a nowcast model. Hydrology and Earth System Sciences, 2013.

- Ochoa-Rodriguez et al., 2017. Susana Ochoa-Rodriguez, Li-Pen Wang, Auguste Gires, Rui Daniel Pina, Ricardo Reinoso-Rondinel, Guendalina Bruni, Abdellah Ichiba, Santiago Gaitan, Elena Cristiano, Johan van Assel, Stefan Kroll, Damian Murlà-Tuyls, Bruno Tisserand, Daniel Schertzer, Ioulia Tchiguirinskaia, Christian Onof, Patrick Willems og Marie-Claire ten Veldhuis. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. Hydrology and Earth System Sciences, Journal 531(389-407), 2017.
- Schmitt, 2001. Lothar M. Schmitt. Theory of genetic algorithms. 259, 1–61, 2001. ISSN 0304-3975. doi: 10.1016/S0304-3975(00)00406-0.
- Smith et al., 2013. B. K. Smith, J. A. Smith, M. L. Baeck, G. Villarini og D. B. Wright. Spectrum of storm event hydrologic response in urban watersheds. 49, 2649–2663, 2013. ISSN 0043-1397. doi: 10.1002/wrcr.20223.
- Spildevandskomiteen, 2005. Spildevandskomiteen. Funktionspraksis for afløbssystemer under regn. https://ida.dk/sites/default/files/ Skrift27Funktionspraksisforafl%C3%B8bssystemerunderregn.pdf, 2005. Downloadet: 27-05-2018.
- Spildevandskommiteen, 2018. Spildevandskommiteen. Gældende definitioner for SVK nedbørs data. http://www.dmi.dk/fileadmin/Erhverv/Gaeldende_ definitioner_for_SVK_nedboers_data_samt_definition_af_KM2-format.pdf, 2018. Downloadet: 20-05-2018.
- Thorndahl et al., 2017a. SØren Thorndahl, Aske Korup Andersen og Anders Badsberg Larsen. Event-based stochastic point rainfall resampling for statistical replication and climate projection of historical rainfall series. 21, 4433–4448, 2017. ISSN 1027-5606. doi: 10.5194/hess-21-4433-2017.
- **Thorndahl et al.**, **2014**. Søren Thorndahl, Jesper E. Nielsen og Michael R. Rasmussen. Bias adjustment and advection interpolation of long-term high resolution radar rainfall series. Hydrology and Earth System Sciences, 2014.
- Thorndahl et al., 2017b. Søren Thorndahl, Thomas Einfalt, Patrick Willems, Jesper Ellerbæk Nielsen, Marie-Claire ten Veldhuis, Karsten Arnbjerg-Nielsen, Michael R. Rasmussen og Peter Molnar. Weather radar rainfall data in urban hydrology. Hydrology and Earth System Sciences, Journal 21/2017, 2017.
- van de Beek et al., 2010. C. Z. van de Beek, H. Leijnse, J. N. M. Stricker,
 R. Uijlenhoet og H. W. J. Russchenberg. *Performance of high-resolution X-band radar* for rainfall measurement in The Netherlands. Hydrology and Earth System Sciences, 14(2), 205-221, 2010. doi: 10.5194/hess-14-205-2010. URL https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/14/205/2010/.
- Wright et al., 2013. Daniel B. Wright, James A. Smith, Gabriele Villarini og Mary Lynn Baeck. Estimating the frequency of extreme rainfall using weather radar and stochastic storm transposition. Journal of Hydrology, Journal 488/2013, 2013.

A

RADARHÆNDELSES OVERSIGT

Tabel A.1. Accepteret radarhændelser. Bevægelsesretningen er angivet som grader nord.

