



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

## **Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg**

Thorndahl, Søren Liedtke; Rasmussen, Michael R.

*Publication date:*  
2010

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Thorndahl, S. L., & Rasmussen, M. R. (2010). *Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg*. Department of Civil Engineering, Aalborg University. DCE Technical reports Nr. 95

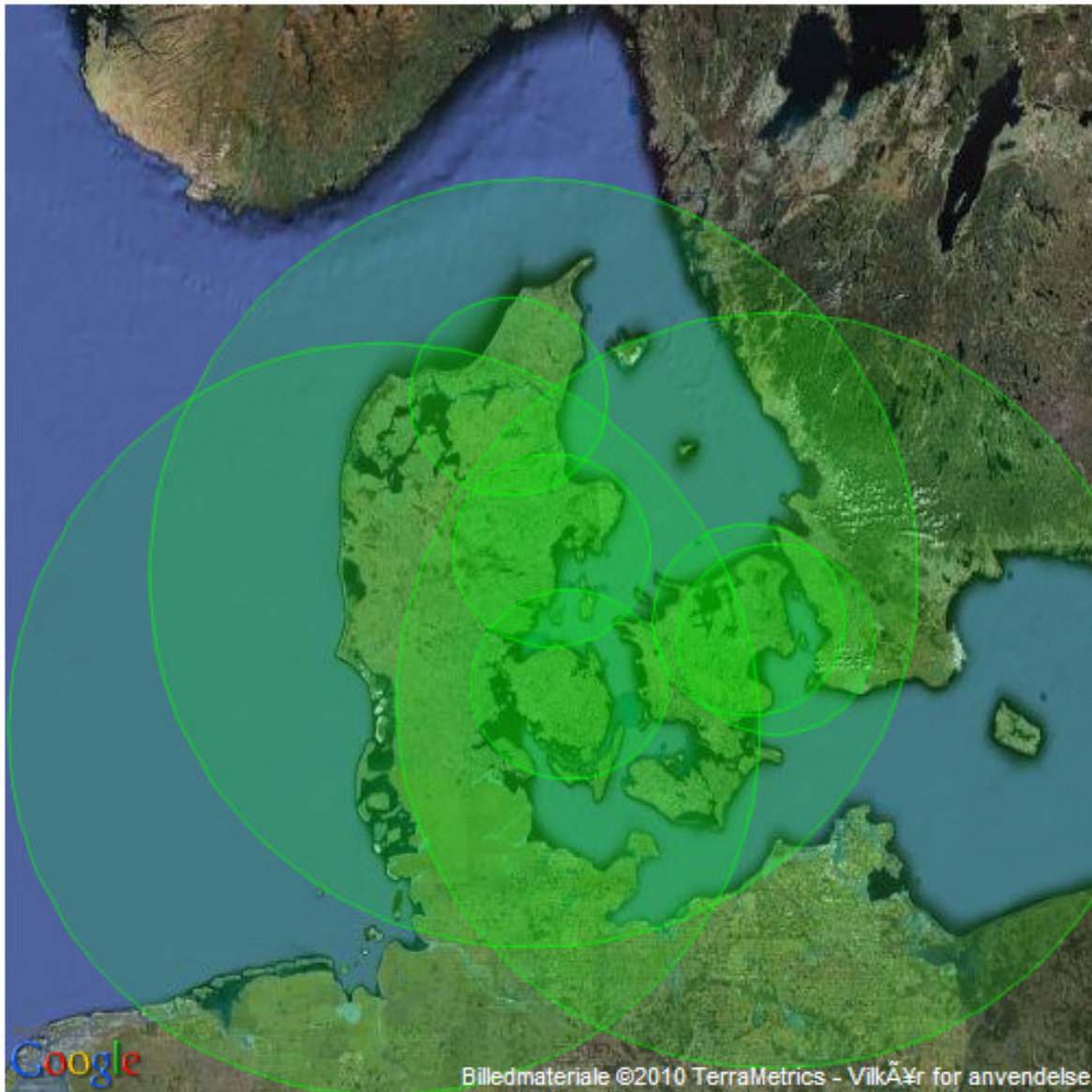
### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



# Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg 2010

Aalborg Universitet  
Institut for Byggeri og Anlæg  
Sektionen for Vand og Jord

**DCE Technical Report No. 95**

# **Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg**

**Aalborg Universitet**

Søren Thorndahl  
Michael Rasmussen

**Krüger A/S**

Sune Neve  
Troels Sander Poulsen  
Morten Grum

Juni 2010

© Aalborg Universitet og Krüger A/S

## Videnskabelige publikationer ved Institut for Byggeri og Anlæg

**Technical Reports** anvendes til endelig afrapportering af forskningsresultater og videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg på Aalborg Universitet. Serien giver mulighed for at fremlægge teori, forsøgsbeskrivelser og resultater i fuldstændig og uforkortet form, hvilket ofte ikke tillades i videnskabelige tidsskrifter.

**Technical Memoranda** udarbejdes til præliminær udgivelse af videnskabeligt arbejde udført af ansatte ved Institut for Byggeri og Anlæg, hvor det skønnes passende. Dokumenter af denne type kan være ufuldstændige, midlertidige versioner eller dele af et større arbejde. Dette skal holdes in mente, når publikationer i serien refereres.

**Contract Reports** benyttes til afrapportering af rekvireret videnskabeligt arbejde. Denne type publikationer rummer fortroligt materiale, som kun vil være tilgængeligt for rekvirenten og Institut for Byggeri og Anlæg. Derfor vil Contract Reports sædvanligvis ikke blive udgivet offentligt.

**Lecture Notes** indeholder undervisningsmateriale udarbejdet af undervisere ansat ved Institut for Byggeri og Anlæg. Dette kan være kursusnoter, lærebøger, opgavekompender, forsøgsmanualer eller vejledninger til computerprogrammer udviklet ved Institut for Byggeri og Anlæg.

**Theses** er monografier eller artikelsamlinger publiceret til afrapportering af videnskabeligt arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg som led i opnåelsen af en ph.d.- eller doktorgrad. Afhandlingerne er offentligt tilgængelige efter succesfuldt forsvar af den akademiske grad.

**Latest News** rummer nyheder om det videnskabelige arbejde udført ved Institut for Byggeri og Anlæg med henblik på at skabe dialog, information og kontakt om igangværende forskning. Dette inkluderer status af forskningsprojekter, udvikling i laboratorier, information om samarbejde og nyeste forskningsresultater.

Udgivet 2010 af

Aalborg Universitet  
Institut for Byggeri og Anlæg  
Sohngårdsholmsvej 57,  
DK-9000 Aalborg, Danmark

og

Krüger A/S  
Gladsaxevej 363  
DK-2860 Søborg

ISSN 1901-726X  
DCE Technical Report No. 95



## Indhold:

<b>1. Forord .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Sammenfatning og konklusioner .....</b>	<b>8</b>
<b>3. Indledning.....</b>	<b>9</b>
<b>4. Fremgangsmåde og metode.....</b>	<b>12</b>
4.1 Dataflow .....	14
4.2 Radarteknologi .....	15
4.2.1 Kalibrering af radar.....	20
4.2.2 Statisk kalibrering af X-bånds radar .....	20
4.2.3 Statisk kalibrering af C-bånds radar .....	22
4.2.4 Dynamisk kalibrering af radar .....	23
4.2.5 Nedbørsprognose.....	24
4.3 WaterAspects .....	29
4.4 Auto-kalibrering .....	31
4.5 Kvalitetssikring af afstrømningsprognoser .....	37
4.6 Brugergænseflade - vejrradarprognose.....	40
4.7 Brugergænseflade – afstrømningsprognose live .....	47
4.8 Brugergænseflade – afstrømningsprognose historisk.....	49
<b>5. Syv cases.....</b>	<b>51</b>
5.1 Aalborg.....	51
5.1.1 Radaropsætning og resultater .....	52
5.1.2 Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler.....	55
5.1.3 Prognosevalidering.....	61
5.1.4 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	63
5.1.5 Vurdering og perspektiver .....	67
5.2 Egedal.....	69
5.2.1 Radaropsætning og resultater .....	69
5.2.2 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	71
5.2.3 Vurdering og perspektiver .....	75
5.3 Hvidovre .....	77
5.3.1 Radar opsætning og resultater .....	77
5.3.2 Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler.....	83
5.3.3 Prognosevalidering.....	90
5.3.4 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	92
5.3.5 Vurdering og perspektiver .....	97
5.4 Odense .....	99
5.4.1 Radaropsætning og resultater .....	100
5.4.2 Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler.....	103
5.4.3 Prognosevalidering.....	109
5.4.4 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	111

5.4.5	Vurdering og perspektiver .....	115
5.5	Slagelse .....	116
5.5.1	Radaropsætning og resultater .....	116
5.5.2	Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler.....	123
5.5.3	Prognosevalidering.....	129
5.5.4	Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	131
5.5.5	Vurdering og perspektiver .....	134
5.6	Tønder .....	136
5.6.1	Radaropsætning og resultater .....	136
5.6.2	Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler.....	140
5.6.3	Prognosevalidering.....	147
5.6.4	Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	149
5.6.5	Vurdering og perspektiver .....	152
5.7	Århus.....	153
5.7.1	Radaropsætning og resultater .....	153
5.7.2	Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler.....	158
5.7.3	Prognosevalidering.....	164
5.8	Opbygning af afstrømningsmodel og resultater .....	166
5.8.1	Vurdering og perspektiver .....	170
<b>6.</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>172</b>
<b>7.</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>178</b>
<b>8.</b>	<b>Perspektiver og anvendelsesmuligheder .....</b>	<b>180</b>

## 1.

**Forord**

Som et led i implementeringen af regeringens handlingsplan om miljøeffektiv teknologi, blev der i efteråret 2007 under Miljøstyrelsen Virksomhedsordning afsat midler til fremme af miljøeffektiv teknologi. Et af Virksomhedsordningens tre fokusområder var håndteringen af ekstremregn og vandudledning i byer, og under disse rammer blev nærværende projekt blev iværksat.

Første fase af projektet ”**Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg**”, blev igangsat i starten af 2008 ved blandt andet ved hjælp af støtte fra By- og Landskabsstyrelsen og deltagerne på dette tidspunkt bestod af:

Krüger A/S  
Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg  
Aalborg Kommune, Kloakforsyningen  
Århus Kommune, Vand og spildevand  
Vestforsyning, Holstebro  
Odense Vandselskab  
Hvidovre Vandforsyning

Med udgangspunkt i aktuelle problemstillinger hos de fem deltagende forsyningsvirksomheder, blev der i denne fase af projektet arbejdet med at opsætte et realtidssystem til forudsigelse af nedbør og afstrømning i oplandet.

I løbet af et års tid lykkedes det således at få opstillet et realtidssystem, men det stod også klart at det ville blive nødvendig med yderligere udbygning af systemet før forudsigelsen af afstrømning kunne opnå en den ønskede kvalitet, og dermed anvendes i styringsstrategier.

På baggrund af denne erkendelse blev fase 2 af projektet startet op i 2009, og her blev systemet udbygget til at kunne opdatere sine modelberegninger ved hjælp af aktuelle målinger. I fase 2 deltog følgende:

Krüger A/S  
Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg  
Aalborg Forsyning, Kloak A/S  
Århus Vand A/S  
VandCenter Syd as  
Hvidovre Forsyning A/S  
Tønder Forsyning A/S  
SK Spildevand A/S  
Egedal Forsyning A/S

På sigt er det påtænkt at realtidssystemet kan indbygges i styringsstrategier med henblik på at reducere aflastninger til recipienterne, samt at sikre en optimal rensning af spildevandet.

Krüger A/S har i projektet haft ansvar for projektledelsen og arbejdet med afstrømningsprognosen. Aalborg Universitet har været ansvarlig for radar prognose/teknologi, mens forsyningsselskaberne har defineret de aktuelle problemstillinger og været behjælpelig med opstilling af datagrundlaget.

Teknologien som er udviklet under dette projekt må betragtes som banebrydende inden for spildevandsbranchen i Danmark, og kan i dens nuværende form være med til at støtte op om en forbedret håndtering af afstrømning forårsaget af ekstremregn.

Projektet er forløbet i perioden:

Fase 1: 1. januar 2008 til 16. december 2008.

Fase 2: 1. marts 2009 til 17. juni 2010.

---

---

## 2.

### Sammenfatning og konklusioner

Aflastninger af urensset spildevand forårsaget af ekstreme regnhændelser med en kraftig påvirkning af vandmiljøet til følge kan formindskes. Dette kan ske ved udbygning af afløbssystem og spildevandsanlæg og/eller ved at optimere driften af de eksisterende systemer. Ved at måle den stedlige fordelte nedbør over byen og bruge denne viden til at lave en forudsigelse af tilstrømningen til nøglepunkter i spildevandssystemet muliggøres en bedre styring af afløbssystem og renseanlæg og derigennem reduceres den aflastede mængde.

Projektet har etableret Danmarks første radarbaserede spildevandsprognoser. Der er i projektet opstillet en radarbaseret prognose for flow og/eller niveau ved et punkt i afløbssystemet i syv forskellige byer. Det er lykket at prognosticere regn 1-2 timer frem ved brug af radar målingen og at prognosticere niveau og/eller flow yderligere 1/2-1 1/2 time frem i tiden ved brug af modeller for afløbssystemet. Projektet er i stor udstrækning gennemført ved sammenkobling af eksisterende teknologier. I fire af syv casestudier (Aalborg, Egedal, Odense, Hvidovre) benyttes realtidsdata fra lokale vejrradarer (af DHI typen), mens der i Tønder og Slagelse benyttes realtidsdata fra DMI raderne på henholdsvis Rømø og Stevns. I projektets første fase anvendt Århus deres egen lokale radar, men har pga. nedtagning (flytning) af den lokale radar valgt at anvende DMI radaren i Virring i projektets anden fase.

Resultaterne viser at kombinationen mellem radar og afløbsmodellering fungerer godt. Ligeledes er det fundet at en kontinuert opdatering af både radar og afløbsmodel giver meget bedre resultater i forhold til at kunne forudsige tilstanden i afløbssystemet op til 2 timer frem. Den dynamiske kalibrering gør det muligt at kompensere for nogle af de usikkerheder der naturligt er knyttet til en så kompleks modellering.

Radar baserede prognoser i spildevandssystemer har et stort potentiale i forhold til en optimeret udnyttelse af både afløbssystem og renseanlæg. Ved udnyttelse af potentialet opnås miljømæssige forbedringer af vandkvalitet på en økonomisk fordelagtig måde.

På projektets hjemmesider er der links til de prognoser der er opstillet under projektet:

- radar prognoserne: [www.vejrradar.dk](http://www.vejrradar.dk)
  - flow og niveau prognoserne: <http://regnradar.star2.dk>
-

### 3.

## Indledning

### Baggrund

2006/2007 var et meteorologisk rekordår, hvor mange dele af landet har oplevet store oversvømmelser som følge af ekstremregn. I sommeren 2006 oplevede Aalborg-området to meget kraftige regnhændelser. Den 20/1 2007 oplevede Midt- og Sønderjylland samt Fyn og Sjælland udbredte oversvømmelser som følge af ekstremregn. Således stod hele Vejle Centrum under vand. Senest oplevede Sjælland den 11/8 2007 regnintensiteter, der ikke var målt større de sidste 20 år noget sted i Danmark.

Selvom de konkrete hændelser ikke statistisk kan kobles direkte til klimaændringer er det et bekymrende billede af hvordan den nære fremtid vil se ud. Med forudsigelser fra de fleste klimamodeller om, at vi vil opleve kraftigere ekstrem regn om sommeren er det klart at der skal udvikles strategier for at imødekomme de skadevoldende hændelser.

Med de ekstreme hændelser i 2006/2007 er der kommet øget opmærksomhed på den ekstreme nedbør og at den efterfølgende afstrømning er et reelt problem i vore byer. Denne ekstra opmærksomhed lægger naturligt et pres fra befolkningen på kommunerne om at sikre at gentagelsesperioden for skadevoldende hændelser gøres længere.

Krüger og Aalborg Universitet er centrale partnere bag et større projekt, Storm- and Wastewater Informatics (SWI), under det strategiske forskningsråd, omhandlende styring af afløbssystemer ved hjælp af bla. vejrradar. Fokus i SWI projektet er forskning i nye metoder til optimering af driften af eksisterende spildevandssystemer. Dette projekt adskiller sig fra SWI projektet ved at være målrettet mod udvikling af ny teknologi ved udnyttelse af eksisterende viden og sammenkobling af eksisterende teknologier og er langt mindre grad et forskningsprojekt. Ligeledes vil der først komme resultater fra SWI projektet i løbet af de næste år. Dette projekt støtter derfor op om igangværende arbejde og kunne fungere som teknologikatalysator inden for dette vigtige område.

I dette projekt, som baserer sig på eksisterende viden, er universiteter, rådgivere, vandselskaber og forsyningsvirksomheder gået sammen om at udvikle fremtidens regnstyringssystemer for afløbssystem og spildevandsanlæg. Fokus har været at udnytte den viden der er om måling og forudsigelse af regn ved hjælp af vejrradarer til at forbygge skadevoldende hændelser på ejendom, sundhed og miljø.

Erfaringer fra det første år af drift af systemet har afklaret at det er nødvendigt med en kontinuert opdatering af systemets kalibrering. Dette gøres på

---

vejrradarsiden ved at holde resultater op mod regnmålerdata i realtid og på afløbsmodelsiden ved at sammenholde med målinger af flow og vandstand i afløbssystemet. Det andet år af projektet har fokuseret på at knytte teknologien sammen i et online system og kombinere det med en konstant overvågning.

### **Problemstilling**

Ved ekstreme regnhændelser bliver renseanlægget overbelastet. Konsekvenserne kan i mange tilfælde være kraftig påvirkning af vandmiljøet i form af overløb af urensede spildevand. Dette kan imødekomes ved at kapaciteten udvides gennem udbygning af spildevandsanlæg eller ved at optimere driften af de eksisterende systemer. I mange situationer er en optimering af systemet at foretrække frem for kostbar og besværlig anlægsudvidelse.

Afløbssystemer og renseanlæg er altid dimensioneret til en given maksimal hydraulisk belastning. Under ekstreme regn med gentagelsesperioder større end de dimensionsgivende gentagelsesperioder, overskrides denne kapacitet. I disse situationer står valget mellem at lede mere vand igennem renseanlægget med risiko for at forringe næringsstoffjernelse og slamflugt eller at aflaste direkte til recipienten med risiko for forringelse af vandmiljø og badevandskvalitet.

De væsentligste problemer forbundet med en hydraulisk overbelastning af afløbssystemer og renseanlæg er:

- Aflastning direkte til recipient der fører til:
  - Forringelse af vandmiljø i både nær- og fjernrecipienter
  - Forurening af badevand
- Slamflugt fra efterklaringstanke på renseanlæg med efterfølgende forringet renskapacitet
- Reduceret næringsstoffjernelse

Ved at måle den stedslige fordelte nedbør og prognosticere denne over byen kan der laves en forudsigelse af tilstrømningen til nøglepunkter i afløbssystemet og/eller til renseanlægget. Herved vil bliver det meget nemmere at optimere styringen af afløbssystemet og forbedre kapaciteten af renseanlægget uden at skulle udbygge de fysiske anlæg. Det giver en langt mere fleksibel løsning på kapacitetsproblemet.

---



### **Målgruppe**

Målgruppen for dette projekt er typisk forsyningsvirksomheder og vandselskaber. De har det direkte ansvar for at vores afløbssystemer og renseanlæg fungerer tilfredsstillende. Der er derfor i dette projekt lagt vægt på at involvere forsyningsvirksomheder direkte i arbejdet, for at opnå en så god anvendelse af den nye viden som muligt.

Danmark ligger også i front med udvikling af X-båndsbaseerede lokale vejrradarer og det er nærliggende at forestille sig at dette projekt vil understøtte behovet for flere lokale vejrradarer både i Danmark og i udlandet. Projekter som dette vil derfor bringe dansk kompetence inden for områderne omkring vejrradarstyrede miljøteknologi frem.

I gruppen af forsyningsvirksomheder der har støttet og deltaget i dette projekt, har fem nu etableret lokale vejrradarer og to har valgt at afprøve brugen af data fra en af de landsdækkende DMI radarer.

## 4.

**Fremgangsmåde og metode**

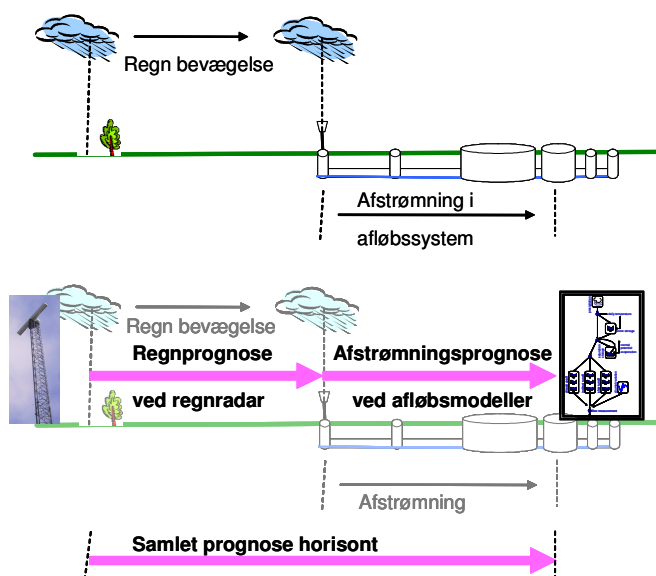
Målet med nærværende projekt er at opbygge et varslingsystem til afløbssystemer og renseanlæg, der udnytter potentialet i vejrradartechnologi til at forbedre drift og kvalitet af spildevandssystemet.

Systemet består af følgende to hovedelementer:

- prognoseværktøj til regn ved brug af radar
- afstrømningsmodel til fremskrivning af den prognosticerede regn

Forudsætningen for en ubemandet realtidsstyring af f.eks. renseanlæg er at systemet er enkelt, hurtigt og robust. Måling af nedbør med vejrradar genererer store mængder af data. Udfordringen er at omsætte disse komplekse og varierende regnmønstre til information som kan bruges til styring.

Regnprognosen baserer sig på nedbørsmålinger foretaget med en lokal vejrradar af LAWR- typen (Local Area Weather Radar) for Odense, Hvidovre, Egedals og Aalborgs vedkomne. Radarerne er placeret i nærheden af de aktuelle oplande. For Tønder, Slagelse og Århus vedkomne anvendes DMI's radarer på hhv. Rømø, Stevns og i Virring. Radarmålingen danner baggrund for en prognose for regnens udbredelse og intensitet op til 1-2 timer frem i tiden. Prognosen skal være i stand til at tage hensyn til de forskellige vejrtyper som er typiske i Danmark. På baggrund af vejrradar målinger genereres kontinuert et usikkerhedsestimat til den videre bearbejdning.



**Figur 4.1.a.**  
Illustration af den samlede prognose horisont bestående af prognose af regnen med radar og prognose af afstrømningsforløbet.

Prognostisering af tilløbet til et punkt i afløbssystemet som for eksempel et bassin eller renseanlæg kræver en omsætning af nedbør til afstrømning, hvor der tages højde for arealfordeling, forsinkelser, overløb, spjæld og pumper i afløbssystemet. Afstrømningsprocessen beskrives gennem en afstrømningsmodel der på en enkel og robust måde beregner regnvandsafstrømningen fra overflader og ledningsnet til renseanlægget. Ved denne fremgangsmåde opnås en håndtering af effekterne af den stedlige varierende nedbør uden brug af detaljeret hydrodynamisk modellering. Fordele ved denne fremgangsmåde er en robust og hurtig metode, som er velegnet til realtidsstyring. Modellerne opstilles på grundlag af oplandsbeskrivelse og ledningsnet, og kalibreres løbende mod målinger i afløbssystemet. Modellen modtager kontinuerligt et nedbørsinput fra ovennævnte nedbørsprognose og opdaterer dermed tilløbsprognosen til renseanlægget eller tilsvarende punkt i afløbssystemet.

I afløbssystemet kan en prognose af tilløbet til forskellige punkter i afløbssystemet for eksempel benyttes aktivt til at styre tømning fra bassiner. Ofte, som for eksempel i Odense, er der endda mulighed for at fordele udpumpning og afstrømning mellem forskellige renseanlæg. Prognoserne for flow til forskellige punkter i afløbssystemet giver mulighed for optimeret forberedelse af bassiner til kommende afstrømning og en optimal belastning af afløbssystemets renseanlæg.

Ud fra tilløbsprognosen får det pågældende styresystem på renseanlægget information om forventet variation i den fremtidige hydrauliske belastning under regnhændelsen. Disse informationer anvendes aktivt i form af en online styring på renseanlægget som er specifikt designet til håndtering af regnhændelser. En særlig problemstilling er hvornår regnstyringen skal aktiveres og afsluttes. Ved at have en prognose på tilstrømningen er det muligt at udnytte rensekapaciteten fuldt ud under hele hændelsen og dermed reducere miljøpåvirkningen af recipienten. Ligeledes mindskes slamflugt fra efterklaringstanken, som er specielt problematiske under ekstreme og uvarslede regnhændelser. Slamflugt kan foruden en akut miljøpåvirkning også resultere i reduceret udløbskvalitet fra renseanlægget i en periode efter hændelsen.

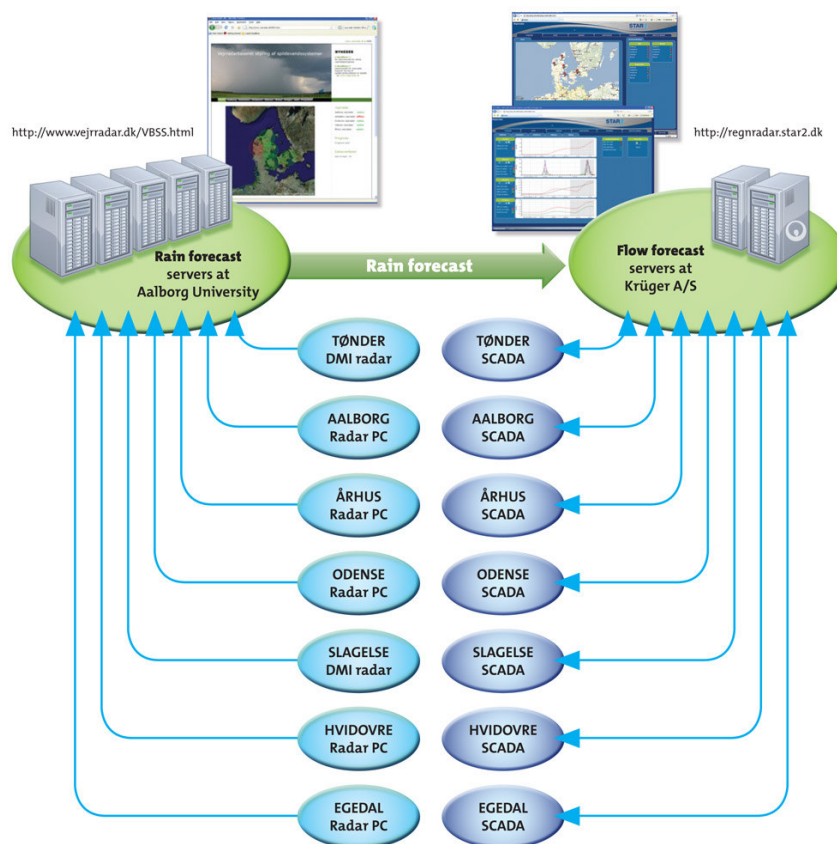
For renseanlæg som i dag ikke anvender regnstyring er det potentielt muligt at forøge den hydrauliske kapacitet med 40 % i gennemsnit. Det anslås at den foreslåede aktive styring med prognosticerede vejrradardata kan forøge denne kapacitet med yderligere 10-15 %. Dette kan reducere behovet for anlægsudvidelser på renseanlægget eller etableringer af forsinkelsesbassiner i oplandet. Gevinsten på styring af afløbssystemer er noget svære at fastlægge men vil typisk ligge på en 0-50 % reduktion i aflastede volumener.

## 4.1

### Dataflow

Nedenfor ses en skematisk illustration af dataflowet fra radarerne til prognosen i spildevandssystemet. Flowet består af følgende trin:

1. Hos AAU indhentes radardata hvert 5. minut via ftp enten direkte eller indirekte fra hver af de lokale vejrradarer. Data gemmes i et arkiv.
2. Hos AAU indhentes regnmålerdata hvert eller hvert andet minut via ftp eller ved direkte kontakt med regnmålerene
3. Radardata bliver hos AAU løbende kalibreret i forhold til online regnmålere ved brug af den dynamiske kalibreringsprocedure.
4. Hos AAU benyttes de seneste radardata til hvert 5. minut at beregne en prognose for regnintensiteten.
5. Hos AAU omregnes prognosen til middelintensiteter for de enkelte deloplande i hvert casestudie og disse prognoser overføres via internettet til server i Krüger, Søborg, hvert 5. minut.
6. Overførsel af data, prognose, mv. overvåges og eventuelle problemer logges.
7. På serveren i Krüger foretages en simulering af afstrømningen ved brug af de prognosticerede regnserier for regn over de enkelte deloplande. Dette sker hvert andet minut idet denne server er baseret på en videreudvikling af STAR2 teknologien der opererer med 2 minutters tidsskridt.
8. Udvalgte måle- og driftsdata fra spildevandssystemernes SRO system sendes ligeledes kontinuert til serveren i Krüger, Søborg.
9. Der er etableret en webside til løbende visning af både målt og prognosticeret radarnedbør for hver casestudie. Adressen er: <http://www.vejrradar.dk/VBSS/VBSS.html>
10. Der er ligeledes etableret en åben web side til løbende visning af radar baseret prognose af flow/niveau i afløbssystemet eller ved tilføjet til renseanlægget. Adressen er: <http://regnradar.star2.dk>



**Figur 4.1.b**  
 Skematisk illustration af dataflow fra radar til prognose i spildevandssystem.  
 Se beskrivelse i teksten.

## 4.2

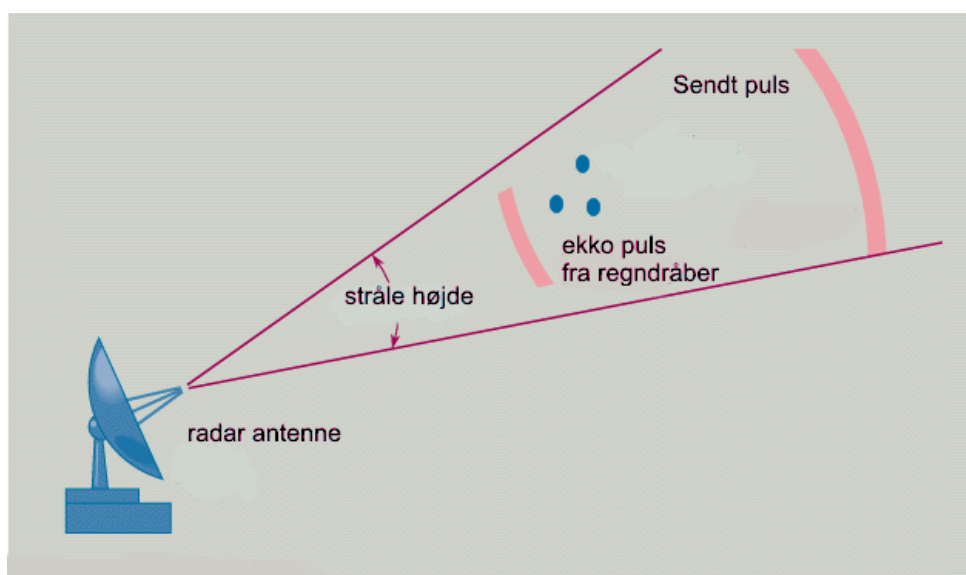
### Radarteknologi

#### *Oprindelse af vejrradar*

Nedbør måles traditionelt med vippekar-regnmålere. Disse er en international standard for nedbørsregistrering. Den ingeniørmæssige praksis i afløbsteknikken er derfor i stort omfang blevet baseret på denne type regnmåler og en tilhørende antagelse om at disse er repræsentative for et større areal. Vejrradar blev som meteorologisk måleinstrument anvendt i slutningen af 40'erne. Opdagelsen under anden verdenskrig var at nedbør forhindrede radaren i at se skibe og fly. Dette forhold blev senere brugt til at studere hvordan regn dæmper radarsignalet gennem atmosfæren. Det var derfor ikke langt til at bruge denne teknologi til at studere hvor meget nedbør der er i atmosfæren og dermed også hvor meget det regnede. Siden 1980'erne er vejrradar blevet standard inden for de meteorologiske tjenester. De sidste 10 år er anvendelse af vejrradar inden for afløbsteknikken været genstand for stigende interesse inden for forskningen (Einfalt et al, 2004).

### Teknikken bag vejrradar

Skønt der i dag findes mange forskellige typer af vejrradar er de grundlæggende principper stadig de samme. Radaren udsender gennem en retningsspecifik antenne en meget kortvarig puls af elektromagnetisk stråling, figur 4.2.a. Når pulsen rammer regndråber vil noget af strålingen blive reflekteret tilbage mod radaren. Ved at måle hvor lang tid der går fra at pulsen er afsendt til at ekkoet kommer tilbage kan man beregne afstanden ud til regnskyen. Da antennes retning også registreres er det dermed mulig at bestemme den præcise position hvor det regner. Når styrken af ekkoet også måles kan man estimere hvor mange dråber der er inden for målevolumenet. Da radar antennen har begrænset vinkelåbning vil det volumen der måles over blive større des længere væk det er fra radaren. Derfor betyder antennes vinkelåbning meget for hvor fin en opløsning der kan måles i.

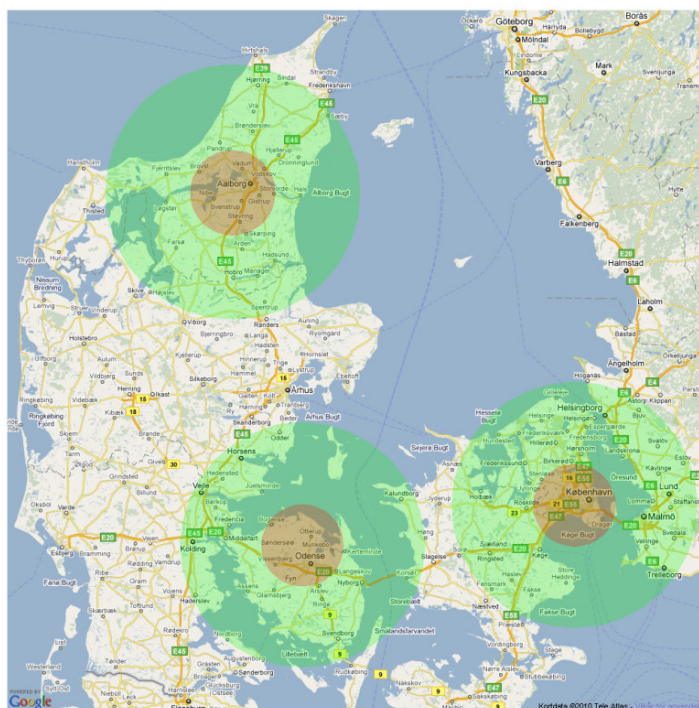


**Figur 4.2.a**  
Princip ved måling af nedbør med radar, (figur modificeret fra Encyclopedia Britannica, 1994).

I dette projekt anvendes en kombination af X-bånd og C-bånds radarer. C-bånd bruges typisk af de større meteorologiske radarer (som f.eks. DMI), mens X-bånd er blevet populært til de mindre og billigere lokale radarer. X-bånd kan måle med høj geografisk opløsning, men er udsat for kraftig dæmpning gennem regnen. C-bånd er kun påvirket af regn i mindre grad – til gengæld er den geografiske opløsning mindre. Under alle omstændigheder skal begge typer af radar justeres i mod kendt nedbør, f.eks. målt af vippekars regnmålere. Der er også forskel i måleperioden mellem de to typer af radarer. C-bånds radaren anvendt i dette projekt tager et øjeblikksbillede hvert 10. minut, men X-bånds radaren typisk midler målingen over 5 minutter

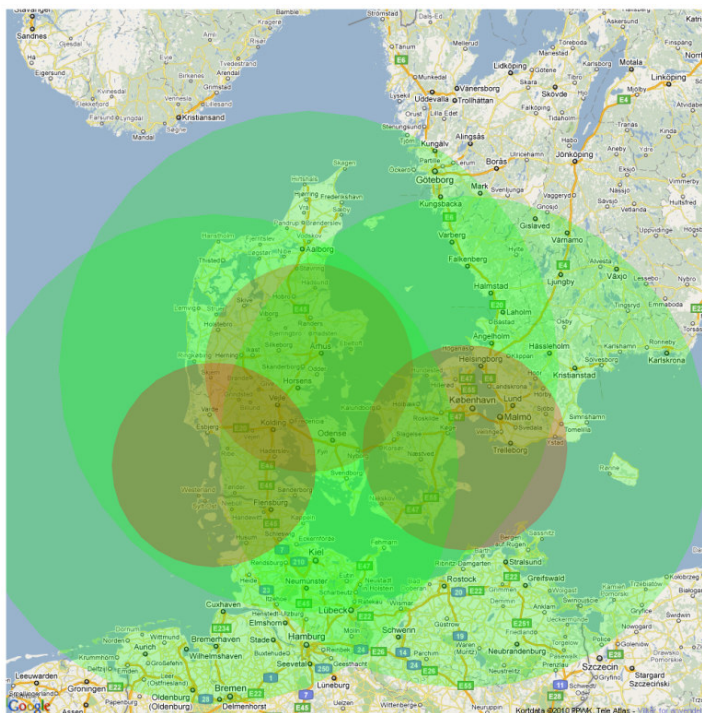
### Radar dækningsområde

Der indgår otte radarer i dette projekt. Deres indbyrdes placering, maksimale rækkevidde og rækkevidde for kvantitativ måling af nedbør er vist på figur 4.2.b og 4.2.c. De lokale radarer, figur 4.2.b er angivet med grønt og cirkelens radius visere deres maksimale rækkevidde på 60 km, samt en rød cirkel (15 km) som angiver det område hvor der kvantitativt kan måles nedbør. Udenfor det røde område kan der stadig måles nedbør men prædiktionen af intensitetsniveauerne er noget usikker. Der også opstillet lokale radarer i Århus og Egedal, men disse har ikke været operationelle i projektets anden fase. DMI's radarer, figur 4.2.c, har en rækkevidde på 240 km og kan måle kvantitativt ud til ca. 100 km.



**Figur 4.2.b**  
Placering, maksimal rækkevidde (grønt område) og rækkevidde for kvantitativ måling af nedbør (rødt område) for X-bånds radarer ejet af forsyningerne.





