Varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser baseret på realtidsimuleringer

Niels Harald Kjær Jepsen

Kandidatspeciale

Vand & Miljø

Juni 2020

AALBORG UNIVERSITY
STUDENT REPORT

Kandidatspeciale v/ Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet
Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg
http://www.build.aau.dk

Titel:

Varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser baseret på realtidssimuleringer

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

September 2019 - juni 2020

Forfatter:

Niels H. K. Jepsen

Vejledere:

Søren Thorndahl
Rasmus Nielsen

Oplagstal: 4
Sidetal: 88
Appendiks: 4
Elektronisk appendiks: 1
Afsluttet: 10-06-2020

Synopsis:

Dette specialeprojekt omhandler opbygningen af et varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser for bydelene Kærby og Håndværkerkvarteret i Aalborg Kommune. Der vil i projektet blive undersøgt hvorledes det er muligt at lave dette varslingsystem baseret på realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel.

Til dette formål er det undersøgt hvor langt ud i fremtiden, det vil være muligt at prognosticere fremtidig regn med nowcasting af radardata, ved at sammenligne fem nowcastede regnhændelser med observeret nedbør målt med radar.

Herudover er der i projektet opbygget et eksempel på en skal til realtidskørsel af 1D-2D modellen, for at vise hvilke overvejelser der skal tages i forbindelse med realtidsmodellering, og for at undersøge hvor meget beregningskraft er nødvendig for at køre modellen i realtid.

På baggrund af den dårlige præstation af radar nowcastet er det konkluderet, at det ikke vil være muligt at lave et varslingsystem baseret på realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel for Kærby og Håndværkerkvarteret.

Forord

Dette rapport er udarbejdet af Niels Harald Kjær Jepsen som kandidatspeciale på kandidaten i Vand og Miljø på Aalborg Universitet i perioden september 2019 til juni 2020. Temaet for rapporten er *Varslingsystem mod regnbetingede oversvømmelser baseret på realtidssimuleringer*.

Der rettes tak til vejledere Søren Thorndahl og Rasmus Nielsen for god vejledning og stort engagement gennem hele forløbet.

Læsevejledning

Projektarbejdet er præsenteret i en rapport med appendiks, som er refereret til gennem rapporten. Ligeledes er der refereret til elektroniske appendiks, som er vedlagt i projektmappen.

Referencer til kilder er gennem rapporten angivet i kantede parenteser med angivelse af efternavn på forfatter efterfulgt af årstal for udgivelse. I litteraturlisten er kilderne angivet i alfabetisk rækkefølge i forhold til efternavn. Kildehenvisninger til den foregående sætning er angivet inden punktum, mens kildehenvisninger til det foregående afsnit er angivet efter punktum.

Figurer, som fremstår uden kildehenvisninger, er udarbejdet af forfatteren. Er der indhentet værdier eller kortlag til fremstilling af figurer eller tabeller er dette angivet i figur- eller tabelteksten med henvisning til, at data er indhentet fra den respektive kilde. Medmindre andet er angivet, er kortlag, som er anvendt som baggrundskort, indhentet fra Kortforsyningen.

Abstract

This Master thesis investigates the possibility of creating an early warning system against urban flooding for the neighborhoods Kærby and Håndværkerkvarteret in Aalborg Municipality based on real time simulations of a 1D-2D flood model.

For this purpose it has been investigated how far into the future it's possible to predict future rainfall using radar nowcast. This has been done by comparing the flood extent simulated by the model using the nowcasts with different leadtimes to results from a simulation using observed radar rainfall for 5 different rain events.

Furthermore the project contains an example of shell for running the 1D-2D model in realtime to give an example of the considerations that should had when running this type a model in realtime and to show the required computing power nessecary to run the model in real time.

Based on the lackluster preformance of the radar nowcast it's concluded that it wont be possible to do an early warning system against urban flooding for the neighborhoods Kærby and Håndværkerkvarteret.

Indhold

I Introduktion

1 Indledning 3

2 Kærby og Håndværkerkvarteret 5

2.1 Østerå 6

2.2 Projektområdets afløbssystem 6

3 Beskrivelse af forskellige varslingssystemer 9

3.1 Hydrauliske modeller til brug i varslingssystemer 10

3.2 Analyse af forskellige gridstørrelser i 1D-2D oversvømmelsesmodel 13

3.3 Opsummering 15

4 Problemformulering 17

II Modelopbygning

5 1D-2D oversvømmelsesmodel 21

5.1 Vandføring i Vandløb 22

5.2 Østerås påvirkning på afløbssystemet 24

5.3 Responstid for model 26

5.4 Opsummering 27

6 Regn-input til realtidsmodel 29

6.1 Radar 29

6.2 Arealvægtning af radardata 31

6.3 Lead time på radar nowcast 34

6.4 Grunde til fejl i nowcasting af radardata 35

6.5 Opsummering 43

7 Automation af modeldrift 45

7.1 Batch-script til initialisering af realtidsmodel 45

7.2 MATLAB-script til kørsel af MIKE FLOOD-model 46

7.3 Python-script til visualisering af resultater og varsling 52

7.4 Beregningstid af realtidsmodel 53

7.5 Opsummering 54

III Afrunding

8 Konklusion 57

9 Perspektivering 59

Litteratur 59

IV Appendiks

A Oversvømmelseskort til analyse af gridstørrelse 65

B Undersøgelse af nowcasts 69

C Flowchart over opbygning af realtidsmodel 75

D Elektroniske appendiks 77

D.1 Zip-fil med kode og nødvendige filer til realtidsmodel 77

Introduktion

1 Indledning 3

2 Kærby og Håndværkerkvarteret 5

3 Beskrivelse af forskellige varslingssystemer 9

4 Problemformulering 17

1. Indledning

Der er i de seneste år i Danmark så vel som i andre lande observeret en øget hyppighed i antallet af oversvømmelser forudsaget af kraftig nedbør. Især i de urbane områder i byerne er hyppigheden af oversvømmelser forøget. Dette skyldes blandt andet fortætning på grund af urbanisering, hvilket reducerer områdernes infiltration og opmagasineringsevne, og dermed gør områderne følsomme overfor korte højintensive regnskyl.

En anden årsag til den stigende hyppighed i regnhændelser der giver anledning til vand på terræn, er klimaforandringer. Ifølge FN's klimapanel IPCC's femte rapport fra 2013 er den gennemsnitlige årsnedbør steget med 100 mm siden 1870 på verdensplan, og i samme tidsperiode er gennemsnitstemperaturen steget med 1,5 °C. Denne udvikling vil forsætte i fremtiden, det er estimeret, at den årlige nedbør i år 2100 vil være steget med 2-7 % afhængig af udviklingen i den menneskelige påvirkning på CO_2-udledningen til atmosfæren. Rapporten peger også på, at selvom den akkummulerede sommernedbør vil være på samme niveau, vil antallet og intensiteten af højintensive regnhændelser stige i fremtiden. [Stocker et al., 2013] Det er disse regnhændelser, som giver anledning til regnbetingede oversvømmelser i urbane områder. Dette tyder på, at der i fremtiden vil komme hyppigere regnbetingede oversvømmelser, og at de samfundsmæssige og økonomiske konsekvenser heraf vil derfor også stige i fremtiden. [DMI, 2014]

I Danmark bestemmer kommunerne selv serviceniveauet i forhold til hvor hyppigt der må forekomme vand på terræn, hvilket betyder at der accepteres en oversvømmelsesrisiko ved regnhændelser med en større gentagelsesperiode end serviceniveauet. Afløbssystemerne i Danmark bliver designet for at kunne leve op til dette serviceniveau. Problemet er dog, at udbygninger af afløbssystemerne sjældent kan følge med udviklingerne forudsaget af urbaniseringen og klimaforandringerne, hvorfor det er svært for kommunerne at opretholde deres serviceniveau alene ved at renovere og udvide afløbssystemer.

Regnbetingede oversvømmelser kan have store samfundsmæssige og økonomiske konsekvenser. Et eksempel på dette er skybruddet over Storkøbenhavn d. 2 Juli 2011, hvor der målt en døgnnedbør på op til 135 mm og en 10 minutters intensitet på 3,1 mm/min. Skybruddet forudsagede forstyrrelser i trafikken på grund af oversvømmede veje, og det tog 3 dage inden at alle oversvømmede veje var farbare igen. Skybruddet havde også store økonomiske konsekvenser, i det at der blev udbetalt forsikringserstatninger for over 4,88 milliarder kroner fordelt på over 90.000 skader. [Beredskabsstyrelsen, 2012]

På grund af de problemstillinger, der er blevet beskrevet, vil det være fordelagtigt at kunne forudsige om en fremtidig regnhændelse vil give anledning til oversvømmelser, således at beredskab og private borgere har tid til at reagere, og dermed minimere de samfundsmæssige og økonomiske konsekvenser af oversvømmelsen.

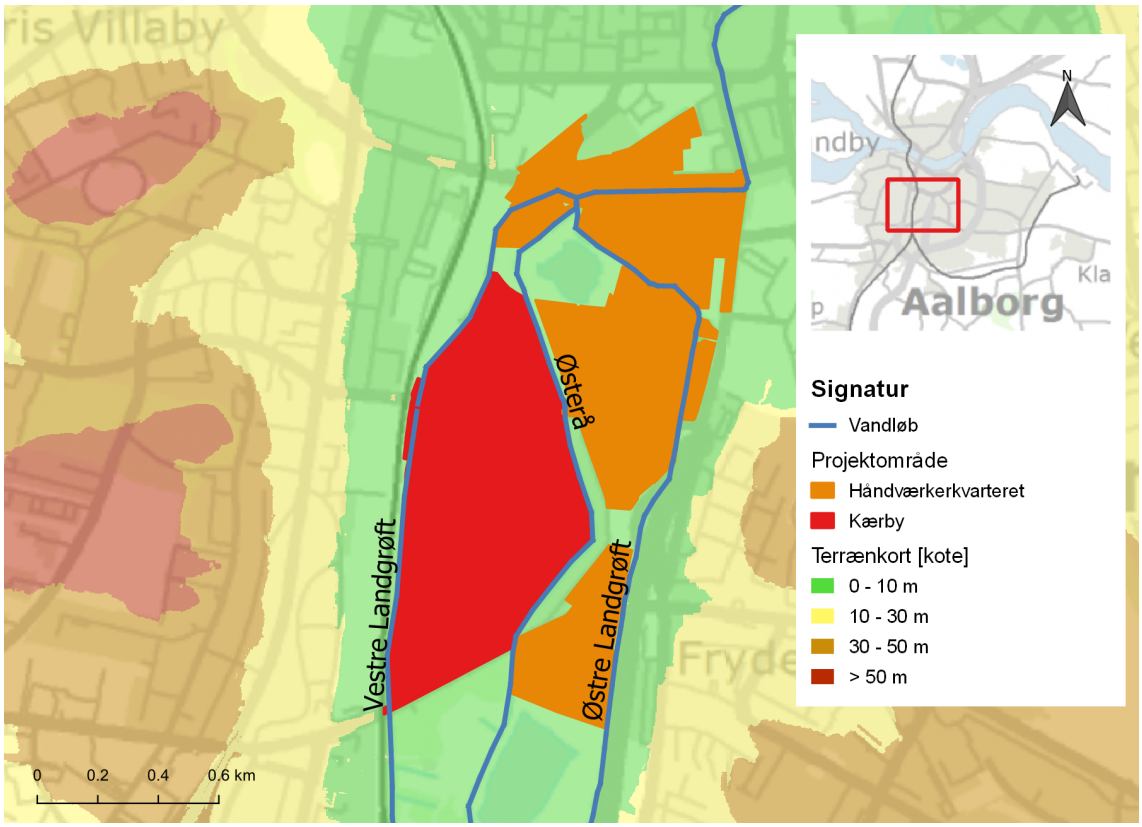
Dette kan gøres ved at etablere et varslingssystem, der indhenter regnmålinger og/eller regnprognoser i realtid, og herefter bruger disse som input til en model, der simulere om der

kommer oversvømmelse og eventuelt hvordan oversvømmelsesudbredelsen vil være. Hvis det estimeres, at regnhændelsen giver anledning til oversvømmelser, kan der udsendes varslinger til de berørte borgere og beredskabet således at disse har tid til at forberede sig, for eksempel ved at tømme kældre, fjernelse af biler fra veje med risiko for at blive oversvømmet eller lignede.

For at kunne ekspemlificere hvordan et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser kan opbygges, er det valgt at tage udgangspunkt i bydelene Kærby og Håndværkerkvarteret beliggende i den sydlige del af Aalborg. Disse bydele har historisk set haft problemer med regnbetingende oversvømmelser, og det vil derfor være fordelagtigt med et varslingsystem, der kan være med til at reducere omkostningerne ved regnbetingede oversvømmelser.

2. Kærby og Håndværkerkvarteret

Der vil i projektet blive taget udgangspunkt i at udvikle et varslingsystem mod regnbetingede oversvømmelser til bydelene Kærby og Håndværkerkvarteret i det sydlige Aalborg. Kærby er et villakvarter med et areal på omkring 60 ha med ca. 1900 indbyggere [Aalborg Kommune, b], mens Håndværkerkvarteret er et område på 70 ha, som primært består af erhvervs og industribygninger, der har en høj befæstningsgrad. Disse to bydele har historisk set haft problemer med oversvømmelser forudsaget af kraftige regnhændelser, hvilket er eksemplificeret i at der under skybrudet over Aalborg d. 6 august 2012, hvor der faldt 27,8 mm regn på en 30 minutters tidsperiode, var 78 udrykninger til Kærby alene, ud af de 324 der var for hele Aalborg. [EnviDan, 2012] På figur 2.1 ses projektlokalitetens placering.



Figur 2.1: Projektområdet med terrænkort og omkringliggende vandløb.

Projektlokalitetens høje oversvømmelsesrisiko skyldes til dels områdets høje befæstelsesgrad, der giver en stor overfladeafstrømning, herudover er der i Kærby et højt grundvandsspejl, hvilket reducere infiltrationskapaciteten og dermed øger overfladeafstrømningen. Disse to faktorer tilsammen gør, at det kun er en brøkdel af afstrømningen, der har mulighed for at infiltrere i området og at stort set alt nedbøren fra området skal afledes i afløbsystemet. Også områdets placering i en lavning, og de omkringlæggende vandløb, der omkranser området har en indflydelse

på områdets høje oversvømmelsesrisiko. Det bør derfor undersøges, om projektområdets placering i en lavning og de omkringlæggende vandløb, kan have en indflydelse på regnbetingede oversvømmelser i Kærby og Håndværkerkvarteret.

2.1 Østerå

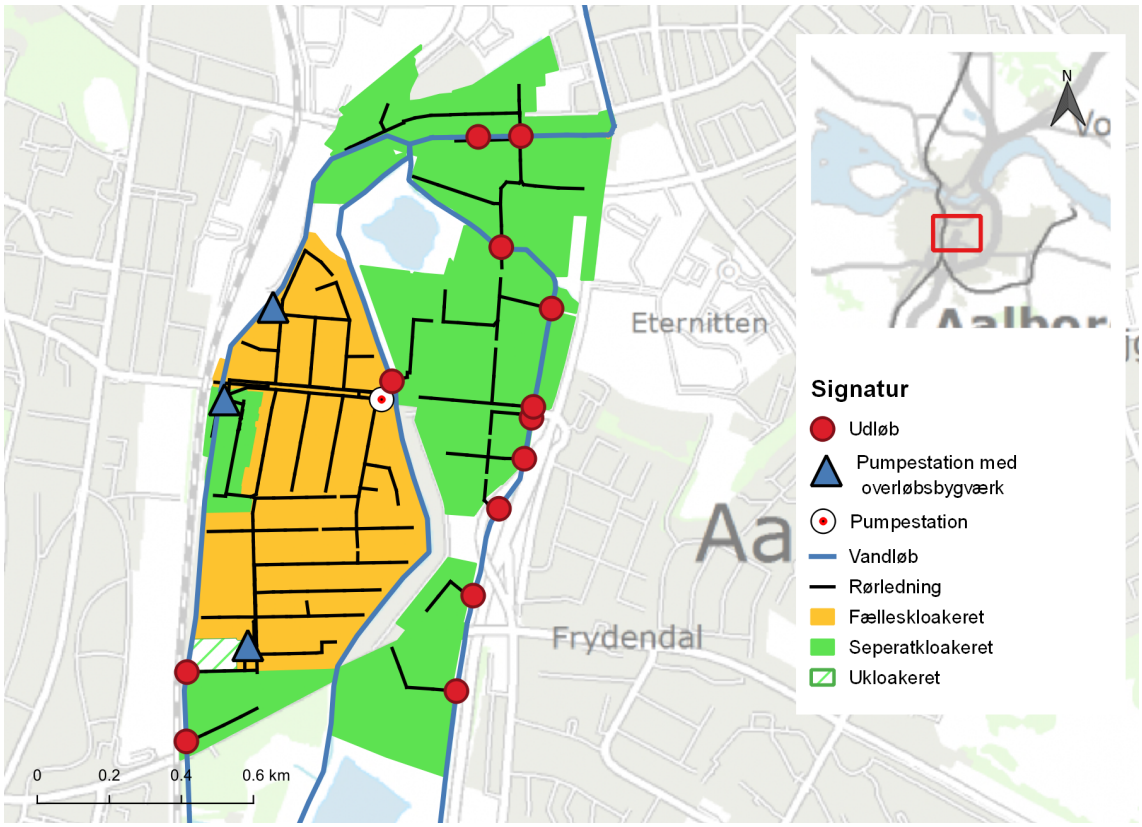
Som det ses på figur 2.1 løber der tre vandløb omkring projektområdet, Østerå som løber i mellem Kærby og Håndværkerkvarteret, og dens to forgreninger Vestre Landgrøft som løber vest om Kærby, og Øster Landgrøft der løber øst om Håndværkerkvarteret. Vestre Landgrøft løber ud i Østerå nord for Kærby, Øster Landgrøft løber ud i Østerå længere opstrøms, vandløbenes trace rundt om Kærby og Håndværkerkvarteret fremgår af figur 2.1.

Østerå udspringer nær Mjels syd for projektområder, og løber nord imod Limfjorden, Der er derfor mulighed for at afstrømning til Østerå, nedstrøms for projektområdet, vil kunne forøge vandføringen og dermed vandstanden i Østerå, og dermed vanskliggøre afledningen af regnvand fra især håndværkerkvarteret hvor regnvandet fra afløbssystemet udledes direkte til vandløbet ved gravitation. Dog er kun en lille del af oplandet syd for Kærby og Håndværkerkvarter befæstet, hvorfor denne del af Østerås opland ikke nødvendigvis bidrager med en stor tilstrømning til vandløbet under regnhændelser.

Nord for Kærby og Håndværkerkvarteret løber Østerå igennem Aalborg Centrum, i dag er denne del af Østerå rørlagt, men der er planer om at omlægge en del af traceet og genåbne Østerå i Aalborg Centrum. Dette skal være med til at forøge kapaciten i Østerå [Aalborg Kommune, a], hvilket kan afhjælpe nogle af problemerne med regnbetingede oversvømmelser i Håndværkerkvarteret. Dog vil genåbningen muligvis kunne give anledning til oversvømmelser længere nedstrøms ved regnhændelser, der giver anledning til stor afstrømning fra projektområdet.

2.2 Projektområdets afløbssystem

Afløbssystemet i Kærby er næsten udelukkende fælleskloakeret, hvilket betyder, at regnvand og spildevand løber i samme rør ned mod en pumpesump. På grund af Kærbys placering i en lavning bliver fællesvandet pumpet videre til Aalborg Renseanlæg Vest. Hvis kapaciteten i pumpen ikke er tilstrækkelig, vil vandet strømme over i overløbssumpen, hvorfra det pumpes til det nærmeste vandløb. Herudover er der to seperatkloakerede områder i Kærby, den ene af disse områder er koblet til det fælles kloakerede system, mens det seperatkloakerede område i det sydlige Kærby har et direkte udløb til Vestre Landgrøft. På figur 2.2 ses en oversigt over afløbssystemet i Kærby og Håndværkerkvarteret.



Figur 2.2: Afløbssystem for Kærby og Håndværkerkvarteret.

Afløbssystemet i Håndværkerkvarteret er seperatkloakeret. Hvilket betyder, at spildevandet lige som i Kærby bliver pumpet videre til Renseanlæg Vest, hvorimod at regnvandet fra Håndværkerkvarteret bliver ledt direkte ud i det nærmeste vandløb. Af figur 2.2 kan det ses, at der fra Kærby og Håndværkerkvarteret er 16 udløb til de omkringliggende vandløb. Tre af disse udløb udleder opblandet spildevand og regnvand, som bliver pumpet ud i Vestre landgrøft fra de tre pumpestationer med overløbsbygværk markeret på figur 2.2. Herudover er der et udløb, hvor regnvandet pumpes ud i Østerå, og 12 udløb hvor regnvand udledes ved gravitation til vandløbene.

3. Beskrivelse af forskellige varslingssystemer

Varslingssystemer mod regnbetingede oversvømmelser findes allerede og kan inddeles i tre forskellige typer varslingssystemer, der alle har det fælles mål at anvende en regnprognose eller målt nedbør til at bestemme, om der vil ske oversvømmelser:

- Empirisk baserede varslingssystemer, hvor det ud fra empiri og viden om tidligere oversvømmelseshændelser vurderes om den givne regnprognose vil give anledning til oversvømmelse.
- Varslingsystemer baseret på præsimuleringer af en hydaraulisk model, hvor prognosen sammenlignes med et katalog af andre regnhændelser,
- Varslingssystemer baseret på realtidssimuleringer af en hydraulisk model, hvor regnprognosen anvendes direkte i en hydraulisk model der bestemmer om den givne prognose vil give anledning til oversvømmelse.

I Danmark er der i to varslingssystemer mod regnbetingede oversvømmelser, begge baseret på emperiske sammenhænge mellem regn og oversvømmelse. På DHI's hovedkontor i Hørsholm er der opstillet en regnmåler, hvor der ud fra realtidsmålinger og viden om tidligere oversvømmelseshændelser er opbygget et varslingssystem. Et lignende system findes i Hvidovre Kommune hvor Nowcastet radardata anvendes til at udregne afstrømningen fra 22 urbane oplande i kommunen. Overstiger afstrømningen fra en af oplandene en empirisk fastsat værdi advares berørt borgere ved brug af SMS og e-mail. [Hénonin et al., Juli 2013]

Et eksempel på et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser der er baseret på præsimulerede scenarier, findes i den sydfranske by Nimes' varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser ESPADA, hvor det mest sandsynlige scenarie udvælges fra et katalog af præsimulerede hændelser baseret på regnprognosen. Scenarierne er opbygget baseret på to-dimensionelle simuleringer af strømninger på overfladen der er vurderet at være for beregningstunge til at kunne blive udført i realtid. [Raymond et al., 2006]

I Bangkok og Barcalona findes der varslingssystemer hvor regnprognoser anvendes, som input i realtidssimuleringer af hydrauliske modeller til at bestemme om den modtagede regnprognose vil give anledning til oversvømmelser. I varslingssystemet i Barcalona er der anvendt en 1D-rørmodel som hydraulisk model til realtidssimuleringerne mens der i Bangkok anvendes en 1D-rørmodel koblet med 1D-strømningsmodel for overfladen. [Hénonin et al., Juli 2013] Begge typer hydraulisk model er relativt simple, for at opnå en beregningstid der gør det muligt at køre modellerne i realtid, dog har disse typer hydraulisk modeller nogle svagheder, som vil blive nærmere beskrevet i afsnit 3.1.

Hver af disse tre metoder til at opbygge et varslingsystem har deres fordele og ulemper, Emperisk baserede varslingsystemer og varslingsystemer baserede på præsimulerede scenarier kan give næsten øjeblikkelige resultater, hvorimod et varslingssystem baseret på realtidsimuleringer vil have beregningstid i størrelseordenen fra et minut til flere timer afhængig af typen af hydraulisk model,

størrelsen af modelområdet og computerkraften på computeren der udføre simuleringer. For at et varslingsystem kan virke, er det nødvendigt at beregningstiden, er kortere end tidhorisonten på regnprognosen og systemet responstid, ligeledes vil længere beregningstid reducere hvor lang tid de berørte borgere og myndigheder har til at reagere på en eventuel varsling.

En fordel realtidssimuleringer af en hydrauliske modeller har over empirisk baserede modeller, er at de nemmere, kan tage højde for andre faktorere, der kan påvirke, hvorledes en oversvømmelse vil indfinde. Udledes regnvandet fra et område direkte til et vandløb ved gravitation, kan vandstanden i vandløbet påvirke hvor meget vand, der kan udledes fra udløbet og dermed kapiciteten i områdets afløbsystem. I denne situation vil det være svært at opstille en emperisk relation udelukkende mellem regn og oversvømmelse. Ligeledes kan det give udfordringer for varslingsystemer baserede på præsimuleringer i det at de forskellige regnscenarier skal simuleres igennem for alle mulige scenarier for vandløbet, hvilket resultere i at kataloget af præsimulerede hændelser bliver flere faktore større. Et varslingssystem baseret på realtidssimuleringer kan derimod godt håndtere disse former for komplekse relationer, hvis der er data tilgengængelig i realtid til at beskrive randbetingelserne, som i tilfælde af vandløbet en vandføringsmåler opstrøms i vandløbet.