Hændelses nr.	Hændelses start	Hændelses slut	Areal døgnnedbør [mm]	Maks. døgnnedbør [mm]	Retning [-]	Has tighed $[\rm m/s]$
1	23-05-2003 00:00	23-05-2003 23:59	13.4	22.4	36.9	10.7
2	24-05-2003 00:00	24-05-2003 23:59	22.1	34.7	54.4	13.5
3	03-07-2003 00:00	03-07-2003 23:59	14.2	29	352	5.5
4	04-07-2003 00:00	04-07-2003 $23:59$	24.2	38.9	334	7.34
5	18-07-2003 00:00	18-07-2003 23:59	20.6	51.3	113	4.16
6	29-08-2003 00:00	29-08-2003 23:59	21.4	43.2	58.6	3.19
7	10-09-2003 00:00	10-09-2003 23:59	26.2	31.1	95.5	2.21
8	19-11-2003 00:00	19-11-2003 23:59	13.9	18.3	342	16.4
9	22-11-2003 00:00	22-11-2003 23:59	9.24	10.7	29.3	16.9
10	03-02-2004 00:00	03-02-2004 23:59	5.18	5.59	353	17.9
11	19-03-2004 00:00	19-03-2004 23:59	6.98	8.97	28.8	15.3
12	25-04-2004 00:00	25-04-2004 23:59	9.08	11.8	305	7.13
13	17-06-2004 00:00	17-06-2004 $23:59$	9.65	26.4	13.6	5.64
14	25-06-2004 00:00	25-06-2004 23:59	9.47	17.1	9.88	11.7
15	03-07-2004 00:00	03-07-2004 $23:59$	14.5	26.2	35.2	8.78
16	04-07-2004 00:00	04-07-2004 $23:59$	8.94	16.8	17.7	11.3
17	09-07-2004 00:00	09-07-2004 23:59	9.95	19.2	72.1	7.87
18	10-07-2004 00:00	10-07-2004 $23:59$	10.1	16.4	355	9.49
19	18-07-2004 00:00	18-07-2004 $23:59$	12.5	24.3	68.4	7.84
20	21-07-2004 00:00	21-07-2004 23:59	14	26.4	73.9	6.3
21	05-10-2004 00:00	05 - 10 - 2004 $23:59$	6.57	14.3	41.7	17
22	17-10-2004 00:00	17-10-2004 23:59	38.3	58.4	211	3.71
23	22-11-2004 00:00	22-11-2004 23:59	16	22.9	344	15.8
24	13-06-2005 00:00	13-06-2005 23:59	8.72	10.3	68	11.6
25	05-07-2005 00:00	05-07-2005 23:59	7.62	10.6	125	10.6
26	20-07-2005 00:00	20-07-2005 23:59	12.7	18.1	7.3	12.6
27	29-07-2005 00:00	29-07-2005 23:59	13.9	29.2	38	9.71
28	30-07-2005 00:00	30-07-2005 23:59	21.1	30.9	56.1	8.68
29	31-07-2005 00:00	31-07-2005 23:59	14.9	21	65.8	10.3
30	27-09-2005 00:00	27-09-2005 23:59	6.78	15.1	22.5	9.07