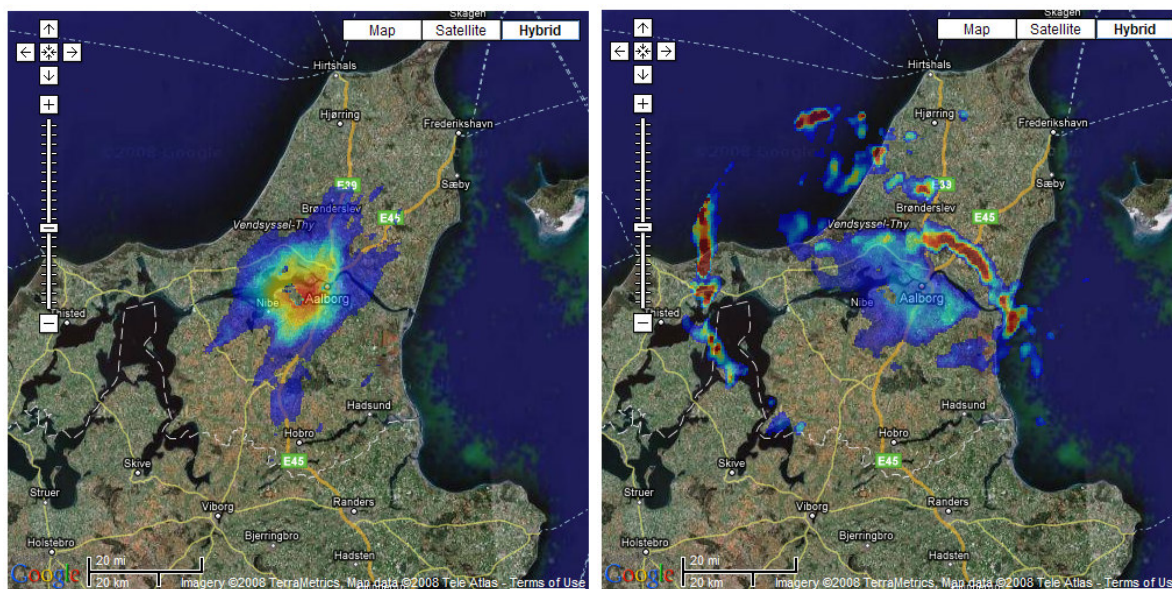
**Figur 4.2.c**  
**Placering, maksimal rækkevidde (grønt område) og rækkevidde for kvantitativ måling af nedbør (rødt område) for C-bånds radarer ejet af DMI.**

Det er af betydning for radarforudsigelsernes kvalitet hvor langt væk fra radarmålingerne kan antages at være præcise. Hvis regnen f.eks. bevæger sig med 10 m/s, vil de 15 km rækkevidde have passeret radaren på 25 minutter. For forudsigelser længere frem end 25 minutter er data således baseret på mindre nøjagtige målinger. De to systemer opererer med forskellig stedlig opløsning. De lokale radarer opererer med en opløsning på 500 x 500 meter. Mens DMI's radar opererer med en opløsning på 2000 x 2000 meter. Ud over forskellen i opløsning, er antennedesignet også væsentlig forskellig, figur 4.2.d. DMI's radar benytter sig af en parabol med en symmetrisk stråle på 1° åbning. De lokale radarer benytter sig af en asymmetrisk antenne hvor den horisontale åbningsvinkel er 1°, mens den vertikale åbningsvinkel er +/- 10°. Det betyder for de lokale radarer at den øverste del af strålen bryder ud af skydækket relativt tæt på radaren. For konvektive regnskyer (tordenbyger) med en skyhøjde op til 10 km er dette uden betydning. Men for lavthængende stratiforme regnskyer kan det betyde at målingen ikke er optimal.



**Figur 4.2.d**  
 Eksempel på C-båndsradar (Sindal) med parabol antenne og X-båndsradar (Aalborg) med slotted array antenne.

Det er for figur 4.2.e klart at i perioder med lavthængende skyer der giver en fin regn, kan det være vanskeligt at måle med stor præcision, mens perioder med kraftige byger er bedre bestemt med den lokale radars anten- nede- design.



**Figur 4.2.e**  
 Eksempel på vejr-situation, hvor skyhøjden er lav og tæt på jorden (stratiform) og en vejr-situation hvor sky højden er høj og bygepræget (konvektiv).

Dette præger naturligt den kvalitet der er mulig at forvente for prognosemo- dellens i perioder med lavthængende stratiform regn. Det er en problemstil- ling, der kræver yderlig forskning og udvikling for at løse. På den mere po- sitive side er det sjældent de lavt hængende regnsystemer der giver anled- ning til problemer i afløbssystemerne i praksis.

#### 4.2.1

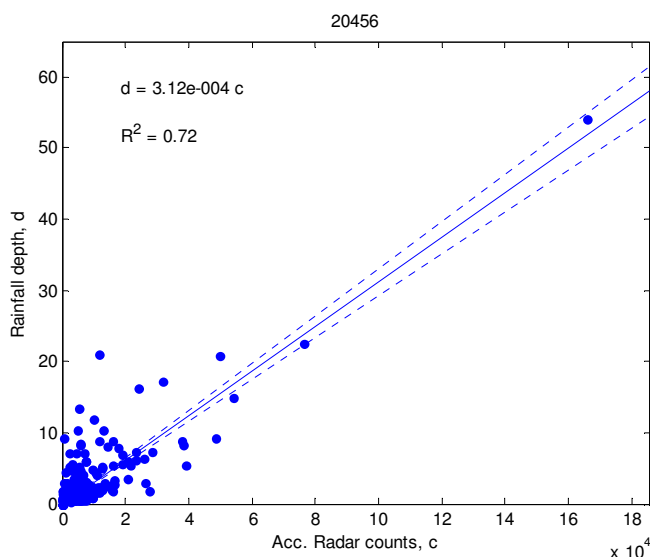
##### **Kalibrering af radar**

For at radarens reflektivitet kan omsættes til regnintensitet skal den kalibreres imod et antal regnmålere placeret inden for radarens rækkevidde. De lokale X-bånds radarer og DMI's radarer kalibreres på forskellige måder, hvorfor kalibreringen beskrives i to forskellige afsnit. Disse typer kalibrering kaldes i dette projekt bliver for *statisk kalibrering*, dvs. en kalibrering som ikke ændres i tiden. Den bygger derfor på flere måneders data og anvendelsen af kalibreringen giver resultater som, når man ser på en længere periode, passer godt. Problemet ved at anvende en statisk kalibrering er at denne ikke, som det ligger i navnet, ændres som funktion af nedbørstypen eller udbredelsen af nedbøren. Det betyder at radaren nogle gange overestimerer nedbørsintensiteterne og andre gange underestimerer, selvom den i middel observerer det sammen som regnmålerne. For at håndtere dette problem er den *dynamiske kalibrering* implementeret. Denne bygger på de regnintensiteter der er prædikeret ved brug af den statiske kalibrering kontinuert justeres i forhold til et antal online regnmålere placeret tæt på det opland der modelleres i projektet. Således kan regnintensiteterne estimeres mere korrekt end hvis den statiske kalibrering udelukkende havde været anvendt. Dette betyder ikke, at der skal være registreret regn i online regnmålerne, for at radaren kan prædikere regnintensiteter, i dette tilfælde anvendes den statiske kalibrering, men når der er registreringer i online regnmålerne initieres den dynamiske kalibreringsprocedure.

#### 4.2.2

##### **Statisk kalibrering af X-bånds radar**

I X-bånds-radarerne omsættes radarens reflektivitet til en 8 bit-værdi, dvs. et såkaldt radarcount mellem 0 og 255. Det er denne værdi der igennem kalibreringen skal omsættes til en regnintensitet. Dette gøres ved at udtrække data fra den pixel á 500 x 500 m som svarer til placeringen af en regnmåler og herefter plotte akkumulerede radarcounts pr. hændelse mod akkumulerede mm pr hændelse i den pågældende regnmåler. Herefter gennemføres en lineær regression for at finde den bedste rette linie gennem de observerede punkter, figur 4.2.2a



**Figur 4.2.2a. Eksempel på lineær regression mellem regndybde observeret i regnmåler og radarcounts. Aalborg vejrradar og regnmåler 20456, Frejlev Syd. Stiplede linier angiver 95 % konfidensintervallet for den bedste rette linie.**

X-bånds-radaren har en forholdsvis stor åbningsvinkel på 10 grader – hvilket vil sige at det volumen af atmosfæren som skannes bliver større og større som funktion af afstanden fra radarens origo. Det betyder, at signalet tilsvarende skal forstærkes mere og mere for at få det samme output fra radaren. Dette er den såkaldte afstandskorrektion. Denne afstandskorrektion gennemføres normalt i radarens hardware, men da indstillingen af de tre X-bånds radarer i dette projekt er forskellig, er det valgt at gennemføre afstandskorrektionen som en del af post-processering af data, og dermed som en del af kalibreringen. I praksis gennemføres afstandskorrektionen ved at plote hældningerne fra de lineære regressioner som funktion af regnmålerens afstand til radaren. Herefter approksimeres en eksponentialfunktion punkterne, jf. eksemplet i figur 4.2.2.b

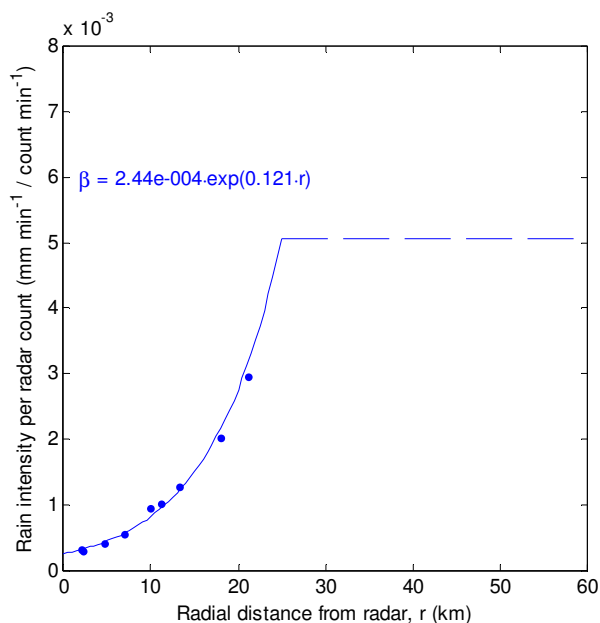
Omregningen fra radarcounts til regnintensitet kan derfor beskrives ved følgende udtryk (Thorndahl og Rasmussen, 2009a + 2009b):

$$i_{i,j} = c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot r) \cdot c_{i,j}$$

eller

$$i_{i,j} = \beta_{\text{stat}}(r) \cdot c_{i,j}$$

Hvor  $i$  er regningensiteten,  $c_1$  og  $c_2$  er fittede konstanter,  $r$  er afstanden fra radaren,  $c$  er radar-count- værdien,  $\beta_{\text{stat}}$  er den statiske kalibreringsfaktor og index  $i, j$  svarer til de enkelte radar pixels.



**Figur 4.2.2b: Eksempel på afstandskorrektion af radardata, Aalborg vejrradar**

Som det fremgår af eksemplet i figur 4.2.2b anvendes afstandskorrekturen ikke i hele radarens rækkevidde, men kun inden for det område hvor nedbøren kan bestemmes kvantitativt. I eksemplet er denne værdi sat til 25 km.

### 4.2.3

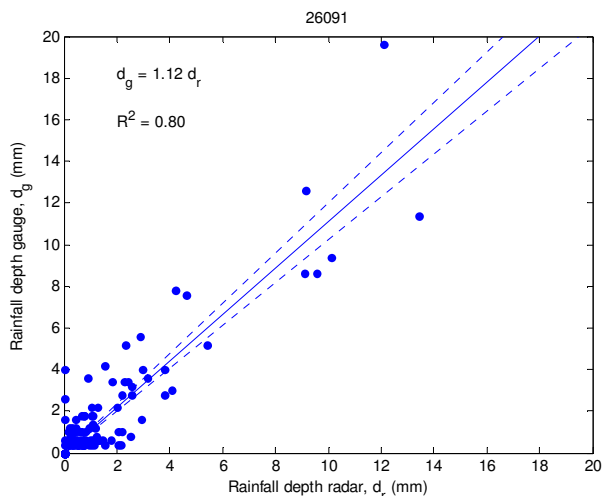
#### Statisk kalibrering af C-bånds radar

Modsat X-bånds-radarene er outputtet fra C-bånds radarene ikke radarcounts, men reflektivitet ( $Z$ ), dette betyder at kan anvende den såkaldte Marshall-Palmer kalibreringsmetode til at fastsætte regnintensiteter på baggrund af radarens reflektivitet (Rinehart 2004):

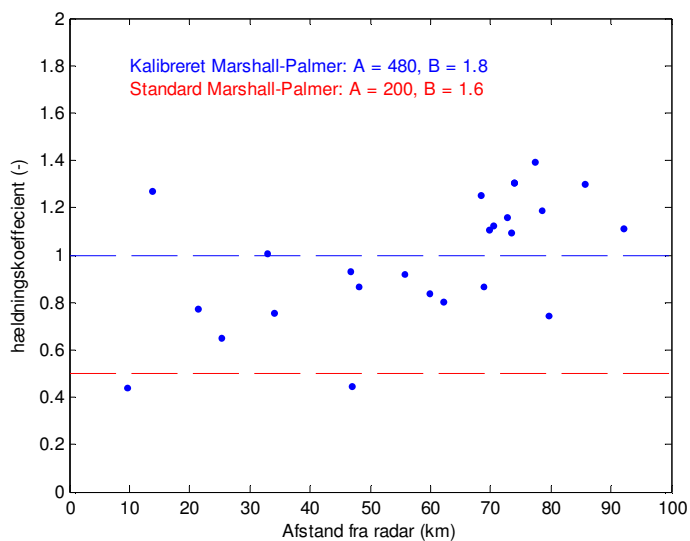
$$Z = A \cdot R^B$$

hvor  $Z$  er reflektiviteten,  $R$  er regnintensiteten og  $A$  og  $B$  er de såkaldte Marshall-Palmer konstanter. Under danske forhold har det vist sig at værdierne  $A = 200$  og  $B = 1.6$  giver fornuftige resultater (Overgaard, 2004, Rinehart 2004). Anvendes denne kalibreringsmetode kan der laves et plot som vist på figur 5.2.3a, hvor regndybden pr hændelse, observeret i en regnmåler, plottes mod den tilsvarende regndybde observeret i radaren i den radarpixel á  $2 \times 2$  km, hvor regnmåleren er placeret. Dette gøres for alle regnmålere, der er placeret inden for den kvantitative rækkevidde af radaren (100 km), således at hældningerne på regressionslinierne kan plottes som funktion af afstanden fra regnmålere til radar, som vist i eksemplet på Figur 5.2.3b. Herefter justeres Marshall-Palmer konstanterne således at

middelværdien af hældningskoefficienterne giver 1 – dvs. at radar og regnmålere i gennemsnit giver den samme regndybde.



**Figur 4.2.3a. Eksempel på lineær regression mellem regndybde observeret i regnmåler og regndybde beregnet ud fra radarens reflektivitet vha. Marshall-Palmers konstanter. Virring-radar. Stiplede linier angiver 95 % konfidensintervallet for den bedste rette linie.**



**Figur 4.2.3b: Eksempel på bestemmelse af Marshall-Palmer konstanter. Virring radar.**

#### 4.2.4

##### Dynamisk kalibrering af radar

Den dynamiske kalibrering foretages på samme måde for både X- og C-bånds radarer. Kalibreringsfaktoren bestemmes ved at beregne forholdet mellem den gennemsnitlige regnintensitet observeret i online-regnmålerne

pr. tidsskridt og den gennemsnitlige regnintensitet i de tilsvarende radarpixels pr. tidsskridt:

$$\beta_{dyn}(t) = \frac{\left(\sum_{g=1}^G i_g(t)\right)/G}{\left(\sum_{g=1}^G i_r(t)\right)/G}$$

Hvor  $\beta_{dyn}(t)$  er den dynamiske kalibreringsfaktor,  $G$  er antallet af regnmålere,  $i_g$  er regnintensiteten i regnmåler  $g$ ,  $i_r$  er regnintensiteten i den radarpixel som den aktuelle regnmåler er placeret i - bestemt med den statiske kalibrering. Er der ingen input i online-regnmålerene er  $\beta_{dyn}=1$ . Således kan intensiteterne i hele radarens udbredelsesområde bestemmes ved for X-bånds radarenes vedkomne:

$$i_{i,j} = \beta_{stat}(r) \cdot \beta_{dyn}(t) \cdot c_{i,j}$$

og for C-bånds radarene:

$$i_{i,j} = (Z_{i,j}/A)^{(1/B)} \cdot \beta_{dyn}(t)$$

I løbet af projektet er der eksperimenteret lidt med en tidlig midling af den dynamiske kalibreringsfaktor, idet der blev observeret nogle urealistiske korrektioner som følge af en dynamisk kalibrering baseret på hvert tidsskridt (5 min for X-bånd og 10 min for C-bånd). Den ideelle tidlige midling blev fundet til at være over 4 tidsskridt. I afsnit 5.4.2 er der beskrevet et eksempel hvor den dynamiske kalibrering gennemføres både med og uden tidlig midling.

Eksempler på både statisk og dynamisk kalibrering ses i beskrivelsen af de enkelte kommuner.

#### 4.2.5

##### Nedbørsprognose

Første fase af nærværende projekt er gennemført med to forskellige prognosemodeller for nedbøren (Thorndahl et al, 2009). Begge modeller bygger på et ekstrapoleringsprincip. Populært sagt betyder det at man følger hvor regnen er på vej hen og derefter antager at regnen vil følge samme rute i den nærmeste fremtid (dvs. de næste 1-2 timer). Den første model *Global Vector (GV)* er anvendt i startfasen af første fase - primært for at opsætte og teste hele data-infrastrukturen, dvs. import af data fra de enkelte radarer, lagring af data, processering af data og eksport af data til afstrømningsmodellen hos Krüger. Efter denne infrastruktur faldt på plads, blev den anden metode *CO-TREC* implementeret online: Her i anden fase af projektet er kun CO-TREC metoden anvendt.



### Global Vector (GV)

I denne model bestemmes en global vektor (se figur 5.2.5.b) ud fra den maksimale korrelation mellem to på hinanden følgende radarbilleder. Korrelationen  $\gamma(x,y)$  bestemmes ud fra følgende formel, hvor  $O(x,y)$  angiver en observeret radarpixel. Index 1 og 2 angiver to på hinanden følgende radarbilleder (Van Horne 2003):

$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O_1(x, y) - \bar{O}_1) \cdot (O_2(x - n, y - m) - \bar{O}_2)}{\sqrt{\left( \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O_1(x, y) - \bar{O}_1) \right)^2 \cdot \left( \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O_2(x - n, y - m) - \bar{O}_2) \right)^2}}$$

hvor  $n$  og  $m$  er forskydningen af et antal pixels og stegen  $O$ 'erne over indikerer middelværdier

Det seneste radarbillede kan når den globale vektor er fundet ekstrapoleres lineært (linear forward advection) et antal tidsskridt ud i fremtiden. Modellen er derfor udelukkende en parallelforskydning af det oprindelige radarbillede.

GV-modellen er ikke anset for særlig pålidelig, da den ikke tager højde for forskellige strømningshastigheder og rotationer i nedbørsfeltet. Desuden er modellen meget påvirkelig overfor støj i billederne (clutter), da disse vil påvirke den maksimale korrelation mellem to radarbilleder. Hvilket i nogle tilfælde fører til at den globale vektor ikke kan bestemmes eller at denne får en urealistisk størrelse eller retning. For i nogen grad at reducere denne usikkerhed er der indført en tærskelværdi, således at de laveste værdier frasorteres inden korrelationsberegningen.

### CO-TREC

CO-TREC-modellen (Continuous-TREC, Mechlenburg 2000; Li et al 1995) er baseret på den såkaldte TREC-model, *Tracking of Radar Echoes with Correlation*, Rinehart og Garvey (1978) og Li et al. (1995). Den baserer sig også på korrelationen mellem radarbilleder, men i modsætning til GV-modellen deles radarbilledet op i mindre områder og korrelationen findes for hvert delområde radarbillederne imellem. Det er hermed muligt at finde et vektorfelt for nedbørens bevægelse, når ovenstående formel anvendes på mindre områder.

Inden det lokale vektorfelt findes foretages en udglatning (glidende gennemsnit) af radarbillederne, således det værste støj midles ud. Liu (2008) har for X-bånds-radardata eksperimenteret med flere forskellige typer udglatning (*smoothing*) af radarbillederne og fundet en optimal størrelse af

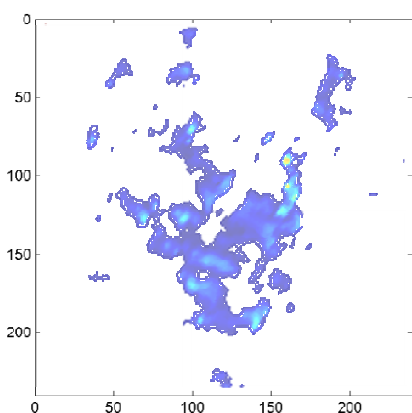
den boksstørrelse hvori udglatningen foretages. Som det kan ses i eksemplet på figur 4.2.5.c kan de lokale TREC-vektorer, på trods af udglatningen, være behæftet med en del støj, dels på grund af eventuel støj mellem radarbillederne, og dels da der i periferien af radarbilledernes udbredelse kan være observeret nedbør i et billede, men måske ikke i det næste. Derfor implementeres CO-TREC-modellen (figur 4.2.5.d), som ensretter de lokale vektorer ved at minimere følgende funktion (Li et al 1995):

$$J(u, v) = \int \left( (u(x, y) - u_0(x, y))^2 + (v(x, y) - v_0(x, y))^2 \right) dx dy$$

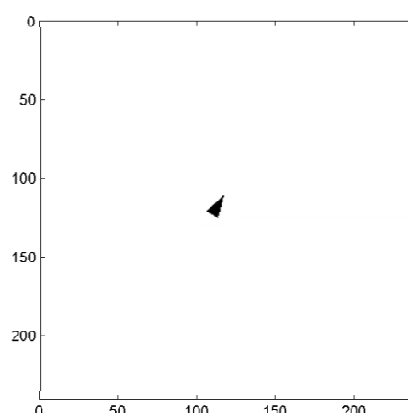
Hvor  $u_0(x, y)$  og  $v_0(x, y)$  er de bestemte TREC-hastigheder i begge retninger og  $u(x, y)$  og  $v(x, y)$  er CO-TREC-hastighederne. Desuden sikres kontinuitet i bevægelsesfeltet ved at sikre at følgende funktion er overholdt (Li et al 1995):

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} = 0$$

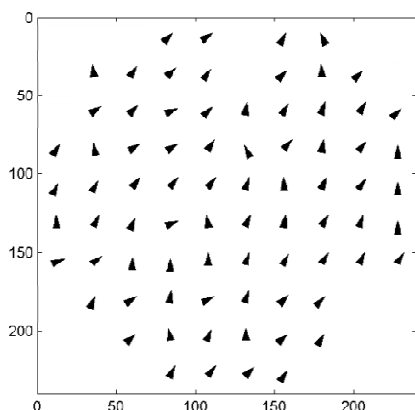
Liu (2008) har ligeledes analyseret en lang række nedbørshændelser og fundet et optimalt parametersæt for dette ensretningsinterval. Ud fra det fundne CO-TREC-vektorfelt ekstrapoleres radarbillederne ved hjælp af en såkaldt linear backward advection metode, som fungerer ved at første tidskridt i prognosen genereres ved at ekstrapolere det seneste radarbillede med CO-TREC-vektorfeltet. Andet tidsskridt ekstrapoleres så det genererede billede med vektorfeltet, og sådan fortsættes prognosen i et specificeret antal tidsskridt.



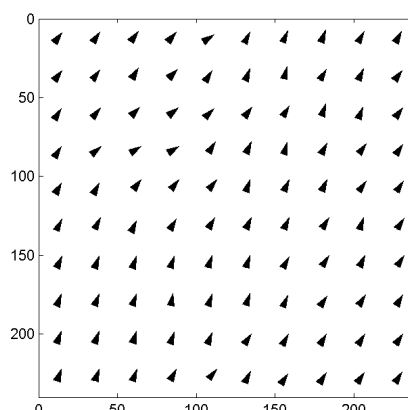
Figur 4.2.5.a Eksempel på radarbillede



Figur 4.2.5.b Eksempel på den globale vektor



Figur 4.2.5.c Eksempel på TREC-vektorer



Figur 4.2.5.e Eksempel på CO-TREC-vektorer

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

### Evalueringsmål

I prognoser for nedbør baseret på radardata er det vigtigt af have nogle repræsentative mål for hvor godt prognosen præsterer i forhold til observationer. Der findes en helt række af forskellige typer af sammenhængsmål anvendt indenfor meteorologien og radarteknologien, og i dette projekt er der valgt tre mål som repræsenterer tre forskellige situationer. Det er både interessant at vide hvor god sammenhængen mellem observationer og prognosemodel er overordnet for hele radarens udbredelsesområde, men også i forhold til de maksimale værdier.

### CSI (*Critical Success Index*)

Dette indeks beskriver hvor god prognosemodellen er til at prædikere regn i de enkelte radarpixels ud fra nedenstående skema (Van Horne 2003):

		Prognose	
		Ja	Nej
Observation	Regn	<i>Hit (H)</i>	<i>Miss (M)</i>
	Nej	<i>False Alarm (FA)</i>	<i>Null (N)</i>

CSI værdien kan herefter beregnes ved at summere op over hele radarbilledet:

$$CSI = \frac{\sum H}{\sum H + \sum M + \sum FA}$$

En perfekt prognose vil resultere i en CSI-værdi på 1 og er der ingen sammenhæng mellem prognose og observationer er CSI lig med 0. Dette indeks undersøger ikke om de enkelte prædikterede intensiteter svarer det de observerede, men udelukkende om der har været prædikeret regn eller ej. Dvs. at dette evalueringsmål anvendes til at kvantificere om prognosen har prædikeret regn de rigtige steder.

### Korrelationskoefficienten ( $R^2$ )

Som evalueringsmål for de prognosticerede (P) og observerede (O) regnintensiteter anvendes den todimensionale korrelationskoefficient  $R^2$ :

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \cdot (P(x, y) - \bar{P})}{\sqrt{\left( \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \right)^2 \cdot \left( \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (P(x, y) - \bar{P}) \right)^2}} \right)^2$$

Modsat CSI siger  $R^2$  noget om hvor godt de enkelte regnintensiteter korrelerer når man ser på hele radarens udbredelsesområde. En perfekt prognose vil resultere i en  $R^2$ -værdi på 1 og er der ingen sammenhæng mellem prognose og observationer er  $R^2$  lig med 0.

### Den maksimale korrelationskoefficient ( $c_{max}$ )

Modsat CSI og  $R^2$  som angiver værdier for sammenhængen mellem observationer og prognose for hele den prognosticerede flade, beskriver den maksimale korrelationskoefficient ( $c_{max}$ ) den største korrelation mellem prognose og observationer i et punkt, nemlig der hvor korrelationen er størst:

$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \cdot (P(x - n, y - m) - \bar{P})}{\sqrt{\left( \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \right)^2 \cdot \left( \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (P(x - n, y - m) - \bar{P}) \right)^2}}$$

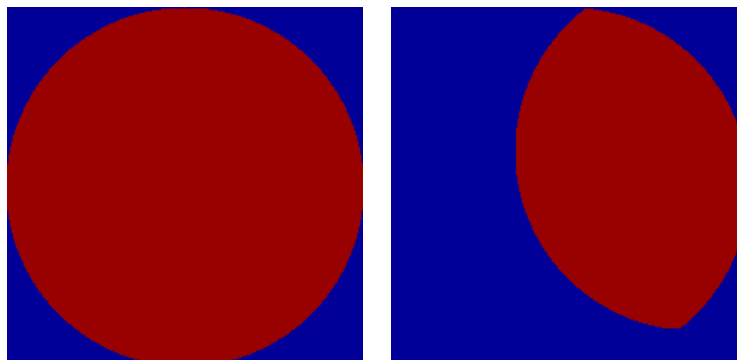
$$c_{max} = \max(\gamma)$$

Faktisk er det samme funktion som anvendes til at finde den globale vektor. Som i de to andre mål svarer en værdi på 1 til den bedste korrelation og 0 til ingen korrelation.

### Maskering

Når evalueringsmålene beregnes er det vigtigt, at man kun sammenligner de områder hvori der reelt er data der kan sammenlignes. Man kan for ek-

sempel forestille sig, at der i de observerede data vil være nyt nedbør kommet ind i radarbilledet, som af gode grunde ikke er at finde i prognosen. Derfor er der implementeret en maske, som afgrænser det område, hvori de tre evalueringsmål beregnes. Denne maske flyttes advektivt i hvert tidsskridt med den globale vektor i begge prognosemetoder (Figur 4.2.5.f)

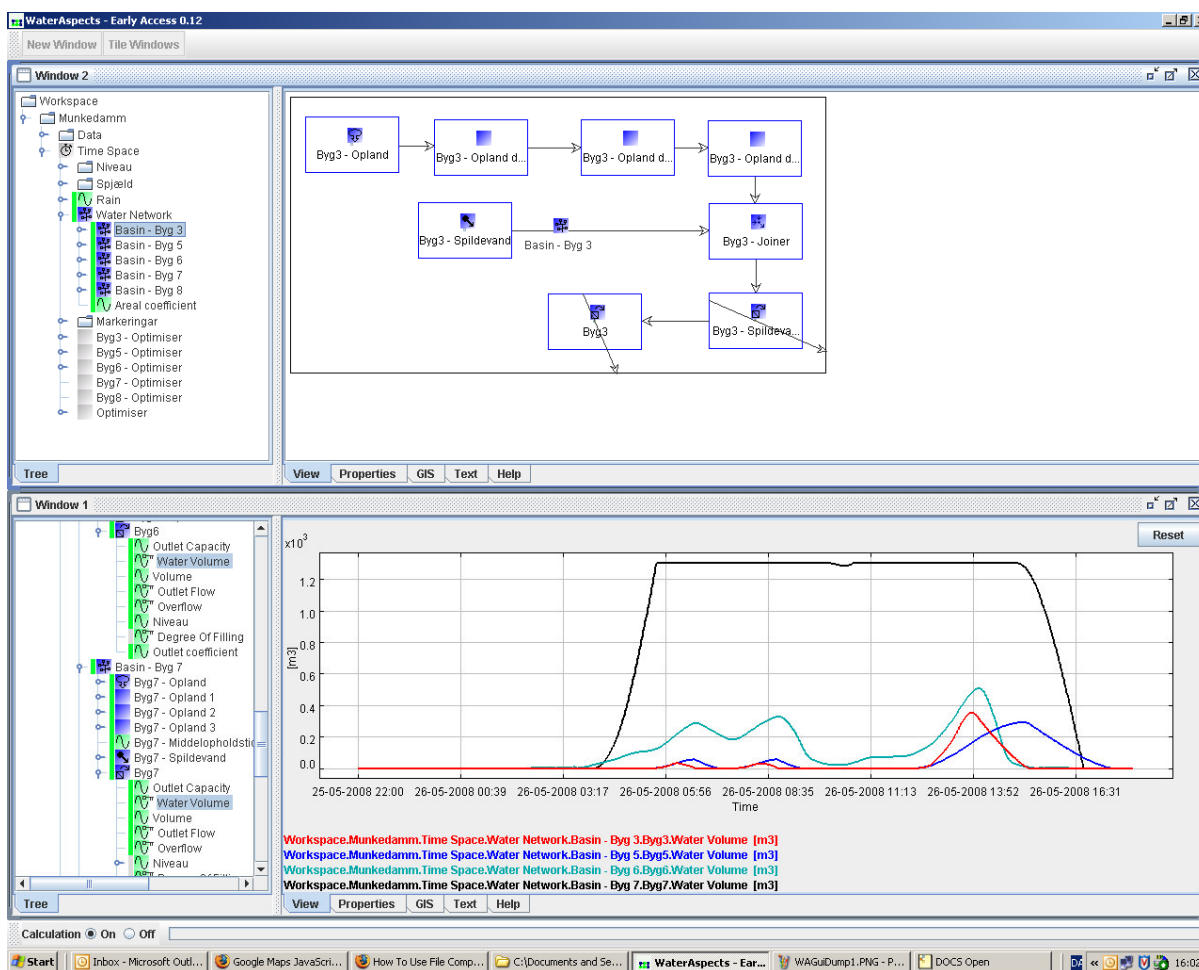


**Figur 4.2.5.f.**  
Tv. oprindelig maske (rød) som afgrænser radarens udbredelse. Th. maske flyttet et antal tidsskridt med den globale vektor. I det røde område beregnes evalueringmålene.

### 4.3

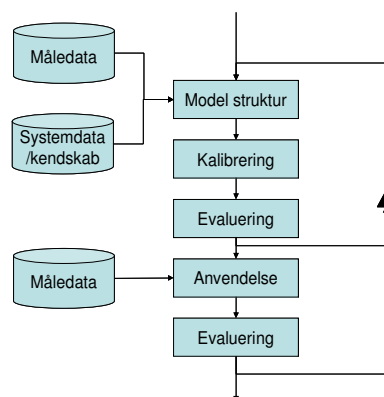
#### **WaterAspects**

Prognosemodellerne er opbygget i **WaterAspects**<sup>®</sup>, et fleksibelt komponentbaseret modelleringsværktøj med mulighed for at foretage prognoseberegninger i realtid og med indbygget optimeringsrutine til kalibrering over for måledata. Brugeren af programmet har i høj grad selv mulighed for at vælge kompleksitet og detaljeringsgraden af den opbyggede model. Eksempel på brugerfladen ses i figur 4.3.a.



**Figur 4.3.a**  
 Visning af WaterAspects bruger grænsefladen der er benyttet til opbygning og kalibrering af afstrømningsmodellerne for hver case studie.

Fremgangsmåden ved opbygning af modellerne er illustreret i figuren nedenfor. Med udgangspunkt i afløbssystemets hovedstruktur opstilles en forenklet model for afløbssystemet. Sammenhørende dataserier for regn og flow i afløbssystemet benyttes derefter til kalibrering og evaluering af modellen. Ved evalueringen vurderes om det om modellen beskriver afstrømningsprocessen tilstrækkeligt og såfremt der forsat er systematiske afvigelser udvides eller ændres modelstrukturen så den bedre beskriver disse variationer. Formålet med denne iterative databaserede fremgangsmåde er at få en model der giver en god beskrivelse af sammenhængen mellem nedbør og afstrømning med få tilstandsvariable og få parametre. Dette muliggør på sigt en etablering af en løbende opdatering i forhold til måleværdier, en løbende kalibrering og gennemregning af et stort antal kørsler i forbindelse med usikkerhedsestimering og optimeret styring.



**Figur 5.3.b**  
Illustration af den databaserede fremgangsmåde ved opbygning af modellen.

Til kalibrering af afstrømningsmodellen er brugt data fra en nærliggende regnmåler.

Modellerne i dette projekt er opbygget af **WaterAspects**<sup>®</sup> komponenter til beskrivelse af hhv. et oplandareal, lineare reservoirer og bassiner. **WaterAspects**<sup>®</sup>s fleksible funktionsbaseret variable definition er benyttet til beskrivelse af styringer, stuvninger og niveau-volumen forhold i afløbssystemerne.

Flere oplysninger om modelleringsværktøjet **WaterAspects**<sup>®</sup> henvises til hjemmesiden [www.WaterAspects.org](http://www.WaterAspects.org) samt til artiklen Grum et al. (2006). De generelle principper for model opbygning minder i store træk om den metode der er beskrevet i artiklen Grum et al. (2005).

#### 4.4

#### Auto-kalibrering

Til hvert tidsskridt kalibreres afstrømningsmodellen med data fra de seneste timer. Dette kaldes her auto-kalibrering idet kalibreringen gennemføres automatisk uden nogen form for manuelt indgreb eller validering inden parametrene anvendes i modellen til prognostisering.

Formålet med auto-kalibreringen er at tage højde for ændringer i afstrømningssystemets karakteristika. Dette være sig ændringer i middel tørvejr-afstrømning, det effektive afstrømningsareal eller afstrømningshastigheden.

#### Metode

Under auto-kalibreringen estimeres modelparametrene ved en klassisk ikke-linear optimeringsopsætning. En søgerutine benyttes til at minimere et optimeringskriterium. Søgerutinen ændrer parametrene efter en foruddefineret strategi hvor der for hver ændring gennemføres en model simulering



og en efterfølgende evaluering af optimeringskriteriet. Søgerutinen stopper enten når ændringerne ikke længere fører til forbedring af optimeringskriteriet eller når tiden er opbrugt og der skal foretages en ny forudsigtelse.

Optimeringskriteriet har størst indflydelse på det endelige valgte parametersæt mens optimeringsrutinen for det meste kun påvirker hvor mange modelsimuleringer, der er nødvendige for at finde frem til løsningen. Optimeringskriteriet og optimeringsrutinen er beskrevet i de følgende afsnit.

### Optimeringskriteriet

Optimeringskriteriet, der benyttes her, er et statistisk mål for hvor godt modellen passer til målingerne. Dette er udtrykt som sandsynligheden for at de målte værdier er en realisation af den benyttede model med det valgte parametersæt. For at undgå at parametrene vandrer helt skævt når det benyttede datasæt (måling) ikke indeholder information om den pågældende del af modellen, ganges der yderligere med a priori sandsynligheder for hver parameter.

Søgerutinen arbejder på logaritmen til den samlede sandsynlighed, LL, som kan beskrives ved den nedenstående ligning. Ligningen er illustreret grafisk i figur 4.4.a.

$$LL(\underline{y}|\underline{a}) = \sum_{t=1}^n \ln \left( \frac{1}{\sigma_e \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(y_t - \hat{y}_t)^2}{2\sigma_e^2}} \right) + \sum_{i=1}^m \ln \left( \frac{1}{\sigma_i \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(a_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \right)$$

Hvor:

$LL(\underline{y}|\underline{a})$  er optimeringskriteriet givet parametersættet

$n$  er antal tidsskridt med målinger af flow i modelsimuleringsperioden

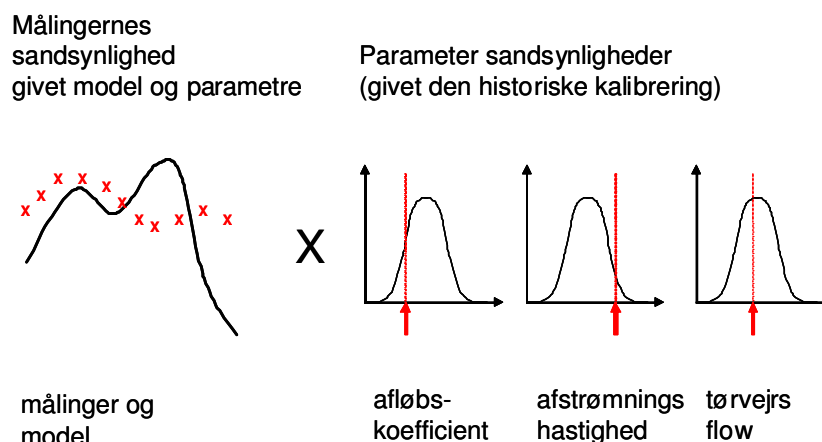
$m$  er antal parametre i optimeringen

$y$  og  $y$  med *hat* er hhv. målt og modelleret flow til tiden  $t$

$\sigma_e$  er den forventede spredning på afvigelserne mellem målt og model

$a_i$  er den aktuelle værdi på den  $i$ 'te parameter

$\mu_i$  og  $\sigma_i$  er hhv. a priori middel og a priori spredning for den  $i$ 'te parameter



**Figur 4.2.a**  
**Illustration af optimeringskriteriets sammensætning.**

### Optimeringsrutinen

Til hvert tidsskridt benyttes en Quasi-Newton søgerutine til at finde det parametresæt, der maksimerer det ovenfor beskrevne optimeringskriterium.

Newtons metode forudsætter, at funktionen kan lokalt tilnærmes som kvadratisk i regionen omkring optimum. For at finde dette stationære punkt bruges det første og andet afledte. I Quasi-Newton algoritmen reduceres antal nødvendige modelsimuleringer ved at den anden afledte af optimeringskriteriet med hensyn til parametrene tilnærmes gennem en analyse af ændringer i de første afledte. Til denne approksimation benyttes her den meget udbredte BFGS metode. En uddybende beskrivelse af Quasi-Newton søgerutinen kan findes på [wikipedia.org](http://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Newton_method) ([http://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Newton\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Quasi-Newton_method)).