En anden fordel ved et varslingssystem baseret på realtidssimuleringer af en hydraulisk model er, at varslingssystemet er mere tilpasningsdygtigt end de to andre former for varslingssystemer. Sker der en ændring i området som f.eks seperatkloakering af et delområde eller lignede, vil en tidligere etableret empiriske relation muligvis ikke længere være gyldige, og det vil derfor være nødvendigt at opstille en ny relation mellem regndybde og oversvømmelse, hvilket kræver at der findes ny data til dette. Ligeledes vil det være nødvendigt for et varslingsystem baseret på præsimulerede scenarier, at lave et nyt katalog af scenarier hvis der sker ændringer i området, da systemets respons muligvis vil have ændret sig. Herimod vil det for et varslingssystem baseret på realtidssimuleringer være relativt simpelt at tage højde for ændringer i modelområdet. Ændringer kan implementeres i den hydrauliske model hvorefter at varslingssystemet vil fungere igen.

På baggrund af de fordele og ulemper der er blevet beskrevet, er det vurderet, at det vil være mest fordelagtigt at arbejde videre med at opbygge et varslingssystem baseret på realtidssimuleringer af en hydraulisk model for Kærby og Håndværkerkvarteret. Dette skyldes at det er vurderet, at det vil være muligt at have en rimelig beregningstid baseret projektområdet relativt lille fysisk størelse sammenlignet med tidligere beskrevede eksempler på varslingssystemer. Herudover er der i Aalborg Kommunes spildevandsplan for perioden 2016 til 2027 [Aalborg Kommune, 2015] planlagt etablering af 3 nye forsinkelsesbasiner før udløbene fra Kærby til Vestre Landgrøft, der ifølge planen senest skal etableres i 2021. Udover dette vil området i fremtiden også skulle seperatkloakeres, og der er som nævnt i kapitel 2 planlagt at genåbne Østerå i Aalborg Centrum. Der er derfor både i den nærmeste fremtid, og på længere sigt planer om væsentlige ændringer som vil have indflydelse på forholdet mellem regn og oversvømmelse i Kærby og Håndværkerkvarteret, hvilket gør et varslingssystem baseret på realtidssimuleringer af en hydrauliske model mere attraktivt.

3.1 Hydrauliske modeller til brug i varslingssystemer

Ligesom at der findes flere former for varslingssystemer, findes der flere forskellige former for hydrauliske modeller med forskellige kompleksitetsgrader og med forskellige styrker og svagheder.

I dette afsnit vil de forskellige typer af hydrauliske modeller, der kan anvendes til realtidssimuleringer i et varslingsystem mod regnbetingede oversvømmelser, blive introduceret som beskrevet i [Hénonin et al., Juli 2013] og deres styrker og svagheder vil blive diskuteret.

1D hydrodynamisk rørmodel

En et-dimensionel hydrodynamisk rørmodel beregner strømningerne i afløbssystemet ved brug af Saint-Venant ligningerne, og er tilgengænglig i kommericielle programmer som MIKE URBAN. Modellen kobles med en afstrømningsmodel for overfladen, og det er herudfra muligt at beregne hvor i afløbssystemet, der vil ske opstuvning til terræn. Modellen dækker dog kun over afløbssystemet, og kan derfor ikke beskrive hvordan, vandet bevæger sig på overfladen, når det er opstuvet til terræn, og kan derfor ikke bruges til at estimere af hvordan udbredelsen af oversvømmelsen vil være.

2D terræn model

Denne model består af en 2D model af overfladen, hvorfor regnen falder direkte på overfladen og afstrømmer efter terrænet hældningen. Denne model kan modellere vandets udbredelse på terrænet. Dog kan modellen ikke tage højde for, hvordan vandet strømmer i afløbssystemet hvorfor der skal kompenseres for dette ved brug af antagelser eller estimeringer.

1D-1D oversvømmelsesmodel

En 1D-1D oversvømmelsesmodel antager en dimensionelle strømninger i både afløbssystemet men også på overfladen med koblingspunkter som f.eks brønde hvor vand kan bevæge sig imellem afløbssystem og overflade. Denne metode kan med tilfredsstillende præcision modellere overfladestrømningerne, sålænge strømningen på overfladen kan anses som værende en kanaliseret strømning, hvilket det ofte vil være på veje. Denne metode til at beskrive overfladeafstrømninger er dog upræcis, hvis vandet forlader gaderne, og det dermed ikke kan antages, at strømningen er kanaliseret.

1D-2D oversvømmelsesmodel

En 1D-2D oversvømmelsesmodel kombinere en 1D-rørmodel med en 2D-terrænmodel. Dette tillader at bibeholde styrkerne ved en 1D-rørmodel, til at bestemme i hvilke brønde der sker opstuvning til terræn i, samtidig giver den mulighed for at beskrive hvordan vandet bevæger sig på terræn. Modellen virker ved, at hvis en regnhændelse medfører opstuvning til terræn i brøndene, vil vandet komme op på terræn, hvor det vil følge hældingen på terrænet, og enten strømme ned i en anden brønd eller ende i en lavning. Modellen kan dermed præcist beskrive hvor oversvømmelserne opstår i afløbssystemet og udbredelsen af dem, dog afhænger præcisionen af opløsningen på det anvendt højdekort og på kalibreringen af modellen.

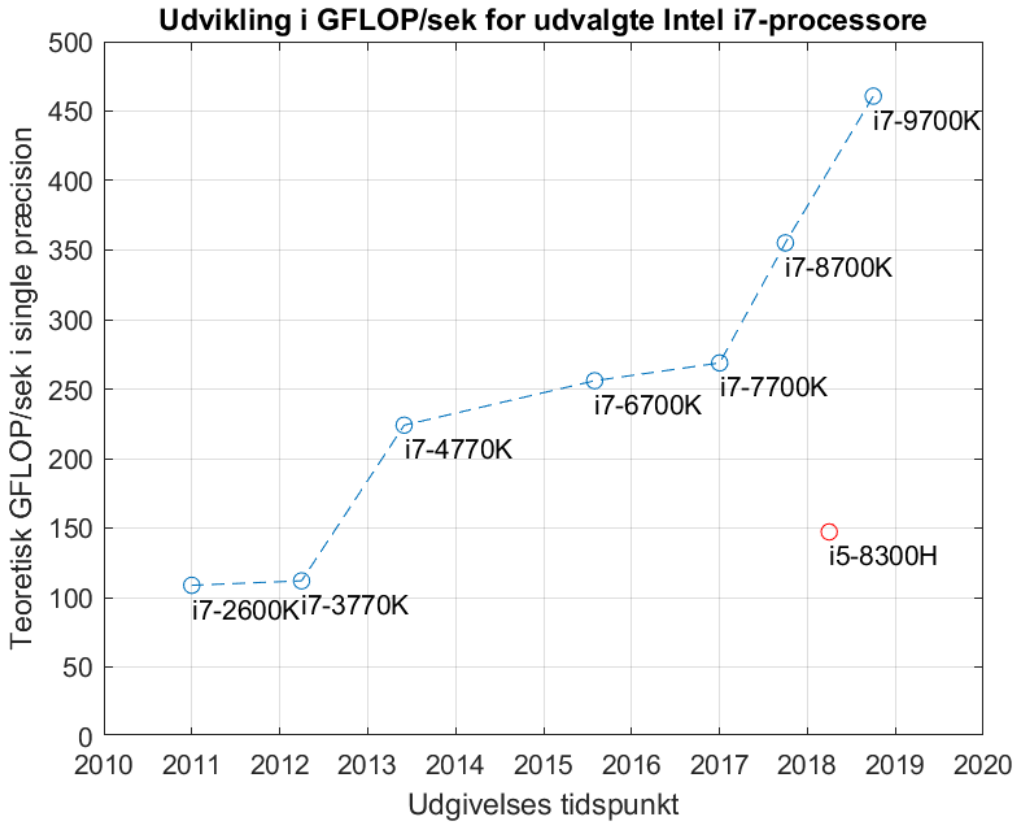
3.1.1 Valg af hydraulisk model til varslingssystem

Med de forskellige typer hydrauliske modeller beskrevet kan der nu vælges hvilen af disse modeller der arbejdes videre med, i tabel 3.1 kan en sammenligning af de forskellige hydrauliske modeller ses.

Tabel 3.1: Opsummering af forskellige typer hydrauliske modellers egenskaber.

	Beregningstid	Opstuvet node	Udbredelse af oversvømmelse
1D-rørmodel	Lav	Ja	Nej
2D terræn model	Middel til høj	Nej	Ja
1D-1D oversvømmelsesmodel	Middel	Ja	Kun på veje
1D-2D oversvømmelsesmodel	Høj	Ja	Ja

Ud fra tabel 3.1 kan det ses, at 1D-2D oversvømmelsesmodellen er den eneste af de listede hydrauliske modeller, der kan modellere, hvordan vandet bevæger sig i afløbssystemet og sammentidig bestemme hvordan vandet ville udbrede sig på terræn. 1D-2D oversvømmelsesmodeller har generelt ikke været brugt som realtidsmodel i et varslingssystem, i det at beregningstiden ofte har været set som en begrænsende faktor, selvom at projekter har vist potentialet for brugen af 1D-2D oversvømmelsesmodeller til brug i varslingssystemer [Brødbæk et al., 2015]. De eksisterende varslingssystemer tidligere beskrevet er lavet til at dække områder langt større end projektområdet i dette projekt. Denne formindskelse af hvor stort et område en eventuel realtidsmodel skal dække, vil medføre at den nødvendige computerkraft, for at modellen kan simulere med et tilfredsstillende beregningstid, vil blive reduceret. En anden faktor er den teknologiske udvikling inden for mikroprocessere, som har resulteret i en udvikling i computerkraft [Rupp, 2016]. Et eksempel på dette kan ses på figur 3.1 hvor processere fra i7-serien fra Intel's beregningskraft målt i FLOPS (floating point operations per second) er vist.



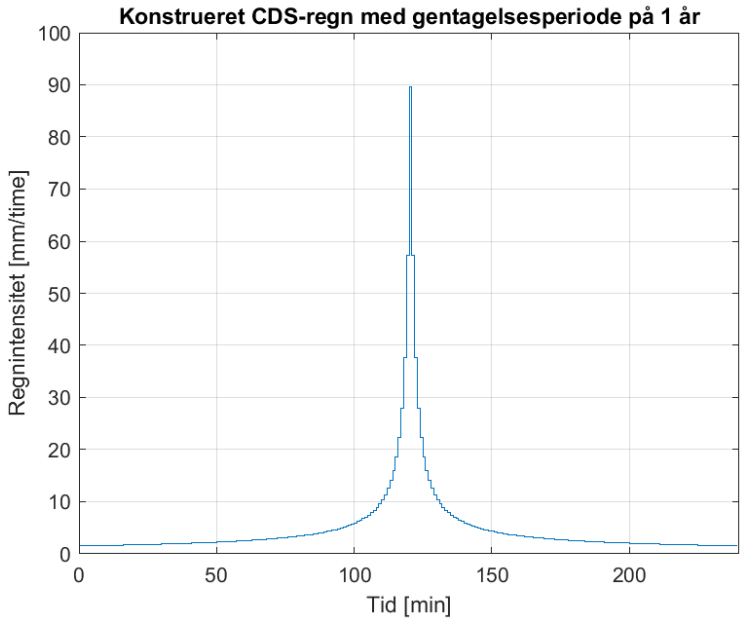
Figur 3.1: Udvikling i beregningskraft for processore i Intels i7-serie, værdier for processerne indhentet fra [Intel]. Processeren for den bærbare computer hvorpå fremtidige undersøgelser foretages er også vist.

Det fremgår af figur 3.1 at der i perioden fra 2011 til 2018 er sket en kraftig udvikling i tilgængligheden af beregningskraft. i7-2600K processeren udgivet i 2011 har en teoretisk beregningskraft på 108,8 GFLOP/sek, i7-9700K processeren udgivet i 2018 har en teoretisk beregningskraft på 460,8 GFLOP/sek, hvilket er en forøgelse i beregningskraft på 424 % over en periode på 8 år. Det er dog vigtigt at pointere at disse værdier er en teoretisk værdi for den maksimalt mulige beregningshastighed der kan opnås, og at der i praksis kan være andre komponenter i computeren eller andre faktorere der begrænser beregningshastigheden, men grafen viser stadig tydeligt at det i dag er et større potentialle for at køre beregningstunge modeller som en 1D-2D oversvømmelsesmodel i realtid.

Det vil derfor blive undersøgt, om det på baggrund af den teknologiske udvikling af microprocessere og en nedskallering af modelområdet fra by-skala til bydels-skala er muligt at køre en 1D-2D oversvømmelsesmodel i realtid for Kærby og Håndværkerkvarteret og dermed anvende modellen som beregningskerne i et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser.

3.2 Analyse af forskellige gridstørrelser i 1D-2D oversvømmelsesmodel

En faktor der har en stor indflydelse på beregningstiden af en 1D-2D oversvømmelsesmodel, er gridstørrelsen på overflademodellen. Overflademodeller med en mindre gridstørrelse giver generelt mere præcise resultater, men forøger også beregningstiden, det er derfor valgt at bruge fire forskellige gridstørrelser for overflademodellen på henholdsvis 2,5, 5, 7,5 og 10 meter. Undersøgelsen er foretaget ved at simulere en CDS-regn med en gentagelsesperiode på et år og en varighed på fire timer konstueret ud fra målinger fra SVK-station 5052 (Aalborg Østerport Pumpestation), lavet med regnearket til SVK skrift 30. [IDA, 2016] Den konstruerede regnhændelse kan ses på figur 3.2.



Figur 3.2: CDS-regn anvendt som input til undersøgelse af gridstørrelse af oversvømmelsesmodels betydning for beregningstid.

Simuleringerne er foretaget på en MSI GV62 8RD-028NE bærbar computer, hvis specifikationer kan ses i tabel 3.2. På figur 3.1 kan den teoretiske beregningskraft af computerens processer ses, det fremgår heraf at processerens teoretiske beregningskraft er to til tre gange lavere end i7-processerne, der er udgivet omkring samme tid.

Tabel 3.2: Specifikationer for bærbar computer anvendt til analyse af beregningstid for forskellige gridstørrelser.

	Specifikationer
Processer	Intel i5-8300H, 4 kerner med en hastighed på 2,30 GHz
Hukommelse	8 GB DDR4 RAM
Grafikkort	Nvidia GeForce GTX 1050 Ti

Som parameter for hvor hurtigt modellen kører, er simuleringens relative beregningstid udregnet, hvilket er et udtryk for hvor hurtigt et minut i modellen simuleres i realtid.

$$t_r = \frac{t_f}{t_s} \tag{3.1}$$

Hvor:

t_r	Relativ beregningstid	[-]
t_f	Fysisk tid anvendt på simulering	[min]
t_s	Simuleret tidsperiode	[min]

I tabel 3.3 ses resultaterne for den relative beregningstid for de forskelige gridstørelser, Herudover er oversvømmelsesudbredelse og oversvømmelsesvolumen for hver af de fire gridstørrelser fundet, for at undersøge hvilken indflydelse, det har på præcisionen af modellen at ændre gridstørrelsen på modellen.

Tabel 3.3: Resultater af analyse af gridstørelse på overflademodel.

		2,5m grid	**5m grid**	**7,5m grid**	**10m grid**
Oversvømmelsesudbredelse	[ha]	4,5	4,6	4,9	5,6
Oversvømmelsesvolumen	[m^3]	3856	4021	4240	4944
Beregningstid	[min]	60	15	6	4
Relativ beregningstid	[-]	0,25	0,06	0,03	0,02

Som det kan ses af tabel 3.3, er der relativ stor enighed om oversvømmelsesudbredelsen og oversvømmelsesvolumenet i mellem de forskellige gridstørrelser grid hvor oversvømmelsesudbredelsen og oversvømmelsesvolumenet for 10 meter griddet dog afviger en smule fra de andre gridstørrelser. Det kan også ses at alle gridstørrelserne har en relativ beregningstid på langt under en, hvilket betyder at de i princippet alle kan bruges til en realtidsmodel, i det at beregningstiden for et minut i modellen er mindre end et fysisk minut, selv når der tages højde for andre tidskrævende processer i varslingsystemet, som f.eks indhentning af radardata, beregning af overfladeafstrømning og andre processer. Dette betyder ikke nødvendigvis, at en gridstørrelse på 2,5 meter er optimal, da en korte beregningstid for modellen medføre at en varsling vil komme ud før, hvilket giver berørte borgere og myndigheder bedre tid til at reagere. Af denne grund er det valgt at arbejde videre med en gridstørrelse på overflademodellen på 5 meter, da

det er vurderet at denne gridstørrelse, giver den bedste kombination af præcision på oversvømmelsesudbredelsen og beregningstid.

Det kan ud fra denne undersøgelse konkluderes, at beregningstiden ikke vil være en begrænsende faktor for at anvende realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel til et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser i Kærby og Håndværkerkvarteret. Dette viser at det er muligt at anvende realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel som beregningskerne i et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser.

3.3 Opsummering

Der er i dette kapitel blevet præsenteret forskellige metoder til at lave et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser. Det er valgt at arbejde med et varslingssystem baseret på realtidssimuleringer af en hydraulisk model. Ligeledes er flere forskellige typer hydrauliske modeller blevet præsenteret og deres styrker og svagheder i forhold til at bruges som en realtidsmodel i et varslingssystem diskuteret. Det er på baggrund udviklingen i beregningskraften af mikroprocessorer og projektområdets lille areal, relativt til de eksempler der er præsenteret i kapitelet, valgt at undersøge om det vil være muligt at opstille et varslingssystem baseret på realtidsimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel. Til dette formål er der lavet en indledende undersøgelse af hvor fint en opløsning på overflademodellen, det vil være mulig at foretage 1D-2D simuleringer i realtid med. Her blev det fundet at den relative beregningstid for alle de undersøgt opløsninger vil være under en, hvorfor det vil være muligt at køre modellen i realtid med disse gridstørrelser.

4. Problemformulering

Der er igennem den indledende del af denne rapport argumenteret for, at et varslingssystem vil kunne være med til at reducere konsekvenserne af regnbetingede oversvømmelser, som vil forkomme hyppigere i fremtiden på grund af forøget urbanisering og klimaforandringer. Der vil derfor blive forsøgt at udvikle et varslingssystem til bydelene Kærby og Håndværkerkvarteret, som allerede i dag har problemer med hyppige oversvømmelser. Der er ligeledes lavet en initial undersøgelse, som viser at der er potentiale for at forøge kompleksiteten af de hydrauliske modeller, der i dag anvendes til realtidsimuleringer i varslingssystmer ved at anvende en 1D-2D oversvømmelsesmodel. På baggrund af dette er følgende problemformulering opstillet:

"Hvilke muligheder er der i at anvende realtidssimuleringer af 1D-2D oversvømmelsesmodeller til at opbygge et varslingssystem mod regnbetingedde oversvømmelser for enkelte bydele så som Håndværkerkvarteret og Kærby"

II Modelopbygning

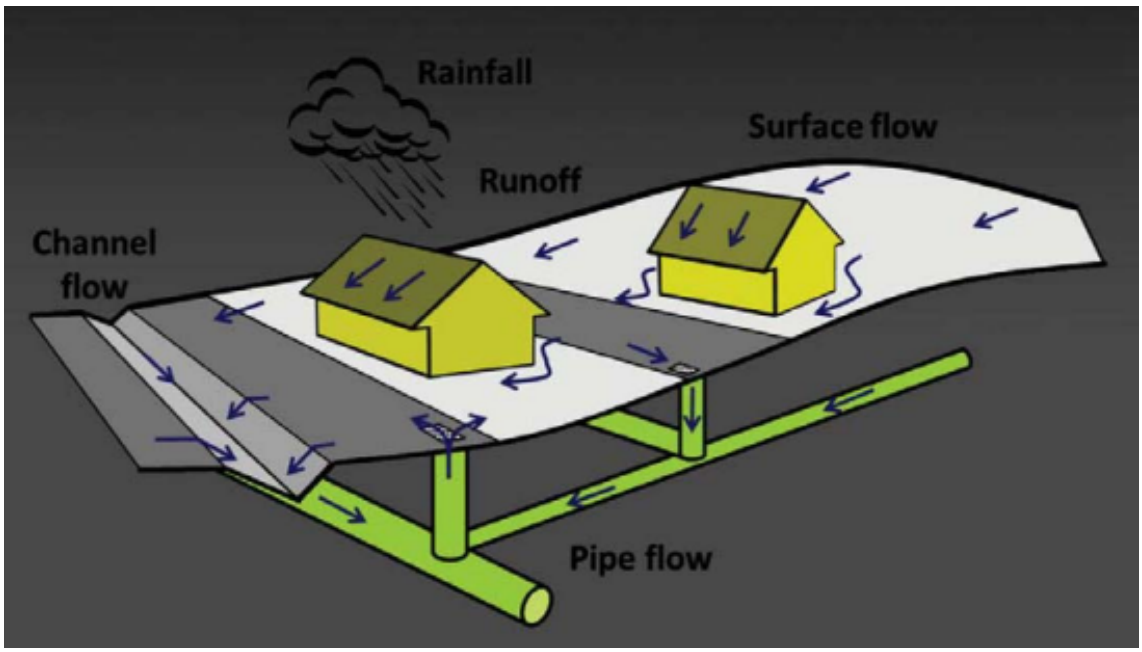
5 1D-2D oversvømmelsesmodel 21

6 Regn-input til realtidsmodel 29

7 Automation af modeldrift 45

5. 1D-2D oversvømmelsesmodel

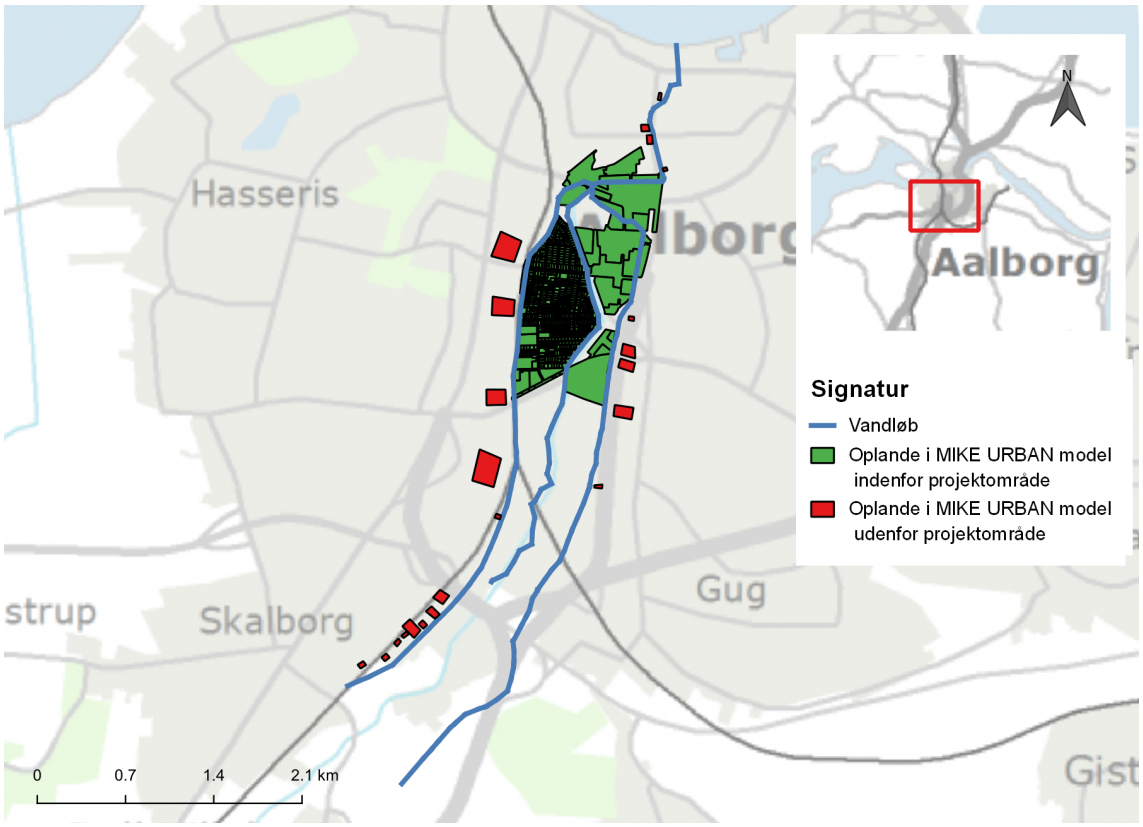
Som beskrevet i afsnit 3.1 er det valgt at bruge en 1D-2D oversvømmelsesmodel til varlslingssystemet. Der er til dette formål blevet udleveret en kalibreret og valideret MIKE FLOOD model af projektområdet af Aalborg Forsyning. MIKE FLOOD er en dynamisk kombination af en MIKE URBAN og en MIKE 21 model, hvor MIKE URBAN håndtere overfladeafstrømning og det et-dimenstionelle flow i afløbssystemet, imens håndtere MIKE 21 de to-dimensionelle strømninger på overfladen. MIKE URBAN anvender Tid-Areal-metoden til at udregne overfladeafstrømningen til afløbløbssystemet. Denne overfladeafstrømning anvendes i en hydrodynamisk rørmodel hvor afløbssystemets respons på overfladeafstrømningen kan modelleres. Hvis kapaciteten af rørsystemet i MIKE URBAN er opbrugt, vil vandet opstuve fra nodes i MIKE URBAN, og op på terræn hvor flowet vil blive beskrevet ved brug af MIKE 21. Vandet kan også bevæge sig fra MIKE 21 modellen og tilbage i MIKE URBAN modellen, hvilket betyder at vand kan opstuve fra en Brønd i modellen, følge terrænets hældning og herefter strømme ned i en anden brønd. På figur 5.1 ses en skitse af hvordan 1D-2D oversvømmelsesmodelen fungere.