Hændelses nr	Hændelses start	Hændelses slut	Areal døgnnedhør [mm]	Maks døgnnedbør [mm]	Retning [_]	Hastighed [m/s]
	20.00.2005.00.00	20.00.0005.00.50		10.7	Teetining []	r or
31	29-09-2005 00:00	29-09-2005 23:59	4.45	12.7	58.1	5.35
32	01-10-2005 00:00	01-10-2005 23:59	10.7	21.0	39	8.1
33 24	25-10-2005 00:00	20-10-2000 20:09	27.0	37.0	19.4	20.9
34	11-11-2005 00:00	11-11-2005 23:59	0.39	12.9	307	10.0
30	27-03-2006 00:00	27-03-2006 23:59	9.42	14.2	23.4	13.0
30	20-05-2006 00:00	20-05-2006 23:59	8.4	11.4	37.1	11.0
37 20	28-05-2006 00:00	28-05-2006 23:59	10.7	20.3	330	10.2
38	23-07-2006 00:00	23-07-2006 23:59	8.80	23.7	33.0	0.87
39	28-07-2006 00:00	28-07-2006 23:59	0.00	8.0	40.3	(.(1 7.c
40	01-08-2006 00:00	01-08-2006 23:59	13.3	18.7	(1.5	(.0 5 10
41	02-08-2006 00:00	02-08-2006 23:59	7.09	13.2	120	0.19 7.79
42	11-08-2006 00:00	11-08-2006 23:59	13.1	19.2	139	1.13
43	12-08-2006 00:00	12-08-2006 23:59	13.3	20.2	152	0.03
44	13-08-2006 00:00	13-08-2006 23:59	17.2	23.4	182	7.03
40	14-08-2000 00:00	14-08-2000 23:39	23.0	00.0 10.1	89.9	1.41
40	15-08-2006 00:00	10-08-2006 23:09	1.41	12.1	24.9	10.0
47	21-08-2006 00:00	21-08-2006 23:59	9.50	22.0	13.4	4.40
48	22-08-2006 00:00	22-08-2006 23:59	10.9	20.5	328	0.30
49	25-08-2000 00:00	23-06-2000 23:39	19.9	01.2	310	6.91
50 E 1	27-08-2006 00:00	27-08-2006 23:59	14.7	29.0	347	0.09
51	29-08-2006 00:00	29-08-2000 23:39	10.0	20.1	109	5.20
52 52	27-09-2006 00:00	27-09-2006 23:59	13.0	17.8	39.7	14.2
00 E4	02-10-2006 00:00	02-10-2000 23:39	12.0	20.9	00.1 02.5	14.0
04 EE	24 10 2006 00:00	00-10-2000 23:59	11.5	21.1	25.0	10.7
99 56	24-10-2006 00:00	24-10-2006 23:59	10.1	24.9	37.1	13.3
50	28-10-2006 00:00	28-10-2000 23:39	12.1	10.2	10.0	10.2
59	08 11 2006 00:00	08 11 2006 22:59	9.1	21.7	12.8	21.0
50	21 12 2006 00:00	21 12 2006 22:50	12.0	16	0.452	17.0
59 60	17 05 2007 00:00	17 05 2007 23:59	0.70	10	2.83	6.53
61	20.05.2007.00:00	20.05.2007.23:59	0.31	10.7	149	10.1
62	22-05-2007-00:00	23-03-2007 23:53	20.5	20.4	0.78	6.13
63	22-00-2007 00:00	22-00-2007 23:50	0.7	20.3	20.0	5.74
64	25-06-2007 00:00	25-06-2007 23:59	39	20.5 43.6	20.5	63
65	30.06.2007.00:00	21-00-2007 23:55	7.01	10.4	16.5	10.2
66	02-07-2007 00:00	02-07-2007 23:59	27.7	31.7	88.3	8 57
67	03-07-2007-00:00	03-07-2007 23:59	5 30	6.46	76	8.21
68	05-07-2007 00:00	05-07-2007 23:59	41.8	47.2	240	4 51
69	15-07-2007-00:00	15-07-2007 23:59	12.0	26.2	34.4	12.2
70	27-07-2007 00:00	27-07-2007 23:59	10.8	14.5	22.4	17.1
70	28-07-2007 00:00	28-07-2007 23:59	8.05	15.3	10.4	13.6
72	30-07-2007 00:00	30-07-2007 23:59	5.94	10.6	339	11.5
73	11-08-2007 00:00	11-08-2007 23:59	17.5	66 7	180	4 91
74	22-08-2007 00:00	22-08-2007 23:59	15.8	26.8	166	12.1
75	31-08-2007 00:00	31-08-2007 23:59	7,25	10.9	336	13.6
76	02-09-2007 00:00	02-09-2007 23:59	7 93	9.41	4 2	17
77	10-09-2007 00:00	10-09-2007 23:59	14.6	17.9	331	10.8
78	20-09-2007 00:00	20-09-2007 23:59	5 49	9.11	13.9	14 7
79	29-10-2007 00:00	29-10-2007 23:59	19.8	21.7	35	10.7
80	26-01-2008 00:00	26-01-2008 23:59	8.2	9.46	339	24.8
	20 01 2000 00.00	20 01 2000 20:00	0.2	0.10		

Tabel A	.2.	Accepteret	radarhændelser	Bevæge	lsesretningen	er angivet	som	grader	nord
LUUCI A	L . / .	necepteret	radarna nationstr.	Duragu	iscor comingen	or angive	SOIII	grauer	noru

