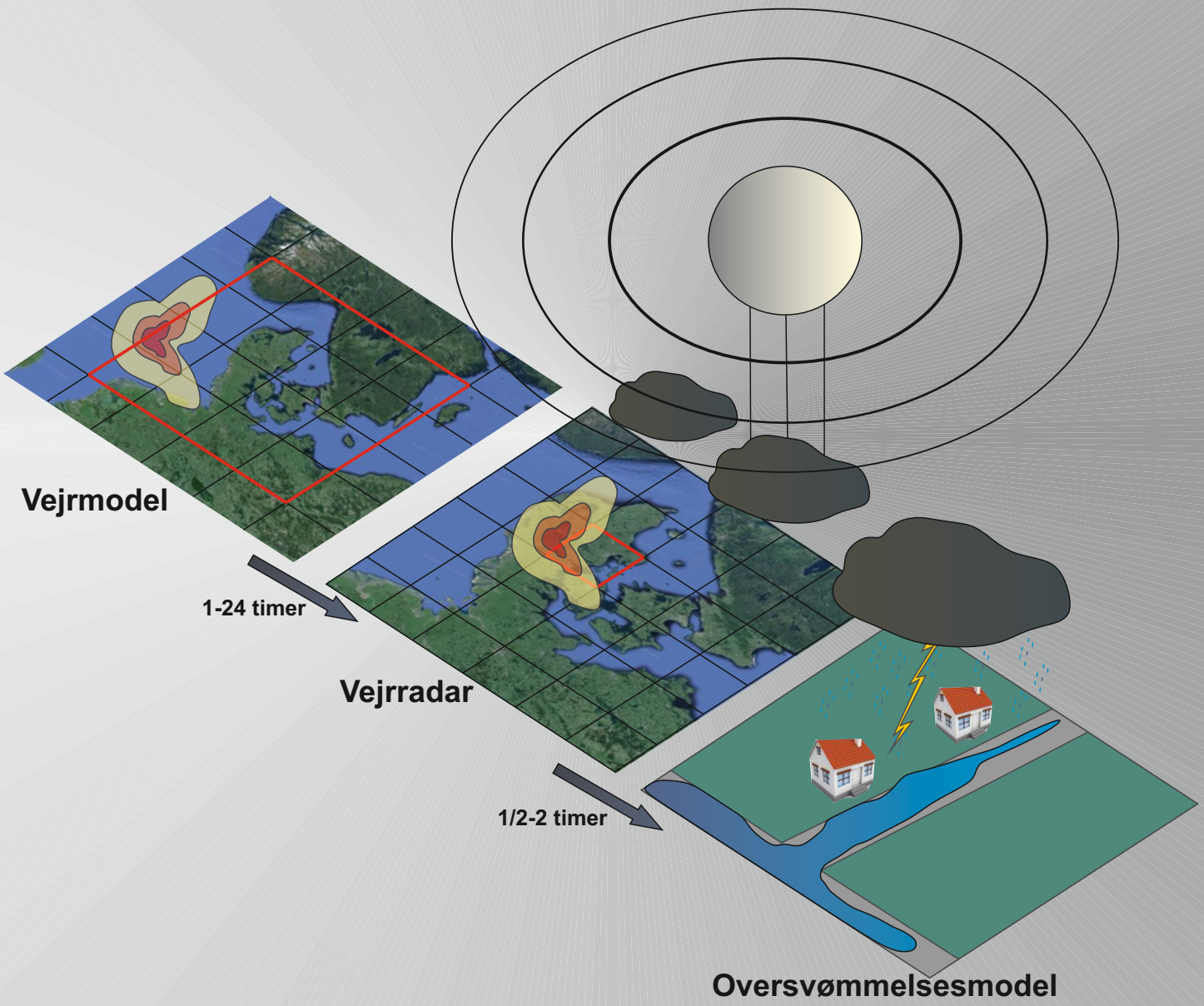
Undersøgelse af potentiale for realtidsmodellering af oversvømmelser med input fra vejrradar- og vejrmodeldata



Afgangsprojekt af:
Mikael Kjærgaard Laursen
9.-10. semester
Vand og Miljø
Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet
Sofiendalsvej 9-11
9200 Aalborg sydvest
Telefon (+45) 9940 9940
http://www.tek-nat.aau.dk/

Titel:
Undersøgelse af potentiale for realtidsmodellering af oversvømmelser med input fra vejrradar- og vejrmodeldata

Projektperiode:
9. og 10. semester
1. september 2014 - 10 juni 2015

Gruppemedlem:
Mikael Kjærgaard Laursen

Vejleder:
Søren Liedtke Thorndahl
Jesper Ellerbæk Nielsen

Oplagstal: 4

Rapport sideantal: 85

Appendiks sideantal: 28

Total sideantal: 113

Projekt afsluttet den:
10. juni 2015

Synopsis:
De seneste år er der set flere tilfælde, hvor kraftig regn har medført store oversvømmelse i byer og som har kostet samfundet mange penge i form af ødelagte bygninger og infrastruktur. I følge DMI's klimaprognose forventes det, at lignende tilfælde vil forekomme oftere.
På baggrund af denne problemstilling er der i dette projekt undersøgt to typer af prognoseværktøjers potentiale for oversvømmelser i byer forårsaget af kraftig nedbør. De to prognoseværktøjer er hhv. nowcast, som er baseret på ekstrapolation af radardata og en numerisk vejrmodel.

Samlet set viser analysen et potentiale for at estimere oversvømmelserne forårsaget af kraftig nedbør. Nowcasten havde tendens til at underestimere nedbøren betydeligt, grundet at den konvektive nedbør opstår inden for korte tidsperioder, hvilket begrænser anvendelsen af længere leadtimes, dog kan dette til en vis grad efterleves ved, systematisk at udvælge ensembles fra den sandsynlighedsbaserede nowcast. Vejrmodellen kan forudsige den konvektive nedbør, dog viser denne stor usikkerhed ved at estimere den nøjagtige lokalit af nedbøren. Det er dog svært at give en endelig vurdering på potentialet ud fra de to kraftige nedbørshændelser som er undersøgt. Det konkluderes derfor at være nødvendigt at der undersøges flere af samme type hændelser for at kunne give en endelig vurdering af potentialet, men at undersøgelsen peger i retning af, at der er mulighed for et potentiale.

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Mikael Kjærgaard Laursen fra Vand og Miljø under institut Byggeri og Anlæg ved Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet på Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet på 9. - 10. semester, som et afgangsspeciale, der udgør 45 ECTS. Projektperioden for udførelsen af rapporten var i perioden fra den 1. september 2014 til den 10. juni 2015. Titlen for projekt er *Undersøgelse af potentiale for realtidsmodellering af oversvømmelser med input fra vejrradar- og vejrmodeldata*.
De tilknyttede vejledere til projektet var Søren Liedtke Thorndahl og Jesper Ellerbæk Nielsen fra Aalborg Universistet.

Der rettes en særlig tak til Aarhus Vand og Orbicon, som har udleveret en Mike Urban model af Lystrups regnvandssystem samt data i form af borgerhænvendelser og skadesregistreringer på huse i forbindelse med regnhændelsen d. 26. august 2012.

Læsevejledning
Kilderne er angivet i parenteser med efternavnet på forfatteren samt udgivelsesåret for publikationen, såsom [Navn, år]. Kilder der angivet med flere forfattere er anført [Navn et al., år]. Alle referencerne er opført i slutningen af rapporten i litteratur efterfulgt af bilag. Henvisningerne til figurer, tabeller samt ligninger er nummereret i henhold til kapitlerne for eksempel figur 3.2 er den anden figur i kapitel 3. Hvis en kilde er angivet i figurteksten, er billedet anvendt fra kilden. Hvis der ikke er angivet kilde til figur med ortofoto eller topografiske kort er disse fra kortforsyningen.dk.

Herudover er der vedlagt en bilags CD.

Abstract

Recent years have seen several cases where heavy rainfall has caused major flooding in cities which has cost the community a lot of money in the form of damaged buildings and infrastructure. According to DMI's climate forecast there will be a change in both the total annual precipitation and rain intensities in the individual events throughout this century. It is expected that in Denmark will occur more and longer dry periods without rain in the summer, but the rainfall events will be more intensive. In the winter there will be a general tendency of more precipitation.

Based on this problem this project investigate whether it is possible to use some of the forecasting tools that are available today to predict urban flood caused by heavy rainfall. The study includes an investigation of two heavy rainfall events, which caused flooding in a small town, Lystrup, just north of Aarhus. The two cases took place respectively the 26. of August 2012 and the 13.-14. of July 2014.
The two forecasting tools is based on different methods of estimating precipitation. The first method is a nowcast model which is based on extrapolation of radar data. This method is best applicable seen at a local scale and in leadtimes of 10-120 min.
The second method is a numerical weather model. This is most easily applied on a larger scale and in leadtimes of 1-24 hours.
Both forecasting tools showed a potential to forecast flooding of the two events. For both tools, there was some uncertainty about estimating the correct intensities and time during convective rainfall. The Nowcast model tended to underestimate the precipitation strongly, due to the convective rainfall that occurs in short periods of time, which limits the longer lead times considerably. The weather model could predict the convective rainfall, however, the uncertainty in estimating the exact location of it is relatively high.

Overall, the analysis has shown a potential to do a flood prognosis, however, it is difficult to definitively make an assessment of the potential from the studied containing two heavy rainfall events. It is expected to be necessary to study more of the same type of events to give a final assessment of the potential.

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse **9**

I Introduktion til projekt **11**

Kapitel 1 Indledning **13**
1.1 Problemformulering 15

Kapitel 2 Fremgangsmåde og metoder **17**
2.1 Projektlokalitet 19
2.1.1 Håndtering af regn- og spildevand i Lystrup 20
2.1.2 Topografi og geologi 20
2.2 Nedbørsinput 23
2.2.1 Regnmåler 23
2.2.2 Radar 23
2.2.3 Vejrmodel 28

II Oversvømmelsesmodel for Lystrup **29**

Kapitel 3 Modelopsætning **31**
3.1 Model for afløbssystem - MIKE Urban 31
3.2 Model for overfladen – MIKE 21 32
3.3 Kobling af modeller - MIKE Flood 34

Kapitel 4 Kalibrering og Validering **35**
4.1 Resultater for kalibrering 40
4.2 Resultater for Validering 46
4.3 Opsamling 46
4.3.1 Usikkerheder 46

III Analyse af fremskrevne datainputs **49**

Kapitel 5 Nowcast og vejrmodel **51**
5.1 Hændelse den 26. august 2012 51
5.1.1 Nedbørsprognoser 52
5.1.2 Oversvømmelsesprognoser 55
5.2 Hændelse den 13.-14. juli 2014 58

5.2.1 Nedbørsprognoser . . . 58
5.2.2 Oversvømmelsesprognose . . . 61

Kapitel 6 Sandsynlighedsbaseret nowcast **65**
6.1 Hændelsen d. 26. august 2012 . . . 65
6.2 Hændelsen d. 13.-14. juli 2014 . . . 70

Kapitel 7 Diskussion **75**

Kapitel 8 Konklusion **79**

Litteratur **81**

Bilag A Analyse af cellestørrelse til oversvømmelsesmodel **85**

Bilag B Hændelsen d. 13.-14. juli 2014 **89**

Bilag C Observationer **92**

Bilag D Resultater fra oversvømmelsesmode med nedbørsdata fra regnmåler **95**

Bilag E Analyse af vejrmodel **97**
E.1 Beskrivelse af Hændelser . . . 98
E.1.1 Hændelsen d. 26. august 2012 . . . 98
E.1.2 Hændelsen d. 13.-14. juli 2014 . . . 105

Bilag F Bestemmelse af gentagelsesperiode for regnhændelse **111**

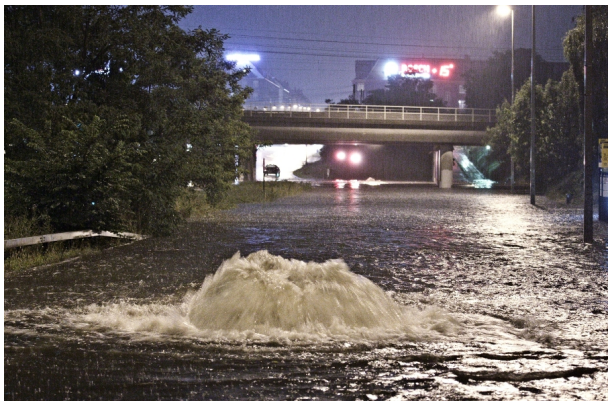
Del I

Introduktion til projekt

1 Indledning

I Danmark har der været flere eksempler på, at der er sket en ændring i nedbørsstrukturen, hvilket primært anses for at være klimaændringerne. De globale klimaændringer forventes at få indflydelse på vandstandsniveauet i havet, men også i stor grad på den årlige nedbør. Ifølge Danmark Meteorologiske Institut's (DMI) klimaprognose for Danmark forventes der i løbet af dette århundrede en ændring i både den samlede årlige nedbørsfordeling samt af regnintensiteterne i de enkelte hændelser. Det forventes, at der i Danmark vil forekomme flere og længere tørre perioder uden nedbør om sommeren, men at regnhændelserne vil være kraftigere. Om vinteren vil der være en tendens til at der genrelt vil falde mere nedbør. [Danmarks Meteorologiske Institut 2014]

I de seneste år har hændelser med ekstrem regn været skyld i flere større oversvømmelser i Danmark, hvilket har resulteret i store skader på både erhverv og beboelse, men også medført store gener i trafikken, hvilket alt sammen koster samfundet mange penge. Eksempler på hvor kraftig regn har været årsag til oversvømmelse ses bl.a. i København d. 15. og 16. august 2010, hvor et skybrud var årsagen til oversvømmelsen. Figur 1.1 og figur 1.2 viser Lyngby motorvej som blev sat under vand.



Figur 1.1. Oversvømmelsen på Lyngby motorvejen ved København d. 15. og 16. agust 2010. Billede fra Politikken [2010]

Figur 1.2. Oversvømmelsen på Lyngby motorvejen ved København d. 15. og 16. agust 2010. Billede fra Ekstrabladet [2010]

Herudover fandt et mere lokalt skybrud sted d. 26. august 2012 i Lystrup, en mindre by nord for Aarhus, som også var skyld i en større oversvømmelse. Her blev der ifølge DMI officielt målt 48 mm nedbør i løbet af 3 timer ved målestationen i Egå ca. 1,5 km fra Lystrup, hvilket svarer til kraftig regn i følge DMI [2014b]. På figur 1.3 og figur 1.4 ses et eksempel af den kraftige regnhændelse over Lystrup d. 26. august

2012.

Figur 1.3. Eksempel på oversvømmelsens omfang i Lystrup den 26. august 2012. Billede fra [Politikken 2012a]

Figur 1.4. Oversvømmelse ved E45 nær Lystrup i Østjylland den 26. august 2012. Billede fra [Politikken 2012b]

Årsagen til oversvømmelserne har i disse tilfælde været, at kapaciteten i afløbssystemet ikke har været tilstrækkelig til at håndtere nedbøren, som afstrømmer til afløbssystemet. Årsagen hertil er, at kloaksystemerne ikke er dimensioneret til at håndtere så kraftige regnhændelser jf. de generelle funktionskrav [IDA Spildevandskomiteen 2005].
I dag er der et krav om, at alle kommuner skal have en klimatilpasningsplan, hvor der udtænkes en strategi for, hvor der skal ligges en indsats for at håndtere de større mængder af nedbør. Her tænkes der bl.a. på fornyelse og forbedring af afløbssystemet, hvor der tages højde for klimaforandringerne, samt hvordan vandet på bedst mulig måde håndteres oppe på terræn ved eks. at lave områder, hvor vandet kan opmagasineres eller tilbageholdes. Ved klimatilpasningsplanerne er bl.a. oversvømmelsesmodeller et vigtigt planlægningsværktøj til at udpege og bestemme områder, som er mest udsatte under hændelser med kraftig regn. Fremgangsmåden er, at der finde de områder som er mest udsatte samt hvor meget ved forskellige regnhændelser. Ved denne anvendelse af oversvømmelsesmodellen, benyttes den som et værktøj til en planlægningsstruktur for, hvordan de større mængder af nedbør kan håndteres på sigt.

En mere alternativ anvendelse af oversvømmelsesmodellen kan være, at implementere den i en form for realtidsstyring. I dag er man begyndt at se på, hvordan prognosebaseret realtids styring af afløbssystemer kan implementeres, med henblik på at forbedre udnyttelsen af kapaciteten i de nuværende afløbssystemer eller ved at aktivere alarmsystemer, hvis overløb er forestående [Pleau et al. 2005, Thorndahl et al. 2009]. Inden for de seneste år er der blevet fokuseret mere på prognosticering af vandføringer i realtid i urbane afløbssystemer, hvilket har vist gode resultater [Thorndahl et al. 2012]. Det er bl.a. validiteten af data input fra nummeriske vejrmodeller samt vejrradar som er blevet undersøgt. Formålet med disse undersøgelser har bla. været, at kunne prognosticere en vandføring til et renseanlæg for at optimere renseprocesserne under regn. Der har dog endnu ikke været mange undersøgelser omkring prognosticering af oversvømmelse i byer, hvilket bl.a. kan skyldes, at data og observationer i forbindelse med disse typer af oversvømmelser har været begrænsede. I de forgangne år har der været flere tilfælde med regnhændelser, som har givet anledning til oversvømmelser, hvormed mængden af tilgængelig data også er blevet større. Formålet med at kunne prognotsticere, hvor og hvornår oversvømmelsen vil finde sted samt dens udbredelse, er i mange tilfælde, at kunne reducere nogle af de skadesomkostninger som kommer, fordi oversvømmelsen ofte kommer som en overraskelse. Bliver der gjort opmærksom på oversvømmelsens kommen og størrelse, er det muligt at udpege områder,

som vil blive udsat. Dette kan styrke en evt. forebyggelse af oversvømmelsen samt give mulighed for at forberede et beredskab på de mulige konsekvenser.

1.1 Problemformulering

Det forventes, at der stadig vil blive sat større fokus på oversvømmelser i fremtiden i takt med, at nedbørsstrukturen ændrer sig og det ser ud til oftere at ville forekomme kraftigere regnhændelser. Det er derfor meget relevant at undersøge, hvorledes det er muligt, med de teknologier og metoder som er tilgængelige i dag, at kunne give en tilstrækkelig valid prognosticering af en oversvømmelse.

I dag er vejrradar og vejrmodeller to vigtige værktøjer til at estimere og prognosticere nedbør, hvorfor det også er disse typer af data input, som vil blive analyseret i dette projekt. De omtalte data inputs er dog primært blevet anvendt i forbindelse med prognosticering af nedbør ud fra almindelige regnhændelser og ikke mere ekstreme regnhændelser som oftest er skyld i oversvømmelserne. En problemformulering for dette projekt lyder som følgende:

Hvor stort er potentialet for realtidsmodellering af oversvømmelser med input fra vejrradar- og vejrmodeldata?

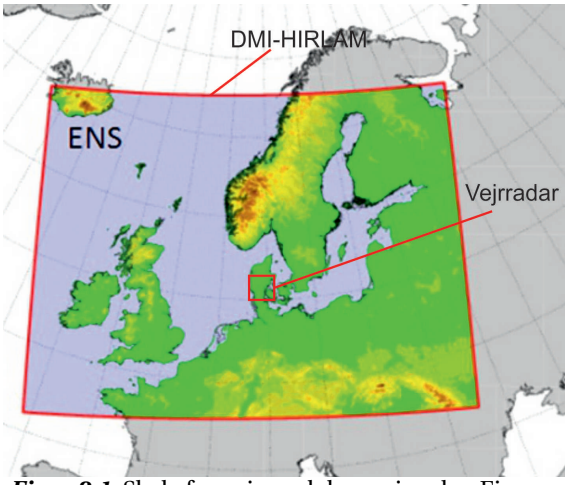
Formålet med projektet er at sammenligne og vurdere muligheden for at modellere oversvømmelser ud fra to forskellige metoder at fremskrive nedbør: (1) en numerisk vejrmodel fra DMI, NWP [European meteorological institutes 2014] med prognosedata fra 1 til 24 timer, og (2) en nowcast model, som er baseret på ekstrapolation af radar nedbør, med prognosedata på op til 2 timer[Thorndahl et al. 2009; 2010]. Nowcast modellen er udviklet af Aalborg Universitet.

Projektet vil tage udgangspunkt i en mindre by, Lystrup, nord for Aarhus. Der er for dette opland sat en afløbsmodel, se bilags cd "*Modeller*", og billeder fra oversvømmelsen den 26-08-2012 til rådighed fra Aarhus Vand og dennes rådgiver Orbicon.

Fremgangsmåde og metoder 2

Formålet med dette projekt er at undersøge to forskellige prognoseværktøjer, herunder radarfremskrivninger(nowcast) og vejrmodelprognoser, for at kunne vurdere, hvor stort et potentiale der er, for at anvende disse nedbørsestimater som input i en model til at forudsige oversvømmelser. Der vil i forbindelse med nedbørshændelserne blive set på to historiske hændelser, så det derved er muligt at sammenligne nedbørsprognoserne med de reelle observerede nedbør.
Til modellering af oversvømmelsens udbredelse anvendes en oversvømmelsesmodel. Oversvømmelsesmodellen består af en afløbsmodel og en overflademodel til at beskrive hhv. strømninger i afløbssystemet og på terræn. Regnprognoserne stammer fra hhv. Danmarks Meteorologiske Institut's (DMI) vejrmodel DMI-HIRLAM og fremskrivninger af radardata fra en vejrradar, som er placeret i Virring 25 km fra Lystrup. Vejrradaren ejes af DMI, mens fremskrivningerne er foretaget af Aalborg Universitet.

Nowcast er baseret på ekstrapolation af radar observationer. Ekstrapolation er en metode, hvor foregående observationer af nedbøren benyttes til at bestemme den fremtidige nedbør. Denne metode gør, at fremskrivningerne kun er baseret på den nedbør, som ligger indenfor radarens observations område og derfor kun tager forbehold for det radaren kan observere. Det betyder, at de fremskrivninger der fortages ud fra radar observationerne er brugbare på en lokal skala og i kortere prognoser. Her opereres der i prognoser på 10 min. og op til 2 timer. Metoden har den ulempe, at det kan være vanskeligt at forudsige hurtig voksende og aftagende nedbør, da pludselig ændringer i nedbøren forårsaget af de atmosfæriske processer ikke medtages i ekstrapolationen.



Figur 2.1. Skala for vejrmodel og vejrradar. Figur er fra DMI [2014a]

Vejrmodellen er derimod baseret på en numerisk model, som modellerer processerne, der finder sted i atmosfæren. Vejrmodellen arbejder på en større skala sammenlignet med radaren, eksempel på skala forskellen er illustreret på figur 2.1. Det betyder, at vejrmodellen kan estimere nedbør længere frem i tiden med en større nøjagtighed sammenlignet med de fremskrivninger, der opnås ved nowcast. Nedbørsprognoserne fra DMI-HIRLAM opererer med tidshorisonter på 1-24 timer. Ulempen ved vejrmodellen er, at når den opererer på en stor skala, bliver både den stedslige og tidslige opløsning større. Dermed er usikkerheden ved nedbørs estimeringerne større for vejrmodellen på lokal skala, hvor nowcast derimod har sin styrke.

Oversvømmelsesmodellen er opsat i hhv. Mike Urban(afløbsmodel) og Mike 21(overflademodel), hvor modellerne bliver koblet sammen via Mike Flood. Modelleringsværktøjerne er alle udviklet af DHI [DHI 2014]. Ved en kobling mellem afløbsmodel og overflademodel kan der ske en udveksling af vand mellem afløbssystem og terræn, hvis afløbssystemet overskrider sin kapacitet, hvorved der sker opstuvning til terræn. Modellens formål er, at kunne give et repræsentativt estimat på oversvømmelsens udbredelse ved kraftige nedbørshændelsers belastning af afløbssystemet.

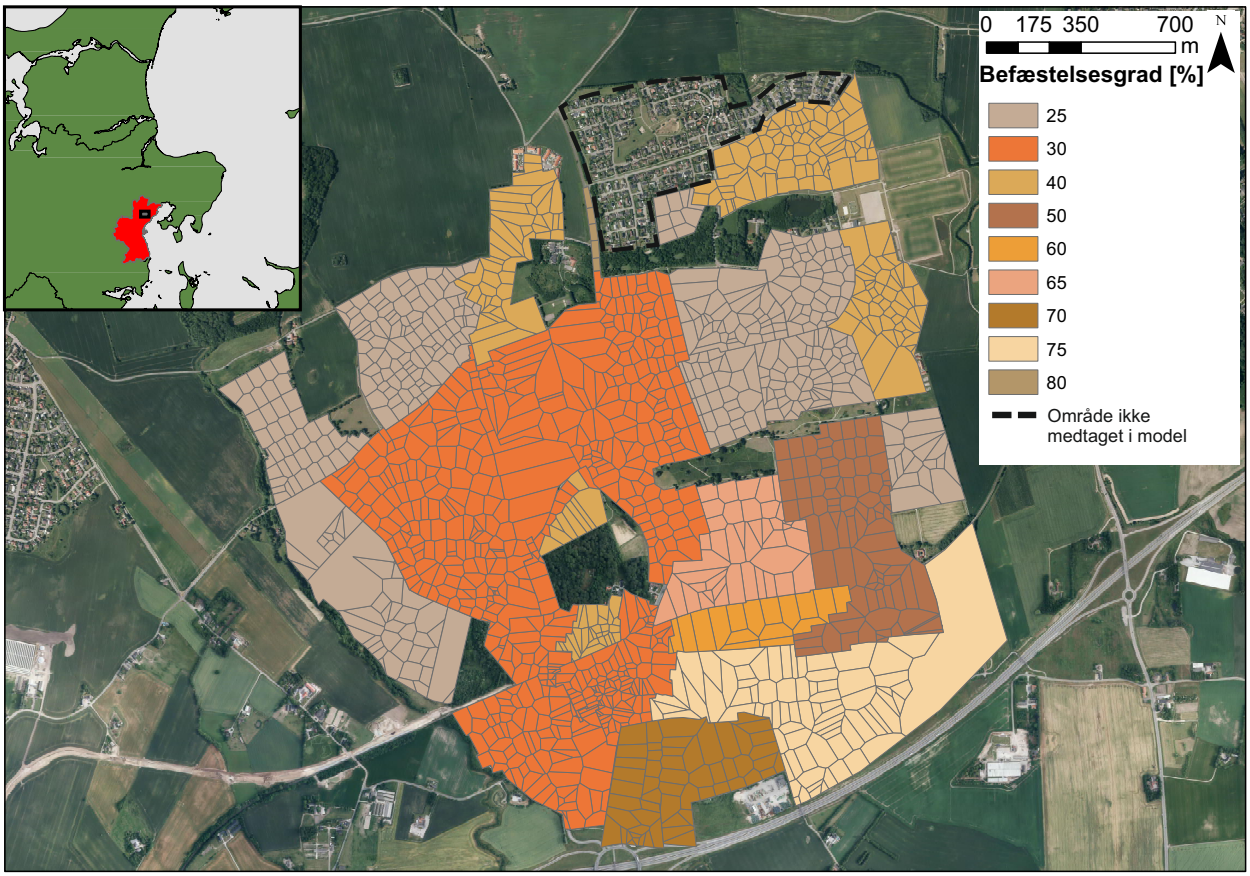
Analysen er delt op i to kapitler. Det første kapitel består i at undersøge, hvor stor en usikkerhed, der ligger i de to forskellige typer af prognoseværktøjer, den deterministiske nowcast og vejrmodellen, ift. at estimere den korrekte mængde nedbør og intensiteter. Deterministisk nowcast er et udtryk for, at nowcasten beregner et resultat for nedbørsprognosen.
De forskellige nedbørsdata bliver anvendt som input i oversvømmelsesmodellen, hvor der undersøges, hvor stor en usikkerhed der er ved de forskellige prognoser ift. at kunne forudsige oversvømmelsen. Det vil gennem projeket være radar observationerne og tildels regnmåler nr. 5180 der vil anvendes som reference for den observerede nedbør.
Det andet kapitel omhandler en undersøgelse af nedbørs fremskrivninger af radardata, hvor der er medregnet usikkerhed(sandsynlighedsbaseret nowcast). Metoden til at fremskrive radardata er i princippet den samme, forskellen ved den sandsynlighedsbaseret nowcast er, at der genereres en række prognoser(ensemple members) for nedbøren i stedet for blot én. Alle ensemplerne er en smule forskellige fra hinanden, men er også alle et bud på den fremtidige nedbør. Derved beskriver de mange ensemples tilsammen prognose usikkerheden ved radar ekstrapolationen.

Projektets resultat er en diskussion af, hvor stort et potentiale der er i at forudsige oversvømmelser forårsaget af kraftige nedbørshændelser grundet overbelastning af afløbssystemet.

2.1 Projektlokalitet

Lystrup er valgt som projektlokalitet, da byen har været ramt af mindst to kraftige regnhændelser hhv. d. 26. august 2012 og den 13. juli 2014. Disse medførte begge oversvømmelse i byen pga. overbelastning af afløbssystemet. Herudover har Aarhus Vand sat en afløbsmodel af regnvandsystemet af Lystrup til rådighed og for regnhændelsen den. 26. august 2012 også udleveret flere registreringer af skader på huse samt borgerhenvendelser omkring vand på terræn og vandstrømme, som er brugbare til at sammenligne og tilpasse oversvømmelsesmodellen med virkeligheden.
En anden fordel ved projektlokaliteten er oplandets størrelse, som gør den mere fordelagtig, ift. opsætning af oversvømmelsesmodel og den nødvendig beregningskraft til simulering af den.

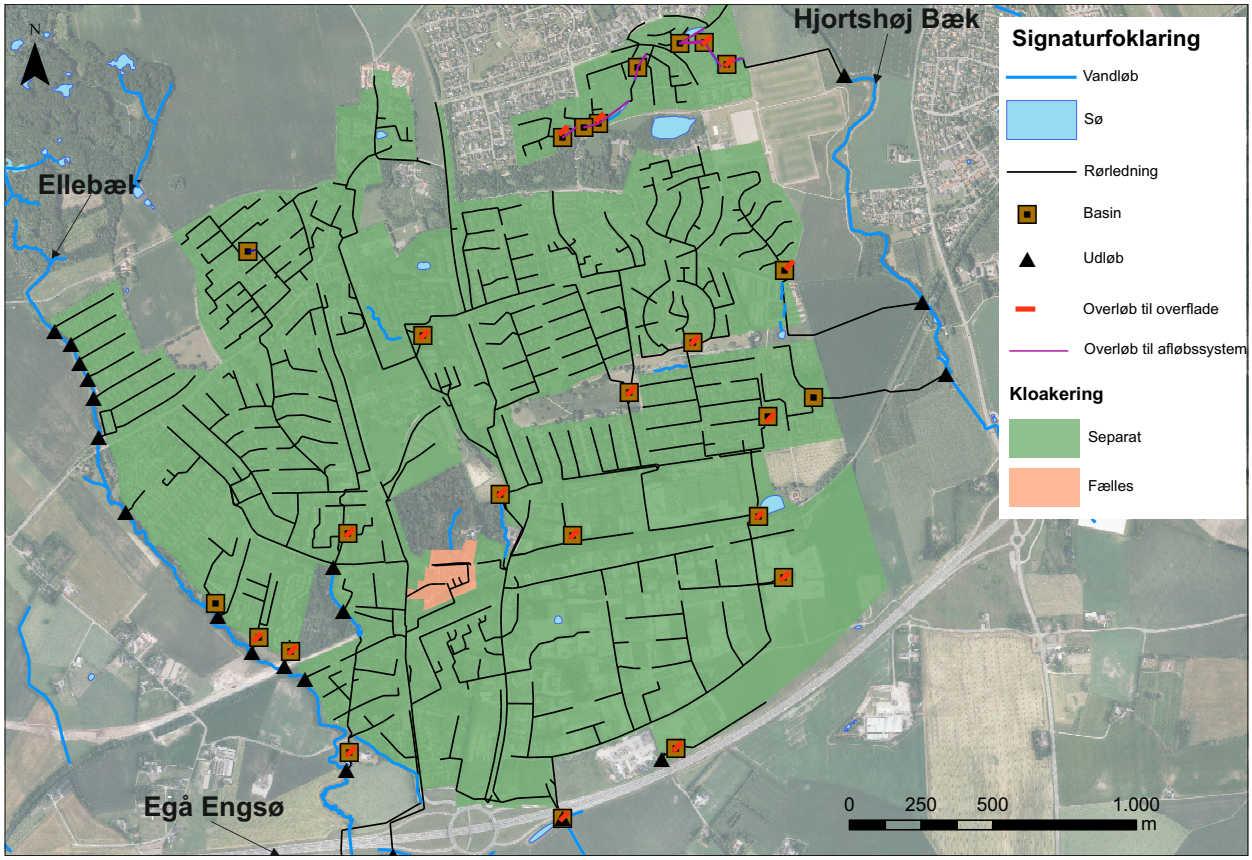
Lystrup er en forstad til Aarhus og ligger ca. 10 km fra Aarhus centrum. I 2008 blev Djurslandmotorvejen åbnet [Dansk Vejtidsskrift ApS 2008, side 55], som går syd om byen, hvilket skaber gode forbindelse til og fra byen. Lystrup dækker et areal på ca. 5,40 km^2, svarende til 540 ha, og består af ca. 2.800 ejendomme. I følge Danmarks Statistik [2014] var indbyggertallet 10.362 i 2014. På figur 2.2 ses Lystrups placering samt de enkelte oplandes befæstelsesgrader, som der er anvendt i Aarhus Vands model af Lystrup. Området markeret med en sort stiblet linje er ikke medtaget i modellen fra Aarhus Vand, årsagen hertil kendes dog ikke.



Figur 2.2. Lystrups lokalitet og befæstelsesgrader for de enkelte oplande. Befæstelsesgrader jf. MIKE Urban model fra Aarhus Vand.

2.1.1 Håndtering af regn- og spildevand i Lystrup

Afløbssystemet i Lystrup er primært separatkloakeret, hvilket betyder at regnvand og spildevand ledes væk i hver deres ledning. Der findes et enkelt mindre område, som er fælles kloakeret. Dette forventes dog separatkloakeret i perioden 2017-2020 i følge Aarhus Kommune [2011]. Spildevandet ledes til Egå Renseanlæg, som ligger tre km syd for Lystrup, mens regnvand afledes via bassiner til Ellebæk, som udmunder i Egå Engsø syd for Lystrup, og Hjortshøj Bæk. Regnvandssystemet i Lystrup er dimensioneret til, jf. Aarhus Kommune [2011], statistisk set at ske opstuvning til terræn i separatkloakerede områder hvert 5. år. Regnvandsbassinerne er som udgangspunkt dimensioneret til en gentagelsesperiode på 10 år - alternativt hvert 5. år, såfremt overløb sker til et areal, hvor overløbsvandet ikke vurderes at forårsage skade. [Aarhus Kommune 2014]
Der er i alt i Lystrup 21 udløb til recipienter og 25 bassiner, hvor flere af disse ved overløb udledes til grønne områder i byen, hvor det antages, ikke at kunne gøre en større skade. På figur 2.3 ses regnvandssystemet for Lystrup, med de dertilhørende udløb, bassiner og recipienter.



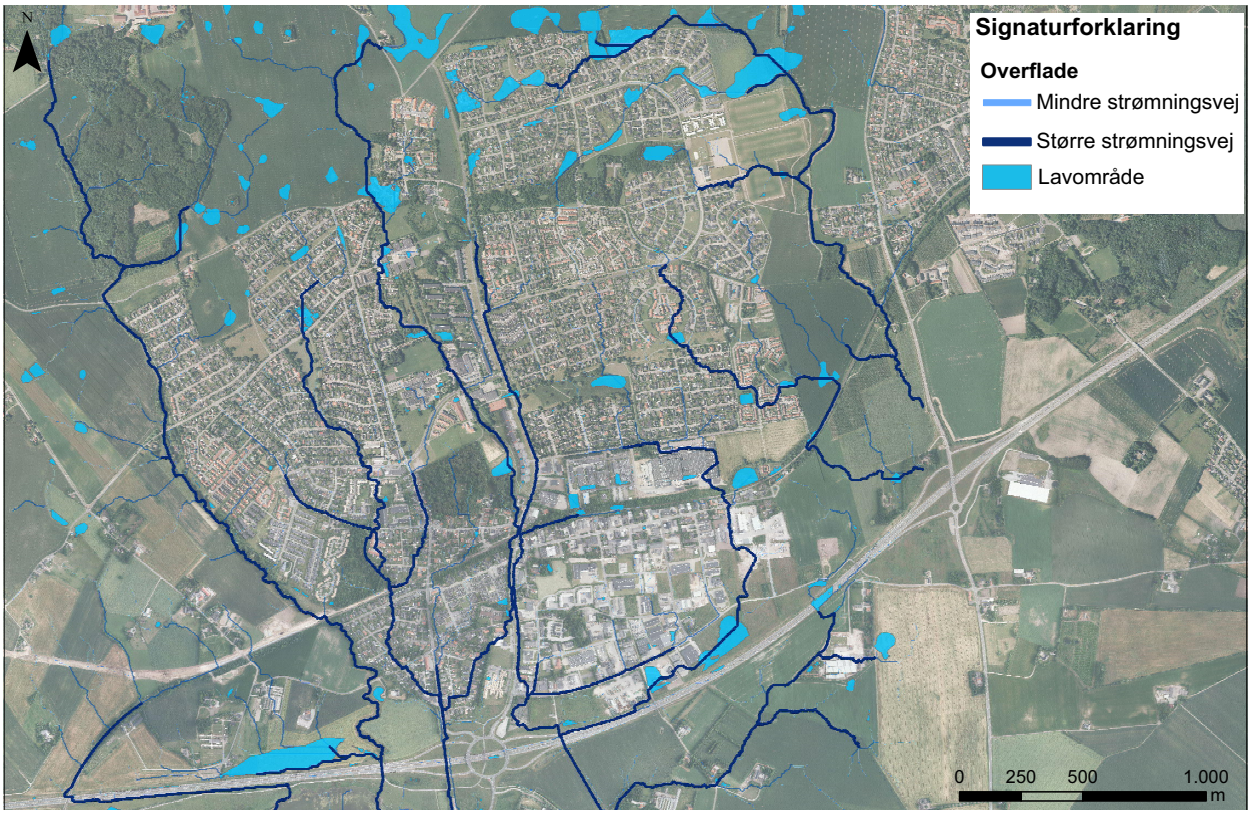
Figur 2.3. Regnvandssystemet i Lystrup med de dertilhørende udløb, bassiner, overløb og recipienter. Nogle overløb(lilla rørstrækninger) er overløb som igen aflaster til andet sted i afløbssystemet og ikke ud på overfladen.

2.1.2 Topografi og geologi

Terrænets topografi spiller en stor rolle ift. hvordan vandet bevæger sig på jordoverfladen. Terrænet i Lystrup falder fra nord mod syd mod motorvejen, hvilket også betyder, at vandet vil have en generel strømningsretning fra nord mod syd. Der er i forbindelse med terrænet lavet en simpel GIS-analyse, som beskriver de primære strømningsretninger og lavområder på overfladen, resultaterne fra GIS-analysen

er illustreret i figur 2.4. GIS-analysen bygger på terræn modellen fra Kort og Matrikelstyrelsen [2009] på 1,6x1,6 m.

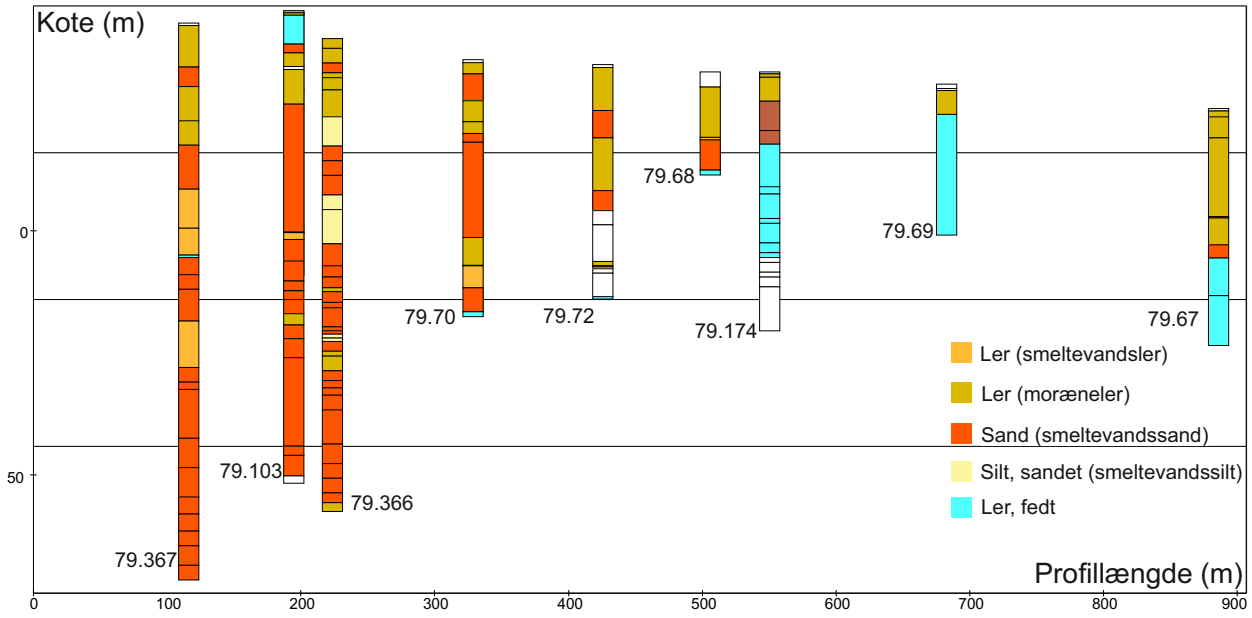
Lavområderne illustrerer de steder, hvor der findes lokale lavninger i terrænet og hvor vandet har en tendens til at søge mod. Der er i GIS-analysen ikke taget forbehold for eksempelvis afløbssystem og vegetation, hvilket kan påvirke den reelle strømningssituation under regn. Derfor skal dette kun ses som et overblik over, hvor der findes lavninger og hvor der kan være risiko for ophobning af vand.
Analysen viser, at vandet løber fra nord mod syd og at de primære strømningsveje er vandløbene, som løber vest og øst om byen, samt den store vej som går midt igennem byen og nogle andre lavt liggende strækninger som også går gennem byen. Det ses også ud fra analysen, at vandet primært vil samle sig nede omkring motorvejen, hvor det skal ledes under vejen for ikke at give problemer med vand. Alle temaer er tilgængelig på bilags cd "*overfladeanalyse*".