Figur 5.1: Principskitse af en 1D-2D oversvømmelsesmodel. [Dansk Hydraulisk Institut]

Den udleverede MIKE URBAN model af projektområdet består af 844 deloplande, hvilket dækker over et areal på 130 hektar, hvoraf 80 hektar er befæstet, og derfor bidrager til afstrømningen til afløbssystemet. Herudover er der i modellen 599 noder og 635 rørledninger. Noderne og rørledningerne anvendes til strømninger i både afløbssystem og vandløb, vandløbene er koblet til modellen i det, at der som beskrevet i afsnit 2.2 bliver udledt regnvand ved gravitation fra projektområdet til vandløbene, hvorfor det muligvis er nødvendigt at kunne modellere vandstanden

i vandløbene for at kunne tage højde for tilbagestuvning i afløbssystemet. På figur 5.2 ses en oversigt af modellens opbygning.



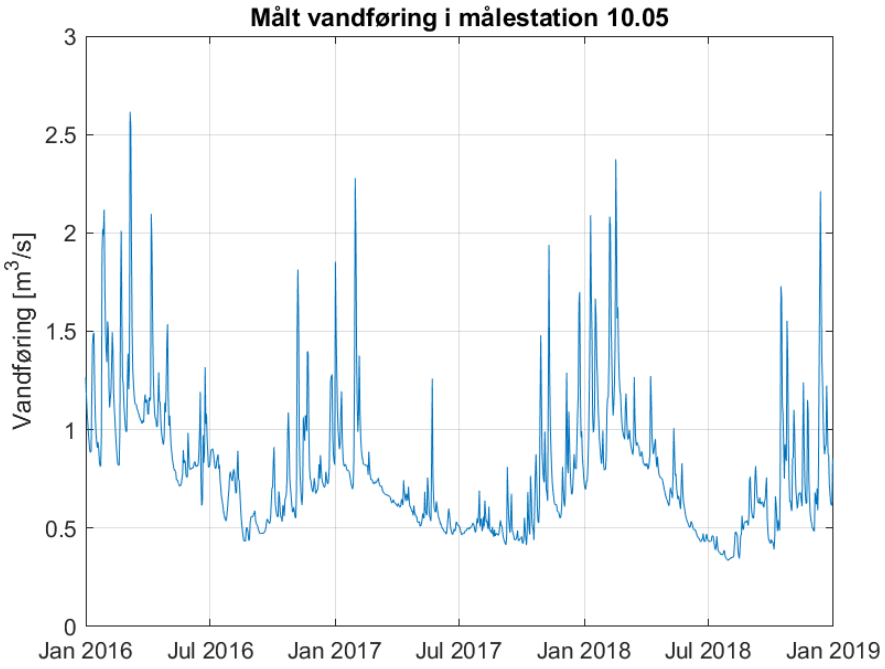
Figur 5.2: Oversigt over oplande i MIKE URBAN-model.

For at få en realistisk repræsentation af vandstanden i vandløbene er der som vist på figur 5.2, tilknyttet 26 deloplande til modellen der også bidrager til vandløbene. Deloplandene har til sammen et befæstet areal på 650 hektar svarende til over 7 gange det samlede befæstede areal af Kærby og Håndværkerkvarteret tilsammen, hvilket også gør at disse deloplande bidrager med betydenlige mængder vand til vandløbene i modellen. Dog er disse delopland opbyggede som linæere reservoire i modellen, hvilket betyder at vandet fra disse oplande vil afstrømme direkte til et bassin, fra disse bassiner er der to udløb, et i bunden af bassinet hvorfra vandet løber ud af modellen. Er der ikke nok kapacitet i dette udløb, vil vandstanden i bassinet stige. Overstiger vandstanden en fastsat kote, vil vandet over denne kote begynde at strømme fra basinnet til Østerå, Vestre Landgrøft eller Østre Landgrøft.

5.1 Vandføring i Vandløb

Da vandstanden i Østerå har indflydelse især på afløbssystemet i Håndværkerkvarteret, er det nødvendigt at tage højde for dette. For at kunne modellere vandstanden i Østerå er det nødvendigt med randbetingelser for Østerå og dens forgreninger. For Vestre Landgrøft og Østre Landgrøft er der anvendt et konstant baseflow på henholdsvis 0,055 m^3/s og 0,015 m^3/s, imens at der er anvendt en varierende vandføring for Østerå. Vandføringsdataen i randbetingelsen kan ses på figur 5.3, af

figuren fremgår det at døgnmiddelvandføringen i perioden 2016 til 2018 variede fra 0,34 m^3/s til 2,62 m^3/s.

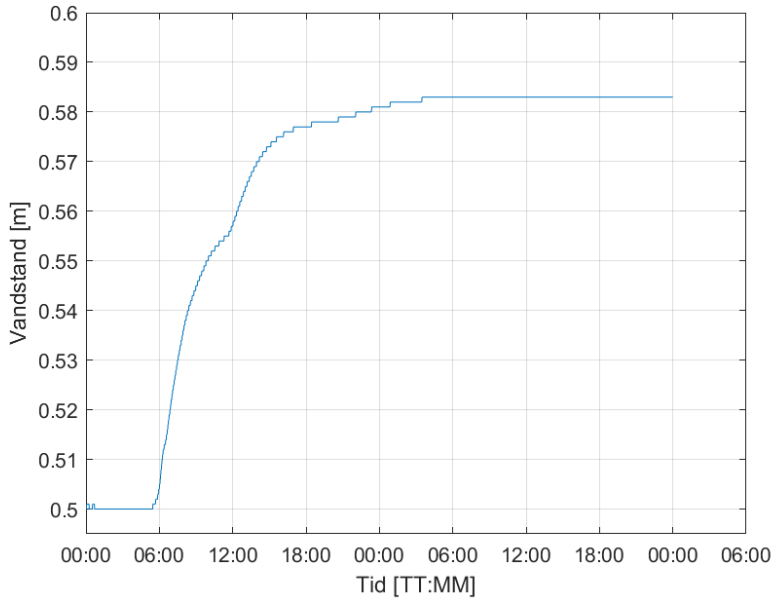


Figur 5.3: Målt vandføring i Østerå i perioden 2016-2018.

Placeringen af Miljøstyrelsens målestation 10.05 hvorfra vandføringsmålingerne er taget, kan ses på figur 5.4.

Figur 5.4: Placering af målestation anvendt til vandføringsrand i Østerå.

For at kunne modellere tilbagestuvningen i afløbssystemet, er det ligeledes nødvendigt med en begyndelsesbetingelse for vandstanden i vandløbene, således at vandløbene er fyldt ved simuleringsstart. Uden en begyndelsesbetingelse vil vandløbene være tomme i starten af simuleringen, dette betyder, at vandløbene uden en begyndelsesbetingelse ikke vil stabilisere sig under korte regnhændelser, og at der derfor ikke ville kunne blive taget højde for tilbagestuvning i afløbssystemet. På figur 5.5 ses det hvordan vandstanden udvikler sig som funktion af tid i en simulering uden regn.



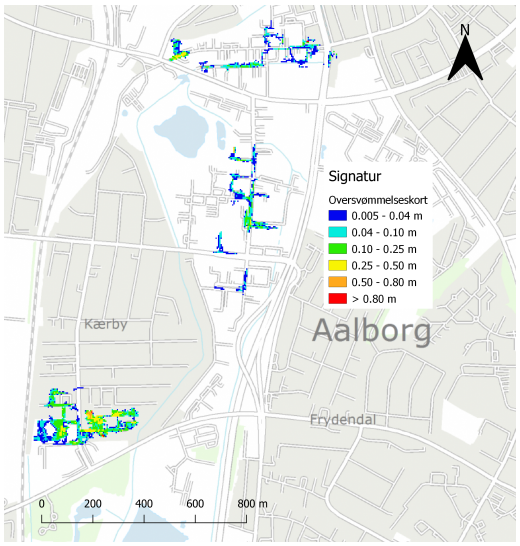
Figur 5.5: Tidserie for vandstand i node i den nordlige del af Østerå, under en simulering uden regn og en vandføring i Østerå på 0,3 m^3/s.

Som det kan ses af figur 5.5, vil det tage omkring 27 timer før vandløbene opnår en konstant vandstand. Tages der ikke i højde for dette i modellen med en begyndelsesbetingelse for vandstanden i vandløbene, vil en potentiel tilbagestuvning fra vandløbet til afløbssystemet ikke kunne simuleres korrekt, hvilket potentielt kan have indflydelse på, om en given regnhændelse vil give anledning til oversvømmelse, og hvor stor denne oversvømmelse vil være.

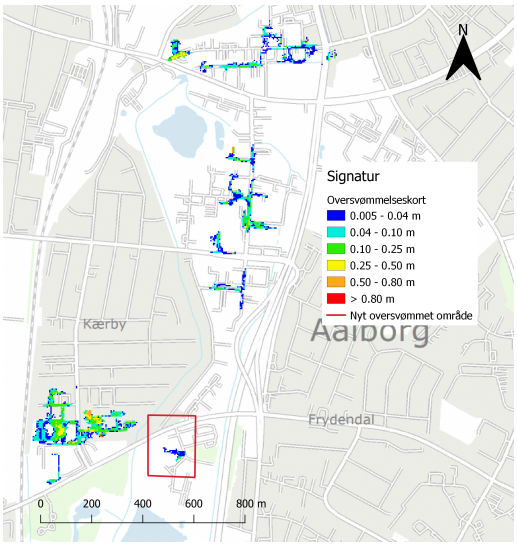
5.2 Østerås påvirkning på afløbssystemet

I det at der fra Håndværkerkvarteret bliver udledt regnvand direkte til Østerå og Østre Landgrøft ved gravitation og uden forsinkelse, kan vandstanden og dermed vandføringen i Østerå og Østre Landgrøft have stor betydning for kapaciteten i afløbssystemet i Håndværkerkvarteret, i det at en høj vandstand i vandløbene vil kunne give anledning til tilbagestuvning i afløbssystemet og dermed reduceret kapacitet. For at eksemplificere konsekvenserne af denne tilbagestuvning, er en CDS-regn med en gentagelsesperiode på 1 år og en varighed på 4 timer konstrueret ud fra målinger fra SVK-station 5052 (Aalborg Østerport Pumpestation) lavet med regnearket til SVK skrift 30. [IDA, 2016] Den konstruerede regnhændelse kan ses på figur 3.2. Regnhændelsen er simuleret med to forskellige randbetingelser for vandføringen i Østerå, i den første simulering er randbetingelsen

sat til 0,5 m^3/s svarende til en normal sommerdag, i den anden simulering er der anvendt en vandføring på 1,8 m^3/s, hvilket er en vandføring der har indfundet sig som døgnmiddelvandføring for Østerå 13 gange i perioden 2016 til 2018 vist på figur 5.3, hvilket giver denne vandføring i Østerå en gentagelsesperiode på omkring 3 måneder. På figur 5.6 og 5.7 ses oversvømmelseskort for de to scenarier mens oversvømmelsesudbredelse og oversvømmelsesvolumen fremgår af tabel 5.1.



Figur 5.6: Simulering af CDS-regn med gentagelsesperiode på 1 år og vandføring i Østerå på 0,5 m^3/s.



Figur 5.7: Simulering af CDS-regn med gentagelsesperiode på 1 år og vandføring i Østerå på 1,8 m^3/s.

Tabel 5.1: Resultater af analyse af gridstørelse på overflademodel.

		Vandføring på 0,5 m^3/s	Vandføring på 1,8 m^3/s
Oversvømmelsesudbredelse	[ha]	4,6	6,3
Oversvømmelsesvolumen	[m^3]	4021	4898

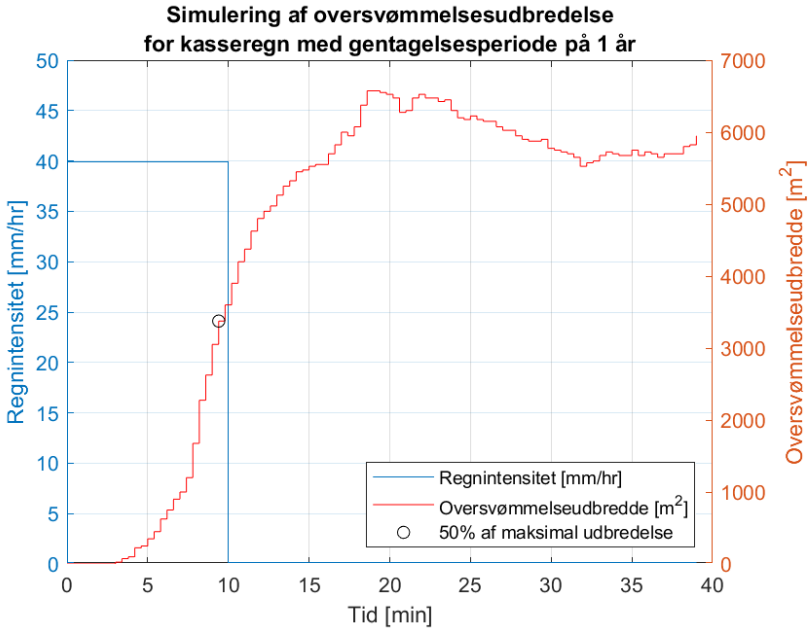
I tabel 5.1 kan det ses, at en forøgelse i vandføringen vil føre til en forøgelse i især oversvømmelsesudbredelse men også oversvømmelsesvolumen. Denne forøgelse kan især ses i den sydlige del af Håndværkerkvarteret, hvor der med en lav vandføring ikke vil forekomme vand på terræn ved den simulerede regnhændelse, hvorimod der ved en høj vandføring vil ske oversvømmelser i den sydlige del af Håndværkerkvarteret markeret med rødt på figur 5.7. Det kan derfor ud fra denne undersøgelse konkluderes, at vandstanden og vandføringen i Østerå kan have en betydelig indflydelse på regnbetingede oversvømmelser især i Håndværkerkvarteret. Det er derfor nødvendigt at medtage vandløbene i oversvømmelsesmodelleringerne, og det vil være essentielt for præcise realtidsmodelleringer, at der haves præcise målinger af vandføringen i Østerå i realtid der kan bruges som randbetingelse i modellen.

I det at vandføringen i Østerå variere, vil det være nødvendigt med flere begyndelsesbetingelser for at starte med en retvisende vandstand i modellen. Det er valgt at lave begyndelsesbetingelser for vandføringer mellem 0,30 m^3/s og 2,70 m^3/s med et interval på 0,10 m^3/s. Dette er vurderet at give en god begyndelsesbetingelse for vandløbene i modellen for alle realistiske vandføringer i Østerå.

5.3 Responstid for model

En vigtig parameter når en 1D-2D oversvømmelsesmodel køres i realtid er hvor lang tid det tager, fra regnen falder på oplandene, til at der vil indfinde sig vand på terræn, dette tidsinterval imellem regnen starter med at falde til at der forekommer vand på terræn, vil i denne rapport blive kaldt for modellens responstid. Modellens responstid er af betydning, da den vil have indflydelse på, hvor lang tid inden at vandet vil opstuve til terræn, det vil være muligt at udsende en advarsel. Er modellens responstid i størrelseordenen af en til flere timer, vil det være muligt at anvende regndata målt i realtid som input til modellen. Er modellens responstid derimod kun et par minutter, vil der være nødvendigt at anvende en regnprognose som regninput, hvilket vil tiføje et lag af usikkerheder til resultaterne af realtidsmodellen. Det er vigtigt at pointere, at modellens responstid vil afhænge af regnhændelsen, og at højere regnintensiteter vil resultere i en kortere responstid, hvorfor det ikke vil være muligt at give en eksakt værdi for modellens responstid.

For at give et eksempel på modellens responstid er en kasseregn med 10 minutters varighed og en regnintensitet svarende til en regn med en gentagelsesperiode på et år simuleret, hvor det undersøges hvor lang tid det vil tage inden 50 % af den maksimale oversvømmelsesudbredelse opnås hvilket anvendes som mål for modellens responstid. Den konstruerede regn og den resulterede oversvømmelsesudbredelse kan ses på figur 5.8.



Figur 5.8: Simulering af kasseregn med gentagelsesperiode på et år.

I simuleringen vist på figur 5.8 er det fundet, at halvdelen af den maksimale oversvømmelsesudbreddelse vil indfinde sig lidt over 9 minutter efter starten af kasseregnen, hvilket tydeligt viser at der for modellen over Kærby og Håndværkerkvarteret, er en meget kort responstid, fra regnen falder, til at der vil komme vand på terræn, hvilket er typisk for urbane områder som Kærby og Håndværkerkvarteret. Det kan derfor ud fra denne undersøgelse konkluderes, at det vil være nødvendigt at anvende regnprognoser som regninput til realtidsmodellen, for at kunne opnå varslinger med en lang nok tidshorisont, til at kunne reagere på varslingen.

5.4 Opsummering

I dette kapitel er MIKE FLOOD-modellen der tiltænkes som beregningskerne i varslingssystemet præsenteret. Østerå og dens forgreninger Vestre Landgrøft og Østre landgrøfts betyding for kapaciteten af afløbssystemet i Kærby og Håndværkerkvarteret, hvor det blev fundet at vandføringen i Østerå har en betydenlig effekt på oversvømmelsesudbredelsen som vil resultere ved simulering af en CDS-regn med en gentagelsesperiode på et år, hvorfor det vil være nødvendigt at inkludere vandløbene i modellen og have realtidsmålinger af vandføringen i Østerå, for at kunne modellere oversvømmelsesudbreddelsen i Kærby og Håndværkerkvarteret. Herudover blev der argumenteret for nødvendigheden af at have begyndelsesbetingelser for vandstanden i vandløbene, således at disse ikke er tomme i starten i en simulering, da det kan tage opimod 27 timer inden at der opnås en stabil vandstand i Østerå.

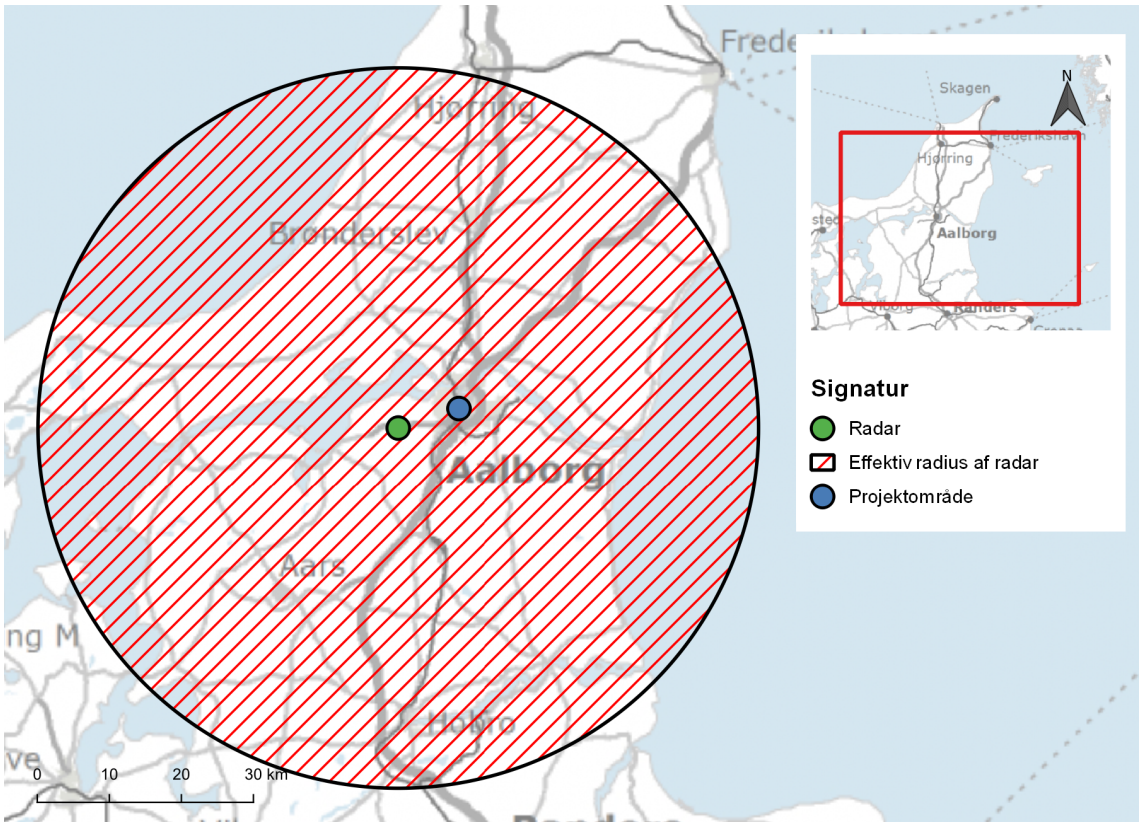
Til sidst er det undersøgt hvor lang tid, det i modellen vil tage fra en regnhændelse starter til at der vil være vand på terræn, her blev det fundet at der vil gå 9 minutter fra starten af en kasseregn med en varighed på 10 minutter og en gentagelsesperiode på et år til at halvdelen af den totale oversvømmelsesudbredelse vil være indtruffet, hvilket er normalt for urbane områder. Ud fra dette er det konkluderet, at det vil være nødvendigt at anvende prognosticeret regn for at opnå en varsling med en acceptabel tidshorrisont.

6. Regn-input til realtidsmodel

I kapitel 5 blev det vist at tidsintervallet fra regnen falder, til at der vil være vand på terræn vil være så kort at det vil være nødvendigt at anvende regnprognoser som input til realtidsmodellen for at opnå en acceptabel lead time på varslingen. Der vil derfor i dette kapitel blive undersøgt, hvorvidt det er muligt at anvende regndata målt med radar, der er ekstrapoleret frem i tid som regn-input til realtidsmodellen.

6.1 Radar

Der vil i dette projekt blive anvendt regndata målt med radar, radardataen er målt med en FURUNO WR-2100 X-band radar placeret i Store Restrup sydvest fra Aalborg. Radaren har en spatial opløsning på 100 meter, en tidslig opløsning på et minut, og en effektiv radius på 50 kilometer, hvor den kan tage brugbare målinger [FURUNO, 2020]. Fra denne radar haves målinger fra 1. Januar 2016 til 16. Juni 2018. På figur 6.1 ses radarens placering i forhold til projektområdet.



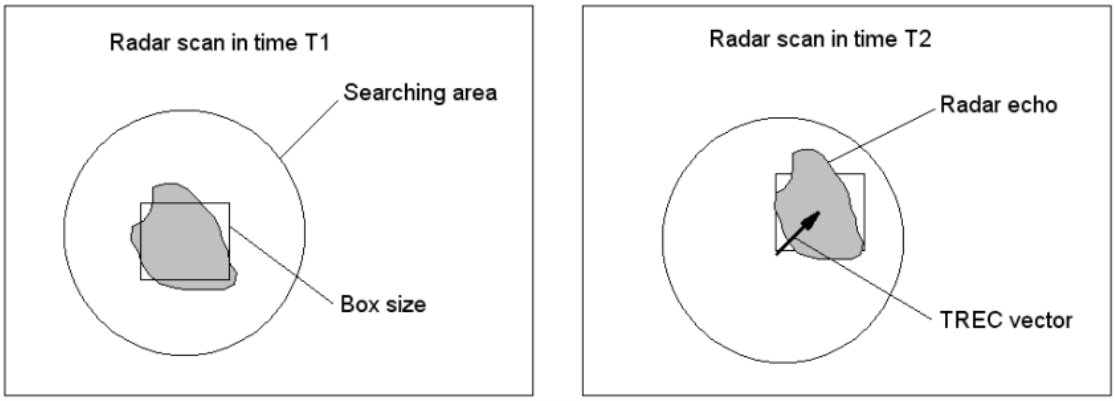
Figur 6.1: FURUNO WR-2100 X-band radar placeret i Store Restrups effektive radius.