	A.J. Accepte		leiser. Devægeisesi	etiningen er angive	t som gra	
Hændelses nr.	Hændelses start	Hændelses slut	Areal døgnnedbør [mm]	Maks. døgnnedbør [mm]	Retning [-]	Hastighed [m/s]
81	13-03-2008 00:00	13-03-2008 23:59	11.6	14.4	328	16.3
82	01-05-2008 00:00	01-05-2008 23:59	12.3	14.7	75.5	7.29
83	02-05-2008 00:00	02-05-2008 23:59	10.9	17.5	25.7	7.9
84	26-05-2008 00:00	26-05-2008 23:59	29.4	31	43.5	8.21
85	27-06-2008 00:00	27-06-2008 23:59	7.46	8.85	10.6	11.8
86	06-07-2008 00:00	06-07-2008 23:59	6.2	6.81	33.6	9.94
87	11-07-2008 00:00	11-07-2008 23:59	11.4	20.6	39.3	13.1
88	18-07-2008 00:00	18-07-2008 23:59	6.78	8.42	34	8.98
89	04-08-2008 00:00	04-08-2008 23:59	32.6	42.7	15.1	11.3
90	08-08-2008 00:00	08-08-2008 23:59	13.5	23.2	12.7	9.6
91	10-08-2008 00:00	10-08-2008 23:59	9.91	10.2	18	12.9
92	27-08-2008 00:00	27-08-2008 23:59	11.9	14.1	3.01	17.9
93	06-09-2008 00:00	06-09-2008 23:59	9.51	10.3	45.6	14.4
94	26-10-2008 00:00	26-10-2008 23:59	12.5	13.8	14.8	17.2
95	10-11-2008 00:00	10-11-2008 23:59	5.43	6.7	33.8	19.2
96	11-11-2008 00:00	11-11-2008 23:59	8.76	9.7	35	16.5
97	20-05-2009 00:00	20-05-2009 23:59	10.2	17.7	15.6	12.4
98	22-05-2009 00:00	22-05-2009 23:59	7.45	13.5	355	13.4
99	19-06-2009 00:00	19-06-2009 23:59	9.31	15.1	1.36	13.6
100	10-07-2009 00:00	10-07-2009 23:59	13.9	41.3	31.9	8.22
101	13-07-2009 00:00	13-07-2009 23:59	6.65	12.7	22.3	9.12
102	23-07-2009 00:00	23-07-2009 23:59	10.7	13.8	59.4	13.4
103	03-08-2009 00:00	03-08-2009 23:59	10.2	12.3	105	8.18
104	10-08-2009 00:00	10-08-2009 23:59	12.7	15.2	53.1	7.73
105	15-08-2009 00:00	15-08-2009 23:59	10.4	14.1	5.99	9.61
106	03-09-2009 00:00	03-09-2009 23:59	11	15.4	66.6	13.4
107	05-09-2009 00:00	05-09-2009 23:59	7.24	9.61	346	11.9
108	26-10-2009 00:00	26-10-2009 23:59	16.4	23.4	28	10.2
109	02-11-2009 00:00	02-11-2009 23:59	11.3	13.1	63.6	7.1
110	09-11-2009 00:00	09-11-2009 23:59	18.4	23.7	179	9.37
111	16-11-2009 00:00	16-11-2009 23:59	5.83	7.55	51.4	7.07
112	18-11-2009 00:00	18-11-2009 23:59	10.2	14.3	12.6	16.7
113	12-05-2010 00:00	12-05-2010 23:59	24.1	41.5	109	11.4
114	07-06-2010 00:00	07-06-2010 23:59	28.5	34.9	18.2	5.95
115	11-06-2010 00:00	11-06-2010 23:59	7.91	9.58	29.8	17.9
116	13-07-2010 00:00	13-07-2010 23:59	12.8	18.3	81.7	12.5
117	08-08-2010 00:00	08-08-2010 23:59	26.9	36.1	241	3.52
118	12-08-2010 00:00	12-08-2010 23:59	16.8	19.6	102	10
119	14-08-2010 00:00	14-08-2010 23:59	63.2	84.3	140	6.55
120	17-08-2010 00:00	17-08-2010 23:59	23.6	30	164	5.28
121	18-08-2010 00:00	18-08-2010 23:59	8.63	13.9	46	5.97
122	22-08-2010 00:00	22-08-2010 23:59	12.6	27.1	14.1	18
123	23-08-2010 00:00	23-08-2010 23:59	17.5	22.7	53.8	12.6
124	14-09-2010 00:00	14-09-2010 $23:59$	11.1	14.5	17	15.6
125	15-09-2010 00:00	15-09-2010 $23:59$	6.05	9.51	21.2	17.5
126	23-10-2010 00:00	23-10-2010 23:59	7.87	12.6	29	13.8
127	03-11-2010 00:00	03-11-2010 $23:59$	7.79	13.5	4.46	22.5
128	04-11-2010 00:00	$04\text{-}11\text{-}2010\ 23\text{:}59$	8.42	20.6	350	20.1
129	22-05-2011 00:00	22-05-2011 $23:59$	12.7	19.4	54.2	14.3
130	08-06-2011 00:00	08-06-2011 $23:59$	9.66	14.8	113	8.1

	1 1 1 1	D 1 / '	• ,	1 1
Tabel A 3 Accepteret	radarhændelser	Bevægelsesretningen	er angivet	som grader nord
	radarmondon.	Devesebeeneeningen	or angivee	Som Stader nord.