Figur 2.4. Strømningsveje og lavninger i Lystrup.

På figur 2.5 og figur 2.6 ses et tværsnitsprofil af geologien for den vestlige del af Lystrup. Som det fremgår af profilet, består det øverste lag, ca. 0-0,5 m, af muldjord, hvorefter der er et forholdsvis tykt lag af moræneler. Ifølge redegørelsesrapporten Aarhus Amt [2006] for Elstrup lavet af Naturstyrrelsen, er denne geologi et typisk billede af geologien i området omkring Lystrup. Dette kan som oftest betyde, at vandet kan have svært ved at infiltrere ned i jorden i dette område, da ler er lavpermeabelt og ligger i dette tilfælde tæt på terræn.

Figur 2.5. Udvalgte boringer som illustrerer geologien i den vestlige del af Lystrup. Boringerne er udtrukket fra Geus [2014].



Figur 2.6. Tværsnitsprofil med udvalgte boringer. Boringerne viser tegn på muldjord i de første 0-0,5 m, hvorefter der forekommer moræneler.[Geus 2014].

2.2 Nedbørsinput

I følgende afsnit vil de to forskellige nedbørsinputs, som anvendes i projektet, blive beskrevet. Herudover vil der også blive beskrevet kort omkring regnmålerene fra spildevandskomiteens regnmålersystemet i Danmark, da disse anvendes i forbindelse med kalibreringen af radardata. Regnmåleren tættets på Lystrup vil også tildels blive anvendt som reference til nedbøren sammen med radar observationerne som er den primære reference.

2.2.1 Regnmåler

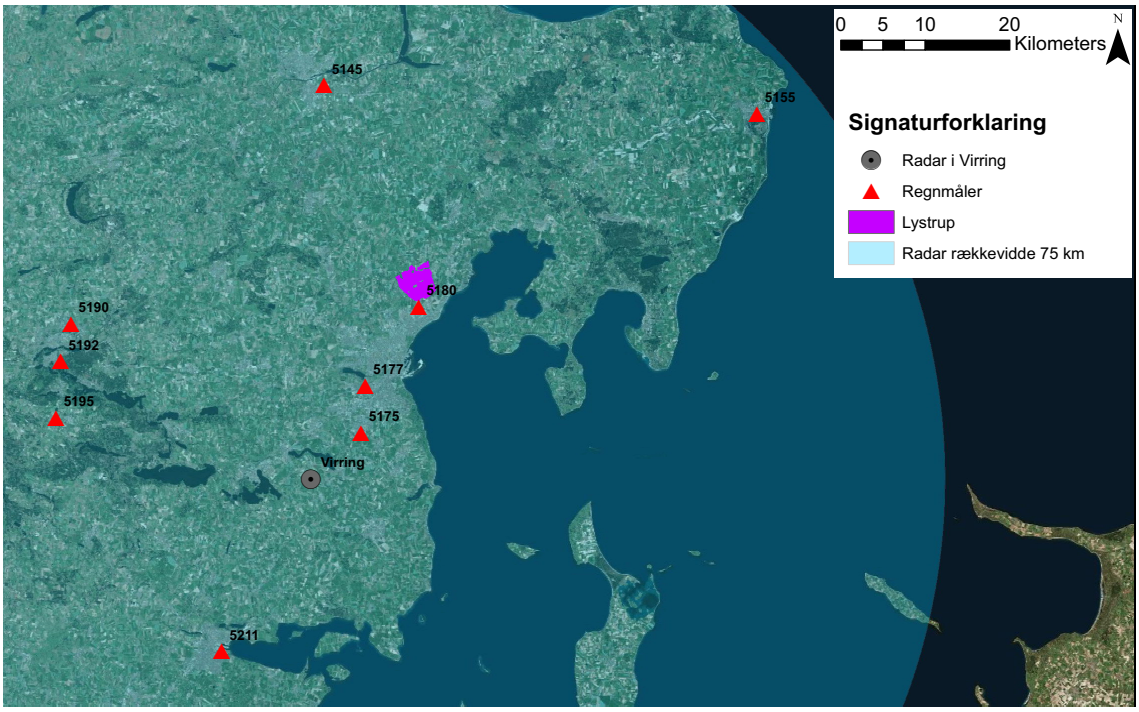
Regnmålerne som anvendes i dette projekt er nogle af de ca. 145 målere, som er opstillet forskellige steder i Danmark. Det er en samarbejdsaftale mellem Ingeniørforeningen i Danmarks (IDA) Spildevandskomite og Dansk Meteorologiske Institut (DMI), som siden 1979 har sikret, at der er blevet opsat og vedligeholdt et landsdækkende fuldautomatisk nedbørsmålesystem [DMI og IDA's spildevandskomite 1979].

Regnmåleren har et vippekarsystem, hvilket betyder, at den registrerer nedbør ved, at vippekaret i regnmåleren laver et vip. Hvert vip tæller for 0,2 mm og dette bliver summeret med en tidsopløselighed på 1 min. Regnmålerne giver et godt estimat på den faldne nedbørsmængde i nøjagtig det punkt eller område, hvor at måleren er placeret.
Data fra regnmåleren bliver i dette projekt ikke fremskrevet, men anvendt til at kalibrere radaren. Radarens måling af nedbør har en tendens til at afvige sammenlignet med regnmålerne, hvorfor det er væsentligt at justere disse enten under regnhændelsen eller efter regnhændelsen, hvilket kan og vil blive gjort i dette tilfælde, hvor der undersøges historiske data. Ved kalibreringen sammenlignes den målte akkumulerede nedbør i regnmåleren med den målte akkumulerede nedbør fra radaren.
Der bliver i alt i dette projekt anvendt ni regnmålere til at justere radaren. De ni regnmålere og den anvendte radars placering kan ses på figur 2.7. Regnmåler nr. 5180, ca. fem km fra Lystrup, bliver tildels også anvendt som reference for nedbøren sammen med radar observationerne.

2.2.2 Radar

Gundprincippet ved en vejrradar er, at den udsender et kortvarig puls af elektromagnetisk stråling fra dens retningsbestemte antenne. Hvis pulsen rammer en regndråbe vil noget af strålingen blive reflekteret tilbage til radaren. Ved at måle tiden fra at pulset bliver sendt ud til, at det bliver reflekteret tilbage, kan afstanden til regnskyen estimeres. Da antennens retning hele tiden kendes, er det muligt at bestemme den præcise position for nedbøren. Mængden af nedbør estimeres ud fra styrken af den reflekterede energi, som afhænger af antal og størrelse på dråberne. [Ronald E. Reinehart 2004]

I dette projekt anvendes data fra DMI's C-båndsradar i Virring. C-båndsradaren har en operationel rækkevidde på 240 km, men i praksis er den maksimale rækkevidde for en god kvantitativ måling af nedbøren mellem 75-100 km ifølge DMI. Det er derfor af betydning for radarforudsigelsernes kvalitet, hvor langt væk radarmålingerne kan antages at være præcise. De radarpixels som bliver anvendt ses, at ligge inden for denne radius fra radaren. Systemet opererer med en stedlig opløsning på 2x2 km og en tidsopløsningen på 10 min. Radaren bliver, som nævnt i afsnit 2.2.1, justeret imod kendt nedbør målt af vippekars regnmålere. På figur 2.8, ses de seks radar pixel som dækker Lystrup og afstanden til radaren i Virring.



Figur 2.7. Placering af C-båndsradaren i Virring med en buffer på 75 km og de ni regnmålere som bliver anvendt til kalibrering af radar observationerne.

Figur 2.8. Seks radar pixels fra C-bånds radaren i Virring, som dækker Lystrup. Den stedslige opløsning er 2x2 km.

2.2.2.1 Teori

Omregning af radardata til nedbør

Til estimering af radar nedbøren (Quantitative Precipitation Estimation - QPE) anvendes Marshall og Palmer [1948], Z-R forholdet, se ligning 2.1, med standard parametrene A=200 B=1,6. Z-R forholdet er en eksponentiel funktion mellem reflektionsfaktor og regnintensitet.

$$Z = A \cdot R^B \tag{2.1}$$

hvor:
$Z = 10 \cdot \log(z)$ (dBZ)
z = reflektionsfaktor fra nedbøren ($mm^6 m^{-3}$)
R = Regn intensitet (mm/h)
A, B = Justerings parametre

Mean Field bias (MFB) justering

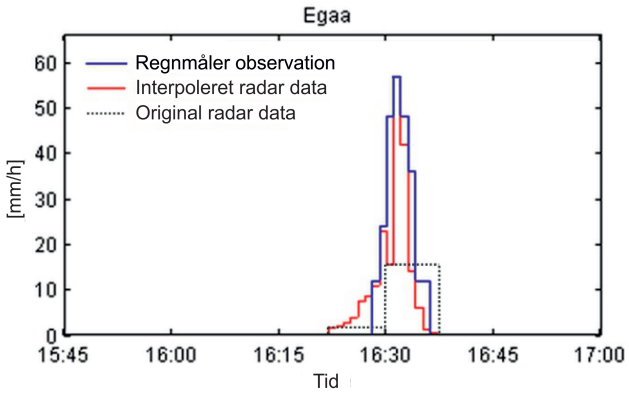
Nedbørs estimaterne bliver bias justeret efter regnmålere baseret på den daglige nedbørs akkumulering ved brug af metoden af Krajewski og Smith [2002], se ligning 2.2. Konceptet er at anvende konstante værdier for A og B i Z-R forholdet og efterfølgende lave en bias justering vha., i dette tilfælde, ni regnmålere for at tilpasse radarens estimater med konkrete nedbørsmålinger.

$$MFB = \frac{\frac{1}{N}(\Sigma d_g)}{\frac{1}{N}(\Sigma d_r)} \tag{2.2}$$

hvor:
d_g = Daglig nedbørs akkumulering fra regnmålere
d_r = Daglig nedbørs akkumulering fra radar
N = Antal regnmålere
MFB = Justerings faktor

Advektion interpolation

For radar observationerne og nowcast prognoserne anvendes der også advektion interpolation. Formålet med advektion baseret interpolation er, at øge den tidsmæssige radardata opløsning for at få mere præcise akkumuleringer og regn intensiteter. Radardataene har en tidsmæssig opløsning på 10 minutter, hvilket i realiteten betyder, at nedbøren kan bevæge sig flere kilometer mellem to radar scanninger. Ved at anvende interpolation, kan der opnås en tidsopløsning på 1 min og dermed en større variation i nedbøren. Eksempel på hvor der er anvendt advektion interpolation kan ses i figur 2.9.
Den anvendte interpolationsmetode er baseret på advektion. Bevægelsen af nedbøren estimeres fra radarbilleder, og anvendes til at forudsige placeringen af nedbør i mellem radar scanninger. [Nielsen et al. 2013]

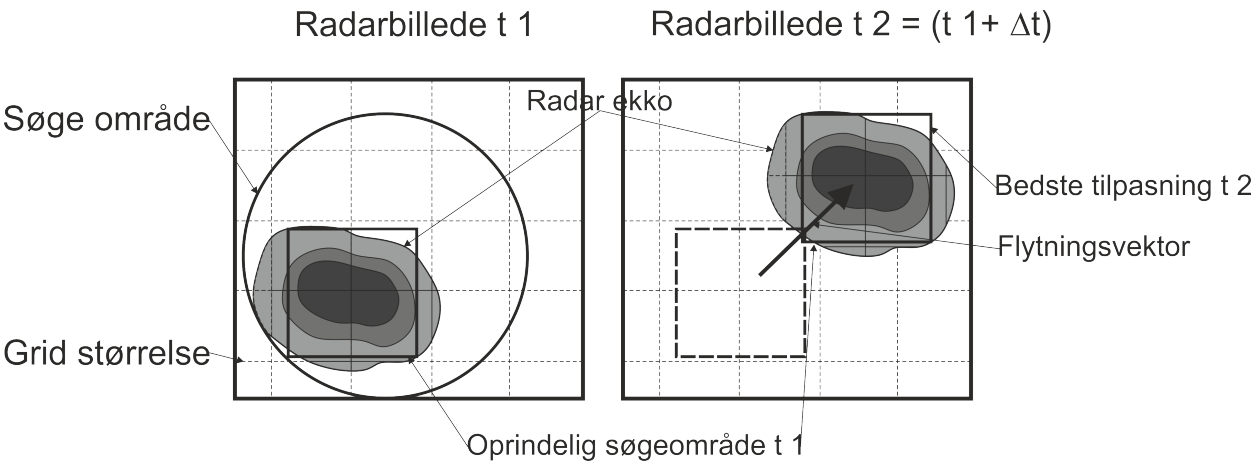


Figur 2.9. Eksempel på advektion baseret interpolation af radar data. Figur fra Jesper E. Nielsen og Michael R. Rasmussen (AAU) [2012]

Deterministisk nowcast model

Der anvendes en deterministisk nowcast model, som anvender CO-TREC algoritmen (Continuous-TREC, Li et al. [1995]), som er baseret på den originale TREC (Tracking Radar Echoes by Correlation, Rinehart og Garvey [1978]). Modellens formål er vha. krydskorrelation, at finde en vektor for hvordan ændringen mellem to radarbilleder ser ud. Radarbilledet deles op i mindre delområder, hvor den maksimale korrelationen findes for hvert delområde radarbillederne i mellem. Efter bestemmelse af flytningsvektorene kan det seneste radarbillede ekstrapoleres lineært et antal tidsskridt frem i tiden. Modellen er derfor udelukkende en parallelforskydning af det oprindelige radarbillede. Pricippet er illustreret i figur 2.10

Der er i modellen ikke implementeret udvikling/henfald af nedbøren, hvilket vil sige, at nedbørsfeltet kun flyttes advektivt i prognosen, mens intensiteterne ikke ændres. Dette kan være et problem i konvektive nedbørshændelser, hvor nedbøren hurtigt udvikles og henfalder.



Figur 2.10. Princip ved fremskrivning af nedbørsdata fra radarbilleder. Først foretages krydskorrelation mellem to radarbilleder for at bestemme flytningsvektor, hvorefter der foretages en ektrapolation af nedbøren.

Sandsynlighedsbaseret nowcast

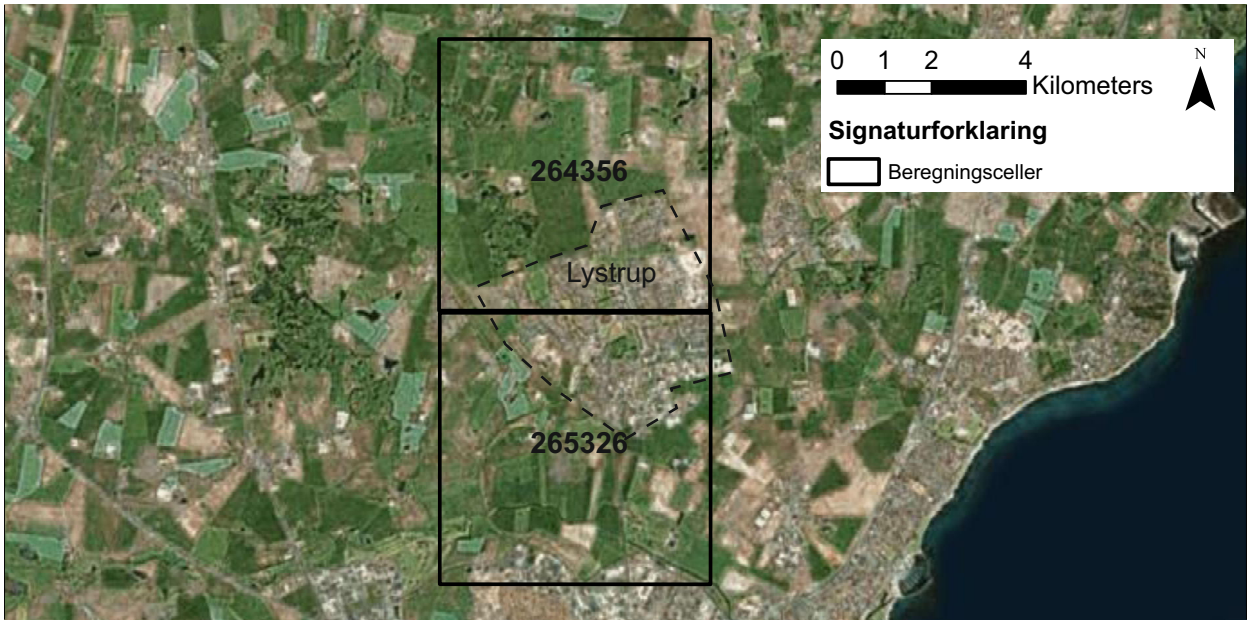
Konceptet ved den sandsynlighedsbasrede nowcast er, at der ikke kun genereres en løsning for, hvordan nedbøren vil ændre sig over tid, men at der generes flere løsninge for, hvordan nedbøren kan ændre sig. Herved genereres der flere mange løsninger som hver repræsentere nedbøren og tilsammen repræsenterer usikkerheden ved den deterministiske nowcast.

Metoden er, at analysere fejl mellem den deterministiske nowcast mod radar observationer som en funktion af leadtime. Analysen er baseret på to af de vigtigste kilder til usikkerhed ved nowcasten, usikkerhed ved advektion altså flytningsvektoren og usikkerhed ved nedbørens struktur ift. aftand, størrelse og middel intensitet. Analysen af usikkerheden for begge kilder bygger på historiske data.

Fejlen i advektionen er baseret på historiske data fra januar 2010 til december 2012. Fejlen i strukturen er baseret på en tre måneders periode fra april til juni 2012. [Jensen et al. 2014]

2.2.3 Vejrmodel

DMI's vejrmodel HIRLAM (HIgh Resolution Limited Area Model) [European meteorological institutes 2014] er en hydrostatisk model. Modellen bygger på de matematiske-fysiske love udtrykt ved ligninger for atmosfæren, dvs. ligninger for atmosfærens strømning.
Modellen er inddelt i et gitter af punkter, som hver repræsenterer atmosfæren i form af forskellige meteorologiske parametre som bl.a. nedbør, vind og tryk. Vejrmodellens beregningsceller inddeler Lystrup i to dele, hvilket er illustreret på figur 2.11. Det antages dog, at det er den sydlige celle, nr. 265326, som dækker hele Lystrup.
HIRLAM modellen findes for flere forskellige geografiske udsnit, hvor den som anvendes i dette projekt dækker Danmark, Nord- og Mellemeuropa. Den stedlige opløsning i modellen er på 3x3 km. HIRLAM genererer prognoser 24 timer frem i tiden og opdateres fire gange i døgnet, UTC: 00:00, 06:00, 12:00 og 18:00. Nedbøren fremgår som akkumuleret nedbør med en opløslighed på en time.

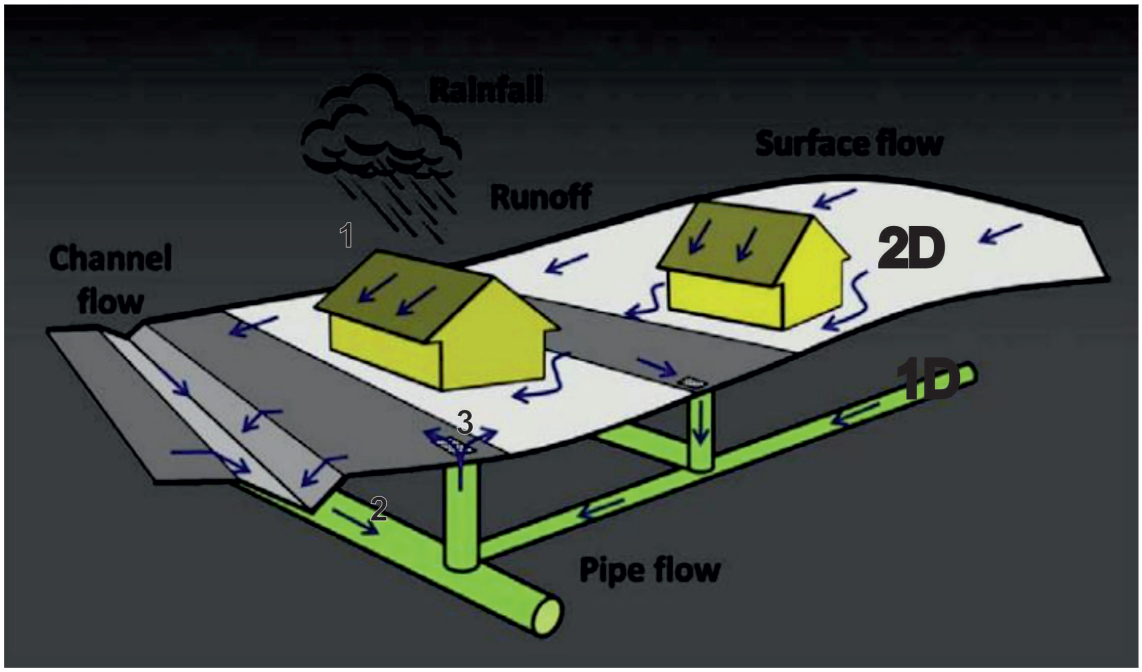


Figur 2.11. To beregningsceller fra HIRLAM modellen som dækker Lystrup, hvor det er celle 265326 som anvendes i analysen.

Del II

Oversvømmelsesmodel for Lystrup

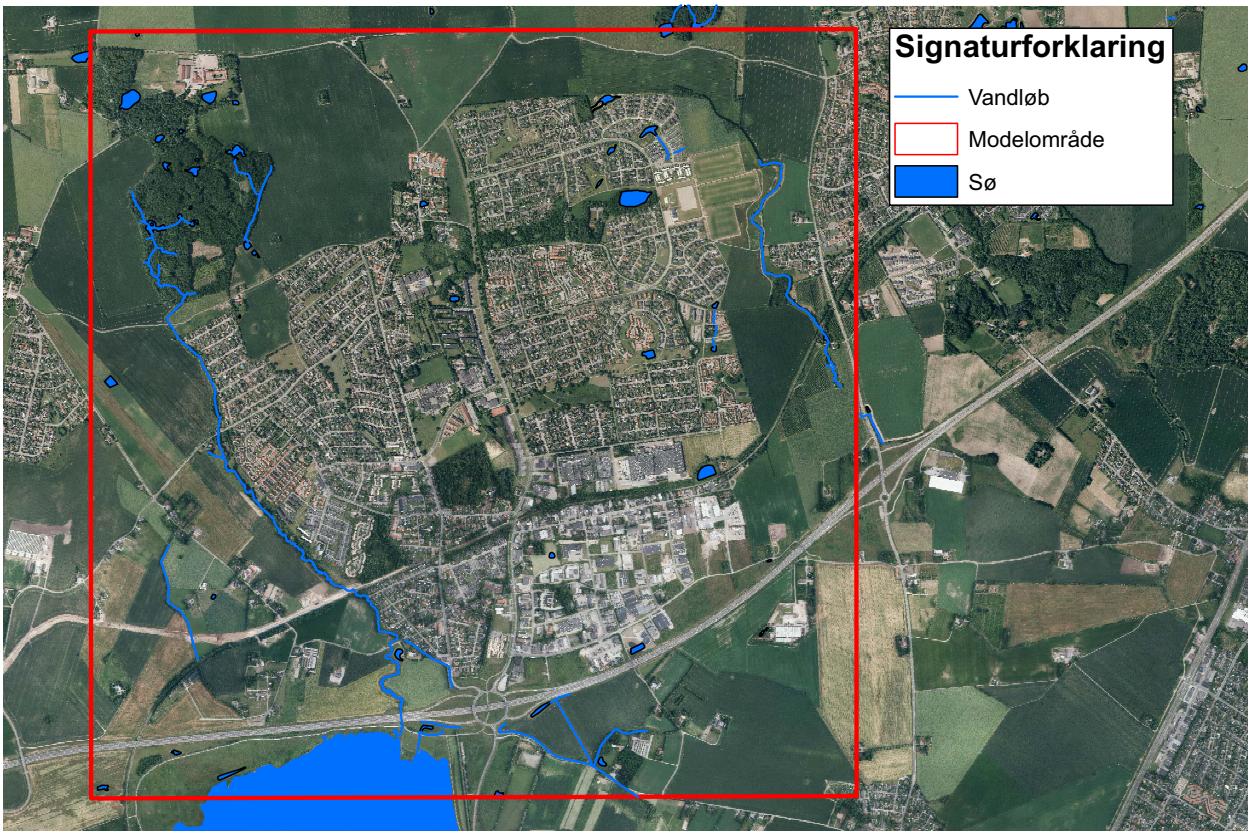
Formålet med denne del er at opstille en pålidelig oversvømmelsesmodel, som kan gengive en oversvømmelses størrelse og omfang ud fra kraftige enkeltstående regnhændelser grundet overbelastning af afløbssystemets kapacitet. Modellen skal anvendes til, at undersøge forskellen i oversvømmelsens udbredelse mellem input fra observeret nedbør og nedbørsprognoser. Til at opstille oversvømmelsesmodellen benyttes DHI's modelleringsværktøj/program MIKE Flood, som kobler MIKE Urban og MIKE 21. Modellen for afløbssystemet er opsat i MIKE Urban, hvilket er udført af Aarhus Vand/Orbicon. I MIKE 21 er modellen for overfladen opsat. Fremgangmåden ved brug af MIKE Flood er, at der sker en afstrømning fra de befæstede arealer til afløbssystemet (MIKE Urban) fra et nedbørsinput. Herfra modelleres afstrømningen i afløbssystemet. Hvis afløbssystemets kapacitet overskrides sker der opstuvning i brøndene og op på terræn. Det vand som opstuver på terræn bliver håndteret i MIKE 21, der beregner vandets strømninger på terrænoverfladen. Alt udveksling af vand mellem de to modeller sker via brøndene. På figur 2.12 ses princippet.



Figur 2.12. Principskitse for beregningsgangen i MIKE Flood. 1. Afstrømning fra befæstede arealer til afløbssystem. 2. Modellering af vand i afløbssystem. 3. Modellering af vandudbredelse på terræn. [DHI 2014]

Modelopsætning 3

Modellens randbetingelser er tilpasset projektlokaliteten Lystrup. Der er taget højde for, at der så vidt muligt bliver afgrænset ift. naturlige lavninger såsom vandløb og søer, så der ikke ændres på strømningsveje og de naturlige forekomne lavninger. Modellen er opstilt med den betingelse, at vand ikke kan løbe ud af modellen via terrænmodellen. På figur 3.1 ses modelområdet for Lystrup.



Figur 3.1. Afgrænsning af model, så der tages forbehold for vandløb og søer.

3.1 Model for afløbssystem - MIKE Urban

MIKE Urban modellen, som anvendes i dette projekt, er udleveret af Aarhus Vand/Orbicon. Modellens opbygning med ledninger, bassiner og udløb er beskrevet i afsnit 2.1.1 på side 20. Den udleverede model

er en "første udgave", hvilket betyder, at det er en udgave, som kan indeholde enkelte fejl og mangler ift. rør dimensioner og parametre som eks. befæstelsesgrad.

Modellen er testet og giver resultater, som er brugbare i forbindelse med dette projekt, hvorfor der ikke vil blive lagt større fokus på kalibrering af denne model alene, men istedet samlet set ift. hele oversvømmelsesmodellen.

I MIKE Urban modellen er følgende forudsætninger antaget:

- Overflademodel: A
- Hydrologisk reduktionsfaktor: 0,9
- Initialtab: 0,6 mm
- Koncentrationstid på deloplande: 7 min.
- Befæstelsesgrader: Se figur 2.2 på side 19 (udført af Orbicon)

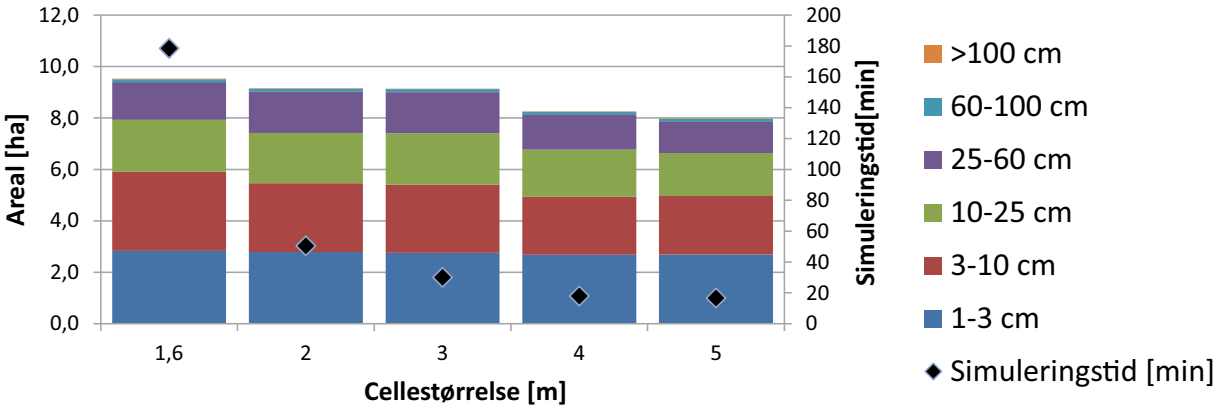
3.2 Model for overfladen – MIKE 21

For overflademodellen er det primært kvaliteten af højdemodellen, som beskriver overfladen, samt cellestørelserne for beregningscellerne, som har den største betydning. I dag findes højdemodellen i et forholdsvis højt detaljeringsniveau, hvilket betyder, at denne er velegnet til at beskrive vandets bevægelse på overfladen. Den seneste frit tilgængelige højdemodel fra Kort og Matrikelstyrelsen [2009] er Danmarks Højdemodel, som har en horisontalopløsning på 1,6 m og en vertikal opløsning på 0,01 m.

Højdemodellen som anvendes til overflademodellen er en modificeret udgave af *DHyM/Rain* fra 2007 [Geodatastyrelsen - Kortforsyningen 2013, DHyM/Rain-2007 (1,6 m grid)]. Denne beskriver højden af terrænet, og hvor alle objekter såsom huse, træer, biler mm. er fjernet, men broer og veje over lavninger er bevaret. Modellen er dog tilpasset med et hydrologisk lag således, at overfladevandet kan strømme i modellen, som det gør i naturen f.eks. under broer.

Der er foretaget en modificering af terrænmodellen, hvor der er taget forbehold for bygninger samt, at cellestørrelsen er ændret fra 1,6x1,6 m til 4x4 m. Ændringen af cellestørrelsen er foretaget på baggrund af en test af cellestørrelsernes betydning ift. oversvømmelsens udbredelse. Der er set på cellestørrelser mellem 1,6 m og 5 m ved en kasseregn på 23,3 mm/h i 60 min., hvilket svarer til en gentagelsesperiode på 10 år ved en varighed på 60 min. Der er undersøgt simuleringstid og udbredelse af oversvømmelsen. Analysen findes i bilag A.

På baggrund af testen af cellestørelsen, er der valgt at benytte en cellestørrelse på 4x4 m. Udbredelsens omfang ændrede sig ikke nævneværdigt imellem de forskellige simuleringer og de større strømningsveje ser ud til at blive bevaret. Derimode bliver beregningstiden markant reduceret ved en forøgning af cellestørrelsen, se figur A.2 hvor simuleringstid og udbredelsen af vand er illustreret.



Figur 3.2. Udbredelsen af vand på terræn og simuleringstid for model med en cellestørrelse på hhv. 1,6, 2, 3, 4 og 5 m.

Forudsætninger

I MIKE 21 modellen er antaget følgende forudsætninger:

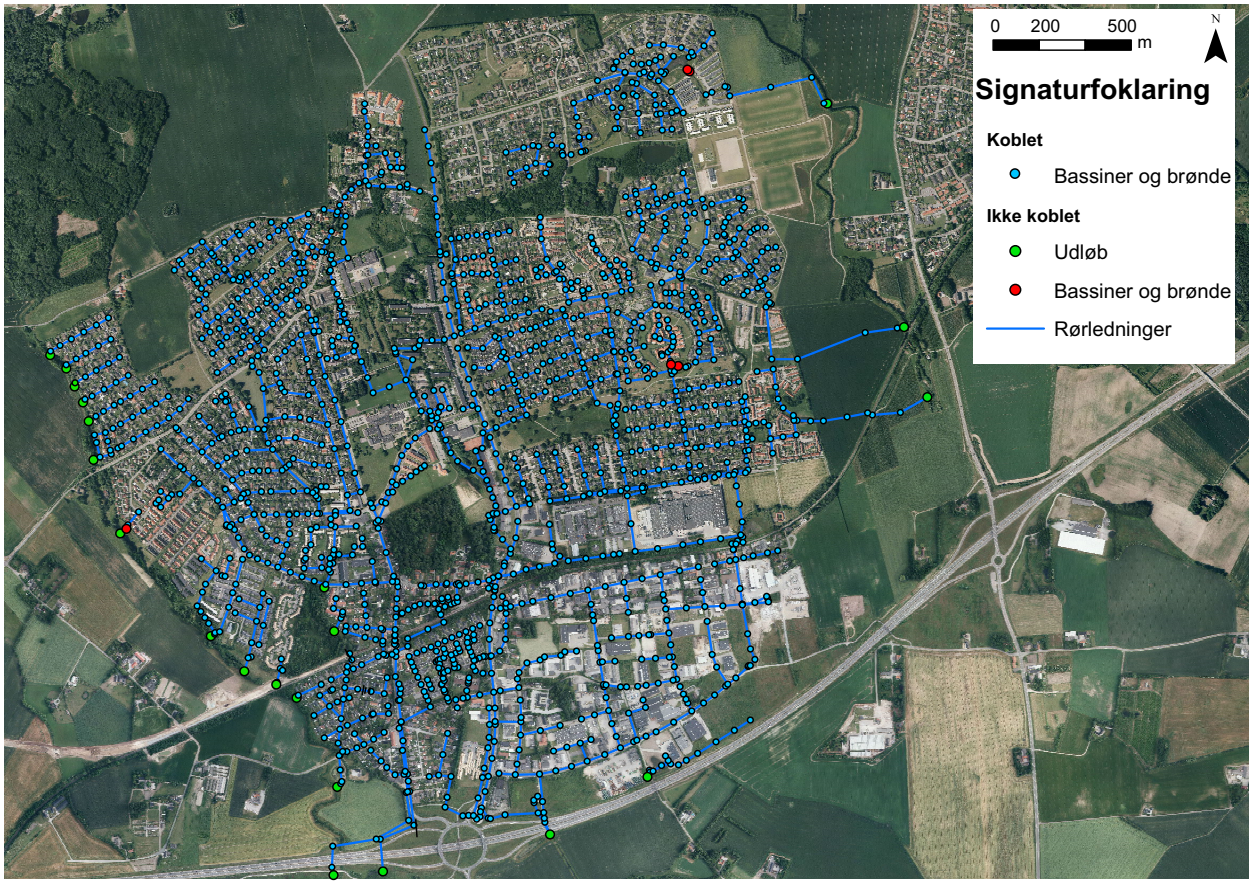
- Højdemodel *DHyM/Rain* med bygningstema
- Cellestørrelse: 4x4 m
- Randbetingelser: No-flow rand
- Modul: Hydrodynamisk
- Drying dybde: 0,002 m
- Flooding dybde: 0,003 m
- Nedbør: 0 mm/dag (ikke tilført nedbør til overflademodel)
- Modstand: Manningtal på 32 $m^{\frac{1}{3}}/s$
- Vind: Ikke medtaget

3.3 Kobling af modeller - MIKE Flood

Koblingen mellem de to modeller sker gennem MIKE Flood. Her defineres de punkter, hvor der kan ske en udveksling af vand mellem de to modeller. I modellen er anvendt følgende forudsætninger:

- Der er lavet kobling mellem de to modeller ved alle brønde.
- Alle udløb er slået fra, så der her ikke sker en kobling. Det samme er for brønd 266, kNode 11, kbas280 1, J17251R. Der er i alle tilfælde en stor forskel mellem top brøndkoter og koten i højdemodellen, som medfører fejl under beregningerne.
- Udveksling af vand skal først ske fra afløbssystem til overflademodel.

På figur 3.3 er de koblede og ikke-koblede brønde illustreret. De ikke koblede punkter forventes ikke at have en større indflydelse på oversvømmelsens udbredelse i det, at der er placeret brønde, som er koblet mellem de to modeller, forholdsvis tæt på de punkter som ikke er koblet.



Figur 3.3. Koblinger som er medtaget og ikke medtaget mellem de to modeller.

Kalibrering og Validering 4

Formålet med kalibreringen er at justere modellens parametre således, at den kan eftervise udvalgte observationer. Dette kræver, at både regninput til modellen og observationsdata er af god kvalitet til, at kunne anvendes på et lokalt område. I forbindelse med regninput, er kvaliteten for det meste tilstrækkelig, da det i mange tilfælde er muligt enten at anvende nedbørsmålinger fra regnmålere eller radardata fra den specifikke hændelse.
Det er dog som regel begrænset med tilgængelig observationsdata, der kan anvendes til kalibrering af oversvømmelsesmodellen. Normalt ved kalibrering kan der anvendes flowmålinger, overløbsmålinger mv. til at justere parametre i modellen. Dette er ikke muligt når der arbejdes med oversvømmelse, da der som regel ikke bliver registreret lignende data i forbindelse med disse hændelser, hvilket gør det svært at kalibrere oversvømmelsesmodellen. Primært vil det være billeder, borgerhenvendelser og skadesregistreringer fra nogle historiske hændelser der benyttes til at tilpasse modellen, hvorfor der oftest slet ikke vælges at kalibrere oversvømmelsesmodellen. De primære punkter som ses på ved kalibrering af oversvømmelsesmodellen er følgende. [DHI 2012]:

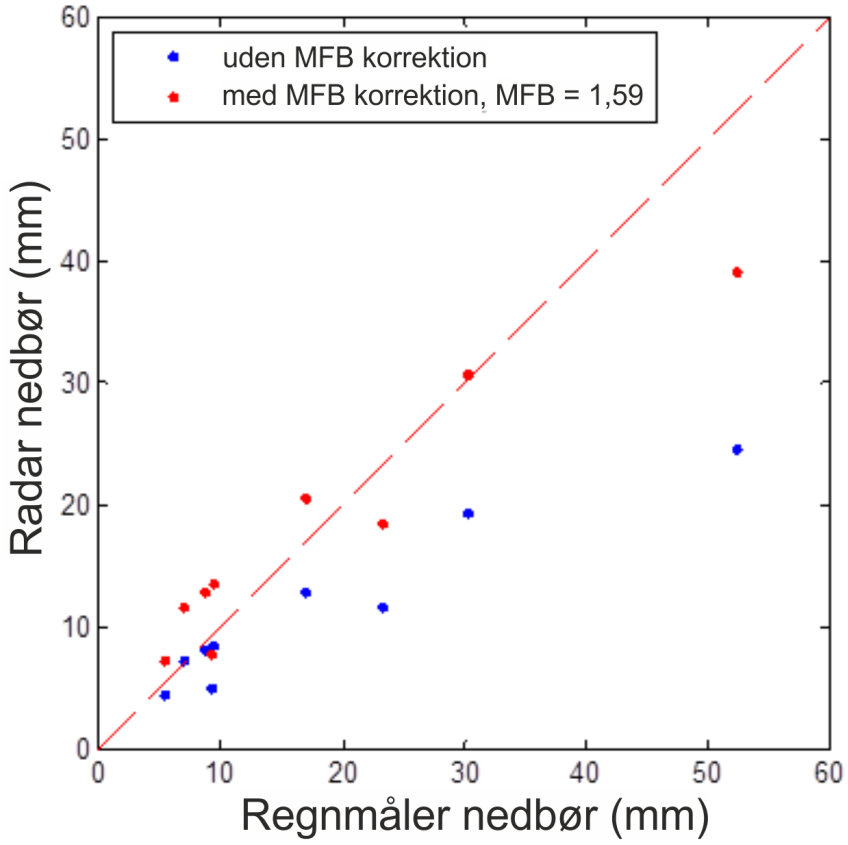
1. Rekalibrering af befæstede parametre for forskellige arealanvendelser i afløbsmodellen.
2. Mulige strømningsveje på overfladen. Huse og andre arealanvendelser kan sammenlægges under konverteringen af overflademodellen.
3. Korrekt kobling mellem afløbsmodel og overflademodel.
4. Ruhed (Manning tal) på overfladen er i de fleste tilfælde af ringe betydning, og det påvirker kun formen af afstrømningens hydrografi.

Til at kalibrere oversvømmelsesmodellen for Lystrup anvendes regnhændelsen fra den 26. august 2012. Regnhændelsen var skyld i, at flere huse og områder blev oversvømmet og skadet i Lystrup. Aarhus Vand/Orbicon fik efter hændelsen flere borgerhenvendelser og registreringer af husskader, som er til stor hjælp, når modellens skal kalibreres og dens validitet skal vurderes. Til at validere modellen anvendes hændelsen d. 13. juli 2014.

Nedbørsdata
I forbindelse med hændelsen d. 26. august 2012 er der både nedbørsdata fra en regnmåler, nr. 5180 ved Egå renseanlæg fem km syd for Lystrup, og radardata over Lystrup tilgængelig. Modellen vil blive kalibreret ift. radardata, da det er radardata nowcastprognoserne er baseret på, samt at disse anvendes som reference for nedbøren. Hændelsen varer fra kl. 00:00 til kl. 15:00. Som nævnt i afsnit 2.2 anvendes seks forskellige radar pixels til at dække projektområdet, hvilket betyder, at nedbøren varierer i både tid

og sted i modellen. Modellen er testet med radardata i en tidslig opløsning på 1 min og 10 min samt med regnmåleren ved Egå renseanlæg for at vise forskellen.