Som det kan ses af figur 6.1, ligger projektområdet inden for radarens effektive radius hvorfor

målingerne herfra må antages at være gyldige for projektområdet.

6.1.1 Radar Nowcast

Nowcasting af radardata er en metode, til at ekstrapolere hvordan regnbyger målt af radaren vil bevæge sig op til to timer frem i tiden, nowcasting kan derfor anvendes, til at estimere nedbøren der vil falde over Kærby og Håndværkerkvarteret i den nærmeste fremtid. Princippet bag radar nowcast er, at bruge to fortløbende radarbilleder til at finde et vektorfelt for hvordan den målte regnbyge har bevæget sig, og herefter ekstrapolere dette bevægelsesfelt frem i tid, for at estimere hvordan regnbygen vil bevæge sig. Vektorfeltet findes ved at inddele regnbygen i kasser og ved brug af krydskorrelation finde ud af hvordan kassen har bevæget sig fra det første tidskridt til det næste, ved at se hvor kassen fra det første tidskridt har den højest mulige korrelation i det næste tidskridt. [Li et al., 2005] På figur 6.2 er princippet bag nowcasting illustreret.



Figur 6.2: Nowcasting af radardata. [Thorndahl, 2019]

En af ulemperne ved nowcasting er, at metoden kun ser på hvordan regnbygerne bevæger sig, og ikke kan tage højde for vækst eller henfald i regnintensitet. Dette gør at den nowcastede regndata kan have problemer med at give en god prognose for konvektive regnhændelser som f.eks tordenbyger der ofte har stor vækst eller henfald i regnintensitet. En anden begrænsning ved nowcasting af radarbilleder er at radaren bliver nød til at måle regnen, før at den kan ekstrapolere den til en regnprognose, hvilket muligvis kan sætte en begrænsning for hvor stor en lead time det er muligt at opnå på prognosen. For at undersøge hvor langt ud i fremtiden det principielt vil være muligt at ekstrapolere regnen frem i tiden for Kærby og Håndværkerkvarteret, er der lavet en undersøgelse af 1644 nowcasts dækkende over 19 forskellige dage, her er den maksimale hastighedsvektor for hvert nowcast fundet. Medianen og 95-% fraktilen af den maksimale hastighedsvektor kan ses i tabel 6.1.

Tabel 6.1: Maksimale hastighedsvektorere fundet for nowcasts.

		Median	95-% fraktil
Hastighed	[m/s]	6,66	18,72

Antages det at en regnbyge vil bevæge sig imod projektområdet, fra den værst mulige retning hvor afstanden mellem projektområdet til kanten af den effektive radius er 41,2 kilometer, vil det med

en hastighed svarende til 95-% fraktilen være muligt at opnå en lead time på 38 minutter, hvilket er en relativ lav lead time. Et sådan et scenarie hvor en regnbyge kommer fra den værst mulige vinkel og med høj hastigved, vil dog være yderst sjælden, kommer regnbygen i stedet med en hastighed svarende til medianen, vil der gå 103 minutter, inden regnbygen er over projektområdet, hvilket vil give mulighed for at opnå en god lead time på nowcastet. Det er derfor vurderet at det kun i sjældne tilfælde, vil ske, at det vil være regnbygens hastighed/radarens effektive radius, der sætter en begrænsning for lead timen på nowcastet.

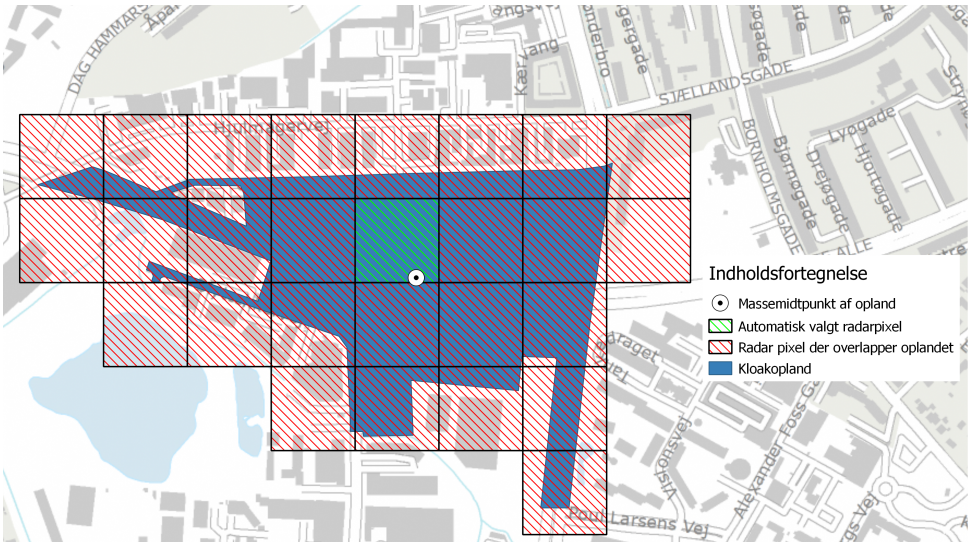
Der er til projektet udleveret fem nowcastede regnhændelser, hvor det er vurderet, at der er faldet nok regn, til at det muligvis vil give anledning til vand på terræn i Kærby og Håndværkerkvarteret, Der er i disse hændelser nowcastet 1 time frem i tiden med en opdateringsrate på mellem 5 og 10 minutter. En oversigt over hændelserne kan ses i tabel 6.2.

Tabel 6.2: Oversigt over regnhændelser hvor der haves nowcastet radardata, al nedbør i millimeter.

Hændelse nr.	Starttidspunkt	Sluttidspunkt	Minimum nedbør	Median	Maks
1	05-11-2016 01:00	05-11-2016 21:00	11,2	21,3	38,0
2	15-06-2017 20:00	16-06-2017 03:00	3,0	8,2	13
3	15-08-2017 11:00	15-08-2017 22:00	14,4	17,7	23,3
4	18-08-2017 09:00	18-08-2017 22:00	10,1	11,5	16,6
5	06-09-2017 13:00	06-09-2017 23:00	30,8	34,0	38,1

6.2 Arealvægtning af radardata

Som tidligere beskrevet har radaren anvendt i projektet en spatial opløsning på 100 meter, hvilket betyder at hver radarpixel dækker over et areal på en hektar. I MIKE URBAN-modellen har oplandene et areal på op til 11,3 hektar, dette betyder at nogle oplande i modellen, vil være dækket af mere end en radarpixel. I tilfælde hvor et opland er dækket af mere end en radarpixel, vil modellen automatisk vælge radarpixelen tættest på oplandets tyngdepunkt som input til dette opland. På figur 6.3 ses princippet for et opland i den nordlige del af Håndværkerkvarteret.



Figur 6.3: Princip for automatisk udvælgelse af radarpixels som randbetingelse til opland.

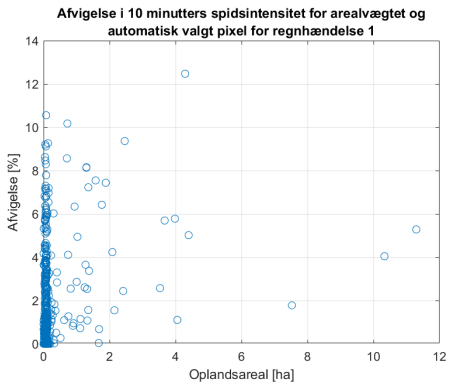
Som det kan ses på figur 6.3, er det viste opland dækket af 27 radarpixels, heraf vil modellen dog kun anvende regndataen fra radarpixelen tættest på oplandets tyngdepunktl, der markeret med grønt på figur 6.3, til at beregne afstrømningen af regnvand fra oplandet til afløbssystemet. Dette vil give anledning til en usikkerhed i modellen, hvis der er stor variation i regnintensiteterne i de forskellige radarpixels over oplandet. Det er derfor valgt at undersøge, hvor stor en fejl det vil give anledning at bruge den automatisk udvalgt radarpixel til at udregne afstrømningen. For at kunne undersøge hvor stor fejlen ved dette er, udregnes et vægtet gennemsnit af regnintensiteten i radarpixelsne der overlapper med oplandet, med arealet af overlappet mellem den individuelle pixel og oplandet som vægtningsfaktor som beskrevet i ligning 6.1.

$$i_{opland}(t) = \frac{\sum A_n \cdot i_n(t)}{\sum A_n} \tag{6.1}$$

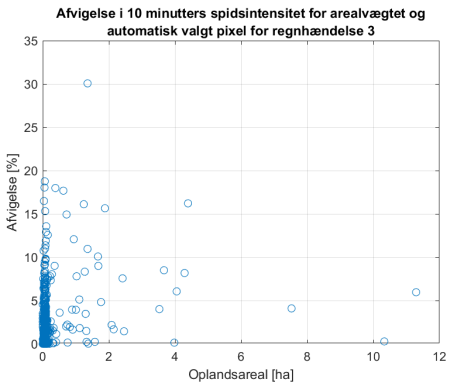
Hvor:

i_{opland}	Regnintensitet for opland	[mm/time]
A_n	Areal af overlap mellem radarpixel og opland	[m^2]
i_n	Regnintensitet af radarpixel	[mm/time]
n	Radarpixel	[-]
t	Tid	[min]

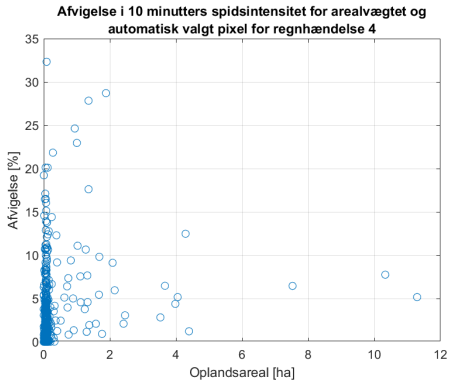
For at undersøge hvor stor en forskel der er på de to metoder til at udregne regnintensiteten for et opland, er lavet en sammenligning af hvor store forskelle, der er på de to metoder til at udregne regnintensiteten for et opland. Til denne sammenligning er målt radardata fra hændelse 1, 3, 4 og 5 i tabel 6.2 anvendt. Det er valgt at sammenligne de to metoder på, hvilken 10 minuters spidsintensitet de udregner for regnhændelserne, da det ofte er korte højintense regnhændelser, der giver anledning til vand på terræn i urbane områder. På figur 6.4, 6.4, 6.6 og 6.7 ses afvigelsen i 10 minuters spidsintensitet for alle oplandene i Kærby og Håndværkerkvarteret som funktion af oplandsarealet.



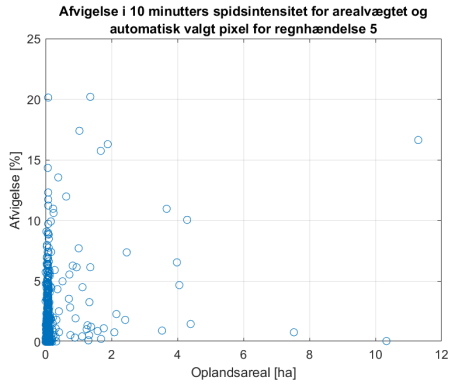
Figur 6.4: Afvigelse i 10 minuters spidsintensitet i mellem arealvægtet og pixel i tyndgdepunkt for regnhændelse 2.



Figur 6.5: Afvigelse i 10 minuters spidsintensitet i mellem arealvægtet og pixel i tyndgdepunkt for regnhændelse 4.



Figur 6.6: Afvigelse i 10 minuters spidsintensitet i mellem arealvægtet og pixel i tyndgdepunkt for regnhændelse 5.



Figur 6.7: Afvigelse i 10 minuters spidsintensitet i mellem arealvægtet og pixel i tyndgdepunkt for regnhændelse 7.

Ud fra sammenhængene mellem afvigelse og oplandsareal vist på figur 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, ses det at der kan være op imod 33 % forskel på at anvende arealvægtede regnserie for oplandende i stedet for at anvende radarpixelen tættest på massemidtpunktet. Dog kan det også ses, at for langt størstedelen af oplandene er forskellen på de to metoder til at udregne afstrømningen på under 10 %. Ligeledes kan det konkluderes ud fra de fire analyserede regnserier, at der ikke umiddelbart er en sammenhæng mellem oplandets størrelse og forskellen på de to metoder til at udregne regnintensiteten. En ting der ikke er synlig af figurerne, men som er værd at bide mærke i, er at 385 ud af 844 oplande i modellen svarende til 44 % af oplandene, kun er dækket af en radarpixel, og at regnintensiteten fundet ved de to metoder derfor vil være ens. For de 459 oplande der er dækket af mere end en pixel, kan medianafvigelsen i 10 minuters spidsintensitet for de fire regnhændelser ses i tabel 6.3.

Tabel 6.3: Medianafvigelse i 10-minuters spidsintensitet for oplande dækket af mere end en radarpixel.

	Regnhændelse 1	Regnhændelse 4	Regnhændelse 4	Regnhændelse 5
Medianafvigelse [%]	1,05	1,61	2,02	1,33

Ud fra Medianen af afvigelserne listet i tabel 6.3 kan det ses, at medianen af afvigelserne for kloakoplande dækket af mere end en pixel ligger på mellem 1 og 2 %. Dette er ikke nogen stor afvigelse, men det kan dog diskuteres, om medianafvigelsen er en god parameter til at vurdere, om arealvægtning af radardataen er nødvendig, da langt størstedelen af oplandene er mindre oplande i Kærby, og disse dermed vil have stor indflydelse på medianen. Det er dog de større mere groft definerede oplande i Håndværkerkvarteret, hvor det kan forventes, at den største fejl vil finde sted ved at kun anvende radarpixelen tættest på oplandets tyngdepunkt. Af denne grund er der lavet simuleringer af afstrømningen fra Kærby og Håndværkerkvarteret seperat med og uden arealvægtning af radardataen. I tabel 6.4 og 6.5 fremgår det totale afstrømmede volumen fra de to deloplande i simuleringerne.

Tabel 6.4: Afstrømmet vandvolumen fra Håndvæerkerkvarter med og uden arealvægting af målte regnintensiteter.

	Afstrømmet volumen [m^3]	
	tyngdepunkt	**Arealvægtet**
Regnhændelse 1	2960	2461
Regnhændelse 3	1555	1207
Regnhændelse 4	826	533
Regnhændelse 5	3565	2690

Tabel 6.5: Afstrømmet vandvolumen fra Kærby med og uden arealvægting af målte regnintensiteter.

	Afstrømmet volumen [m^3]	
	tyngdepunkt	**Arealvægtet**
Regnhændelse 1	2764	2766
Regnhændelse 3	2086	2085
Regnhændelse 4	1171	1167
Regnhændelse 5	3989	3990

Ud fra de simulerede afstrømninger fra Kærby i tabel 6.5 kan det ses at der opnås næsten idenitiske resultater for simuleringen med arealvægtet radardata, og simuleringen hvor radarpixelen tættest på oplandets tyngdepunkt anvendes. Ligeledes kan det i tabel 6.4 ses, at der med de to forskellige metoder til at bestemme regn-inputtet for et opland er rimelige væsenlige forskelle på det afstrømmede vandvolumen fra Håndværkerkvarteret i de fire simuleringer.

Ud fra de relativt store forskelle fundet i det afstrømmede vandvolumen fra Håndværkerkvarteret og de minimale forskelle fundet i afstrømningen fra Kærby kan det konkluderes, at fejlen der begås ved at anvende radarpixelen tættest på oplandets tyngdepunkt i stor grad vil afhænge af størrelsen på oplandet. Med små oplande, som haves i Kærby-delen af modellen vil fejlen være ubetydelig, imens der med større oplande som haves i modellen i Håndværkerekvarteret vil ske en betydelig fejl.

Da det er vist, at arealvægtningen har en stor indflydelse på afstrømningen fra Håndværkerkvarteret, er det valgt i det videre arbejde i rapporten at anvende en arealvægtning af radardataen, da det er vurderet, at dette vil være den bedste metode til at tage højde for den spatiale variation, der er over de enkelte oplande i Håndværkerkvarteret.

6.3 Lead time på radar nowcast

Som tidligere beskrevet er en af svaghederne ved nowcasting af radardata, at det er en ekstrapolation af allerede målt radardata, hvorfor nowcastene ikke kan håndtere tilvækst eller henfald i regnintensitet. Dette vil give en begrænsning for, hvor lang tid ud i fremtiden det vil være muligt at ekstrapolere målt radardata med en tilfredsstillende præcision. I dette afsnit vil det derfor blive undersøgt, hvor præcist nowcastene er ved forskellige lead times. Der er valgt at undersøge præcisionen ved lead times på 15, 30, 45 og 60 minutter. For nogle af hændelserne i tabel 6.2 haves der op til to timers lead time, men det er vurderet at lead times på over 60 minutter, vil være for

upræcise til brug i realtidsmodellen. De forskellige lead times undersøges ved at tage regnintensiteten ved den givne leadtime i alle nowcastene for en hændelse og herefter sætte dem sammen til en kontinuert tidserie. Da nowcastene har en opdateringsrate på 5 minutter, og radardaten og dermed også nowcasten har en tidslig opløsning på 1 minut, vil det ikke være muligt at anvende en konstant leadtime hvorfor præcisionen vil blive undersøgt for intervallerne; 10 - 15 minutter, 25 - 30 minutter, 40 - 45 minutter og 55 - 60 minutter. Ligeledes kan der være huller med manglende nowcast, fordi at nowcastet af en eller flere grunde er blevet kassseret, haves sådan et hul vil det udfyldes af nowcastet før med de efterfølgende 5 minutter, undtagen for leadtimen på 55 - 60 minutter, hvor det vil være nowcastet efter der anvendes til at udfylde hullet, da nogle af nowcastene kun har 60 minutters lead time.

Ud fra resultaterne vist i appendiks B kan det ses, at der generelt er en dårlig sammenhæng mellem oversvømmelsesudbredelsen og oversvømmelsesvolumenet modelleret ud fra det observerede radardata, og udbredelsen og volumenet modelleret ud fra nowcastene. For de fem simulerede hændelser giver kun hændelsen d. 15-06-2017 vand på terræn ved simulering af det observerede radardata, og ved denne hændelse er det kun nowcastet med en lead time på 30 minutter der er tæt på at simulere den korrekte oversvømmelsesudbredelse. For de fire andre hændelser er der konstateret ingen eller minimal vand på terræn ved simulering af det observerede radardata, hvorimod simuleringerne af nowcastene for disse hændelser i større eller mindre grad resultere i vand på terræn.

Det er derfor umiddelbart ikke muligt at konkludere hvor lang en leadtime det generelt vil være muligt at lave en god regnprognose med, med mindre det vælges at konkluderes at det ikke vil være muligt for nogle af de undersøgte lead times. En af udfordringerne ved at undersøge radar nowcasts evne til at forudsige oversvømmelser, er at regnhændelser der giver anledning til vand på terræn heldigvis er relativt sjældne, hvorfor det kan være svært at finde nok hændelser til at lave disse sammenligninger. Der er i [Thorndahl et al., 2016] foretaget en lignende undersøgelse af, hvor lang tid ud i fremtiden det vil være muligt at nowcaste radardata baseret på bydelen Lystrup, nord for Aarhus. I denne undersøgelse konkluderes det, at det vil være muligt at nowcaste med en leadtime på 30 minutter.

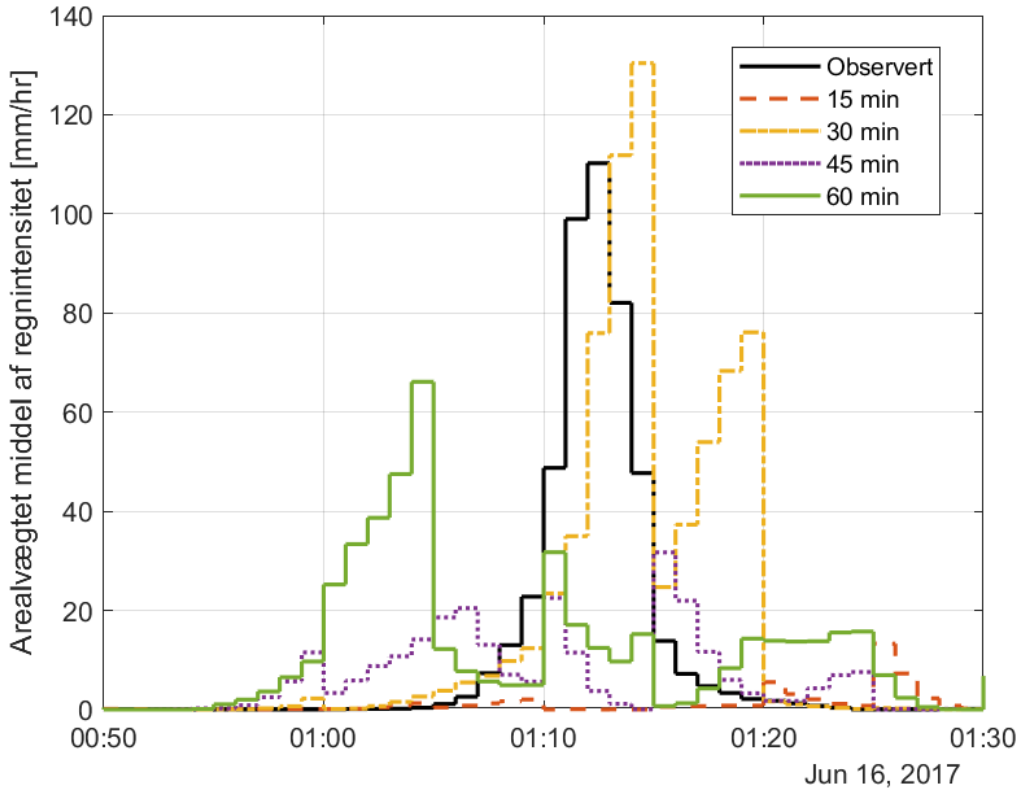
På grund af de dårlige resultater opnået i denne undersøgelse af de forskellige lead times præcision, er det valgt at kigge nærmere på de nowcastede tidserier, for at få en forståelse for hvad der giver anledning til forskellene i modelresultater.

6.4 Grunde til fejl i nowcasting af radardata

På grund af de store fejl, der blev fundet i oversvømmelsessimuleringer af nowcastene med forskellige lead times er det valgt, at undersøge hvilke faktore der giver anledning til de store forskelle. Dette vil blive gjort ved at kigge nærmere på enkelte peaks, hvor der er uoverensstemmigelser imellem det observerede radar regndata og nowcastene med forskellig lead time, dette vil blive gjort ved at sammenligne radarbillederne for det observede data og radar nowcastene.

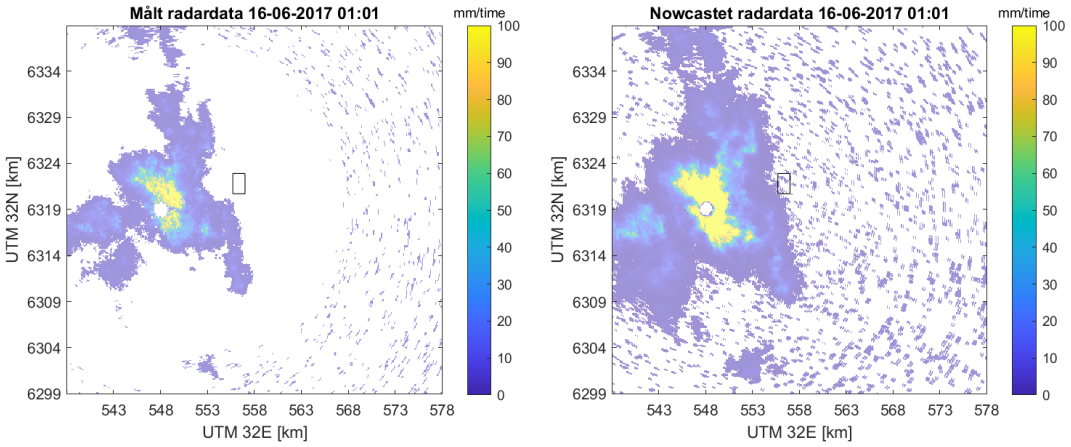
6.4.1 Peak d. 16-06-2017 kl 01:10 til 01:15

Tidligt om morgenen d. 16-06-2017 er der en kort periode i det oberserverede radardata med meget høje regnintensiteter, dette peak i det observerede radardata kan ses sammen med nowcastene med de forskellige lead times på figur 6.8.