10000	11.4. Hecepte.		ieisei. Devægeisesi	etiningen er angive	i bom gra	
Hændelses nr.	Hændelses start	Hændelses slut	Areal døgnnedbør [mm]	Maks. døgnnedbør [mm]	Retning [-]	Hastighed [m/s]
131	16-06-2011 00:00	16-06-2011 23:59	14	17.8	57.1	11.3
132	22-06-2011 00:00	22-06-2011 23:59	21.1	24	48.1	8.31
133	02-07-2011 00:00	02-07-2011 23:59	69.8	141	196	12.1
134	03-07-2011 00:00	03-07-2011 $23:59$	10.9	25.1	240	9.16
135	08-07-2011 00:00	08-07-2011 $23:59$	12.7	14.6	80	10.2
136	$13-07-2011 \ 00:00$	13-07-2011 $23:59$	5.67	7.26	64.6	6.32
137	14-07-2011 00:00	14-07-2011 23:59	32	42.2	102	8.8
138	21-07-2011 00:00	21-07-2011 $23:59$	21.4	25.8	173	4.72
139	22-07-2011 00:00	22-07-2011 23:59	11.2	22.7	180	6.45
140	23-07-2011 00:00	23-07-2011 23:59	11.7	24.5	151	4.12
141	07-08-2011 00:00	07-08-2011 23:59	13	14.8	55.4	14
142	09-08-2011 00:00	09-08-2011 23:59	9.51	17.2	352	10.9
143	11-08-2011 00:00	11-08-2011 23:59	14.6	20.2	3.05	15.7
144	14-08-2011 00:00	14-08-2011 23:59	30.8	37.1	86.5	8.6
145	27-08-2011 00:00	27-08-2011 23:59	25.4	33.3	89.6	17.8
146	05-09-2011 00:00	05-09-2011 23:59	16	31.6	70	12.2
147	07-09-2011 00:00	07-09-2011 23:59	9.92	12.9	9.27	17.9
148	11-09-2011 00:00	11-09-2011 23:59	12.3	18	46.5	13.7
149	06-10-2011 00:00	06-10-2011 23:59	9.45	11.7	17.7	21.4
150	10-10-2011 00:00	10-10-2011 23:59	9.86	11.3	347	13.8
151	18-10-2011 00:00	18-10-2011 23:59	8.48	11.1	26.4	19.8
152	01-01-2012 00:00	01-01-2012 23:59	10.1	14.1	19.2	13
153	08-06-2012 00:00	08-06-2012 23:59	10.1	13.4	39.4	10.2
154	16-06-2012 00:00	16-06-2012 $23:59$	6.74	11	42.1	14.5
155	29-06-2012 00:00	29-06-2012 23:59	15.7	19.7	43.3	12
156	06-07-2012 00:00	06-07-2012 23:59	9.73	19.8	125	7.74
157	26-08-2012 00:00	26-08-2012 23:59	8.82	14.3	11.1	8.52
158	30-08-2012 00:00	30-08-2012 23:59	10.6	19	56.1	11
159	22-09-2012 00:00	22-09-2012 23:59	7.37	14.9	334	9.45
160	24-09-2012 00:00	24-09-2012 23:59	13.5	15.6	65.6	10.8
161	25-09-2012 00:00	25-09-2012 23:59	11.7	18.2	72.4	13.4
162	26-09-2012 00:00	26-09-2012 23:59	13.6	17.3	61.1	21.1
163	13-10-2012 00:00	13-10-2012 23:59	17.4	26	30	8.78
164	15-10-2012 00:00	15-10-2012 23:59	6.26	7.65	53.6	9.37
165	11-11-2012 00:00	11-11-2012 23:59	7.13	8.28	41.7	9.93
166	08-05-2013 00:00	08-05-2013 23:59	12.3	17.5	94.8	12.8
167	19-05-2013 00:00	19-05-2013 23:59	14.3	21.5	206	6.67
168	22-05-2013 00:00	22-05-2013 23:59	15.9	22.2	12.7	3.47
169	26-05-2013 00:00	26-05-2013 23:59	8.34	11.5	223	13.2
170	13-06-2013 00:00	13-06-2013 23:59	19.6	23.6	37.7	13.7
171	31-07-2013 00:00	31-07-2013 23:59	10.9	14	8.59	11.7
172	10-08-2013 00:00	10-08-2013 23:59	5.53	14.6	29.5	6.48
173	14-08-2013 00:00	14-08-2013 23:59	14.9	23.9	326	11.2
174	18-09-2013 00:00	18-09-2013 23:59	15.4	57.2	108	2.99
175	04-11-2013 00:00	04-11-2013 23:59	9.65	19.4	42.5	10.4
176	02-01-2014 00:00	02-01-2014 23:59	6.21	7.89	60.4	11.4
177	09-01-2014 00:00	09-01-2014 23:59	14.2	16.3	26.1	18.4
178	07-02-2014 00:00	07-02-2014 23:59	6.14	9.55	45.5	14.8
179	07-05-2014 00:00	07-05-2014 23:59	9.44	11.7	26.3	8.62
180	08-05-2014 00:00	08-05-2014 23:59	9.16	22	34.7	10.5