Andre metoder blev afprøvet under opbygningen af auto-kalibreringen. Disse inkluderer Nelder-Mead metoden bedre kendt som Downhill Simplex (se [http://en.wikipedia.org/wiki/Nelder-Mead\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Nelder-Mead_method)) og Dynamically Dimensioned Search (DDS), som er en evolutionsbaseret optimeringsalgoritme præsenteret af Tolson & Shoemaker.

Quasi-Newton metoden blev valgt i det den generelt førte til forholdsvis robust optimering med forholdsvis få model simuleringer (typisk mellem 50 og 500). For mere komplekse problemstillinger hvor flowresponsen domineres af tærskelparametre, eller hvor det af anden grund ikke er rimeligt at antage linearitet omkring optimum, kan det forventes, at DDS metoden vil være bedre egnet. Dette vil dog kræve væsentligt mere beregningskraft eller en ændret strategi, hvor der er meget længere tid mellem auto-kalibrering af modellerne.

Følgende parametre auto-kalibreres:

- Tørvejrflow
- Areal
- Middelopholdstid i oplandet

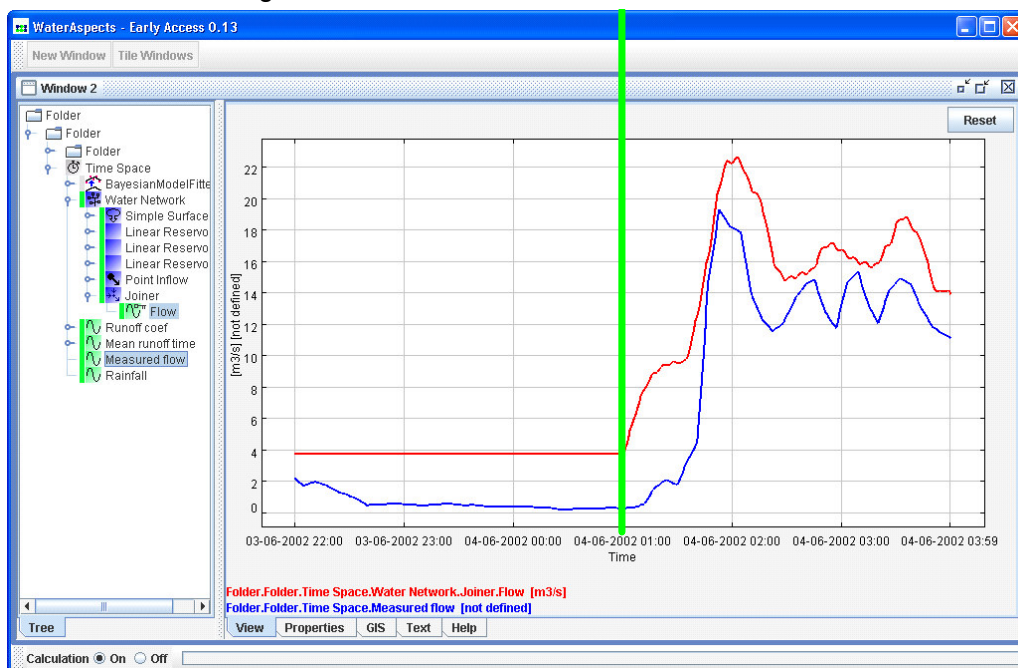
### **Eksempel**

I figur 4.4.b og 4.4.c er illustreret hvordan auto-kalibreringen justerer modellen ind for derved at give en bedre flowforudsigelse end modellen kalibreret alene på de off-line data, der blev benyttet ved modelopbygningen.

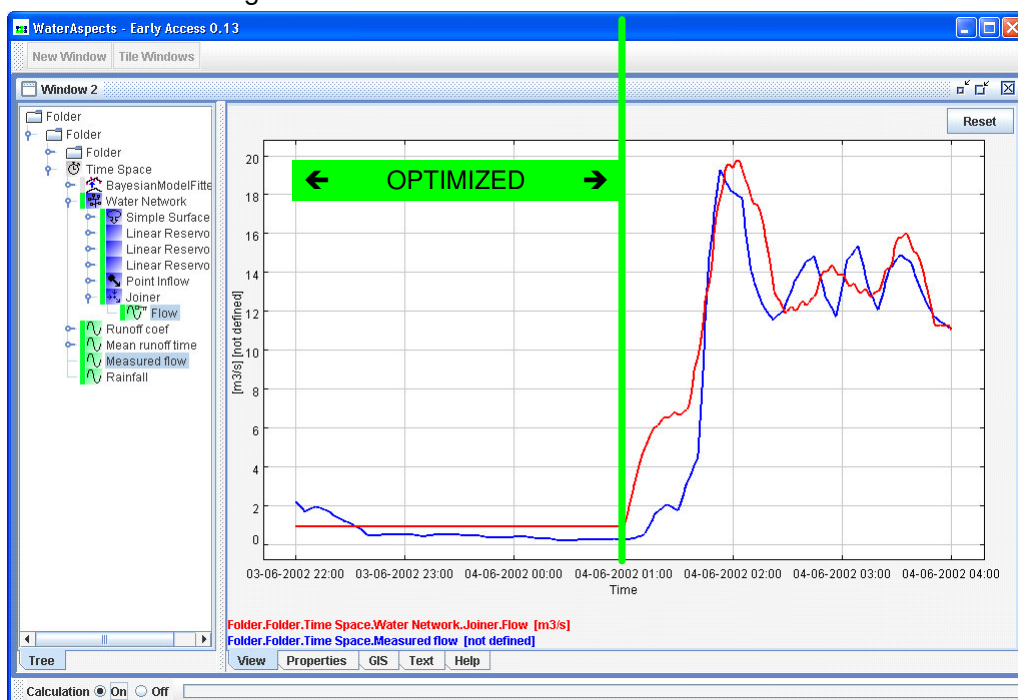
I det første eksempel (Figur 4.4.b) ses, at det målte tørvejrflow er noget lavere end tørvejrflowet i modellen. Dette kan for eksempel skyldes, at modellen oprindeligt blev opbygget i en vinterperiode med megen indsvining og højt basisflow. Uden auto-kalibrering ville modellen føre til en overestimering af den top, der sker kl. 02:00. Med auto-kalibrering, der er blevet kørt i perioden til venstre for den grønne streg, ses umiddelbart hvordan dette fører til en bedre modelbaseret forudsigelse af maksimalflowet.

I det andet eksempel (Figur 4.4.c) ses det, at den samlede afstrømningsmængde i modelberegningen (og derfor også i forudsigelsen) er noget mindre end det målte. Dette kan skyldes, at det effektive areal har ændret sig siden modellen blev lavet, at regnens historik gør at der kommer et direkte bidrag fra ikke befæstede områder eller at den regnmåler, der blev benyttet under modelopbygningen var dårligt placeret i forhold til oplandet. I den nederste figur er auto-kalibreringen igen blevet kørt på perioden til venstre for den grønne streg, hvilket igen fører til en bedre forudsigelse af flowet i perioden til højre.

### Uden auto-kalibrering:



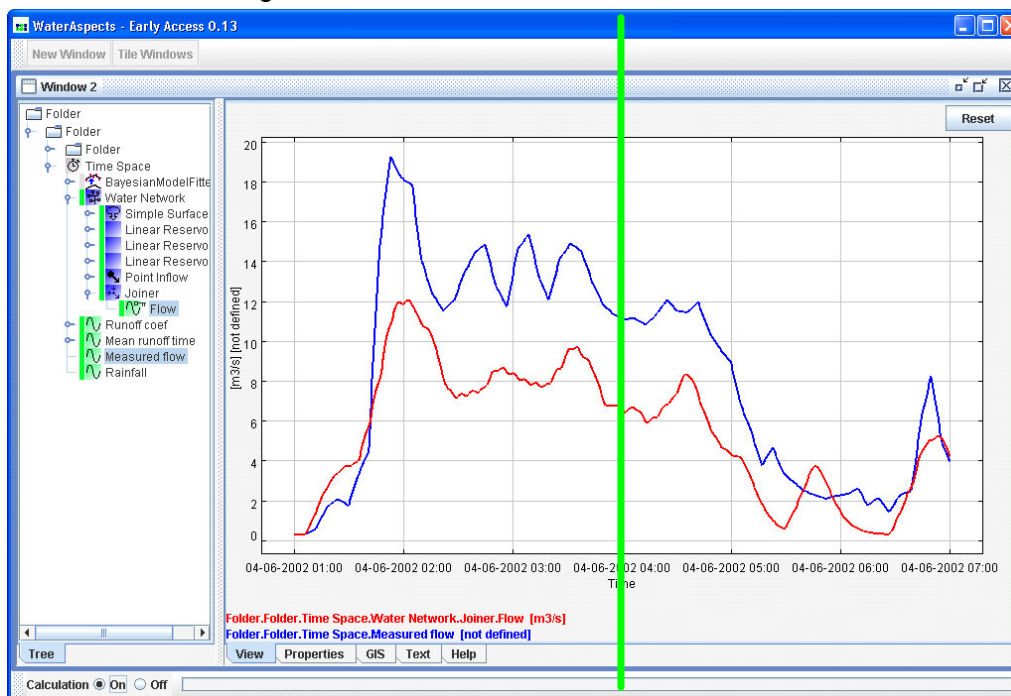
### Med auto-kalibrering:



Figur 4.4.b

En illustration af hvordan auto-kalibrering i perioden op til en hændelse (til venstre for den grønne streg) forbedrer forudsigelsen (til højre). Tiden ses ud af x-aksen, flow på y-aksen med farvelægning blå = målt og rød = model.

## Uden auto-kalibrering:



## Med auto-kalibrering:



Figur 4.4.c

En illustration af hvordan auto-kalibrering under en hændelse (til venstre for den grønne streg) forbedrer forudsigtelsen (til højre). Tiden ses ud af x-aksen, flow på y-aksen med farvelægning blå = målt og rød = model.

### **Implementering og indkøring**

Ved implementeringen er det valgt at normalisere modelparametrene, så der auto-kalibreres på koefficienter til de egentlige parametre. Dette øger gennemskueligheden af auto-kalibreringens indflydelse, idet alle koefficienter som udgangspunkt forventes at have værdien 1.

Ved indkøringen i real tid blev det klart, at en optimering af alle tre parametre til hvert tidsskridt gav uønskede resultater omkring starten af en regnhændelse. Dette kunne opstå, hvis den målte afstrømning begyndte at stige svagt lidt tidligere i virkeligheden end i modellen (eller omvendt). Auto-kalibreringen ville så forsøge at kompensere for dette ved at skrue på tørvejrskoefficienten, hvilket kunne resultere i en mindre god forudsigelse. Dette blev løst blandt andet ved at tørvejrskoefficienten kun blev estimeret, når der ikke havde været regn i optimeringsperioden og ved ikke at benytte de sidste minutters data i optimeringskriteriet. På samme vis blev det besluttet kun at estimere koefficienter for afstrømningsareal og afstrømningshastighed, når der var faldet en vis mængde regn. Dette gav en mere stabil auto-kalibrering, der umiddelbart fungerer i praksis, og derved giver en bedre forudsigelse.

Ved implementering af auto-kalibrering af afstrømningsmodellerne skal man være opmærksom på, at der naturligvis er en direkte kobling mellem den dynamiske justering af radardata ud fra regnmålere og auto-kalibrering af arealkoefficienten i afstrømningsmodellen. Auto-kalibreringen vil i nogen grad forsøge at kompensere for en eventuelt mindre god justering af radarens nedbørsestimat. Man kunne foranlediges til at tro, at det i forhold til afstrømningsmodellen overhovedet ikke er nødvendigt at justere radardata. Dette er imidlertid ikke tilfældet. Justering af radarbilledet sker blandt andet for at kompensere for ændringer i dråbestørrelsesfordelingen, der ofte har en noget hurtigere dynamik end afstrømningsprocessen. Endvidere er auto-kalibrering af arealkoefficienten generelt på bagkant af en hændelse, idet der i sagens natur skal være sket noget afstrømning inden der er basis for en justering af afstrømningskoefficienten. Dette betyder, at der er behov for en dynamisk justering af både radardata og afstrømningsarealet for at sikre en god forudsigelse.

## **4.5**

### **Kvalitetssikring af afstrømningsprognoser**

Der er opstillet kvalitetsberegninger, der løbende undersøger, hvorvidt de udregnede forudsigelser i prognosepunkterne for fremtidigt flow eller niveau er troværdige eller ej. En såkaldt vagthund.

Vagthunden beregnes ud fra oplysninger om radar, SRO og afstrømningsmodellens parametre fra autoopdateringen. Når vagthundens værdi

er 0 er de udregnede forudsigelser brugbare, mens en vagthundværdi på 1 angiver ikke-brugbare forudsigelser.

For hver modelopsætning evalueres kun ét radarsignal og ét signal pr. SRO-system, da det er tilstrækkeligt for at vurdere dataforbindelsen.

### **Radar**

For de indkommende radarsignaler findes 3 forskellige situationer, hvoraf de 2 angiver fejl.

- Fejl. Der modtages ikke radardata fra AAU.
- Fejl. Der modtages radardata fra AAU, men et fejlsignal. I denne situation kan radardata ikke anvendes.
- God. Der modtages radardata, som ikke er fejlsignalet.

Radardata modtages ikke med en tidsopløsning på 2 minutter. Da vagthunden beregnes hvert 2. minut, fastholdes hver radarværdi indtil en ny modtages.

### **SRO**

For indkommende SRO-signaler findes 2 forskellige situationer.

- Fejl. Der modtages ikke data.
- God. Der modtages data.

For de fleste SRO-systemer modtages signaler med en tidsopløsning på 2 minutter. Dermed vil vagthunden med det samme angive ikke-brugbare forudsigelser, hvis forbindelsen til et SRO-system skulle mangle.

Så snart forbindelsen er retableret, vil vagthunden automatisk skifte tilbage.

### **Afstrømningsmodel**

Fra afstrømningsmodellen bidrager 4 parametre, der alle er relateret til autoopdateringen.

De tre af parametrene relaterer sig til de koefficienter, der ændres i autoopdateringen:

- Koefficient for areal
  - Koefficient for afstrømningstid
  - Koefficient for tørvejrflow
-

For hver af de tre koefficienter gælder det, at de skal være indenfor en angivet tolerance. Vagthunden kan eksempelvis melde fra, hvis arealkoefficienten afviger mere end 50 % fra kalibreringsresultatet.

Den fjerde parameter udtrykker, om autoopdateringen overhovedet er aktiv.

### **Eksempel**

Nedenstående figur 4.5.a viser eksempel på, at vagthunden skifter når blot én af ovenstående parametre bidrager negativt til vagthunden.

Frem til kl. 07:08 angiver vagthunden med værdien 1, at der er ikke-brugbare forudsigelser. Fra kl. 07:10 skifter vagthunden til 0.

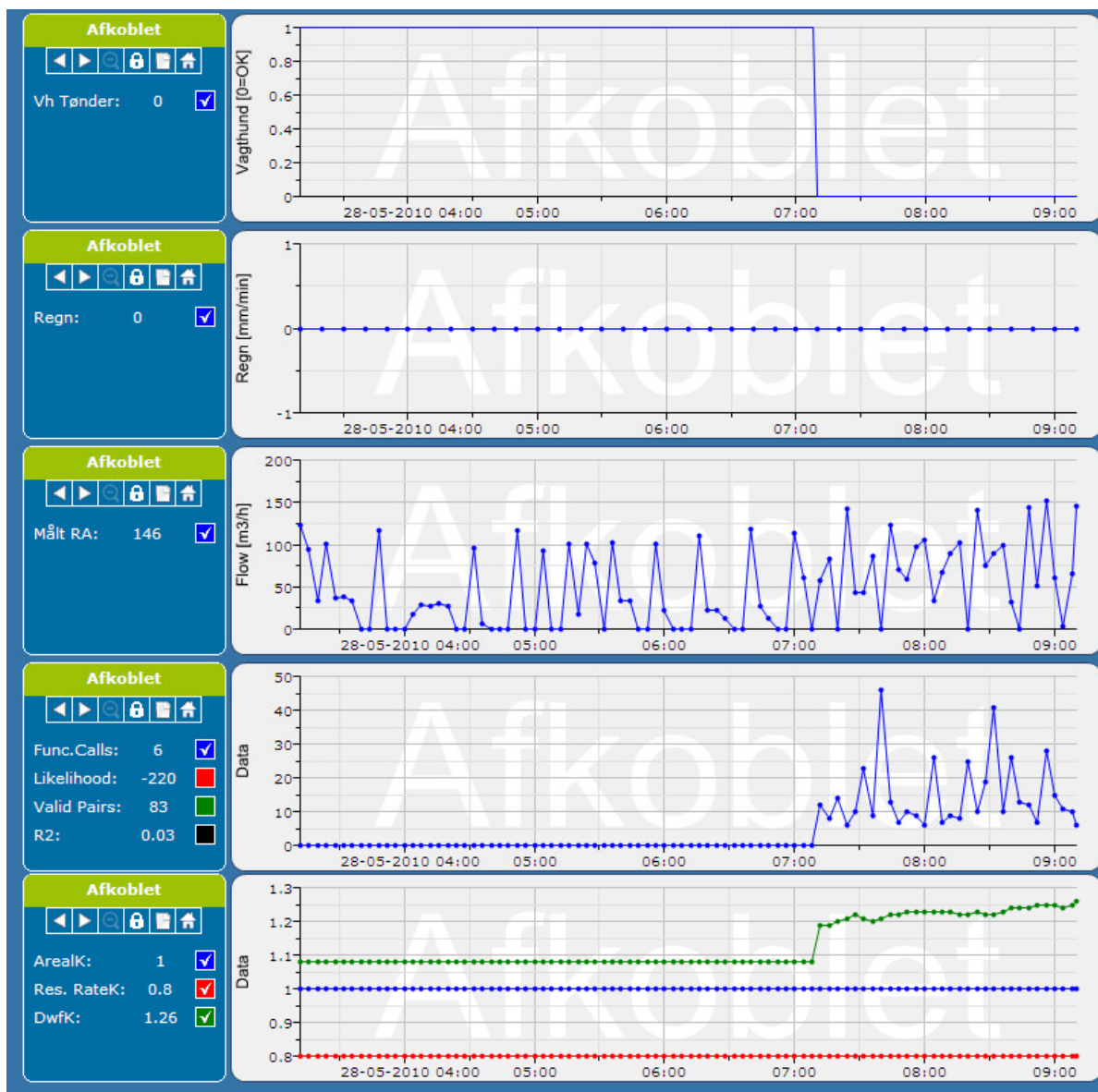
Fejlen har frem til kl. 07:10 været, at afstrømningsmodellen ikke har autoopdateret (figurens 4. del, parameteren kaldet "Function Calls" er 0). Både radardata og SRO er blevet modtaget i hele perioden (figurens 2. og 3. del).

Da autoopdateringen ikke har været aktiv, har de 3 autoopdateringskoefficienter i nederste del af figuren ikke ændret sig. Kl. 07:10 starter autoopdateringen igen. At autoopdateringen er aktiv kan også ses på koefficienten for tørvejrflow (kaldet "DwfK"), da den igen bliver dynamisk. De regnvejrrelaterede koefficienter for afstrømningstid (kaldet "Res.RateK") og areal (kaldet "ArealK") ændres dog fortsat ikke, da der ikke sker regnafstrømning i modellen i den pågældende periode.

På tilsvarende vis ville vagthunden have haft værdien 1, hvis der havde manglet radardata eller forbindelse til SRO-systemet.

---





**Figur 4.5.a**  
 Eksempel på beregning af vagthund. Øverst vagthund, derefter bidrag fra radarregn og SRO. De to nederste viser parametre fra autoopdateringen.

#### 4.6

#### Brugergrenseflade - vejrradarprognose

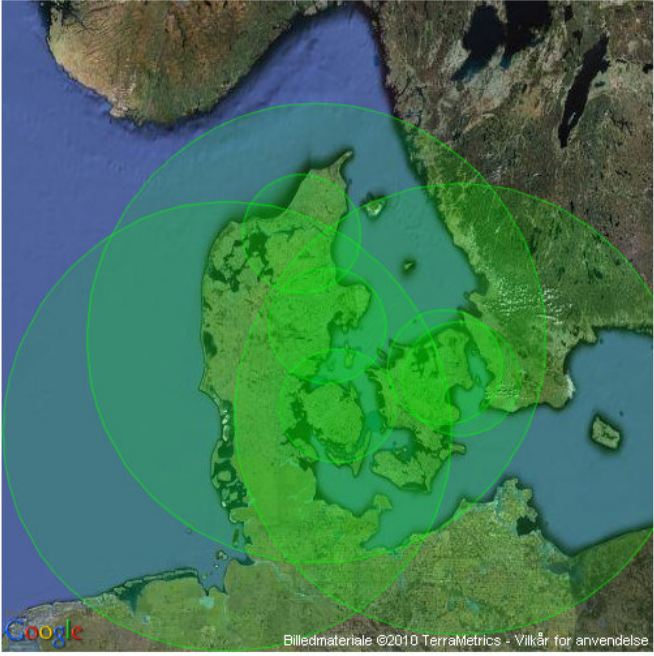
Vejrradardata sendes både direkte til Krüger for anvendelse i *Water Aspects* og til en præsentationshjemmeside (<http://www.vejrradar.dk/VBSS/VBSS.html>). Siden er indrettet på den måde at man altid kan vælge og se data på et udvalgt opland, figur 4.6.a. Formålet med hjemmesiden er at præsentere resultaterne fra alle vejrradarprognoserne ét sted. Kortene er implementeret i Google Maps for at have online opdatering af kort eller luftfoto. Betingelsen for at anvende Google Maps er at siderne er offentligt tilgængelige.

www.vejrradar.dk • 2008

# Vejrradarbaseret styring af spildevandssystemer

AALBORG UNIVERSITET

Home | Aalborg | Egedal | Hvidovre | Odense | Slagelse | Tønder | Århus | Krüger | AAU | Projektet



Billedmateriale ©2010 TerraMetrics - Vilkår for anvendelse

## NYHEDER

- **Headlines »**  
Hjemmeside for VBSS II er nu revideret

## Vejrradar

Aalborg vejrradar: **online**

Egedal vejrradar: **offline**

Hvidovre vejrradar: **online**

Odense vejrradar: **online**

Rømø vejrradar: **online**

Stevns vejrradar: **online**

Virring vejrradar: **online**

Århus vejrradar: **offline**

## Prognose

Prognose aktiv

## Dataoverførsel

AAU-Krüger: OK


Figur 4.6.a

Hovedside for vejrradarprognose <http://www.vejrradar.dk/VBSS/VBSS.html>

Når man vælger en case at se nærmere på (f.eks. Hvidovre) bliver man dirigeret over på en ny side, figur 4.6.b. På denne hjemmeside er der et oversigtsbillede af kommunen samt link direkte til forsyningsvirksomhedens prognoseside. Ved at trykke på linket, bliver man automatisk ledt videre til den enkelte forsynings prognoseside, figur 4.6.c.

www.vejrradar.dk • 2008

## Vejrradarbaseret styring af spildevandssystemer




### Hvidovre

- Status »  
Hvidovre vejrradar: **online**
- Forudsigelse »  
Forecaster ver 0.5 **aktiv**


Prognose - **Tryk Her**

[Home](#) [Aalborg](#) [Egedal](#) [Hvidovre](#) [Odense](#) [Slagelse](#) [Tønder](#) [Århus](#) [Krüger](#) [AAU](#) [Projektet](#)



Billedmateriale ©2010 TerraMetrics - Vilkår for anvendelse

Hvidovre kommune  
Kloakforsyningen



www.hvidovre.dk

**Figur 4.6.b**  
Side for Hvidovre kloakforsyning

I tabel 4.6.a ses direkte links til hver kommunes side.

**Tabel 4.6.a Direkte links**

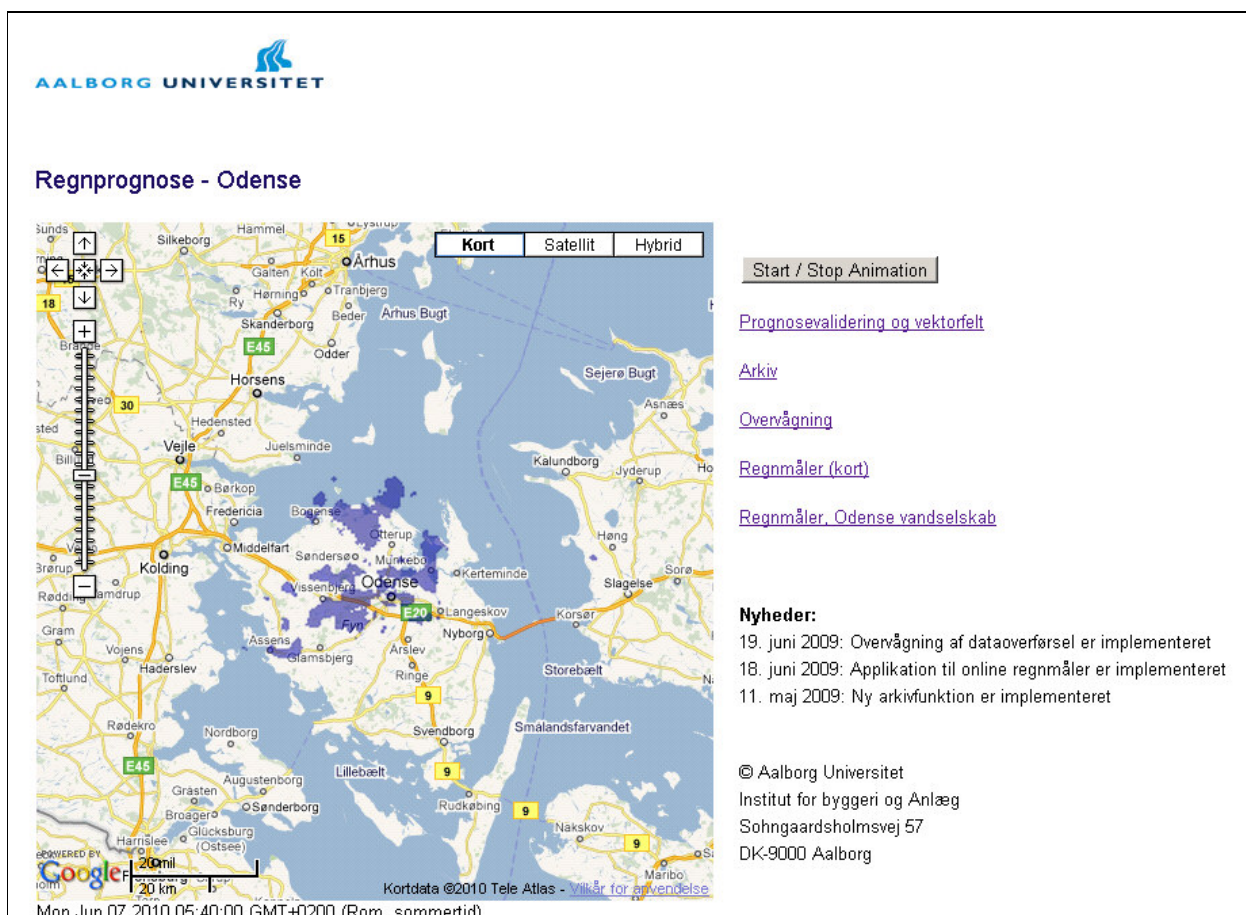
Aalborg	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/aalborg/">http://www.aalborgvejrradar.dk/aalborg/</a>
Egedal	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/egedal/">http://www.aalborgvejrradar.dk/egedal/</a>
Hvidovre	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/hvidovre/">http://www.aalborgvejrradar.dk/hvidovre/</a>
Odense	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/odense/">http://www.aalborgvejrradar.dk/odense/</a>
Århus (Virring)*	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/virring/">http://www.aalborgvejrradar.dk/virring/</a>
Slagelse (Stevns)*	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/slagelse/">http://www.aalborgvejrradar.dk/slagelse/</a>
Tønder (Rømø)*	<a href="http://www.aalborgvejrradar.dk/toender/">http://www.aalborgvejrradar.dk/toender/</a>

\* Disse hjemmesider er beskyttet med brugernavn og adgangskode på grund af ophavsret på DMI's data. Brugernavn og adgangskode kan rekvireres hos Søren Thorndahl, e-mail: st@civil.aau.dk



Det er muligt at skifte mellem satellitkort, alm. kort og hybridkort. Der kan med slideren i siden af billedet zoomes ind og ud. Man kan også med musen bevæge billedet rundt.

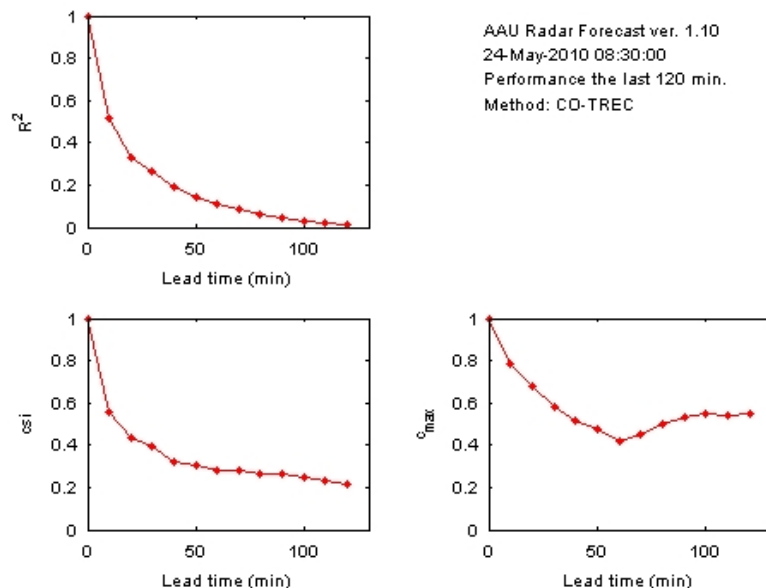
Det er muligt at se en animation af den sidste times nedbørsmåling efterfulgt af én times prognose af nedbøren for de lokale radarer og to timer for DMI radaren.



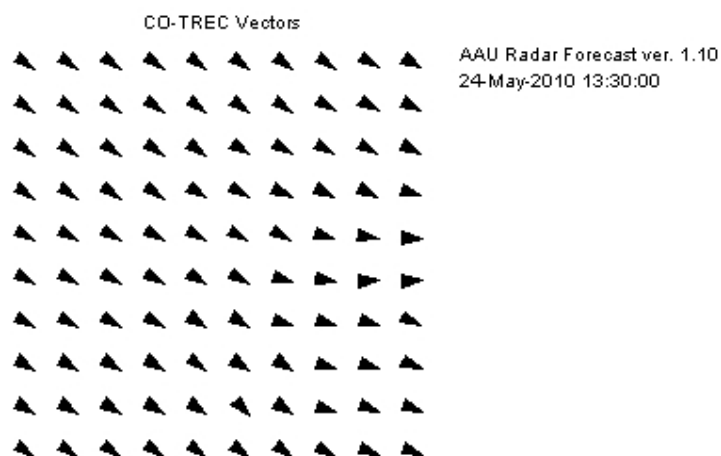
Figur 4.6.c

Side for prognose baseret på Odense vejrradar.

Som det kan ses af figur 4.6.d opgøres radarens prognosekvalitet (ved klik på *prognosevalidering og vektorfelt*) på baggrund af, hvor god radar har været gennem den sidste 1 time til at forudsæ regnens udvikling. Desuden vises flytningsvektorer for den aktuelle prognose.



Figur 4.6.d Eksempel på Prognosevalidering Rømø-radar 24. maj 2010

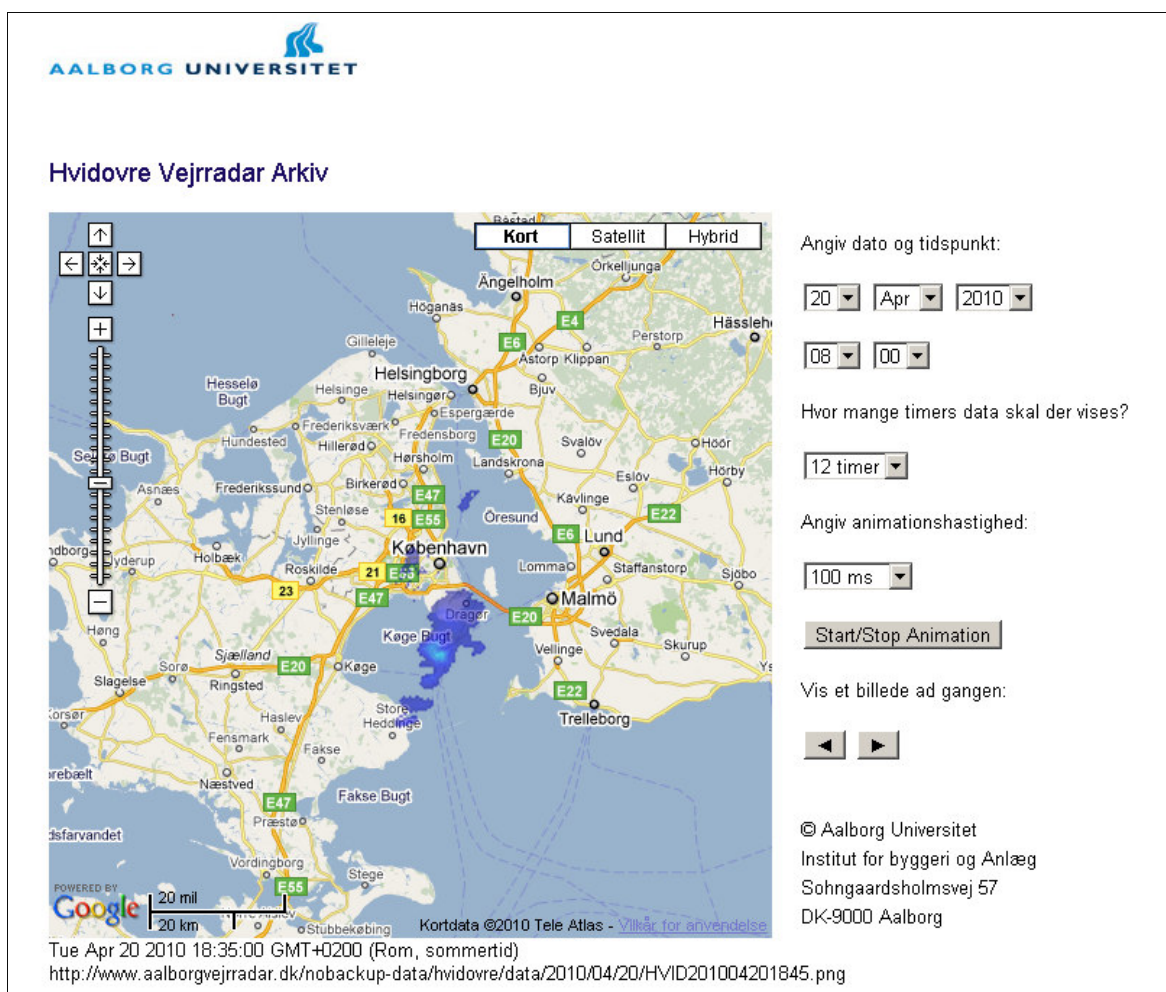


Figur 4.6.e Vektorfelt for den aktuelle prognose- her vist for Virring radaren den 24. maj 2010

Ved at klikke på *Arkiv* kommer man ind på en hjemmeside (Figur 4.6.f) hvor det er muligt at se historiske radardata fra den periode man har lyst til. Der kan vælges dato og tidspunkt, hvor mange timers animation af radar data der skal vises samt hastigheden af animationen. Desuden kan man manuelt bladere frem og tilbage i radararkivet ved at benytte pilene.

Klikker man på *Overvågning* kommer siden vist i figur 4.6.g frem. Her er det muligt at se om datakommunikationen og prognose fungerer korrekt. er vises et rødt kryds vist en del af systemet ikke virker. Desuden er det muligt at se en log over nedbrud, dvs. perioder hvor der af en eller anden grund ikke er lavet en regnprognose.

Ved at klikke på menuerne *Regnmåler (kort)* og *Regnmåler*, fås siden som er vist på hhv. figur 4.6.h Her kan man se online data for de regnmålere som AAU har direkte kommunikation med. Det er ikke muligt at se de regnmålere som går igennem kommunernes SRO-anlæg. Det er muligt at se regnintensiteterne for dags dato (figur 4.4.i) og en figur med dagsnedbør på månedsbasis (figur 4.6.j)



Figur 4.6.f Arkiv-side for Hvidovre

  
**AALBORG UNIVERSITET**

### RADAROVERVÅGNING

**Radar: Aalborg**

Opdateret: 08-06-2010 14:30

Modtagelse af data: ✓

Prognoseberegning: ✓

Overførsel til Krüger: ✓

Overførsel til web: ✓

**Sidste tre nedbrud af dataoverførsel:**

07-06-2010 12:55 – 07-06-2010 13:00

28-05-2010 13:30 – 28-05-2010 13:30


28-05-2010 11:55 – 28-05-2010 11:55

[Nedbrudslog](#)

---

© Aalborg Universitet  
Institut for byggeri og Anlæg  
Sohngaardsholmsvej 57  
DK-9000 Aalborg

Figur 4.6.g. Eksempel på overvågning af radar og prognose

  
**AALBORG UNIVERSITET**

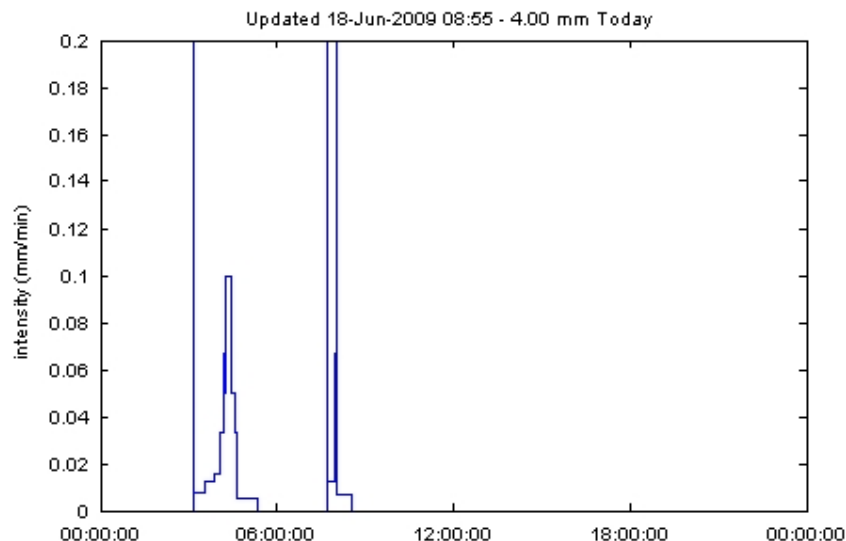
### On-line regnmålere, Tønder kommune

Rødt område: 0-120 km  
Grønt område: 120 - 240 km

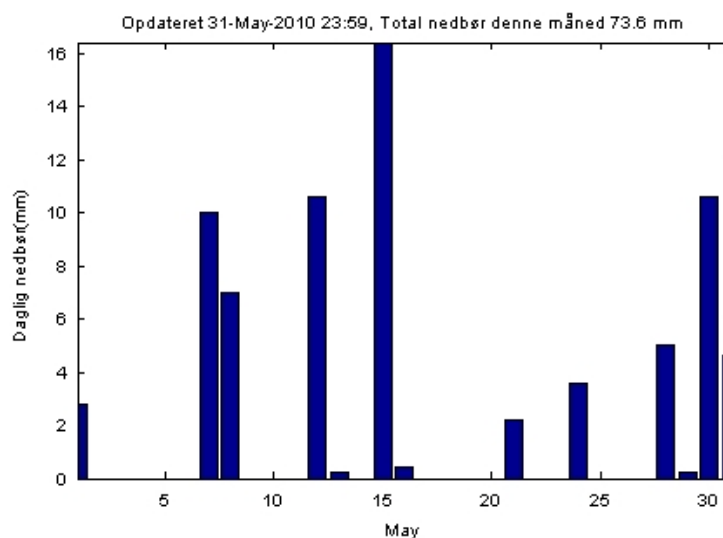
[Skærbæk renseanlæg, regnmåler 22](#)  
[Døstrup pumpestation, regnmåler 29](#)  
[Tønder renseanlæg, regnmåler 28](#)

© Aalborg Universitet  
Institut for byggeri og Anlæg  
Sohngaardsholmsvej 57  
DK-9000 Aalborg

Figur 4.6.h Side for onlineregnmålere. Ved at klikke på symbolerne ses en kurve for regnintensiteten den pågældende dag som fx på figur 4.4.i



Figur 4.6.i. Eksempel på online-plot af regnintensitet i regnmåler 25 (Odense)



Figur 4.6.j. Eksempel på dagsnedbør i maj 2010, regnmåler Skærbæk.