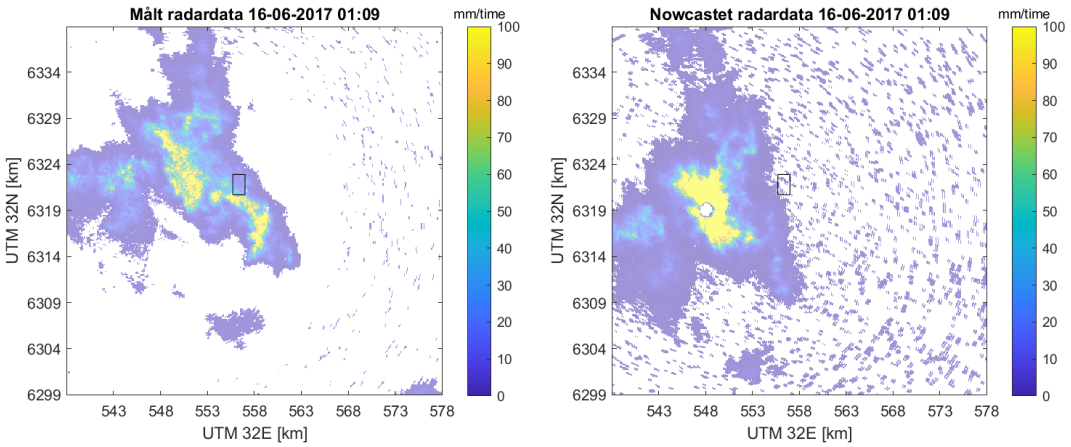
Figur 6.8: Arealvægtet regnintensitet d. 16-06-2017 fra kl 00:50 til 01:30.

Ud fra figur 6.8 kan det ses, at der imellem kl 01:10 og 01:15 i det observerede radardata er et peak med en gennemsnitlig intensitet på 77,5 mm/timen. det kan også ses at der for lead timen på 30 minutter er et lignende peak dog et minutter forsinket og en 5 minutters spidsintensitet på 76,7 mm/timer. For de andre lead times misser dette peak i større eller mindre grad, især lead timen for 15 minutter stikker ud, i det at der i tidsperioden er næsten ingen regn over projektområdet. Der er derfor valgt at kigge på radarbilleder fra nowcastet lavet kl. 01:00, for at undersøgem hvad der gør at nowcastet med en lead time på 15 minutter misser dette peak. Radarbillederne kl. 01:01 kan ses på figur 6.9.



Figur 6.9: Radarbillede d. 16-06-2017 kl. 1:01 for observeret radardata og nowcast kl: 01:00.

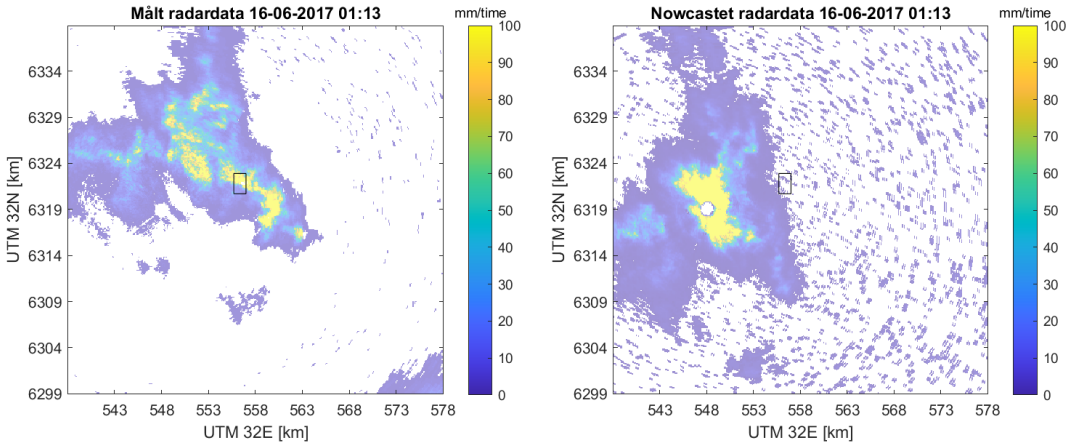
Som det kan ses af figur 6.9, er der et højintenst område ca. 10 kilometer vest for projektområdet. For at se hvordan dette højintense område bevæger sig vises radarbillederne 8 minutter senere på figur 6.10.



Figur 6.10: Radarbillede d. 16-06-2017 kl. 1:09 for observeret radardata og nowcast kl: 01:00.

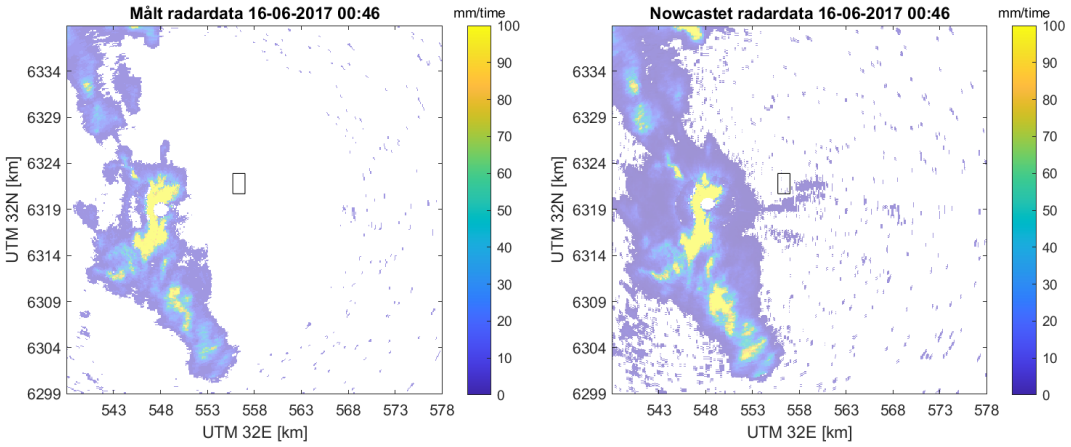
Som det fremgår af radarbillederne kl. 01:09 er der opstået en nyt højintenst peak syd for Projektområdet. En anden observation der kan drages ud fra radarbilledet af nowcastet på figur 6.10, er at peaket vest for projektområdet, næsten ikke har bevæget sig på nowcastet. Dette skyldes at vektorfeltet har en hastighed på 0,5 m/s i nordøstlig retning, hvilket gør at regnbygerne bevæger sig meget langsomt. Det er dog ikke dette, der i denne situation giver anledning til den store forskel imellem det observerede radardata og nowcastet med en lead time på 15 minutter, men det er dog stadig værd at nævne som en potentiel kilde til fejl i andre situationer. Fejlen opstår derimod da der et par minutter inden sker en kraftig tilvækst i regnintensiteten syd for projektområdet, og denne

højintense zone herefter bevæger sig over projektområdet. En af svaghederne ved nowcasting af radardata er som tidligere nævnt, at den udførte ekstrapolation ikke kan tage højde for tilvækst/henfald i regnintensiteter, og det er denne svaghed der i denne situation, vil give anledning til den store forskel, der er på nowcastet med en lead time på 15 minutter og på det observerede radardata. På figur 6.11 ses det hvordan denne højintense zone bevæger sig op igennem projektområdet.



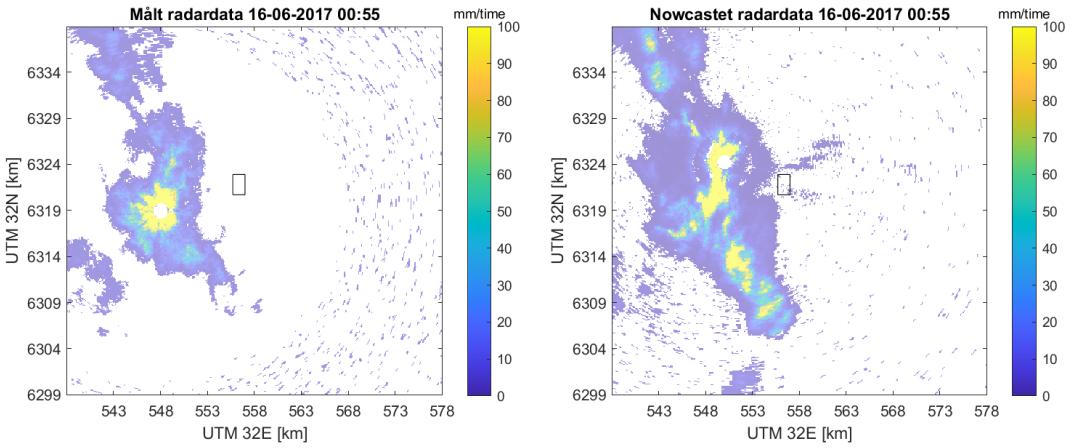
Figur 6.11: Radarbillede d. 16-06-2017 kl. 1:13 for observeret radardata og nowcast kl: 01:00.

Faktummet at det observerede peak er et resultat af, at der er sket en kraftig tilvækst i regnintensiteten lige inden regnen passere over projektområdet, skaber en undren om hvordan nowcastet med en lead time på 30 minutter lykkedes at have et peak der minder om det fundet på det observerede radardata et par minutter forsinket. Der er derfor kigget på nowcastet lavet kl 00:45, på figur 6.12 radarbilleder af det observerede radardata og det første tidskridt i nowcastet fra kl. 00:45.



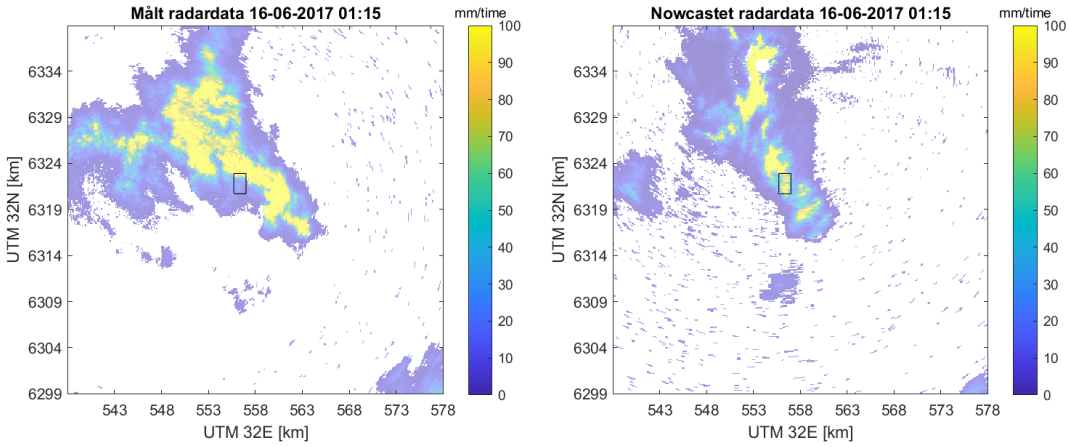
Figur 6.12: Radarbillede d. 16-06-2017 kl. 0:46 for observeret radardata og nowcast kl: 00:45.

På figur 6.12 kan det ses, at der er en område med højintens regn sydvest fra projektområdet, Det er dette peak, som nowcastet projicere vil bevæge sig imod Kærby og Håndværkerkvarteret. På figur 6.13 ses situationen 9 minutter senere.



Figur 6.13: Radarbillede d. 16-06-2017 kl. 0:55 for observeret radardata og nowcast kl: 00:45.

På figur 6.13 kan det ses på det nowcastede radarbillede, at det højintense regnområde sydvest bevæger sig i retning af projektområdet. Ligeledes kan det ses på det observerede radarbillede at der er sket et kraftigt henfald i regnintensiteten, hvilket igen viser begrænsningerne i ekstrapolation af radardata frem i tid. Til sidst vises radarbillederne kl. 01:15 hvor det høj intense område på nowcastet har bevæget sig ind over Kærby og Håndværkerkvarteret.

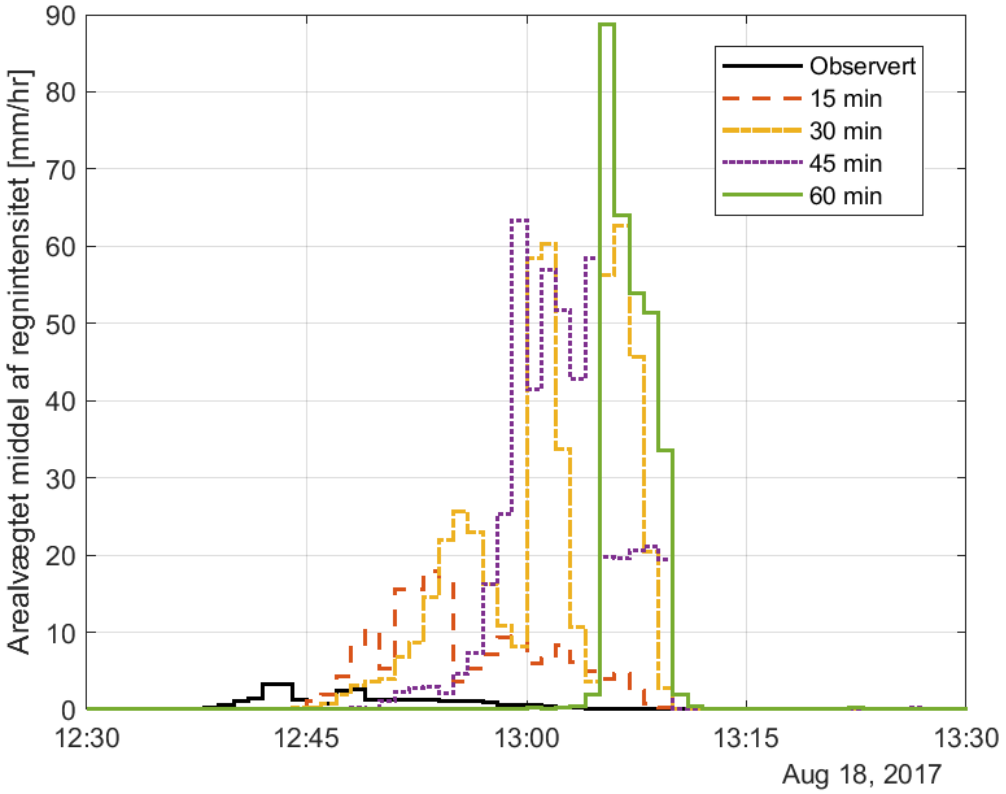


Figur 6.14: Radarbillede d. 16-06-2017 kl. 1:15 for observeret radardata og nowcast kl: 00:45.

Det kan altså konkluderes, at grunden til at tidsserien for regnen med en lead time på 30 minutter stemmer godt overens med det observerede radardata, ikke skyldes at nowcastet korrekt modellere hvordan regnen vil bevæge sig, men derimod skyldes to seperate fejl i nowcastet som opvejer hinanden. Det må derfor ses som en tilfældighed, at 30 minutters lead time tidserien rammer det observerede peak og ikke som et resultat af en god regnprognose.

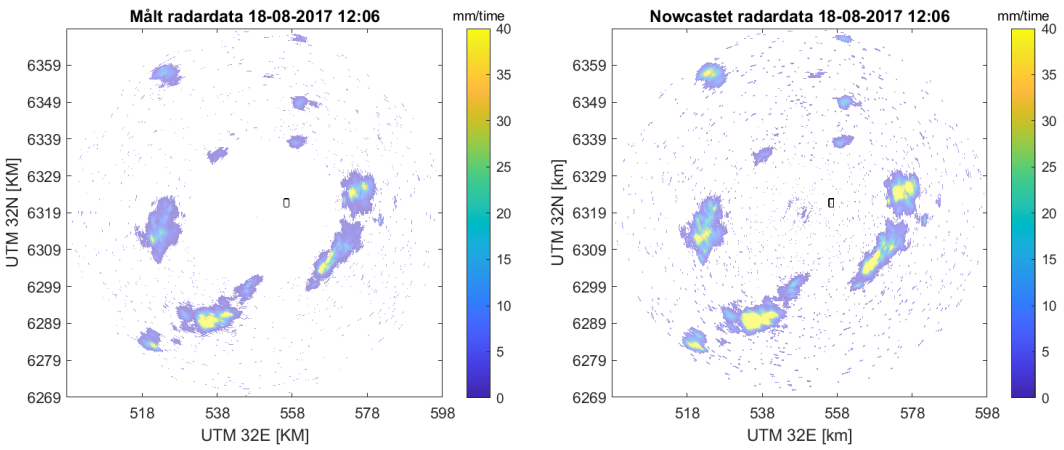
6.4.2 Peak d. 18-08-2017 kl 12:50 til 13:10

Et andet eksempel hvor der er stor forskel på det observerede radardata, og på nowcastene med de forskellige lead times, findes d. 18-08-2017 mellem kl. 12:50 og 13:10. Regnintensiteten for de forskellige lead times og for det observerede radardata d. 18-08-2017 kl 12:50 til 13:10, kan ses på figur 6.15.



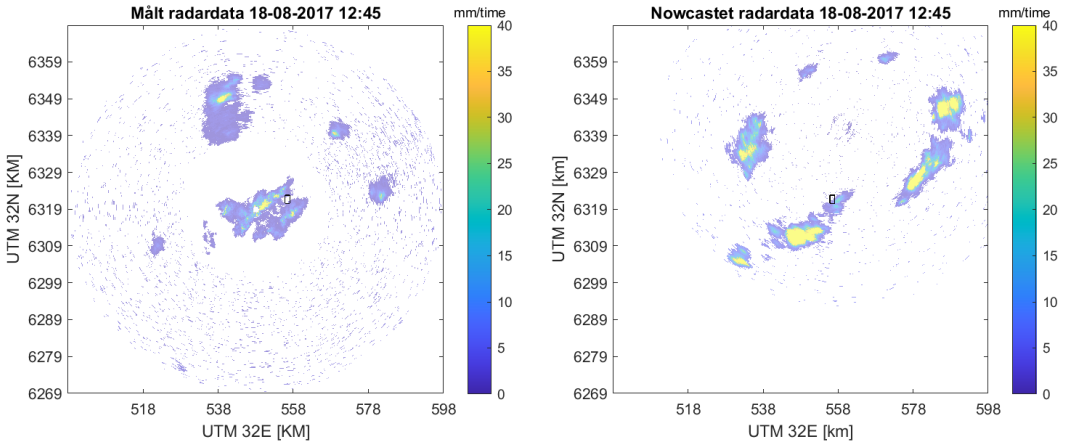
Figur 6.15: Arealvægtet regnintensitet d. 18-08-2017 fra kl 12:50 til 13:10.

Af figur 6.15 kan det ses, at der for nowcastene med en lead time på 30, 45 og 60 minutter er relativt store mængder regn, mens der på det observerede radardata næsten ingen regn er. For at finde årsagen for disse forskelle vil der blive kigget nowcastet med en lead time på 60 minuuter. På figur 6.16 ses første tidskridt i nowcastet dannet kl 12:10 som er det nowcast der giver anledning til spidsintensiteterne for lead timen på 60 minutter set på 6.16.



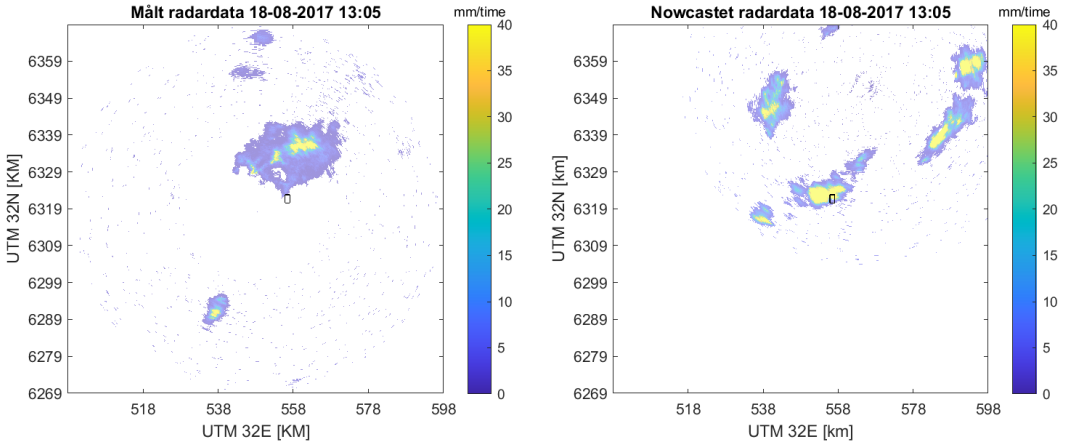
Figur 6.16: Radarbillede d. 18-08-2017 kl. 12:06 for observeret radardata og nowcast kl: 12:05.

På figur 6.16 kan det ses, at der er en regnbyge sydvest fra projektområdet, det er denne regnbyge som nowcastet ekstrapolere til at bevæge sig over projektområdet, hvorfor der vil blive set nærmere på hvordan denne regnbyge udvikler sig i det observerede radardata. På figur 6.17 ses det observerede radardata 40 minuter senere.



Figur 6.17: Radarbillede d. 18-08-2017 kl. 12:45 for observeret radardata og nowcast kl: 12:05.

Af figur 6.17 fremgår det, at der har været et henfald i regnintensiteten for det observerede radardata, og at de højintense områder tilbage i regnbygen er uden for projektområdet. På figur 6.18 ses radarbilledet efter en time.



Figur 6.18: Radarbillede d. 18-08-2017 kl. 13:05 for observeret radardata og nowcast kl: 12:05.

Ud fra de radarbilleder der er blevet kigget på, kan det konkluderes at en af de primære årsager til forskelle i mellem det observerede radardata og nowcastene, er vækst og henfald af regnintensiteten, hvilket er en svaghed radar nowcastene har, da de er en ekstrapolation af målt

radar data, og derfor ikke har en metode til at håndtere tilvækst og henfald i regnintensitet. Hurtig tilvækst eller henfald i regnintensitet, som er eksempliferet i de dette afsnit, er et kendetegn af konvektive hændelser, kigges der på tidserierne for de to regnhændelser på figur B.2 og B.4 i appendiks B kan det ses at de to regnhændelser, der i dette kapitel er anvendt som eksempel begge består af korte, men meget højintense regnskyl, hvorfor de sandsynligvis er konvektive regnhændelser. Det er vurderet, at nowcast ville præstere langt bedre under stratiforme hændelser, hvor regnintensiteterne vil være mere konstante. Det er dog vigtigt at pointere, at det ofte vil være korte konvektive regnbyger, som vil give anledning til vand på terræn i urbane områder, og at funktionaliten af et varslingsystem derfor vil være begrænset, hvis ikke det kan forudsige, hvordan afløbssystemet vil reagere på konvektive regnhændelser.

6.5 Opsummering

I dette kapitel er radar nowcastene, der er tiltænkt som input til realtidsmodellen præsenteret. På grund af den høje spatiale opløsning på radardataen er det undersøgt, om det er nødvendigt at arealvægte radardataen for de enkelte oplande, da nogle af oplandene vil være dækket af flere radarpixels. Udfra denne undersøgelse blev det konkluderet, at arealvægtningen vil have en stor betydning på afstrømningen fra oplande med store arealer som haves i Håndværkerkvarteret. Det er derfor valgt at arbejde videre med arealvægtet radardata i rapporten. Der blev herefter undersøgt hvor langt ud i fremtiden det vil være muligt at ekstrapolere radardataen ud og stadig opnå resultater for 1D-2D oversvømmelsesmodellen der minder om resultaterne opnået med det observerede radardata. Her blev fundet at for alle de undersøgte lead times på 10-15, 25-30, 40-45 og 55-60 minutter vil der generelt blive store forskelle i mellem det observerede radardata og det nowcastede radardata med forskellige lead times. Det blev herefter undersøgt, hvorfor denne store forskel opnås hvor det blev konkluderet at en af de primære bidrag til forskellen er vækst/henfald i regnintensitet, hvilket et nowcast ikke kan tage højde for.

7. Automation af modeldrift

For at kunne lave et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser, vil det være nødvendigt at opbygge en skal der automatisere indhentning af data, opsætning og kørsel af den hydrauliske model og behandling af resultaterne fra modellen. Der er derfor i projektet udarbejdet et eksempel på hvordan en skal til realtidsdrift af en 1D-2D MIKE FLOOD-model kan opbygges. Målsætningen for varslingssystemet er at opnå så præcis en modellering muligt, og sammentidig have en lav beregningstid for at få mest mulig leadtime på oversvømmelsesvarslingen. Ligeledes skal det sikres, at modellen er driftsikker, og selv kan løse problemer den støder på som f.eks manglende nowcast. Det er antaget, at det vil være muligt at producere et nyt radar nowcast hver femte minut, hvorfor målsætningen for varslingsystemet er, at en modelkørsel skal tage under fem minutter for at kunne starte en ny simulering så snart at et nyt nowcast modtages.