Tabal A	/ Accontorot	radarhandolsor	Bowmool	sogratningon	or anginat	som	aradar	nord
Iaoel A.	4. Accepteret	radarnændelser.	Bevægel	sesretningen	er angivet	som s	grader	nora

	A.J. Accepte	let ladalhænd	leiser. Devægelsesi	etilingen er angive	t som gra	der nord.
Hændelses nr.	Hændelses start	Hændelses slut	Areal døgnnedbør [mm]	Maks. døgnnedbør [mm]	Retning [-]	Hastighed [m/s]
181	12-05-2014 00:00	12-05-2014 $23:59$	15	23.2	15	9.6
182	18-05-2014 00:00	18-05-2014 23:59	15.7	18.4	167	7
183	28-06-2014 00:00	28-06-2014 23:59	6.6	29.1	33	10.2
184	14-07-2014 00:00	14-07-2014 23:59	11.3	25.9	356	10.4
185	03-08-2014 00:00	03-08-2014 23:59	12.9	19.4	106	12.3
186	04-08-2014 00:00	04-08-2014 23:59	8.98	15.5	94.7	6.27
187	08-08-2014 00:00	08-08-2014 23:59	12.3	46.8	50.8	4.93
188	09-08-2014 00:00	09-08-2014 23:59	5.07	12.4	67.9	12.9
189	10-08-2014 00:00	10-08-2014 23:59	8.72	15.6	67.5	11.6
190	29-08-2014 00:00	29-08-2014 23:59	6.77	9.31	33.5	8.01
191	30-08-2014 00:00	30-08-2014 23:59	15.4	51.5	47.3	7.85
192	31-08-2014 00:00	31-08-2014 23:59	56.9	134	143	7.11
193	09-09-2014 00:00	09-09-2014 23:59	10.1	15.9	328	12.3
194	13-09-2014 00:00	13-09-2014 23:59	17.4	38.7	195	6.91
195	14-09-2014 00:00	14-09-2014 23:59	6.3	15.4	153	11.1
196	01-10-2014 00:00	01-10-2014 23:59	9.64	16.8	25.5	4.34
197	07-10-2014 00:00	07-10-2014 23:59	9.35	15.1	67.7	15.2
198	16-10-2014 00:00	16-10-2014 23:59	14.8	28.5	53.1	5.9
199	17-10-2014 00:00	17-10-2014 23:59	22.8	38.3	16.2	4.41
200	19-10-2014 00:00	19-10-2014 23:59	29.5	39.2	13.1	19.4
201	05-11-2014 00:00	05-11-2014 23:59	19	23.6	64.3	8.49
202	22-12-2014 00:00	22-12-2014 23:59	10.7	16	336	12.9
203	10-01-2015 00:00	10-01-2015 23:59	10.1	11.4	351	27.1
204	04-05-2015 00:00	04-05-2015 23:59	10.1	16.8	16.8	9.52
205	12-05-2015 00:00	12-05-2015 23:59	9.06	11.1	16.5	18.9
206	31-05-2015 00:00	31-05-2015 $23:59$	7.53	11	17.6	16.7
207	02-06-2015 00:00	02-06-2015 23:59	7.89	11.7	31.6	23.6
208	13-06-2015 00:00	13-06-2015 23:59	6	7.88	41.3	14.4
209	17-06-2015 00:00	17-06-2015 23:59	10.8	13	357	9.36
210	05-07-2015 00:00	05-07-2015 23:59	8.87	10.4	50.7	10.8
211	08-07-2015 00:00	08-07-2015 23:59	7.71	21.3	20.6	15.5
212	09-07-2015 00:00	09-07-2015 $23:59$	12.7	19.8	339	13.1
213	28-07-2015 00:00	28-07-2015 23:59	14.2	26.4	32.9	8.76
214	11-08-2015 00:00	11-08-2015 $23:59$	5.87	9.59	64.8	10.9
215	25-08-2015 00:00	25-08-2015 23:59	6.03	9.68	63.4	14.7
216	27-08-2015 00:00	27-08-2015 $23:59$	8.35	10.1	35.3	11.7
217	31-08-2015 00:00	31-08-2015 23:59	7.3	11.2	33.4	15.3
218	04-09-2015 00:00	04-09-2015 23:59	16	38.6	45.8	7.24
219	05-09-2015 00:00	05-09-2015 $23:59$	25.2	36.7	350	12.8
220	14-09-2015 00:00	14-09-2015 23:59	6.96	9.24	110	13.1
221	15-09-2015 00:00	15-09-2015 $23:59$	9.54	16.7	69.6	13.8
222	20-09-2015 00:00	20-09-2015 23:59	6.76	9.69	318	8.59
223	22-09-2015 00:00	22-09-2015 23:59	6.4	8.6	78.1	10.6
224	09-11-2015 $00:00$	09-11-2015 $23:59$	6.46	8.16	3.49	19.7
225	18-11-2015 00:00	18-11-2015 23:59	11.3	13.6	356	18.8
226	23-12-2015 00:00	23-12-2015 23:59	8.95	10.6	5.78	21.1
227	30-05-2016 00:00	30-05-2016 23:59	6.95	9.21	136	7.86
228	31-05-2016 00:00	31-05-2016 23:59	5.01	7.42	161	6.66
229	16-06-2016 00:00	16-06-2016 23:59	27.6	63.5	77.2	3.06
230	23-06-2016 00:00	23-06-2016 23:59	16.1	27	31.1	10.7