På figur 4.1 ses der et plot over nedbør fra radar og nedbør fra de ni udvalgte regnmålere, samt de korrigerede værdier. Det ses, at der er foretaget en korrigering på 1,59 for at tilpasse radarværdierne med værdierne fra regnmålerne, som nævnt tidligere i afsnit 2.2.2, er der anvendt en daglig MFB. Der er anvendt de oprindelige radardata på 10 min. tidsopløsning til justering af MFB.



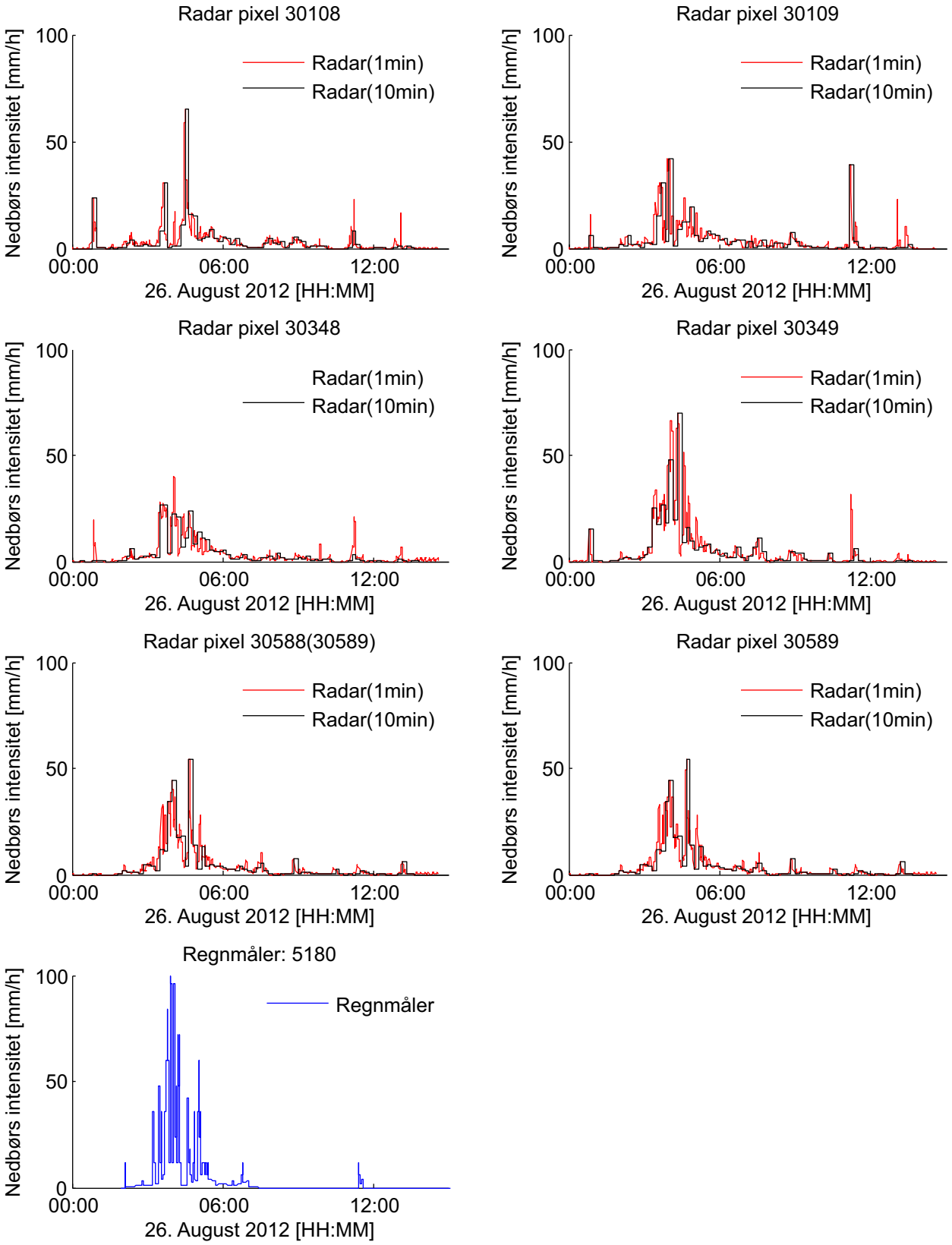
Figur 4.1. Akkumuleret nedbør fra ni regnmålere vs. akkumuleret nedbør fra radar før og efter bias korrektion, d. 26. august 2012.

Den akkumulerede nedbørsmængde for de seks radar pixels for hhv. 1 min. og 10 min. tidsopløsning samt regnmåleren er listet i tabel 4.1.

Tabel 4.1. Akkumuleret nedbør fra seks radar pixels og Regnmåler 5180 fra regnhændelsen den 26. august 2012 over Lystrup. Under hver radar pixel er anført to værdier, for hhv. 1 min. og 10 min. tidsopløslighed.

	30108	30109	30348	30349	30588	30589	regnmåler 5180
Akk. nedbør [mm]	43,6/47,4	51,1/50,3	47,2/45,2	70,2/66,7	52,5/52,4	52,5/52,4	58,0

På figur 4.2 ses en sammenligning af regnhændelsen for hvert enkel radarpixel med en tidsopløselighed på hhv. 1 og 10 min. Herudover er der sammenlignet med regnmåler nr. 5180, som er placeret ca. 5 km fra Lystrup.



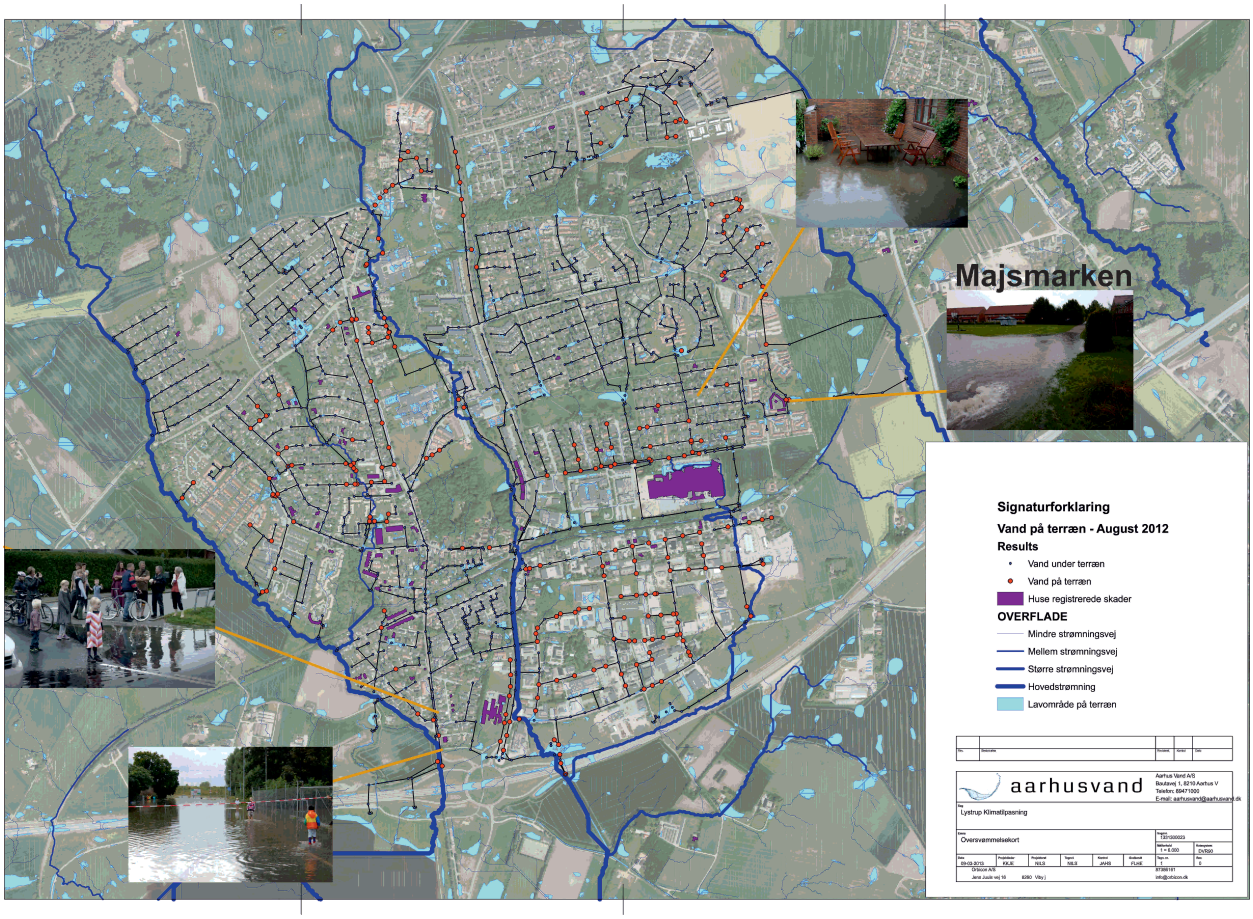
Figur 4.2. Tidsserie for regnhændelsen den 26. august 2012 for hvert enkelt radarpixel i 1 min(rød) og 10 min(sort) opløsning samt regnmåleren 5180(blå).

Der er ikke stor forskel på 1 min. og 10 min. radardata. Det ses dog, at radardata på 1 min. har en større variation i intensiteterne pga. tidsopløsningen, hvilket også betyder, at den kan vise højere intensiteter indenfor den oprindelig radaropløsning på 10 min.
Det fremgår tydeligt, at regnmåleren måler højere intensiteter end radaren. Med radaren er der målt en maksimal intensitet på ca. 70 mm/h, mens der i regnmåleren er målt en maksimal intensitet på ca. 100 mm/h. Det skal påpeges, at regnmåler og radar observationer ikke nødvendigvis skal vise det samme. Der både er en afstand på ca. fem km mellem regnmåler og radar pixel og så er regnmåler en punktmåling, mens radar observationer er en måling foretaget over et større volumen.
Sammenlignes den akkumulerede nedbør, er der en god overensstemmelse mellem regnmåler og radarpixel. Der er dog en radarpixel (30588) som skiller sig markant ud. Her registreres en nedbør på 7,9 mm, hvilket er meget lavere samenlignet med de resterende pixels. Dette kan skyldes en form for skygge effekt ift. radarens synsfelt. Der vælges ikke at anvende dette pixel som input i modellen, hvorfor der i stedet vil blive benyttet værdierne fra pixel 30589, som er det pixel, der ligger lige under.
Det er radar observationerne på 1 min. som oversvømmelsen vil blive kalibreret efter, da det er disse, der primært vil blive anvendt som reference.

Tidsserie samt kalibrerings data for hændelsen d. 13.-14. juli 2014 findes i bilag B.

Observationsdata

De observationsdata, som er tilgængelig fra Lystrup d. 26. august 2012 er skadesregistreringer fra huse, vidnesberetninger omkring vandstrømme fra Majsmarken, som ligger i den østlige del af Lystrup. Herudover er der billeder fra enkelte områder, hvor oversvømmelsen har voldt problemer. Billederne er fra den sydligste del af Lystrup omkring motorvejen samt et enkelt tilfælde ved et regnvandsbassin i den østlige del. På figur 4.3, ses et kort med skadesregistreringer på huse, billeder fra oversvømmelsesramte områder samt Orbicons modelresultater med vand under og på terræn.

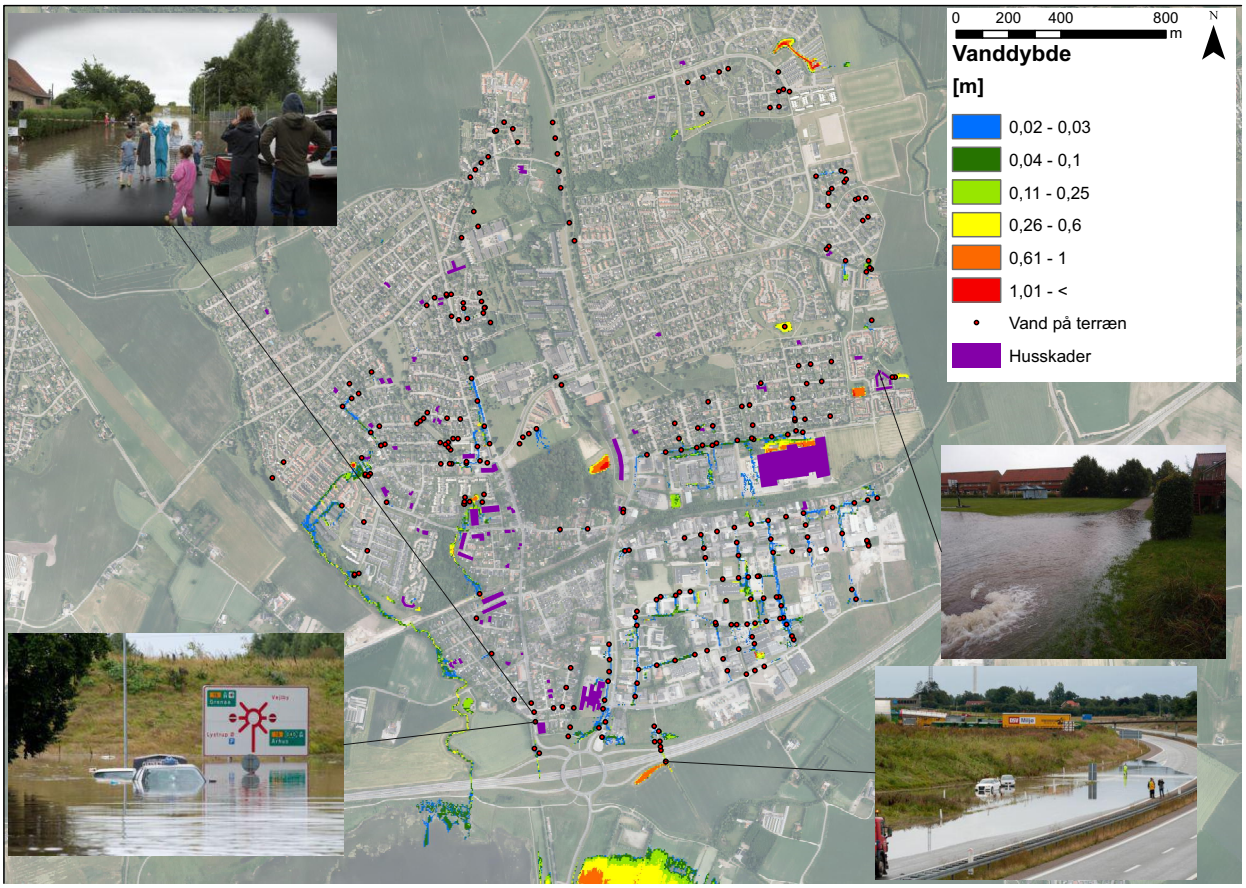


Figur 4.3. Kort fra Aarhus Vand, som illustrerer strømningsveje, lavområder på terræn, vand på terræn fra model og husregistrerede skader.

Vidnesberetningerne udleverede af Aarhus Vand og Orbicon kan ses på bilag C

4.1 Resultater for kalibrering

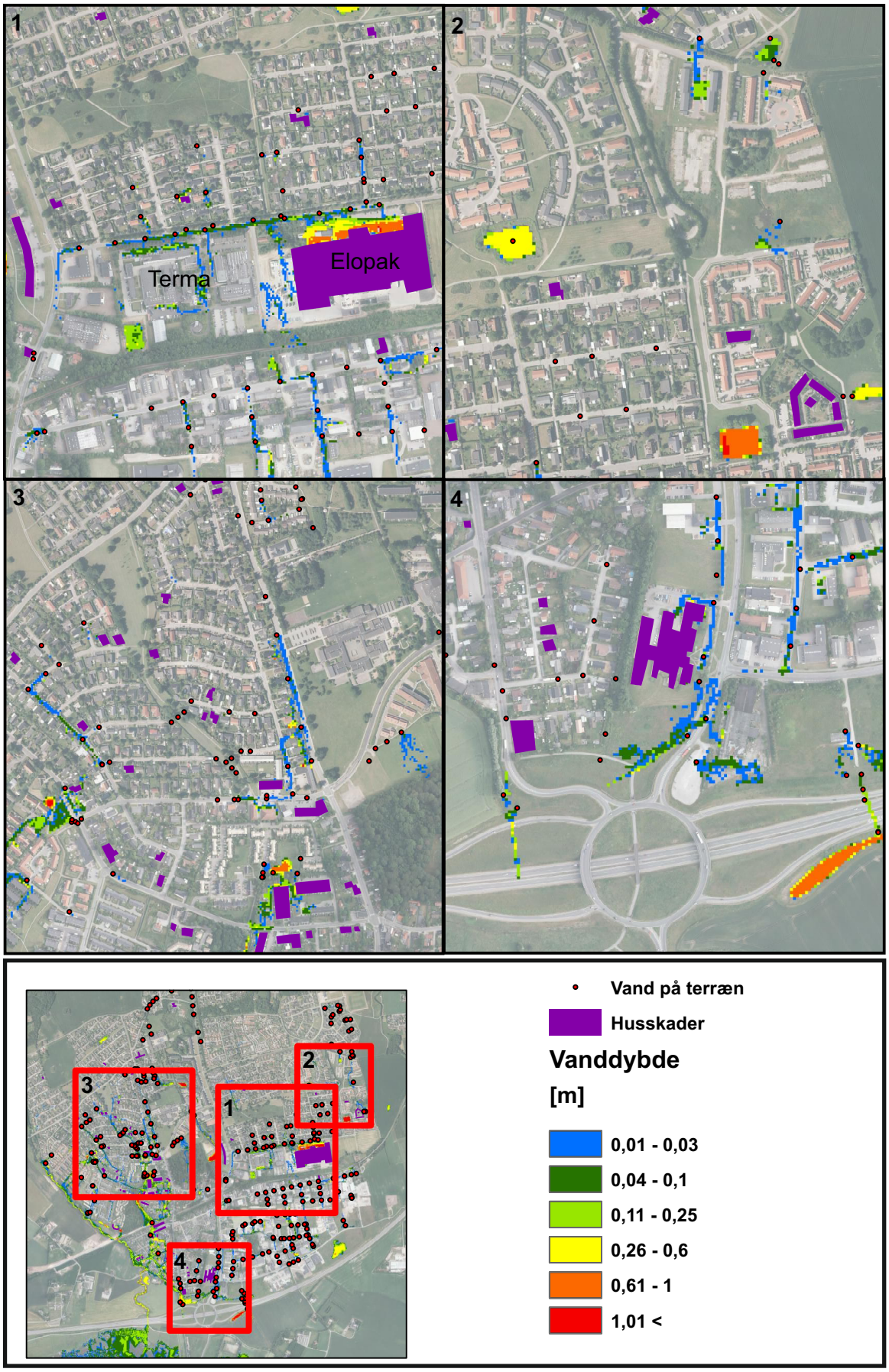
Model med oprindelige værdier (fra kapitel 3)
Modellen er først kørt i gennem med de oprindelige værdier, som er antaget for de to modeller i afsnit 3. Resultatet fra modellen med 1 min. opløselighed og observationsdata kan ses på figur 4.4



Figur 4.4. Oversvømmelsesudbredelse ved gennemkørsel af model med radar tidsopløselighed på 1 min. og de oprindelige værdier fra MIKE Urban og MIKE 21 model. Observationer som huse registrerede skader, vand på terræn fra Orbicon model og billeder er medtaget. Billeder er fra hhv. Orbicon og TV2 Galleri [2012].

Modellen viser, at der i enkelte områder opstår vand på terræn, som stemmer overens med de områder, hvor der er registreret skader. Der er områder i modellen, hvor der ikke opstår oversvømmelse eller hvor vanddybden virker forholdsvis lav, under tre cm, hvor der ellers er observeret vand. Dette er primært i forbindelse med til- og frakørslen fra motorvejen, som også er illustreret på billederne i figur 4.4. Her er der observeret en vandstand i næsten en bils højde, hvilket svarer til ca. 120 - 150 cm. Herudover er der også flere huse, hvor der er registreret skade, som heller ikke umiddelbart i modellen, ser ud til at blive ramt af vand på terræn. Dette tyder på, at der bliver udvekslet for lidt vand mellem de to modeller, hvilket kan tages hensyn til, ved at justere på de hydrologsike parametre i afløbsmodellen som eksempelvis befæstelsesgraderne.

Der er valgt, at fokusere på fire områder i Lystrupmodellen under kalibreringen. Disse er valgt ud fra de tilgængelige observationer. Udsnit af områderne er illustreret på hhv. figur 4.5.



Figur 4.5. Udsnit 1 til 4 med en gennemkørsel af oversvømmelsesmodel med oprindelige værdier.

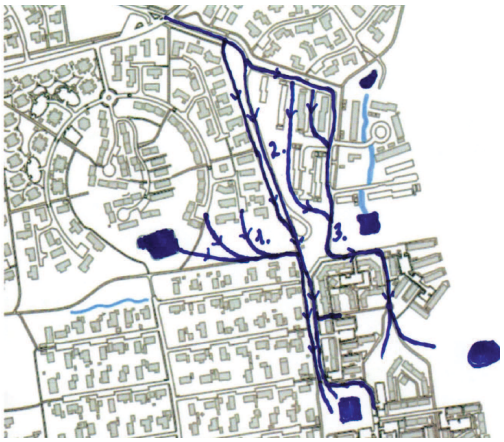
Udsnit 1: Model og observationer stemmer her godt overens ift. samling af vand omkring Elopak, vandstand 30-100 cm. Mens at der omkring boligblokkene helt til venstre i figuren ikke umiddelbart ser ud til at være påvirket af vand på terræn.

Udsnit 2: Både fra observationer af skadesregistreringer og vidnesberegninger som ses på figur 4.7 eller bilag C, ses i modellen ikke samme problemer med vand på terræn, hvilket kan skyldes en for lav vandvolumen tilført modellen. Der ses enkelte små områder med vand på 1-10 cm.

Udsnit 3: Der ses i dette område også for lidt vand i modellen. I modellen samles der vand tæt ved bebyggelsen nederst i figuren. Omkring den resterende bebyggelse er det begrænset med vand på terræn ift. de skadesregistreringer der modtaget.

Udsnit 4: Ved indkørslen fra motorvejen til Lystrup samles der alt for lidt vand ift. den virkelige situation, se figur 4.6. Dette forventes primært at skyldes en fejl i terrænmodellen omkring motorvejen samt en for lav tilførelse af vand til modellen.

Figur 4.6. Oversvømmelse ved indkørsel fra motorvejen ved Lystrup d. 26. August 2012. Billede fra TV2 Galleri [2012].

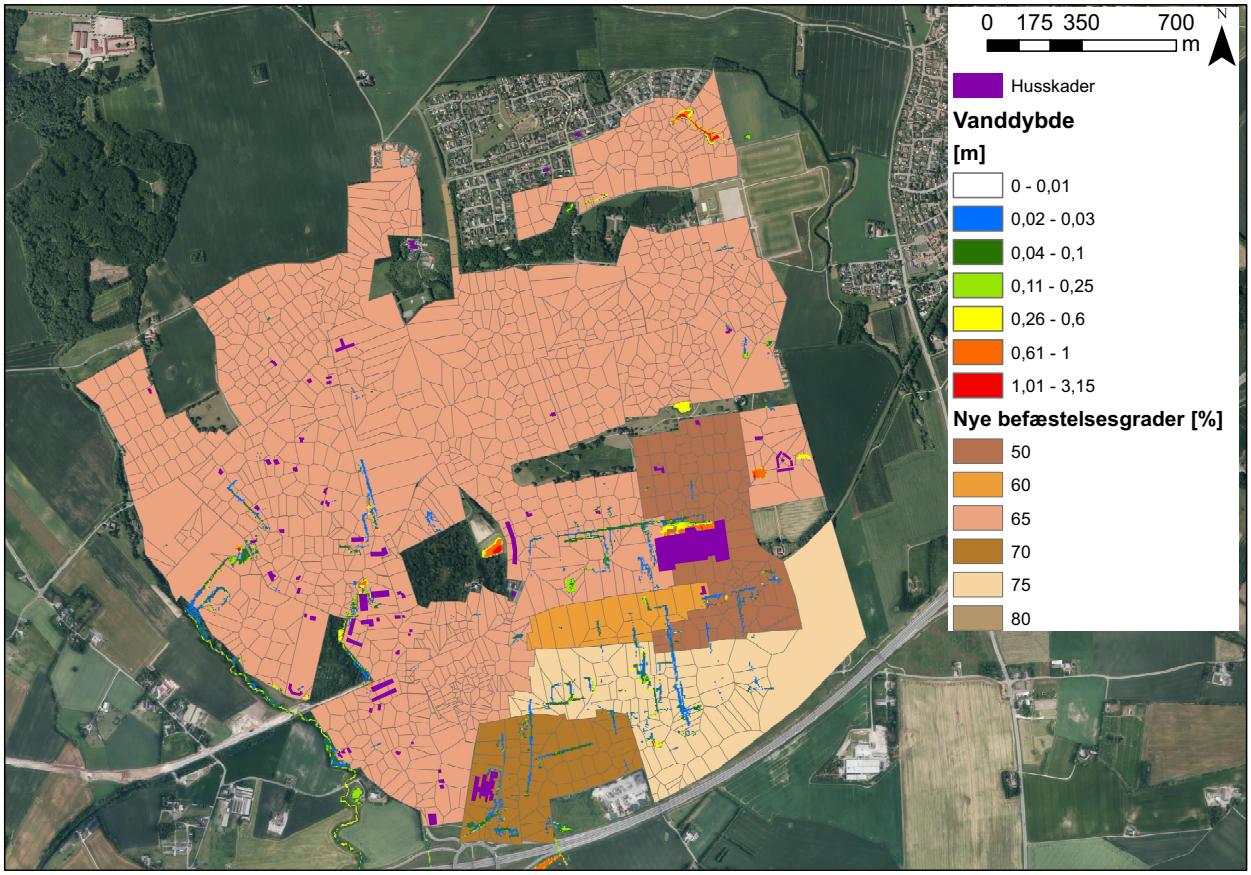


Figur 4.7. Vidnesberetning af strømningsveje omkring Majsmarken i den østlige del af Lystrup.

Model med nye værdier

Sammenlignes udbredelsen af oversvømmelsen i modellen med befæstelsesgrader og observationer, figur 4.8, ses det, at oplande med befæstelsesgrader mellem 50 og 80 % passer fint overens med model og observationer, mens der ved oplande med lavere befæstelsesgrader mellem 25 og 40 % generelt ses for lidt vand på terræn. Det formodes, at dette kan skyldes at der i områderne med lave befæstelsesgrader, sker en større afstrømning fra de grønne arealer end hvad er antaget i modellen. Dette kan evt. skyldes, at de lavere befæstedede områder, der består af flere grønne arealer, under kraftig regn også bidrager med afstrømning til afløsbsystemet i og med at disse bliver vandmættet under hændelsen. Tages der højde for geologien jf. afsnit 2.1, som i størstedelen af området er moræneler, kan der være en dårlig infiltrationsevne, som også kan medføre at de grønne områder i større grad vil bidrage til afstrømning til afløbssystemet.

På baggrund af denne antagelse, er der valgt at ændre på befæstelsesgrader. Alle befæstelsesgrader

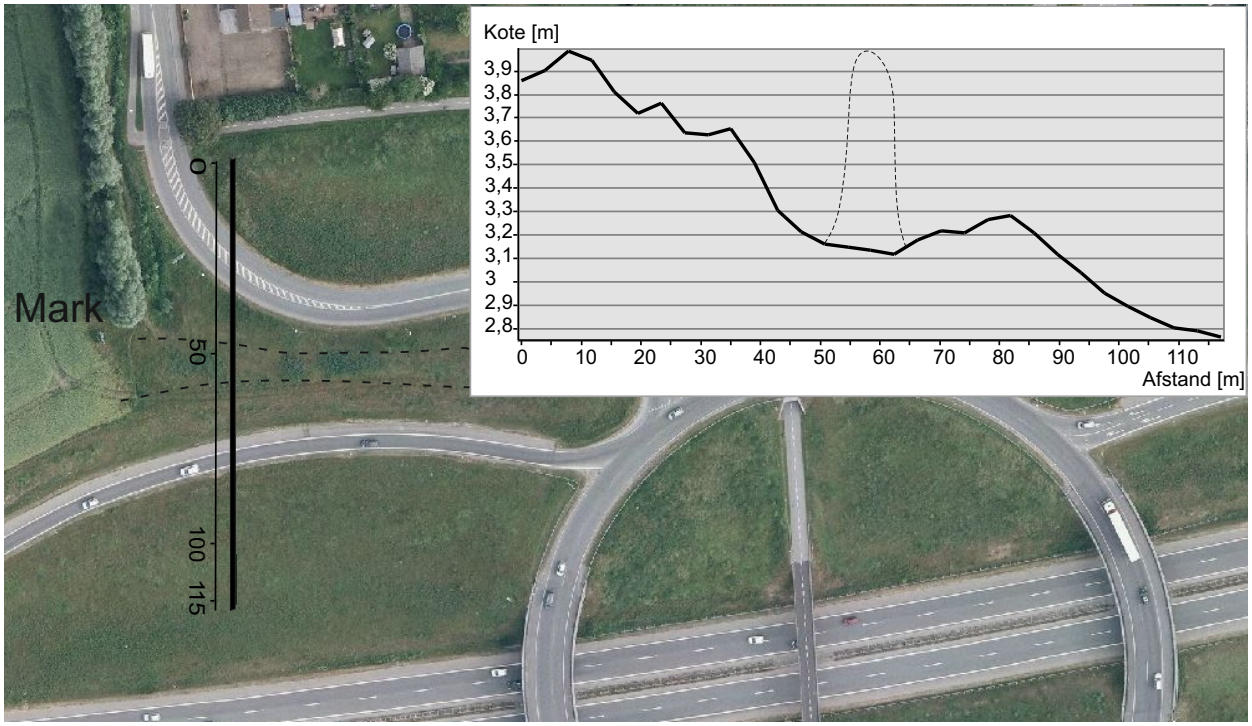


Figur 4.8. Lystrup opdelt i befæstelsesgrader som oprindeligt er anvendt i modellen. Herudover er observationer fra hændelsen d. 26. august 2012 samt model resultater illustreret.

under 50 % er ændret til 65 %. Dette er valgt, for at tage højde for en større afstrømning fra grønne områder.

Der er lavet en enkelt ændring i terrænmodellen. På figur 4.9 ses det, at terrænet falder nogenlunde jævnt ned mod motorvejen, hvilket ikke er tilfældet i virkeligheden. Der er i forbindelse med motorvejens opførelse lavet en form for støjbarriere ud mod motorvejen, hvilket resulterer i, at der dannes en lavning ved denne til- og frakørsel til Lystrup. Derfor ændres terrænmodellen således at, barrieren har tilsvarende højden som terrænet til venstre for vejen. Data anvendt til generering af højdemodellen er fra

2005-2007, hvor motorvejen først stod færdig i 2007-2008. Dette kan være årsag til, at der er en afvigelse mellem højdemodel og det virkelige terræn omkring motorvejen.



Figur 4.9. Terrænprofil af terræn koten mellem indkørslen til Lystrup og motorvejen.

De fire snit er på figur 4.10 illustreret med en modelberegning med de nye værdier.

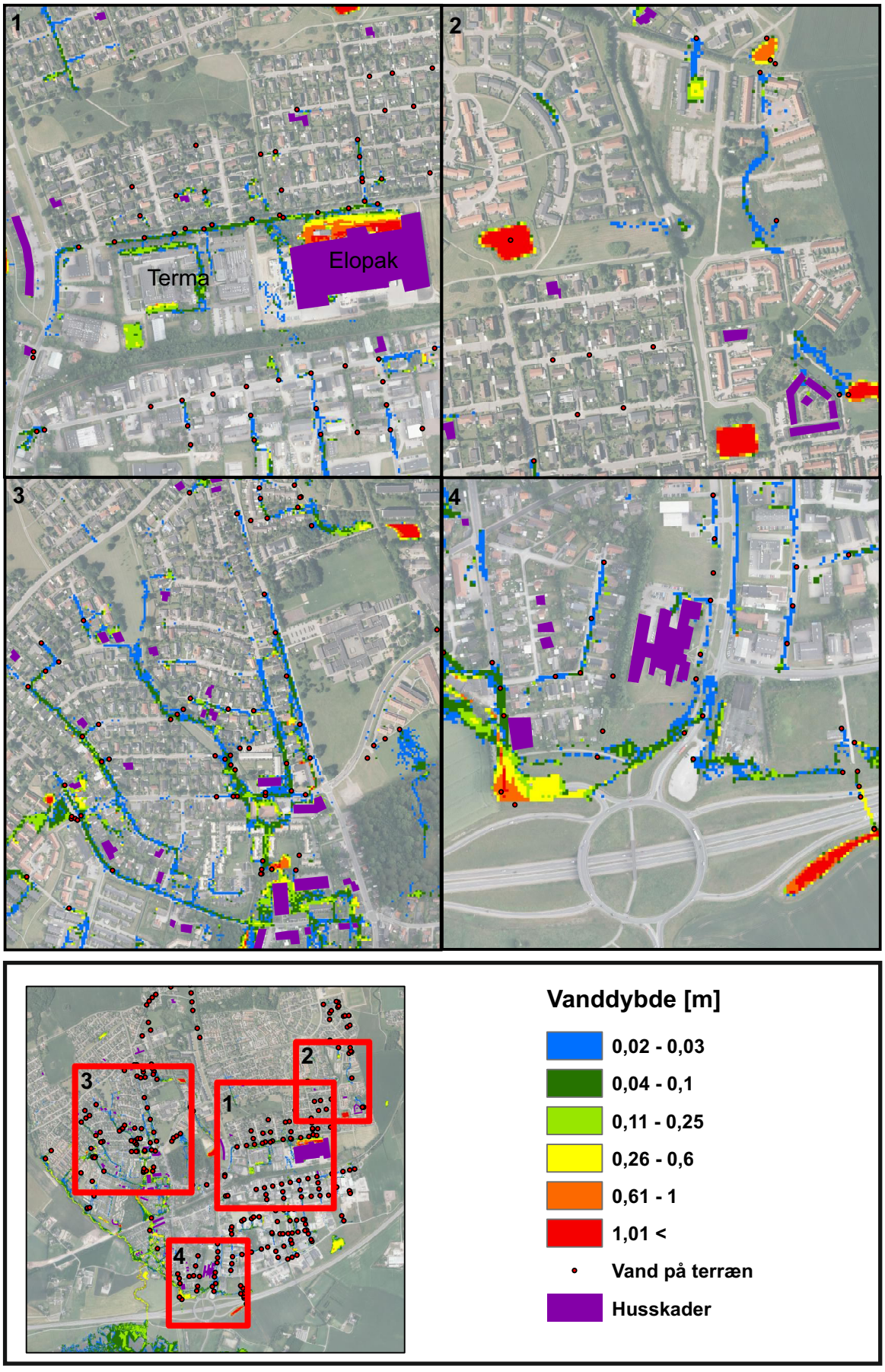
Udsnit 1: Der er i dette område blevet udvekslet mere vand mellem de to modeller, men ikke mere end at det stadig stemmer overens med observationerne. Der samles dog mere vand omkring Terma.

Udsnit 2 Der ses nu en god overensstemmelse mellem vidnesberetningerne af vandstrømme på bilag C og modellen. Der opstuver også vand rundt om bygningerne ved regnvandsbassinet i nederste højre hjørne.

Udsnit 3: Udbredelsen af vand på terræn er også her blevet markant større. Alle bygninger med skadesregistreringer, er i modellen mere eller mindre berørt af vand.

Udsnit 4: Efter ændring i terrænmodel opstuves vandet i indkørslen til Lystrup, som også er observeret. Vanddybden i lavningen er mellem 30 og 100 cm, hvilket stemmer fint overens med den observerede vanddybde.

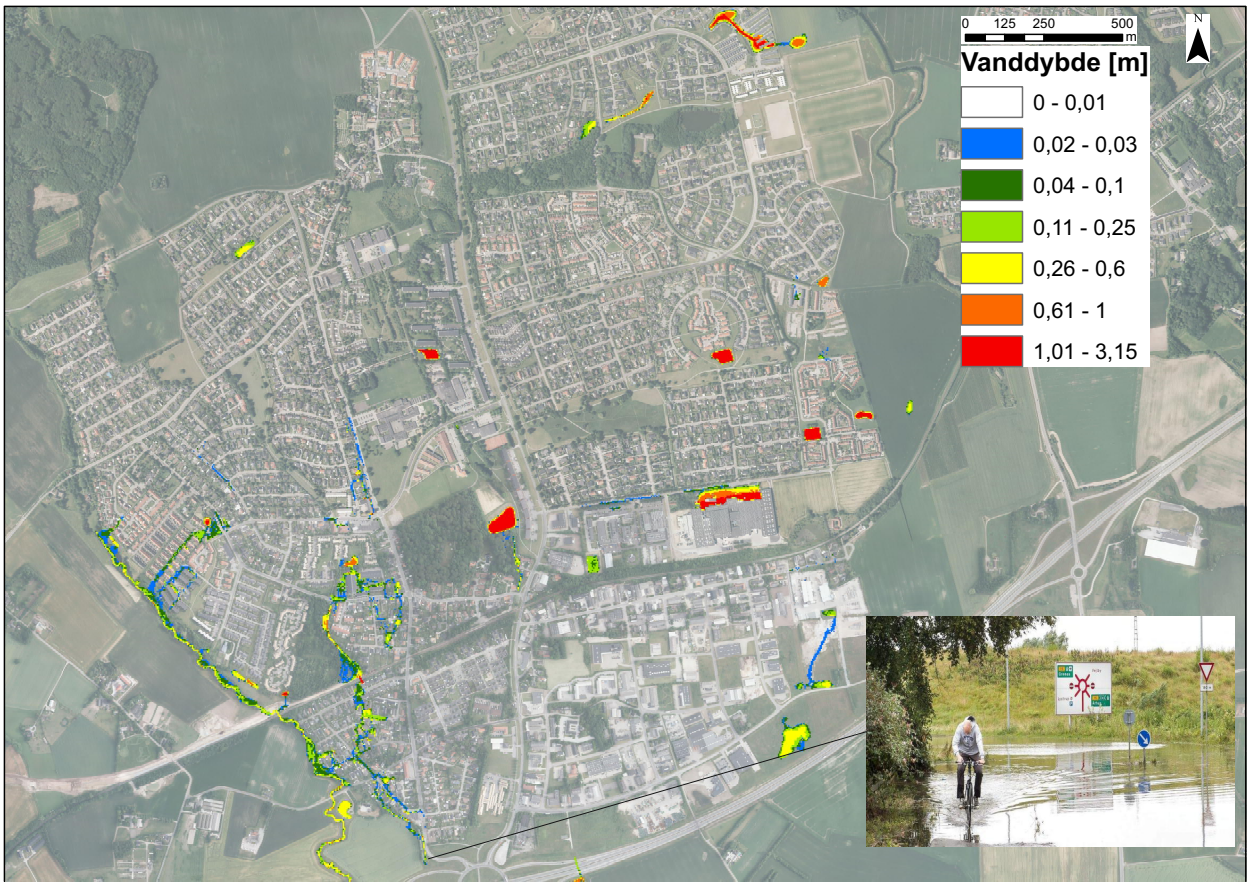
Modellen er tilsvarende kørt igennem med nedbørsmålingerne fra regnmåleren. Resulterne herfra kan ses i bilag D. Ved at anvende nedbørsdata fra regnmåleren, ses det, at oversvømmelsen har en lidt større udbredelse sammenlignet med radar observationerne, men at de ellers er meget sammenlignelige. Regnmåleren måler ca. 25-30% højere nedbørsintensiteter end radaren, hvilket er med til at flere strækninger bliver bliver oversvømmet.



Figur 4.10. Udsnit 1 til 4 med en gennemkørsel af oversvømmelsesmodel med nye værdier.

4.2 Resultater for Validering

Modellen er efterfølgende kørt igennem med hændelsen d. 13.-14. juli 2014, for at validere. Der er dog ikke mange tilgængelige observationer fra denne hændelse. Det har været muligt at finde et enkelt billede fra Aarhus Stifttidende [2014], som viser vandstanden ved til- og frakørslen til motorvejen. På billedet ses at vandstand ved til- og frakørslen er omkring 10-30 cm, hvilket passer nogenlunde overens med modellen, hvor der også ses en vandstand på 10-30 cm. Vandet i modellen ligger dog kun i en lang stribe langs vejen.



Figur 4.11. Oversvømmelsesudbredelse ved gennemkørsel af model med radardata fra hændelsen d. 13.-14. juli 2014. Billede fra [Aarhus Stifttidende 2014]

4.3 Opsamling

Ved at ændre på de laveste befæstelsesgrader, 25-40%, er der blevet tilført mere vand til modellen. Det medførte mere vand på terræn de steder, som med de oprindelige værdier ikke blev berørt af oversvømmelsen.

4.3.1 Usikkerheder

Usikkerheden ved at kalibrere oversvømmelsesmodellen er høj i og med, at der ikke er mange konkrete målinger at sammenligne model og virkelighed med, men kun begrænsede billeder, skadesregistreinger og borgerhenvendelser. Billederne og vidnesberetninger giver dog en udemærket indikation af om

modellen i et grovt perspektiv stemmer overens med virkeligheden.
Skades registreringerne fra huse kan også i et vist omfang anvendes, det kan dog være svært at vurdere, om oversvømmelserne har skyldtes opstuvning af vand på terræn fra afløbssystemet, eller om det skyldtes en mere lokal variation af terrænet og overflader ved de enkelte matrikler.
Hvis der havde været tilgængelige flowmålinger fra de kraftige regnhændelser eller målte overløb fra bassiner, kunne disse også være blevet anvendt til at kalibrere modellen. Dette vil have tilført mere konkrete værdier at justere modellen ud fra.
Til kalibrering er der tilpasset oversvømmelsen efter en enkelt regnhændelse og valideret efter en anden hændelsen. Det er svært at konkludere meget ud fra valideringen, da det er meget begrænset med observationer fra denne hændelse, hvilket kan gøre det svært at sige hvor godt modellen passer under andre regnhændelser. Men umiddelbart ser modellen ud til at kunne estimere oversvømmelsen tilstrækkeligt med input fra radar observationer.