## 4.7

### Brugergrenseflade – afstrømningsprognose live

Den webbaserede brugergrenseflade, der viser de estimerede radarintensiteter over oplandene, samt de udvalgte målte og modellerede parametre i de respektive afløbssystemer, ses på <http://regnradar.star2.dk>. Nedenstående figur viser velkomstsiden, der viser et kort med en markør for hvert af de involverede forsyningsselskaber/byer. Ved at klikke på en markør bliver man ført til en side med en oversigt over parametre for den valgte by. Til højre på velkomstsiden ses en oversigt over hvilke realtidsdata der er til rådighed (venstre række), og hvilke modelberegninger (højre række), der er aktive. Røde kryds markerer, at der for det nuværende 2-minutters



tidsskridt ikke er opdaterede data. På nedenstående figur 4.7.a ses således, at alle radarer er koblet på systemet og modelberegningerne kører, men SRO forbindelsen til Slagelse fungerer ikke i det aktuelle 2-minutters tidsskridt.

The screenshot shows the 'RegnRadar' interface with a map of Denmark and a sidebar titled 'Forbindelser'. The sidebar contains four sections: 'Regnradar', 'Afstrømningsmodel', 'SRO', and 'Beregninger'. Each section lists various cities and their connection status, indicated by green checkmarks or a red 'X'.

Regnradar	Afstrømningsmodel	SRO	Beregninger
Aalborg: ✓	Aalborg: ✓	Aalborg RAV: ✓	Aalborg RAV regn: ✓
Egedal: ✓	Egedal: ✓	Aalborg VHP: ✓	Aalborg VHP regn: ✓
Hvidovre: ✓	Hvidovre: ✓	Hvidovre: ✓	Hvidovre: ✓
Odense: ✓	Odense: ✓	Odense: ✓	Slagelse: ✓
Slagelse: ✓	Slagelse: ✓	Slagelse: ✓	
Tønder: ✓	Tønder: ✓	Slagelse: ✗	
Århus: ✓	Århus: ✓	Tønder: ✓	
		Århus ESKE: ✓	
		Århus JGP: ✓	

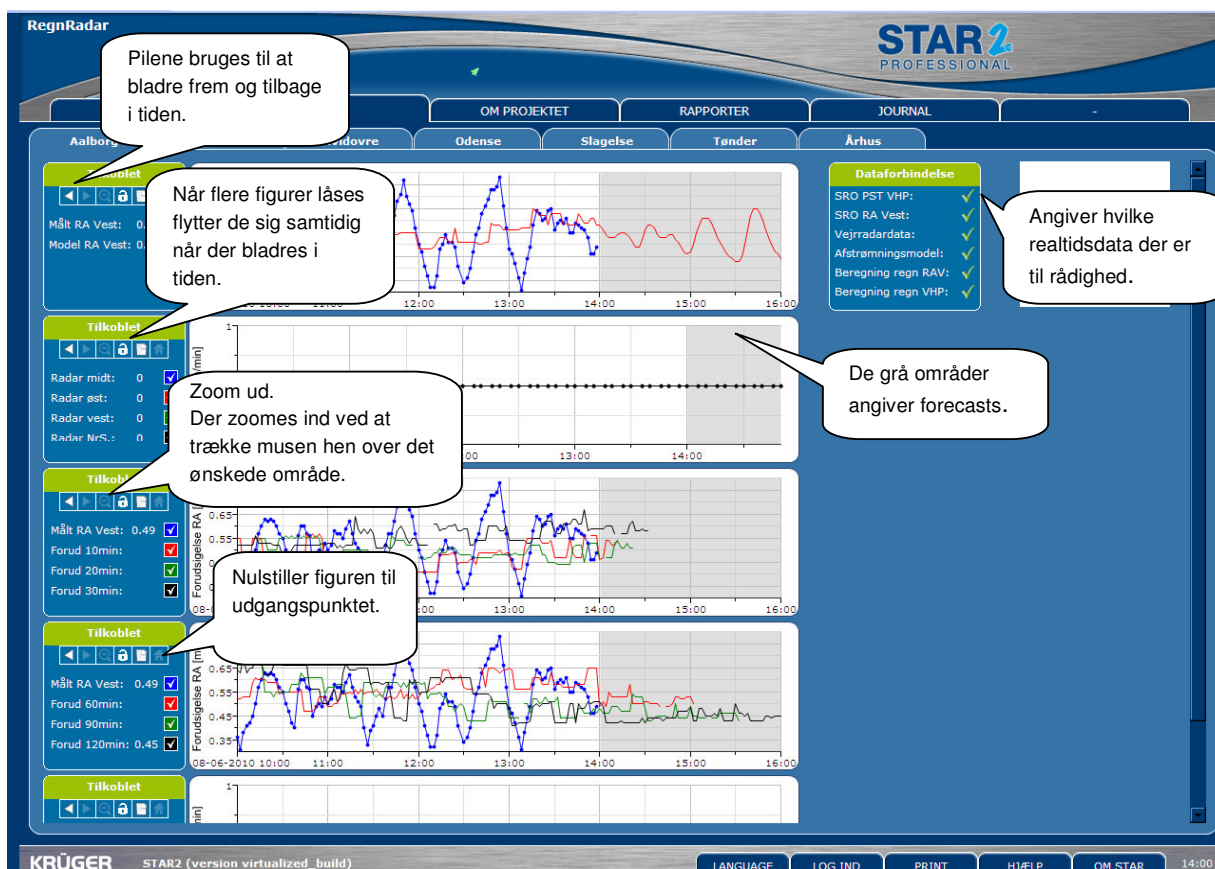
Two callout boxes provide additional information:

- Under dette faneblad ses hvilke realtidsdata, der er til rådighed.
- Ved at klikke på en af de markerede byer, ledes man til den pågældende bys faneblad.

**Figur 4.7.a**  
Velkomstsiden til afløbsprognose siden.

Figur 4.7.b viser hvad man ser på siden for en specifik by. Siden viser tre eller flere grafer, der hver især viser parameterværdier fra 4 timer tilbage i tiden, til én til to timer frem i tiden. Den grå skraverede del af hver figur viser prognosticerede værdier.

Den øverste graf på siden for en by, viser altid den parameter der er hovedfokus for modellen. Når SRO data er til rådighed bliver de plottet i samme figur som de tilsvarende modellerede parametre. Den eller de efterfølgende grafer viser radardataene, mens afstrømningsprognoser og eventuelle sekundære parametre fra modellen afbildes på de sidste grafer.



Figur 4.7.b  
Siden for en specifik by.

#### 4.8

### Brugergrenseflade – afstrømningsprognose historisk

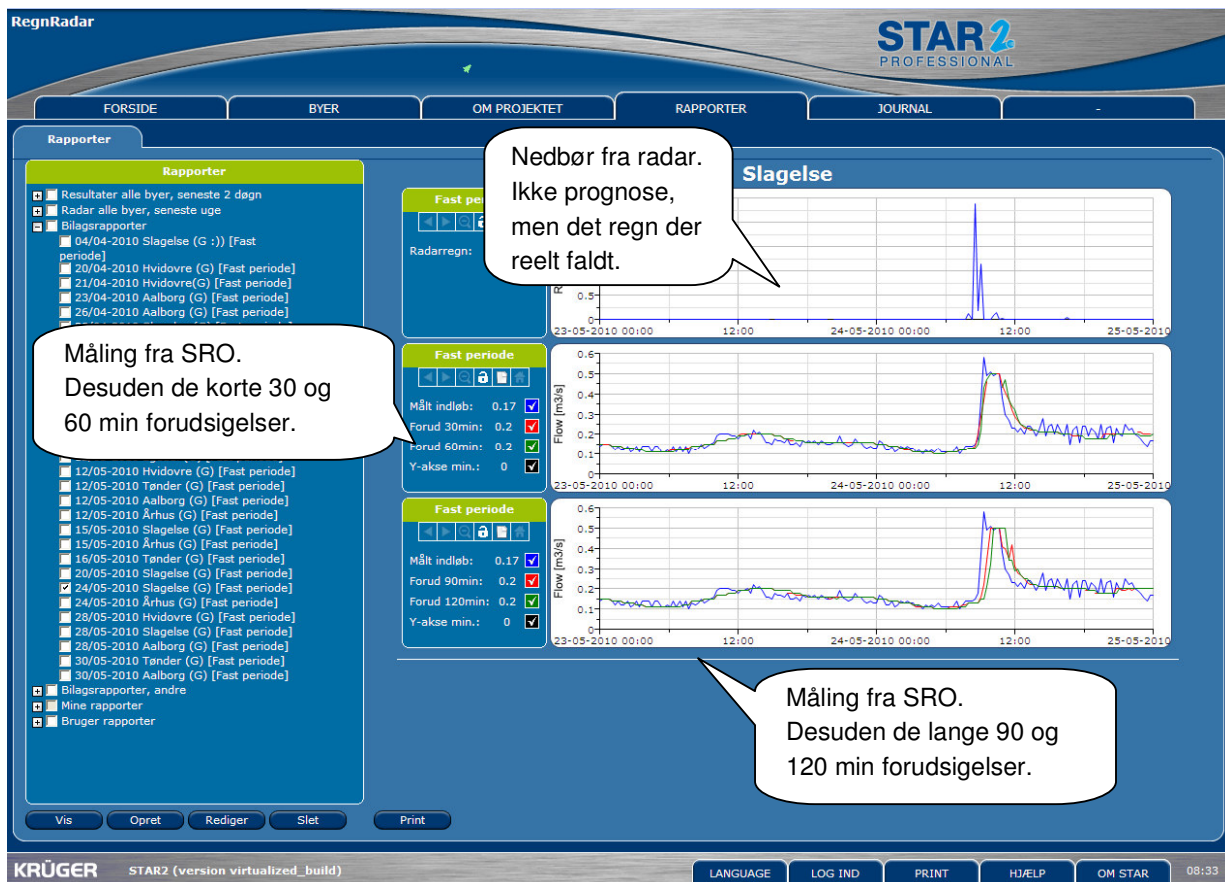
Som beskrevet ovenfor, kan de aktuelle afstrømningsprognoser ses live for de involverede forsyningsselskaber/byer. For allerede overståede regnhændelser og afstrømningsprognoser henvises i stedet til fanen "Rapporter", afsnittet "Bilagsrapporter". Her kan historiske afstrømningsprognoser sammenlignes med hvad der blev målt.

I forbindelse med afrapportering af, hvordan forudsigelserne passede i forhold til målingerne i prognosepunkterne, er det disse rapporter for historiske afstrømningsprognoser, der anvendes.

I en sådan rapport vises to slags figurer. Øverst radardata, der viser hvor meget regn, der reelt faldt over oplandene. Prognoserne for radardata fremgår dermed ikke. Se figur 4.8.a.

I nederste del af figuren vises de reelle målinger fra SRO. Først sammen med de korte afstrømningsprognoser, som er forudsagt henholdsvis 30 og 60 min forud i tiden. Tilsvarende vises de lange afstrømningsprognoser for 90 og 120 min forudsigelse.

Eksempelvis vil måling i prognosepunktet kl. 10 vises kl. 10 sammen med afstrømningsprognoser for kl. 10, som de blev beregnet kl. 8, 8:30, 9 og 9:30.



Figur 4.8.a  
Rapport for historisk regnhændelse.

## 5. Syv cases

I følgende afsnit præsenteres prognoser, kalibrering, resultater, vurderinger mv. for hver af de syv anvendte cases, hhv. Aalborg, Egedal, Hvidovre, Odense, Slagelse, Tønder og Århus.

### 5.1 Aalborg

Renseanlæggets kapacitet under regn har afgørende betydning for hvor ofte og hvor meget urensset spildevand der aflastes under regn. Renseanlægget Aalborg Vest (RAV) har derfor implementeret ATS regnstyring der søger at maksimere den hydrauliske kapacitet af den biologiske rensning. Der kræves en 1 til 2 timer for fuld omstilling fra tørvejrdrift til ATS regnvejrdrift med maksimal kapacitet. Renseanlægget når derfor ikke altid at slå over i regndrift inden de store afstrømningsmængder når ned til anlægget. På denne måde vil den radarbaserede varsling kunne muliggøre et tidligere omslag til regndrift og derved minimere aflastning af urensset spildevand.

Som en naturlig følge af ovenstående har Aalborg Kommune Kloakforsyningen i dette projekt valgt at få opstillet prognosesystemet for tilløbet til RAV, som er angivet på figur 5.1.a.



Figur 5.1.a Den røde nål angiver Aalborg Renseanlæg Vest.



## 5.1.1

**Radaropsætning og resultater**

Aalborg-radaren er placeret i St. Restrup ca. 10 km vest for Aalborg C, hvilket er en perfekt placering i forhold til at måle nedbør kvantitativt i det meste af Aalborg Kommune og især Aalborg C.

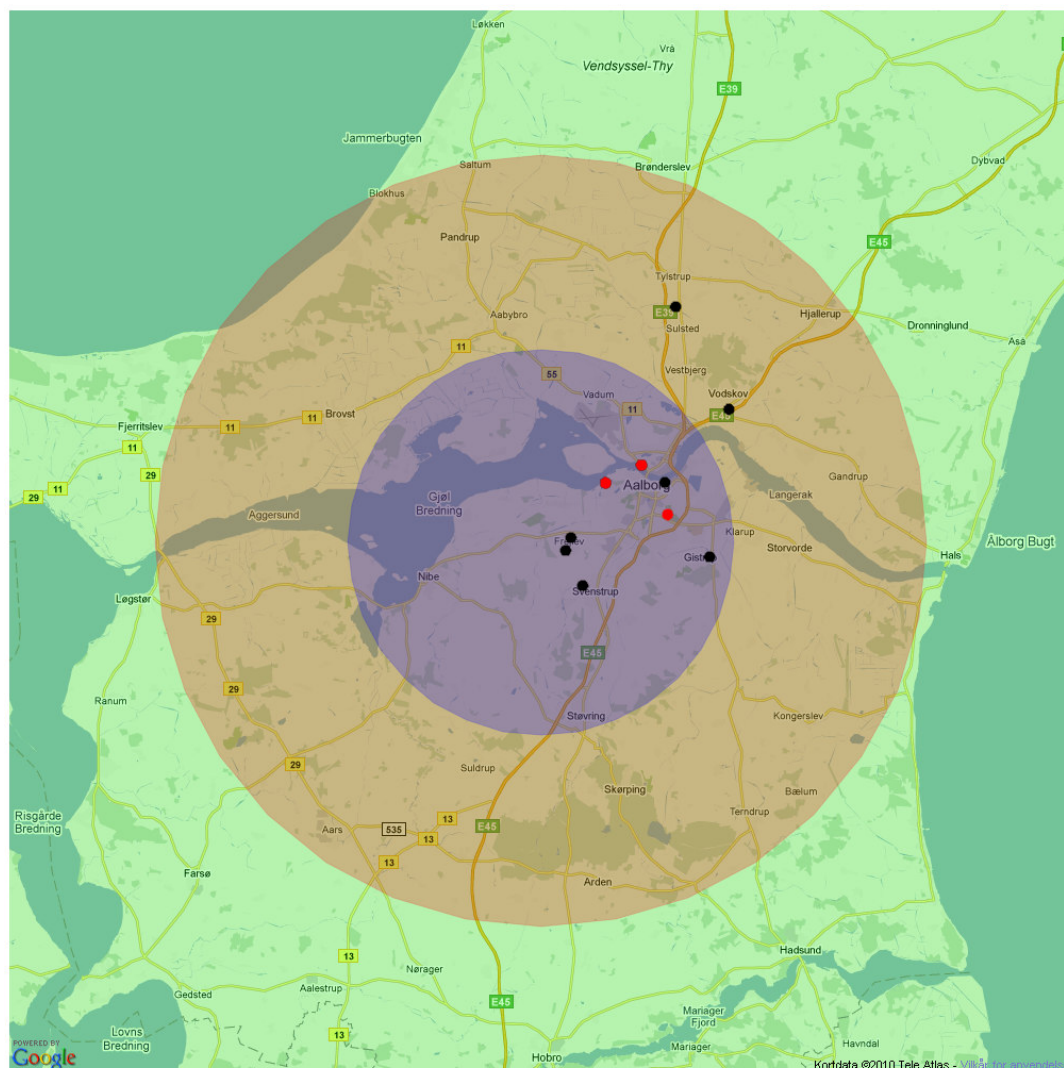


**Figur 5.1.1.a Aalborg-radaren**

**Tabel 5.1.1.a Specifikationer for Aalborg-radaren**

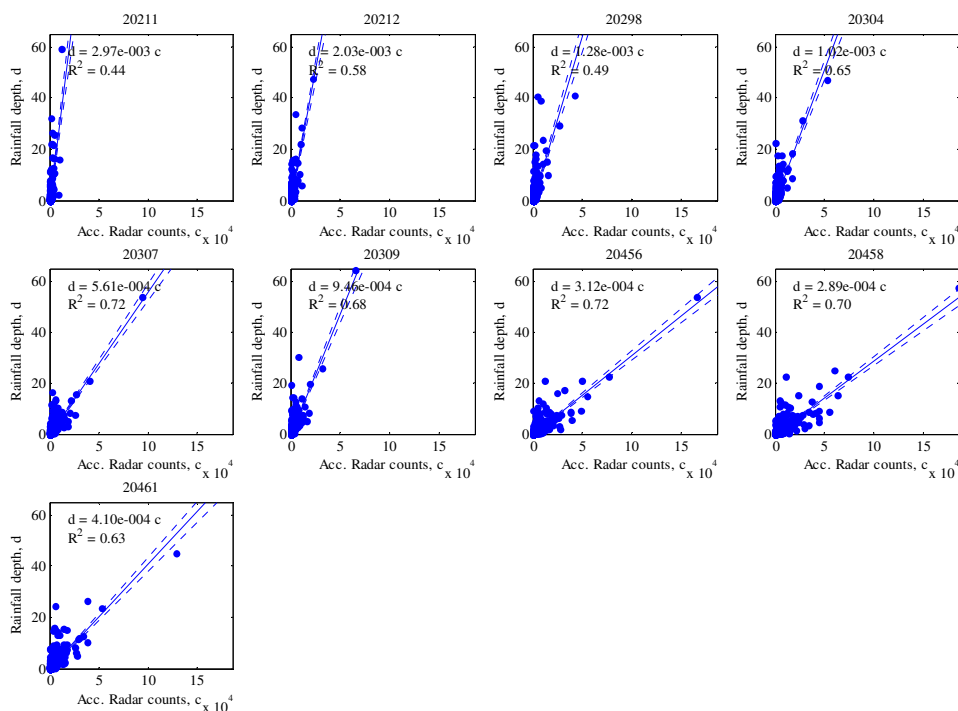
Frekvens	9,4 GHz
Bølgelængde	3,2 cm
Udgangseffekt	25 kW
Rækkevidde	60 km
Stedsopløsning	500 x 500 m
Tidsopløsning	5 min (midlet)
Horisontal strålebredde	0.95 <sup>0</sup>
Vertikal strålebredde	±10 <sup>0</sup>
Ejer	Aalborg Kommune og Aalborg Universitet
Driftsansvarlig	Aalborg Universitet
Producent	DHI
Fabrikat	Furuno 1525 mrk 3
Placering	St. Restrup (Aalborg)
Koordinat	UTM Zone 32 (E 547546, N 6318589)
Datakommunikation	Direkte kommunikation med radar
Drifttid i projektet	19. maj 2009 – 1. juni 2010*
Nedetid	7.3 %

\* Radaren har også været i drift i første fase af nærværende projekt, dvs. fra 8. sep. 2008

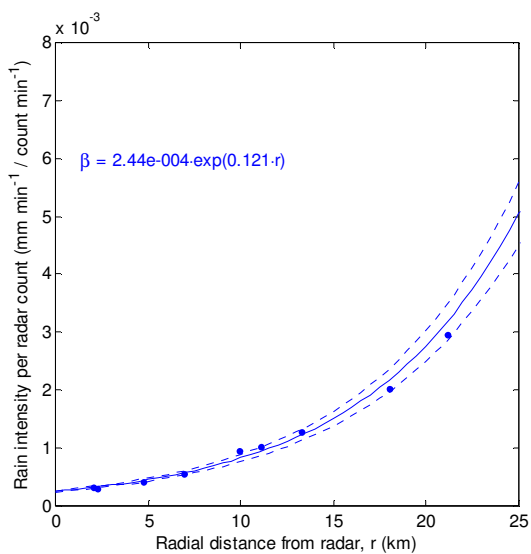


**Figur 5.1.1.b: Blåt område: 0- 15 km fra radaren, rødt område: 15-30 km fra radaren, grønt område 30- 60 km fra radaren. Sorte punkter: SVK regnmålere anvendt til statisk kalibrering, røde punkter on-line regnmålere anvendt til dynamisk og statisk kalibrering.**

Den statistiske kalibrering af Aalborg-radaren er baseret på perioden 7. juli 2008 - 5. maj 2010. På Figur 5.1.1.c ses lineære sammenhænge mellem de 9 regnmålere i Aalborg kommune og radaren og på Figur 5.1.1.d ses disse lineære sammenhænge som funktion af afstanden fra radaren. I Tabel 5.1.1.b vises en opsummering af målt nedbør i hhv. radar og regnmålere i kalibreringsperioden. Nogle data er frasorteret – enten pga. nedbrud af regnmålere eller radar, eller pga. krævet magnetron-skift på radaren. De akkumulerede nedbørsmængder er derfor ikke at sammenligne med statistiske værdier af årsnedbøren.



Figur 5.1.1.c Lineære regression på forholdet mellem mellem regnmålere og radar



Figur 5.1.1.d: Afstandskorrektion og transformation fra "radarcounts" til regnintensiteter for Aalborg-radaren. De stiplede kurver angiver 95 % konfidensintervallet på det eksponentielle fit.

**Tabel 5.1.1.b: Opsummering af statistisk kalibrering**

Regnmåler	SVK måler nr.	afstand til radar (km)	Regnmåler sum, nedbør (mm)	Radar sum, nedbør (mm)
Sulsted Stokbrovej Pumpest.	20211	21.2	782.0	919.4
Vodskov	20212	18.0	876.8	899.9
Gistrup	20298	13.3	868.6	771.0
Aalborg Østerport Pumpest.	20304	11.1	963.5	697.1
Aalborg Renseanlæg Vest	20307	6.9	759.4	659.1
Nørresundby Søvangen Pumpest.	20309	9.9	943.1	719.4
Frejlev Syd Lannerparken	20456	2.0	735.5	685.6
Frejlev Nord Verdisvej	20458	2.3	859.5	870.5
Svenstrup J.	20461	4.7	942.3	796.3
Middel			868.6	779.8

Den statistiske kalibrering af Aalborg radaren vurderes til at være forholdsvis nøjagtig pga. af et stort datagrundlag – dette ses også af smalle konfidensbånd (stiplede linier) på figurerne.

## 5.1.2

### Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler

Aalborg radaren kalibreres dynamisk ved hjælp af tre on-line regnmålere som er præcenteret på figur 5.1.2.a og i tabel 5.1.2.a.

**Tabel 5.1.2.a On-line regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering**

	AAU målernr.	SVK måler nr.	Kommunikation
Nørresundby Søvangen Pumpest.	300	20309	SRO via Krüger
Aalborg Renseanlæg Vest	301*	20307	SRO via Krüger
AAU, Sohngaardsholmsvej	26		Direkte AAU

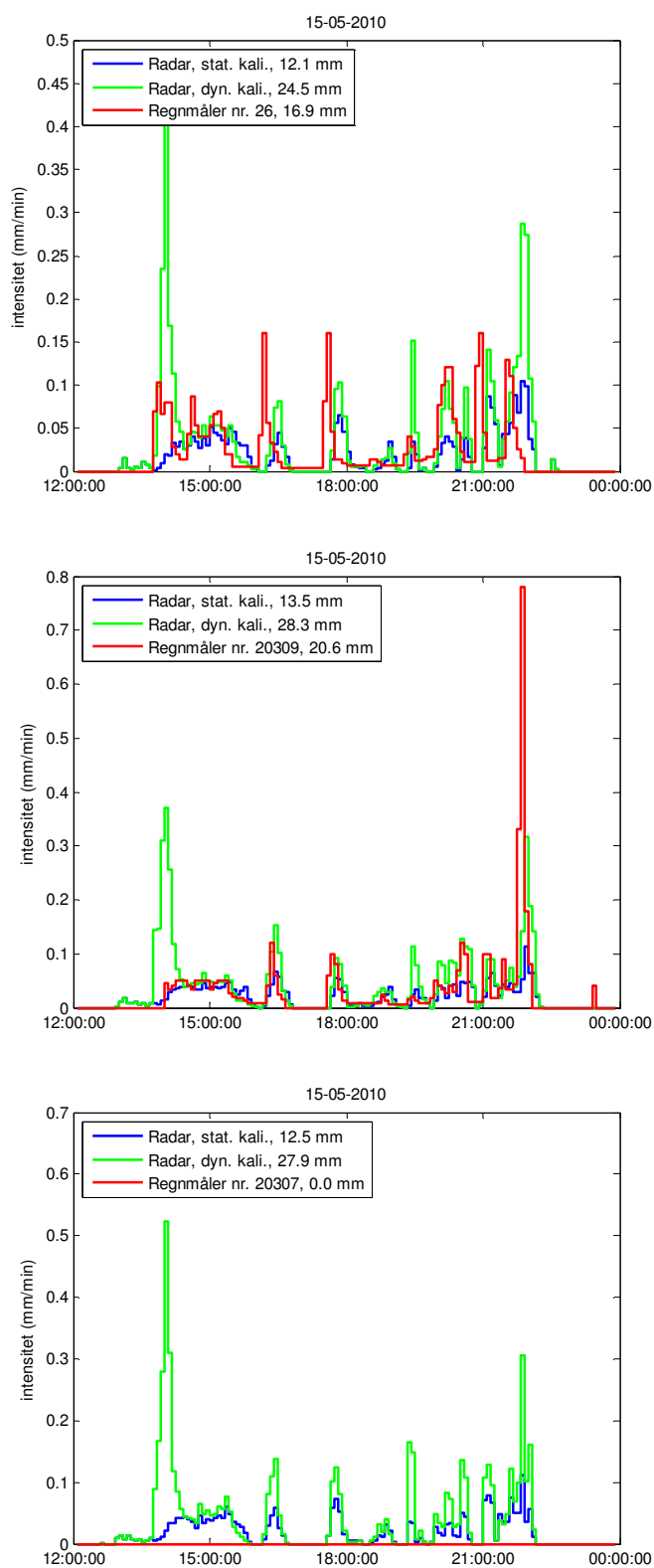
\*Denne måler har i en stor del af projektperioden ikke været tilgængelig on-line pga. kommunikationsproblemer med SRO

Der er valgt at vise tre forskellige eksempler på den dynamiske kalibrering. Den første er baseret på en hændelse den 15. maj 2010.

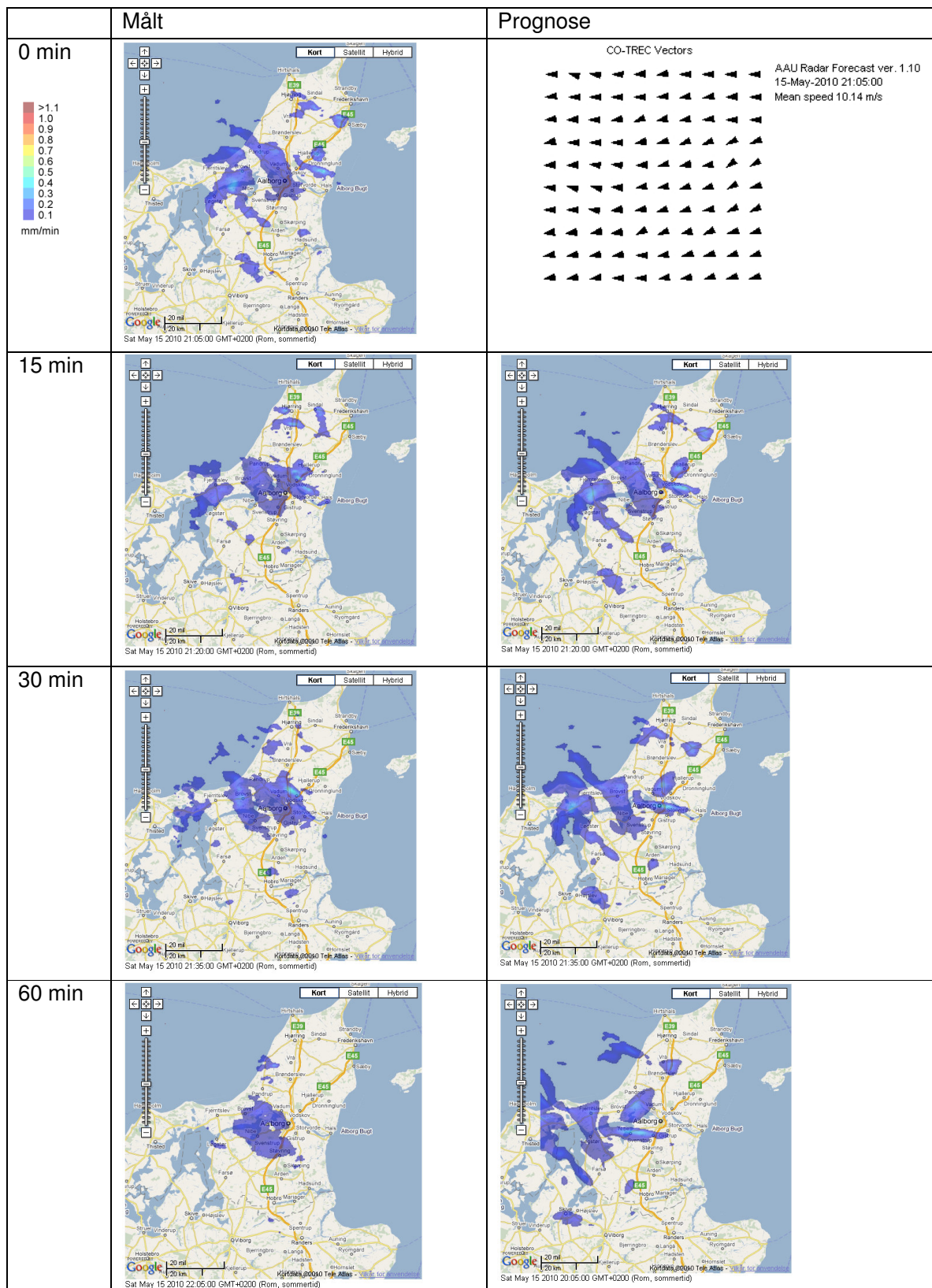
Det ses tydeligt af figurerne at den dynamiske kalibrerings-metode forsøger at opjustere regnintensiteterne, således at radarens intensitetsniveau ligger tættere på det der er målt i regnmålerne, dette betyder dog at den akkumulerede nedbør i hændelse overestimeres en smule i den dynamiske kalibrering i forhold til den statiske.

På figur 5.1.2.b ses et eksempel på regnprognosen den pågældende dag, og på figur 5.1.2.c ses valideringen af prognosen.

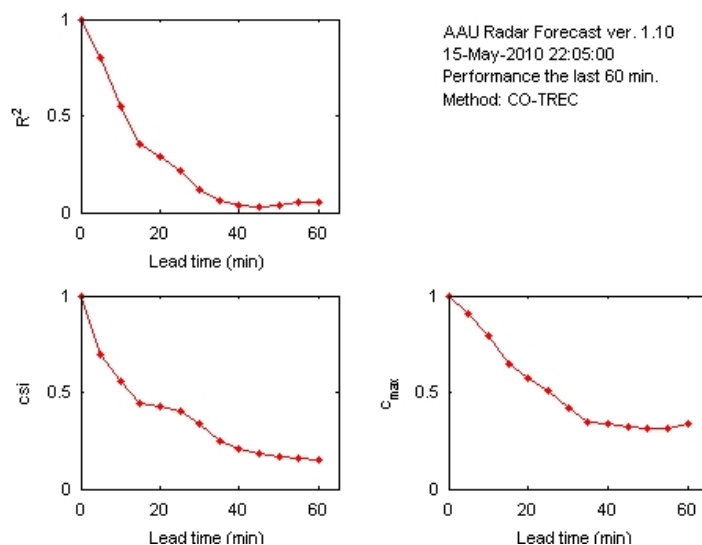




Figur5.1.2.a. Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Aalborg radaren den 15. maj 2010 (Regnmåler 20307 har ikke opsamlet data den pågældende dag viser derfor en regntintensitet på 0)



Figur 5.1.2.b Målt og prognosticeret nedbør den 15. maj 2010

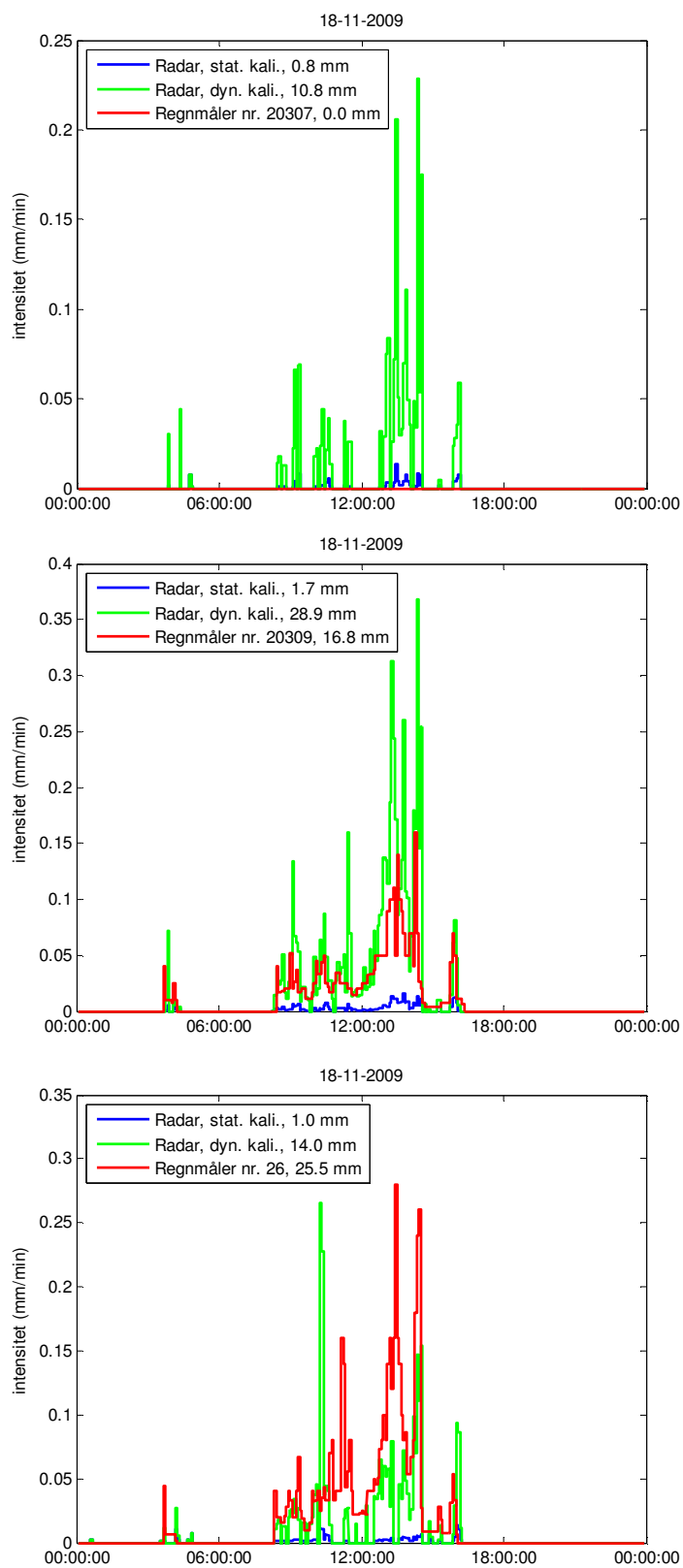


**Figur 5.1.2.c Validering af regnprognose 15. maj 2010 kl. 22.05**

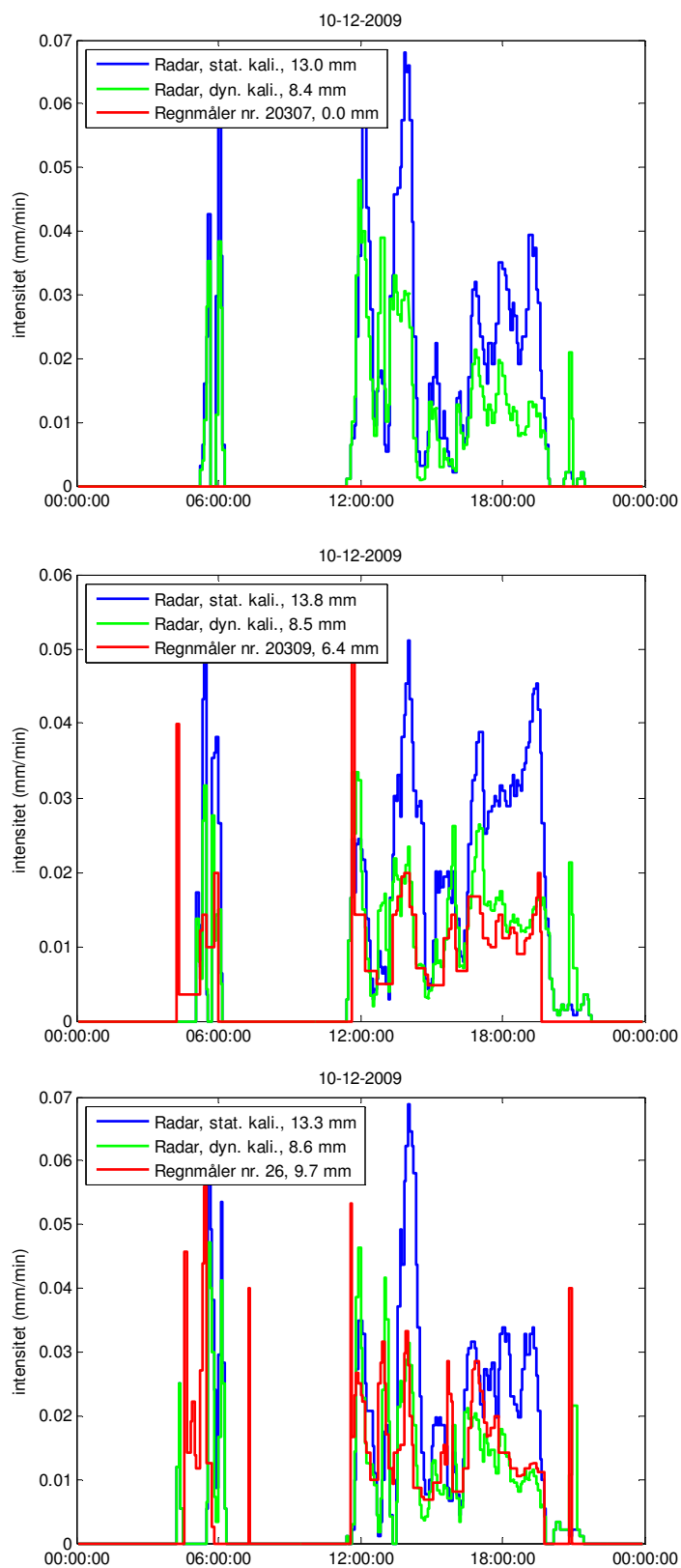
Prognosen for Aalborg by ser fornuftig ud indtil 30 min. prognosen. Herefter divergerer prognosen noget fra det målte, hvilket skyldes at regnen "dør ud" langt fra radarens origo.