Tabel A.5. Accepteret radarhændelser. Bevægelsesretningen er angivet som grader nord.

Hændelses nr.	Hændelses start	Hændelses slut	Areal døgnnedbør [mm]	Maks. døgnnedbør [mm]	Retning [-]	Hastighed [m/s]
231	24-06-2016 00:00	24-06-2016 23:59	15.2	30.6	48.5	12.3
232	29-06-2016 00:00	29-06-2016 23:59	8.69	16.5	54.3	8.29
233	01-07-2016 00:00	01-07-2016 23:59	10.5	13.2	47.6	17.9
234	02-07-2016 00:00	02-07-2016 $23:59$	7.31	10.2	46.4	12.9
235	06-07-2016 00:00	06-07-2016 23:59	12.3	19.7	315	8.57
236	08-07-2016 00:00	08-07-2016 $23:59$	12	18.8	20.6	7.61
237	10-07-2016 00:00	10-07-2016 $23:59$	26.4	35.4	7.23	18.6
238	30-07-2016 00:00	30-07-2016 23:59	9.71	13.7	20.1	7.91
239	28-08-2016 00:00	28-08-2016 23:59	18.5	22.1	38.5	15.2
240	04-09-2016 00:00	04-09-2016 23:59	20	26.9	13.5	6.08
241	02-10-2016 00:00	02-10-2016 23:59	12.7	19.2	109	3.82
242	03-10-2016 00:00	03-10-2016 23:59	18.8	24.4	201	7.91
243	10-10-2016 00:00	10-10-2016 23:59	12.2	17.4	204	4.71
244	15-10-2016 00:00	15-10-2016 23:59	7.39	10.2	93.6	5.36
245	21-10-2016 00:00	21-10-2016 23:59	10.9	14.4	164	6.36
246	$05\text{-}11\text{-}2016 \ 00\text{:}00$	$05 ext{-}11 ext{-}2016$ $23 ext{:}59$	13.8	17.2	66.5	5.92

Tabel A.6. Accepteret radarhændelser. Bevægelsesretningen er angivet som grader nord.
В

KOLMOGOROV-SMIRNOV TEST RESULTATER

B.1 Global analyse

B.1.1 Andel af brønde der går over kritisk kote

Tabel B.1. Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for parameteren brønde over kritisk kote. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet om nulhypotese forkastes.

Interval $\left \ \text{N-N} \varnothing \right.$ NØ-Ø Ø-SØ SØ-S S-SV SV-V V-NV N	V-N
N-NØ 0 1 0 0 1 0 1	0
NØ-Ø 1 0 1 1 0 1 1	1
Ø-SØ 0 1 0 1 1 1 1	1
SØ-S 0 1 1 0 1 0 1	0
S-SV 1 0 1 1 0 1 1	1
SV-V 0 1 1 0 1 0 1	1
V-NV 1 1 1 1 1 1 0	0
NV-N 0 1 1 0 1 1 0	0

B.1.2 Vand til Lynetten

Tabel B.2. Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for parameteren afstrømning til Lynetten. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet om nulhypotese forkastes.