For at kalibrere modellen, er der lavet en forøgning af befæstelsesgraderne for de områder, som havde en lav befæstelsesgrad. Dette er en simpel måde at tage forbehold for, at der sker et større bidrag fra afstrømning til afløbssystemet fra eks. grønne arealer.
Som et alternativ kunne de enkelte oplande opdeles i eks. et opland som bidrager til afløbssystemet og et opland som ikke bedrager til afløbssystemet (grønne arealer). Herefter kunne parametrene, befæstelsesgrader og initialtab, for oplandende med grønne områder justeres for at tilpasse oversvømmelsen. Ved at der udelukkende justeres på oplande med grønne arealer, kan der bedre tages højde for hvor meget tilstrømningen øges fra disse områder grundet kraftig regn. Et ekempel til kalibrering af parametrene kunne være, at sætte befæstelsesgraden til 80 eller 100 % og så justere på initialtabet, til det rigtig afstrømningsvolumen passer. Dog er det umiddelbart svært at vurdere, hvor meget mere detaljeret de forskellige parametre kunne instilles, når der tages forbehold for de observationer som er tilgængelig.

Del III

Analyse af fremskrevne datainputs

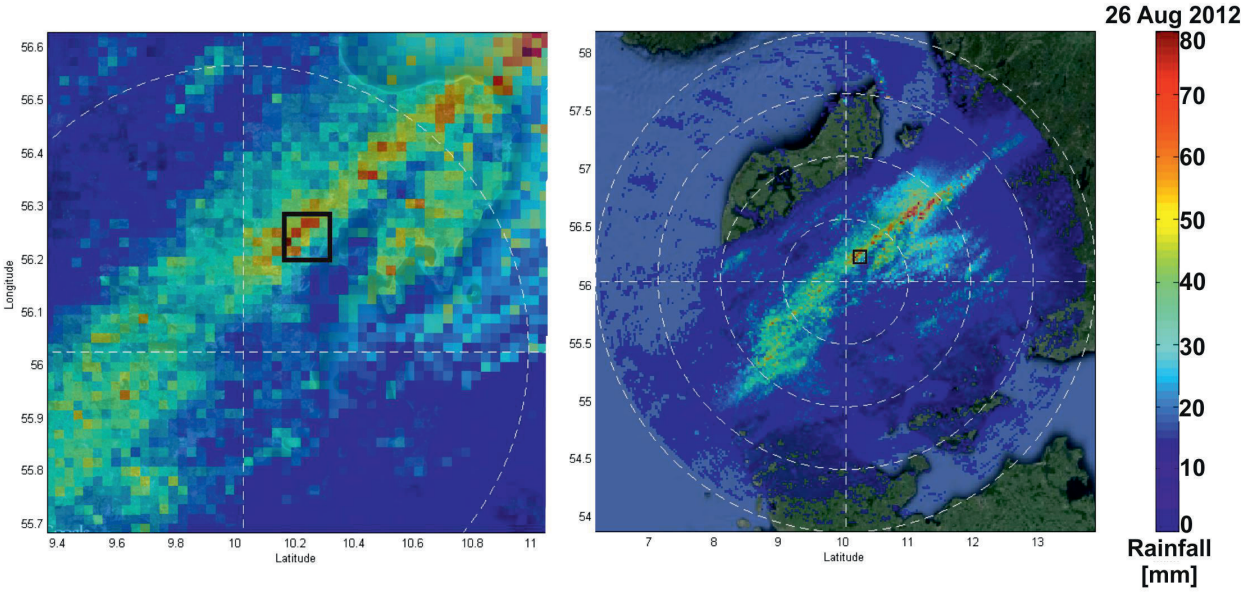
Formålet med denne del er at undersøge to kraftige regnhændelser, som har medført oversvømmelse, med henblik på at kunne vurdere, hvor nøjagtig radar nowcast- og vejrmodel prognoser kan estimere den reelle nedbør fra kraftige regnhændelser. Samt om disse estimater er tilstrækkelige til, at kunne anvendes som input til realtidssimulering af en oversvømmelse. De hændelser som er undersøgt, er hændelsen den 26. august 2012 og den 13.-14. juli 2014.
Der er to kapitler, som indeholder to forskellige analyser hhv. (1) radar fremskrivninger baseret på den determisitiske nowcast og vejrmodelsprognoser og (2) radar fremskrivninger baseret på den sandsynlighedsbaserede nowcast.

Ved prognoserne som er baseret på radarfremskrivninger(nowcast) er der undersøgt prognoser på 10, 30, 60, 90 og 120 min.
Ved vejrmodellen er der anvendt prognoser på hhv. 1-6, 7-12, 13-18 og 19-24 timer. Prognoserne er tidsserier, som er baseret på de oprindelige HIRLAM prognoser. Fremgangsmetode for hvordan tidsserierne for vejrmodellen er opsat kan ses i bilag E. Herudover findes der også i bilag E en mere beskrivende analyse af hvordan vejrmodellen estimerer nedbøren ved de fire prognoser og en mere detaljeret begrundelse for de valg som er taget i forbindelse med de celler som undersøges i vejrmodellen.

Nowcast og vejrmodel 5

5.1 Hændelse den 26. august 2012

Regnhændelsen over Lystrup den. 26. august 2012 var en kraftig regnhændelse. Sammenlignet med regnintensiteterne i regnrækken [IDA Spildevandskomiteen 2014], svarede regnhændelsen til en 50 års regnhændelse ved en varighed på 120 min, sammenligning med regnrækken findes i bilag F. Hele hændelsen varede i ca. 12 timer, hvor der faldt over 50 mm nedbør. Der faldt over 32 mm, svarende til over halvdelen af den totale nedbør, på under to timer.
Ud fra radarbilleder ses det, at høje nedbørsintesiteter opstår og aftager over Lystrup indenfor ca. to timer, hvorefter de helt dør ud. Dette fortæller, at hændelsen var en meget konvektiv nedbørshændelse, hvor regnen opstod og aftog forholdsvis hurtig indenfor et lokalt område. Animation af radarbilleder findes på bilags cd "*Analyse af regn*". På figur 5.1 ses den akkumulerede nedbør målt med radar. Den primære nedbør faldt i en smal stribe fra det sydvestlige til det nordøstlige jylland, mens der i enkelte lokale områder, herunder Lystrup, faldt større mængder nedbør. Denne struktur i den akkumulerede nedbør er med til at indikere hvor lokalt den konvektive nedbør opstod.

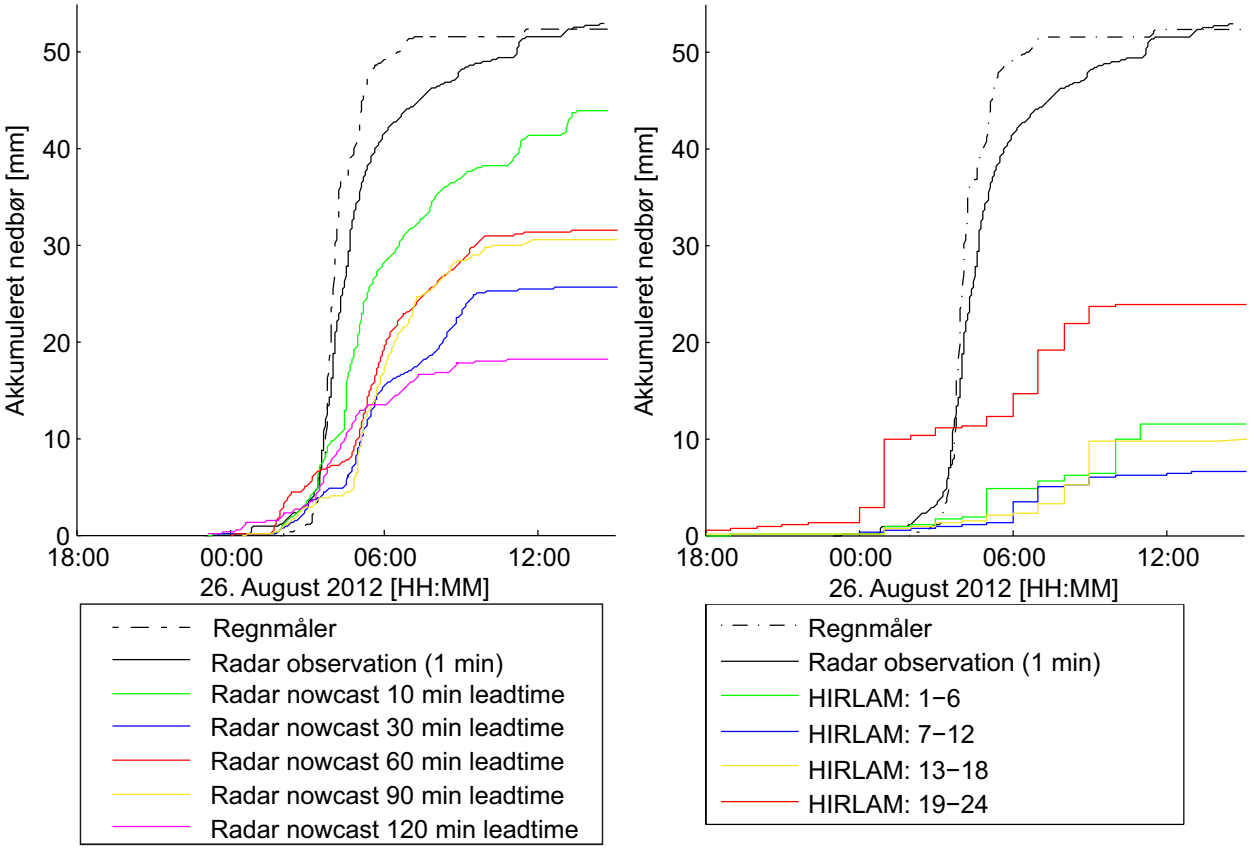


Figur 5.1. Akkumuleret nedbør målt med radar i en radius af ca. 70 km omkring Lystrup(venstre). Akkumuleret nedbør målt med radar for hele Danmark(højre). Lystrup er markeret med en sort firkant.

5.1.1 Nedbørsprognoser

For at en oversvømmelse kan forudsiges, er det nødvendigt, at både den totale nedbør og intensiteterne fra prognosen så vidt muligt stemmer overens med de observerede data. Er den totale nedbør for lav, vil det medføre for lidt vandvolumen tilført til afløbssystemet og for lave intensiteter medfører for lav belastning af afløbssystemets kapacitet.

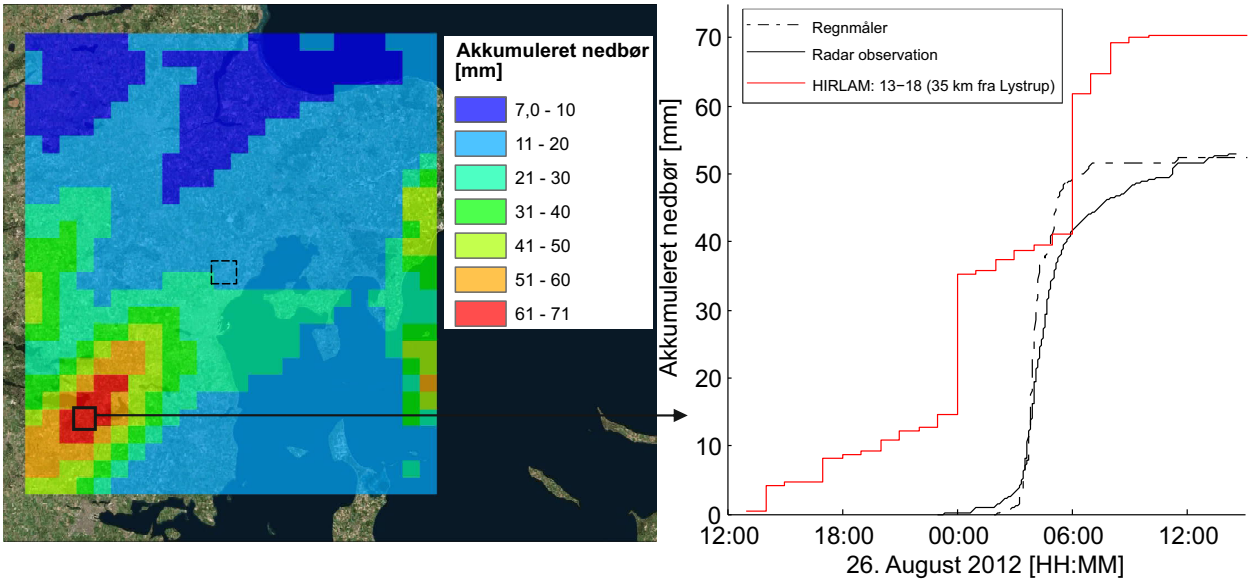
På figur 5.2 er illustreret observationer fra radar og regnmåler sammenlignet med hhv. fremskrivninger fra nowcast og de fire prognoser fra vejrmodellen. Værdier fra radar er en midling af nedbøren af alle seks radarpixel med 1 min. tidsopløselighed. Vejrmodellen er prognoser på 1-6, 7-12, 13-18 og 19-24 timer fra den celle, som dækker Lystrup.
Det er gældende for alle fremskrivninger, både nowcast og vejrmodel, at de akkumulerede nedbørs estimeringer ligger langt fra den observerede nedbør. Som forventet er det 10 min. nowcast som afviger mindst, denne afviger 17 % på det akkumulerede volumen, mens 30, 60 og 90 min. afviger omkring 50 % og ved 120 min. er afvigelsen over 70 %. Prognoserne matcher radar observationerne nogenlunde fra kl. 00:00 hvor regnen starter, og frem til kl. 03:00. Herefter tiltager nedbøren kraftigt, hvilket skyldes en høj stigning i intensiteten, og prognoserne begynder nu at underestimere.
Vejrmodellen har en afvigelse på omkring 60 % på det akkumulerede volumen ved en prognose på 19-24 timer. For de resterende prognoser, ses der en yderligere underestimering. Det ses samtidig, at prognoserne har svært ved at forudsige tidspunkt for hvornår nedbøren falder. Vejrmodellen har dog,



Figur 5.2. Akkumuleret nedbør for radar og regnmåler observationer sammenlignet med hhv. radar nowcast(venstre) og de fire vejrmodels prognoser 19-24 timer(højre).

som tidligere nævnt, en vis usikkerhed ift. at estimere den nøjagtige lokalitet for, hvor nedbøren vil

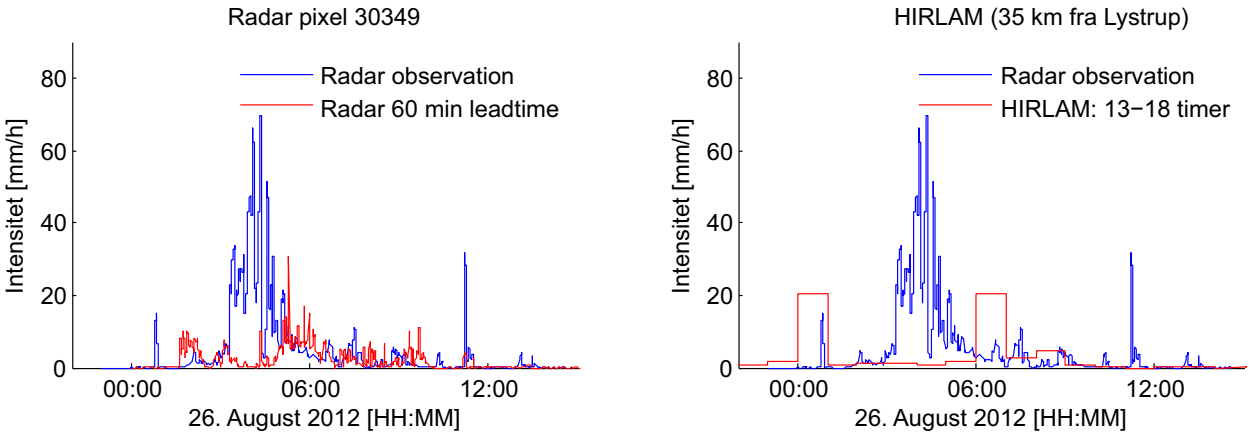
falde. Dette betyder, at den nedbør som blev observeret over Lystrup d. 26. august, kan være bestemt til at falde på en anden lokalitet i prognosen fra vejrmodellen. Der er derfor undersøgt, om der i andre celler omkring Lystrup var prognosticeret mere nedbør, som passer bedre overens med det, som blev observeret i Lystrup. Hele gennemgangen af de fire prognoser fra vejrmodellen findes i bilag E. Analysen af vejrmodellen viser for denne hændelse, at der er stor usikkerhed i vejrmodellens lokalisering af nedbøren, hvorfor der også undersøges de maksimale nedbørsakkumuleringer indenfor en radius af ca. 45 km omkring Lystrup.
På figur 5.3(venstre) ses den akkumulerede nedbør for flere celler i en radius af ca. 45 km omkring Lystrup. Nedbøren er fra en prognose på 13-18 timer, som er den prognose jf. bilag E, der har den største lighed med radar observationerne. Ud fra den akkumulerede nedbør ses det, at prognosen fra vejrmodellen forudser områder, hvor der lokalt falder mere nedbør. Der er estimeret nedbør på 60-70 mm ca. 20-40 km sydvest for Lystrup, hvilket stemmer udemærket overens med det, som blev observeret i Lystrup. Sammenlignes den akkumulerede nedbør fra vejrmodellen med den observerede, ses der nu en bedre lighed mellem nedbøren, se figur 5.3(højre). Vejrmodellen forudser den akkumulerede nedbør godt, og forudser også, at de største mængder af vand falder indenfor nogle korte tidsrum.



Figur 5.3. Akkumuleret nedbør fra vejrmodel (13-18 timer) i en radius af ca. 45 km omkring Lystrup(venstre), samt en graf af den akkumulerede nedbør i cellen, med den maksimale akkumulerede nedbør(højre).

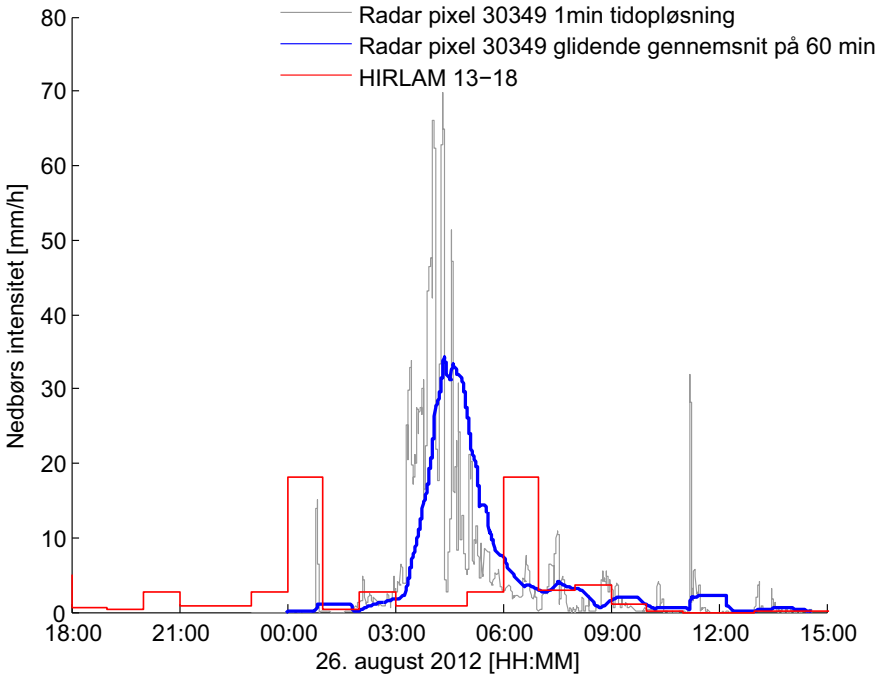
Det er tydeligt at se ud fra den akkumulerede nedbør, at de forskellige prognoseværktøjer i dette tilfælde generelt har svært ved, at estimere den oberverede nedbør. Dog ser det ud til, at vejrmodellen kan estimere nedbøren, hvis der tages forbehold for nedbørens lokalitet og usikkerheden de forskellige prognoser imellem.

På figur 5.4 ses nedbørsintensiteterne i pixel 30349 for en nowcast med leadtime på 60 min., samt en prognose fra vejrmodellen på 13-18 timer i et område lokaliseret ca. 35 km fra Lystrup. Disse er de to prognoser fra hhv. nowcast og vejrmodel, som estimerer nedbøren bedst, hvis der ses bort fra nowcast med 10 min leadtime. Nowcasten er i en opløsning på 1 min., mens vejrmodellen er i en opløsning på 60 min. Figuren viser, at prognoserne ikke kan estimere de hurtige ændringer i intensiteterne der sker ved konvektiv nedbør, dette er også tendensen ved en leadtime på 10 min for nowcasten. Det konvektive fænomen medfører at nedbøren er svær at fremskrive for nowcasten.



Figur 5.4. Nedbørsintensiteter fra radar observation, nowcast med leadtime 60 min. og en vejrmodel prognose på 13-18 timer.

Vejrmodellens intensitet er midlet over en time, hvilket betyder, at denne ikke kan medtage alle de variationer, der forekommer i nedbøren i løbet af en time, som hvis man sammenligner med den observerede nedbør. Hvis intensiterne fra vejrmodellen sammenlignes med radar observationerne med 60 min. glidende gennemsnit, figur 5.5, ses det, at vejrmodellens intensiteter stemmer bedre overens med de observerede, dog underestimerer vejrmodellen stadig.



Figur 5.5. Sammenligning af intensiteter fra observeret nedbør og prognose fra vejrmodel i 60 min tidsopløselighed.

Der ses stor afvigelse i både den akkumulerede nedbør og ved nedbørs intensiteterne, både ved nowcasten og ved vejrmodellen.
Ved nowcsaten ses der en stor underestimering af nedbøren mellem de fem forskellige leadtimes. Nedbørsestimeringerne falder markant med en stigende leadtime. De meget afvigende nowcast forventes at skyldes den meget konvektive nedbørshændelse. Det er under disse forhold, med hurtig

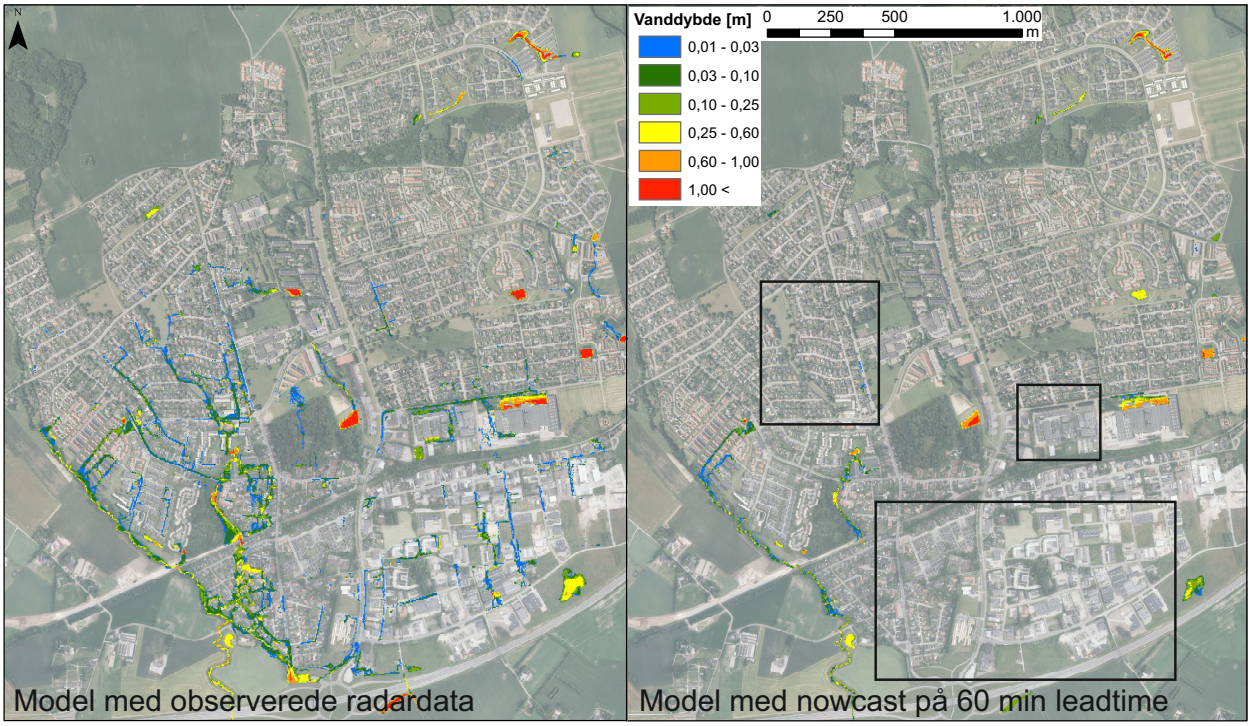
vækst og henfald i nedbørsintensiteterne, ikke muligt at estimere nedbøren med ekstrapolering, da nedbøren ikke er opstået på det tidspunkt, hvor nowcast køres. Ved denne hændelse bliver fremskrivningerne med nowcasten alt for usikre ved leadtimes længere end 10 min.
Vejrmodellen kan godt forudsige den konvektive nedbør, men der ses en stor usikkerhed ift. at estimere nedbørens lokalitet. Denne usikkerhed gælder i alle fire prognoser for vejrmodellen. Når de maksimale værdier indenfor en radius af 45 km sammenlignes med radar observationerne, viser tre af prognoserne en bedre lighed med nedbøren set ift. den akkumulerede nedbør samt intensiteterne. Afstanden til nedbøren ift. Lystrup er 30-45 km. Ved en ud af de tre prognoser(13-18) er der også udemærket lighed i tiden for hvornår nedbøren falder. Ved prognosen på 1-6 timer falder nedbøren for sent, mens den for prognosen på 19-24 timer falder for tidligt.
I tabel 5.2 er summeret akkumuleret nedbør og intensiteter for regnmåler, alle radarpixel og vejrmodel for både observerede og fremskrevne værdier, samt den maksimale akkumulering og intensitet. Værdier for vejrmodellen i parentes er de maksimale værdier indenfor en radius af 45 km.

	Regnmåler	Radar obs.	Radar nowcast				DMI-HIRLAM			
Leadtime (h)	0	0	0,5	1	1,5	2	1-6	7-12	13-18	19-24
Middel akk. (mm)	58	52,9	21,6	27,3	26,7	15,1	14,8(45,8)	7,1(21,3)	9,0(70,5)	23,5(35,4)
Maks. akk. (mm)	58	70,2	23,1	29,6	27,9	16,3	14,8(45,8)	7,1(21,3)	9,0(70,5)	23,5(35,4)
Maks. intens. (mm/h)	108	69,8	27,7	36,8	88,6	31,4	2,5(25,4)	2,3(4,5)	2,82(18,1)	8,98(18,7)

Tabel 5.1. Middel og maksimal akkumulering samt maksimal intensiteter for nedbørs observeringer, nowcast og vejrmodel. Værdier i parentes angiver maksimale værdier fra vejrmodellen i en radius af 45 km fra Lystrup.

5.1.2 Oversvømmelsesprognoser

Det ses tydeligt, at oversvømmelsesmodelleringen bærer præg af, at prognoserne underestimerer intensiteteren. Ved 60 min leadtime, som er den bedste nowcast prognose ift. akkumuleret nedbør, hvis der ses bort fra 10 min. leadtime, er der flere områder i modellen, hvor der ikke opstuver vand på terræn. På figur 5.6 er resultater fra en oversvømmelsesmodel med input fra radar observationer og nowcast på 60 min. leadtime illustreret. Det er her tydeligt, at nedbøren fra nowcasten ikke er tilstrækkelig til at forudsige hele oversvømmelsen. Det er primært de tre områder markeret på figur 5.6(højre), hvor der ses de største problemer ift. at forudsige oversvømmelsen.
Selvom nowcasten giver en underestimeret forudsigelse af nedbøren, er det stadig tilstrækkeligt til, at kunne modellere vand på terræn i enkelte områder, dog i en noget mindre grad sammenlignet med radar observationerne.

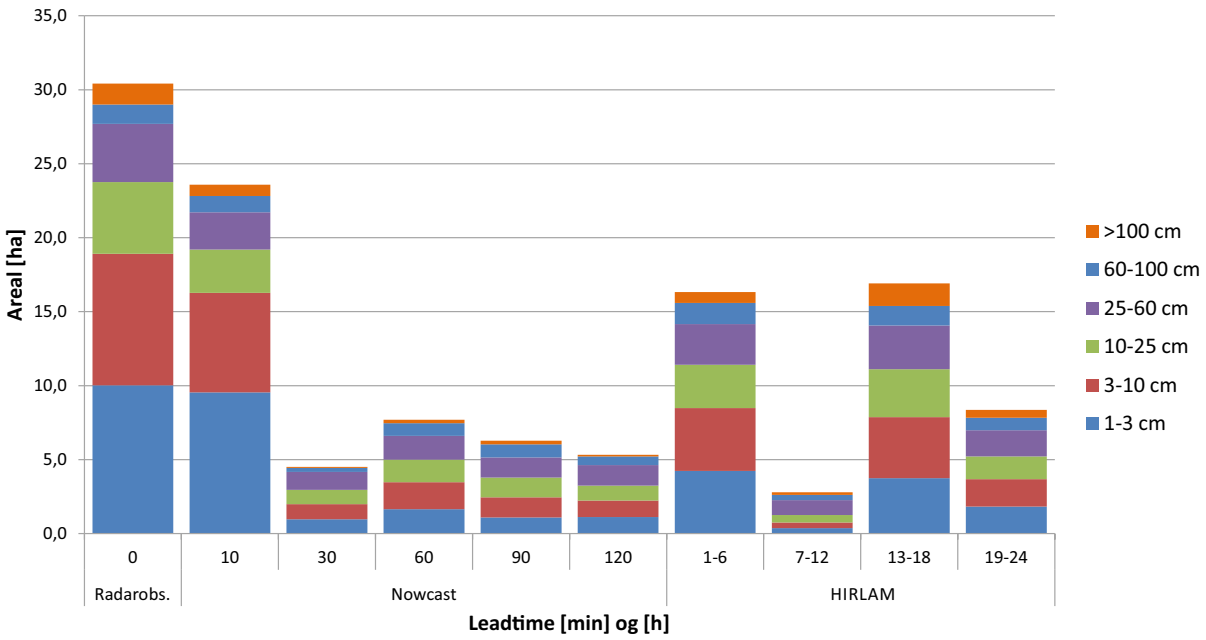


Figur 5.6. Model med observerede radardata(venstre) og model med nowcast med 60 min leadtime(højre). Områder afmærket med sort firkant, hvor vand på terræn ikke bliver modelleret med en nowcast på 60 min leadtime.

Cellen med den højeste akkumulerede nedbør fra vejrmodel prognosen på 13-18 timer forudsagde høje regnintensiteter på omkring 20 mm/h indenfor sammenlagt to timer i løbet af regnhændelsen. Størrelsen på intensiteterne stemmer udemærket overens med de observerede intensiteter midlet over en time bortset fra, at de to høje timeintensiteter ifølge vejrmodellen kommer med 5 timers mellemrum. Dette betyder, at afløbssystemet ikke bliver kraftigt belastet i en lige så lang sammenhængende tidsperiode som under den virkelige hændelse. Dette kan være årsag til, at den simulerede oversvømmelse fra vejrmodelsprognosen ikke når helt den samme oversvømmelsesgrad, som ved modellering med de observerede data.
Selvom prognosen fra vejrmodellen ikke forudsiger helt den korrekte nedbør, er det stadig tilstrækkeligt til, at give en udemærket forudsigelse af oversvømmelsens udbredelse. På figur 5.7 ses oversvømmelsen fra vejrmodellen sammenlignet med radar observationerne.

I figur 5.8 ses resultater af oversvømmelsens udbredelse i ha fra observerede radardata med 1 min tidsopløselighed, nowcast og de fire HIRLAM prognoser med den maksimale akkumulering.

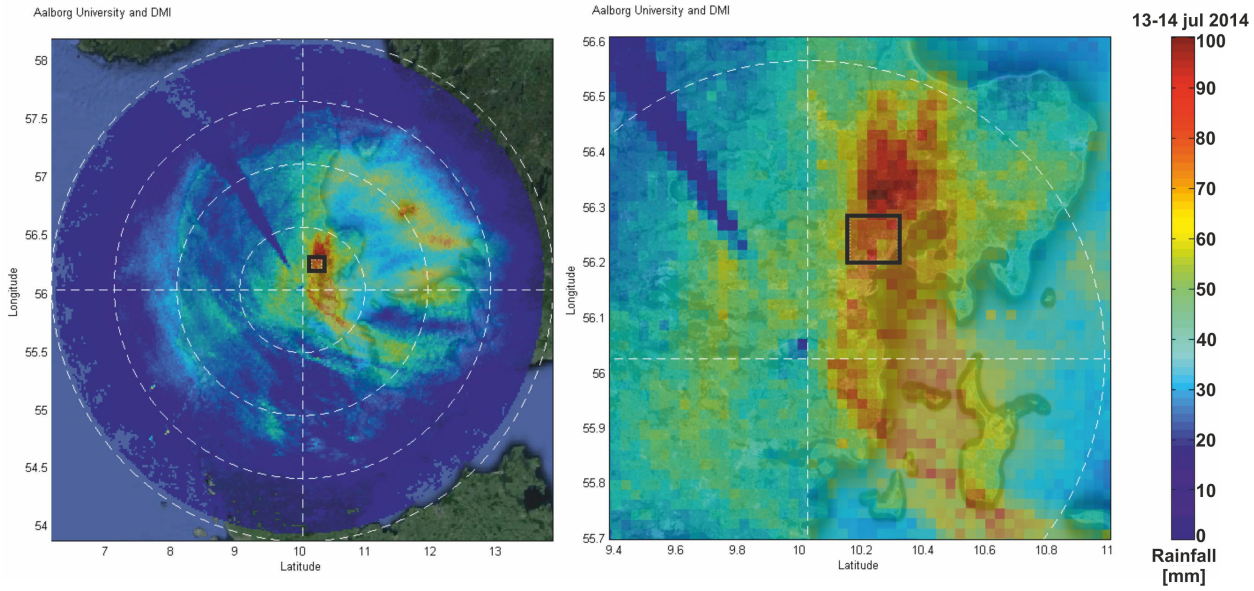
Figur 5.7. Model med observerede radardata(venstre) og model med prognose på 13-18 timer med den maksimale nedbørsakkumulering(højre).



Figur 5.8. Areal af vand på terræn, ved radar observationer, nowcast og prognoserne fra vejrmodellen.

5.2 Hændelse den 13.-14. juli 2014

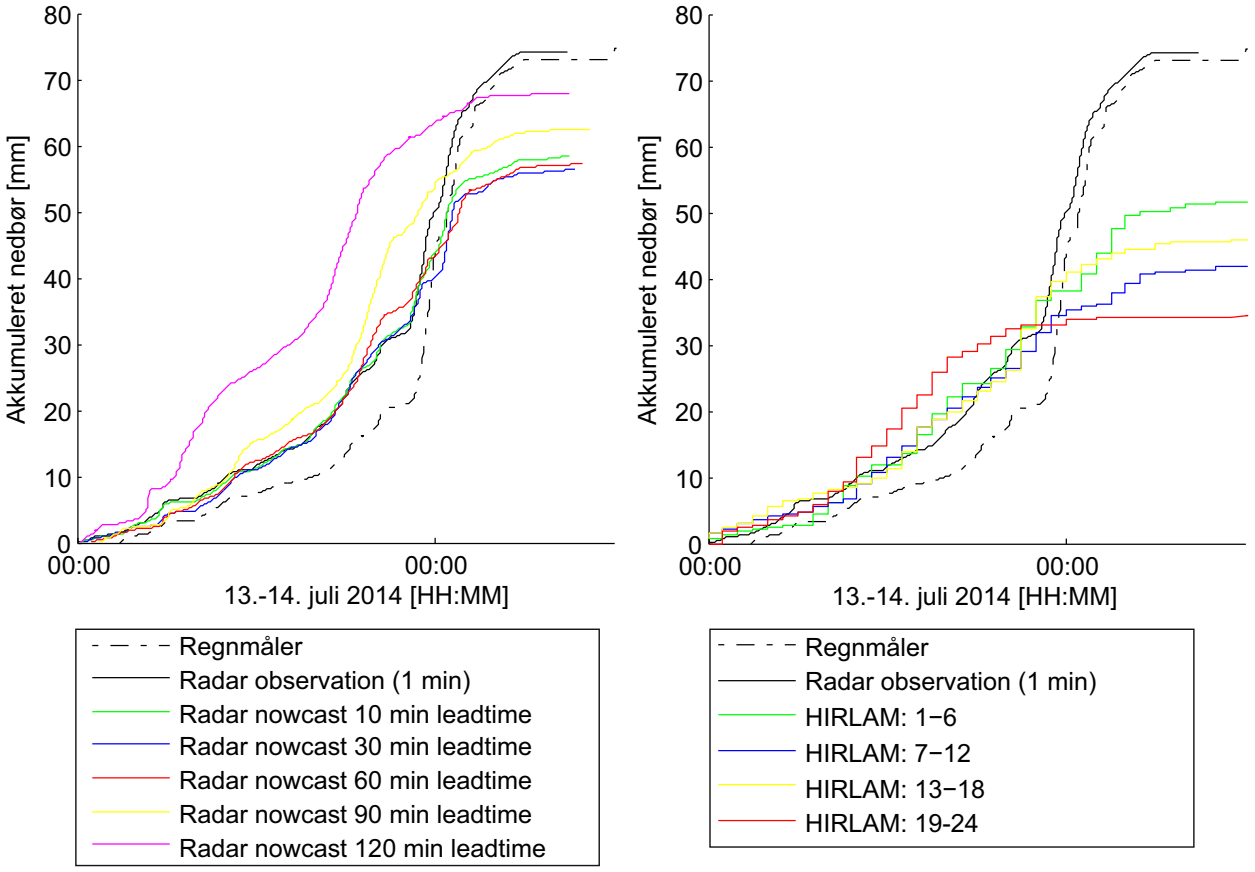
Regnhændelsen den 13. juli 2014 svarede, sammenlignet med regnrækken, til en 20 års hændelse ved en varighed på 600 min., se bilag F. Hændelsen var derfor kraftigest set over de længere varigheder. Hændelsen varede ca. 30 timer, fra kl. 00.00 d. 13 juli til kl. 06:00 d. 14 juli, hvor der nåede at falde ca. 70-80 mm regn. I de første 20 timer var intensiteten nogenlunde konstant og ikke volsom høj, hvorefter intensiteten steg betydeligt i løbet af de næste 4-5 timer.
Ud fra radarbilleder ses det også ved denne hændelse, at konvektiv nedbør opstår og aftager over Lystrup indenfor få timer, hvorefter de dør ud. Herudover ses det også, at nedbøren ændre retning under hændelsen. Nedbøren starter med at bevæge sig fra øst mod vest, herefter begynder den at rotere ventre om og ender ud med at bevæge sig fra vest mod øst. Animation af hændelsen kan ses på bilags cd "Analyse af regn". På figur 5.9 er det ud fra den akkumulerede nedbør fint illustreret, hvor den konvektive nedbør opstod. Sammenlignet med hændelsen d. 26. august 2012, sker den konvektive nedbør d. 13. juli 2014 over et større område og med en rotation i bygernes bevægelse under hændelsen.



Figur 5.9. Akkumuleret nedbør målt med radar for hele Danmark(venstre), samt akkumuleret nedbør i en radius af ca. 70 km omkring Lystrup(Højre). Lystrup er markeret med sort firkant.

5.2.1 Nedbørsprognoser

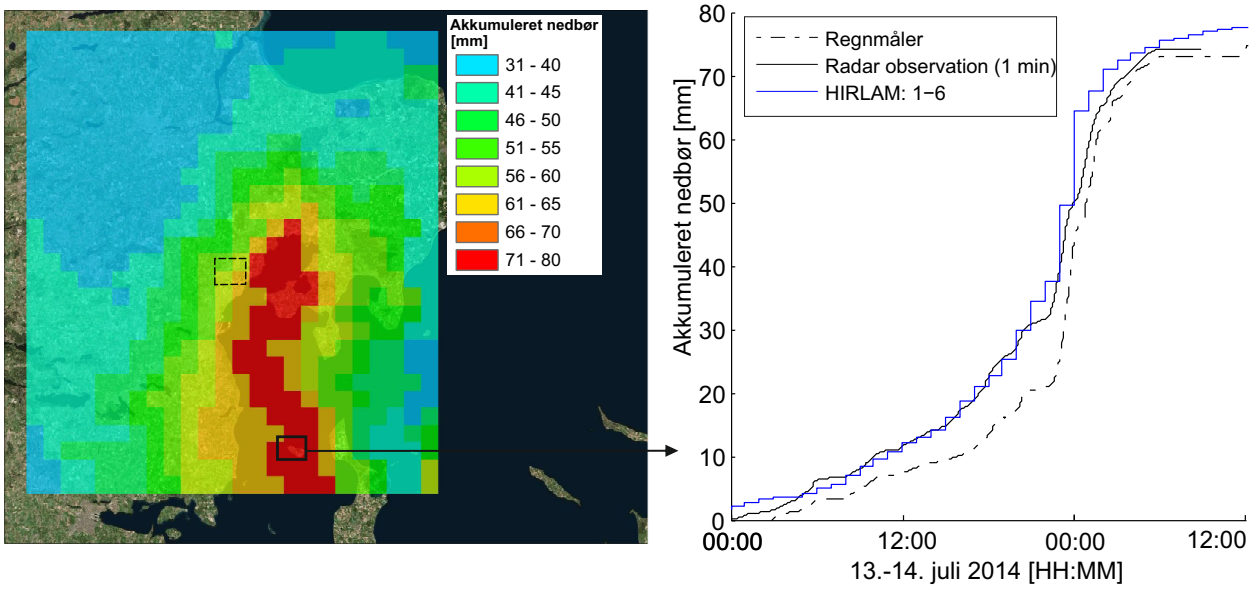
På figur 5.10 er illustreret observationer fra radar og regnmåler sammenlignet med hhv. fremskrivninger fra nowcast og prognoser fra vejrmodellen. Samlet set ser resulteterne af den akkumulerede nedbør fra nowcasten udemærket ud. Alle prognoserne underestimerer den akkumulerede volumen, hvor den afviger mest (30 min leadtime), afviger den med 24 % og den der afviger mindst (120 min. leadtime), afviger med 8 %. Leadtimes mellem 10 og 60 min. estimerer nedbøren godt fra d. 13. juli kl. 00:00 til omkring d. 14. juli kl. 00:00, hvor det er en frontregn med en nogenlunde konstant nedbørsintensitet og bevægelsesretning, som kommer ind over Danmark. Herefter opstår der konvektiv nedbør, bl.a. over Lystrup, samtidig med at bygernes bevægelsesretning bliver roterende. Nowcasten begynder nu at underestimere. Leadtimes på 90 og 120 min. har en tendens til, at overestimere nedbøren i starten af hændelsen, hvilket betyder at de kraftige nedbørsintensiteter kommer førend, at det var tilfældet i virkeligheden. Den akkumulerede nedbør passer dog bedst ved disse to nowcasts.