Nedenstående præsenteres to lidt ekstreme eksempler på den dynamiske kalibrering. Aalborg radaren fik den 3. december 2009 skiftet magnetron, da signalet radar efterhånden var blevet meget lavt. Eftersom den samme statiske kalibrering er brugt gennem projektet betyder det lave signal at regnintensiteterne underestimeres væsentligt, jf. de blå kurver på figur 5.1.2.d. Anvendes den dynamiske kalibrering ses det at denne sørger for at tilpasse intensiteterne til et mere realistisk niveau ud fra den nedbør der er registreret i de tre regnmålere.

Det er desuden velkendt at efter et magnetronskift at magnetronen skal "brændes af" i en til to uger før at man kan få bruge bare signaler fra radaren. På figur 5.1.2.e er vist en regnhændelse én uge efter magnetronskiftet og det ses tydeligt ved anvendelse af den statiske kalibrering at regnintensiteterne overestimeres pga. af det forstærkede signal fra radaren. I dette tilfælde virker den dynamiske kalibrering vha. de tre regnmålere modsat, dvs. at intensiteten nedjusteres til et mere realistisk niveau, samt en mere realistisk akkumuleret regndybde.



Figur 5.1.2.d Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Aalborg radaren den 18. nov. 2009, umiddelbart før magnetronskift (Regnmåler 20307 har ikke opsamlet data den pågældende dag viser derfor en regntintensitet på 0)



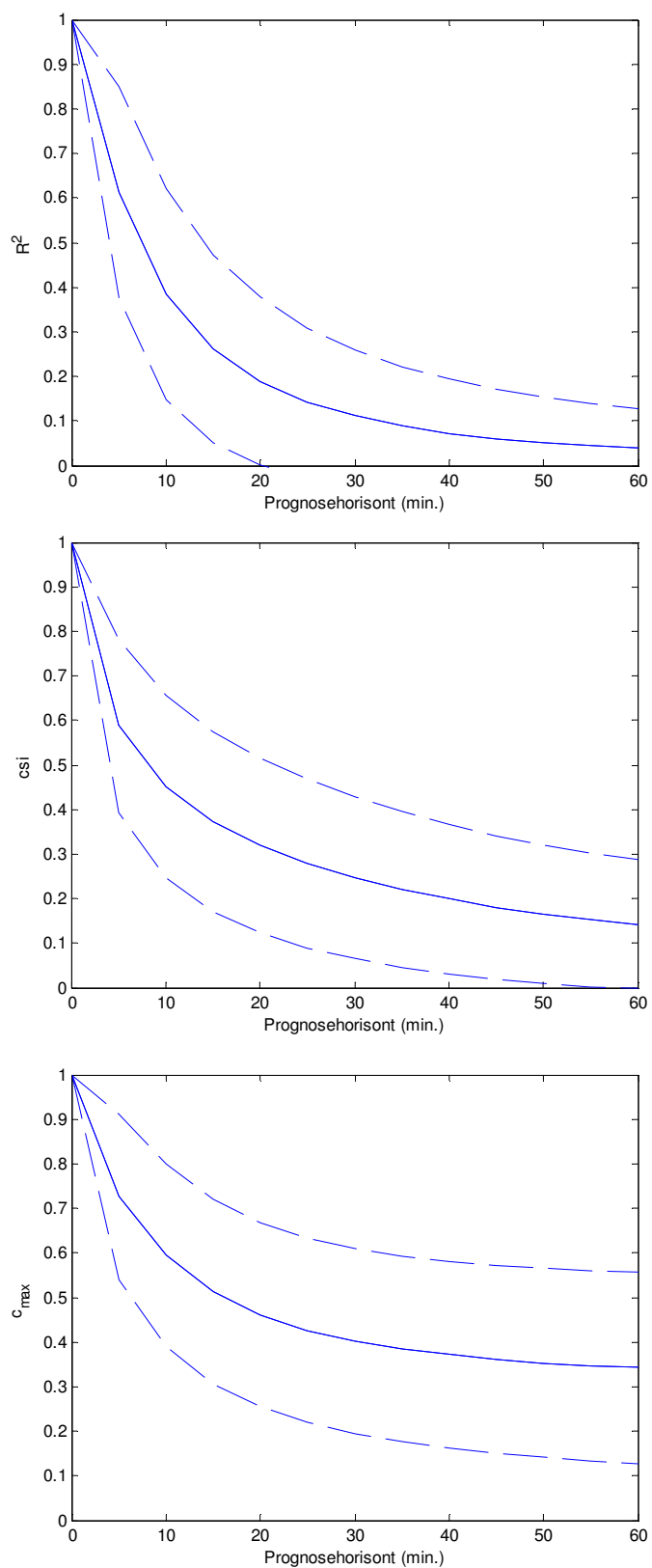
Figur 5.1.2.e Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Aalborg radaren den 10. dec. 2009, umiddelbart efter magnetronskift (Regnmåler 20307 har ikke opsamlet data den pågældende dag viser derfor en regnintensitet på 0)

### 5.1.3

#### **Prognosevalidering**

På figur 5.1.3.a vises en validering af regnprognosen i perioden 19. maj 2009 – 1. maj 2010 ud fra de parametre der er beskrevet i 4.2.5.

Figurene viser at det er muligt at lave en kvantitativ forudsigelse af nedbøren ca. 20- 30 min. frem. Mellem 20-30 og 60 min. kan der kunne prognosticeret om der kommer regn eller ej.



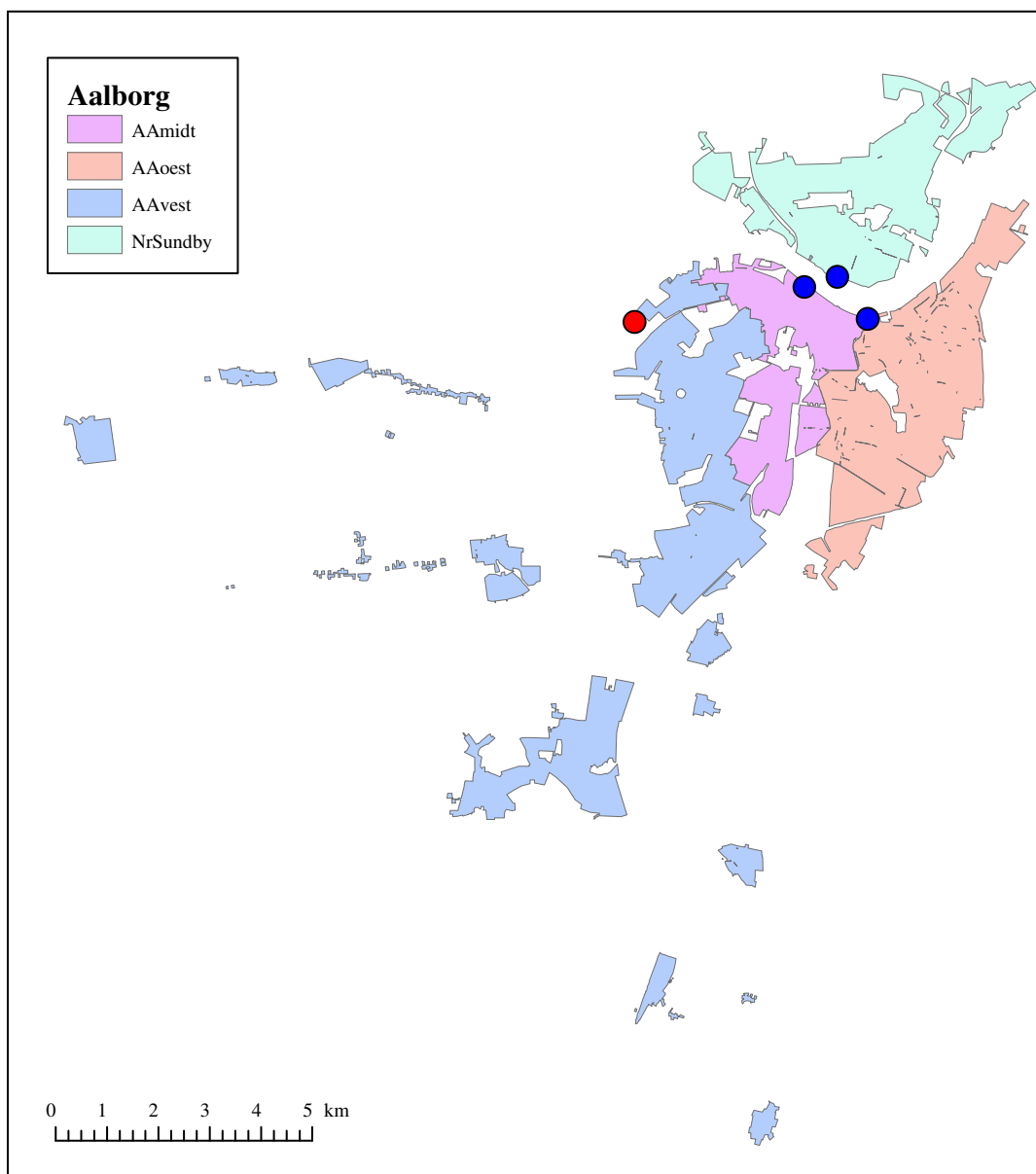
**Figur 5.1.3.a** Validering af regnprognosen baseret på regnvejrs data i perioden 19. maj 2009 – 1. maj 2010. De fuldtoptrukne linier angiver middelværdien og de stiplede en gange spredningen.

### 5.1.4

#### Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

For Aalborg er opbygget en model for tilstrømningen til Aalborg Renseanlæg Vest (RAV). Oplandet er delt op i fire dele, hvoraf de tre er velafgrænsede kompakte områder med bymæssig bebyggelse, mens det fjerde opland, Aalborg Vest, inkluderer små spredte byområder i en afstand af op til 10 km fra den indre by, se figur 5.1.4.a. Reelt sker der også afstrømning til oplandet Aalborg Vest fra en del af den syd for beliggende Rebild Kommune, men dette er udeladt i projektet.

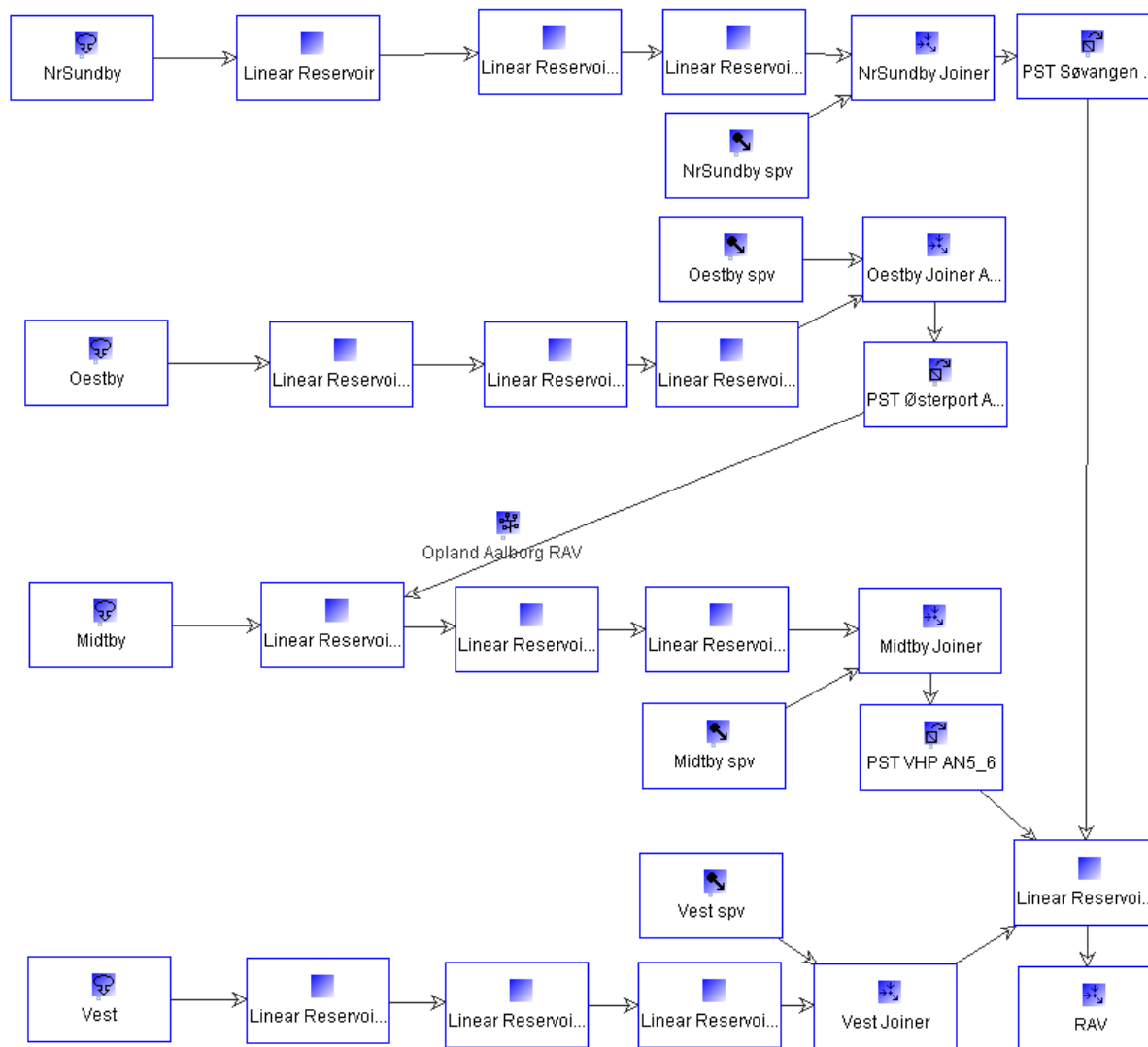
En oversigt over WaterAspects modellen kan ses i figur 5.1.4.b.



Figur 5.1.4.a

De fire oplande i Aalborg modellen med angivelse af prognosepunkt (rød) og øvrige kalibreringspunkter (blå).



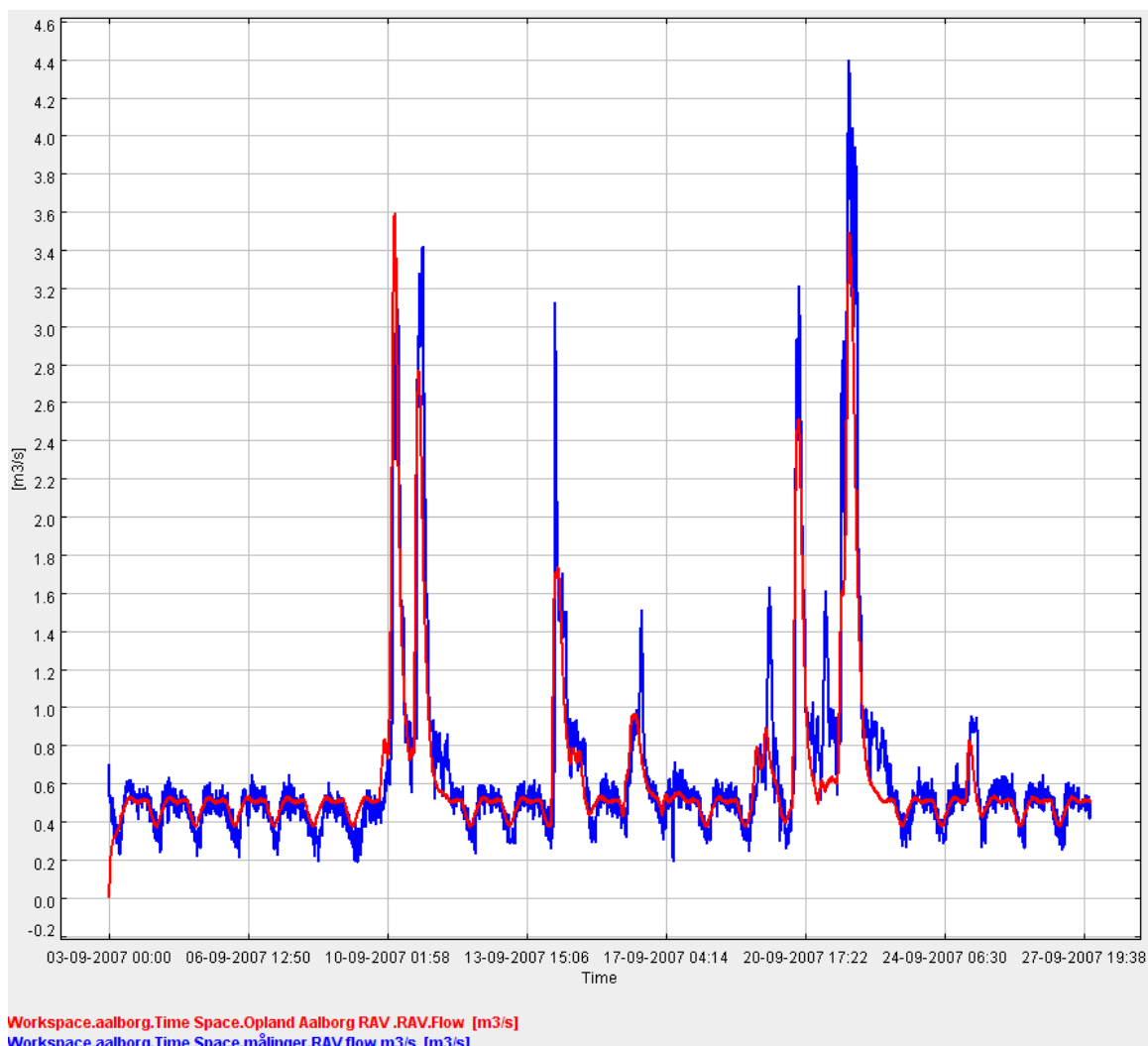


**Figur 5.1.4.b**  
Oversigt over WaterAspects modellen for Aalborg.

### Kalibrering

Kalibreringen af modellen er udført ud fra historiske flowmålinger fra indløbet til Aalborg Renseanlæg Vest (RAV) samt ud fra pumpedata for de tre pumpestationer *PST Søvangen* i Nørre Sundby, *PST Østerport* i Aalborg Østby og *PST Vestre Havnepromenade (VHP)* i Aalborg midtby.

Kalibreringen er udført ud fra data for september måned 2007. Resultatet heraf for indløbet til Renseanlæg Vest ses i figur 5.1.4.c.



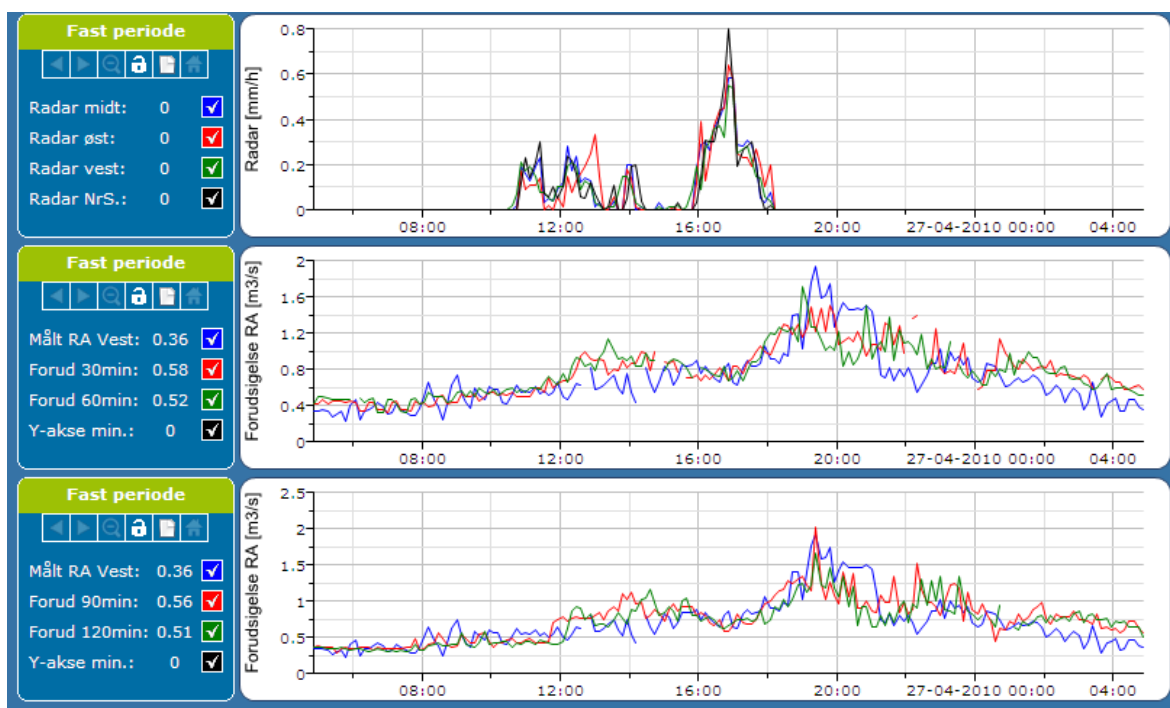
**Figur 5.1.4.c**  
Målt og modelleret indløb til Aalborg Renseanlæg Vest. Den blå linje er de målte data.

### Systemet i brug

26. april 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelse den 26. marts 2010 i Aalborg. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte er både de lange og korte afstrømningsprognoser gode. Både hvad angår tidspunkt for peak, afstrømningens varighed og for hvor højt flowet blev. Se figur 5.1.4.d.



**Figur 5.1.4.d**  
**STAR brugerfladen fra 26. april 2010 i Aalborg.**

28. – 29. maj 2010

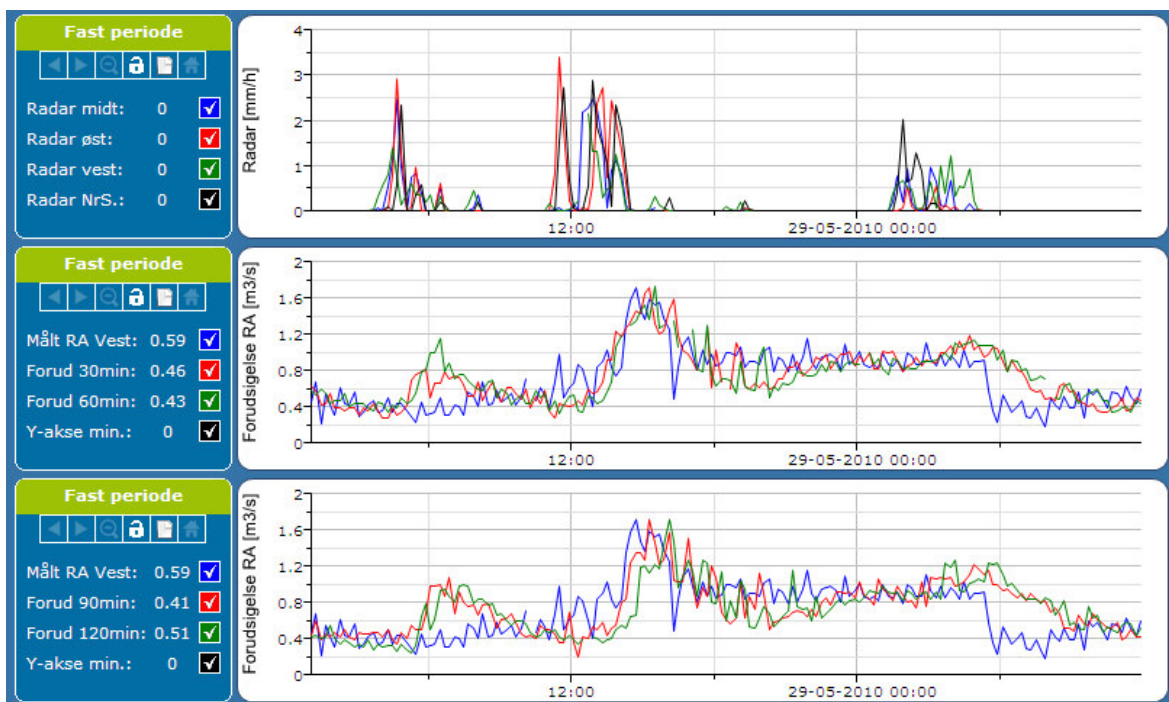
Radaren viser, at der har været tre regnhændelser den 28. – 29. maj 2010 i Aalborg. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

De tre regnhændelser er blevet forudsagt forskelligt i forhold til hvad det målte flow reelt blev. Se figur 5.1.4.e. Den første regnhændelse overestimeres i både de korte og lange afstrømningsprognoser, da regnafstrømningen ikke ses nævneværdigt på det målte flow.

Den efterfølgende regn, der er noget kraftigere, forudsiges til gengæld godt af især de korte 30 og 60 min afstrømningsprognoser. Både hvad angår tidspunkt for øget regnafstrømning og peakværdi. De lange afstrømningsprognoser forudsiger tidsmæssigt afstrømningen for sent, men rammer i øvrigt peakværdi og varighed udmærket.

Den tredje regnhændelse forudsiges udmærket hvad angår peak, men regnafstrømningen viste sig reelt at ske noget hurtigere end i modellen.

Tilsammen er de tre regnhændelser forudsagt godt i forhold til det målte.



**Figur 5.1.4.e**  
STAR brugerfladen fra 28. maj 2010 i Aalborg.

### 5.1.5

#### Vurdering og perspektiver

Aalborg radaren og regnprognosen fra denne har fungeret godt og stabilt i projektperioden, og radar og prognose giver meget stabile resultater. I forhold til den dynamiske kalibrering har der været nogle problemer med kommunikationen med én af online-regnmålerne, hvorfor denne ikke har været anvendt i en del af projektet. Desuden har den dynamiske kalibrering været kompliceret af at der er benyttet to forskellige systemer til online regnmålerdata. Det ene system er koblet på Aalborg kommunes SRO-anlæg og det anden koblet direkte til AAU. Førstnævnte leverer data hvert andet minut og sidstnævnte hvert minut. Dette har kompliceret synkroniseringen med radaren som leverer data hvert 5. minut.

I dag opstartes regnstyring på RAV ud fra signalet fra en enkelt nedbørsmåler på anlægget, men denne måling selvsagt ikke er repræsentativ for nedbøren over hele det store opland som der er til anlægget. Dog skal det siges at tidligere undersøgelse har vist at denne regnmåler er særligt godt placeret, idet den faktisk ved hele 75% af nedbørshændelserne kan levere et varsel på gennemsnitlig 90 minutter. I projektperioden har det været muligt at sammenligne den radarbaserede prognose med den nedbørsmålerbaserede. Her har det vist sig ved flere hændelser at den radarbaserede prognose kan give et varsel på cirka 120 minutter mod nedbørsmålerens 90 minutter ved samme hændelse. Dette bekræfter at Aalborg-radaren med høj sikkerhed kan forudsige regn i et 30 minutters interval. Det vil altså i

nogle tilfælde være muligt at forbedre varslet til ATS ved brug af radar, og effekten af dette vil være en mere effektiv ATS styring og reduceret aflastning under opstart af regnstyring.

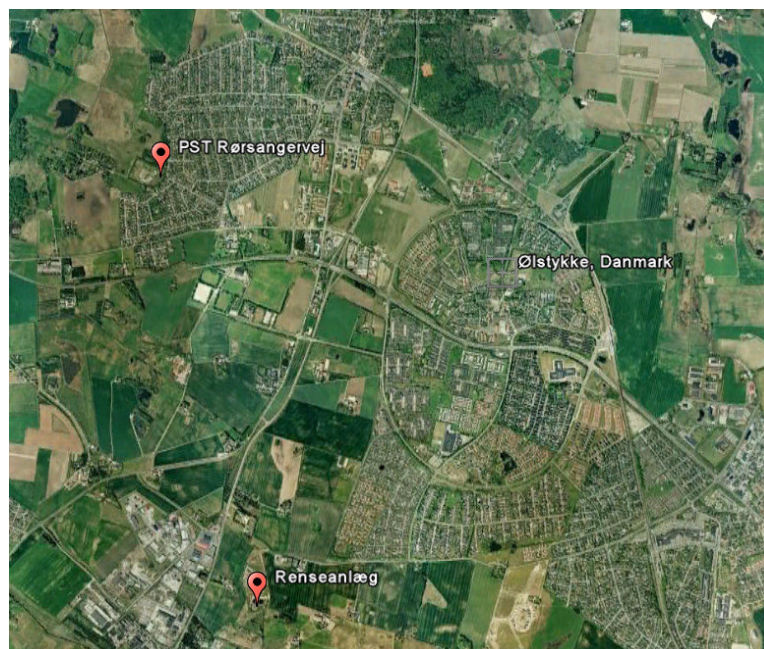
## 5.2

### Egedal

Egedal Forsyning besluttede sig for i 2008/2009 at indkøbe en vejrradar. Formålet med dette var i første omgang at få en bedre registrering af nedbøren, og måske på sigt at inddrage radaren i styring. Prognosepunktet blev valgt til tilløbet ved Ølstykke Renseanlæg, som er et potentielt sted for implementering af vejrradarbaseret styring. Egedal har således selv en X-bånd radar fra DHI, men den var ikke sat op ved dette projekts opstart og er ikke blevet helt operationsdygtig i løbet af projektperioden. Da Egedal ligger tæt på Hvidovre, har Hvidovre Forsyning A/S tilbudt, at Egedal kan anvende data fra deres X-bånds radar.

Hvidovres X-bånds radar er placeret ca. 25 km. sydøst for det område, der anvendes i modellen for Egedal.

Prognosepunktet, som er anvendt i dette projekt, er tilløbet til Ølstykke Renseanlæg, hvilket er angivet på figur 5.2.a.



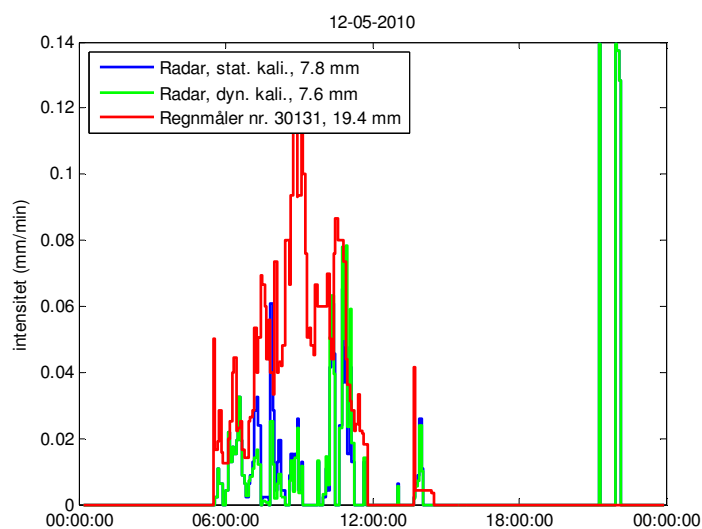
**Figur 5.2.a.**  
De røde nåle angiver placeringen af renseanlægget i Ølstykke og pumpestationen ved Rørsangervej (baggrundskort fra Google Earth).

### 5.2.1

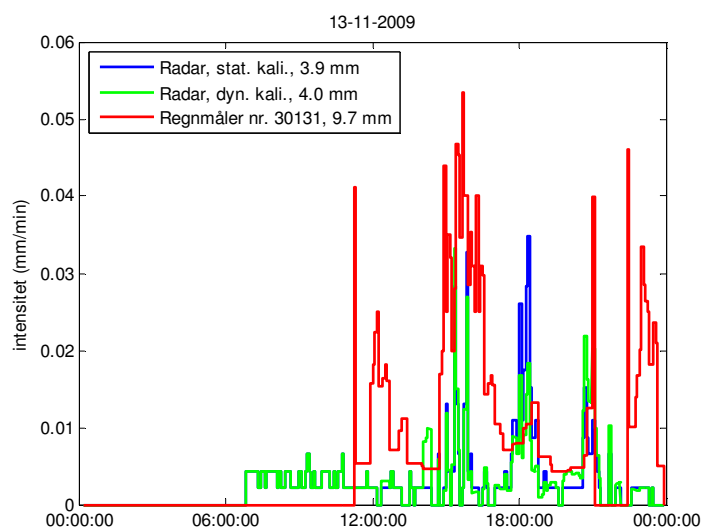
#### Radaropsætning og resultater

I nærværende projekt er Hvidovre-radaren anvendt til forudsigelse af nedbøren i Ølstykke. Opsætning, kalibrering og prognose samt validering er derfor beskrevet i afsnit 5.3.

Der er i projektet ikke foretaget en dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren i forholdt til lokale on-line regnmålere i Egedal kommune. For at vurdere Hvidovre-radarens anvendelse i Egedal er der i stedet sammenlignet med SVK-måleren placeret i Frederikssund nr. 30131. Sammenligningen ses på figur 5.2.1.a for hændelsen beskrevet i afsnit 5.3.2, den 12. maj 2010 og tilsvarende for hændelsen den 13.11 2009. på figur 5.2.1.b.



**Figur 5.2.1.a** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren den 12. maj 2010. Regnmåler 30131 har ikke været anvendt i den dynamiske kalibrering.



**Figur 5.2.1.b** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren den 12. maj 2010. Regnmåler 30131 har ikke været anvendt i den dynamiske kalibrering.

Det er i begge eksempler tydeligt at Hvidovre-radaren underestimerer både intensiteter og akkumuleret nedbør i Frederikssund, hvilket skyldes en afstand på 30,5 km fra Hvidovre-radaren, og som det blev konkluderet i afsnit 5.3 kan Hvidovre-radaren kun anvendes til en fornuftig kvantitativ estimering af nedbørsmængderne ud til ca. 20 km. Frederikssund-regnmåleren ligger dog lidt længere fra radaren end Ølstykke (25 km), hvilket gør sammenligningen lidt værre end reelt.

Konklusionen på anvendelsen af Hvidovre-radaren i Egedal Kommune er at radaren er placeret for langt væk til at kunne give fornuftige resultater. I stedet kunne have været anvendt DMI's C-bånds radar på Stevns eller Egedal Kommunes egen X-bånd radar, men denne er ved projektets afslutning endnu ikke klar til brug.

## 5.2.2

### **Opbygning af afstrømningsmodel og resultater**

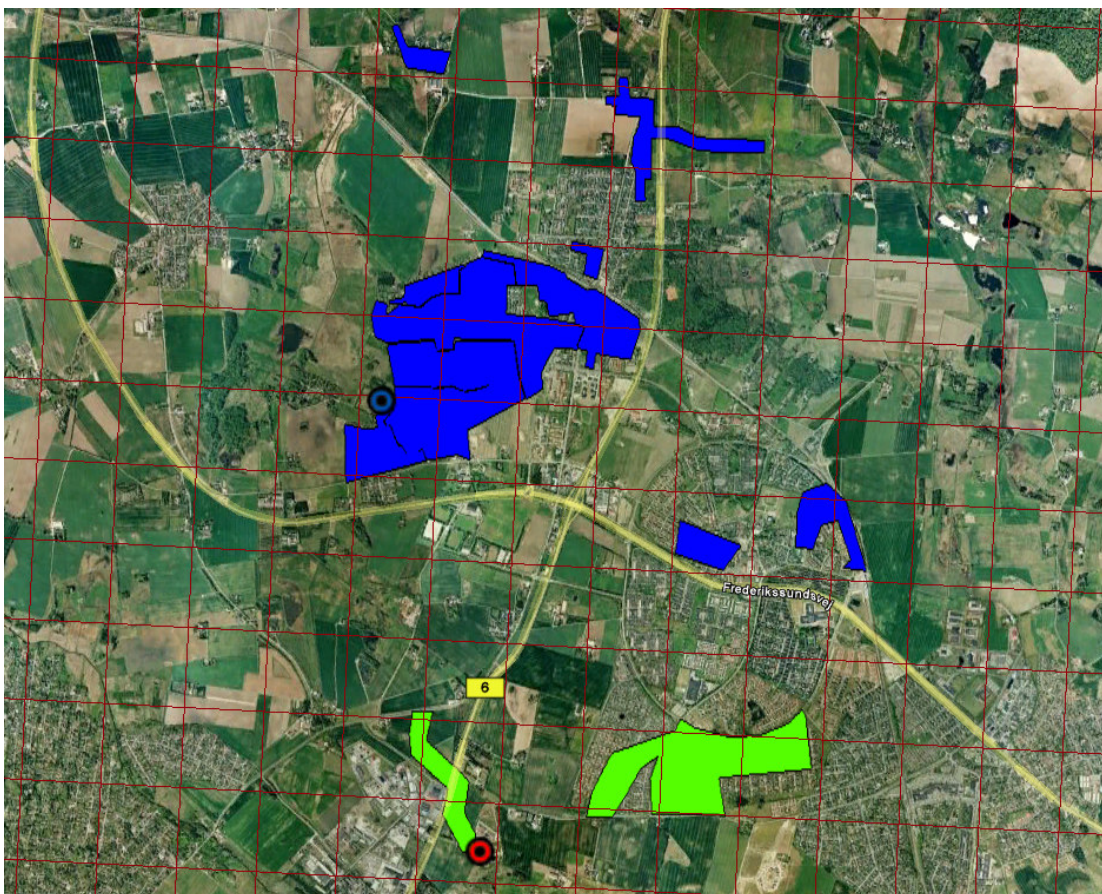
Modellen er opbygget så den simulerer tilstrømningen til renseanlægget fra Ølstykke og omegn.

Oplandet er samlet som to deloplande i modellen, se figur 5.2.2.a. En del af oplandet afstrømmer direkte til Ølstykke Renseanlæg, mens en del afstrømmer til pumpestationen på Rørsangervej, og derfra pumpes til renseanlægget.

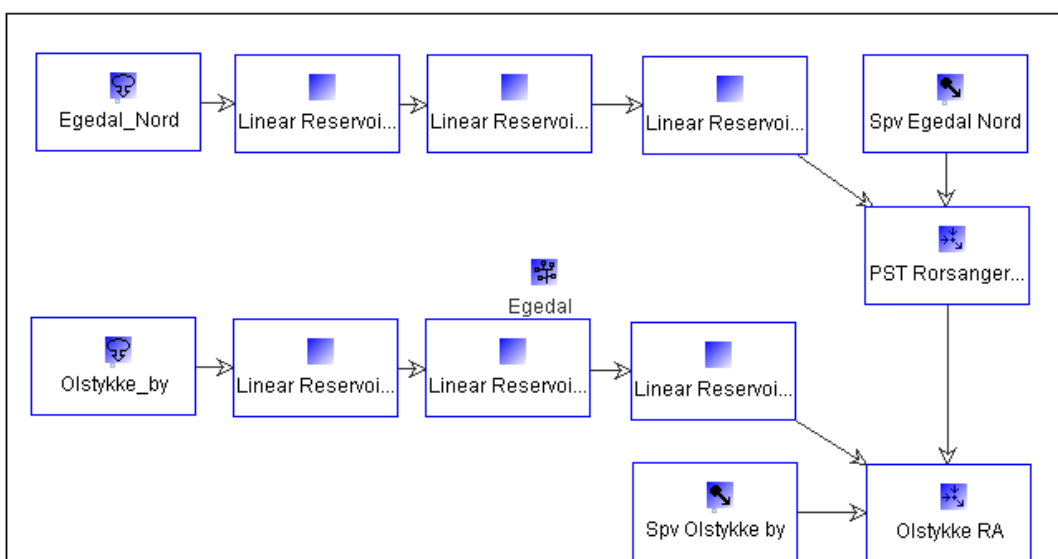
En oversigt over WaterAspects modellen ses i figur 5.2.2.b. Som kalibrering er anvendt historiske data for tilløbet til renseanlægget, hvorfor modellen er kalibreret imod disse.