Interval	N-NØ	NØ-Ø	Ø-SØ	SØ-S	S-SV	SV-V	V-NV	NV-N
N-NØ	0	0	1	0	1	0	1	0
NØ-Ø	0	0	1	0	1	1	0	1
Ø-SØ	1	1	0	1	1	1	1	1
SØ-S	0	0	1	0	1	1	0	1
S-SV	1	1	1	1	0	1	1	1
SV-V	0	1	1	1	1	0	1	1
V-NV	1	0	1	0	1	1	0	1
NV-N	0	1	1	1	1	1	1	0

B.1.3 Overløb

Tabel B.3. Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for parameteren overløb i modellen. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet at nulhypotesen forkastes.

Interval	N-NØ	NØ-Ø	Ø-SØ	SØ-S	S-SV	SV-V	V-NV	NV-N
N-NØ	0	0	1	0	1	0	1	0
NØ-Ø	0	0	1	0	1	1	0	1
Ø-SØ	1	1	0	1	1	1	1	1
SØ-S	0	0	1	0	1	1	0	1
S-SV	1	1	1	1	0	1	1	1
SV-V	0	1	1	1	1	0	1	1
V-NV	1	0	1	0	1	1	0	1
NV-N	0	1	1	1	1	1	1	0

B.2 Lokal analyse

B.2.1 Peak vandføring

Tabel B.4. Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for peak vandføringer, i den nordlig ledning. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet at nulhypotesen forkastes.

Interval	N-NØ	NØ-Ø	Ø-SØ	SØ-S	S-SV	SV-V	V-NV	NV-N
N-NØ	0	0	0	0	0	0	0	0
NØ-Ø	0	0	0	1	0	0	0	0
Ø-SØ	0	0	0	1	0	0	0	0
SØ-S	0	1	1	0	0	1	1	0
S-SV	0	0	0	0	0	0	0	0
SV-V	0	0	0	1	0	0	0	0
V-NV	0	0	0	1	0	0	0	0
NV-N	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel B.5.	Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for peak vandføringer, i den
	sydlig ledning. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer
	fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet at nulhypotesen forkastes.

	fra samm	e fordelin	g. Omvei	ndt angr	ver ettal	let at nu	lhypotese	n forkaste
Interval	N-NØ	NØ-Ø	Ø-SØ	SØ- S	S-SV	SV-V	V-NV	NV-N
N-NØ	0	0	0	0	0	0	0	0
NØ-Ø	0	0	0	1	0	0	0	0
Ø-SØ	0	0	0	1	0	0	0	0
SØ-S	0	1	1	0	0	1	1	0
S-SV	0	0	0	0	0	0	0	0
SV-V	0	0	0	1	0	0	0	0
V-NV	0	0	0	1	0	0	0	0
NV-N	0	0	0	0	0	0	0	0

B.2.2 Peak vandvolumen

Tabel B.6. Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for peak vandvoluminer, i den nordlig ledning. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet at nulhypotesen forkastes.

kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet at nulhypotesen forkas										
Interval	N-NØ	NØ-Ø	Ø-SØ	SØ- S	S-SV	SV-V	V-NV	NV-N		
N-NØ	0	0	0	0	0	0	0	0		
NØ-Ø	0	0	0	1	0	0	0	0		
Ø-SØ	0	0	0	0	0	0	0	0		
SØ-S	0	1	0	0	0	1	0	0		
S-SV	0	0	0	0	0	0	0	0		
SV-V	0	0	0	1	0	0	0	0		
V-NV	0	0	0	0	0	0	0	0		
NV-N	0	0	0	0	0	0	0	0		

kom	mer fra sa	amme fore	deling. O	mvendt	angiver o	ettallet a	t nulhypo	otesen forkaste
Interval	N-NØ	NØ-Ø	Ø-SØ	SØ-S	S-SV	SV-V	V-NV	NV-N
N-NØ	0	0	0	0	0	0	0	0
NØ-Ø	0	0	0	1	0	0	0	0
\emptyset -S \emptyset	0	0	0	0	0	0	0	0
SØ-S	0	1	0	0	0	1	0	0
S-SV	0	0	0	0	0	0	0	0
SV-V	0	0	0	1	0	0	0	0
V-NV	0	0	0	0	0	0	0	0
NV-N	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel B.7. Resultatet af KS testen, for alle interval kombinationer, for peak vandvoluminer, i den sydlig ledning. Et nul angiver at nulhypotesen accepteres og datasættene kommer fra samme fordeling. Omvendt angiver ettallet at nulhypotesen forkastes.