Figur 5.10. Akkumuleret nedbør for radar(1 min) og regnmåler observationer sammenlignet med hhv. radar nowcast(venstre) og vejrmodels prognoser(højre).

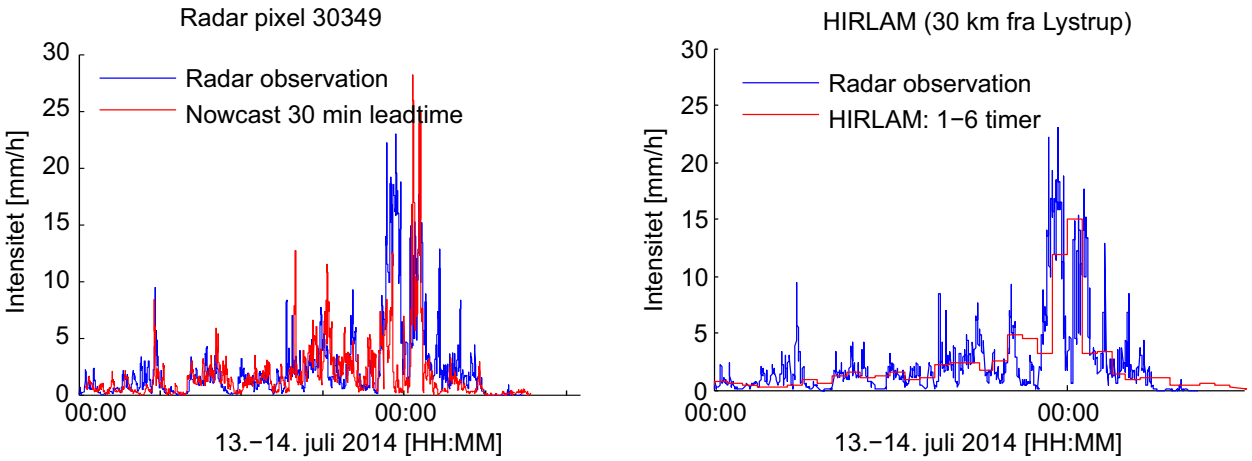
Vejrmodellen forudsiger også hændelsen udemærket fra d. 13. juli kl. 00:00 til omkring d. 14. juli kl. 00:00, men den forudsiger ikke den pludselige stigning i nedbøren, som efterfølgende finder sted. Vejrmodellen underestimerer den akkumulerede nedbør med hhv. 30, 45, 40 og 50 %.

Igen sammenlignes den akkumulerede nedbør fra vejrmodellens prognoser, for at undersøge om modellen har forudsagt en mere sammenlignelig akkumuleret nedbør i en radius af 45 km fra Lystrup. På figur 5.11(venstre) ses den akkumulerede nedbør fra en prognose på 1-6 timer, som viser den bedste lighed ift. den observerede nedbør. De resterende prognoser findes i bilag E. Den maksimale nedbør findes i en celle i en afstand af ca. 30 km fra Lystrup, hvor der forudsiges at falde 70-80 mm nedbør, som stemmer overens med den observerede nedbør. Sammenlignes den akkumulerede nedbør fra vejrmodellen med den observerede, ses der nu en god lighed mellem nedbøren, se figur 5.3(højre). Den akkumulerede nedbør samt tidspunktet for hvornår nedbøren tiltager er stort set ens når der sammenlignes med radar observationerne.



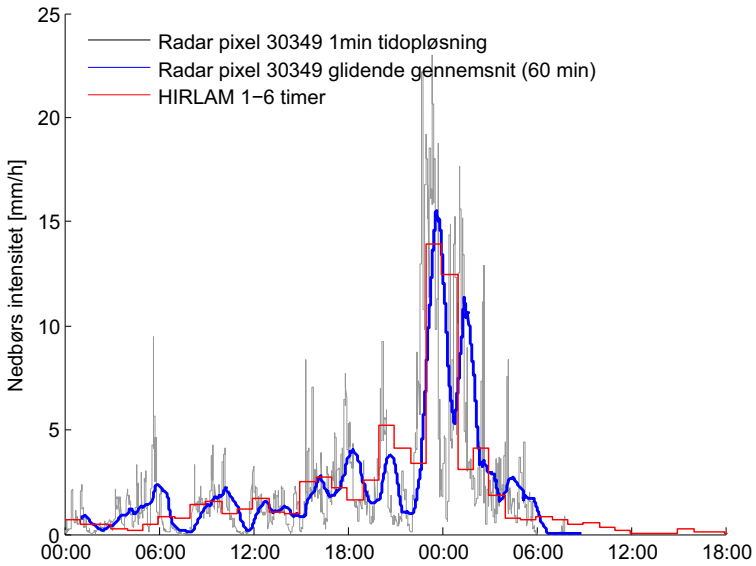
Figur 5.11. Akkumuleret nedbør fra vejrmodel (1-6 timer) i en radius af ca. 45 km omkring Lystrup (vestre), samt en graf af den akkumulerede nedbør i et modelpunkt som matcher den observerede nedbør bedst. Lystrup er makeret med et stiplet kvadrat.

På figur 5.12 ses nedbørsintensiteterne for nowcast prognose med 30 min. leadtime samt en prognose fra vejrmodellen på 1-6 timer. Nowcasten viser at de høje intensiteter bliver nogenlunde forudsagt dog med en lille underestimering.
Vejrmodellens intensiteter forudser også de høje intensiteter samt tidspunktet for hvornår nedbøren rammer lokaliteten. Ved at sammenligne radar observationerne med et glidende gennemsnit på 60 min.,



Figur 5.12. Nedbørsintensiteter fra radar observation sammenlignet med hhv. nowcast med leadtime 30 min og prognose fra vejrmodel på 1-6 timer.

ses det, at vejrmodellen forudser intensiteterne udemærket. Det er både de lave og høje intensiteter samt regnhændelsens struktur, hvor ligheden mellem vejrmodel og observationer er stor. Sammenligning mellem radar observationer og vejrmodel ses på figur 5.13.



Figur 5.13. Sammenligning af intensiteter fra observeret radardata og prognose fra vejrmodel i 60 min tidsopløselighed

Der ses en udemærket lighed i både akkumuleret nedbør og intensitet for nowcast med leadtimes 10-60 min i den første del af regnhændelsen, hvor nedbøren er nogenlunde ensformig og intensiteterne ikke variere meget mens nedbøren bevæger sig ind over Danmark. Nedbøren stiger pludseligt kraftigt, da der opstår konvektivt nedbør i den østlige del af jylland, og nowcasten har igen svært ved at estimere nedbøren. Ved nowcast med leadtimes på 90-120 min. ses der en tendens til, at nedbøren overestimeres i starten af hændelsen, hvorefter det aftager og der sker en underestimering af nedbøren. Dette formodes at skyldes, at der opstår konvektive byger øst fra Lystrup, som igen dør ud inden de når Lystrup. Men disse er med i nowcast prognoserne for hhv. 90 og 120 min. Størrelserne på intensiteterne stemmer dog udemærket overens med størrelserne på de observerede radardata.
Vejrmodellen viser igen, at kunne estimere størrelserne på intensiteterne forholdsvis nøjagtig, dog med en vis usikkerhed ift. lokaliteten. Der ses ellers stor lighed mellem nedbøren for de observerede radardata og vejrmodellen når der udvælges cellen med den maksimale akkumulerede nedbør.
I tabel 5.3 er summeret akkumuleret nedbør og intensiteter for regnmåler, alle radarpixel og vejrmodel for både observerede og fremskrevne værdier, samt den maksimale akkumulering og intensitet.

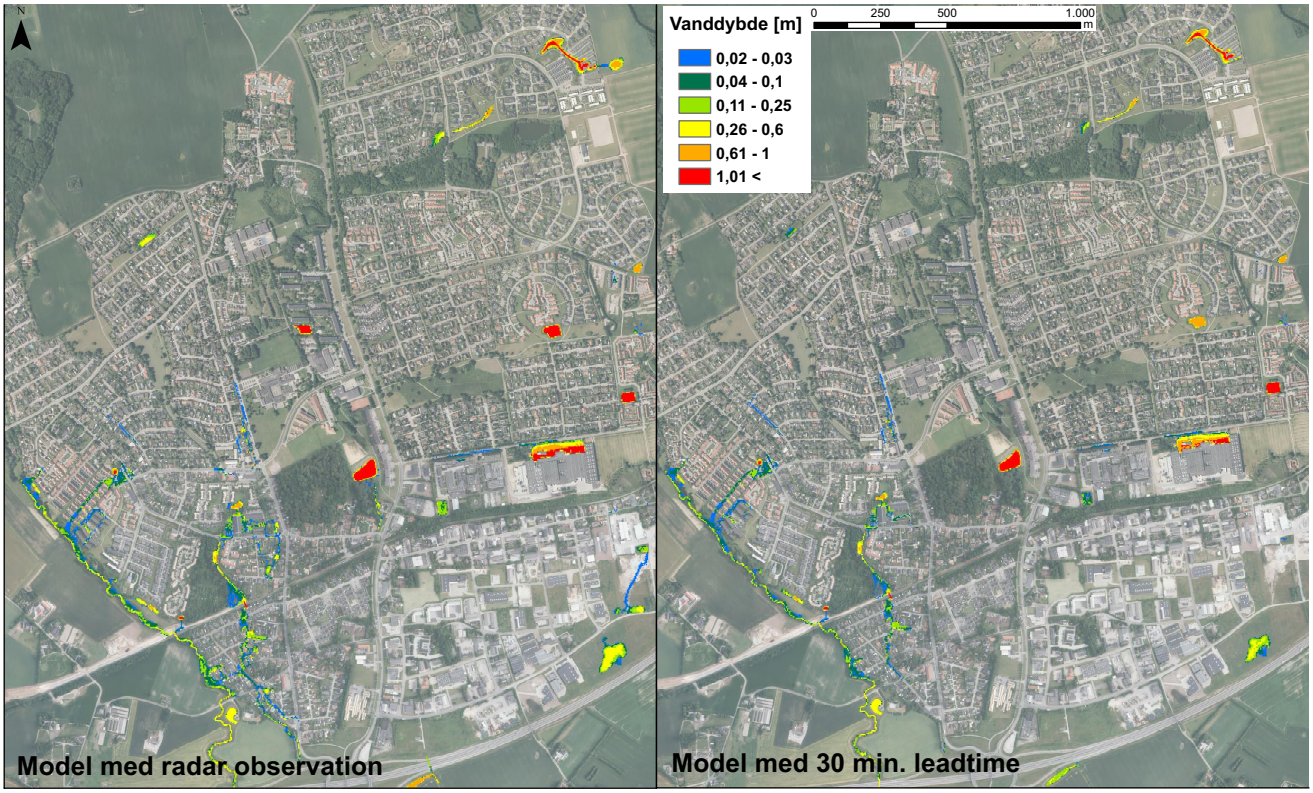
	Regnmåler	Radar obs.	Radar nowcast				DMI-HIRLAM			
Leadtime (h)	0	0	0,5	1	1,5	2	1-6	7-12	13-18	19-24
Middel akk. (mm)	75,2	74,3	56,4	57,2	62,5	67,9	50,3(79,5)	41,0(71,5)	46,1(116,6)	34,8(69,1)
Maks. akk. (mm)	75,2	76,1	59,9	61,7	67,4	69,3	50,3(79,5)	41,0(71,5)	46,1(116,6)	34,8(69,1)
Maks. intens. (mm/h)	36	44,1	28,2	28,6	20,0	28,2	4,0(13,9)	2,8(4,9)	6,3(16,2)	3,8(7,4)

Tabel 5.2. Middel og maksimal akkumulering samt maksimale intensiteter for nedbørsobserveringer, nowcast og vejrmodel. Værdier i parentes angiver maksimale værdier fra vejrmodellen i en radius af 45 km fra Lystrup.

5.2.2 Oversvømmelsesprognose

Denne hændelse var knap så kraftig, som hændelsen d. 26. august 2012, hvilket også kan ses på omfanget af oversvømmelsen fra de to modeller. Hændelsen d. 13. juli medførte en knap så stor udbredelse og

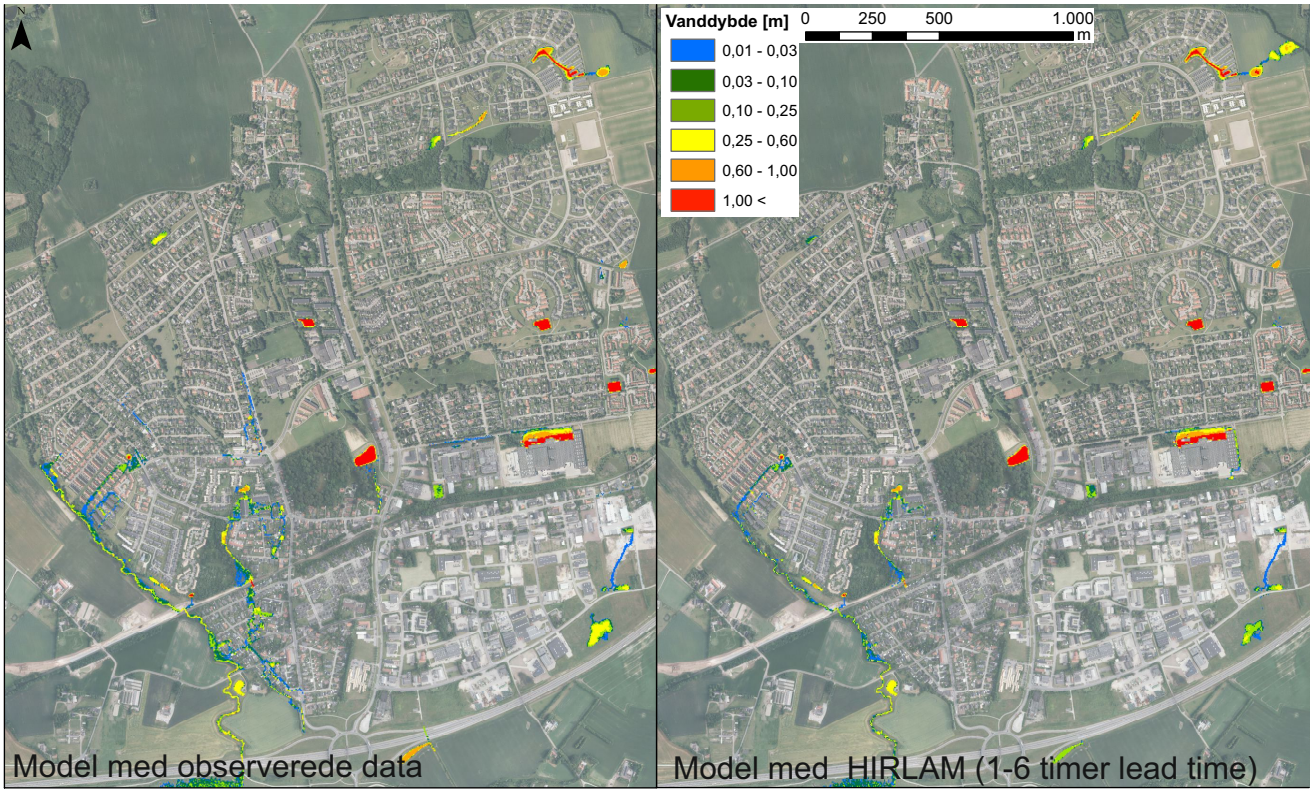
oversvømmelsen stortset udelukkende fandt sted i den sydvestlige del af Lystrup. Sammenlignes model med input fra radar observationer med model med input fra nowcast med leadtime på 30 min, ses det, at oversvømmelsen blive modelleret udemærket, bortset fra den del helt nede ved motorvejsafkørslen. Dette forventes at skyldes, at nowcastenen underestimere de høje intensiteter lidt, og der samtidig ikke bliver modelleret meget vand på terræn i dette område med radar observationerne.



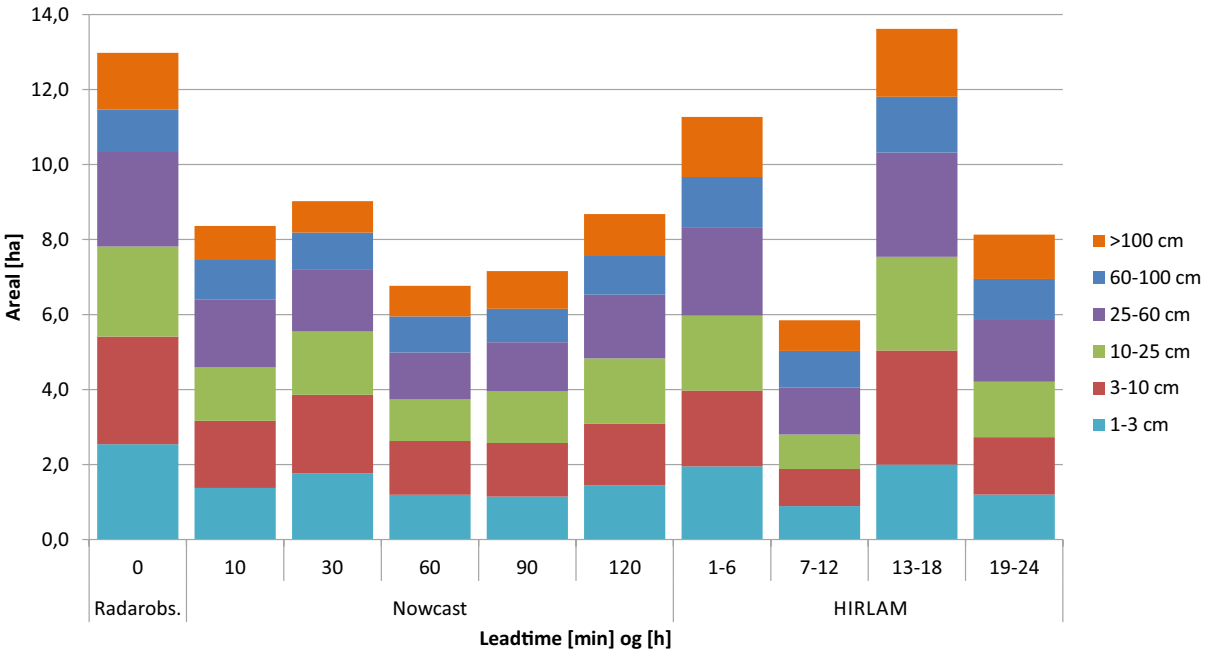
Figur 5.14. Model med observerede radardata(venstre) og model med nowcast med 30 min. leadtime(højre).

Den samme tendens ses der ved modellering af prognosen fra vejrmodellen, hvor det igen er området omkring motorvejsafkørslen, hvor oversvømmelsen ikke modelleres korrekt. Bortset fra afvigelsen af vand på terræn ved motorvejsafkøsrslen estimeres oversvømmelsen meget tæt på den med de observerede radardata.

Sammenlignes det oversvømmede areal af alle prognoserne med radar observationerne, ses der en god lighed ved nogle af prognoserne. Prognoserne fra vejrmodellen på 1-6 og 13-18 timer har en afvigelse på 5-28 %, mens prognoser for nowcasten har en afvigelse på 14-37 %.



Figur 5.15. Model med observerede radardata(venstre) og model med en prognose fra vejrmodellen på 1-6 timer(højre). Områder afmærket med sort firkant, hvor vand på terræn ikke bliver modelleret med vejrmodelen.



Figur 5.16. Areal af vand på terræn ved modellering med observerede radardata(1min), nowcast og vejrmodel.

Sandsynlighedsbaseret nowcast 6

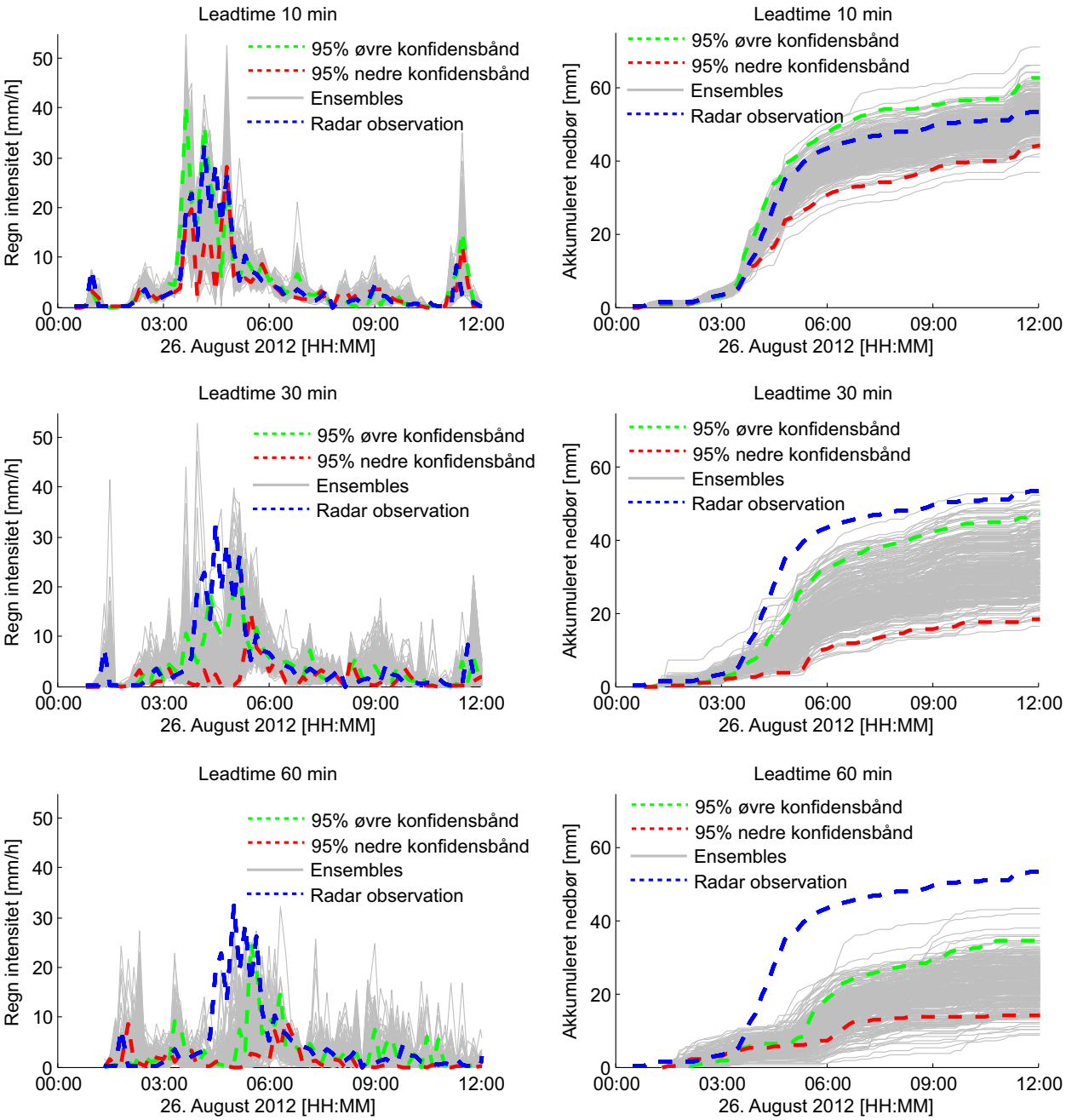
I dette kapitel undersøges den sandsynlighedsbaserede nowcast[Jensen et al. 2014], hvor der tages forbehold for, at der ikke kun er en løsning for, hvordan nedbørsprognosen ser ud, men i stedet undersøges flere forskellige scenarier(ensembles) for en mulig løsning. Der er i projektet undersøgt 300 ensembles for hver leadtime på 10, 30 og 60 min. Ensemblerne beskriver hver især en mulig løsning for, hvordan nedbøren kan ændre sig. Den sandsynlighedsbaserede nowcast har en tidsopløselighed på 10 min., hvilket betyder at alle radardata i dette kapitel har en tidsopløselighed på 10 min. og ikke er lavet med advektion interpolation som i forgående afsnit.
Formålet er at undersøge om der på baggrund af den akkumulerede nedbør eller intensiteterne, kan udvælges ensembles til at vurdere sandsynligheden for nedbøren. Alle ensembles undersøges for hver leadtime på 10, 30 og 60 min, hvorefter der udvælges ensembles ud fra fire forskellige konfidensintervaller 10, 50, 90 og 95 %.
Der er undersøgt to metoder til at udvælge ensemblerne. Den første metode er ved at sortere den akkumulerede nedbør fra hver ensemble efter størrelse, hvorefter der findes konfidensintervallet på hhv. 10, 50, 90 og 95 % for hver af de tre leadtimes.
Den anden metode er at sortere alle 10 min. intensiteterne fra hvert enkelte ensemble efter størrelse. Her udvælges 97,5 % fraktilen for intensiteten fra hvert ensemble, så der nu haves intensiteten svarende til 97,5 % fraktilen for hver af de 300 ensembles. Disse bliver igen sorteret efter størrelse, hvorefter der findes konfidensintervallet på hhv. 10, 50, 90 og 95 % for hver af de tre leadtimes. Den sidste metode, hvor ensemblerne udvælges på baggrund af intensiteterne, viste meget spredte og tilfældige resultater, hvorfor denne ikke er beskrevet nærmere i dette projekt. Det er derfor udenlukkende resultater fra metoden, hvor ensemblerne udvælges på baggrund af den akkumulerede nedbør, som beskrives i kapitlet.

I analysen tages der udgangspunkt i en midling mellem alle seks radar pixels for hvert ensemble.

6.1 Hændelsen d. 26. august 2012

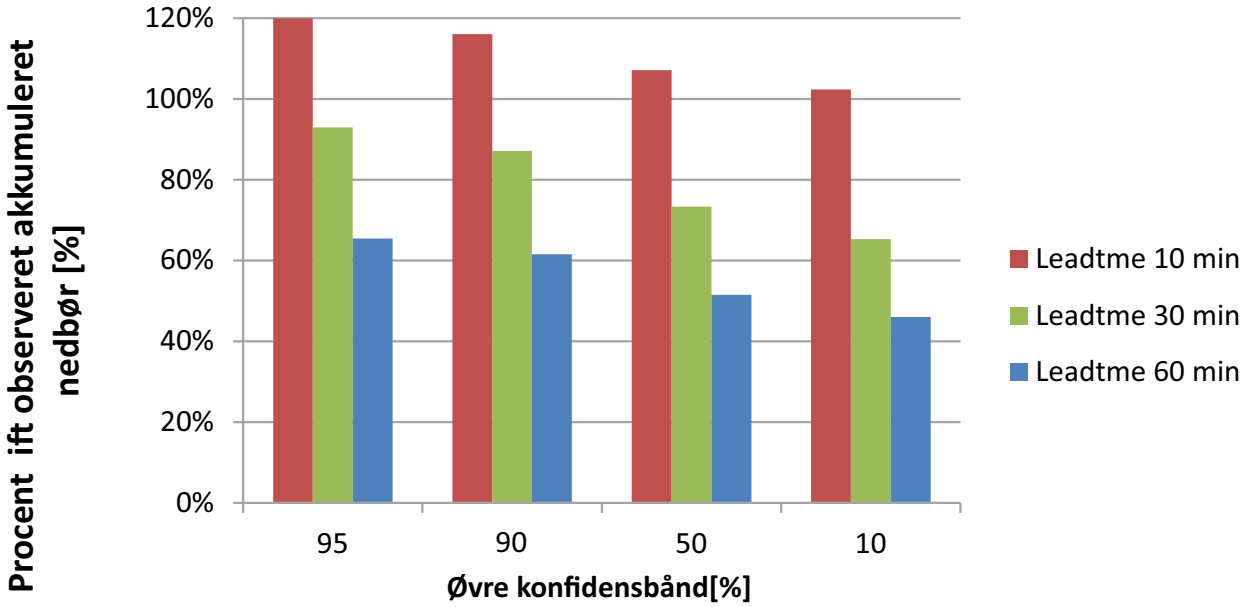
På figur 6.1 ses resultater af nowcast ensemblerne for hændelsen d. 26. august 2012 for leadtimes på 10, 30 og 60 min. De er sammenlignet med de observerede radardata og et konfidensinterval på 95 % af ensemblerne, hvor konfidensintervallet er baseret på metoden, hvor der er sorteret efter den akkumulerede nedbør. Resultaterne er illustreret ved intensiteterne(venstre) og ved akkumuleret nedbør(højre).
Ved en leadtime på 10 min. dækker de genererede ensembles den observerede nedbør både set ift.

intensiterne og den akkumulerede nedbør. Ved leadtimes på 30 og 60 min. ses der kun enkelte eller slet ingen af de generede ensembles som dækker den oberverede set ift. den akkumulerede nedbør.



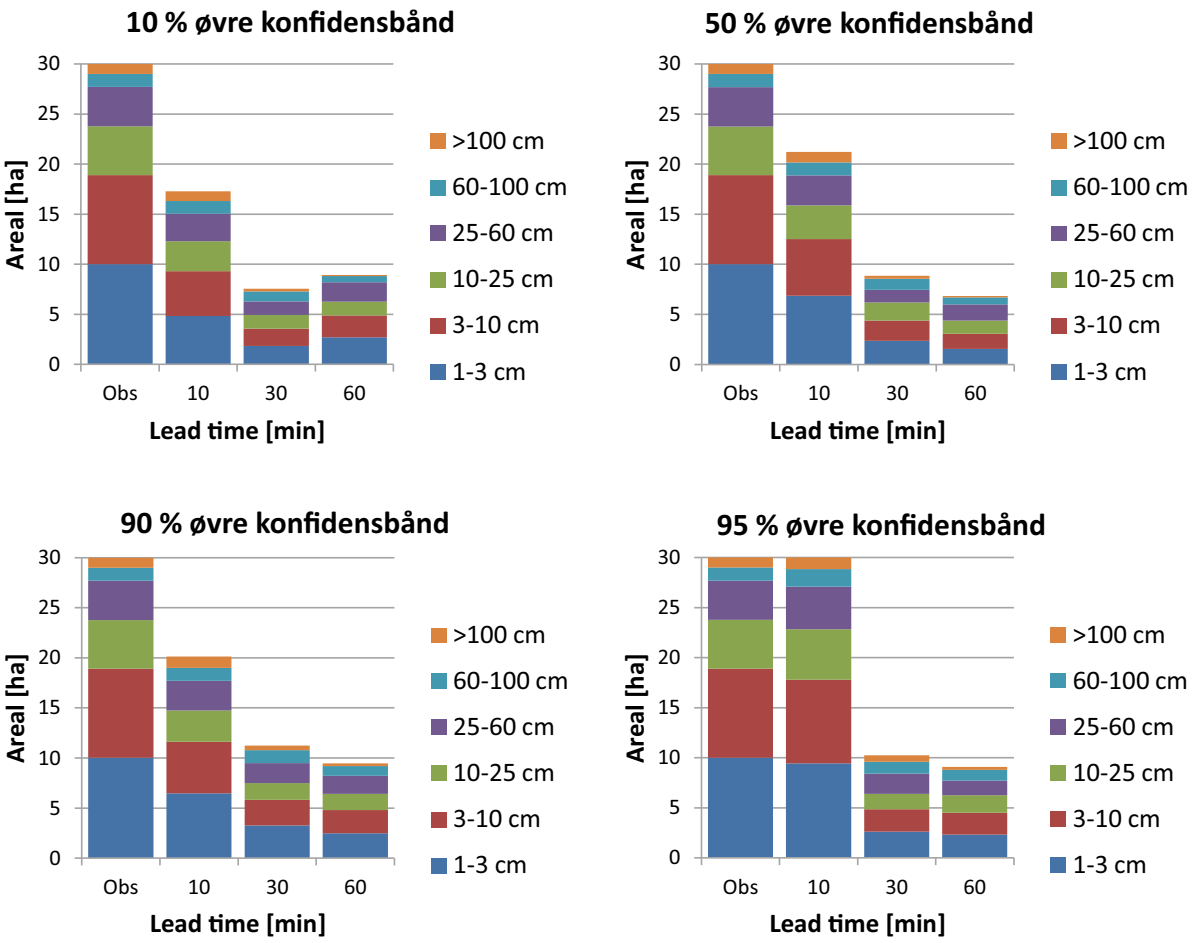
Figur 6.1. Resultat fra 300 nowcast ensembles, hvor konfidensinterval på 95 % er fremhævet.

I figur 6.2 er den akkumulerede nedbør for 95 % øvre konfidensbånd for hver leadtime illustreret i procent ift. den akkumulerede nedbør fra radar observationerne. Ved 10 min. leadtime opnås der en akkumuleret nedbør meget tæt på radar observationerne for alle øvre kondidensbånd, mellem 100 og 120 % af radar observationerne. For leadtime på 30 og 60 min. opnås en akkumuleret nedbør på hhv. 65-90 % og 45-65 % af radar observationerne. Disse resultater antyder at nedbøren fra denne hændelse, ved leadtimes længere end 10 min., er svære at forudsige, selv ved systematisk at udpege ensemble med de højeste akkumuleringer.

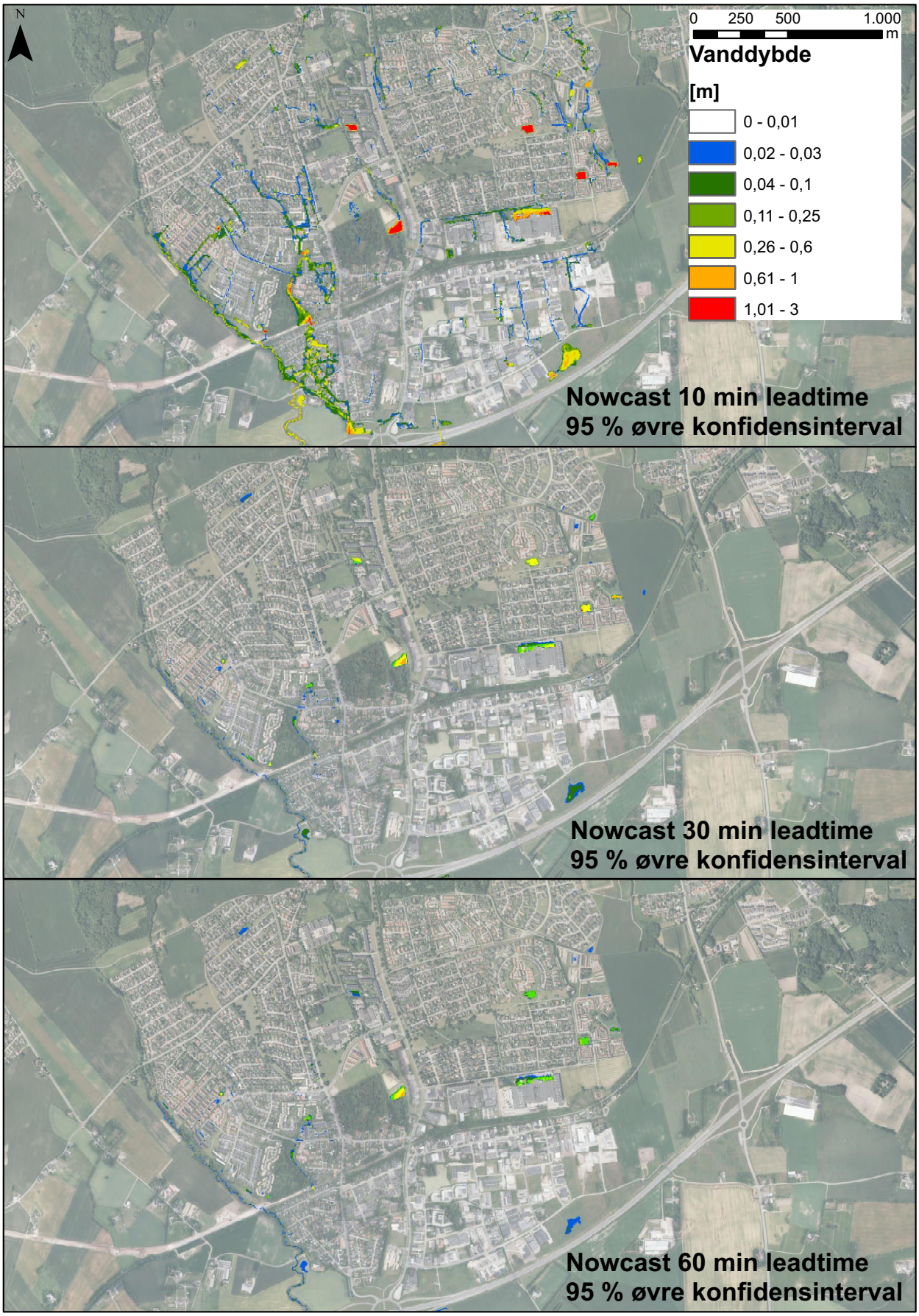


Figur 6.2. Procent nedbør ift. den observerede akkumulerede nedbør med radar.

De udvalgte ensembles er efterfølgende anvendt som nedbørsinput i oversvømmelsesmodellen. Alle resultaterne af vand på terræn fra oversvømmelsesmodellen ses på de fire grafer i figur 6.3. Hver graf viser areal af vand på terræn for de tre leadtimes for det øvre konfidensbånd. I hver graf er der sammenlignet med resultater fra modellen, hvor der er anvendt de observerede radardata som input.
Arealet af vand på terræn bliver underetimeret med 70 % eller mere for leadtimes på hhv. 30 og 60 min. Ved en leadtime på 10 min bliver oversvømmelsen estimeret korrekt når der ses på 95 % øvre konfidensinterval og ved de resterende konfidensbånd underestimeres det med ca. 20 %, selvom den akkumulerede nedbør ved konfidensbånd ikke undersestimeres.
Figur 6.4 viser illustrativt forskellen i oversvømmelsen ved leadtimes på 10, 30 og 60 min. ved 95 % øvre konfidensbånd. Ved 10 min. leadtime gengives oversvømmelsen godt, mens der ved de to resterende leadtimes ses en kraftig underestimering af oversvømmelsen.



Figur 6.3. Areal af vand på terræn for radar observationer og de øvre konfidensbånd for leadtimes på 10, 30 og 60 min.

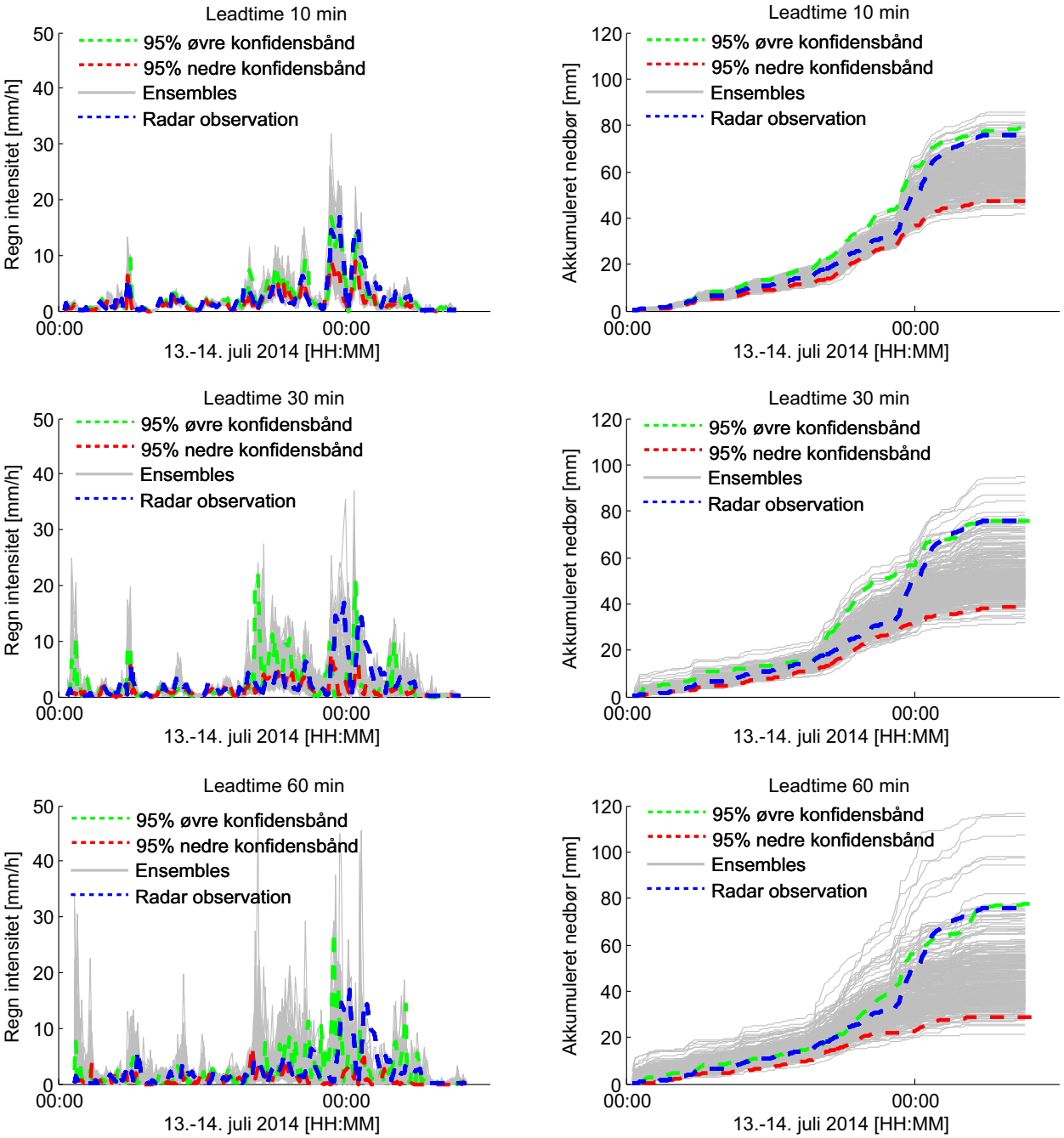


Figur 6.4. Oversvømmelse modelleret ved leadtime på 10, 30 og 60 min. med 95 % øvre konfidensinterval.