Skalen består af tre dele, en batch-fil der ved brug af Windows Task Manager automatisere igangsættelsen af modelkørslen, et MATLAB-script der ændre begyndelsesbetingelser, randbetingelser og indstillinger for MIKE FLOOD-modellen og herefter køre modellen. Til sidst eksekveres et Python-script der anveder QGIS API, der laver et oversvømmelseskort baseret på resultaterne af modellen. En oversigt over hvordan skalen til realtidsmodellen er opbygget, kan ses i appendiks C, filerne til realtidssetuppet kan findes som elektronisk appendiks D.1. Det ville være muligt at opbygge realtidsmodellen, ved kun at anvende en af de anvendt programmeringssporg, men på grund af forfatterens preferencer, er det valgt at opdele koden i de tre programmeringssprog.

Valgene der er taget i forbindelse med opbygningen af realtidsmodellen, vil i de følgende afsnit blive beskrevet og diskuteret. Herefter vil der til sidst blive lavet en analyse af, hvor hurtigt realtidsmodellen kan simulere en cyklus for at få et estimat om hvor meget computerkraft, der er nødvendig for at køre den opbyggede realtidsmodel i realtid. Der er i opbygningen af Realtidsmodellen til projektet set bort fra, hvordan computeren hvorpå realtidsmodellen køre skal indhente nye nowcasts. Ligeledes er der i den opbyggede realtidsmodel set bort fra indhentning af data til vandføringsranden i Østerå.

7.1 Batch-script til initialisering af realtidsmodel

For at kunne automatisere kørslen af MIKE FLOOD-modellen er der lavet en opgave i Windows Task Manager, opgaven vil blive startet automatisk hvis en specifik hændelse dedekteres, dedekteres denne hændelse startes batch-filen. Batch-filen tjekker først om et nyt nowcast eksistere, hvis et nyt nowcast ikke findes vil batch-scriptet vente 30 sekunder inden den afslutter og laver den hændelse der sætter næste kørsel af batch-scriptet i gang. Hvis et nyt nowcast eksistere igangsættes MATLAB-scriptet der køre en runoff-model og 1D-2D oversvømmelsesmodel, bliver der ikke konstanteret oversvømmelse vil batch-scriptet afslutte og lave hændelsen der sætter en ny kørsel af batch-scriptet. Hvis der konstanteres oversvømmelse vil batch-scriptet starte et python-script der

laver et oversvømmelseskort af resultaterne. Efter python-scriptet er færdigt, vil batch-scriptet afslutte og generere hændelsen, der starter batch-scriptet igen.

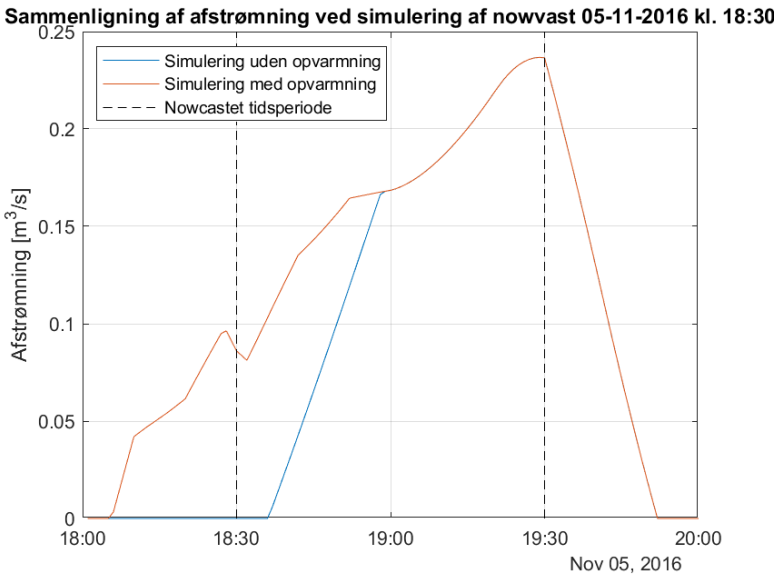
7.2 MATLAB-script til kørsel af MIKE FLOOD-model

Der er til varslingssystemet opbygget et MATLAB-script, formålet med dette script er at omdanne det indhentede nowcast til arealvægtet radardata for hvert enkelt opland og herefter skrive de arealvægtede tidserier for regnen om til et filformat som MIKE FLOOD-modellen kan læse, herefter vil begyndelsesbetingelserne og start og sluttidspunkt for modellen blive opdateret hvorefter først runoff-modellen køres hvilket herefter bruges som randbetingelse til 1D-2D oversvømmelsesmodellen.

7.2.1 Generering af regninput

For at kunne præcist modellere om der er risiko for oversvømmelse i modelområdet, kan det være nødvendigt, ikke kun at modellere regnen der falder i den nowcastede tidsperiode, men også hvad der er sket inden. Grunden til dette er at tids-areal metoden bruges til at udregne afstrømningen fra oplandene, i tids-areal metoden har hvert enkelt opland en koncentrationstid, som bestemmer hvor lang tid, der går før oplandets fulde areal bidrager til afstrømningen, og hvor lang tid efter en regnhændelse inden at oplandet stopper med at bidrage til afstrømningen. Oplandene i modellen for Kærby og Håndværkerkvarteret har en koncentrationstid på op imod 22 minutter afhængig af størrelsen på oplandet, hvilket betyder at for nogle oplande i modellen kan regn der er faldet for op til 22 minutter inden nowcastet have indflydelse på afstrømningen under den nowcastede tidsperiode. Herudover har oplandene i modellen et initialtab på mellem 0,5 og 0,7 millimeter, hvilket kan resultere i at den totale afstrømning fra oplandet underestimeres hvis der ikke tages højde for forgående regn.

For at undersøge hvilken effekt det har at tage højde for tidligere regn, er der på figur 7.1 modelleret afstrømningen fra et nowcast d. 05-11-2016 kl. 18:30, hvor der i den ene simuluering er medtaget de foregående 30 minutter som opvarmning til nowcastet, mens der i den anden simulering kun er medtaget den nuværende nowcast, på figuren er afstrømningen fra et opland i Håndværkerkvarteret med en koncentrationstid på 22 minutter vist, I tabel 7.1 fremgår det afstrømmede vandvolumen under den nowcastede tidsperiode for de to simuleringer.



Figur 7.1: Afstrømning for opland i Håndværkerkvarteret for radar-nowcast d. 5-11-2016 kl 18:30, med og uden opvarmning inden nowcast.

Tabel 7.1: Afstrømmet vandvolumen i den nowcastede tidsperiode med og uden opvarmning.

		Uden opvarmning	Med opvarmning
Afstrømmet vandvolumen fra opland	[m^3]	499	613
Forøgelse i volumen ved brug af opvarmning	[%]	-	23

Som det ses af figur 7.1 og tabel 7.1 har regnen inden den nowcastede tidsperiode en væsenlig betydning for afstrømningen under den nowcastede tidsperiode, især tidligt i den nowcastede periode. Tages der ikke højde for den regn der er faldet i den nærmeste fortid, vil det føre til at afstrømningen fra oplandene til afløbssystemmet, vil blive underestimeret i den første del af den nowcastede tidsperiode. Det er derfor valgt i realtidsmodellen at tilføje de sidste 30 minutter inden nowcastet til runoff-simuleringen for at kunne modellere afstrømningen.

I princippet kunne der argumenteres for, at det vil være nødvendigt at medtage de sidste 16 timer fortløbende det nuværende nowcast for at kunne modellere initialtabet korrekt. Grunden til dette er at der i modellen er antaget en gendannelsesrate på intialtabet på 0,05 millimeter/time, og det derfor vil tage mellem 14 og 16 timer uden regn før regnen tabt til initialtabet vil være forsvundet med et intialtab på 0,7 til 0,8 millimeter for oplandene i modellen. Det er dog vurderet, at fejlen som vil opstå ved ikke at medtage mere end 30 minutter inden nowcastet, vil være lille nok til, at det ikke vil være den øgede beregningstid værd, da formålet med modellen er at modellere oversvømmelser som resultat af større regnhændelser, hvor initialtabet er af mindre betydning for resultatet af modellen.

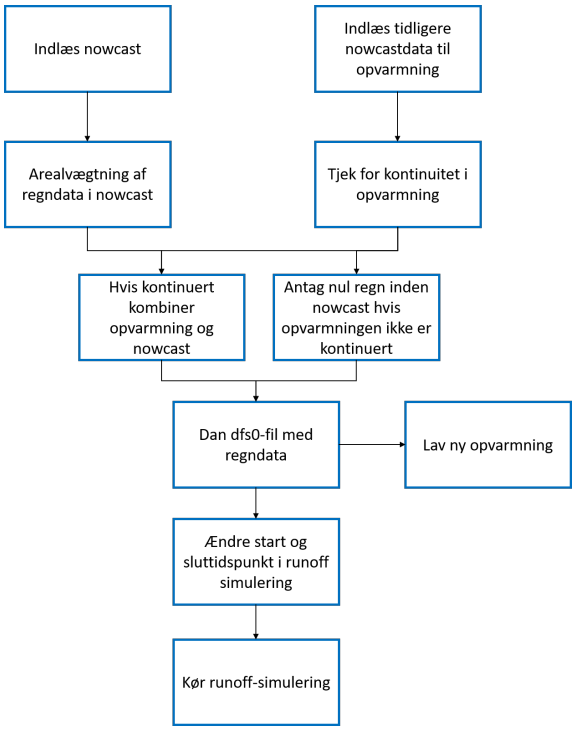
De 30 minutter inden nowcastet vil blive dækket, af de første fem minutter fra de seks nowcasts der fortløber det nuværende nowcasts. Haves dette ikke vil det blive antaget af modellen, at der ingen regn har været i de 30 minutter der føre op til det nuværende nowcast. I princippet ville det være mere præcist at anvende observeret radardata til de 30 minutter inden det nuværende nowcast, men det er valgt at genbruge de tidligere nowcast for at reducere mængden af filer modellen kræver for

at køre.

Ligeledes betyder koncentrationstiden, at det kan tage op til 22 minutter efter den nowcastede tidsperiode, inden vandet der er faldet på et opland, er afstrømmet fra oplandet og ned til afløbssystemet. Af denne grund er det valgt at give de generede regnfiler og runoff-simuleringerne en nedkølingsperiode uden regn, på 30 minutter efter den nowcastede tidsperiode for at give tid til at alt regnen fra oplandet kan nå at afstrømme.

Det er valgt at anvende arealvægtede midler af radarpixelsene til at udregne regnintensiteten over hvert opland ud fra metoden beskrevet i afsnit 6.2, da det blev vist at arealvægtningen har en betydning for afstrømningen fra Håndværkerkvarteret. Dette vil forøge beregningstiden en smule, da det vil give et par ekstra led i at danne regnfilen der bruges i runoff-modellen, og da antallet af tidserier øges fra 497 til 870. hvilket vil forøge tiden, det vil tage at lave dfs0-filen, som runoff-simuleringen skal bruge. Herudover vil det også forøge tiden, det vil tage at indlæse filen i runoff-simuleringen. Det er dog vurderet, at denne forøgelse i beregningstid vil være ubetydelig i forhold til andre processer i realtidsmodellen, hvorfor det er valgt at bruge en arealvægtning af radarpixelsene.

Med regndataen fra Nowcastet konverteret om til en afstrømning fra hvert enkelt opland er næste skridt at sørge for at den hydrodynamiske model har de rigtige begyndelsesbetingelser, således at afstrømningen fra oplandene kan bruges, til at bestemme om der vil forekomme vand på terræn. På figur 7.2 ses et flowchart over hvordan nowcastet indhentes og omdannes til en runoff-simulering.



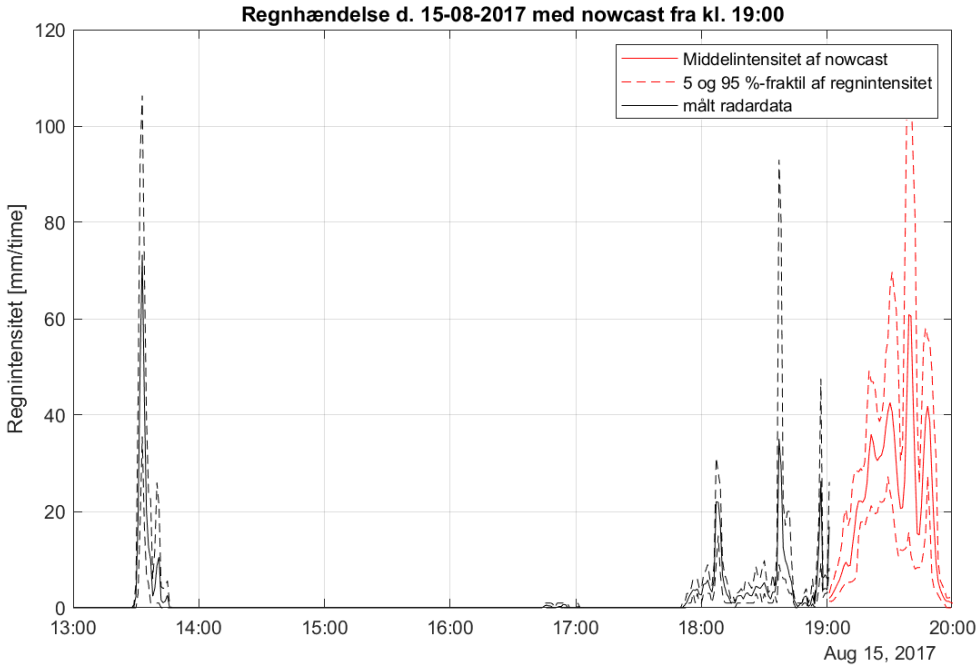
Figur 7.2: Flowchart over proces for genering af regninput.

7.2.2 Opdatering af begyndelsesbetingelser

For at opnå de mest præcise resultater muligt fra realtidsmodellen vil det være nødvendigt at anvende resultater fra tidligere simuleringer som hotstart til modellen. Dette vil være nødvendigt da nowcastene kun dækker en time, og at der derved kan opstå fejl under længere regnhændelser hvis der ikke tages højde for hvad der er sket inden det nowcastede regndata.

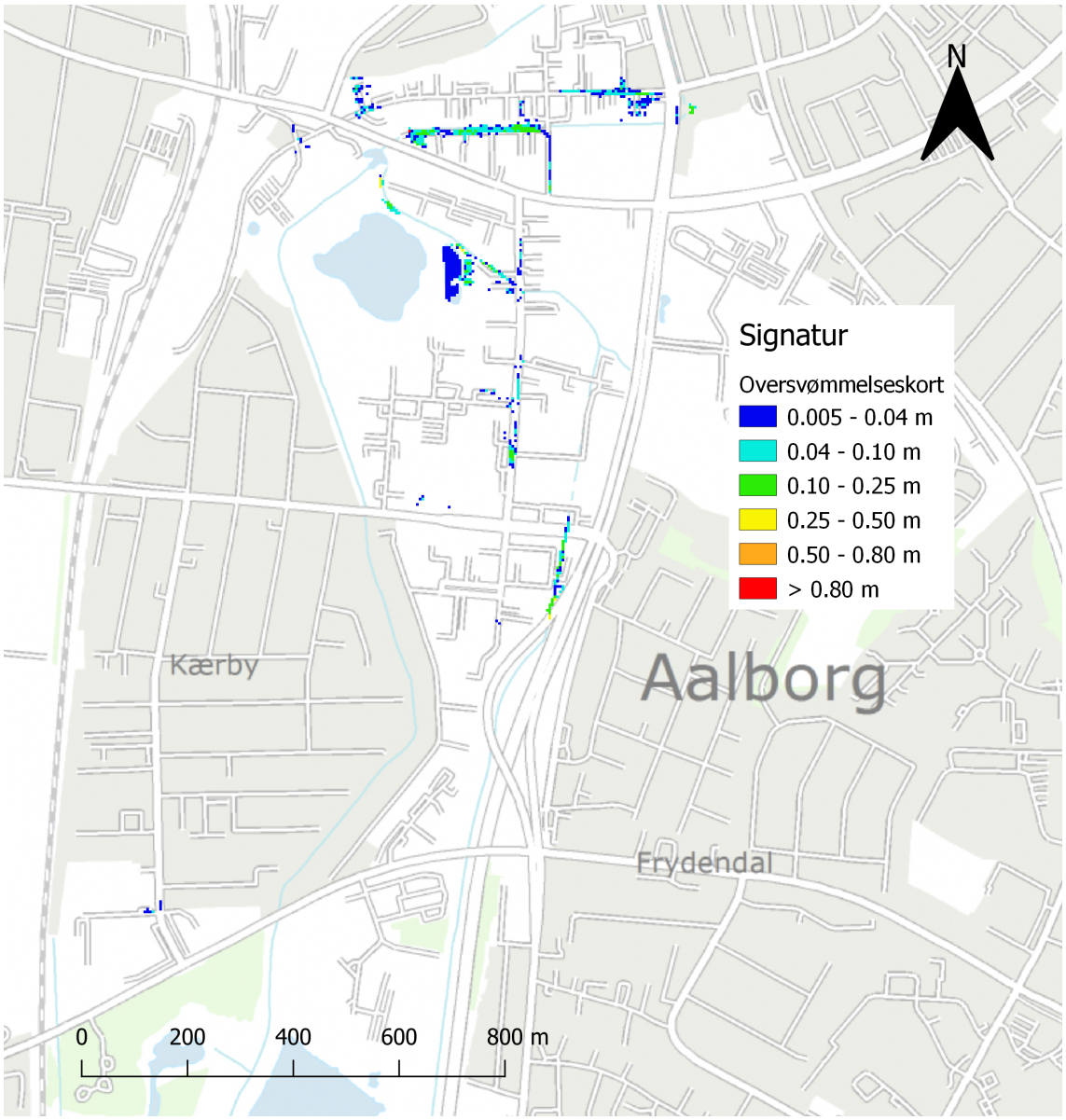
For at sikre at modellen kan køre uden fejl efter lange perioder uden et nyt nowcast, er der indført et tjek der sikre at tidsintervallet fra sidste simulering overlapper starttidspunket for den nuværende modelkørsel, er dette ikke tilfældet, vil der blive anvendt en hotstarts-fil med tomme rør i afløbssystemet, og en vandstand i vandløbene afhængig af vandføringen i randbetingelsen i Østerå. Dette tjek er indført, for at sikre at modellen kan starte af sig selv igen efter at den oplever en længere periode uden at modtage nowcasts.

Ligesom at det er nødvendigt at have en begyndelsesbetingelse for netværksdelen, er det nødvendigt at have en begyndelsesbetingelse for overflademodellen. Haves der ikke dette vil hver simulering starte med en tom overflademodel, hvilket vil gøre at oversvømmelsesudbredelsen og oversvømmelsesvolumenet, vil blive underestimeret under lange regnhændelser, da de vil blive nulstillet ved hver simuleringsstart. For at eksemplificere dette er der foretaget to simuleringer for regnhændelsen d. 15-08-2017 hvor oversvømmelsen modelleret ud fra nowcastet kl. 19:00 er vist, i den ene simulering er modellen kørt med opdaterede begyndelsesbetingelser for de fortløbende nowcasts, mens der i den anden er anvendt en vandstand på nul meter som begyndelsesbetingelse og et tomt afløbssystem. på figur 7.3 ses middelregnintensiteten over Kærby og Håndværkerkvarteret i Nowcastet fra kl. 19:00 og de seks foregående timer som har ledt til begyndelsesbetingelserne i den ene simulering.



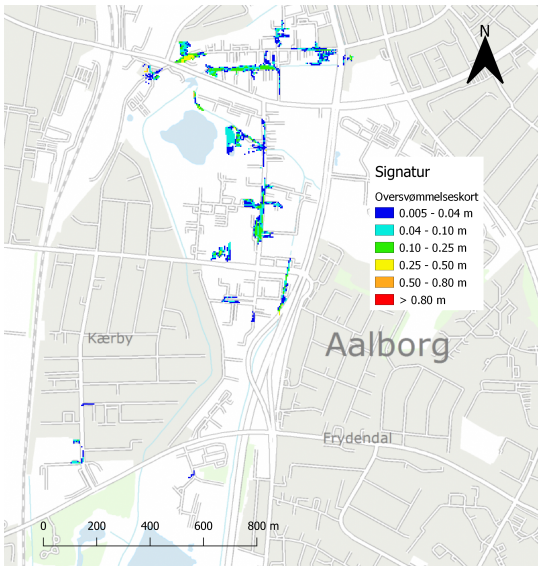
Figur 7.3: Regnhændelse d. 15-08-2017 med målt radardata fra kl. 13:00 til 19:00 og nowcast fra 19:00 og en time frem.

På figur 7.3 kan det ses, at der inden nowcastet har været et regnskyl med tre relativt høje spidser. Dette regnskyl har givet anledning til en situation i overflademodellen som set på figur 7.4.

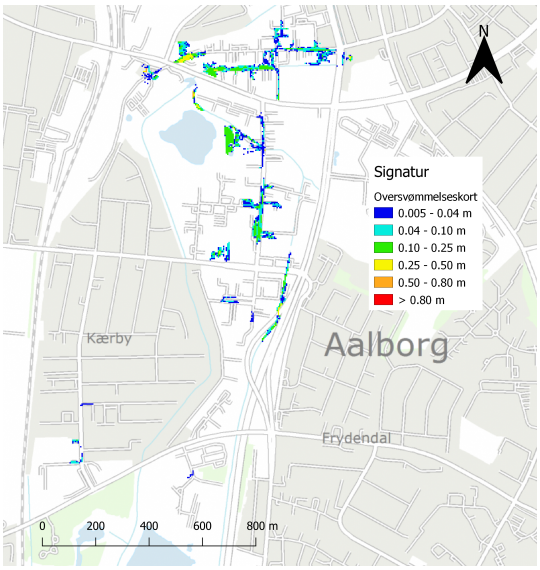


Figur 7.4: Oversvømmelse d 15-08-2017 kl. 19.00 simuleret ud fra nowcast kl. 18:55 med rullende opdatering af begyndelsesbetingelser.

Oversvømmelserne vist på figur 7.4 bruges som begyndelsesbetingelse i en simulering af den nowcastede regnhændelse vist på figur 7.3, denne simulering sammenlignes med en simulering hvor der er anvendt en tom overflade og rørsystem som begyndelsesbetingelse. Resultaterne af de to simuleringer kan ses på figur 7.5 og 7.6.



Figur 7.5: Oversvømmelse genereret af nowcast 15-08-2017 kl. 19:00 uden brug af rullende opdateringer af begyndelsesbetingelser.



Figur 7.6: Oversvømmelse genereret af nowcast 15-08-2017 kl. 19:00 med brug af rullende opdateringer af begyndelsesbetingelser.

Tabel 7.2: Oversvømmelsesudbredelse og volumen for simulering af nowcast d. 15-08-2017 henholdvis med og uden rullende opdatering af begyndelsestingelser.

		Uden begyndelsesbetingelser	Med begyndelsesbetingelser
Oversvømmelsesudbredelse	[m^2]	41250	47975
Oversvømmelsesvolumen	[m^3]	2821	3775

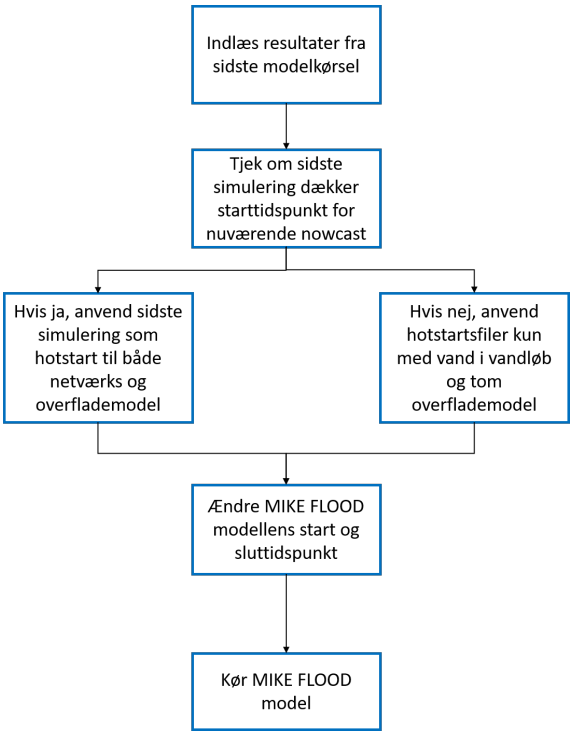
Ud fra tabel 7.2 kan det ses, at rullende opdateringer af begyndelsesbetingelserne for afløbssystemet og overfladen vil have en rimelig betydenlig effekt på oversvømmelsesvolumenet, med et fald i vandvolumenet på terræn på 25% for det viste scenarie uden rullende opdateringer. Ligeledes vil det have en mindre effekt på oversvømmelsesudbredelsen med en reduktion i oversvømmelsesudbredelse på 14 %. Betydningen af de rullende begyndelsesbetingelser vil variere afhængigt af hvilken regnhændelse der simuleres. Havde undersøgelsen f.eks taget udgangspunkt i en´situation hvor der inden nowcastet havde været en situation hvor et stort peak er efterfulgt af et mindre peak, vil oversvømmelsesudbredelsen simuleret under det mindre peak afhænge kraftigt af det store peak der kom inden.