---





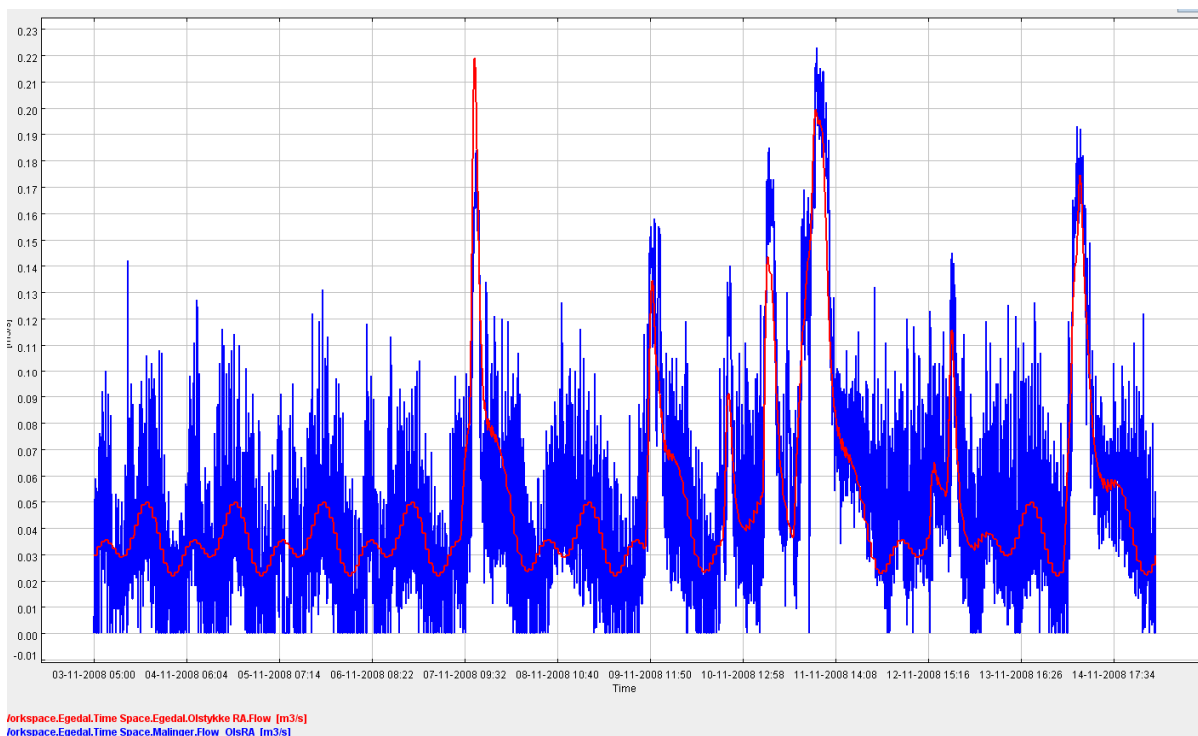
**Figur 5.2.2.a**  
De to oplande for Egedal. Blåt afstrømmer til PST Rørsangervej, grønt direkte til Ølstykke renseanlæg. Desuden fremgår radarens grid (baggrundskort fra Google Earth).



**Figur 5.2.2.b**  
Oversigt over WaterAspects modellen for Egedal.

## Kalibrering

Modellen er kalibreret ud fra historiske måledata for tilløb til renseanlægget, for november måned 2008. Figur 5.2.2.c viser den målte og modellerede tilstrømning til renseanlægget i kalibreringsperioden.



**Figur 5.2.2.c**

Målt og modelleret indløb til renseanlægget. Den blå linje repræsenterer det målte.

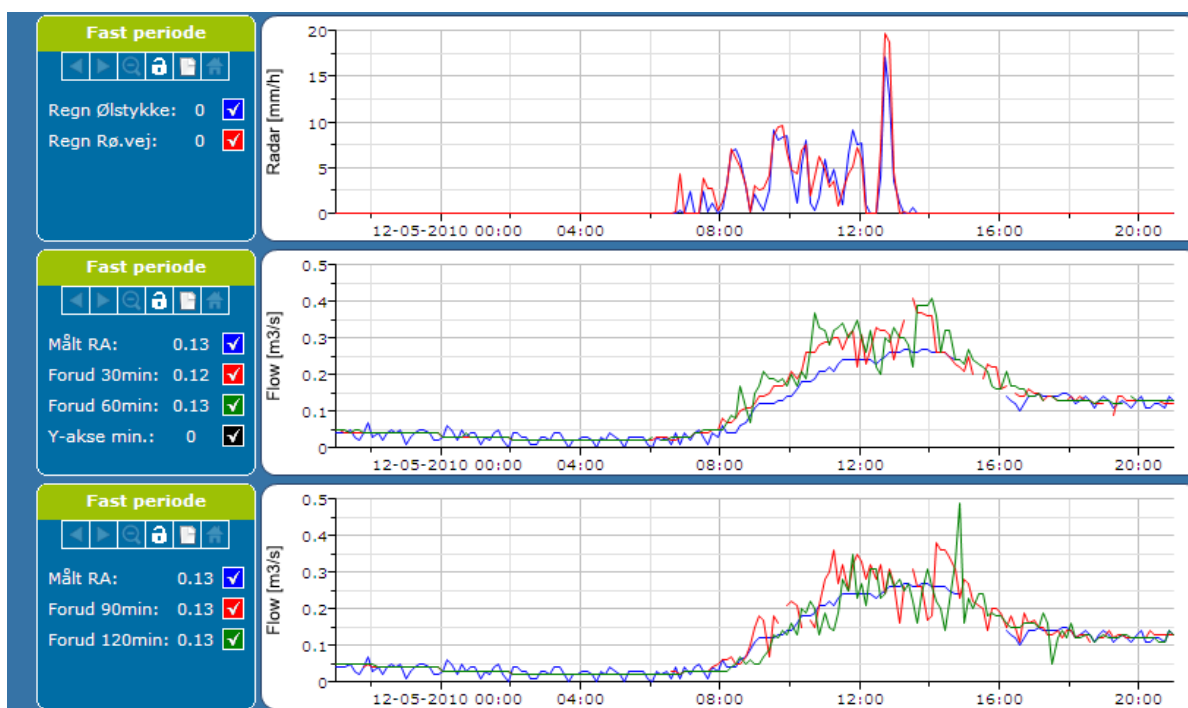
## Systemet i brug

12. maj 2010j

Radaren viser, at der har været en regnhændelse den 12. maj 2010 i Egedal. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte har både de lange og korte afstrømningsprognoser forudsagt tidspunktet for regnafstrømning godt. Grunden til de varierende flow under regnafstrømningen skyldes modelopbygningen af pumpestationen på Rørsangervej.

For peakværdi overestimerer modellen lidt, men regnafstrømningens varighed stemmer godt overens. Se figur 5.2.2.d.



**Figur 5.2.2.d**  
STAR brugerfladen fra 12. maj 2010 i Egedal.

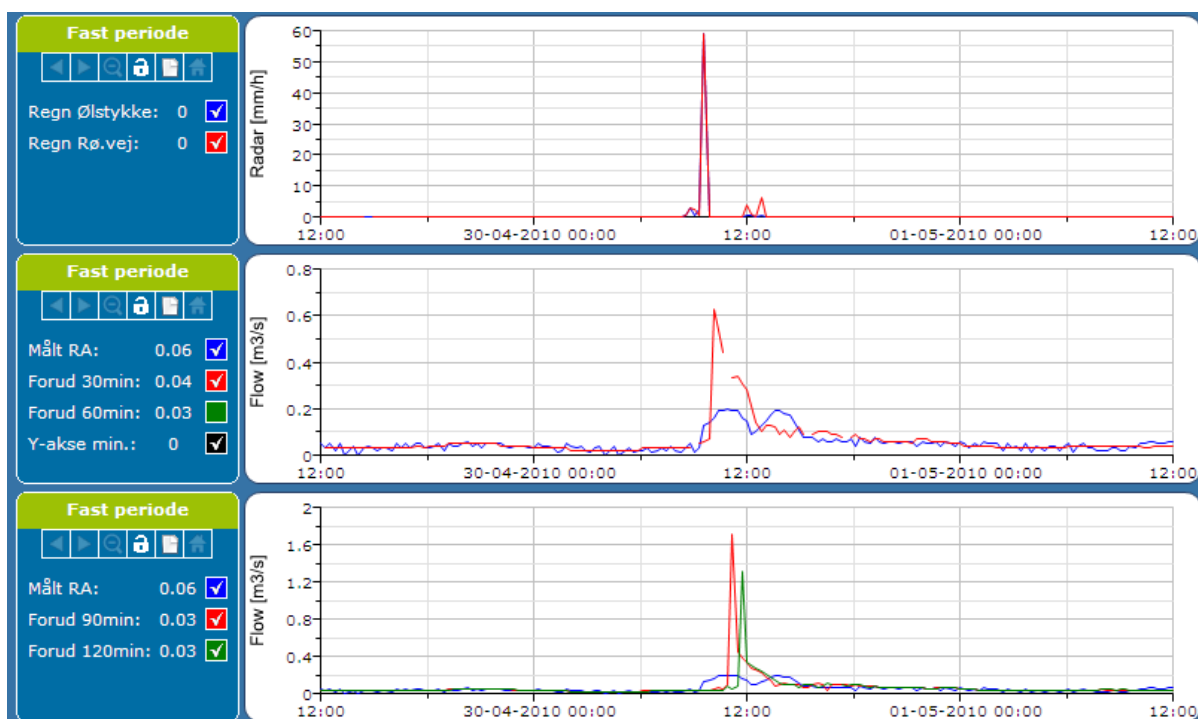
30. marts 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelse den 30. marts 2010 i Egedal. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel. Se figur 5.2.2.e.

Der har været en fejl i form af kraftig overestimering på radaren, hvilket forplanter sig videre i gennem modellen. Derfor bliver peakværdierne så høje i afstrømningsprognoserne. Tidspunkter og den tidsmæssige periode for regnafstrømning kan dog godt evalueres.

De to lange afstrømningsprognoser på 90 og 120 min forudsiger en regnafstrømning, men både tidspunkt og den tidsmæssige periode for regnafstrømning passer dårligt.

Af de korte afstrømningsprognoser er det kun 30 min forudsigelsen, der tidsmæssigt stemmer godt overens med regnafstrømningen; både hvad angår tidspunktet for øget tilløb til renseanlægget og for regnafstrømningens varighed. 60 min forudsigelsen er ikke vist, da den svarer til de dårlige lange afstrømningsprognoser.



**Figur 5.2.2.e**  
 STAR brugerfladen fra 30. marts i Egedal. For at gøre det lettere at se forløbet af 30 min forudsigelsen, er parameteren for 60 min forudsigelsen ikke vist.

### 5.2.3

#### Vurdering og perspektiver

I forhold til at forudsige regnafstrømning i Egedal, er placeringen af radaren (i Hvidovre) ikke optimal. De fleste regnhændelser kommer fra vestlig retning, og da radaren er placeret ca. 25 km sydøst for Egedal, er det meget usikre radarbilleder, der anvendes til afstrømningsprognoserne. Dette fremgår af regnhændelsen den 30. marts, hvor de lange prognoser ikke er brugbare, fordi de tager udgangspunkt i usikre radarbilleder. Kun den korte 30 min forudsigelse er acceptabel.

Derimod forudsiges regnhændelsen den 12. maj 2010 godt for både de korte og lange afstrømningsprognoser. Dette viser, at det er muligt at prognosticere op til 120 min frem i tiden. Grunden til, at regnhændelsen den 12. maj forudsiges så godt, også for de lange prognoser, er, at regnen kom fra sydøstlig retning, som er optimal i forhold til den anvendte radar.

I løbet af kort tid vil den indkøbte radar være implementeret hos Egedal Forsyning. Ud fra positive erfaringer, som er opnået på andre oplande med X-båndsradarer, forventes det at idriftsætningen af den nye radar vil kunne forbedre afstrømningsprognoserne for Ølstykke oplandet betragteligt. Selve afstrømningsmodellen har tilsyneladende fungeret tilfredsstillende under

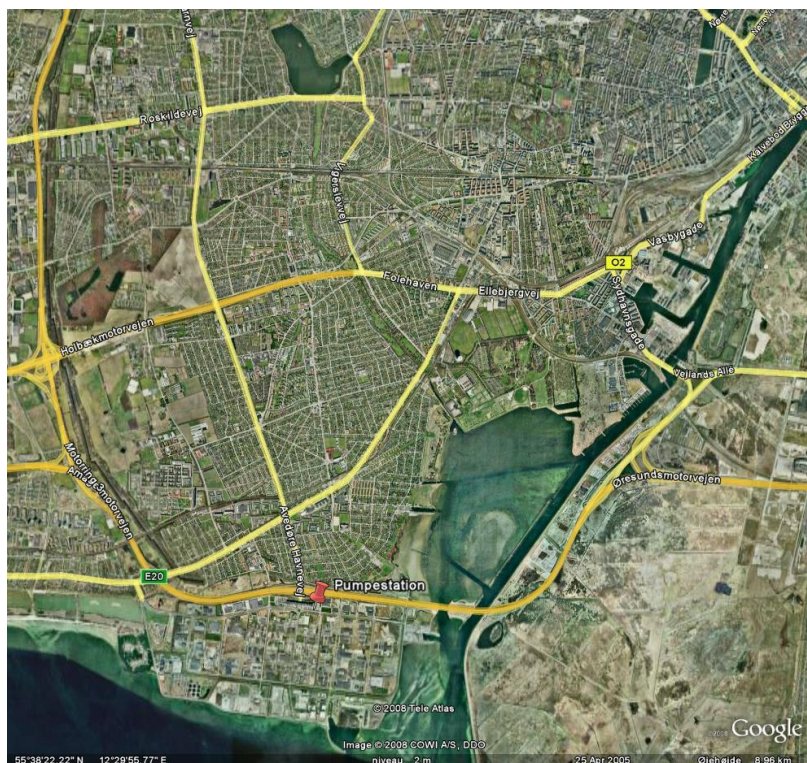
VBSS projektet, men inputtet med nedbørsprognose har simpelthen ikke haft høj nok kvalitet.



## 5.3

**Hvidovre**

Det valgte prognosepunkt i Hvidovres afløbssystem er tilløbet til Muslingevej pumpestation, hvorfra der under kraftigt regn aflastes til Kalveboderne. Det forventes at en prognose af tilstrømningen til dette punkt i afløbssystemet vil give mulighed for bedre at udnytte den volumen der ligger i pumpe-sumpen og de tilstødende ledninger ved en hensyntagen til forholdene nedstrøms for pumpestationen. I dag pumpes det tilstrømmende vand hurtigst muligt videre i systemet. Et bedre kendskab til, hvor meget tilstrømning der egentligt vil komme til pumpe-sumpen i den nære fremtid, vil give mulighed for at tilbageholde vand der ellers vil aflaste i de nedstrøms byggeværker. Området fremgår af figur 5.3.a.



**Figur 5.3.a**  
Den røde nål angiver placeringen af Muslingevejs pumpestation.

## 5.3.1

**Radars opsætning og resultater**

Radaren i Hvidovre er placeret tæt på det modellerede opland og er derfor ideelt placeret. Hvidovre-radaren har desuden den fordel at være placeret i et område hvor der er rigtig mange regnmålere fra spildevandskomiteens regnmålersystem. I nærværende projekt er 36 af spildevandskomiteens (SVK) regnmålere anvendt til den statiske kalibrering.

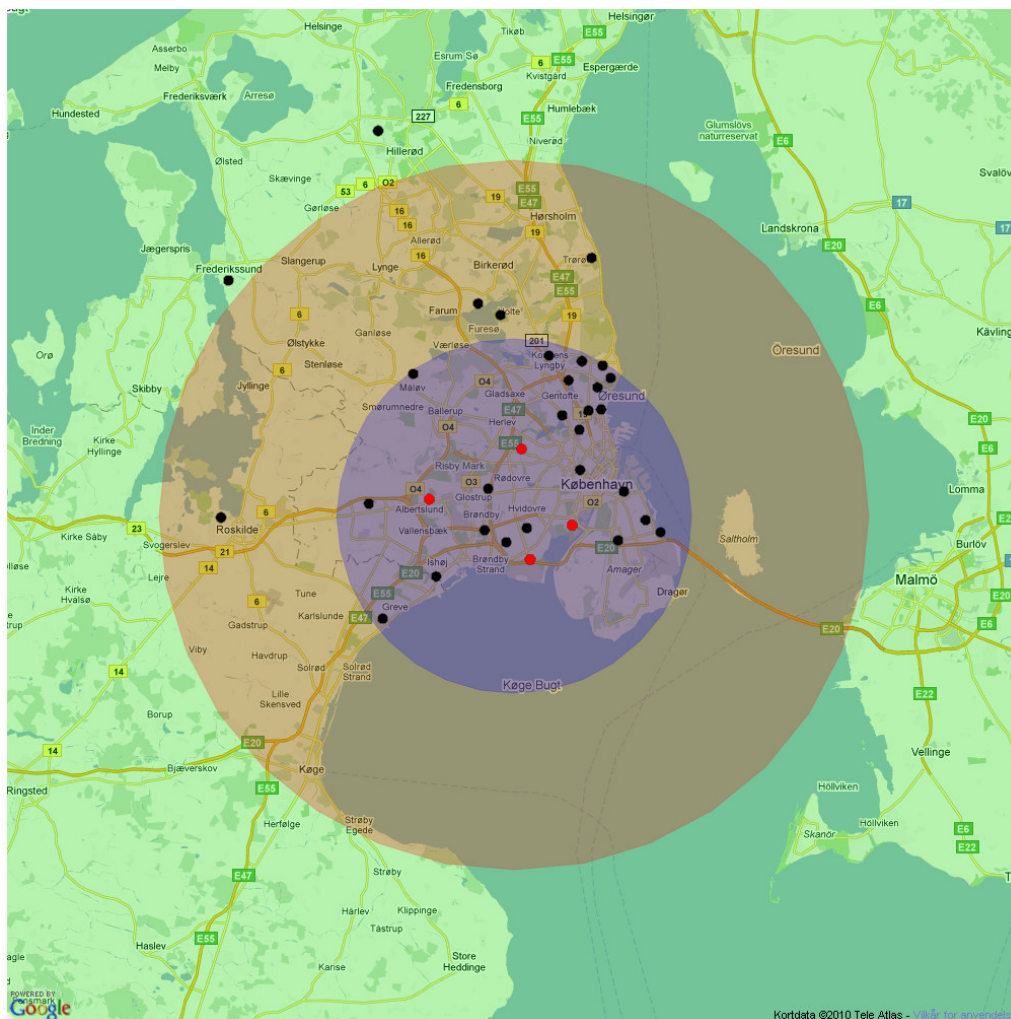


**Figur 5.3.1.a** Vejrradaren i Hvidovre placeret på et tag med clutterfence rundt om radaren (DHI 2008)

**Tabel 5.3.1.a** Specifikationer for Hvidovre-radaren

Frekvens	9,4 GHz
Bølgelængde	3,2 cm
Udgangseffekt	25 kW
Rækkevidde	60 km (15 km kvantitativt)
Stedsopløsning	500 x 500 m
Tidsopløsning	5 min (midlet)
Horisontal strålebredde	0,95 <sup>0</sup>
Vertikal strålebredde	±10 <sup>0</sup>
Ejer	Hvidovre Forsyning
Driftsansvarlig	DHI
Producent	DHI
Fabrikat	Furuno FAR 2127
Placering	Avedøre Havnevej 37, 2650 Hvidovre
Koordinat	UTM Zone 33 (E 339985, N 6170506)
Datakommunikation	FTP til AAU-server
Drifttid i projektet	19. maj 2009 – 1. juni 2010*
Nedetid	18.0%

\* Radaren har også været i drift i første fase af nærværende projekt, dvs. fra 8. sep. 2008

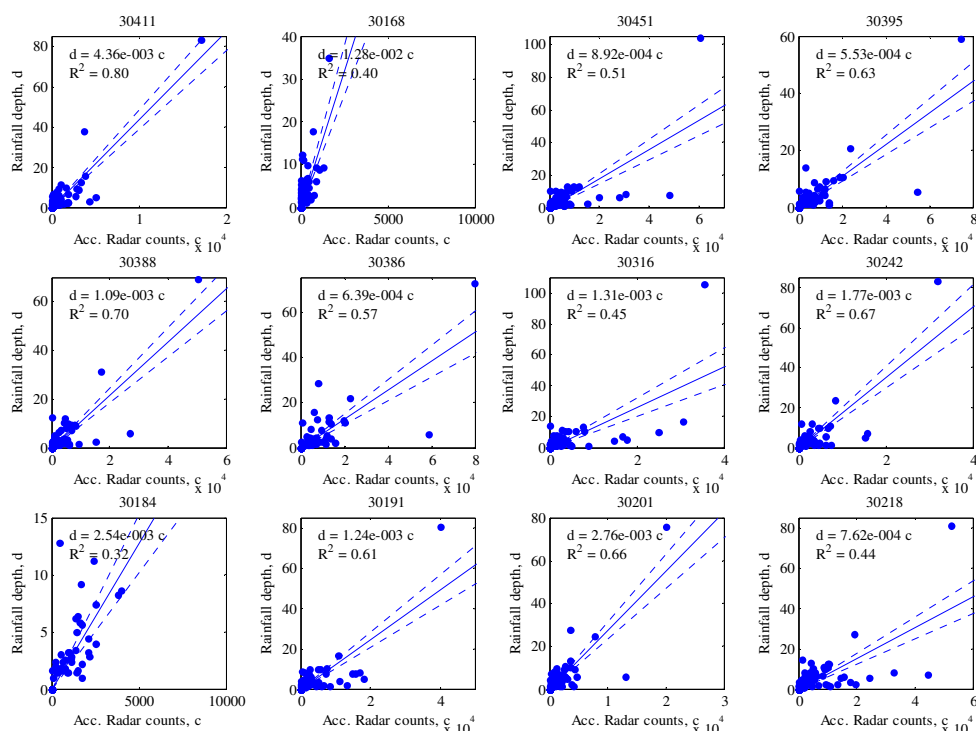


**Figur 5.3.1.b** Blåt område: 0- 15 km fra radaren, rødt område: 15-30 km fra radaren, grønt område 30- 60 km fra radaren. Sorte punkter: SVK regnmålere anvendt til statistisk kalibrering, røde punkter on-line regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering.

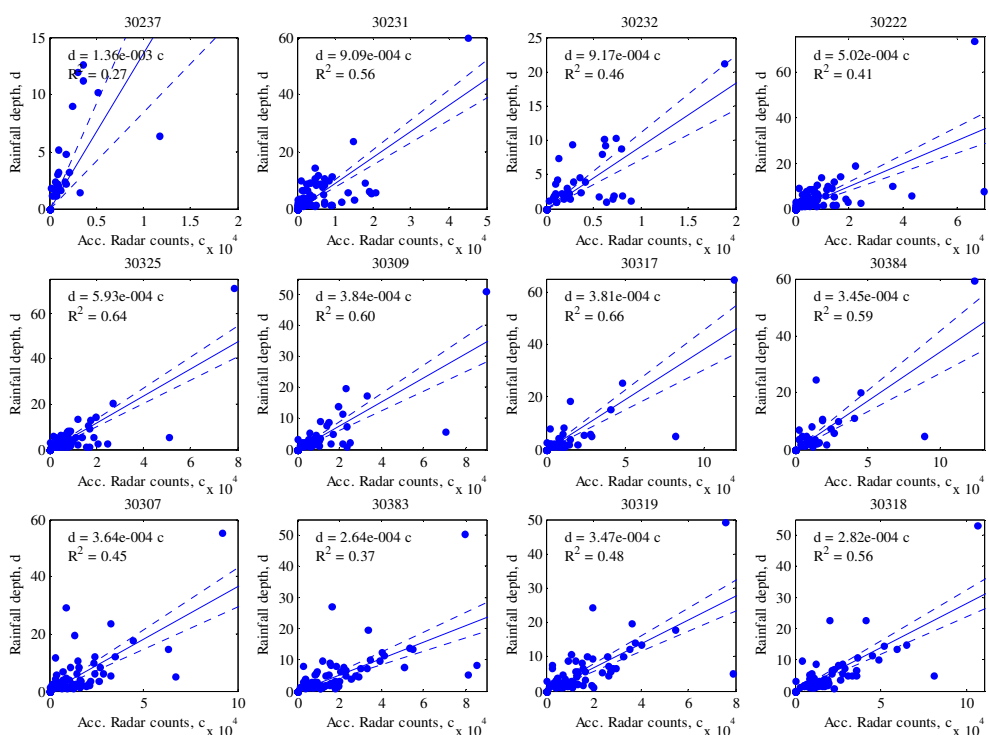
Den statistiske kalibrering af Hvidovre-radaren er baseret på perioden 8. september 2008 – 5. maj 2010. På figur 5.3.1.c til figur 5.3.1.e præsenteres de lineære regressioner mellem radarcounts og regndybder fra de enkelte regnmålere opgjort på hændelsesniveau. På figur 5.3.1.f er den eksponentielle afstandskorrektion afbilledet for det tilfælde hvor alle 36 regnmålere anvendes til den eksponentielle approksimation. Tilsvarende er der på figur 5.3.1.g kun anvendt de punkter hvor den lineære regression mellem radar og regnmåler har en korrelationskoefficient ( $R^2$ ) større end 0.5. Her ses tydeligt, at der ikke er nogen punkter ud over 25 km som svarer til kriteriet, og det kan derfor konkluderes, at radaren ikke kan anvendes til kvantitativ bestemmelse af nedbør, med pålidelige resultater ud over 25 km. Dette stemmer også overens med DHI's anbefalinger for denne type af X-bånds radarer. En opsummering af den statistiske kalibrering er præsenteret i tabel 5.3.1.b. I denne ses også, at hvis kalibreringen anvendes ud over den 25



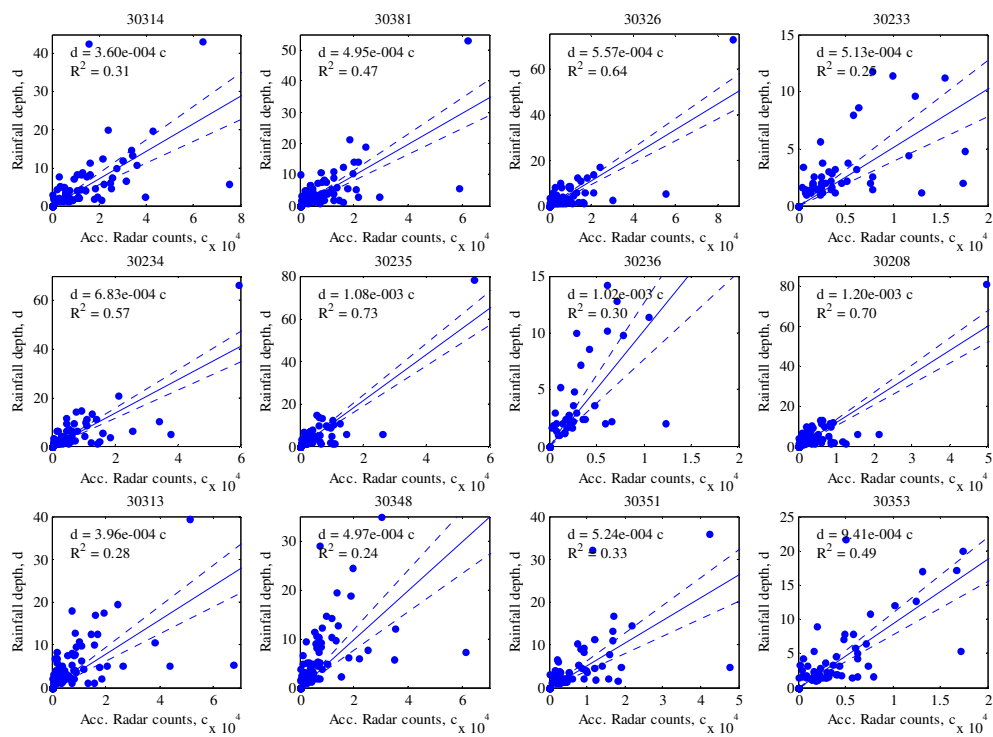
km bliver de akkumulerede regnmængder estimeret med radaren underestimeret (fx SVK-måler 30168).



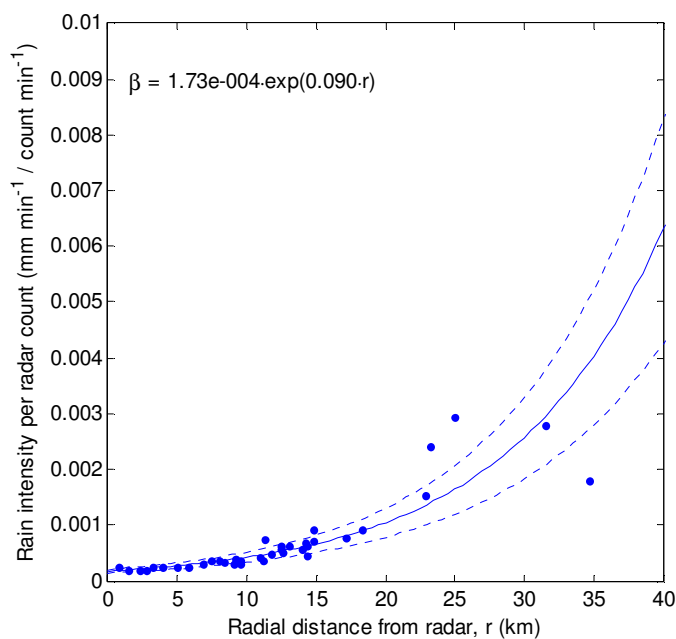
Figur 5.3.1.c Lineær regression mellem radar og regnmålere på hændelsesniveau



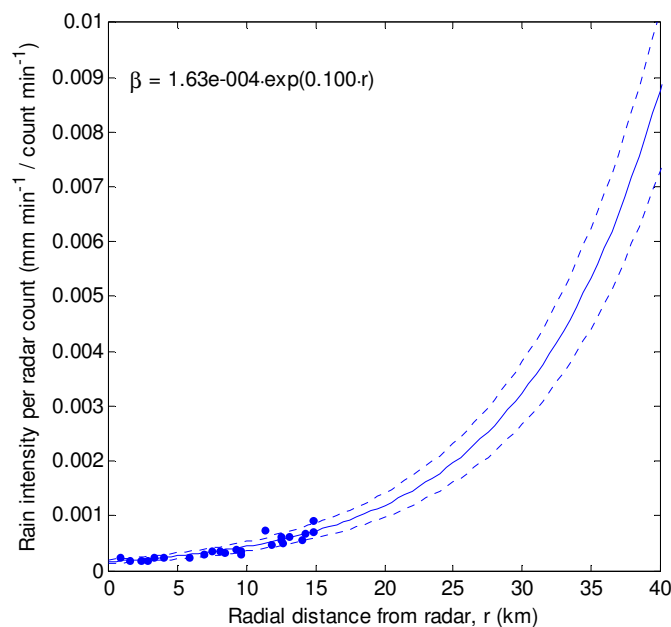
Figur 5.3.1.d Lineær regression mellem radar og regnmålere på hændelsesniveau



Figur 5.3.1.e Lineær regression mellem radar og regnmålere på hændelsesniveau



Figur 5.3.1.f Afstandskorrektion og kalibreringskonstanten  $\beta$  ud til 60 km



**Figur 5.3.1.g Afstandskorrektion og kalibreringskonstanten  $\beta$  ud til 25 km**

Den statistiske kalibrering for Hvidovre-radaren vurderes til at være forholdsvis sikker og entydig hvilket skyldes et efterhånden stort datagrundlag samt et stort antal regnmålere placeret jævnt fordelt inden for 25 km fra radaren.

Som det tydeligt fremgår på figur 5.3.1.c – Figur 5.3.1.e er der en betydelig spredning omkring regressionslinierne når man sammenligner radar og regnmålere. Dette skyldes, at man sammenligner en regnmåler med et overfladeareal på ca. 200 cm<sup>2</sup> med en radar-pixel på 500x500 m og den naturlige usikkerhed der ligger i dette vil give en hvis spredning på radar regnmåler forholdet. Desuden antages det at hældningen på regressionslinierne er konstant for alle typer af regn (konvektivt, stratiformt, mv.). Dette er ikke nødvendigvis ikke tilfældet, men det er ikke praktisk muligt at ændre kalibrerings konstanter alt efter typen af nedbør. For at håndtere problemet er i stedet den dynamiske kalibrering implementeret.

**Tabel 5.3.1.b Opsummering af statistisk kalibrering og anvendte SVK-regnmålere**

Regnmåler	SVK må- ler nr	Afstand til radar (km)	Regnmåler sum, ned- bør (mm)	Radar sum, nedbør (mm)
Roskilde Renseanlæg	30411	25	361.8	282.4
Hillerød Centralrenseanlæg	30168	34.6	318.6	194.3
Mosedede Renseanlæg	30451	14.2	428.2	494.1
Ishøj Varmeværk	30395	8.4	294.6	294.3
Høje Tåstrup	30388	12.4	321.8	265.7
Albertslund Materielgård	30386	7.4	343.2	263.7
Måløv Renseanlæg	30316	14.8	381.6	319
Stavnsholt Renseanlæg	30242	18.3	334	348.4
Sjælsø Renseanlæg	30184	23.2	160.2	156.4
Furesø PARK	30191	17.1	360.2	435.5
Vedbæk Renseanlæg	30201	22.9	388.6	362.9
Stades Krog Overløbsbassin	30218	14	485.8	556.8
Ermelundsværket	30237	14.4	105	55.8
Brogårdsbassin	30231	12.4	415.2	354.4
Fuglegården	30232	11.3	147.4	114.4
Søborg Vandværk	30222	9.5	443	469.2
Bispebjerg Hospital	30325	9.2	354.2	398.5
Åvendingen	30309	5.7	242.8	276.4
Glostrup Genbrugsstation	30317	3.2	224	211.4
Brøndbyvester Vandværk	30384	2.8	237.4	208.3
Træholmen	30307	0.7	388.8	256
Avedørelejren	30383	2.3	406	422.7
Hvidovre Pumpestation	30319	3.9	406.8	398.4
Hvidovre Vandværk	30318	1.5	370.2	381.7
Kongens Enghave	30314	5	422.4	405.1
Landbohøjskolen	30381	6.9	398.4	346.2
Lygten	30326	8.1	336	355.4
Hellerup Kirkegård	30233	11	150.6	176.9
Delfinen	30234	11.7	387.4	441.7
Elmegården	30235	13	362.8	331.5
Lunden	30236	14.3	152.4	137.8
Ordrup Kirkegård	30208	14.8	370.4	385.7
Kløvermarksvej	30313	9.6	440.8	485.3
Wibrandsvej	30348	11.2	508.4	498.6
Tårnby Pumpestation 4	30351	9.1	306.4	297.9
Tårnby Renseanlæg	30353	12.5	253.8	224
Middel			333.6	322.4

**5.3.2****Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler**

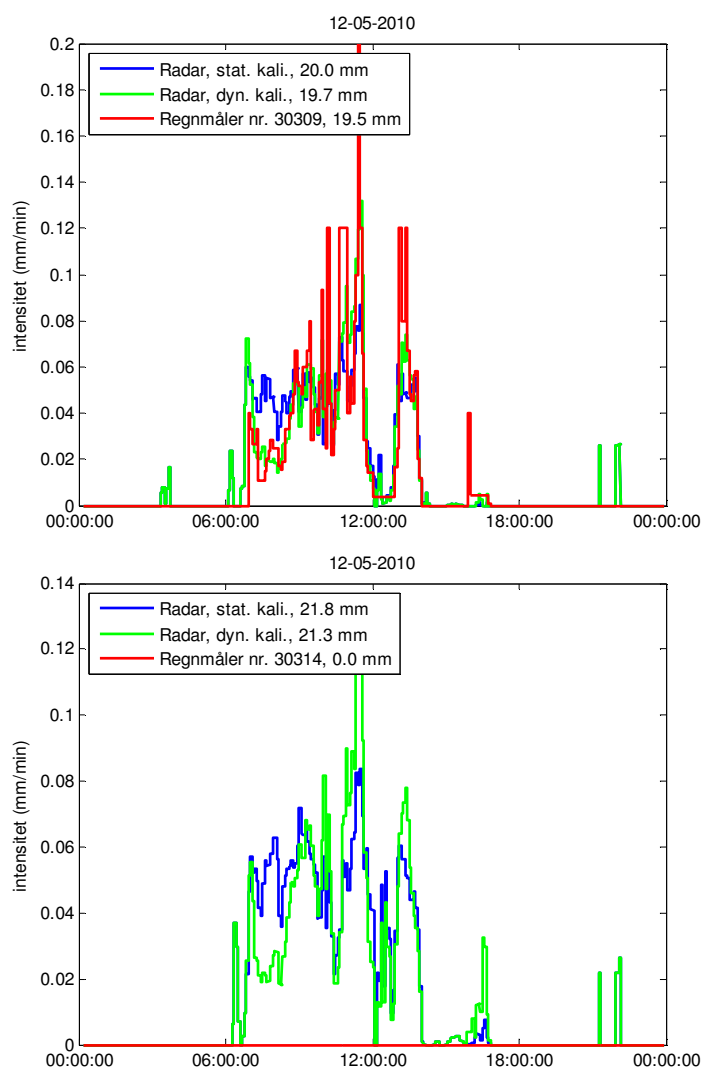
Hvidovre-radaren kalibreres dynamisk ved brug af fire on-line regnmålere som er præsenteret i figur 5.3.1.b og tabel 5.3.2.a.