6.2 Hændelsen d. 13.-14. juli 2014

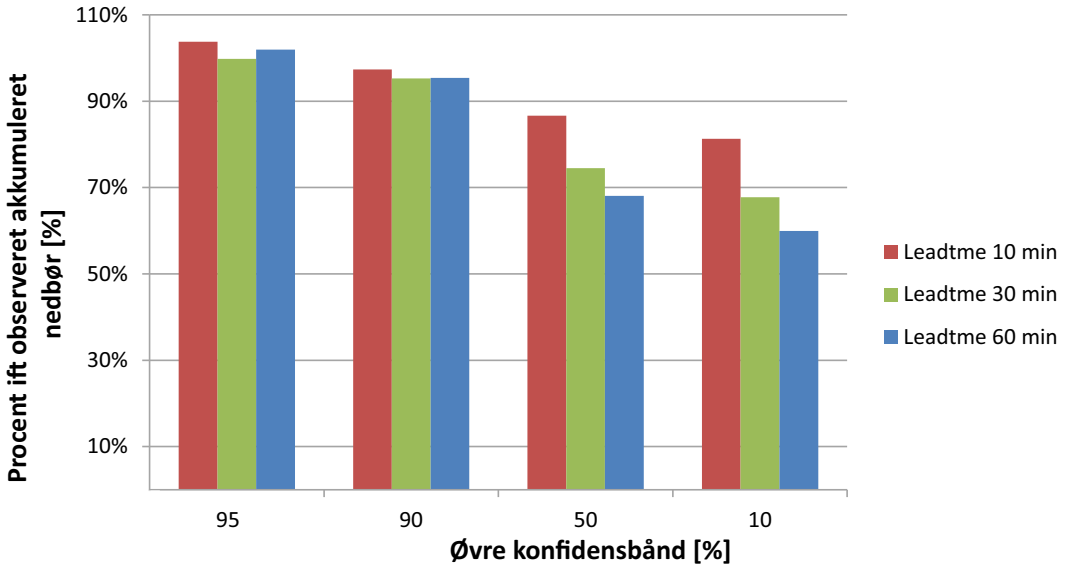
Ved hændelsen den 13.-14. juli 2014, dækker nowcast enseblerne hændelsen forholdsvis godt ved alle tre leadtimes. På figur 6.5, ses 95 % konfidensintervallet, dannet på baggrund af den akkumulerede nedbør, for leadtimes på 10, 30 og 60 min. Data er igen illustreret ved intensiteten(venstre) og den akkumulerede nedbør(højre).

Det ses at den observerede akkumulerede nedbør ligger indenfor et konfidensinterval på 95 % ved alle tre leadtimes, dog tættest på det øvre konfidensbånd. Sammenlignes intensiteterne fra de udvalgte ensembles med radar observationerne, ses der en stor lighed ved leadtime på 10 min., mens der ved leadtimes på 30 og 60 min., ses en forskel i hvornår de enkelte peaks kommer.



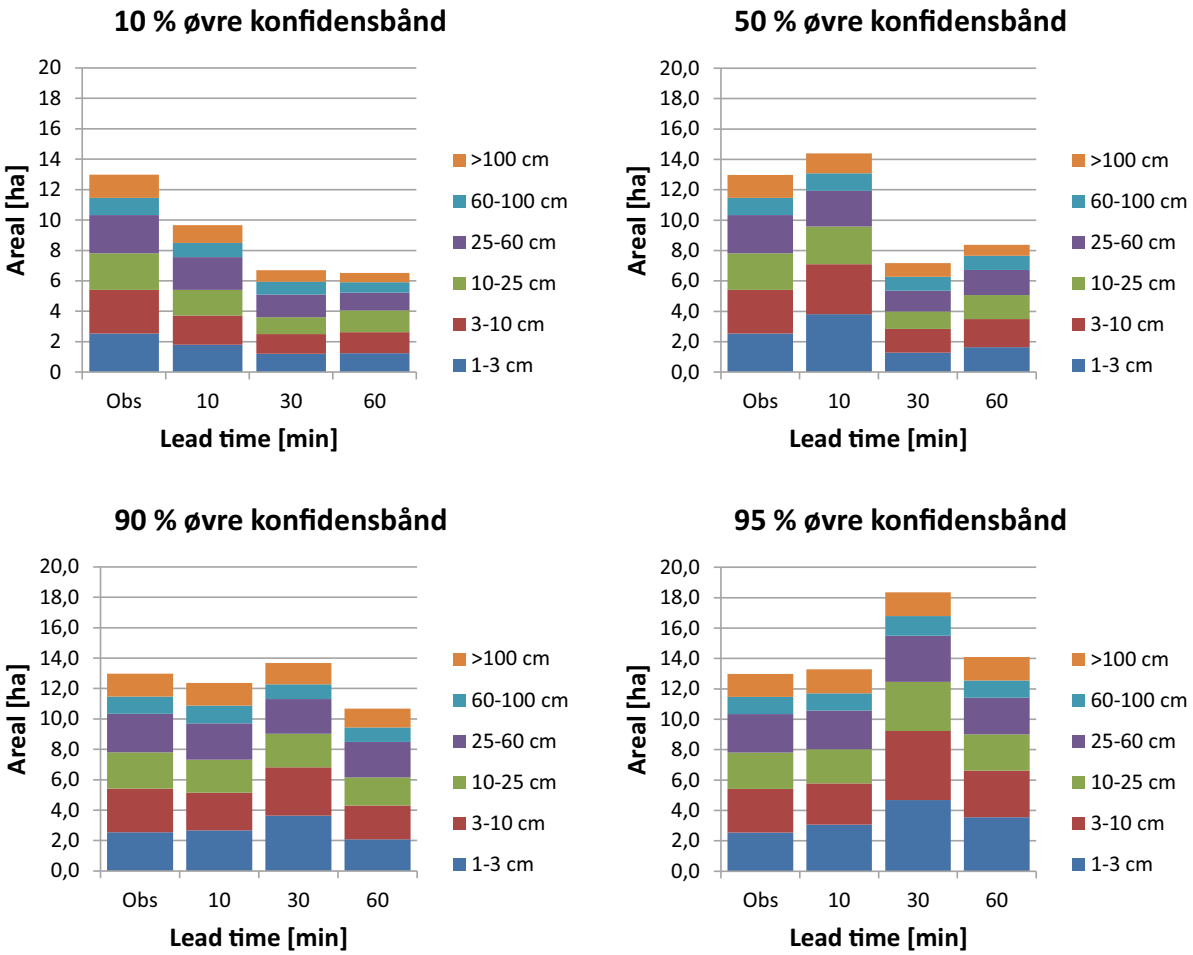
Figur 6.5. Resultat fra 300 nowcast ensembles, hvor konfidensinterval på 95 % er fremhævet.

Sammenlignes den akkumulerede nedbør fra hvert af de øvre konfidensbånd for alle ensemblerne med den akkumulerede nedbør fra radaren, viser denne, at ved 95 % og 90 %, bliver den akkumulerede nedbør eatimeret med en afvigelse på 0-5 %. Ved 50 % og 10 % underestimeres nedbøren med en afvigelse på 25-40 % for leadtimes på 30 og 60 min. og lidt mindre afvigelse for en leadtime på 10 min. Det procentmæssige forhold af den akkumulerede nedbør for de forskellige leadtimes og den observerede nedbør er illustreret i figur 6.6.



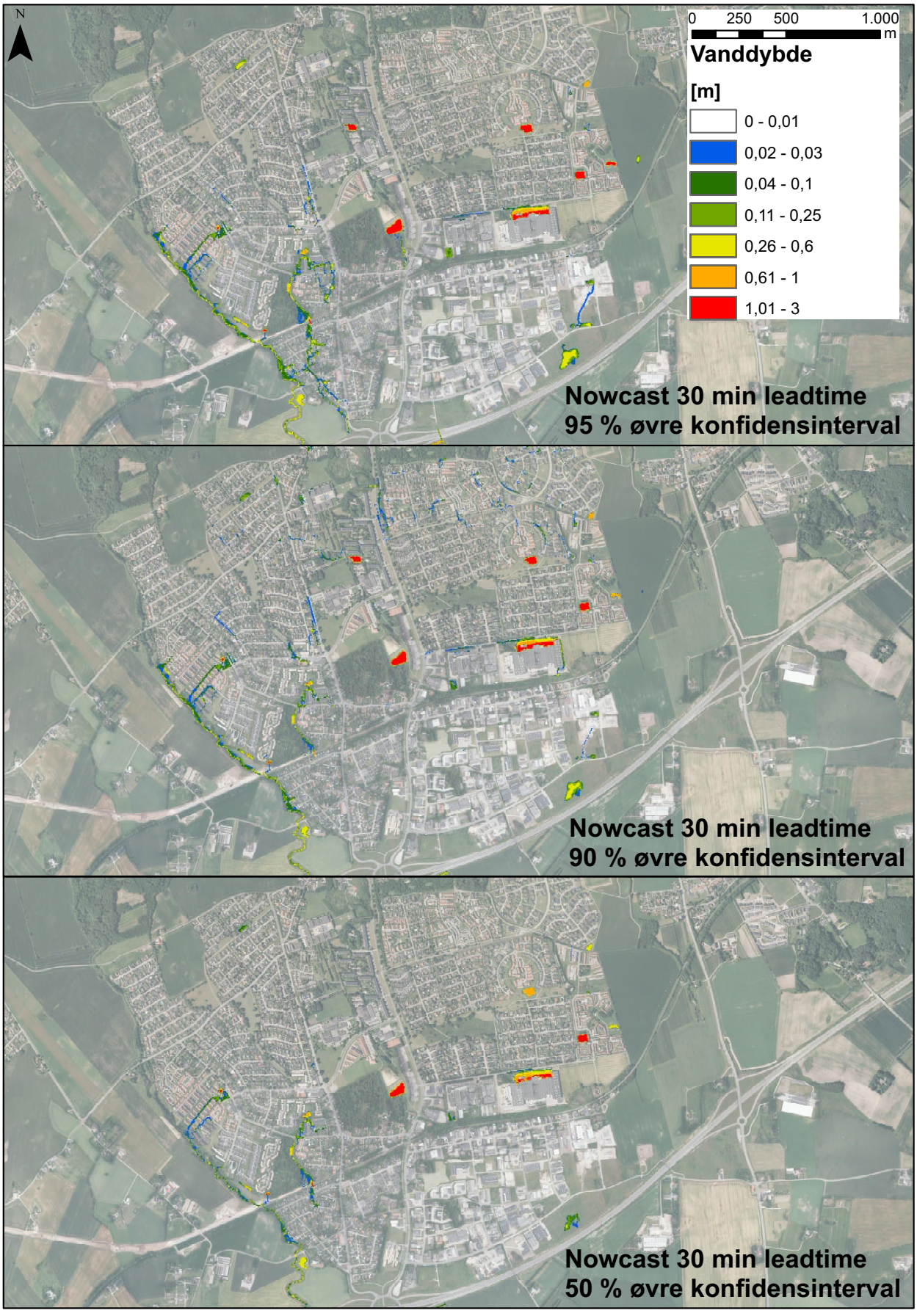
Figur 6.6. Procent nedbør ift. den observerede akkumulerede nedbør med radar.

De udvalgte ensembles anvendes igen, som input i oversvømmelsesmodellen og sammenlignes med en model, hvor der er anvendt en observeret nedbør fra radar. Ved de øvre konfidensbånd ved 95 og 90 %, ses der igen en meget stor lighed mellem resultaterne fra radar observationerne og den estimerede nedbør. Ved 95 % øvre konfidensbånd har oversvømmelsen en tendens til at overestimere lidt. Den største overstimering ses for en leadtime på 30 min, som er på ca. 40 %, mens den for leadtimes på 10 og 60 er på ca. 6 %. Ved 90 % øvre konfidensinterval ligger afvigelsen på 5 % for leadtimes på 10 og 30 min. og 15 % for leadtime på 60 min. Ved de resterende konfidensintervaller på 50 og 10 % underestimeres oversvømmelsen for leadtimes på 30 og 60 min. med 35-50 %, mens resultaterne er lidt bedre for leadtime på 10 min. Resultaterne for vand på terræn ved de forskellige ensembles er illustreret i figur 6.7.
På figur 6.8 er der illustreret oversvømmelsen ved en leadtime på 30 min., ved 95 %, 90% og 50 % øvre konfidensbånd. Der ses tydeligt at arealet af oversvømmelsen underestimeres betydeligt ved en faldende konfidensinterval.



Figur 6.7. Areal af vand på terræn for radar observationer og de øvre konfidensbånd for leadtimes på 10, 30 og 60 min.

Analysen af den sandsynlighedsbaserede nowcast viste et potentiale for at estimere oversvømmelsen, ved systematisk at udvælge ensembles på baggrund af den akkumulerede nedbør.
Ved hændelsen i 2012 blev oversvømmelsesprognoserne acceptable ved leadtimes på 10 min. ved alle øvre konfidensbånd. Ved længere leadtimes blev oversvømmelsen kraftig underestimeret.
Ved hændelsen i 2014 blev oversvømmelsesprognoserne for alle leadtimes gode, så længe der blev anvendt ensembles fra 90 % og 95 % øvre konfidensbånd.
Ved systematisk at udvælge ensemblerne er det muligt at lave en oversvømmelsesprognose, som tilnærmelsesvis efterviser oversvømmelsen modelleret med radar observationer. Tages tiden i betragtning i oversvømmelsesprognosen, kan der her opstå usikkerhed, da de udvalgte ensembles fra nowcsaten ikke altid viser en tidsserie, som stemmer helt overens med den som er observeret med radar.



Figur 6.8. Oversvømmelse modelleret ved leadtime på 30 min. med 95 %, 90% og 50 % øvre konfidensbånd.

7 Diskussion

Projektet har taget udgangspunkt i to kraftige nedbørshændelser som har resulteret i oversvømmelse, for at undersøge to prognoseværktøjer, AAU's nowcast model og DMI's vejrmodels potentiale til anvendelse som input af realtidsmodellering af en oversvømmelse. De to nedbørshændelser som er blevet undersøgt er begge hændelser, hvor den kraftige nedbør opstod som konvektivt nedbør og derfor opstod og aftog inden for en kort tidsperiode og en kort afstand.

Det var muligt at opstille en oversvømmelsesmodel, der på baggrund af radar observationer tilfredsstillende kunne estimere en oversvømmelse af hændelsen i 2012, så denne var sammenlignelig med observationerne fra oversvømmelsen. Oversvømmelsesmodellen blev også testet med hændelsen i 2014, hvor resultaterne fra oversvømmelses også var tilfredsstillende.

Herefter blev det undersøgt, hvorledes det var muligt at anvende forskellige prognoser i oversvømmelsesmodellen, til at lave oversvømmelsesprognoser.
Den deterministiske nowcast, som bygger på en forholdsvis simpel fremskrivnings metode, viste ved begge hændelser en tendens til at underestimere nedbøren. I begge hændelser skyldtes underestimeringen den konvektive nedbør, som opstod og aftog indenfor en kort periode enten over eller tæt på Lystrup. Hændelsen i 2012 blev kraftig underestimeret ved leadtimes på mere end 10 min., hvilket også betød at oversvømmelsesprognosen blev kraftigt underestimeret. Modellen kunne enkelte steder forudsige vand på terræn dog med en vis forsinkelse i tidspunktet. Hændelsen over Lystrup bestod af kraftig konvektiv nedbør som opstod meget lokalt og satte derfor meget dårlige betingelser for nowcastmodellen.
Ved hændelsen i 2014, var resultaterne en smule bedre. Nowcasten estimerer nedbøren udmærket i den første del af hændelsen, hvor nedbøren ikke er konvektiv, men i den sidste halvdel, hvor nedbøren er konvektiv underestimeres nedbøren kraftigt. De bedste estimeringer ligger her indenfor en leadtime på 10-60 min. Hvor der ved 90-120 min. kunne ses en meget stor afvigelse i tidspunktet af nedbøren. Ved denne hændelse viste oversvømmelsesprognoserne også udmærkede resultater ved leadtimes på 10-60 min., hvilket formentlig skyldtes, at hændelsen havde en lang varighed, og det derved blev nedbørens varighed, som blev det det kritiske for afløbssystemet.
Herefter blev hændelserne undersøgt ved at anvende den sandsynlighedsbaserede nowcast. For hændelsen i 2012, viste resultaterne igen ikke stort potentiale i at forudsige nedbøren ved leadtimes på længere end 10 min.
For hændelsen i 2014 var det muligt at opnå en oversvømmelse, som ikke afvigede meget fra den simulerede oversvømmelsen med radar observationerne. For at opnå et godt resultat, krævede det, at der systematisk blev udvalgt de "værst" tænkelige senarier. Udvælgelsen foregik på baggrund af den akkumulerede nedbør. Ved udvælgelse af 90 og 95 % øvre konfidensbånd for den akkumulrede nedbør, blev oversvømmelsesprognoserne tilfredstillende. Selvom det var muligt, at estimere den rigtige oversvøm-

melse, viste det igen en vis usikkerhed i at estimere tidspunktet for de maksimale intensiteter ved leadtimes længere end 10 min. Afvigelsen mellem de maksimale intensiteter kunne være op til flere timer. Ved en oversvømmelsesmodellering er denne afvigelse af de maksimale intentisteter meget afgørende når der anvendes prognoser med en leadtime på maksimalt to timer.
Hændelsen i 2012 viser et meget lille potentiale ved leadtimes længere end 10 min., mens der for hændelsen i 2014 viser ok potentiale ved leadtimes på 10-60 min.
Leadtimes på 10-120 min., virker meget kort til at kunne udligne de usikkerheder der er i at estimere nedbøren ift. tidspunktet for de maksimale nedbørsintensiteter. I oversvømmelsesmodellering er tidspunktet for de maksimale intensiteter essentielle for at kunne give en anvendelig oversvømmelsesprognose i et mindre afløbssystem.

Vejrmodellen er baseret på en helt anden teori end nowcasten, hvilket gør at den tager forbehold for processer i atmosfæren og kan forudsige ændringer i atmosfæren. Vejrmodellen har derved en fordel sammenlignet med nowcasten i at forudsige konvektiv nedbør.
Resultaterne fra vejrmodellen viser, at vejrmodellen har et potentiale i at forudsige den konvektive nedbør, som opstår under de to nedbørshændelser. Resultaterne fra vejrmodellen viser dog, at vejrmodellen har svært ved at placere den konvektive nedbør. Tendensen med at vejrmodellen har svært ved at placere nedbøren ift. det, som er observeret med radar ses i begge hændelser. At vejrmodellen har svært ved at placere nedbøren, betyder at det ikke er tilstrækkeligt kun at kigge på nedbørsestimater i de celler i vejrmodellen, som dækker det område man undersøger, men at det er nødvendigt at medtage et større område.
Der er undersøgt fire forskellige prognoser for vejrmodellen hhv. en prognose på 1-6, 7-12, 13-18 og 19-24 timer. Hvis der ses sammenlagt på de to hændelser, er det prognosen på 13-18 timer, som giver en prognose som er mest sammenlignelig med radar observationerne. Alle prognoserne viser dog en generel tendens til, at estimere den konvektive nedbør minimum 20-30 km ved siden af. Vejrmodellen er dog god til at estimere tidspunktet for hvornår nedbøren falder.
I hændelsen 2012 hvor den konvektive nedbør opstod meget lokalt, ses der en afvigelse i tidspunktet for de maksimale intensiteter på 3-9 timer. Dette betyder ikke væsentligt når der ses på en prognose på op til 24, herved kan oversvømmelsen stadig nå at blive forudsagt. Der ses dog en underestimering af den akkumulerede nedbør og de maksimale intensiteter i 3 ud og 4 af vejrmodellens prognoser.
I hændelsen 2014 opstår den konvektive nedbør over et større område. Prognoserne viser her bedre resultater i at forudsige både akkumuleret nedbør, intensiteter og tidspunkt. I to ud af de fire prognoser, ses der en meget god lighed mellem prognose og radar observationer, hvilket også gør sig gældende under estimeringen af oversvømmelsen.
Vejrmodellen viser et potentiale i at forudsige kraftigt nedbør, men viser stor usikkerhed omkring hvor nedbøren opstår. Det kræver dog, at der undersøges flere hændelser af samme type for bedre at kunne vurdere, hvor stor usikkerhed der er ved at estimere placeringen af den konvektive nedbør.

Hvorvidt de to prognoseværktøjer på nuværende tidspunkt er optimal, at anvende som input til realtidsmodellering af en oversvømmelsesmodel er svært at komme med en endelig vurdering på ud fra en undersøgelse af to kraftige nedbørshændelser. Umiddelbart er der svagheder ved både nowcasten og vejrmodellen, som gør at usikkerheden i at estimere nedbøren med det enkelte prognoseværktøj er stor. Nowcasten viser stor usikkerhed ved at anvende leadtimes meget længere end 30 min., da de kraftige nedbørshændelser, som er undersøgt, skyldes konvektiv nedbør der opstår meget lokalt og som nowcasten ikke har mulighed for at forudsige eller fremskrive. Vejrmodellen har potentiale for at forudsige den konvektive nedbør, men viser stor usikkerhed ved at placere nedbøren.

For at give et endeligt bud på de to prognoseværktøjers potentiale for at forudsige oversvømmelse, kræver det umiddelbart en mere dybdegående undersøgelse, hvor der bliver undersøgt flere af samme type hændelser. Det er tydeligt, at den konvektive nedbør er svær at forudsige for begge prognoseværktøjer om det så er i forhold til de nøjagtige intensiteter eller i forhold til paceringen af nedbøren. Det kan dog på nuværende tidspunkt ud fra undersøgelsen vurderes, at den måde som prognoseværktøjerne har størst potentiale i at indgå i en form for realtidsmodellering, er ved at opstille nogle kritiske scenarier ud fra nedbørsprognoserne for hvordan oversvømmelsen har risiko for at blive.
Her tænkes der eksempelvis på metoden, som anvendes ved den sandsynligehedsbaserede nowcast, hvor der bliver genereret ensembles, for at vise usikkerheden ved modellen. Dette kunne tilsvarende også gøres for vejrmodellen, for derved bedre systematisk at kunne udpege nogle kritiske scenarier.

Konklusion 8

Formålet med dette projekt var at undersøge hvor stort et potentialet der er for realtidsmodellering af oversvømmelser med input fra vejrradar- og vejrmodeldata.
I undersøgelsen er der taget udgangspunkt i to kraftige nedbørshændelser, som først blev anvendt til at opstille en oversvømmelsesmodel. Det var muligt at tilpasse oversvømmelsesmodellen, så den på tilfredsstillendevis kunne simulere oversvømmelsen fra de to kraftige nedbørshændelser med input fra radar observationer. For at kalibrere modellen blev befæstelsesgraden forøget, for de områder, hvor oversvømmelsesmodellen afvigede markant fra oversvømmelses observationerne.

Efterfølgende blev der undersøgt, hvorledes de to prognoseværktøjer, en nowcast model og en vejrmodel, kunne anvendes som input i oversvømmelsesmodellen til at forudsige oversvømmelserne.
Ved hændelsen i 2012 viser nowcasten et meget lille potentiale ved leadtimes længere end 10 min., mens den ved hændelsen i 2014 viser ok potentiale ved leadtimes på 10-60 min. For at få den mest tilfredsstillende oversvømmelsesprognose, viste det sig nødvendigt systematisk at udvælge de kritiske scenarier fra den sandsynlighedsbaserede nowcast.

Vejrmodellen viste potentiale i at estimere den konvektive nedbør under begge nedbørshændelser. Vejrmodellen viste dog stor usikkerhed ved at placere nedbøren, hvilket gjorde det svært forudsige det rigtige scenarier. Blev de mest kritiske scenarier udvalgt, kunne vejrmodellen give en tilfredsstillende oversvømmelsesprognose.

Det kan ud fra undersøgelsen konkluderes at det er nødvendigt at undersøge flere af samme type hændelser, for at kunne give en endelig vurdering af potentiale for realtidsmodellering til at forudsige oversvømmelser. Resultaterne fra undersøgelsen peger dog i en retning af, at der er mulighed på et vist niveau at at anvende disse data en form for realtidsmodellering.

Litteratur

Aarhus Amt, **februar 2006**. Aarhus Amt. *Redegørelse for grundvandsressourcerne i Indsatsområde Elsted*. http://www.geus.dk, 2006.

Aarhus Kommune, **Oktober 2011**. Aarhus Kommune. *Spildevandsplan 2013 - 2016*. http://www.aarhus.dk/da/erhverv/energi-og-miljoe/Vand/Spildevand/Spildevandsplan-2013-2016.aspx, 2011.

Aarhus Kommune, **september 2014**. Aarhus Kommune. *TILLÆG NR. 2 til Spildevandsplan 2013-2016*. http://www.aarhus.dk/da/erhverv/energi-og-miljoe/Vand/Spildevand/Spildevandsplan-2013-2016.aspx, 2014. Håndtering af regnvand fra skybrud på overfladen i Lystrup.

Aarhus Stifttidende, **2014**. Aarhus Stifttidende. *Vand i Lystrup*, 2014. URL `http://stiften.dk/`.

Danmarks Meteorologiske Institut, **september 2014**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Fremtidige klimaforandringer i Danmark*. http://www.klimatilpasning.dk, 2014. Danmarks Klimacenter rapport.

Danmarks Statistik, **2014**. Danmarks Statistik. *Indbyggertal i Lystrup*, 2014. URL `http://www.statistikbanken.dk/BEF44`.

Dansk Vejtidsskrift ApS, **August 2008**. Dansk Vejtidsskrift ApS. *Forskning og efteruddannelse. Transportplanlægning*. http://trafikogveje.dk, 2008.

DHI, **2014**. DHI. *MIKE by DHI - Modellerings værktøjer*, 2014. URL `http://www.mikebydhi.com/`.

DHI, **januar 2012**. DHI. *URBAN CLIMATE CHANGE - GUIDELINES*. http://gst.dk/emner/referencenet-hoejdemodel-opmaaling/danmarks-hoejdemodel/produktbeskrivelse/, 2012. How to achieve sustainable adaptation in urban areas.

DMI, **2014a**. DMI. *DMI-HIRLAM*, 2014. URL `http://www.dmi.dk/laer-om/temaer/atmosfaeren/hirlam/`.

DMI, **2014b**. DMI. *Definition af nedbørstyper*, 2014. URL `http://www.dmi.dk/laer-om/generelt/leksikon/`.

DMI og IDA's spildevandskomite, **1979**. DMI og IDA's spildevandskomite. *Spildevandskomiteens regnmalersystem*, 1979.

Ekstrabladet, **2010**. Ekstrabladet. *Skybrud over København og Nordsjælland*, 2010. URL `http://ekstrabladet.dk/112/article4149924.ece`.

European meteorological institutes, **2014**. European meteorological institutes. *DMI-HIRLAM*, 2014. URL `http://www.hirlam.org/`.

Geodatastyrelsen - Kortforsyningen, **2013**. Geodatastyrelsen - Kortforsyningen. *Download - kortforsyningen*, 2013. URL http://download.kortforsyningen.dk.

Geus, **2014**. Geus. *Jupiterdatabasen*, 2014. URL http://www.geus.dk.

IDA Spildevandskomiteen, **2014**. IDA Spildevandskomiteen. *Skrift nr. 30. Opdaterede klimafaktorer og dimensionsgivende regnintensiteter*. https://ida.dk, 2014.

IDA Spildevandskomiteen, **2005**. IDA Spildevandskomiteen. *Funktionspraksis for afløbssystemer under regn, skrift nr. 27*. https://ida.dk, 2005.

Jensen, Thorndahl, Nielsen, og Rasmussen, **2014**. David G. Jensen, Søren L. Thorndahl, Jesper E. Nielsen, og Michael R. Rasmussen. *Probabilistic uncertainty estimation of weather radar nowcast*. Elsevier editorial system journal of hydrology, 2014.

Jesper E. Nielsen og Michael R. Rasmussen (AAU), **december 2012**. Jesper E. Nielsen og Michael R. Rasmussen (AAU). *Risk assessment map for urban drainage management*, 2012. BALTRAD+ W4-Risk assessment map.

Kort og Matrikelstyrelsen, **december 2009**. Kort og Matrikelstyrelsen. *Danmarks Højdemodel, DHM/Terræn*. http://gst.dk/emner/referencenet-hoejdemodel-opmaaling/danmarks-hoejdemodel/produktbeskrivelse/, 2009. Produktspecifikationer.

Krajewski og Smith, **- 2002**. W.F. Krajewski og J.A. Smith. *Radar hydrology: Rainfall estimation*. Advances in Water Resources, 5(-), 8–12, 2002.

Li, Scmid, og Joss, **- 1995**. L. Li, W. Scmid, og J. Joss. *Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography*. J. Appl. Meteorol, 34(-), 1286–1300, 1995.

Marshall og Palmer, **- 1948**. J.S. Marshall og W.M. Palmer. *The Distribution of Raindrops with Size*. Journal of Atmospheric Sciences, -(-), 165–166, 1948.

Nielsen, Thorndahl, og Rasmussen, **Maj 2013**. Jesper 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*. Atmosphheric Research, 138(1), 1–12, 2013.

Pleau, Colas, Lavallée, Pelletier, og Bonin, **April 2005**. Martin Pleau, Hubert Colas, Pierre Lavallée, Geneviève Pelletier, og Richard Bonin. *Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system*. Environmental Modelling & Software, 20(4), 401–413, 2005.

Politikken, **2010**. Politikken. *København vil tage kampen op mod skybrud*, 2010. URL http://politiken.dk/indland/ECE1109478/koebenhavn-vil-tage-kampen-op-mod-skybrud/.

Politikken, **2012a**. Politikken. *Efter en hektisk dag er den østjyske regn under kontrol*, 2012. URL http://politiken.dk/indland/ECE1732707/efter-en-hektisk-dag-er-den-oestjyske-regn-under-kontrol/.

Politikken, **2012b**. Politikken. *Efter en hektisk dag er den østjyske regn under kontrol*, 2012. URL http://vejret.tv2.dk/artikel/id-54168452:se-billederne-%C3%B8stjylland-ramt-af-skybrud.html.

Rinehart og Garvey, **Maj 1978**. R.E Rinehart og E.T Garvey. *Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar*. Nature, 273(1), 287–8, 1978.

Ronald E. Reinehart, **2004**. Ronald E. Reinehart. *Radar for Meteorologists*, 2004.

Thorndahl, Grum, og Rasmussen, **December 2009**. Søren Thorndahl, Morten Grum, og Michael R. Rasmussen. *Radar Based Flow and Water Level Forecasting in Sewer Systems*. UrbanRain09, 5(1), 225–229, 2009.

Thorndahl, Rasmussen, Ellerbæk, og Badsberg, **- 2010**. Søren Thorndahl, Michael R. Rasmussen, Jesper Ellerbæk, og Jakob Badsberg. *Uncertainty in Nowcasting of Radar Rainfall*. Advances in Radar Technology, 7(1), 232–238, 2010.

Thorndahl, Rasmussen, Ellerbæk, Sander Poulsen, Bøvit, Borup, Ahm, Grum, Gill, og Mikkelse, **- 2012**. Søren Thorndahl, Michael R. Rasmussen, Jesper Ellerbæk, Troels Sander Poulsen, Thomas Bøvit, Morten Borup, Malte Ahm, Morten Grum, Rasphall Gill, og Peter Steen Mikkelse. *Comparison of short term rainfall forecasts for model based flow prediction in urban drainage systems*. International Conference on Urban Drainage Modelling, 12(1), 1–12, 2012.

TV2 Galleri, **2012**. TV2 Galleri. *Skybrud i Lystrup*, 2012. URL `http://galleri.tv2.dk/`.

Winther, Linde, Jensen, Mathiasen, og Johansen, **2011**. Leif Winther, Jens Jørgen Linde, H. Thorkild Jensen, Leo Lund Mathiasen, og Niels Bent Johansen. *Afløbsteknik*. Polyteknisk forlag, Lyngby, Denmark, 2011.

Analyse af cellestørrelse til oversvømmelsesmodel A

Formålet med dette bilag er, at kunne bestemme den ”mest” optimale cellestørrelse for overflade modellen til oversvømmelsesmodellen for dette projekt. Laves omkring 50 simuleringer, hvilket betyder, at simuleringstiden har stor betydning. I analysen er der set på cellestørrelser på 1,6 m, 2 m, 3 m, 4 m og 5 m. Den optimale cellestørrelse vil blive vurderet på baggrund af beregningstiden og på afvigelsen af udbredelsen af vand på terræn.

Beregningsforudsætninger for modellen:

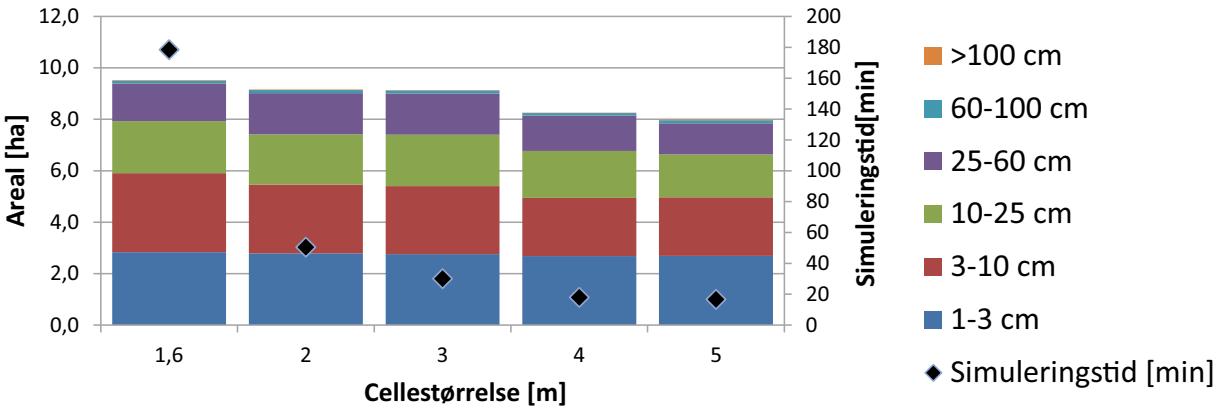
- Kasseregn på 23,29 mm/h, svarende til en 10 års hændelsen ved en varighed på 60 min.
- Simuleringen er kørt over i alt 60 min.

Ved konvertering fra terrænmodellen på 1,6 m til 2m, 3m, 4m og 5m, er der igen lavet hydrologisk tilpasning, da mindre lavninger under interpolationen kan blive udlignet. På figur A.1, ses et eksempel på cellernes fordeling ved en cellestørrelse på 1,6m(øverst) og 4m(nederst). Det ses, at de primære strømningsveje som veje bliver bevaret ved en cellestørrelse på 4m, dog i en lavere detaljeringsgrad ift. 1,6m

Figur A.1. Fordeling af celler ved cellestørrelse på 1,6 m(øverst) og 4 m(nederst).

Resultat

På figur A.2 er modellens beregningstid samt udbredelsen af vand på terræn illustreret for de fem forskellige cellerstørrelser. Det ses at beregningstiden falder betydeligt i takt med at detaljeringsgraden reduceres for overflademodellen. Beregningstiden stiger tilnærmelsesvis ekponentielt ved en forøgning af cellestørrelsen. Til gengæld ses der kun en mindre reduktion af udbredelsen af vand på terræn, ved en reduktion af cellestørrelsen.



Figur A.2. Udbredelsen af vand på terræn og simuleringstid for model med en cellestørrelse på hhv. 1,6, 2, 3, 4 og 5 m.

Ud fra tabel A.1 ses hvor meget de testede cellestørrelses simuleringstid og udbredelsen af vand på terræn afviger ift. 1,6 m. Herudover er der beregnet en forventet simuleringstid for de to hændelser, som bliver undersøgt i analysen på hhv. 12 og 30 timer. Simuleringstiden er beregnet pga. af simuleringstiderne fra testen.

Cellestørrelse [m]	Afvigelse i vand på terræn [%]	Afvigelse i sim. tid [%]	Forventet sim. tid for 12 timers regn [hr]	Forventet sim. tid for 30 timers regn [hr]
5 m	16	91	3,3	8,3
4 m	13	90	3,6	9,0
3 m	4	83	6,0	15,0
2 m	4	72	10,1	25,3
1,6 m	0	0	35,7	89,2

Tabel A.1. Afvigelse i simuleret tid og udbredelse af vand på terræn ift. 1,6 m celler. Simulerings tiden er i de to sidste kolonner beregnet for en forventet simuleringstid ved en regnhændelse på 12 timer og 30 timer.

Konklusion

Der ses en meget stor forskel i simuleringstiden ved at reducere cellestørrelsen. Set på simuleringstiden ved en regnhændelse på hhv. 12 og 30 timer er det tydeligvis cellestørrelsen på 4 m og 5 m, som er de mest optimale, da der skal laves mange forskellige simuleringer i løbet af projeketet. Der ses ikke stor afvigelse mellem 4 m og 5 m.

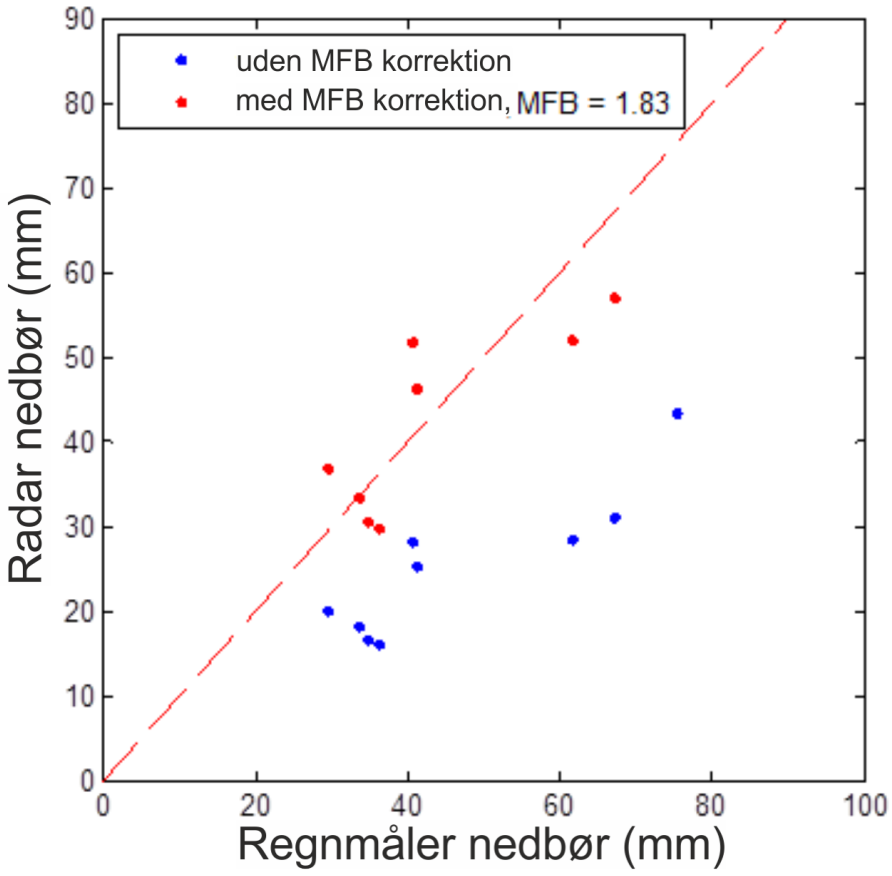
Der ses til gengæld ikke samme tendens for udbredelsen af vand på terræn. Der ses dog en reduktion på ca. 13 procent og 16 procent ved hhv. 4m og 5m celler. Denne afvigelses ses ikke som et problem ift. at analysere de to udvalgte regnhændelser.

På baggrund af resultaterne fra testen, vælges der at anvende en cellestørrelse i modellen på 4 m.