Der er derfor ligesom med netværksdelen valgt at anvende situationen i den sidste simuleringen ved starttidspunktet for den nye simulering som begyndelsesbetingelse for overflademodellen. En udfordring ved denne måde at lave begyndelsesbetingelsen hvor overflademodellen er, at vandet kan ende i lavninger i højdekortet hvorfra det ingen mulighed har for at komme væk, sker dette vil vandet blive liggende for evigt, hvorfor modellen vil vise konstant oversvømmelse. Det er derfor valgt at vandet på overfladen i modellen vil blive nulstillet efter 24 timer. Ligesom med netværksmodellen er der også et tjek for at se om simuleringsperioden for sidste simulering overlapper med starttidspunktet for den nuværende simulering, og er der ikke overlap, vil vandstanden på terræn blive sat til at være nul i alle celler.

Med begyndelsebetingelser på plads kan MIKE FLOOD-modellens filer med indstillingerne

opdateres med de nye begyndelsesbetingelser, MIKE FLOOD-modellen sættes til at køre fra starten af nowcastets tidsperiode til 30 minutter efter nowcastet slutter. Det er valgt at forsætte simuleringerne 30 minutter efter regndataen slutter da der som tidligere beskrevet vil være en forsinkelse fra regnen falder til størstedelen af regnen er i afløbssystemmet. Ligeledes er der også være en forsinkelse i afløbssystemet, inden vandet når en pontentiel kritisk node. Det er derfor vurderet at hvis der bruges 30 minutters nedkøling efter nowcastet kan oversvømmelser forudsaget af peaks sent i nowcastet bedre modelleres, hvorfor det er valgt at medtage en nedkølingsperiode, på trods af at en forøget simuleringstid vil resultere i en forøget beregningstid.

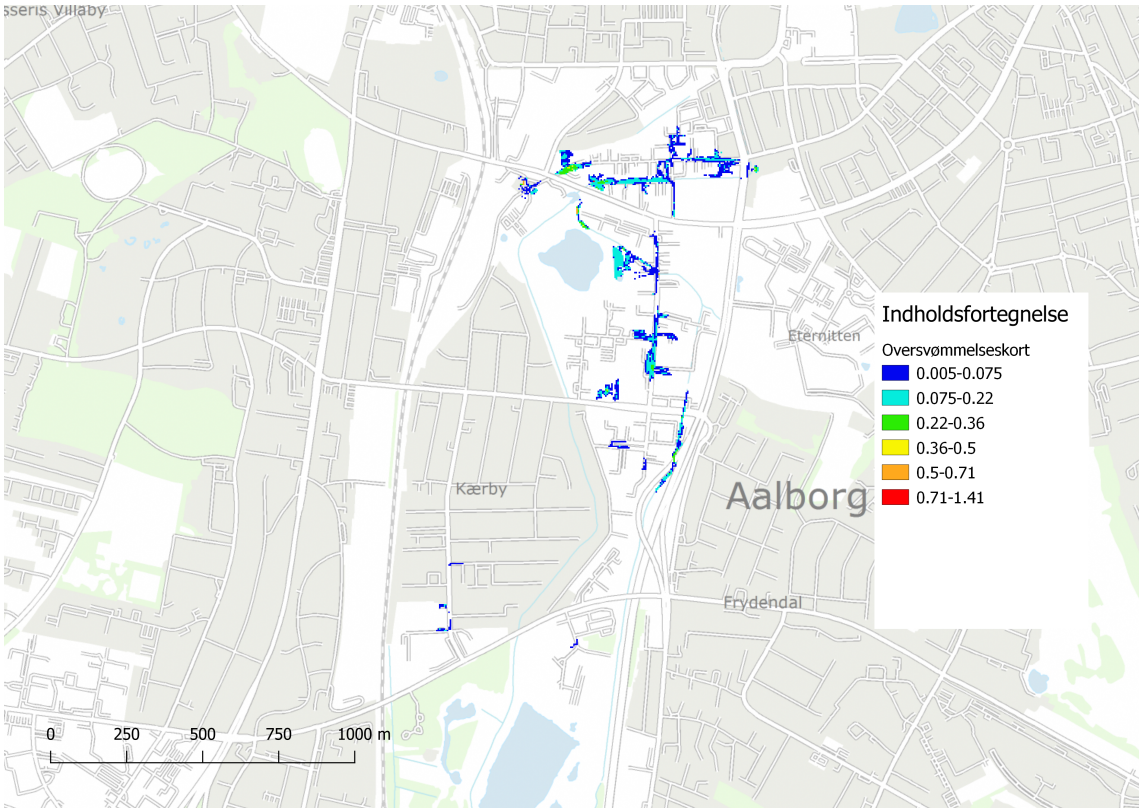
Efter at de nye begyndelsesbetingelser er lavet for netværk og overfladen, kan start- og sluttidspunktet på MIKE FLOOD-modellen opdateres, hvorefter modellen kan køres. Efter modellen er kørt tjekkes det, om der i simuleringen er vand på terræn, hvis der ikke er vand på terræn afsluttes MATLAB-scriptet, hvorefter der igangsættes en ny kørsel af realtidsmodellen. Konstateres der derimod vand på terræn i simuleringen vil MATLAB-scriptet give batch-scriptet besked om at starte python-scriptet til at genere et oversvømmelseskort af simuleringen, på figur 7.7 ses et flowchart over hvordan begyndelsesbetingelserne udvælges og modellen køres.



Figur 7.7: Flowchart over proces for genering af regninput.

7.3 Python-script til visualisering af resultater og varsling

For at kunne præsentere resultaterne som realtidsmodellen producere er der opbygget et python-script, der omdanner resultatfilen fra MIKE FLOOD-modellen til en raster og genere et billede af hvordan oversvømmelsesudbredelsen vil se ud i Kærby og Håndværkerkvarteret ifølge modellen. På figur 7.8 ses et eksempel på et oversvømmelseskort genereret af python-scriptet.



Figur 7.8: Eksempel på billede genereret af realtidsmodel.

Er det første gang i en regnhændelse at MIKE FLOOD-modellen konstantere, at der vil komme vand på terræn, vil scriptet også udsende en E-mail til de personer, der er ansvarlig for driften af modellen, hvor det herefter er tiltænkt, at de driftsansvarlige personer kan bestemme hvilke handlinger skal tages. Alternativt kunne der opstilles en hjemmeside, hvorpå resultaterne fra realtidsmodellen kan uploades direkte, hvormed borgerne kan få adgang til resultaterne af modellen. Det er dog vurderet at usikkerhederne forbundet med modellen. er for store til at blive delt direkte med offentligheden, uden at have været set igennem først.

7.4 Beregningstid af realtidsmodel

Som tidligere beskrevet er beregningstiden kritisk for at lave et godt varslingssystem, da en kort beregningstid betyder en længere leadtime på varslingen, og betyder at det vil være muligt at opdatere varslingen oftere med nye nowcasts. Der er derfor foretaget en undersøgelse af hvor lang tid en modelkørsel af det beskrevne realtidssetup vil tage, for at undersøge hvor meget computerkraft vil være nødvendig for at køre realtidssetuppet med en tilfredsstillende beregningstid. Specifikationerne for computeren hvorpå undersøgelsen af beregnstiden er foretaget, kan ses i tabel 3.2 på side 14. For at få et estimat af beregningstiden af realtidsmodellen er der udført 24 modelkørsler af tilfældige nowcasts med en varighed på en time. I tabel 7.3 kan den gennemsnitlige beregningstid for en modelkørsel ses, sammen med minimum og maksimum af beregningstiden for realtidsmodellen.

Tabel 7.3: Minimum, maksimum og gennemsnitlig beregningstid for 24 kørsler af realtidsmodellen.

		Minimum	Middel	Maksimal
Beregningstid	[MM:SS]	05:56	06:10	06:38

Som det kan ses af tabel 7.3, er den gennemsnitlige beregningstid for realtidsmodellen på lidt over seks minutter, hvilket er mere end den ønskede beregningstid på fem minutter svarene til den tiltænkte opdateringsrate på nowcastene. Ønskes det at reducere beregningstiden for en modelkørsel til under fem minutter vil det være nødvendigt enten at reducere opløsningen på overflademodellen fra 5 meter til f.eks 7,5 meter. Det er vurderet ud fra undersøgelsen fortaget i afsnit 3.2 at det ville kunne være muligt at formindske opløsningen fra 5 meter til 7,5 meter uden at påvirke resultaterne fra realtidsmodellen væsenligt-

Det er på trods af at realtidsmodellen ikke kunne op til det stillede krav om en beregningstid på under fem minutter stadig vurderet at den opstillede realtidsmodel viser et stort potentiale da det er vurderet, at der uden store økonomiske omkostninger kan anskaffes en computer med tilstrækkelig beregningskraft til at kunne køre realtidsmodellen på 5 minutter eller mindre.

7.5 Opsummering

Der er i dette kapitel udarbejdet et eksempel på, hvordan et varslingsystem mod regnbetingede oversvømmelser kan opbygges, hvor målsætningen var at lave en realtidsmodel med en beregningtid på under fem minutter. Betydningen af at opvarme runoff-simuleringen med regndata for regnen inden nowcastet er undersøgt, og det er herudfra konkluderet, at det vil være nødvendigt for at opnå en mere præcis modellering. Ligeledes er betydningen af at implementere en rullende opdatering af begyndelsesbetingelserne i 1D-2D oversvømmelsesmodellen undersøgt. Det blev konkluderet at rullende opdateringer af begyndelsesbetingelserne, vil hjælpe med at øge præcisionen af modelleringen af regnhændelser, der har en længde på over en time, og dermed ikke kan dækkes af et enkelt nowcast.

Der er også fortaget en undersøgelse af beregningstiden af den opstillede realtidsmodel. Her blev det fundet at den gennemnitlige beregningstid var over 5 minutter og at modellen derfor ikke levede op til kravet om en beregningstid på under 5 minutter. Dog blev der ligeledes argumenteret for, at det med en relativt lille økonomisk investering vil være muligt at anskaffe nok computerkraft til at kunne køre den opstillede model med en beregningstid på under 5 minutter. Det blev derfor vurderet at den opstillede realtidsmodel viser at det er muligt at anvende realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel til at opbygge et varslingssystem mod regnbetingede oversvømmelser.

III

Afrunding

8 Konklusion 57

9 Perspektivering 59

Litteratur 59

8. Konklusion

Der er i dette projekt forsøgt at opbygge et varslingssystem for bydelene Kærby og Håndværkerkvarteret beliggende i Aalborg Kommune, der kan advare imod regnbetingede oversvømmelser. Det er valgt at basere varslingssystemet på realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel.

I forbindelse med realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel er der to primære problemstillinger. Den første problemstilling er at urbane områder som Kærby og Håndværkerkvarteret har en lav responstid på regnen, der falder i området, og at tidsintervalet fra regnen falder, til at der vil ske opstuvning til terræn under højintense regnhændelser, ikke vil være mere end et par minutter. Dette nødvendiggøre brugen af regnprognoser som input til oversvømmelsesmodelen for at kunne opnå en tidshorisont på varslingen, der vil give beredskab og berørte borgere mulighed for at reagere på varslingen. Der er derfor som input til den forslåede realstidmodel anvendt nowcastet radardata fra en X-band radar placeret i St. Restrup.

På grund af X-band radarens lave spatiale opløsning, er det undersøgt, hvorvidt det er nødvendigt at arealvægte radarpixelsene i tilfælde, hvor et opland i MIKE URBAN modellen er dækket af mere end en radarpixel. Her blev det fundet at det havde en betydenlig påvirkning på den akkumelerede afstrømning fra Håndværkerkvarteret, hvor der i modellen er få, men større og grovere defineret oplande. Hvorfor det er konkluderet, at en arealvægtning af radarpixelsene over de enkelte oplande vil forbedre resultaterne af modellen.

For at undersøge hvor langt ud i fremtiden det vil være muligt at prognosticere regnen med radar nowcast er der foretaget en sammenligning af oversvømmelsesudbredelsen fået ved fem forskellige hændelser med nowcastet radardata og observerede radardata. Nowcastets præcision blev undersøgt med leadtimes på 15, 30, 45 og 60 minutters ekstrapolation. Her blev det fundet, at nowcastene gav anledning til oversvømmelsesudbredelser og oversvømmelsesvolumener, der var meget anderledes fra dem opnået, med simulering af det observerede radardata, i alle hændelserne og for alle lead times, med få enkelte undtagelser der dog ikke nødvendigvis var opstået som resultat af en god prognose. Det er vurderet, at den primære årsag til disse forskelle er at de undersøgte regnhændelser. hovedsagligt er konvektive regnhændelser med hurtig vækst/henfald i regnintensiteter, hvilket radar nowcasts ikke kan beskrive, da de er en ekstrapolation i tid af målt radardata.

Den anden problemstilling i forbindelse med realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel er at sikre at beregningstiden af modellen, og de tilhørende processer til automatiseringen af modeldriften er lav nok. Der blev i projektet sat en målsætning om at en modelkørsel med den tilhørende generering af filer, behandling af resultater og lignende der er nødvendig for at automatisere modelkørselen ikke må mere end fem minutter. Det lykkedes ikke på den bærbar computer hvorpå realtidsmodellen blev opbygget, men det er værd at notere at denne bærbar computers processer er relativt langsom sammenlignet med moderne processore til stationære computere. Af denne grund vurderes det, at det nemt vil være muligt at køre den

eksemplificerede realtidsmodel, og at det vil være muligt at forfine griddet til mindre opløsninger end den forslåede opløsning på fem meter.

Det konkluderes ud fra projektet at det ikke er lykkedes at opstille et brugbart varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser for Kærby og Håndværkerkvarteret. Dette skyldes, at det ikke er vurderet at det er muligt med radar nowcasts at opnå en præcis nok regnprognose under konvektive regnhændelser til at kunne forudsige oversvømmelser i Kærby og Håndværkerkvarteret. Det er dog i projektet vist at beregningstiden ikke længere nødvendigvis begrænser brugen af realtidssimuleringer af en 1D-2D oversvømmelsesmodel som beregningskernen i et varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser.

9. Perspektivering

Det blev i projektet konkluderet at det ikke vil være muligt at opstille et varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser for Kærby og Håndværkerkvarteret. Grunden til dette er den korte tidsperiode, der går mellem at regnen falder, og at vandet opstuver til terræn, dette medføre at det vil være nødvendigt at anvende regnprognoser til varslingssystemet i form af radar nowcast. Det blev i rapporten konkluderet at nowcastet ikke kunne forudsige regnen, under konvektive regnhændelser hvorfor det ikke ville være muligt at lave et varslingssystem imod regnbetingede oversvømmelser.

Der vil sandsynligvis dog stadig være mulighed for at lave varslingssystemer baseret på realtidssimuleringer af en hydraulisk model for andre problemer end oversvømmelse, der har en længere tidshorisont, fra regnen falder, til at problemet opstår. For eksempel kunne der for Kærby blive lavet realtidskørsler af en rørmodel, der bruges til at bestemme om der vil ske overløb fra pumpestationerne i området, og dermed blive pumpet opblandet spildevand ud i Vestre Landgrøft. Det opblandede spildevand vil efter noget tid ende i Østerå hvor det kan have konsekvenser, for eksempel kan der som resultat af udledt spildevand opstå iltsvind i Østerå hvilket kan have fatale konsekvenser for fiskene i åen. Da at det vil tage flere timer, fra at det opblandede spildevand bliver udledt fra Kærby, til at det potentielt vil resultere i iltsvind i Østerå, er det muligt at producere en varsling ved brug af realtidssimuleringer af målt radardata, og undgå fejlene der opstår som result af usikkerhederne i regnprognosen.

Kigges der uden for projektområdet, vil det muligvis også være muligt at opbygge et varslingsystem imod regnbetingede oversvømmelser hvor der anvendes målt radardata som input til modellen. Dette vil kræve at tiden fra at det regner til at oversvømmelsen indfinder sig, vil være tilpas stor, for eksempel på omkring en time. Dette vil i praksis kræve, at vandet har en stor transporttid i afløbssystemet, inden at det rammer en kritisk node, hvor det vil opstuve til terræn. Sådan et opland vil sandsynligvis være flere gange større end Kærby og Håndværkerkvarteret, hvilket også vil resultere i en længere beregningstid hvis gridstørrelsen på overflademodellen fastholdes. Det burde dog være muligt at anskaffe en computer der ville have nok beregningskraft til at klare en mangedobling af arealet på modelområdet og stadig kunne opnå beregningstiden lig dem fundet i dette projekt.

Litteratur

Aalborg Kommune, **a**. Aalborg Kommune. *Østerå Genåbning af Aalborgs Å*. set: 20-03-2020.

Aalborg Kommune, **b**. Aalborg Kommune. *Befolkningen pr. 1. januar 2019 fordelt efter 5-års aldersklasser - I alt*. http://apps.aalborgkommune.dk/statistik/webaarbog/Folketal2019/Struktur/Bydele/indexlevel1/Bydele5aarsalders

Aalborg Kommune, **2015**. Aalborg Kommune. *Forslag til Spildevandsplan 2016 – 2027*, Aalborg Kommune, 2015.

Beredskabsstyrelsen, **2012**. Beredskabsstyrelsen. *Redegørelse vedrørende skybruddet i Storkøbenhavn lørdag den 2. juli 2011*, Beredskabsstyrelsen, 2012.

Brødbæk et al., **2015**. Daniel Brødbæk, Roland Löwe Vianny Augustin Thomas Courdent, Elbys Jose Menenes og Steen O. Petersen. *OMOVAST - Operativ Model til Varsling og Styring*, Miljøministeriet, Naturstyrelsen, 2015.

Dansk Hydraulisk Institut. Dansk Hydraulisk Institut. *Dansk Hydraulisk Institut*. set: 16-01-2020.

DMI, **2014**. DMI. *Fremtidige klimaforandringer i Danmark*, DMI, 2014.

EnviDan, **2012**. EnviDan. *Regnhændelsen den 6. august 2012*. `http://apps.aalborgkommune.dk/images/teknisk/PLANBYG/KOMPLAN/00/Regn06082012.pdf`, 2012. set: 07-11-2019.

FURUNO, **2020**. FURUNO. *FURUNO Meteorological Radar WR-2100*, 2020. set: 17-01-2020.

Hénonin et al., **Juli 2013**. Justine Hénonin, Beniamino Russo, Ole Mark og Philippe Gourbesville. *Real-time urban flood forecasting and modelling - A state of the art*. Journal of Hydroinformatics, Juli 2013.

IDA, **2016**. IDA. *Regneark til skrift 30*, 2016. set: 22-03-2020.

Intel. Intel. *Export compliance metrics*. set: 20-05-2020.

Kortforsyningen. *Kortforsyningen*.

Li et al., **2005**. L. Li, W. Schmid og J. Joss. *Nowcasting of Motion and Growth of Precipitation with Radar over a Complex Orography*. Journal of Applied Meteorology, volume 34, s. 1286–1300, 2005.

Raymond et al., **2006**. M Raymond, N Peyron og A Martin. *ESPADA, A UNIQUE FLOOD MANAGEMENT TOOL: FIRST FEEDBACK FROM THE SEPTEMBER 2005 FLOOD IN NÎMES*, 7th International Conference on Hydroinformatics HIC 2006, Nice, FRANCE, 2006.

Rupp, **2016**. Karl Rupp. *CPU, GPU and MIC Hardware Characteristics over Time*, 2016. set: 20-05-2020.

Stocker et al., **2013**. Thomas F Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex og Pauline M. Midgley. *Climate Change 2013 The Physical Science Basis - Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions*, IPCC, 2013.

Thorndahl, **2019**. Søren Thorndahl. *Forelæsning i Urban Hydroinformatics*. Efterårsssemesteret, 2019.

Thorndahl et al., **2016**. Søren Thorndahl, Jesper Ellerbæk Nielsen og David Getreuer Jensen. *Urban pluvial flood prediction: a case study evaluating radar rainfall nowcasts and numerical weather prediction models as model inputs*. 2016.

IV Appendiks

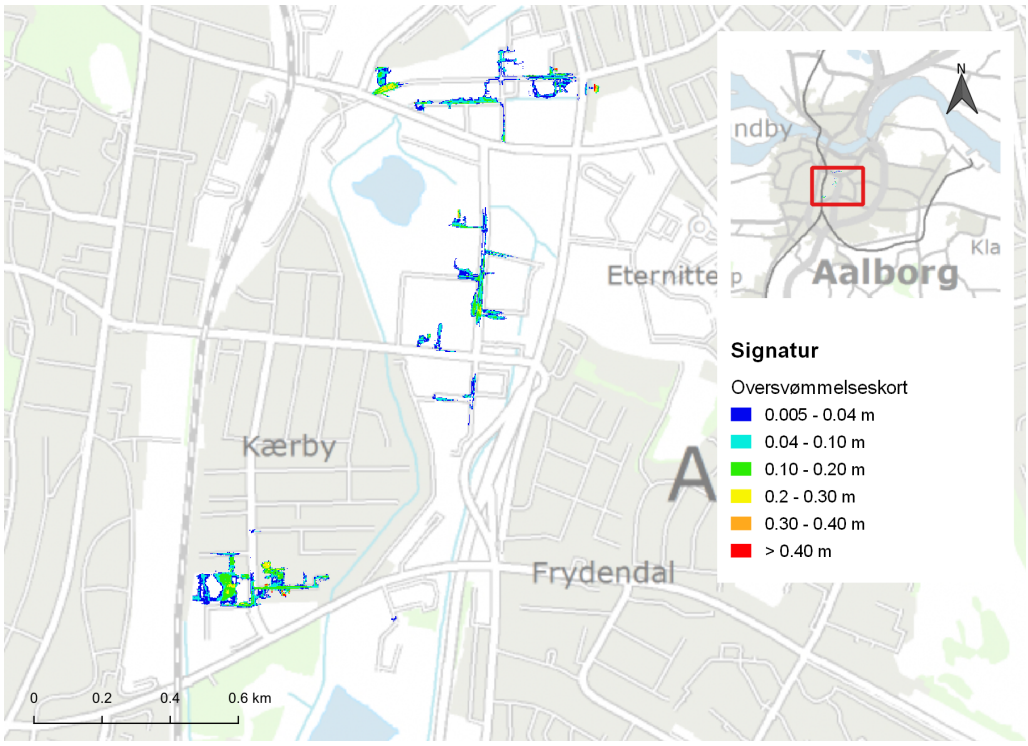
A Oversvømmelseskort til analyse af gridstørrelse 65

B Undersøgelse af nowcasts 69

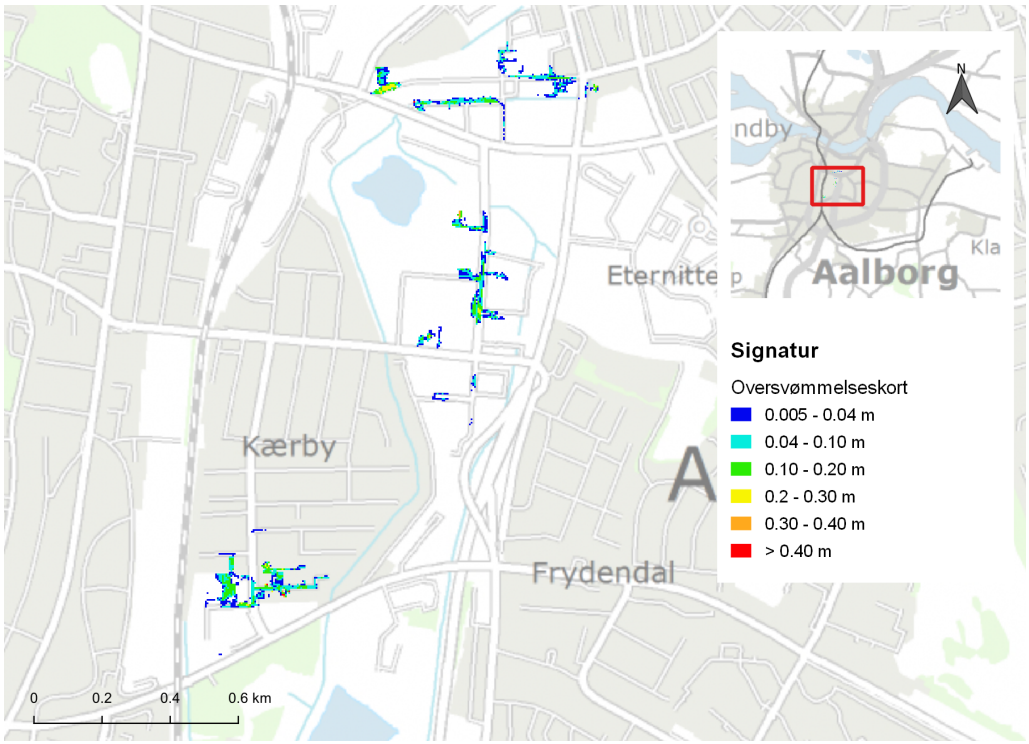
C Flowchart over opbygning af realtidsmodel 75