**Tabel 5.3.2.a On-line regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering**

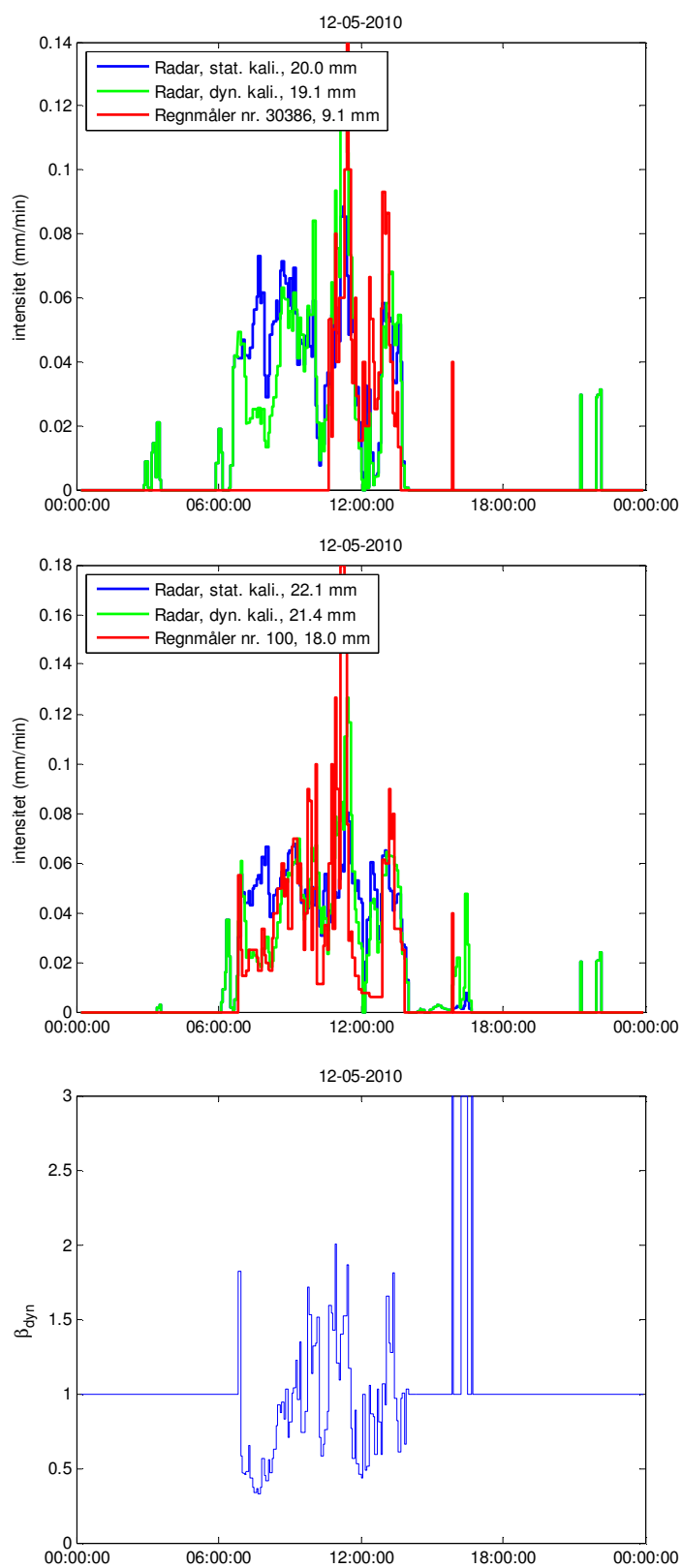
	SVK må- ler nr.	AAU må- ler nr.	Kommunikation
Muslingevej		100	SRO via Krüger
Åvendingen	30309	30309	3G, direkte til AAU
Kongens Enghave	30314	30314	3G, direkte til AAU
Albertslund, Materielgård	30386	30386	3G, direkte til AAU

Der er valgt at vise to hændelseseksempler på den dynamiske kalibrering, hvor også forskellen fra den statiske kalibrering kan anskues. Den første hændelse er fra den 12. maj 2010 (Figur 5.3.2.a og figur 5.3.2.b)

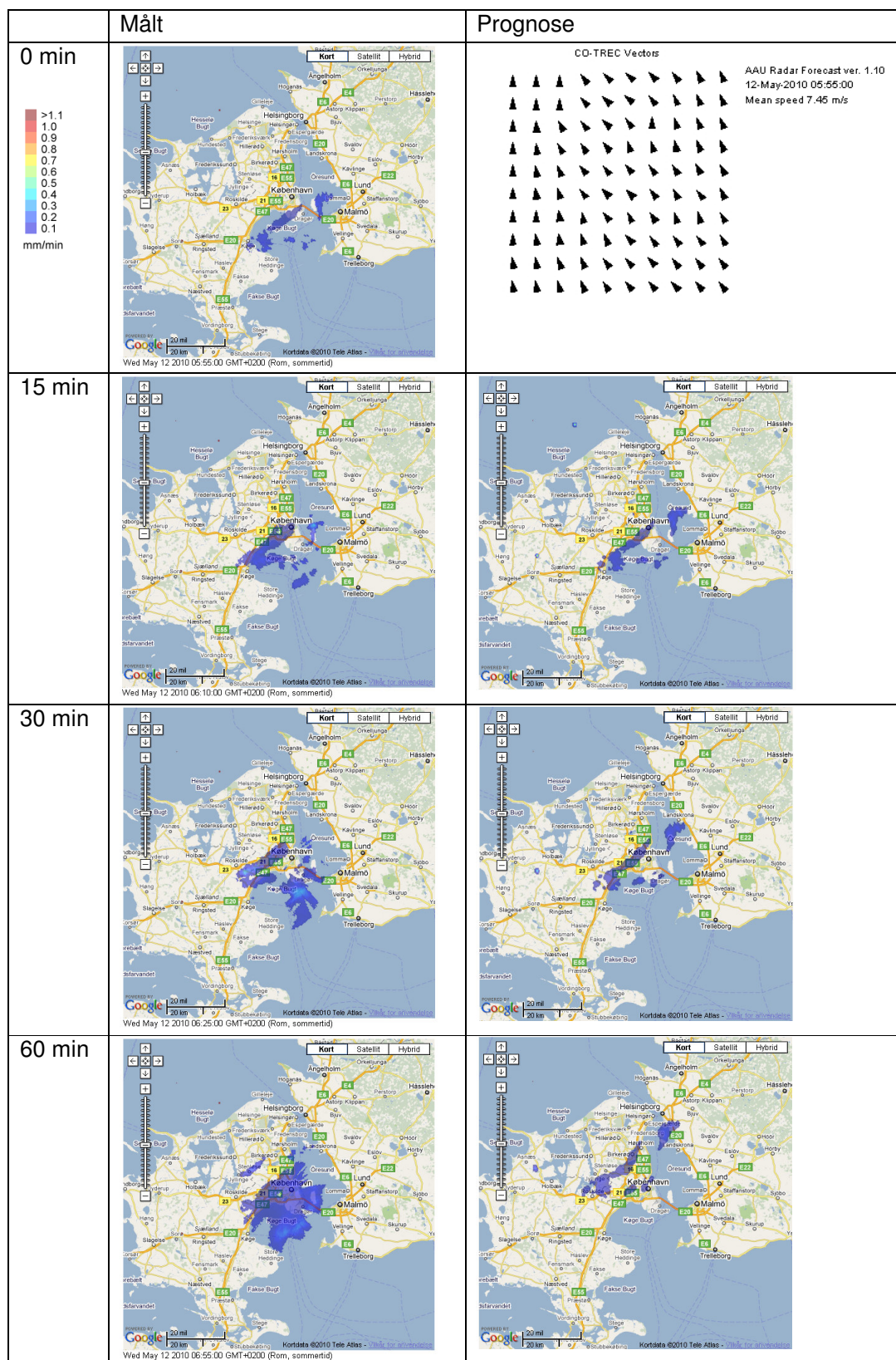
I den valgte hændelse har regnmåler 30314 været ud af drift og regnmåler 30386 har været ude af drift indtil kl. ca. 11. Da det alligevel er valgt at medtage denne hændelse skyldes det at det er en stor hændelse med forholdsvis høje intensiteter. Umiddelbart er der ikke så stor forskel på den dynamiske og den statiske kalibrering i denne hændelse, hvilket svarer til at forholdet mellem radar og regnmålere ligger tæt på regressionslinierne, dog ses det at den dynamiske kalibrering (de grønne kurver) forsøger at opjustere det statiske intensitetsniveau, så at dette kommer tættere på det niveau der er registreret i de enkelte regnmålere. På figur 5.3.2.c præsenteres regnprognosen for den samme dag kl. 05.55 og frem. Prognosen er valideret på figur 5.3.2.d.



**Figur 5.3.2.a** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren den 12 maj 2010 (Regnmåler 30314 har ikke opsamlet data den pågældende dag og viser derfor en intensitet på 0)

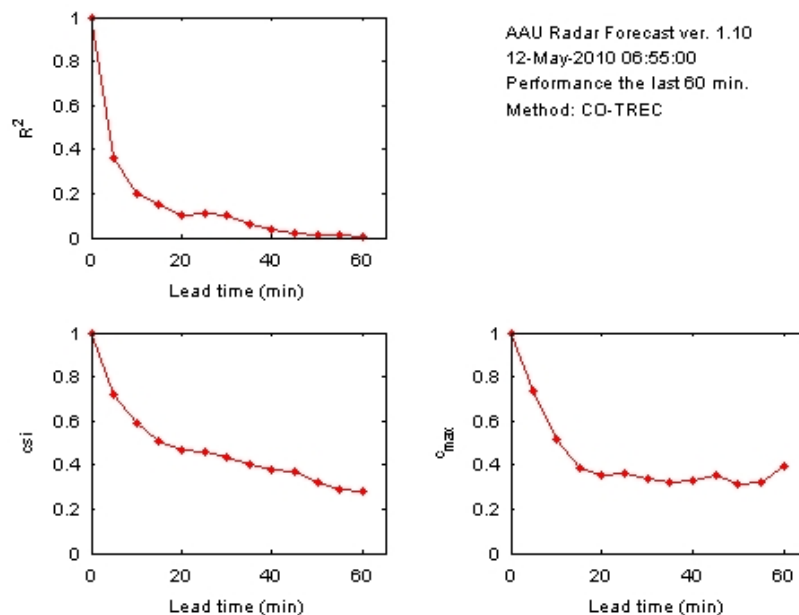


Figur 5.3.2.b Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren den 12 maj 2010. Nederste diagram viser variationen i den dynamiske kalibreringsfaktor.



Figur 5.3.2.c Målt og prognosticeret nedbør den 12. maj 2010 kl. 05:55

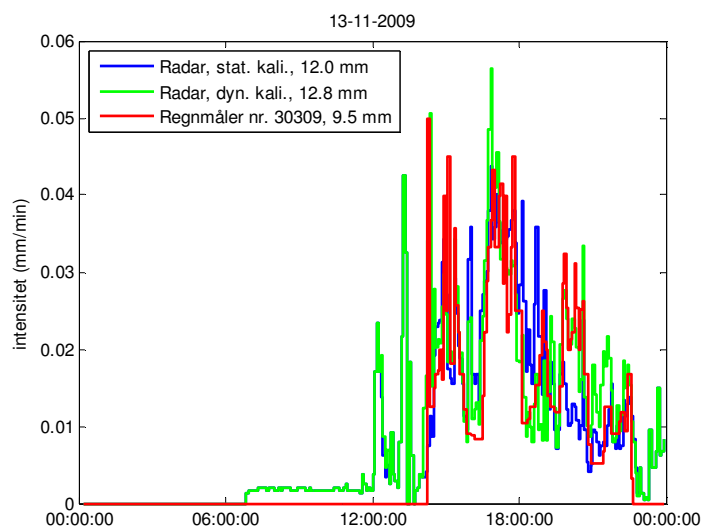




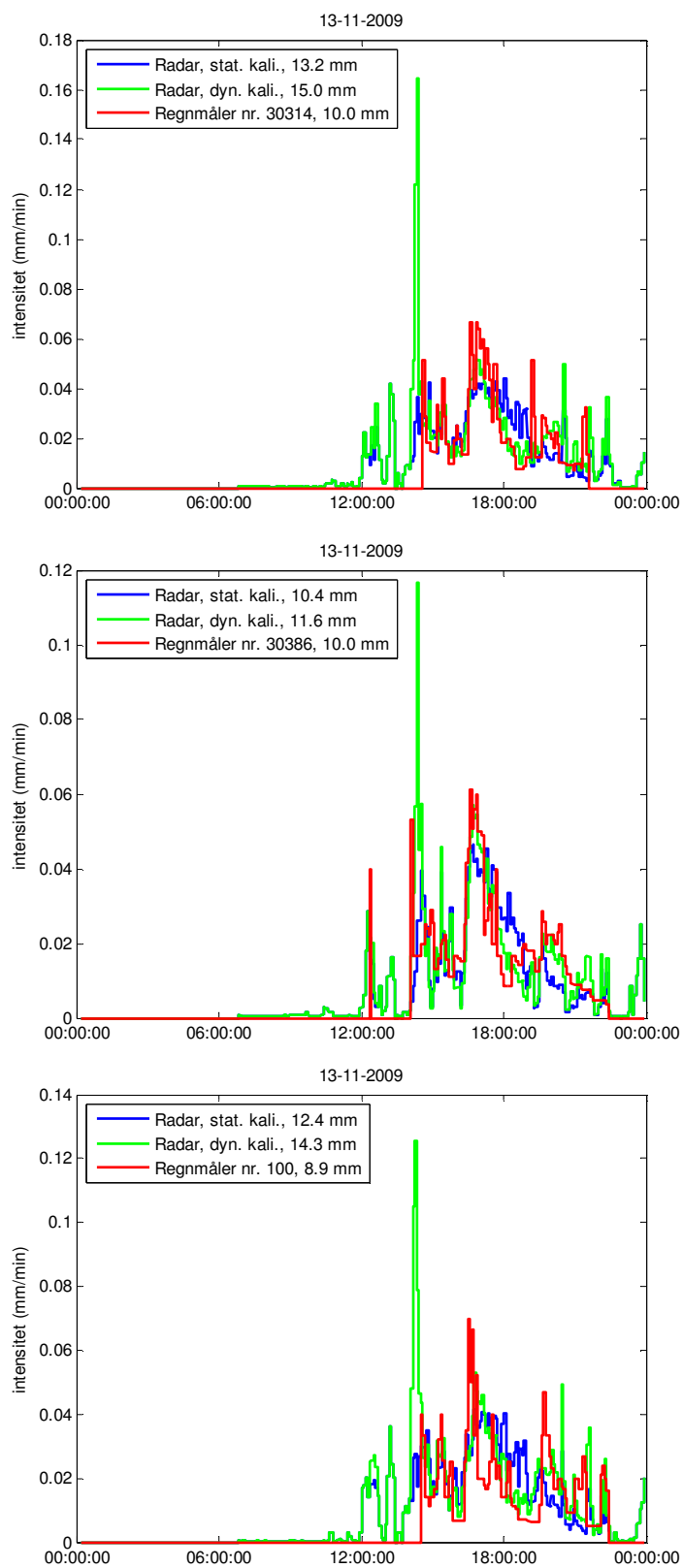
**Figur 5.3.2.d Validering af regnprognose den 12. maj 2010 kl. 06.55**

Prognosen over Hvidovre ser fornuftig ud indtil ca. 30 min. Herefter divergerer prognosen noget fra det målte.

På figur 5.3.2.e og figur 5.3.2.f ses endnu et eksempel på den dynamiske kalibrering – her for en hændelse den 13. november 2009.



**Figur 5.3.2.e Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren den 13. november 2009**



Figur 5.3.2.f Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Hvidovre-radaren den 13. november 2009

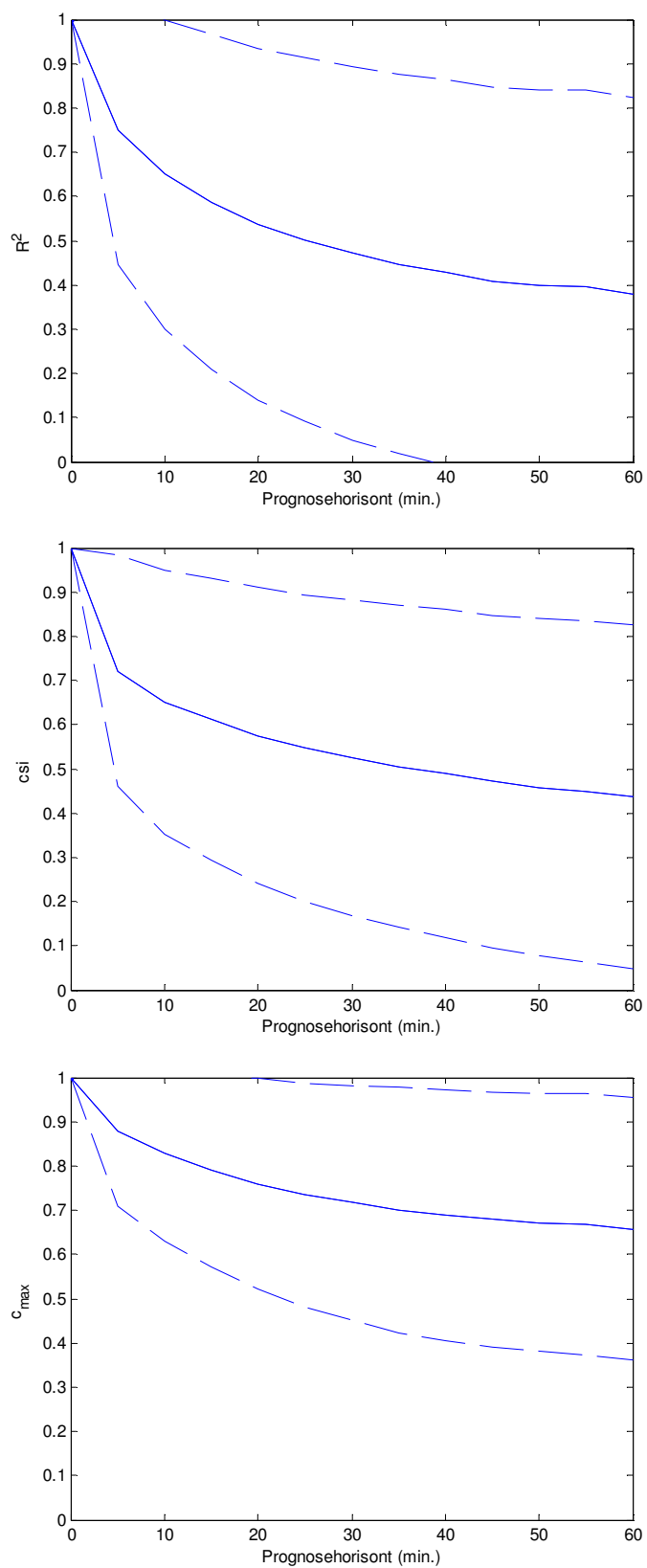
I dette eksempel overstimerer den statiske kalibrering en smule i forhold til regnmåleren, når der vurderes på de akkumulerede mængder. Dog viser den dynamiske kalibrering endnu større akkumulerede mængder, hvilket skyldes at denne forsøger at justere intensitetsniveauerne på plads, og derfor ender med en større akkumuleret mængde, når man ser på hele hændelsen. På figurene ses tydeligt effekten af regnmålerens vippekar, i det radaren viser nedbør tidligere end det registreres i regnmåleren. Dette skyldes at regnmåleren først vipper når der er faldet 0.2 mm regn.

### 5.3.3

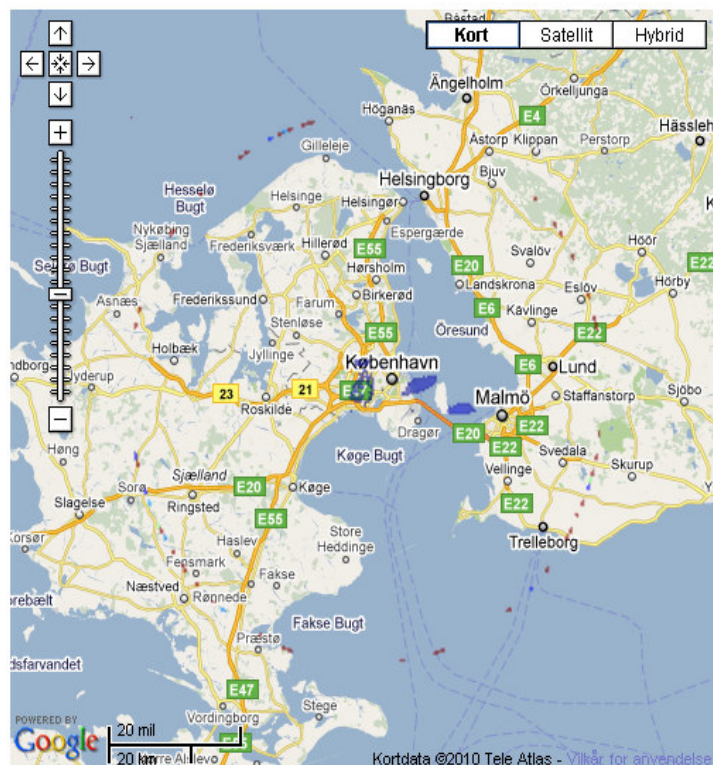
#### **Prognosevalidering**

På figur 5.3.3.a ses de tre valideringsparametre som funktion af prognosehorisonten beregnet på baggrund af perioder fra 19. maj 2009 til 1. maj 2010 med regn. Sammenlignes disse valideringsplots med de tilsvarende fra de andre X-bånds radarer, i hhv. Aalborg og Odense er spredningen omkring middelværdien (den fuldtotrukne linie) væsentlig større. Dvs. at der er en noget større usikkerhed på prognosen ved anvendelse af Hvidovre-radaren.

Radaren har i lange perioder været påvirket af støj på radar signalet hvilket ikke i sig selv har påvirket nedbørsmålingen, men i høj grad har påvirket påvirket regnprognosen. Støjen har primært været periferisk i forhold til radarens måleudbredelse (Figur 5.3.3.b) og har antaget meget høje værdier, således at det ikke har været muligt at frafiltrere den med den normale filtreringsprocedure. I det, støjen ikke flytter sig bliver de beregnede flytningsvektorer heraf mindre og valideringsparametre antager værdier der er tættere på 1, hvilket igen betyder en kunstig høj middelværdi. DHI har justeret på radaren-hardwaren, således at støjen ikke længere forekommer. Desværre for sendt i forhold til afrapportering af nærværende projekt.



**Figur 5.3.3.a Validering af regnprognosen baseret på regnvejrdata i perioden 19. maj 2009 – 1 maj 2010. De fuldoptrukne linier angiver middelværdien og de stiplede plus-minus en gange spredningen**

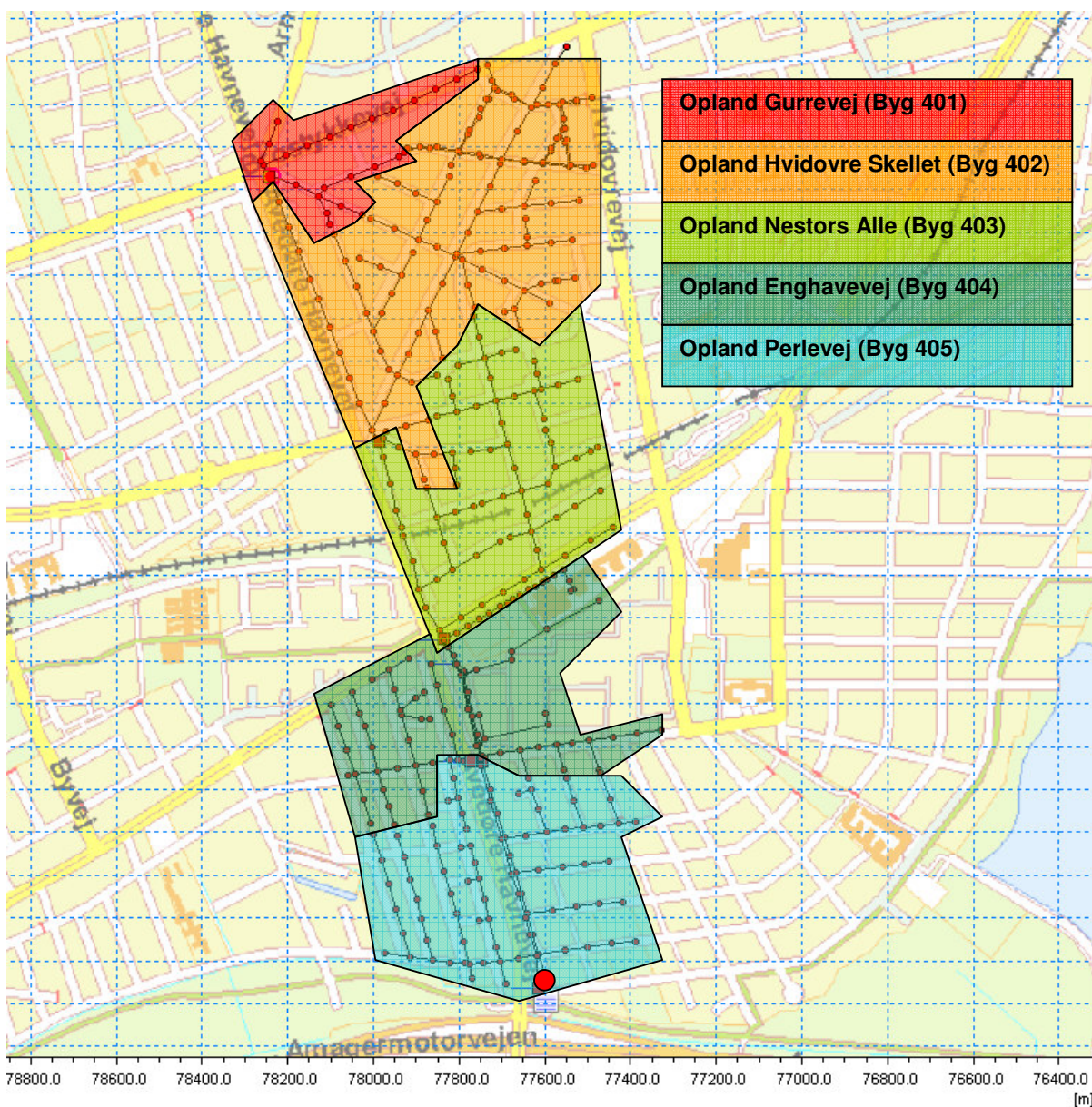


Figur 5.3.3.b Eksempel på periferisk støj på Hvidovre-radaren

### 5.3.4

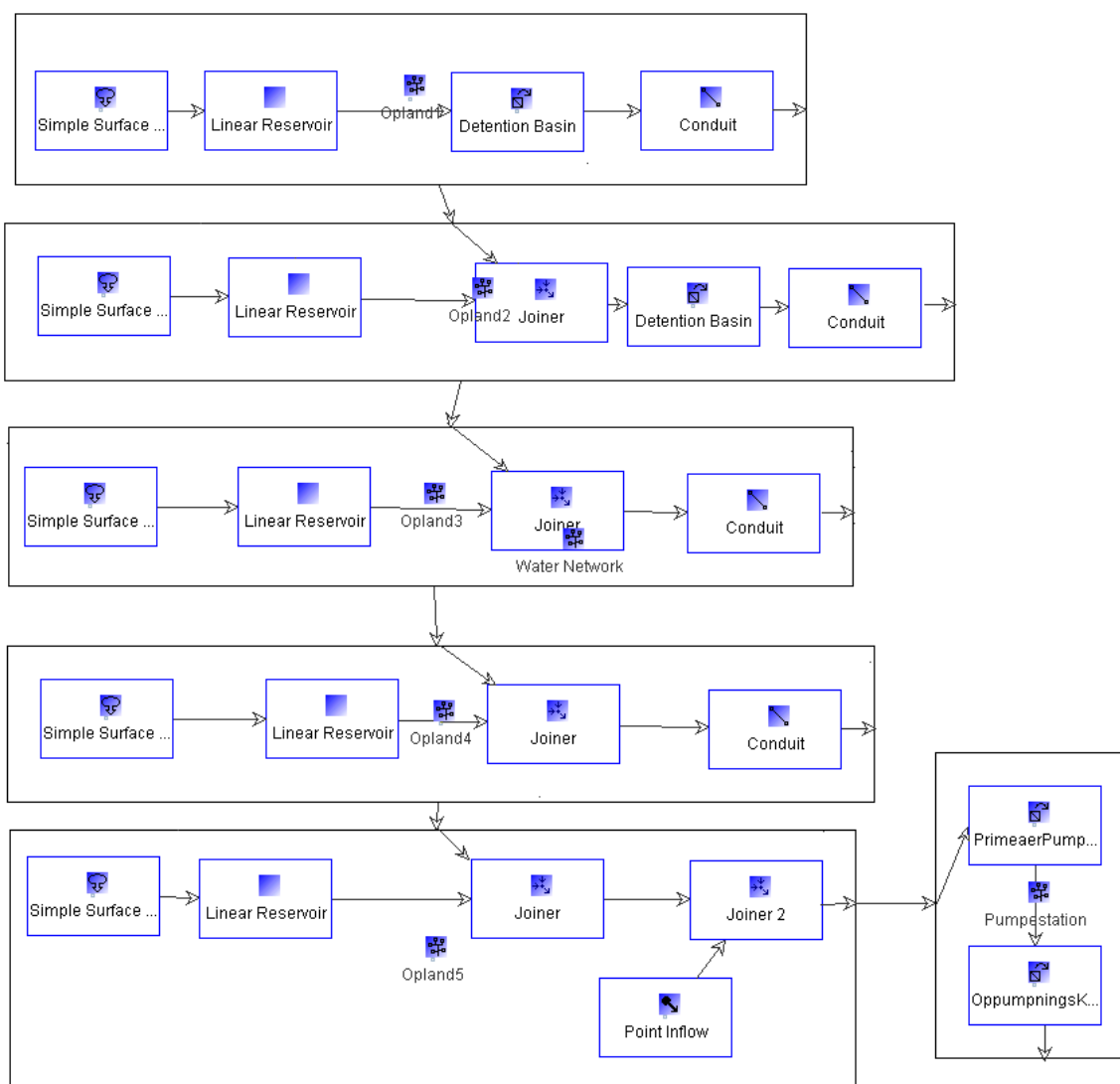
#### Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

Det modellerede opland for Hvidovre er langt mindre end for de andre modeller, og da der ikke har været større mængder historiske data til rådighed, er modellen lavet med udgangspunkt i en eksisterende opdateret Mouse model over oplandet. De enkelte underoplande er fundet ved *backwards flow trace* fra hvert af de fire bygværker opstrøms for pumpestationen, samt fra pumpestationen selv. En væsentlig del af oplandet til pumpestationen afstrømmer til bassinet ved bygværk 402. Herfra er der jævnligt overløb til Damhus-åen, hvilket vil sige ud af modellen. For blandt andet at tage højde for dette, er arealet af de befæstede oplande, samt bassinvolumener og udløbskapaciteten fra bygværk 402, som udgangspunkt taget fra Mouse modellen. De to nedenstående figurer 5.3.4.a og 5.3.4.b viser henholdsvis oplandende og WaterAspects modellen for Hvidovre.

**Figur 5.3.4.a**

De fem oplande i Hvidovre. Den røde prik angiver prognose og kalibreringspunktet.

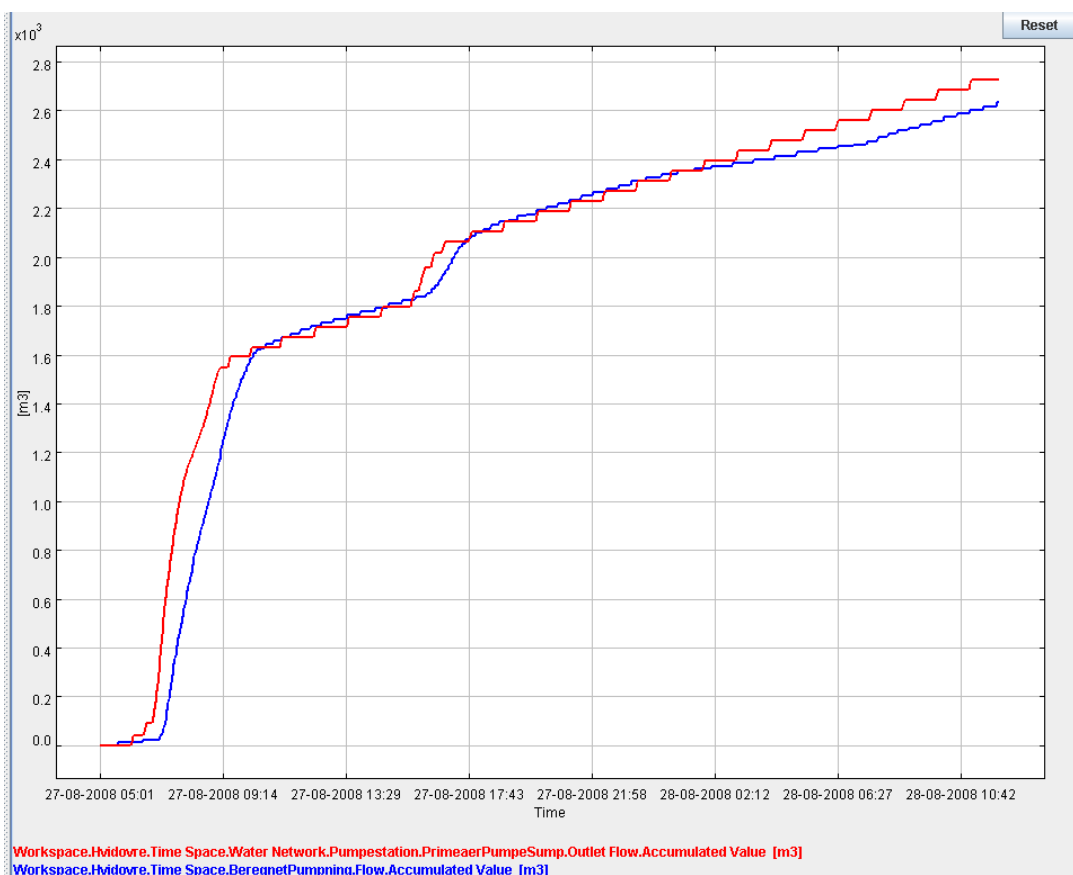




**Figur 5.3.4.b**  
Oversigt over WaterAspects modellen for Hvidovre.

### Kalibrering

Da der ikke har været niveau eller flowdata til rådighed er modellen kalibreret ud fra strømforbruget for de enkelte pumper på Muslingevejens pumpestation. Dette er gjort for hændelsen d. 27/8 2008. Data fra hændelsen d. 11/7 var også tilgængelige, men der var så stor variation i den målte nedbør imellem nabo SVK stationer, at dataene derfra ikke kunne antages at være en pålidelig nedbørsbeskrivelse over hele oplandet. Figur 5.3.4.c viser den målte og modellerede akkumulerede afstrømning fra Muslingevejens pumpestation for kalibreringshændelsen.



**Figur 5.3.4.c**

Den akkumulerede afstrømning fra Muslingevejens pumpestation under hændelsen d. 27/8 2008. Den røde streg angiver det modellerede og den blå angiver den beregnede afstrømning ud fra pumpenes strømforbrug.

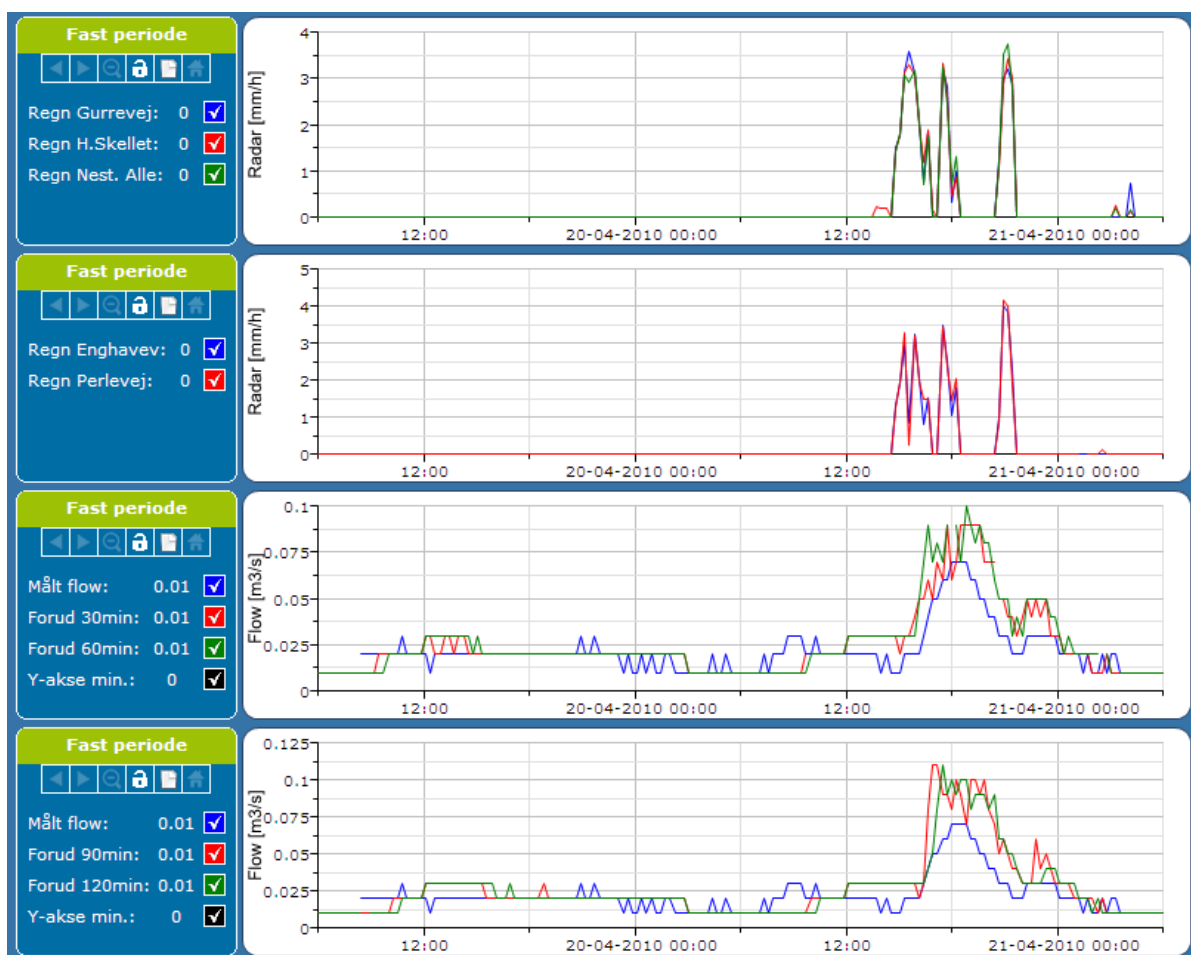
### Systemet i brug

20. april 2010

Radaren viser, at der har været to regnhændelser den 20. april 2010 i Hvidovre. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte er både de lange og korte afstrømningsprognoser gode hvad angår tidspunktet for påbegyndt regnafstrømning og for regnafstrømningens varighed. Derimod overestimeres peakværdien. Se figur 5.3.4.d.