Hændelsen d. 13.-14. juli 2014

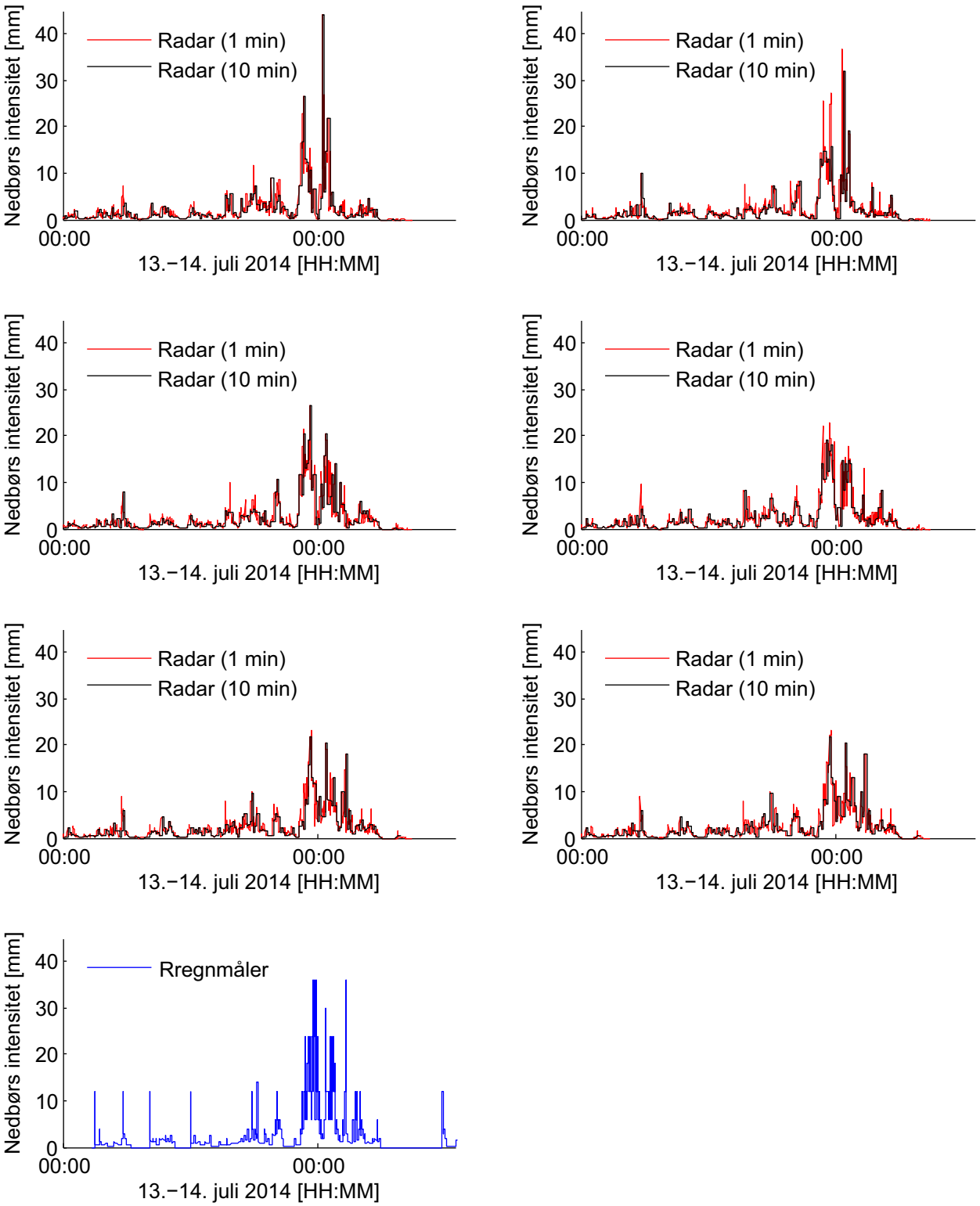
B

Bias justering af radardata. Radardata er justeret 1,83 ift. regnmålerne



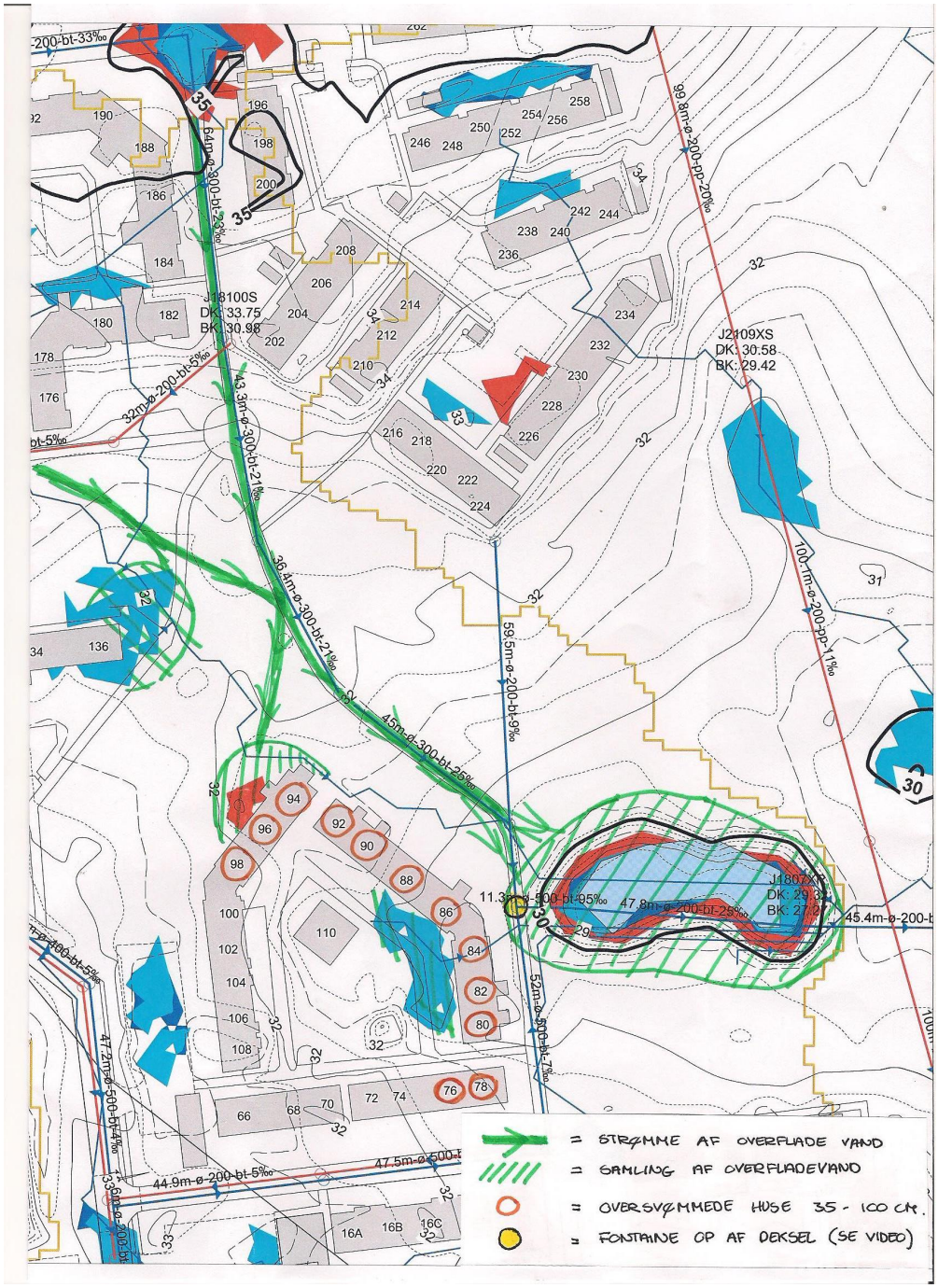
Figur B.1. Bias justering af radardata

Radar observationer i 1 min. og 10 min. tidsopløselighed samt regnmåler nr. 5180.



Figur B.2. Sammenligning mellem 1 min. og 10 min. radardata samt regnmåler nr. 5180.

Observationer C


J18100S
DK: 33.75
BK: 30.98
J2109XS
DK: 30.58
BK: 29.42
= STRØMME AF OVERFLADE VAND
= SAMLING AF OVERFLADEVAND
= OVERSVØMMEDE HUSE 35 - 100 CM.
= FONTAINE OP AF DEKSEL (SE VIDEO)

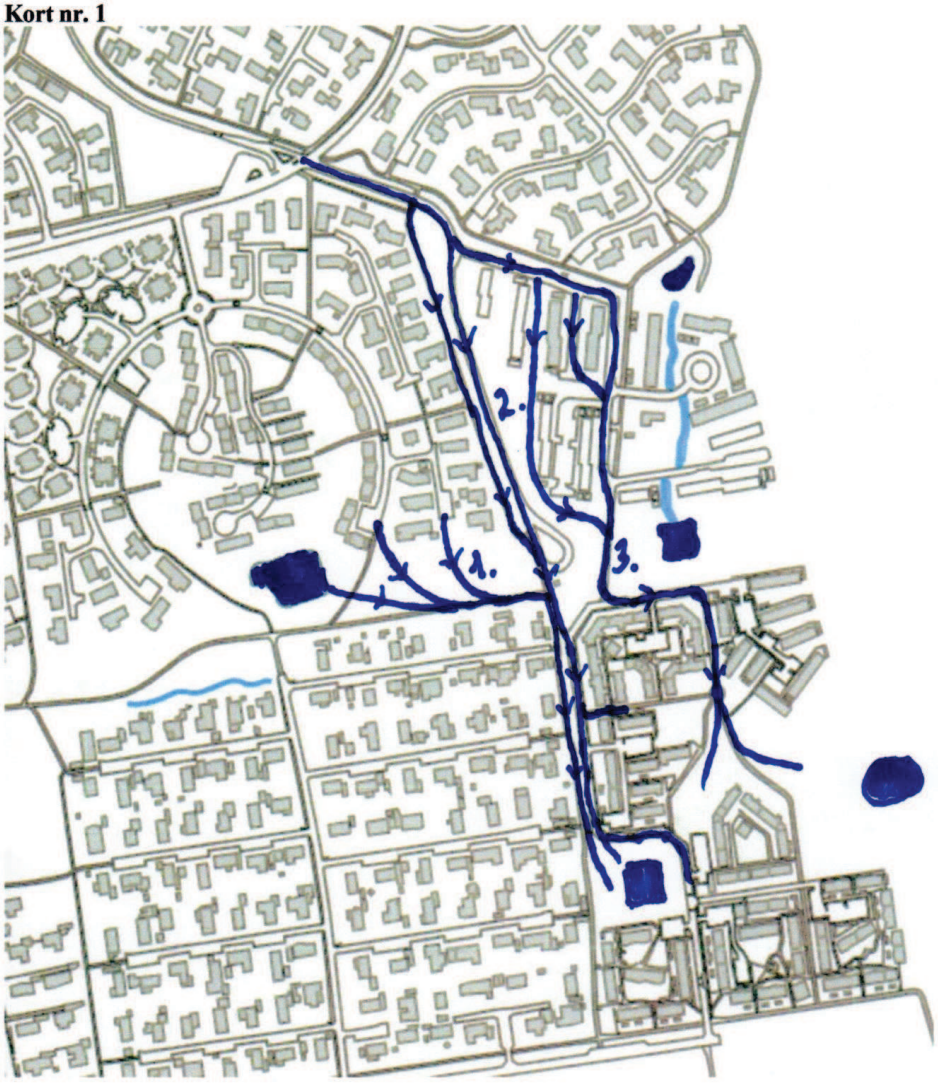
1

Vidneberetning om vandstrømme vedr. skybrud over Lystrup Øst 26. august 2012

Mine observationer og andre vidners beretninger af vandstrømmene til Majsmarken ved det voldsomme skybrud over Lystrup Øst 26-08-2012.

På Kort nr. 1 – har jeg tegnet vandstrømmene med mørkeblå farve.
Der er 3 hovedstrømme ind i Majsmarken fra det højere beliggende område mod nord.
Vandstrøm 1 kommer ind i Majsmarken via stiarealet og det grønne område nord for Rugmarken.
Vandstrøm 2 kommer ind i Majsmarken via busvejen og stien ved siden af.
De to første Vandstrømme møder hinanden i Majsmarken nordvestligste hjørne.
Herfra fortsætter vandstrømmen via vejen og stiarealet i sydlig retning.
Vandstrøm 3 kommer ind i Majsmarken via grusstien fra Kastanjehaven.
Her drejer vandstrømmen i østlig retning via vejen til vandstrømmen igen drejer mod syd ad grusstien til det grønne område imellem Andelsforeningen Hovslaget og Aarhus og Omegns afdeling.
Her mødte vandstrømmen overskudsvandet fra det store grønne område.

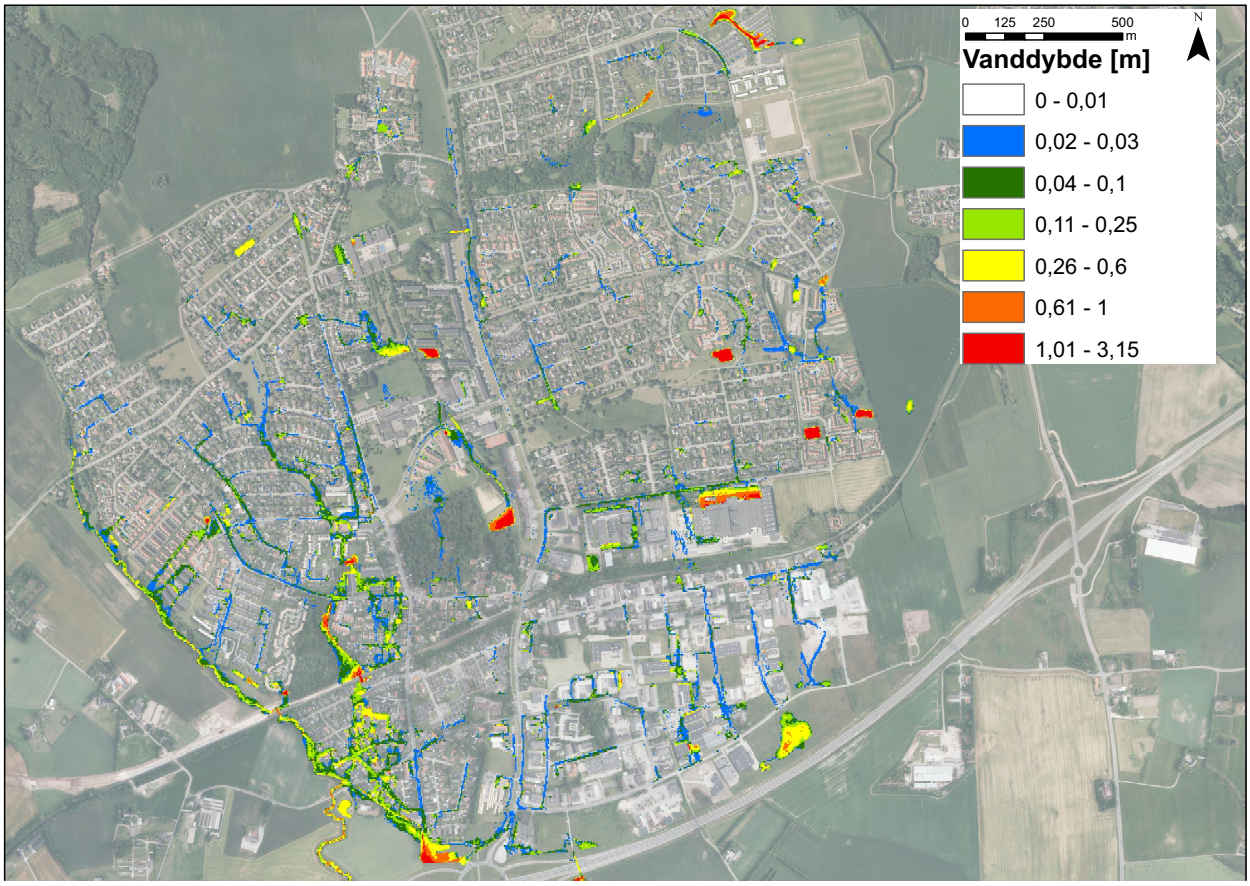
Kort nr. 1



Resultater fra oversvømmelsesmode med nedbørsdata fra regnmåler

D

Resultat fra oversvømmelsesmodellen. Sammenlignes resultaterne fra modellen med radar med modellen med regnmåleren viser modellen med nedbør fra regnmåleren en lidt større udbredelse af vand på terræn, dog er forskellen begrænset, selvom intensiteterne er 25-30% højere ved regnmåleren.



Figur D.1. Resultat fra model med input fra regnmåler. Hændelsen d. 26. august 2012.

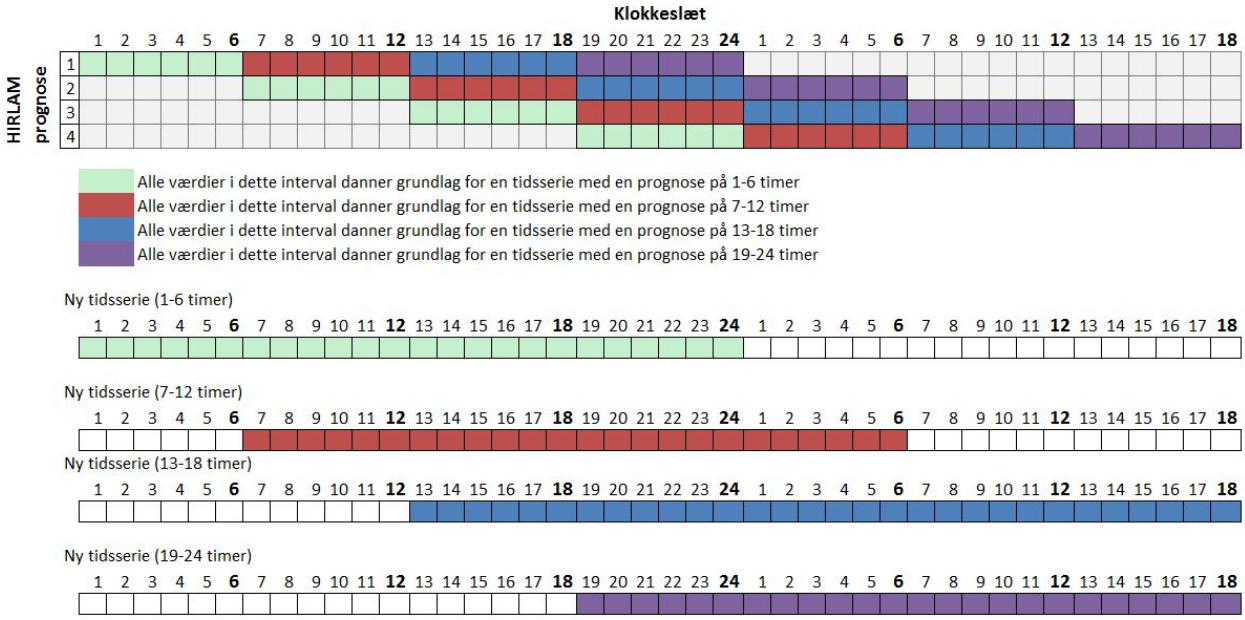
Analyse af vejrmodel E

Vejrmodellen HIRLAM fra DMI, genererer en prognose af nedbøren fra 1-24 timer fire gange i døgnet. Dette betyder, at vejrmodellen kl. 00:00, 06:00, 12:00 og 18:00, hver dag, genererer en ny prognose for, hvordan nedbøren ser ud de næste 24 timer frem i tiden.
Eksempel på en HIRLAM prognose fra d. 24 august 2012 i en celle som dækker Lystrup kan ses i tabel E.1. 0 er starttidspunkt for modellen. 1-24 er antallet af timer som prognosen fremskriver. Nedbøren er angivet i akkumuleret nedbør faldet i løbet af hver prognose.

HIRLAM prognose d. 24. august 2012 i celle over Lystrup.																									
Timer fra starttidspunkt [h]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Akkumuleret nedbør [mm]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Tabel E.1. Eksempel på hvordan en prognose ser ud fra vejrmodellen DMI-HIRLAM. [European meteorological institutes 2014]

I dette projekt er der sammensat fire nye tidsserier, som er baseret på de oprindelige HIRLAM prognoser på 1-24 timer. De fire tidsserier består hhv. af alle prognoseresultater fra 1-6, 7-12, 13-18 og 19-24 timer. På den måde opnås der fire tidsserier, som hver beskriver prognoser indenfor fire forskellige tidshorisonter. Dette er gjort for begge regnhændelser.
Eksempel: Alle værdier fra HIRLAM prognosen regnes først om til intensiteter, mm/h. Der anvendes de første seks nedbørsværdier(1-6) fra alle de oprindelige HIRLAM prognoser, til at lave en tidsserie for 1-6 timer. Der anvendes de næste seks værdier(7-12) fra alle de oprindelige HIRLAM prognoser, til at lave en tidsserie for 7-12 timer. Denne metode anvende også for en tidsserie for 13-18 og 19-24 timer. Eksempel på hvordan værdier fra fire HIRLAM prognoser sættes sammen til fire nye tilsserie, som hver repræsenterer prognoser på hhv. 1-6, 7-12, 13-18 og 19-24 timer er illustreret i figur E.1.



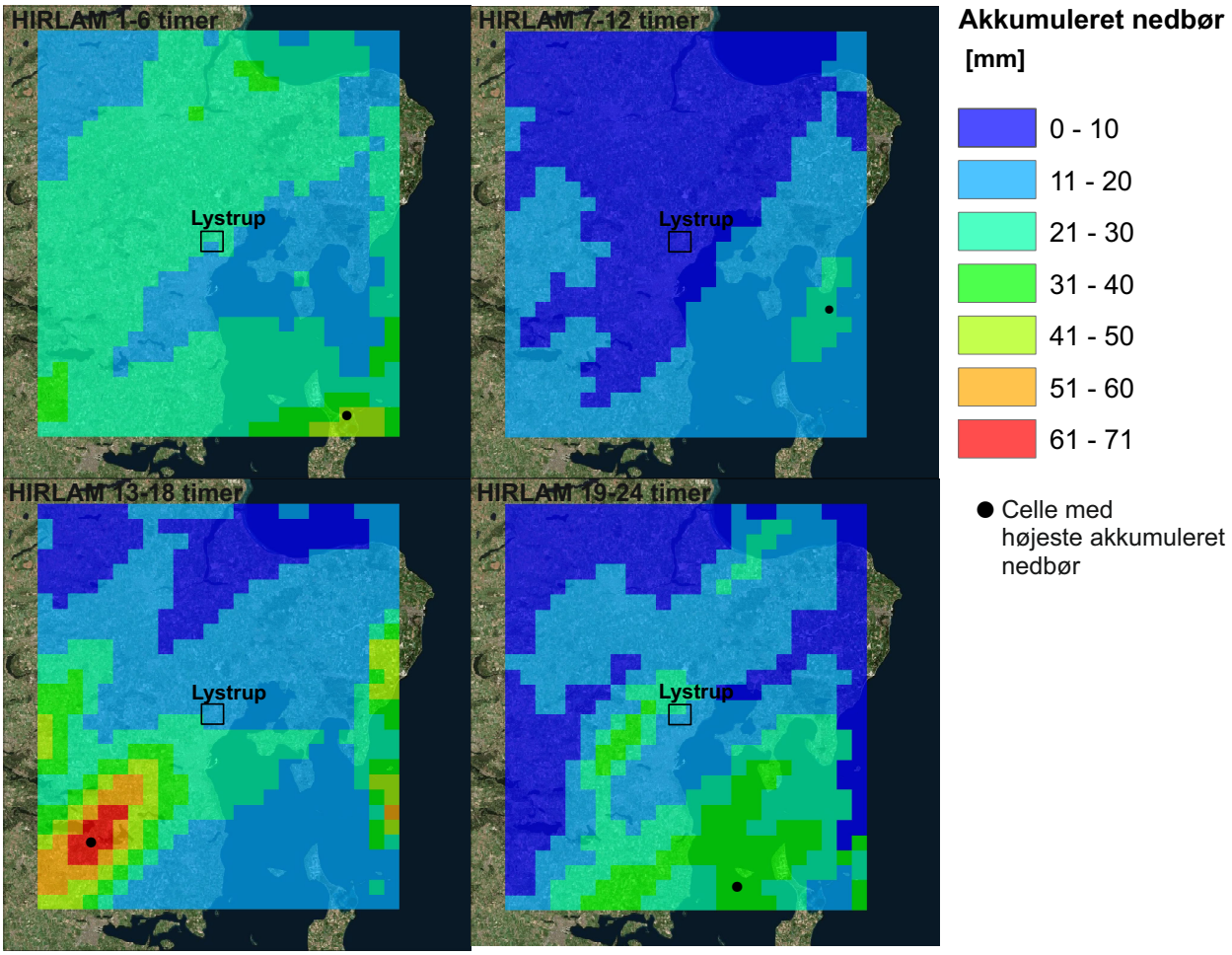
Figur E.1. Eksempel på hvordan fire af de oprindelige HIRLAM prognoser sættes sammen til fire nye tidsserier. Hver tidsserie er baseret på data fra enten 1-6, 7-12, 13-18 og 19-24 timer fra hver oprindelig HIRLAM prognose.

E.1 Beskrivelse af Hændelser

For hver af de fire tidsserier er der lavet en akkumulering af nedbøren fra hver celle i vejrmodellen for, at kunne sammenligne prognosen af nedbøren med de oprindelige nedbørsobservationer på en større skala. Der er lavet en akkumulering af nedbør for begge regnhændelser fra hver af de fire prognoser. Der er tilgængelige data i et areal på ca. 80x80 km omkring Lystrup, hvorfor det kun er et afgrænset område af Jylland, hvor den akkumulerede nedbør er illustreret.

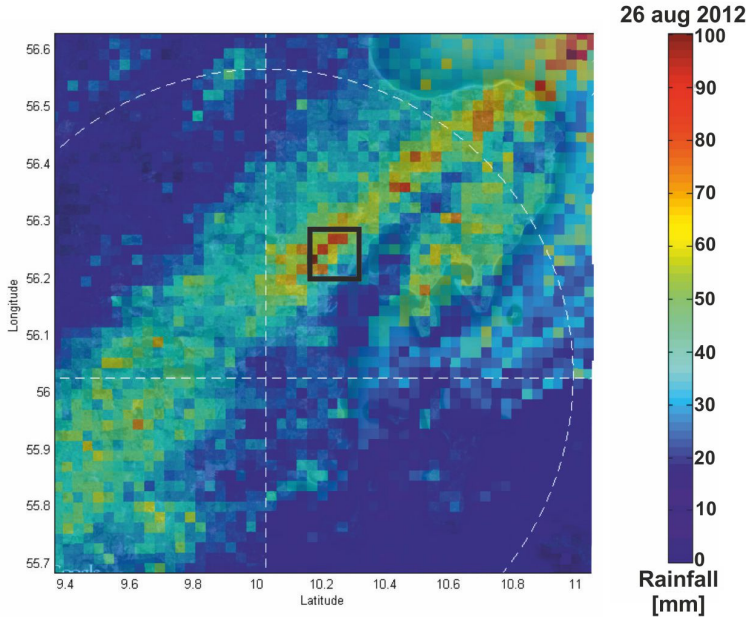
E.1.1 Hændelsen d. 26. august 2012

Den akkumulerede nedbør fra hændelsen d. 26. augsut 2012, fra hver af de fire prognoser, er illustreret i figur E.2. Der ses en stor variation imellem de fire prognoser, hvilket ses både i nedbørens struktur og ift. den akkumulerede nedbør. Sammenlignes de fire prognoser med den akkumulerede nedbør fra radar observationer i samme tidsperiode og på den samme lokalitet, ses det, at der for prognoserne 1-6, 7-12 og 19-24 timer er en stor afvigelse af nedbørens struktur og den totale volumen af nedbøren. I prognosen for 13-18 timer ses der derimod en god lighed mellem vejrmodel og radarobservationer ift. at præsentere de totale akkumuleringer, lokalitet og strukturen af nebøren. Observerede radardata fra hændelsen ses på figur E.3.
Det er tydeligt at se, at vejrmodellen kan forudse områder, hvor der opstår konvektiveagtige byger. Der ses dog en meget stor variation mellem de enkelte prognoser, hvilket indikere, at der er en forholdsvis høj usikkerhed i vejrmodellens prognoser. For prognosen 13-18, som umiddelbart præsentere hændelsen bedst ift. radar observationerne, ses en forskydning af lokaliteten på ca. 20-30 km sammenlignet de observerede radardata, hvilket viser, at vejrmodellen har en vis usikkerhed ift. at estimere den nøjagtige lokalitet af nedbøren.
Der er målt en akkumuleret nedbør med radaren på 50-70 mm over Lystrup, mens vejrmodellen forudser en akkumuleret nedbør på ca. 7 mm for den laveste værdi og ca. 20 mm for den højeste værdi i



Figur E.2. Den akkumulerede nedbør fra de fire forskellige tidsserier af vejrmodellen fra hændelsen d. 26. august 2012.

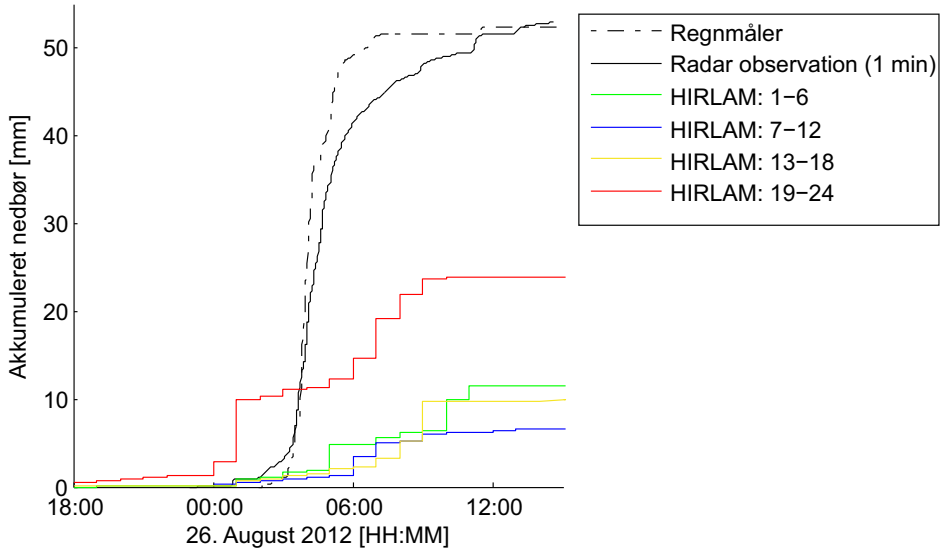
cellerne over Lystrup. Sammenlignes den observerede nedbør derimod med de maksimale værdier i det afgrænsede område, ses der en større lighed mellem nedbøren. Ved prognosen 13-18, hvor der ses den største lighed mellem radar observationer og vejrmodel, er der beregnet en total nedbør mellem 60-70 mm i punkterne med de højeste akkumuleringer, hvilket stemmer godt overens med den observerede nedbør i Lystrup.



Figur E.3. Akkumuleret nedbør målt med radar.

Celle over Lystrup

På figur E.4 ses den akkumulerede nedbør fra den celle, som dækker Lystrup. Der ses en dårlig lighed mellem estimeret nedbør fra vejrmodellen sammenlignet med nedbøren målt med radaren. Vejrmodellen underestimere nedbørsvolumen mellem 60-80 % ift. radar observationerne. I tabel E.2 er



Figur E.4. Akkumuleret nedbør beregnet i celle over Lystrup fra de fire prognoser. Prognoserne er sammenlignet med Regnmåler 5180 og radar observationer med 1 min tidsopløsning.

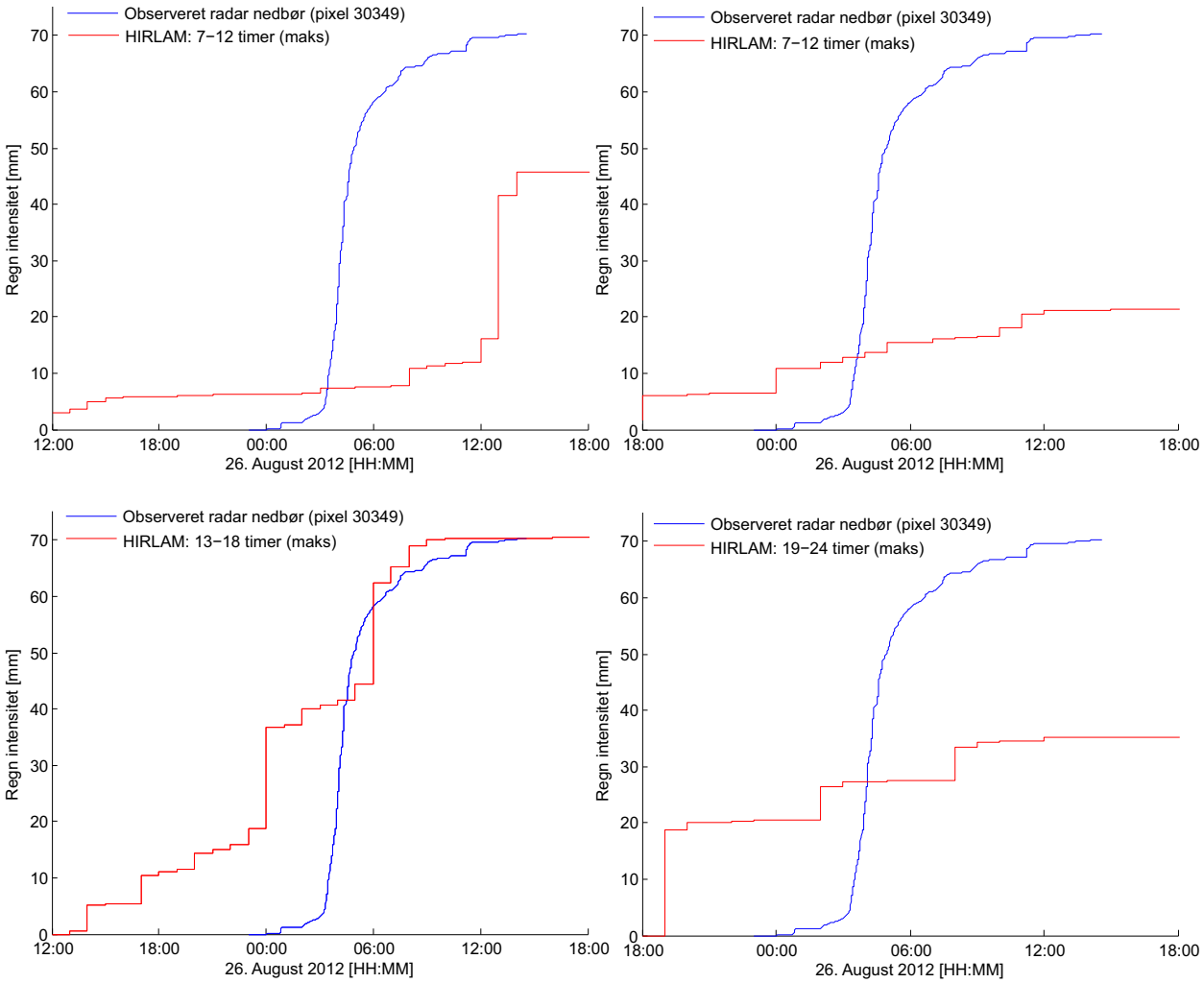
listet akkumuleret nedbør og maksintensitet for radar observation og vejrmodel i en celle over Lystrup.

	Radarobs.	1-6	7-12	13-18	19-24
Akkumuleret nedbør [mm]	52,9	14,84	7,1	9,02	23,50

Tabel E.2. Akkumuleret nedbør fra radar observationer og prognoserne fra vejrmodellen.

Celle med den maksimal akkumulerede nedbør

På figur E.5 er illustreret tidsserier af den akkumulerede nedbør fra hver celle med den maksimale akkumulerede nedbør fra hver af de fire prognoser. Der er sammenlignet med radar observationer med 1 min. tidsopløselighed. De fire punkter med den maksimale akkumulering er illustreret i figur E.2 Akkumuleringerne viser, at prognosen på 13-18 timer har god lighed med radar observationerne både ift.

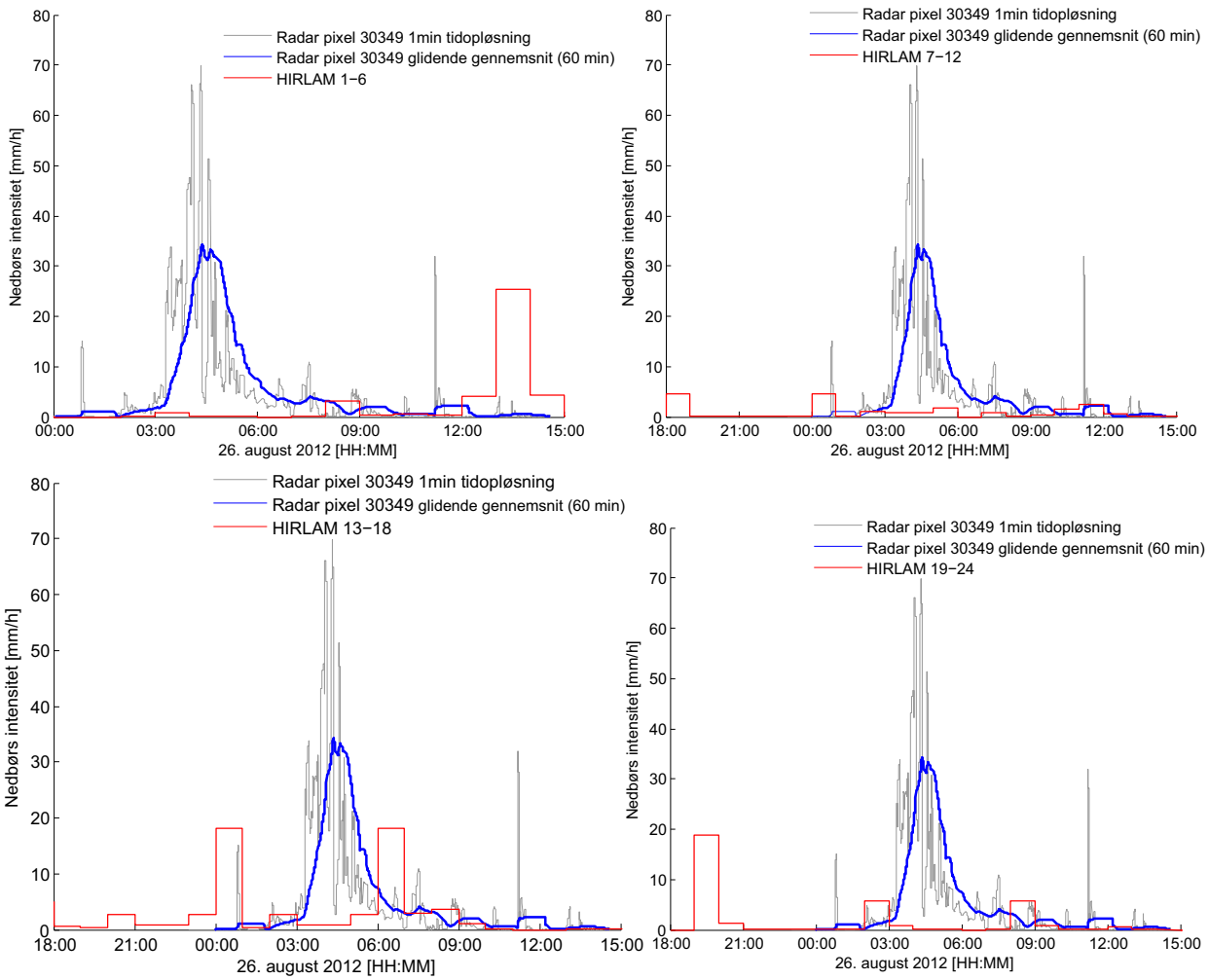


Figur E.5. Akkumuleret nedbør fra det modelpunkt som indeholder den største akkumulerring i hver af de fire prognoser.

den totale nedbørsvolumen, men også ift. at estimere perioder med en høj intensitet. For prognoserne 7-12 og 19-24 timer, ses der ikke stor lighed mellem vejrmodel og radar observationer. For prognosen 1-6 timer estimere vejrmodellen også den høje intensitet, her ses der dog en stor forskydning i tiden og en underestimering i nedbørsvolumenet.

På figur E.6 er intensiteterne i de fire celler illustreret. Der er igen sammenlignet med radarobservationer

med 1 min tidsopløselighed. For prognosen på 13-18 timer ses det, at der kun opnås en maksimal intensitet på ca. 20 mm/h sammenlignet med radar observationerne på 50-70 mm/h.
Vejrmodellen er i en tidsopløselighed på 60 min, hvilket betyder, at intensiteterne er en midling af den totale nedbør faldet i løbet af 60 min. Variationen af nedbøren bliver derved mindre præcis og medfører lavere maksimale intensiteter sammenlignet med intensiteter målt i en tidslig opløsning på eksempelvis 1 min. eller 10 min.
Sammenlignes et glidende gennemsnit på 60 min. af radar observationerne med vejrmodellens intensiteter, ses der en bedre lighed mellem størrelserne på de høje intensiteter fra vejrmodellen og radar observationerne. Det glidende gennemsnit er også illustreret i figur E.6



Figur E.6. Intensiteter fra vejrmodel sammenlignet med intensitet fra observerede radardata med et glidende gennemsnit på 60 min.

I tabel E.3 er de fire forskellige modelpunkter med akkumuleret nedbør, maksimale intensitet og afstand til Lystrup listet.

Ved hændelsen d. 26 august 2012, har vejrmodellen svært ved, at forudsige den korrekte nedbør. Ud fra det afgrænsede område af vejrmodellen som er undersøgt, ses det, at det både er ift. nedbørsvolumenet, men specielt ift. at lokalisere nedbøren, hvor vejrmodellen har en stor usikkerhed. Det er kun én ud af fire prognoser, som giver nedbørsestimater, som er sammenligenlig med den observerede nedbør.

	Radarobs.	1-6	7-12	13-18	19-24
Afstand til Lystrup [km]	0	45	33	35	38
Akkumuleret nedbør [mm]	70,2	45,8	21,3	70,5	35,4
Maks. intensitet [mm/h]	34,4	25,4	4,5	18,1	18,7

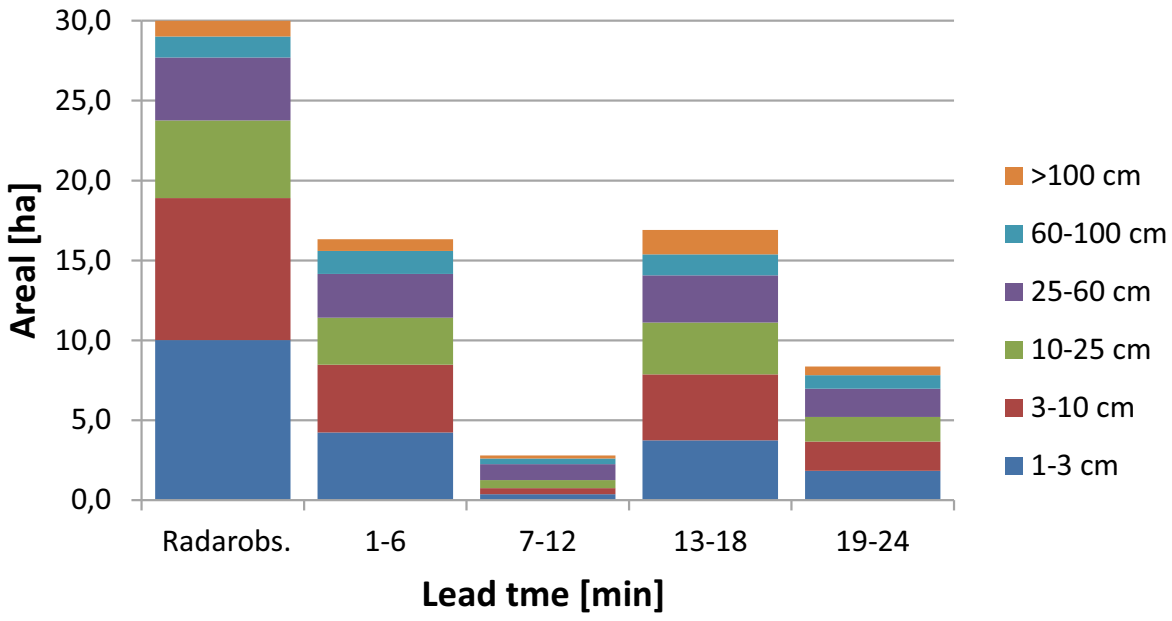
Tabel E.3. Afstand til Lystrup, akkumuleret nedbør og maksimale intensitet midlet over 60 min. fra radar observationer med 1 min tidsopløselighed og udvalgt celler fra hver prognose.