D Elektroniske appendiks 77

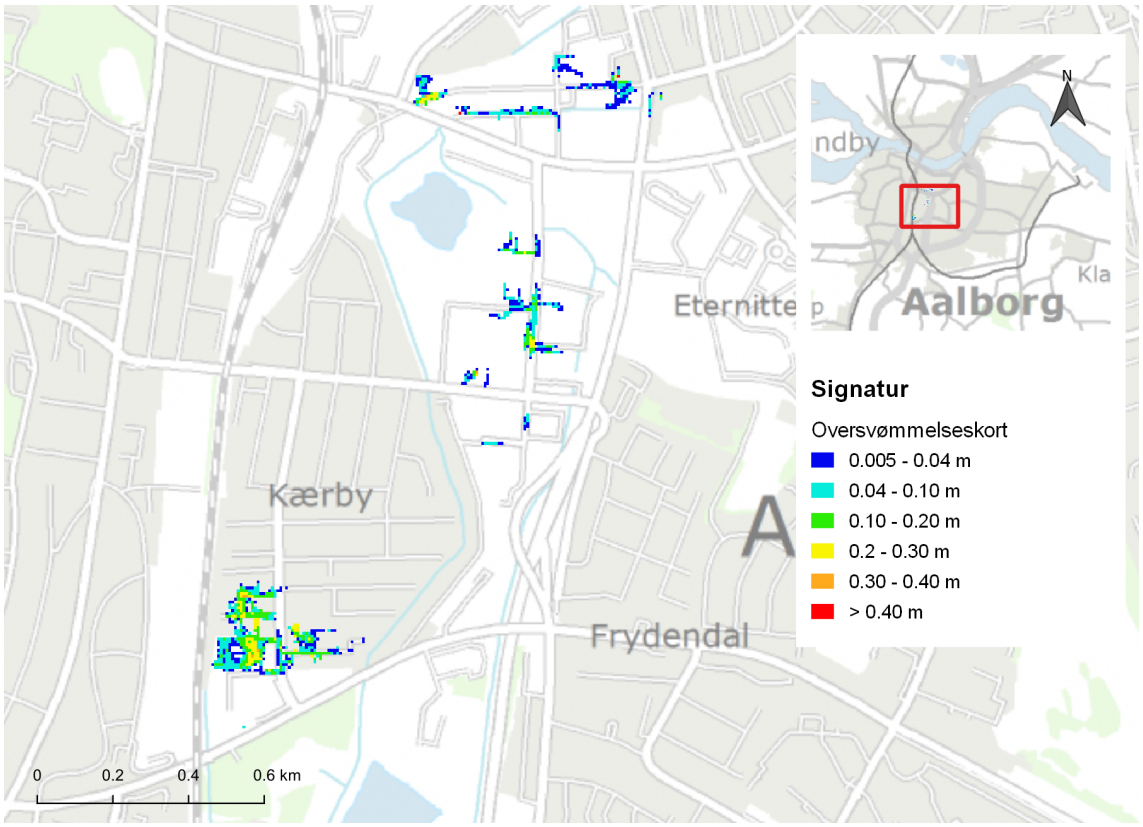
A. Oversvømmelseskort til analyse af gridstørrelse



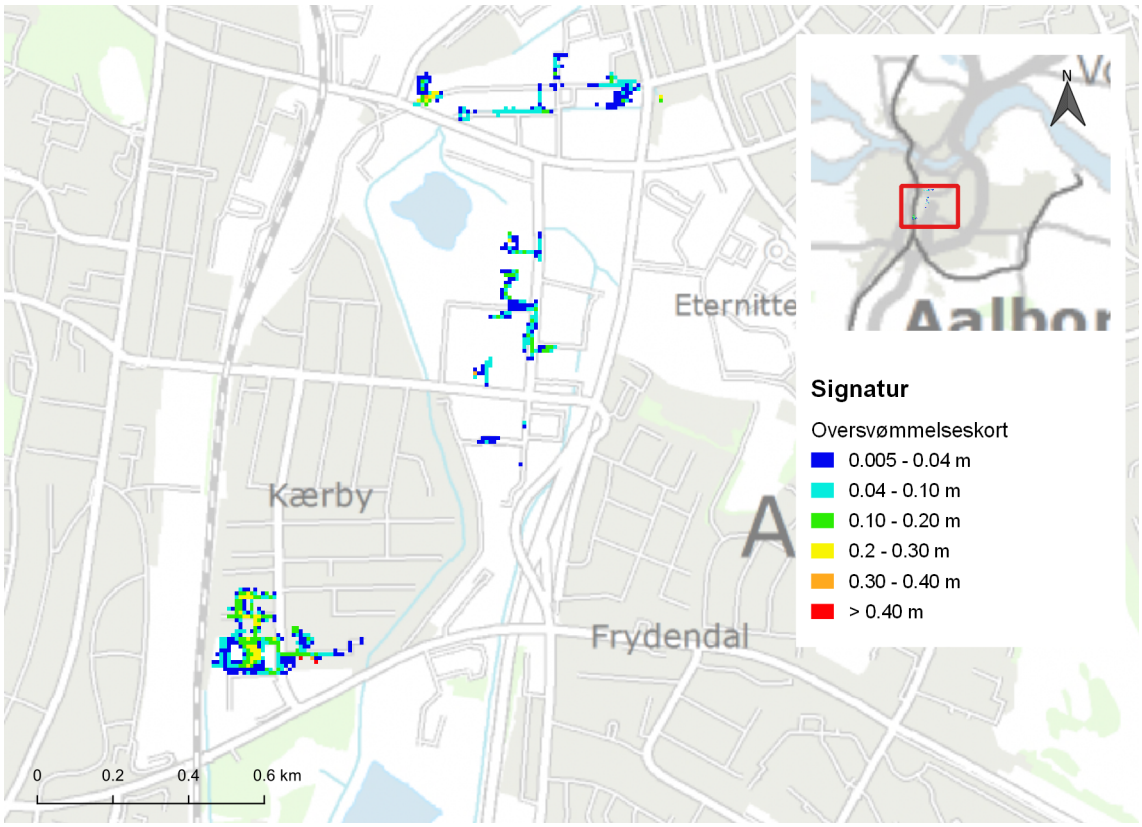
Figur A.1: Oversvømmelsesudbredelse i Kærby og Håndværkerkvarteret, gridstørrelse 2,5 meter



Figur A.2: Oversvømmelsesudbredelse i Kærby og Håndværkerkvarteret, gridstørrelse 5 meter

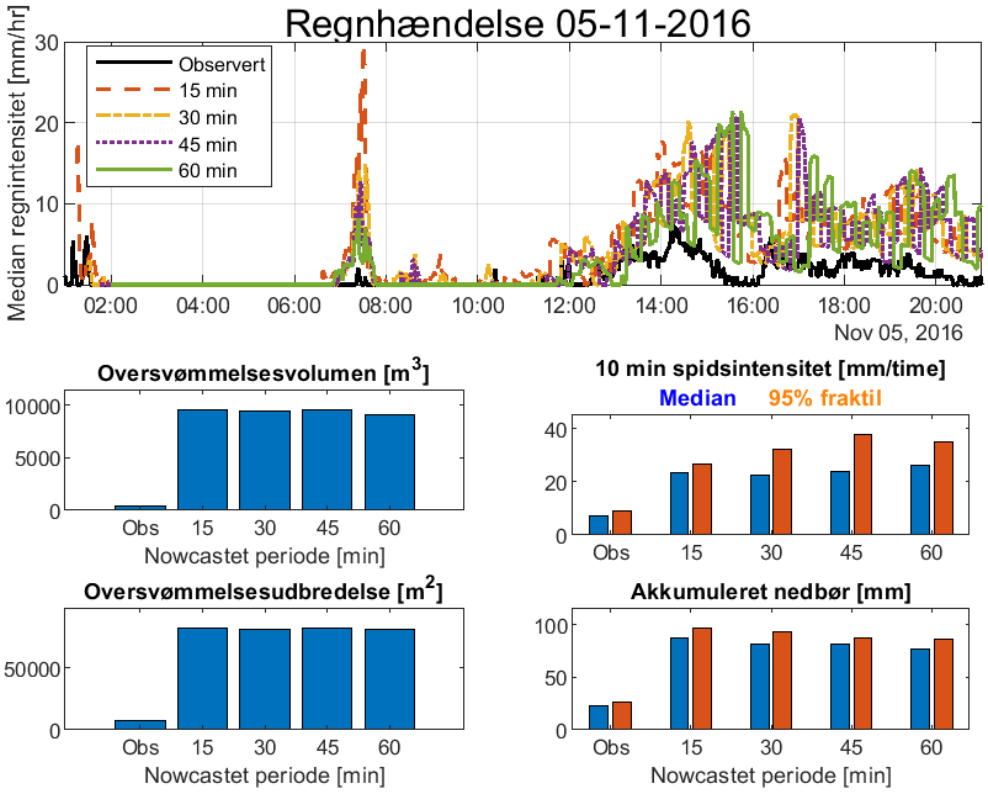


Figur A.3: Oversvømmelsesudbredelse i Kærby og Håndværkerkvarteret, gridstørrelse 7,5 meter

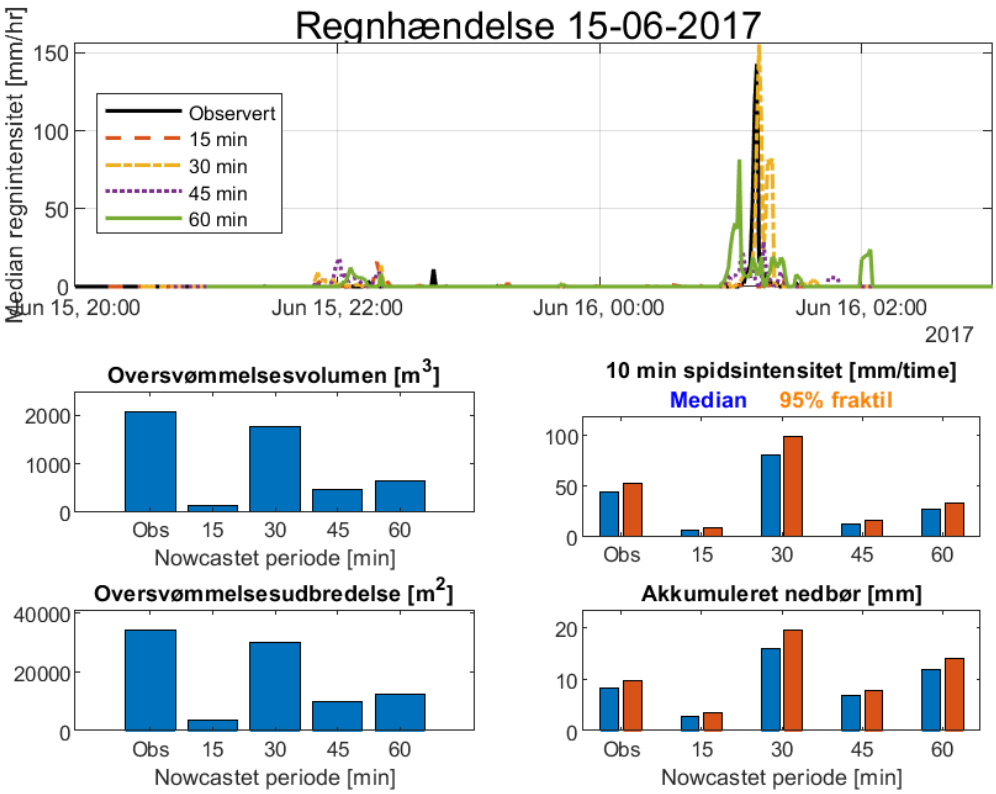


Figur A.4: Oversvømmelsesudbredelse i Kærby og Håndværkerkvarteret, gridstørrelse 10 meter.

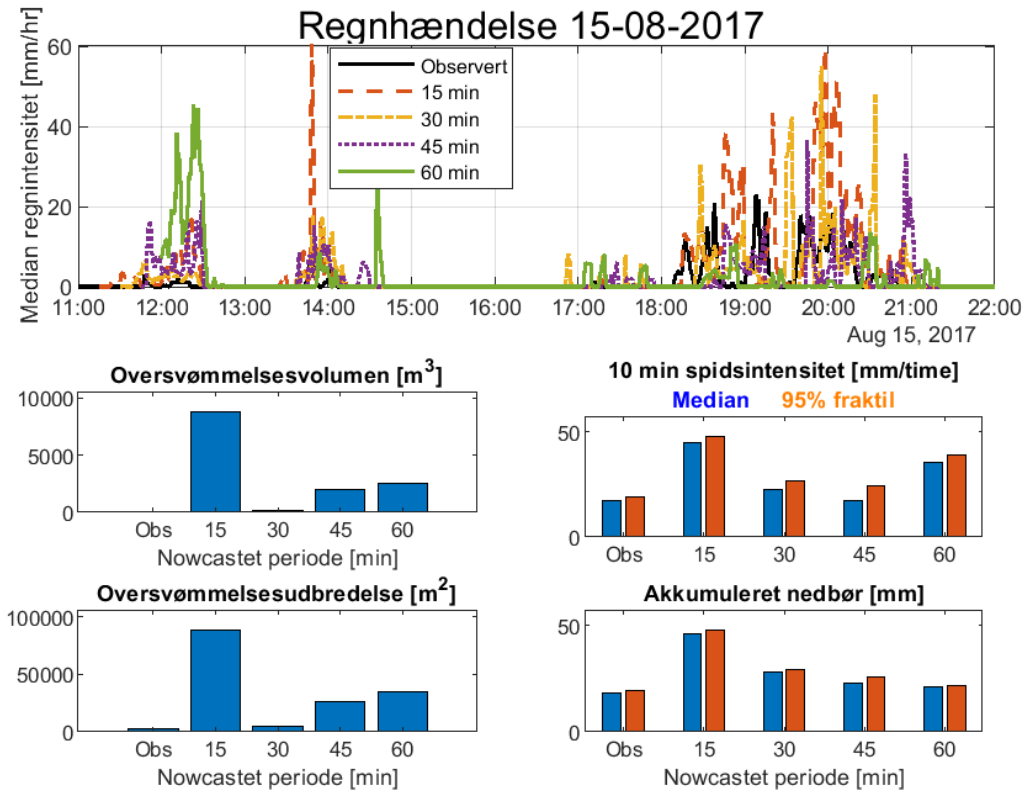
B. Undersøgelse af nowcasts



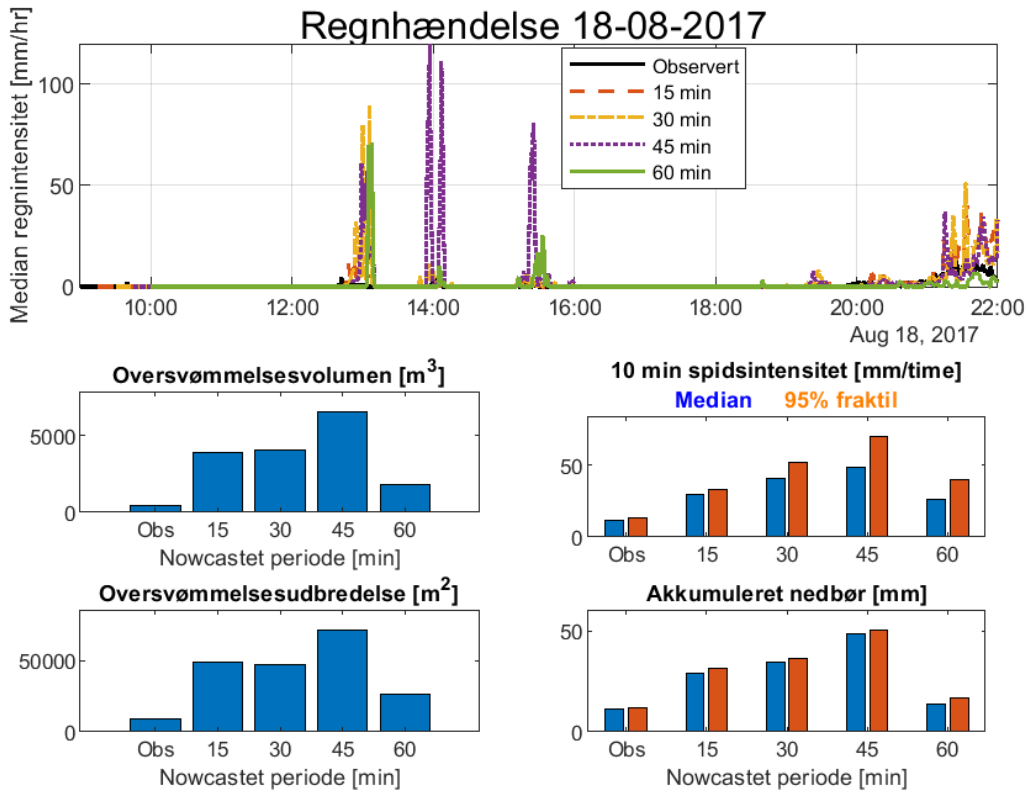
Figur B.1: Undersøgelse af radar nowcasts evne til at forudsige oversvømmelser ved forskellige leadtimes for regnhændelse d. 05-11-2016.



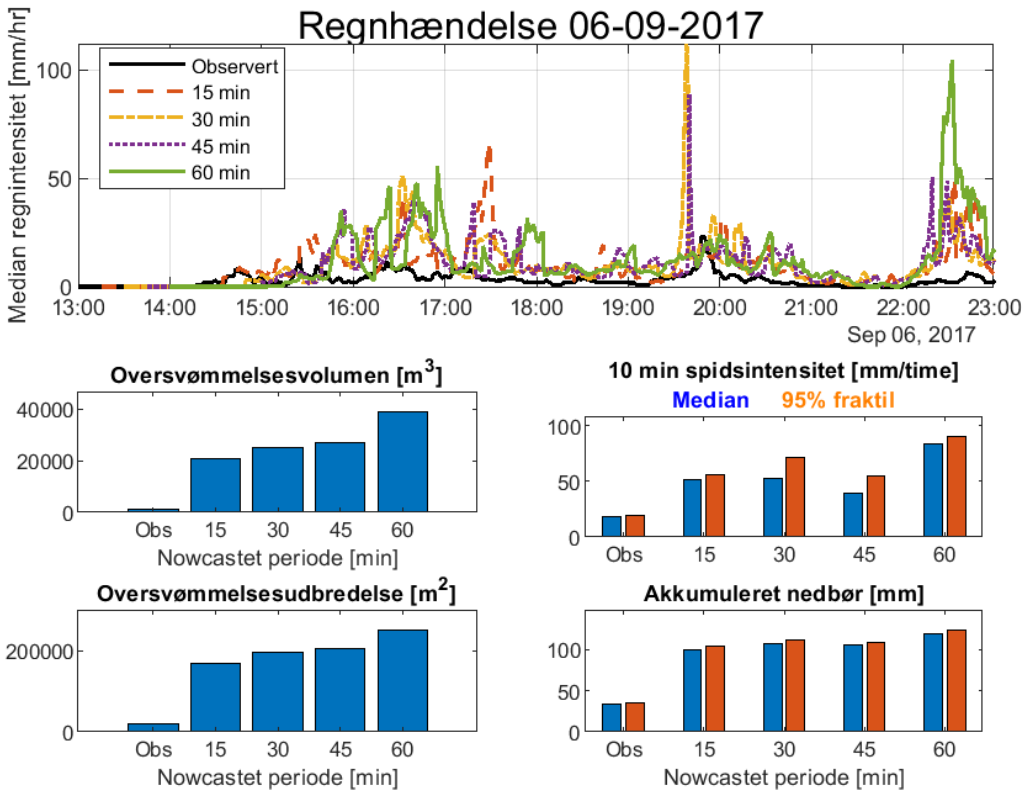
Figur B.2: Undersøgelse af radar nowcasts evne til at forudsige oversvømmelser ved forskellige leadtimes for regnhændelse d. 15-06-2017.



Figur B.3: Undersøgelse af radar nowcasts evne til at forudsige oversvømmelser ved forskellige leadtimes for regnhændelse d. 15-08-2017.

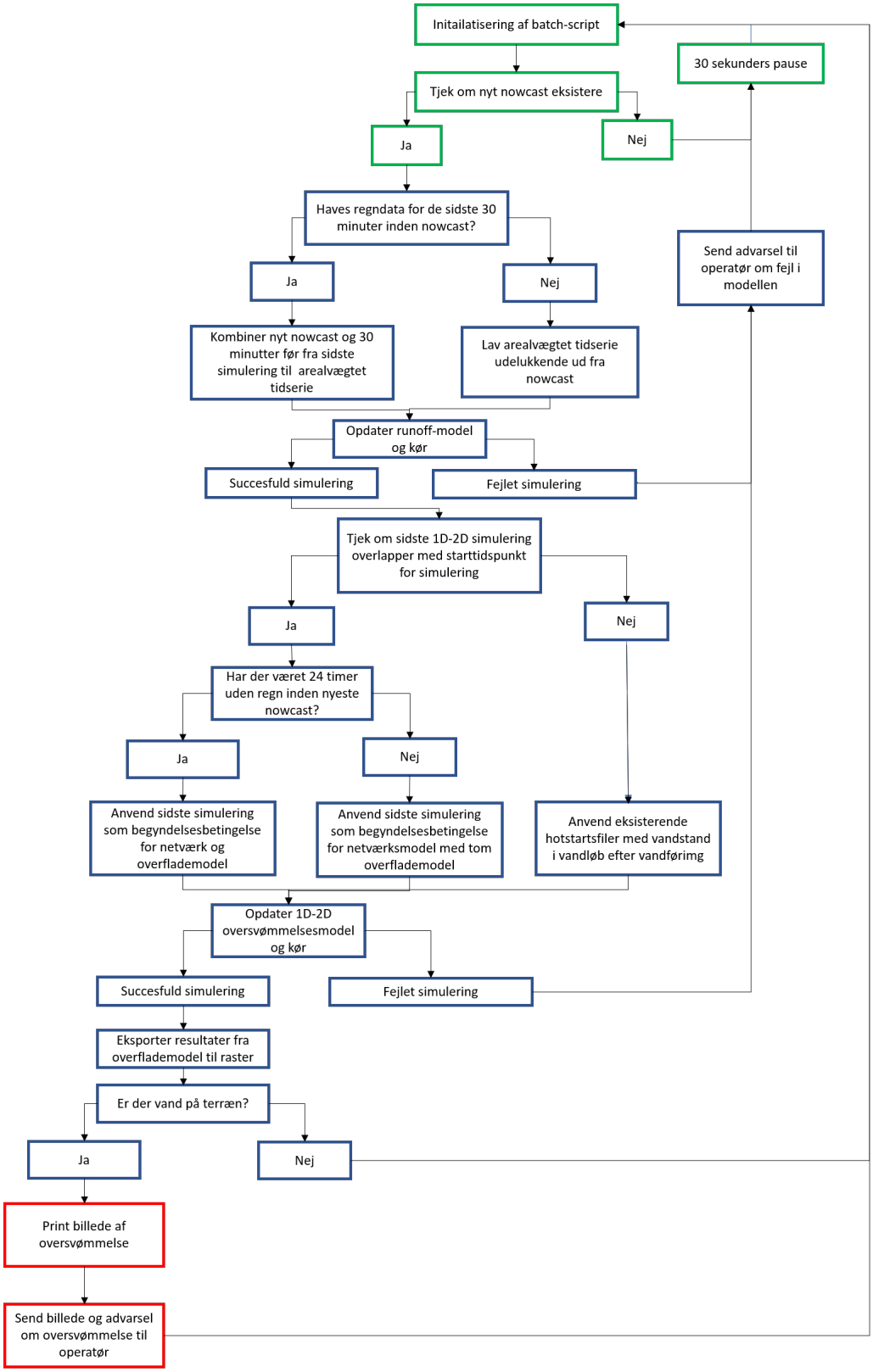


Figur B.4: Undersøgelse af radar nowcasts evne til at forudsige oversvømmelser ved forskellige leadtimes for regnhændelse d. 18-08-2017.



Figur B.5: Undersøgelse af radar nowcasts evne til at forudsige oversvømmelser ved forskellige leadtimes for regnhændelse d. 18-08-2017.

C. Flowchart over opbygning af realtidsmodel



Figur C.1: Flowchart over processer i setup til realtidsmodellering af oversvømmelser i Kærby og Håndværkerkvarteret.

D. Elektroniske appendiks

D.1 Zip-fil med kode og nødvendige filer til realtidsmodel

realtidsmodel.zip