Herudover ses der for prognosen på 13-18 timer, som er mest sammenlignelig med radar observationer, at nedbøren estimeres omkring 35 km ved siden af.

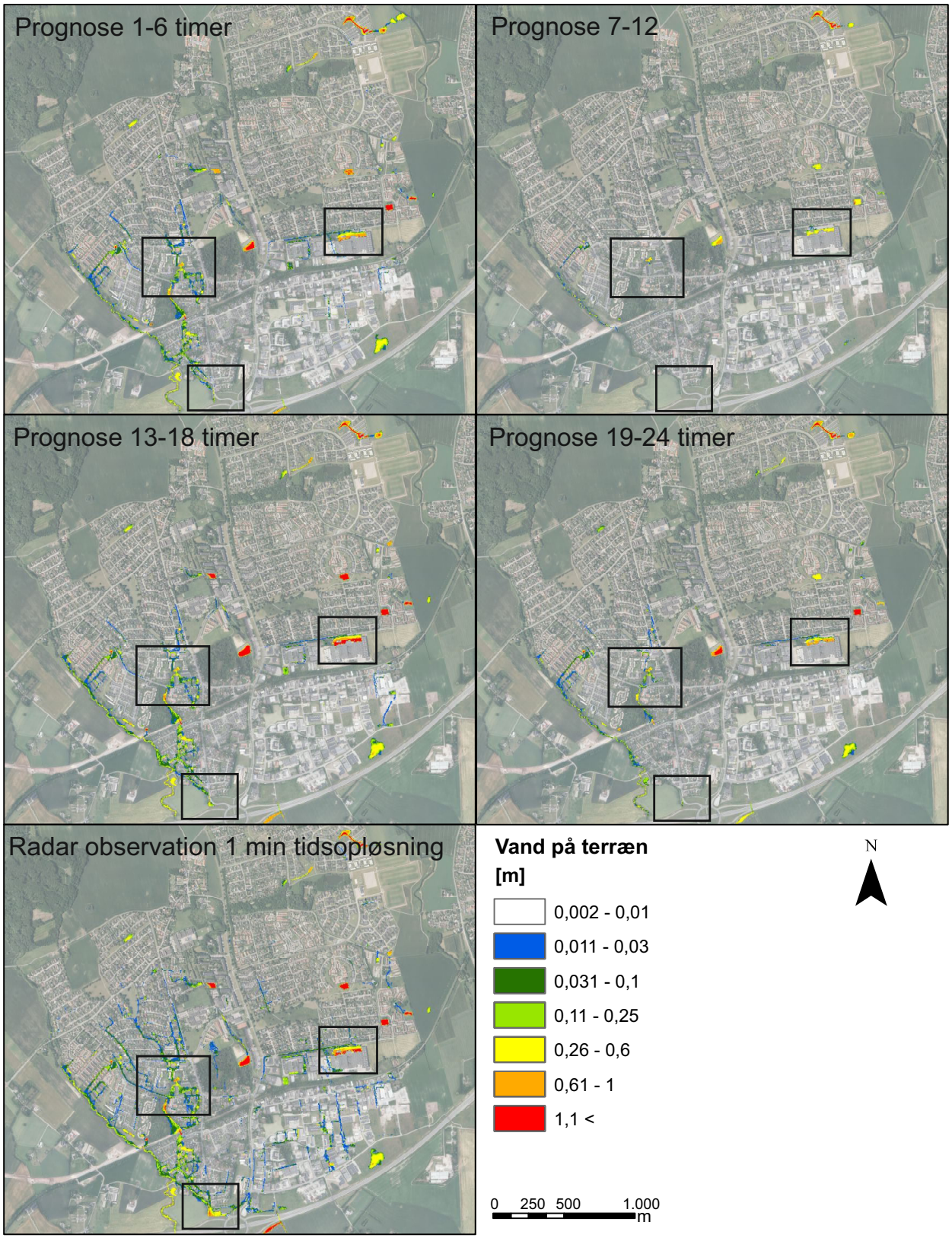
Maksimale nedbør fra HIRLAM som input i oversvømmelsesmodel

De fire maksimale prognoser fra vejrmodellen, beskrevet i forrige afsnit, er anvendt som input i oversvømmelsesmodellen, for at undersøge deres potentiale for at simulere oversvømmelse. I figur E.7 er de oversvømmede arealer visualiseret. I figur E.8 er illustreret udbredelsen fra de fire modelresultater og observerede radardata.

På baggrund af både arealer og det grafiske resultat af vand på terræn, viser prognoserne 1-6 og 13-18 timer et fint potentiale for at estimere oversvømmelsen i nogle af de kristike områder, de tre områder markeret med sort. Det ses dog at arealet af de lave vanddybder mellem 1-10 cm bliver meget underestimeret.



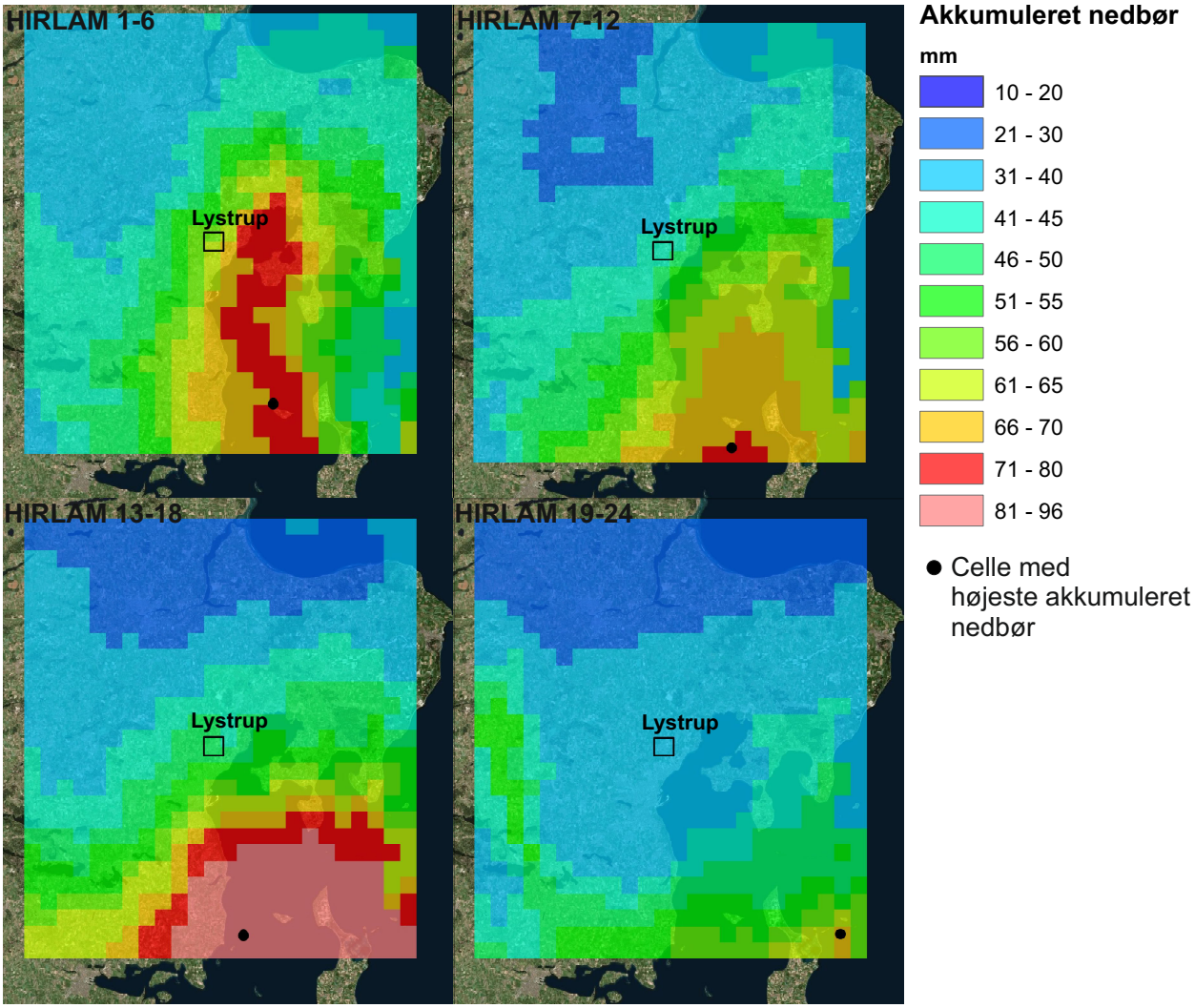
Figur E.7. Areal af vand på terræn, hvor de fire celler med de maksimale akkumulerede nedbører, er anvendt som nedbørs input i oversvømmelsesmodel. Der er sammenlignet med radar observationer med en tidsopløsning på 1 min.



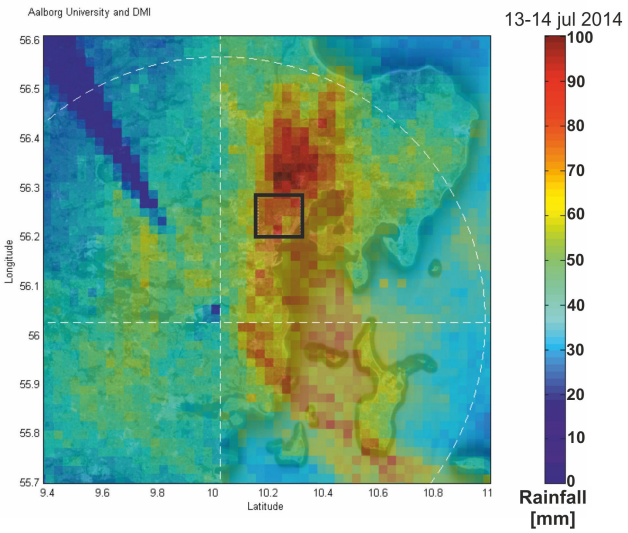
Figur E.8. Oversvømmelsens udbredelse, hvor de fire celler med de maksimale akkumulerede nedbører, er anvendt som nedbørs input i oversvømmelsesmodel. Der er sammenlignet med radar observationer med en tidsopløsning på 1 min.

E.1.2 Hændelsen d. 13.-14. juli 2014

Den akkumulerede nedbør fra hver af de fire prognoser er illustreret i figur E.9. Sammenlignes de fire prognoser med de oprindelige radar observationer, ses der for prognosen på 1-6 timer en god lighed mellem vejrmodel og observationer. Vejrmodellen har forudsagt nedbørsvolumenet og nedbørsstrukturen meget nøjagtigt, dog med en vis stedslig forskydning. For prognoserne på 7-12 og 13-18 timer ses der i en mindre grad samme tendens som ved observationerne. Det ligner umiddelbart, at vejrmodellen her forudser de høje nedbørs akkumuleringer til at være forskudt flere km. mod syd. Ved prognosen på 19-24 timer ses der en stor afvigelse sammenlignet med observationerne. Observationsdata fra radar kan ses på figur E.10.



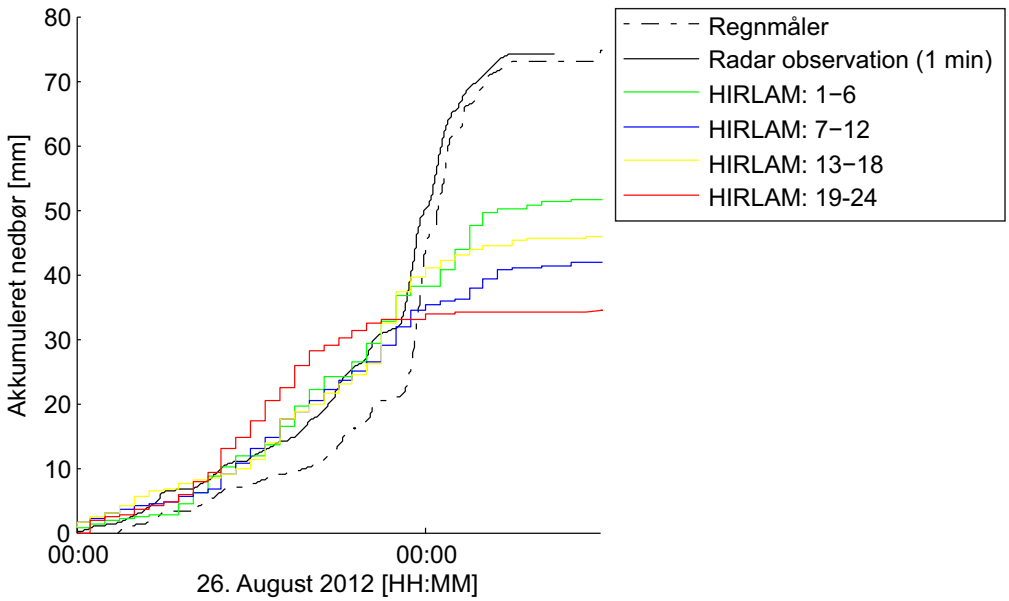
Figur E.9. Den akkumulerede nedbør fra de fire forskellige tidsserier af vejrmodellen fra hændelsen d. 13. juli 2014.



Figur E.10. Akkumuleret nedbør målt med radar.

Celler over Lystrup

På figur E.11 ses den akkumulerede nedbør fra den celle, som dækker Lystrup. Der ses for denne hændelse en bedre lighed mellem de estimerede nedbørsvoluminer og de observerede. Vejrmodellen underestimere dog stadig nedbørsvoluminerne med 35-65 %. Herudover estimere vejrmodellen ikke de høje intensiteter som bliver observeret i den sidste halvdel af hændelsen. I tabel E.4 er listet akkumuleret nedbør og maksimale intensiter for radar observation og vejrmodel i cellen over Lystrup.



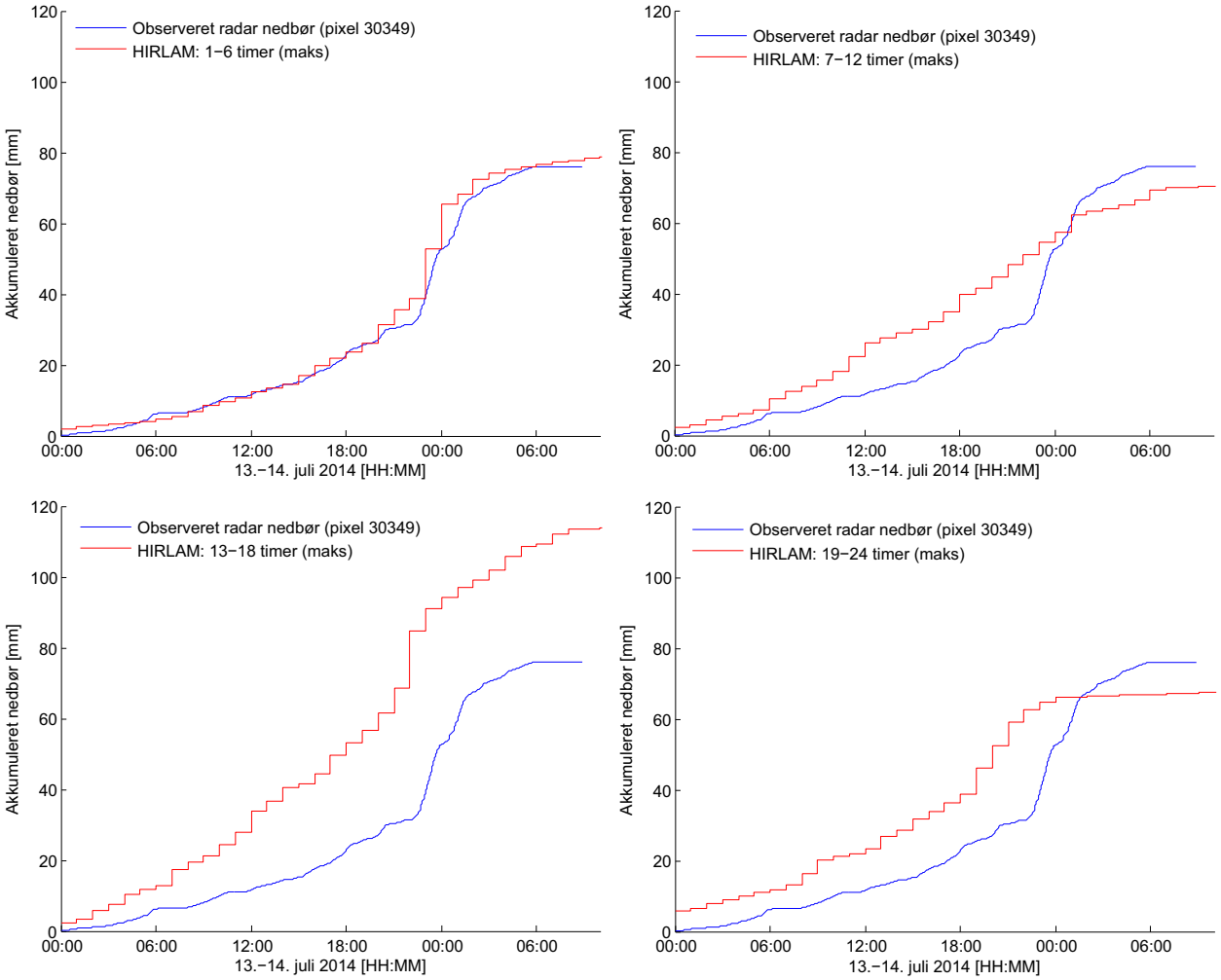
Figur E.11. Akkumuleret nedbør beregnet i modelpunkt over Lystrup fra de fire forskellige prognoser. Prognoserne er sammenlignet med Regnmåler 5180 og radar observationer med 1 min tidsopløsning.

	Radarobs.	1-6	7-12	13-18	19-24
Akkumuleret nedbør [mm]	76,1	50,3	41,0	46,1	34,8
Maks. intensitet [mm/h]	24,5	4,0	2,8	6,3	3,8

Tabel E.4. Akkumuleret nedbør og maksimale intensiteter fra radar observationer og prognoserne fra vejrmodellen.

Celler med den maksimal akkumulerede nedbør

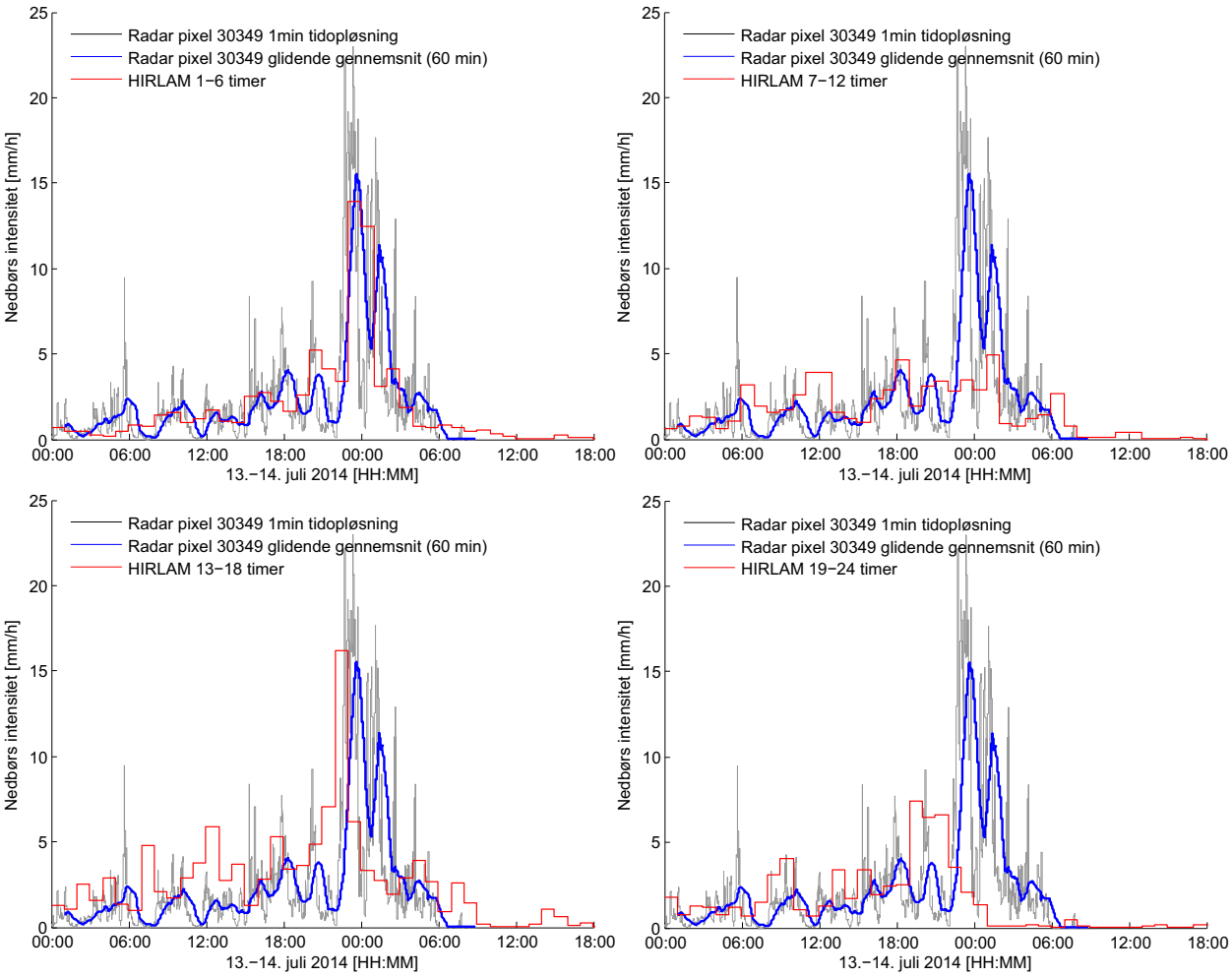
På figur E.12 er illustreret tidsserier af den akkumulerede nedbør for hvert modelpunkt med den maksimale akkumulerede nedbør fra hver af de fire prognoser. Der er sammenlignet med radarobservationer med 1 min tidsopløselighed.



Figur E.12. Akkumuleret nedbør fra den celle som indeholder den største akkumulering i hver af de fire prognoser.

Der ses en udemærket ligehed i den totale nedbørsvolumen mellem vejrmodel og radar observationer for alle de fire prognoser. Prognosen 1-6 timer viser den bedste lighed, da både volumen og intensitet passer overens. Prognosen 13-18 timer overestimerer volumenet, men estimerer de høje intensiteter. De to dårligste prognoser er 7-12 og 19-24, hvor der ses en lille underestimering af volumenet og en underestimering af de højeste intensiteter.

På figur E.13 er illustreret intensiteterne for de fire celler, hvor der igen er sammenlignet med radar observationer på 1 min tidsopløselighed. Sammenlignes vejrmodellens intensiteter med intensitetene fra radar observationerne med et glidende gennemsnit på 60 min ses der en rigtig god lighed. Vejrmodellen i prognose 1-6 og 13-18 timer forudser storset de samme høje intensiteter som radarobservationerne.



Figur E.13. Intensiteter fra vejrmodel sammenlignet med intensitet fra observerede radardata med et glidende gennemsnit på 60 min.

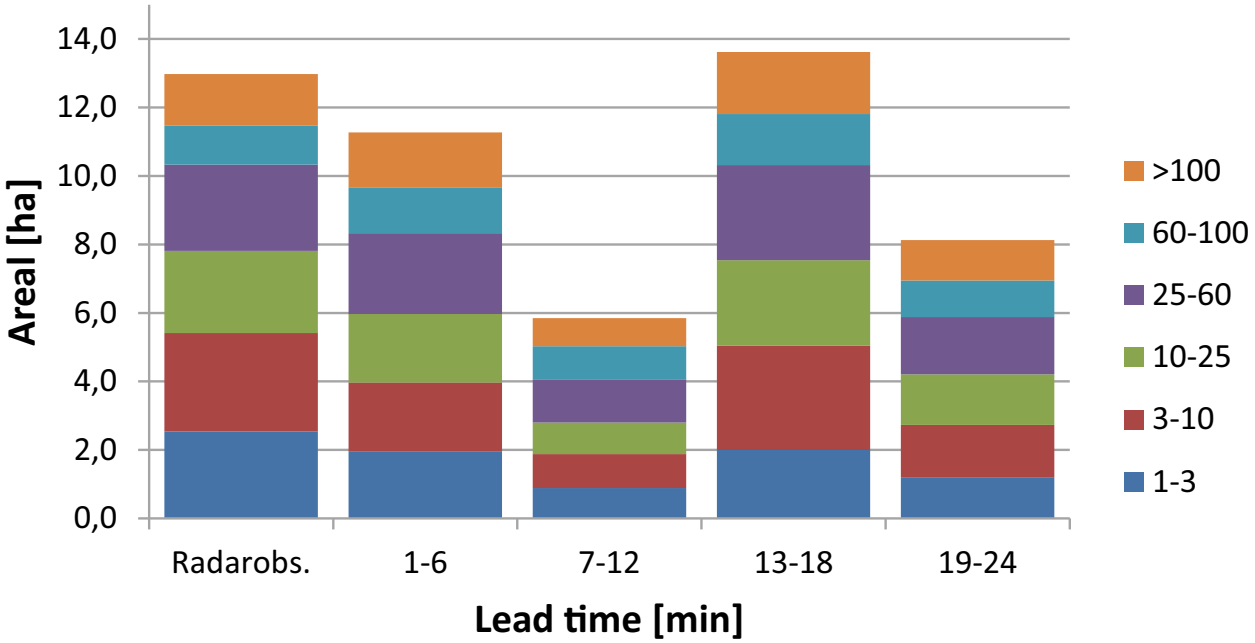
I tabel E.5 er de fire forskellige celler med akkumuleret nedbør, maksimale intensitet og afstand til Lystrup listet. Ved hændelsen den 13.-14. juli 2014 estimere vejrmodellen nedbøren bedre sammenlignet med hændelsen i 2012. Der ses stadig en vis usikkerhed ved vejrmodellen ift. at estimere den nøjagtige lokalitet for nedbøren, dog ses der en større lighed mellem de enkelte prognoser som stadig varierer mellem hinanden. Estimeringen af lokaliteten afviger med 10-40 km ved prognoserne på 1-6 og 13-18 timer til over 50 km ved prognoserne på 7-12 og 19-24 timer. Samlet set er det prognosen på 1-6 timer, som er har den bedste lighed med radar observationerne, når der også tages forbehold for afstanden fra de maksimale celler og til Lystrup, samt vejrmodellens evne til at forudsige den reelle struktur af nedbøren.

	Radarobs.	1-6	7-12	13-18	19-24
Afstand til Lystrup [km]	0	10-30	40	20-35	47
Akkumuleret nedbør [mm]	76,1	79,5	71,5	116,6	69,1
Maks. intensitet [mm/h]	15,5	13,9	4,9	16,2	7,4

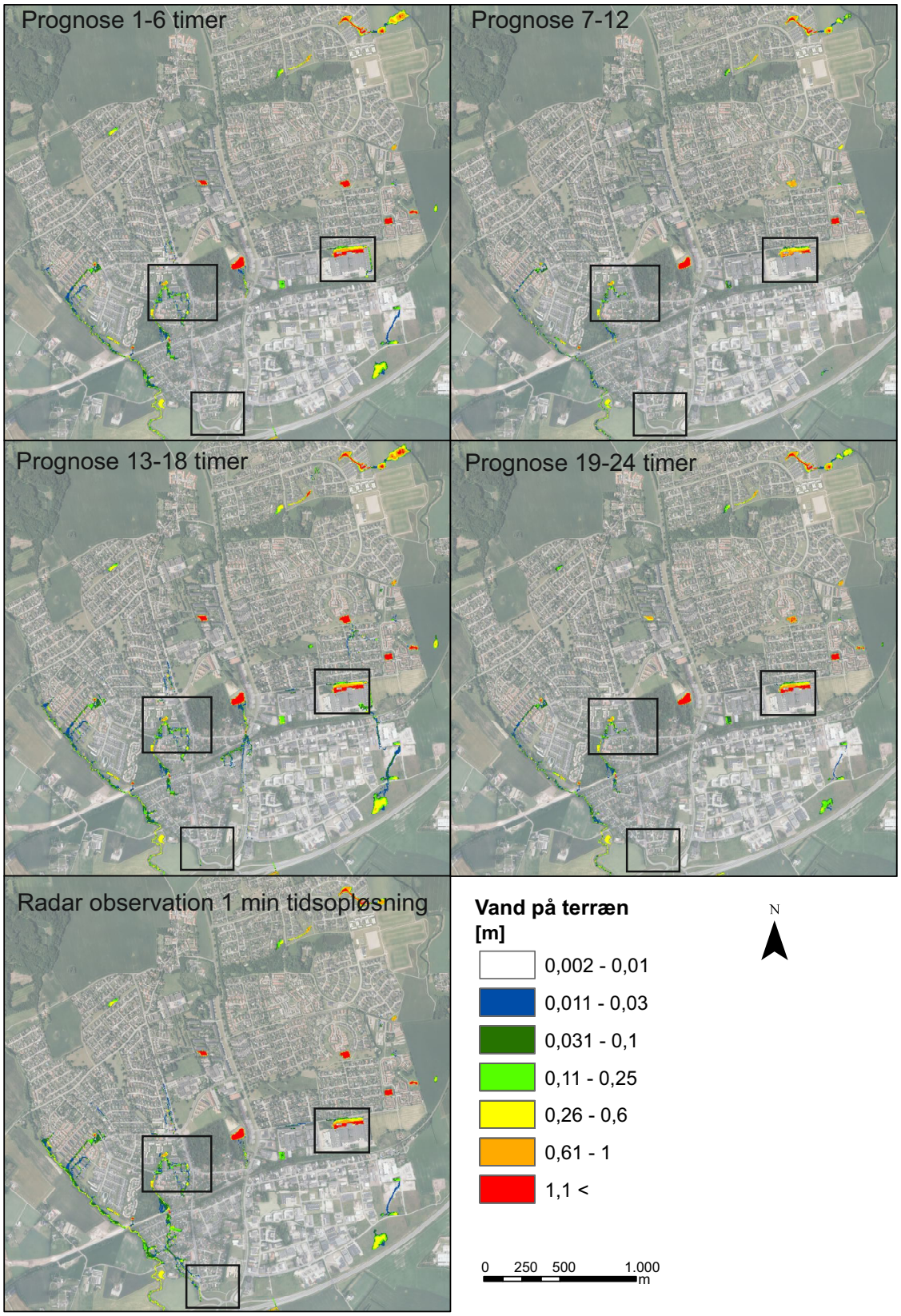
Tabel E.5. Afstand til Lystrup, akkumuleret nedbør og maksimale intensitet midlet over 60 min. for radar observationer med 1 min tidsopløselighed og udvalgt modelpunkt fra hver prognose.

Maksimale nedbør fra HIRLAM som input i oversvømmelsesmodel

De fire maksimale prognoser beskrevet i forrige afsnit er igen anvendt som input i oversvømmelsesmodellen, for at se deres potentiale til at kunne simulere oversvømmelse. I figur E.14 er de oversvømmede arealer visualiseret i ha, mens der i figur E.15 er illustreret udbredelsen fra de fire forskellige modelresultater og observerede radardata. På baggrund af både arealer og det grafiske resultat af vand på terræn, viser alle fire prognoser et potentiale for at kunne estimere oversvømmelsen. Det er prognoserne på 1-6 og 13-18 timer der bedst estimerer arealerne af vand på terræn. Der ser dog ud til, at modellerne ikke kan estimere det vand, som burde samle sig nede i bunden af til- og frakørslen til motorvejen.



Figur E.14. Areal af vand på terræn, hvor de fra de fire celler med de maksimale akkumulerede nedbører, er anvendt som nedbørs input i oversvømmelsesmodel. Der er sammenlignet med radar observationer med en tidsopløsning på 1 min.



Figur E.15. Oversvømmelsens udbredelse, hvor de fra de fire modelpunkter med de maksimale akkumulerede nedbører, er anvendt som nedbørs input i oversvømmelsesmodel. Der er sammenlignet med radar observationer med en tidsopløsning på 1 min.

Bestemmelse af gentagelsesperiode for regnhændelse

F

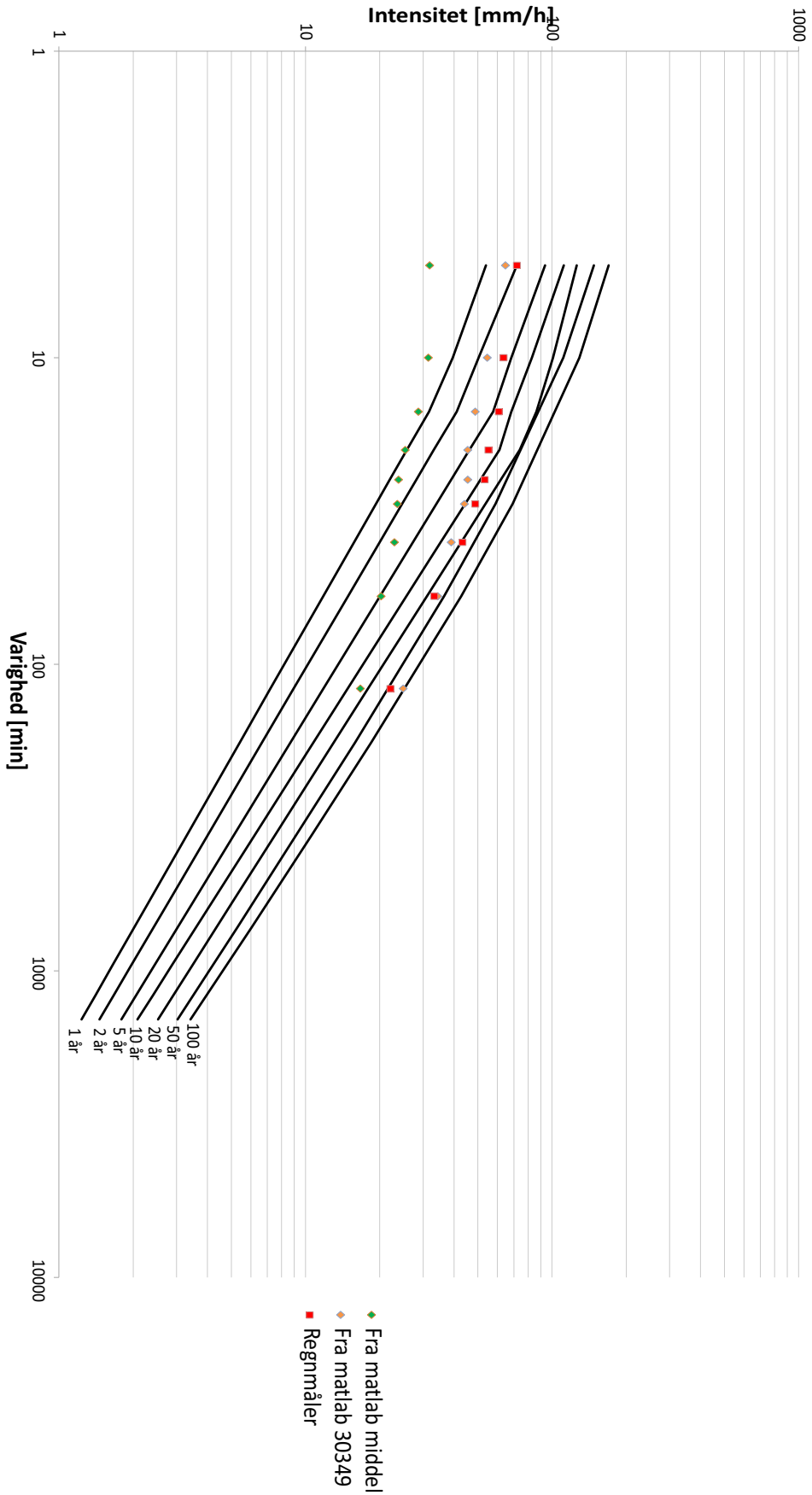
Til bestemmelse af gentagelsesperioden for de to regnhændelser, er der sammenlignet med regnrækken, som er beregnet på baggrund af regnformlen F.1 [Winther et al. 2011]. Udregninger af regnrækken kan også findes på bilags cd *Analyse af regn*.

Nedbøren er midlet over forskellige varigheder fra 5 min og frem, indtil den maksimale gentagelsesperiode for hver hændelse er fundet.

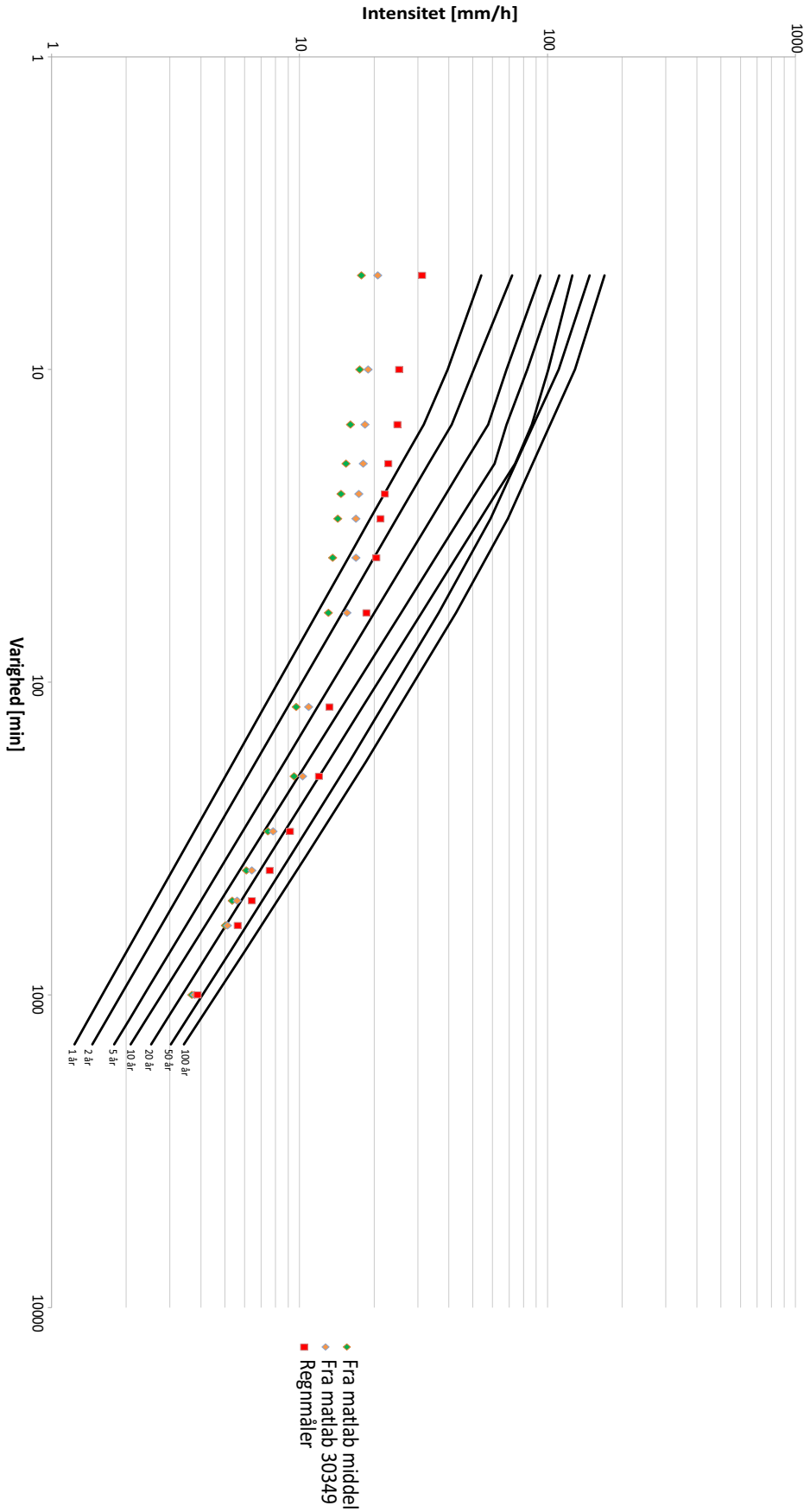
$$log(i) = log(c) - \alpha \cdot log(t_r) \tag{F.1}$$

hvor:
t_r = varighed
c = parameter der afhænger af regnserie og overskridelses hyppighed
α = parameter der afhænger af regnserie og overskridelses hyppighed
i = intensitet

På figur F.1 og F.2 ses de enkelte intensiteter ved en given varighed samt hvilken gentagelsesperiode denne svarer til sammenlignet med regnrækken for hhv. hændelsen i 2012 og 2014. Hændelsen i 2012 svarer til mere end en 20 års hændelse ved en varighed på 40 min. Hændelsen i 2014 svarer også til mere end en 20 års hændelse ved en varighed på 600 min.



Figur F.1. Hændelse d. 26. august 2012 sammenlignet med regnrækken.



Figur F.2. Hændelse d. 13.-14. juli. 2014 sammenlignet med regnrækken.