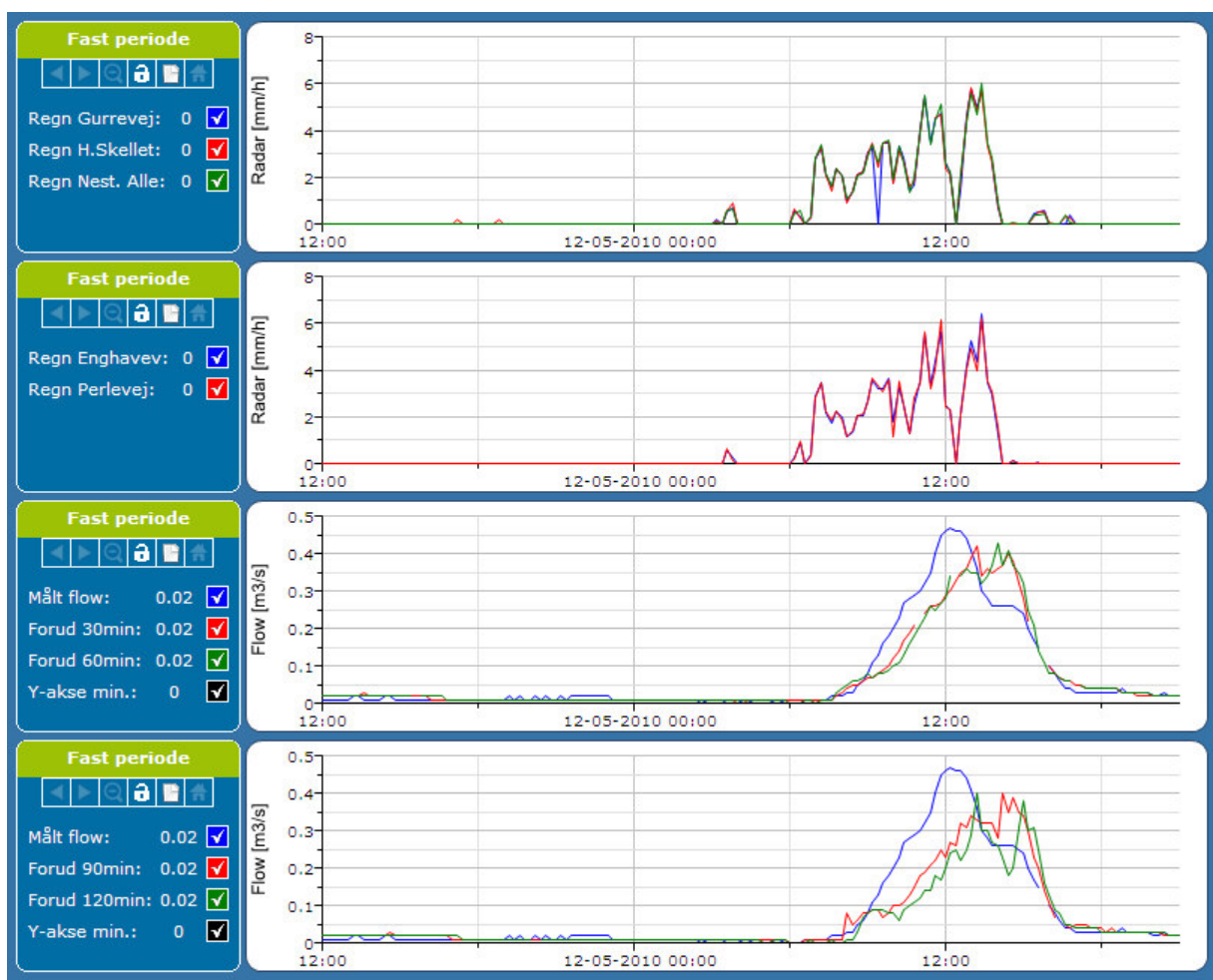


**Figur 5.3.4.d**  
STAR bruggerfladen fra 20. april i Hvidovre.

12. maj 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelse den 12. maj 2010 i Hvidovre. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

Der er tale om en 8 timers regnhændelse den pågældende dag. Perioden, hvor regnafstrømningen foregår, er forudsagt godt i både de korte og lange afstrømningsprognoser. Dog sker der i modellen en for langsom afstrømning, så peakværdien forudsiges for sent, og er desuden for lav i forhold til det målte. Se figur 5.3.4.e.



Figur 5.3.4.e  
STAR brugerfladen fra 12. maj i Hvidovre.

### 5.3.5

#### Vurdering og perspektiver

Hvidovre-radaren har i projektperioden været plaget af mange nedbrud af radaren, fordi den er blevet slukket eller datakommunikationen er mistet. Desuden har DHI haft problemer med indstillingen af radarens software, således der har været en del støj og falske ekkoer i signalet. Dette har medført en dårlig prognose i nogle perioder. Mht. den statiske kalibrering vurderes denne som forholdsvis valid, da der inden for radarens rækkevidde er placeret mange SVK-regnmålere. Den dynamiske kalibrering har fungeret tilfredsstillende, bortset fra nogle udfald på regnmåler 30314.

Som tidligere beskrevet giver den opstillede prognose mulighed for optimering af styring af Muslingevej pumpestation, hvilket ville kunne føre til en reduktion af både antal og mængde af aflastning til Kalveboderne. Der ønskes opretholdt badevands kvalitet i Kalveboderne og derfor er en optimeret udnyttelse af afløbssystemet og dets magasineringsvolumener af høj prioritet. Samtidigt ligger afløbssystemet i området generelt fladt og lavt,

hvilket giver en del udfordringer når vandet skal tilbageholdes. En global prognose baseret styring vil give mulighed for at optimere sammenstyringen af de forskellige deloplande og derigennem reducere antallet af aflastninger og minimere den samlede aflastede mængde. Radar prognosen har derved et stort potentiale i forhold til både at minimere udbygning af afløbssystemet for at opnå de nødvendige badevandsforhold og i forhold til at varsle til borger om uundgåelige oversvømmelser af ejendomme i området. Det vurderes at den opnående radarbaserede prognose i nærværende projekt har en kvalitet som berettiger anvendelse til de skitserede styringsstrategier.

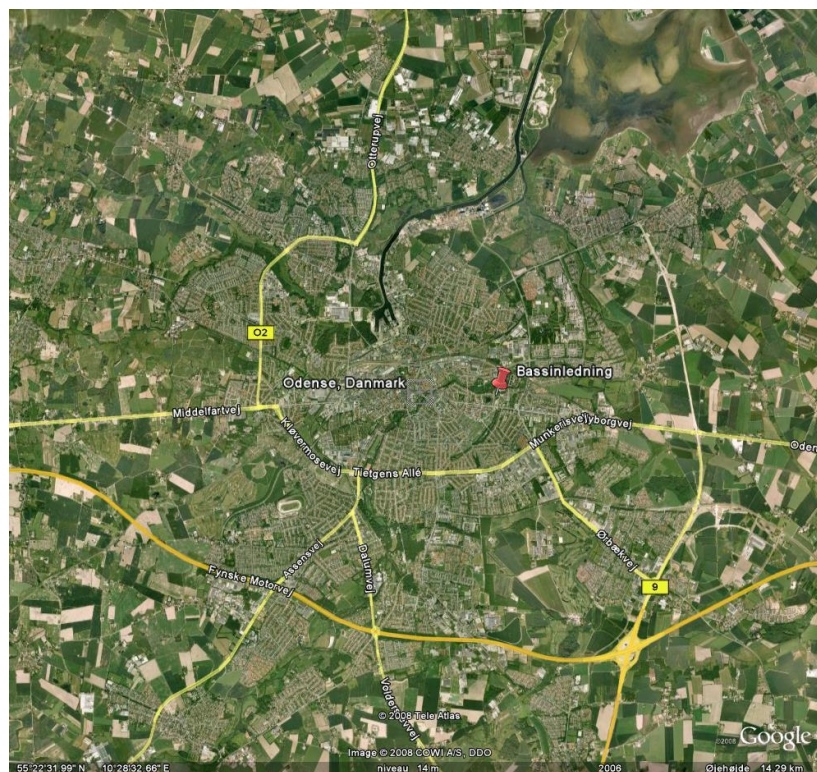
---

## 5.4

**Odense**

Det valgte prognosepunkt i Odense er niveau i overløbsbygværket i den nordlige ende af den nyanlagte bassin-ledning ved Munkedammen, se figur 5.4.a. Ledningen er indrettet med spjæld, der har til formål at tilbageholde vandet i ledningen og derved undgå aflastninger til Odense Å i videst mulig omfang. Er der derimod risiko for oversvømmelser i oplande opstrøms for bassin-ledningen åbnes spjældene, for hurtigst muligt at få vandet ud af ledningen og få sænket vandspejlet i området. I en sådan situation er aflastning til Odense Å uundgåelig.

En prognose af vandspejlet ved overløbsbygværket og ved bygværkerne i bassin-ledningen kan indgå i en forbedret styring af spjældene i bassin-ledningen. Prognosen kan benyttes i styringen af spjældene til tidligere at identificere en reel oversvømmelsesrisiko og derved bedre kunne styre spjældene. Med mere forvarsling og sikkerhed for, hvor meget vandstanden i bassin-ledningen og de tilstødende oplande forventes at stige, forventes det at være muligt at undgå aflastninger i situationer, hvor der reelt ikke er nogen risiko for oversvømmelse.



**Figur 5.4.a.**  
Den røde nål angiver prognosepunktet i Odense.

## 5.4.1

**Radaropsætning og resultater**

Odense-radaren er placeret i Lindved sydøst for Odense C med en afstand på ca. 6 km til Odense C, hvilket er en perfekt afstand i forhold til at kvantitativt at måle nedbørsintensiteter i hele Odense By.



**Figur 5.4.1.a Odense-radaren**

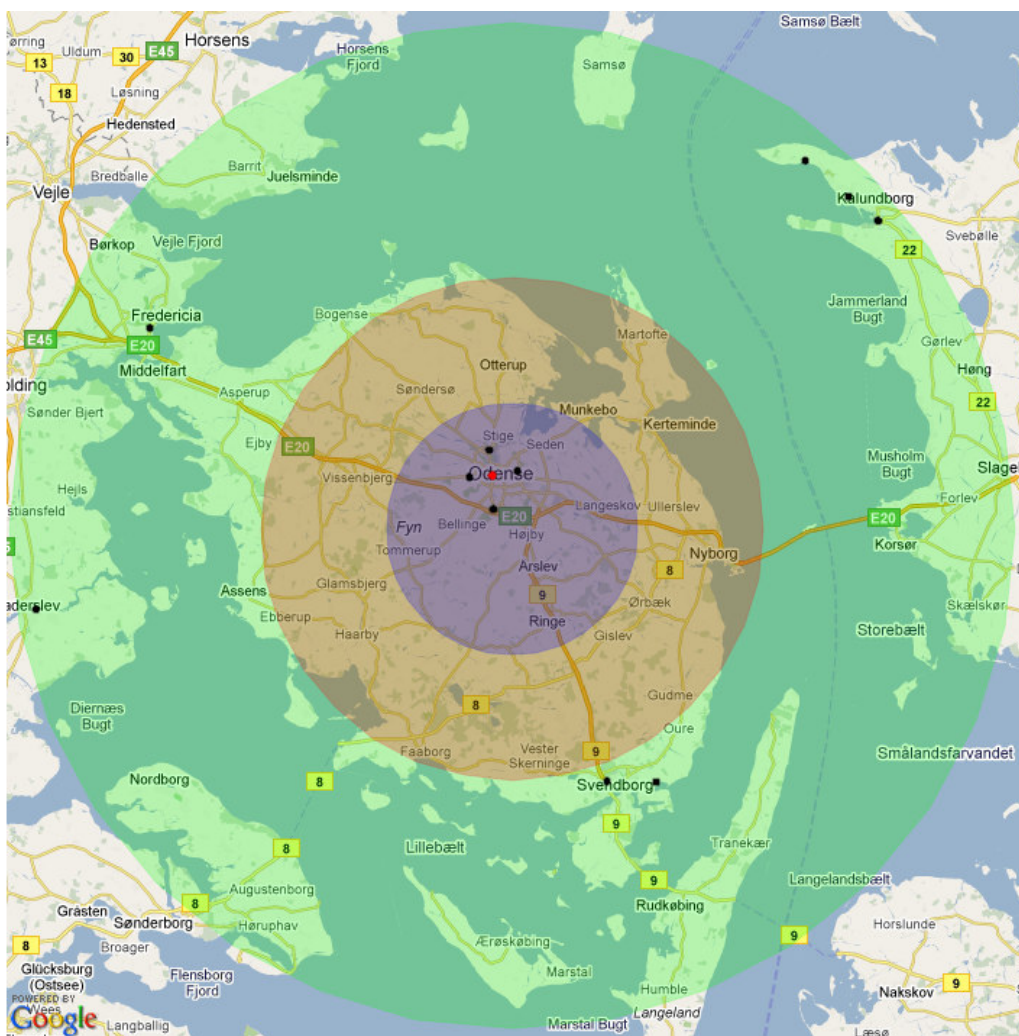
**Tabel 5.4.1.a Specifikationer for Odense-radaren**

Frekvens	9,4 GHz
Bølgelængde	3,2 cm
Udgangseffekt	25 kW
Rækkevidde	60 km (15 km kvantitativt)
Stedsopløsning	500 x 500 m
Tidsopløsning	5 min (midlet over 1 min.)
Horisontal strålebredde	0,95 <sup>0</sup>
Vertikal strålebredde	±10 <sup>0</sup>
Ejer	Odense Vandsekskab A/S
Driftsansvarlig	DHI
Producent	DHI
Fabrikat	Furono 1525 mrk 3
Placering	Lindved (Odense)
Datakommunikation	DHI's FTP-server
Koordinat	UTM Zone 32 (E 589495, N 6133209)
Nedetid	19.1 %
Driftstid i projektet	19. maj 2009 – 1. juni 2010*, dog en del nedetid fra januar 2010 til 10. maj 2010, da DHI havde problemer med dataopsamling.

\*Radaren har også været i drift i første fase af nærværende projekt, dvs. fra 23. marts 2008



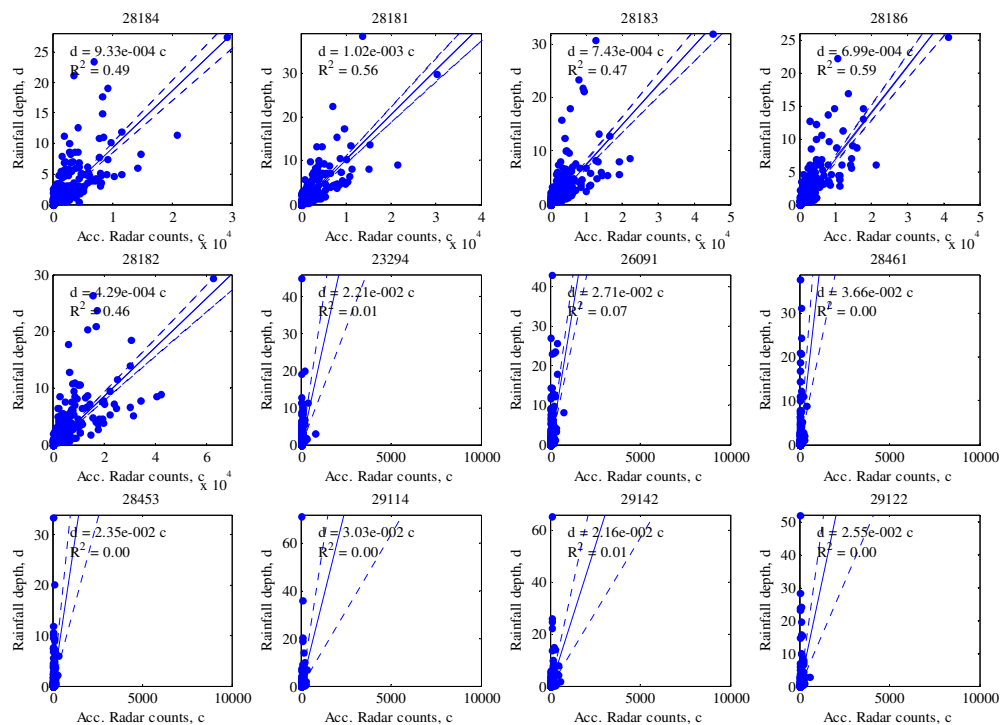
Odense-radaren adskiller sig fra de fire andre i projektet anvendte radarer ved at levere 1 minuts midlede data i stedet for midlet over 5. min som det er tilfældet ved den andre lokale X-bånds radarer. Dette betyder at radarbilerne fremstår mindre langstrakte end de øvrige lokale radarer, men ellers har det ingen betydning for måling af nedbør eller nedbørsprognosen.



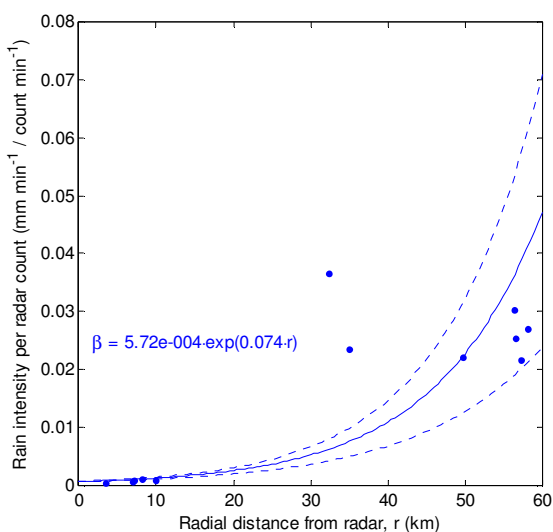
**Figur 5.4.1.b** Blåt område: 0- 15 km fra radaren, rødt område: 15-30 km fra radaren, grønt område 30- 60 km fra radaren. Sorte punkter: SVK regnmålere anvendt til statisk kalibrering, røde punkter on-line regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering.

På figur 5.4.1.c ses den statiske kalibrering af Odense radaren baseret på perioden marts 2008 til maj 2010 og antagelse om en linær sammenhæng mellem radar og regnmålere, når der analyseres på hændelsesniveau. Fem regnmålere er placeret mindre end 10 km fra radaren mens de andre 7 er placeret mere en 30 km fra radaren. På figur 5.4.1.d ses, at der er meget stor spredning på de statiske kalibreringsparametre ud over de 30 km, hvilket svarer meget godt til DHI's anbefalingen at kvantitativ måling af nedbør

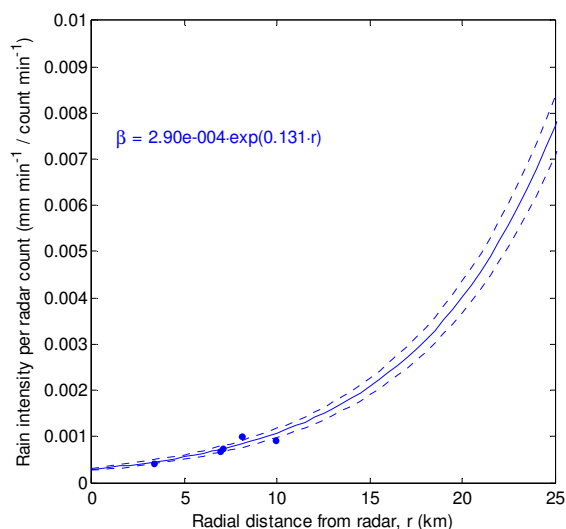
ud til ca. 15-20 km. Derfor vælges at frasortere de regnmålere der ligger mere en 30 km fra radaren, således kalibreringen baseres på figur 5.4.1.e.



Figur 5.4.1.c Lineær regression på forholdet mellem regnmålere og radar i Odense



Figur 5.4.1.d Afstandskorrektion af kalibreringskonstanten  $\beta$  ud til 60 km



Figur 5.4.1.e Afstandskorrektion af kalibreringskonstanten  $\beta$  ud til 25 km

Tabel 5.4.1.b Opsummering af statistisk kalibrering og anvendte SVK regnmålere

Regnmåler	SVK må- ler nr.	Afstand til radar (km)	Regnmåler sum, ned- bør (mm)	Radar sum, nedbør (mm)
Odense Nv Renseanlæg	28184	9.9	750.1	841.5
Bolbro Højdebeholder	28181	8.1	724.6	624
Ejby Mølle Renseanlæg	28183	7.1	736.5	700.8
Odense Vandværk	28186	6.9	605.0	627.5
Dalum Vandværk	28182	3.3	872.1	863.1
Fredericia Centralrenseanlæg	23294	49.8	(406.0)	-
Haderslev Renseanlæg	26091	58.2	(661.2)	-
Svendborg Overløbsbassin	28461	32.4	(432.2)	-
Svendborg Centralrenseanlæg	28453	35.0	(316.6)	-
Ulstrup Renseanlæg	29114	56.3	(359.6)	-
Kalundborg Centralrenseanlæg	29142	57.3	(396.8)	-
Sønder Nyrup Renseanlæg	29122	56.6	(444.2)	-
Middel			737.7	731.4

Eftersom de regnmålere der kan anvendes til den statistiske kalibrering alle er placeret i afstanden 3-10 km fra radaren er usikkerheden på den eksponentielle afstandskorrektion heraf noget stor, hvilket betyder at estimeringen af nedbørsmængder og intensiteter ud over de 10 km har en tilsvarende usikkerhed.

## 5.4.2

### Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler

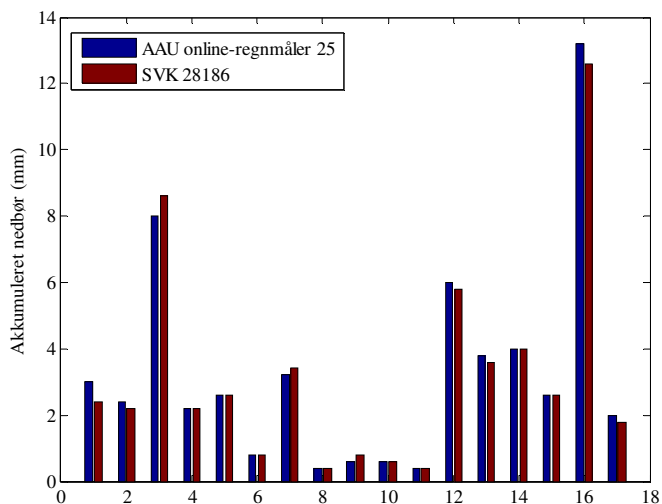
Odense radaren er kalibreret dynamisk vha. af en, af Aalborg Universitet opstillet, regnmåler (Tabel 5.4.2.a). Denne er placeret umiddelbart ved siden af SVK-regnmåler 28186, hvorfor der i figur 5.4.2.a er lavet en sammenligning af disse to målere på nogle hændelser i sommeren 2009. Det ses tydeligt, at de to målere har registreret den samme akkumulerede nedbørsmængde pr. hændelse, når man tager usikkerheden på plus-minus et vip (0.2 mm) i betragtning. På figur 5.4.2.b ses et eksempel på regnintensiteter registreret i de to målere. Her ses også sammenfald, dog er kurverne



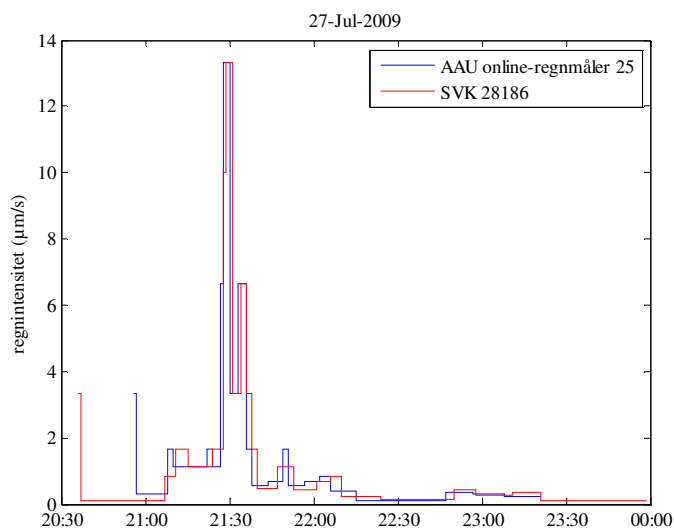
lidt forskudt pga. forskellige vippetidspunkter. Det kan heraf konkluderes at de to typer af regnmålere registrerer det samme.

**Tabel 5.4.2.a On-line regnmåler anvendt til dynamisk kalibrering**

Regnmåler	AAU måler nr.	Kommunikation
Odense Vandværk	25	3G, direkte til AAU



**Figur 5.4.2.a Sammenligning af SVK-regnmåler 28186 og AAU-regnmåler 25, 17 hændelser sommeren 2009**

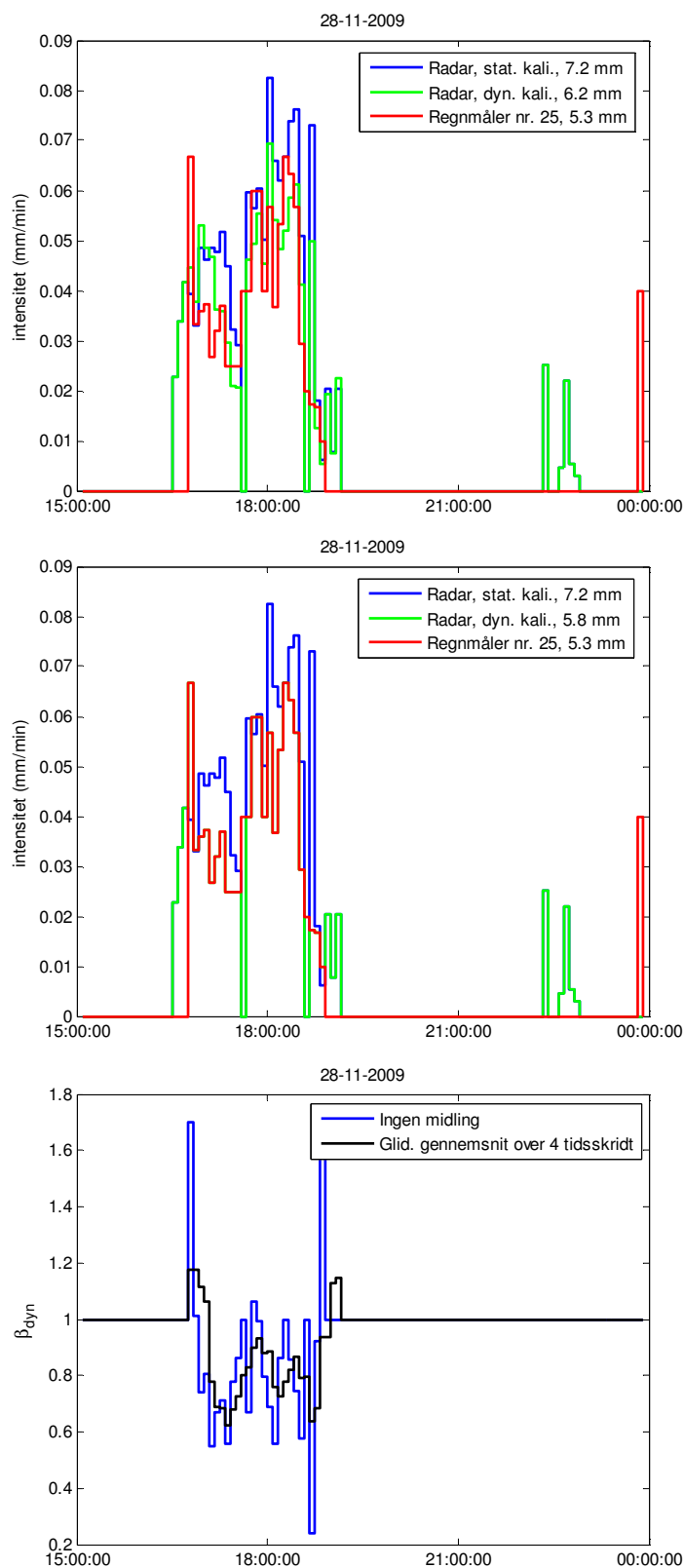


**Figur 5.4.2.b Sammenligning af SVK-regnmåler 28186 og AAU regnmåler den 27. juli 2009**

Som skrevet i afsnit 4.2.4 anvendes der i den dynamiske kalibrering en kontinuert tidlig midling – dvs. en "hukommelse" på den dynamiske kalibreringsfaktor ( $\beta_{dyn}$ ). Da der i Odense-casen kun anvendes én on-line

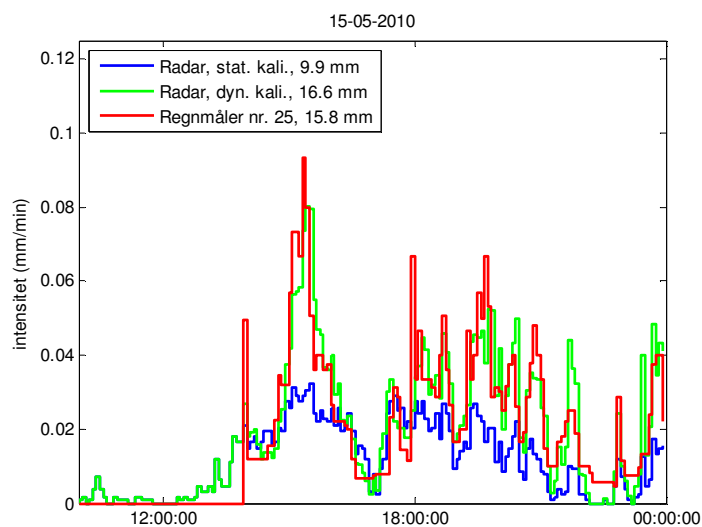
regnmåler betyder det, hvis der ses bort fra den tidslige midling, således at kalibreringsfaktoren ændres til hvert tidsskridt, at radar og regnmåler intensiteter er sammenfaldende i de tidsskridt hvor der er registreret regn i både radar og regnmåler. Et eksempel på dette ses i det øverste diagram på figur 5.4.2.c. Det er tydeligt at se, at så længe der ikke er et input i regnmåleren kan den dynamiske kalibrering ikke foretages og den dynamiske (grønne) kurve og den statiske (blå) kurve er derfor sammenfaldende, og når der så er input i regnmåleren er den dynamiske og regnmåleren (den røde kurve) sammenfaldende – havde der været flere regnmålere anvendt i den dynamiske kalibrering havde kurverne ikke været sammenfaldende. På det midterste diagram ses den samme hændelse, hvor der er anvendt en tidslig midling over fire tidsskridt og på det nederste diagram i figur 5.4.2.c ses de anvendte dynamiske kalibreringsfaktorer i de to tilfælde. I Odense casen hvor der kun anvendes én regnmåler bliver den dynamiske kalibrering ikke umiddelbart forbedret af den tidslige midling, dog er det observeret på andre radarer med flere on-line regnmålere, at den tidslige midling er med til at reducere meget pludselige og urealistiske variationer i den dynamiske kalibreringsfaktor.

---

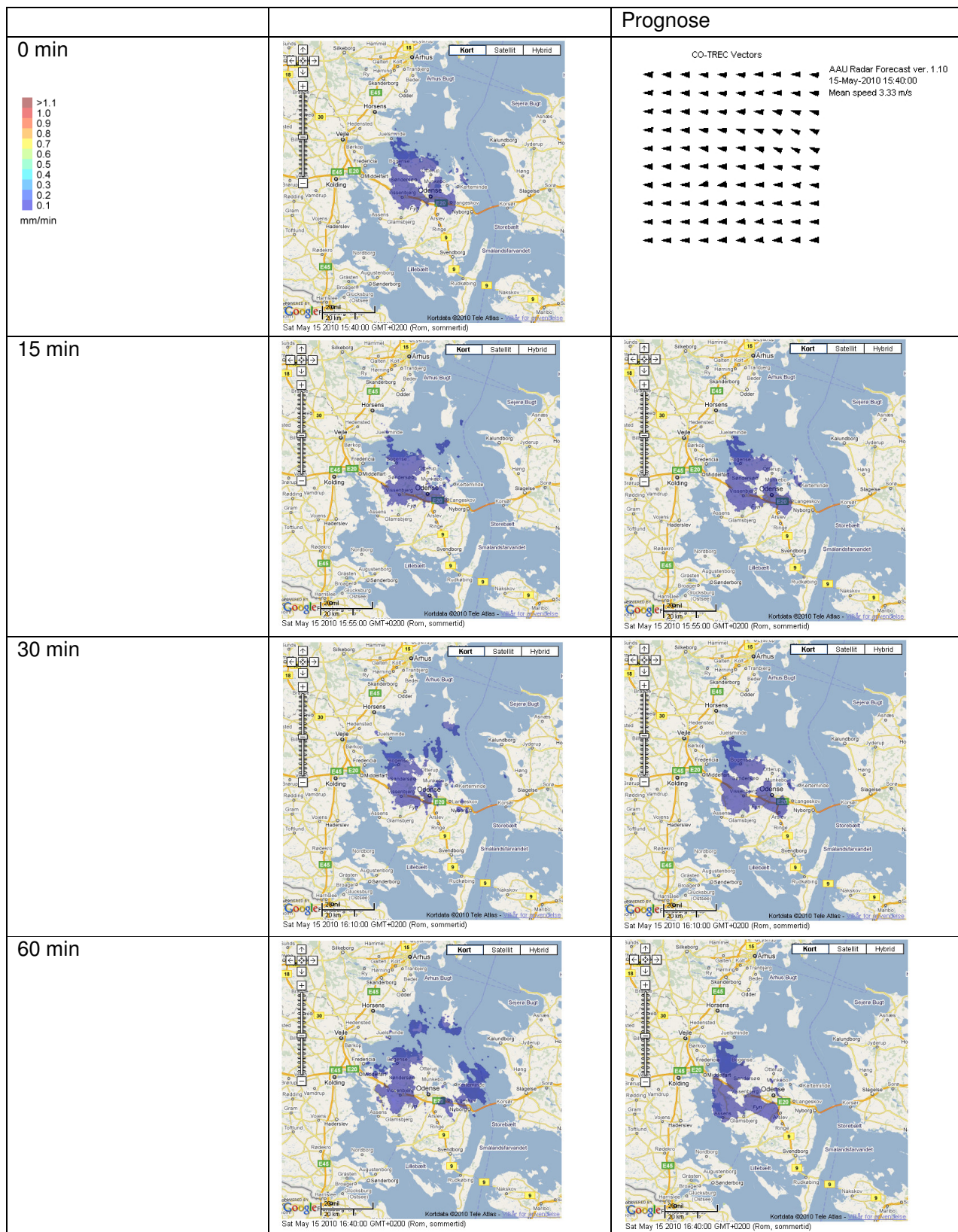


Figur 5.4.2.c Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering, Odense radaren den 28. nov. 2009. Øverste diagram er med tidlig midling og midterste diagram er uden tidlig midling. Nederste diagram angiver variationen i den dynamiske kalibreringsfaktor, hhv. med og uden tidlig midling.

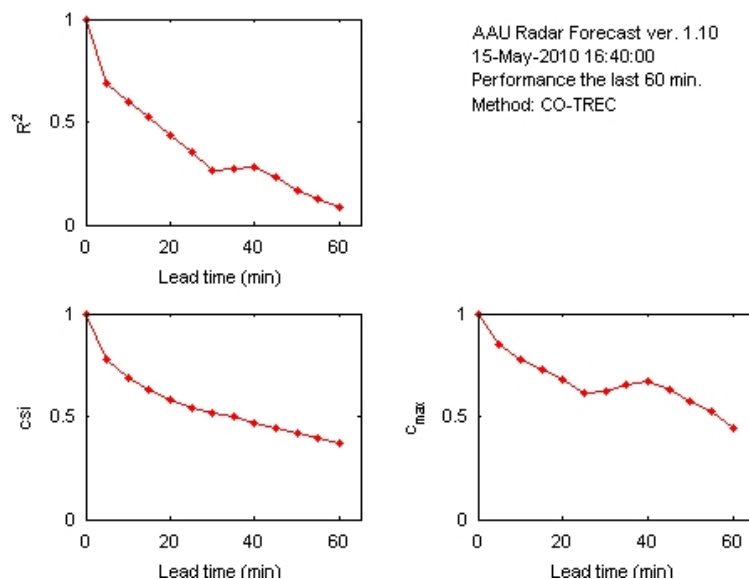
På figur 5.4.2.d ses et andet hændelseseksempel fra den 15. maj 2010. Umiddelbart passer radar og regnmåler ikke særligt godt overens i starten af regnhændelsen, hvilket skyldes at regnmåleren først vipper når der er faldet 0.2 mm. Herudover ses det tydeligt at regnintensiteterne "justeres på plads" ved implementeringen af den dynamiske kalibrering. På figur 5.4.2.e ses et eksempel på regnprognosen den pågældende dag og på figur 5.4.2.f ses valideringen af samme hændelse.



Figur 5.4.2.d Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering, Odense radaren 15. maj 2010



Figur 5.4.2.e Målt og prognosticeret nedbør den 15. maj 2010 kl. 15.40 og frem



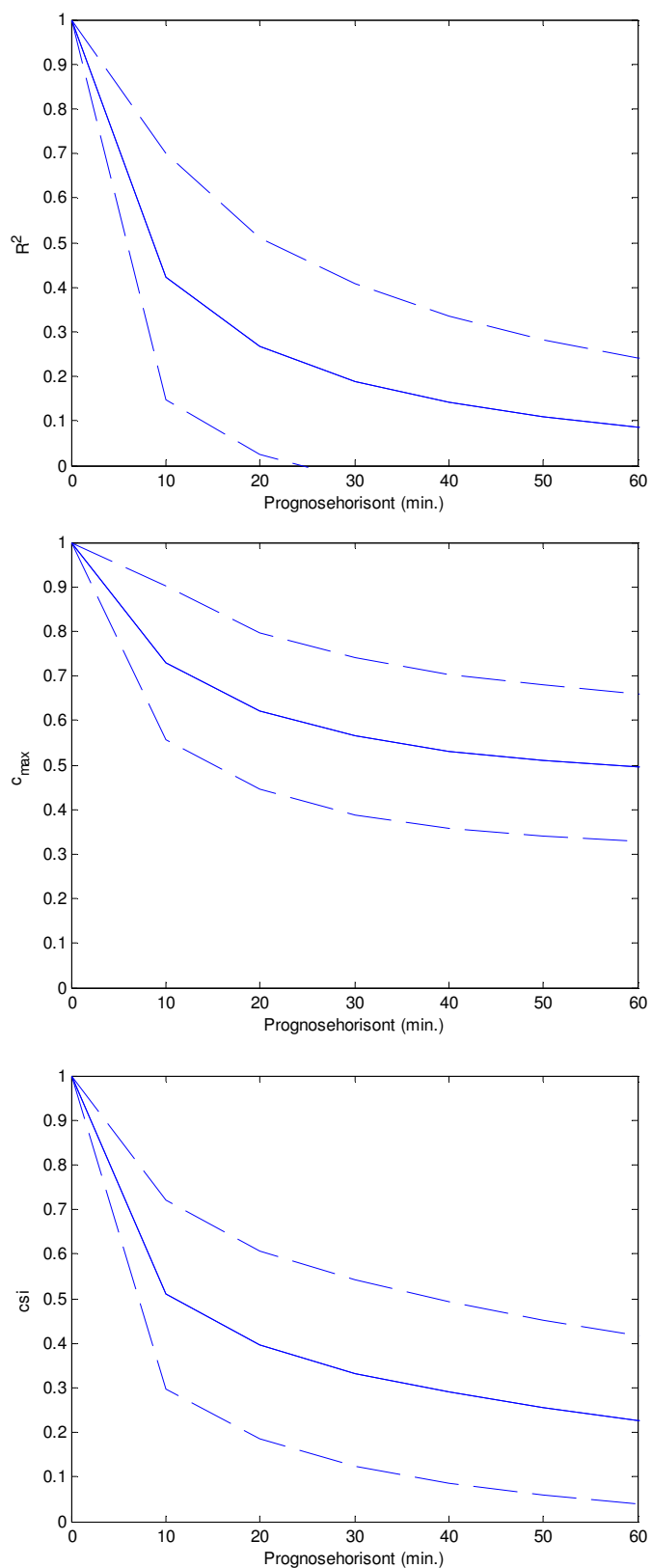
Figur 5.4.2.f Validering af regnprognose 15. maj 2010 kl. 16.40

Prognosen for Odense by ser fornuftig ud indtil 30. min. herefter divergerer prognosen noget fra det målte.

### 5.4.3

#### Prognosevalidering

På figur 5.4.3.a ses de tre valideringsparametre som funktion af prognosehorisonten. Datasættet er baseret på sammenlagt 600 timers nedbør. Baseret på de tre parametre vurderes det, at det er muligt at lave en fornuftig prognose med X-båndsradaren i Odense på op til 30 min. Udover 30 min. antager valideringsparametrene lave værdier og usikkerheden er stor, især på kvantificeringseringen af nedbørsmængder og intensiteter. Det vurderes derfor at prognosemodellen ud over de 30 min. kun kan anvendes til at prædikere en eventuel forekomst af regn uden at kunne kvantificere regnintensiteter og mængder.



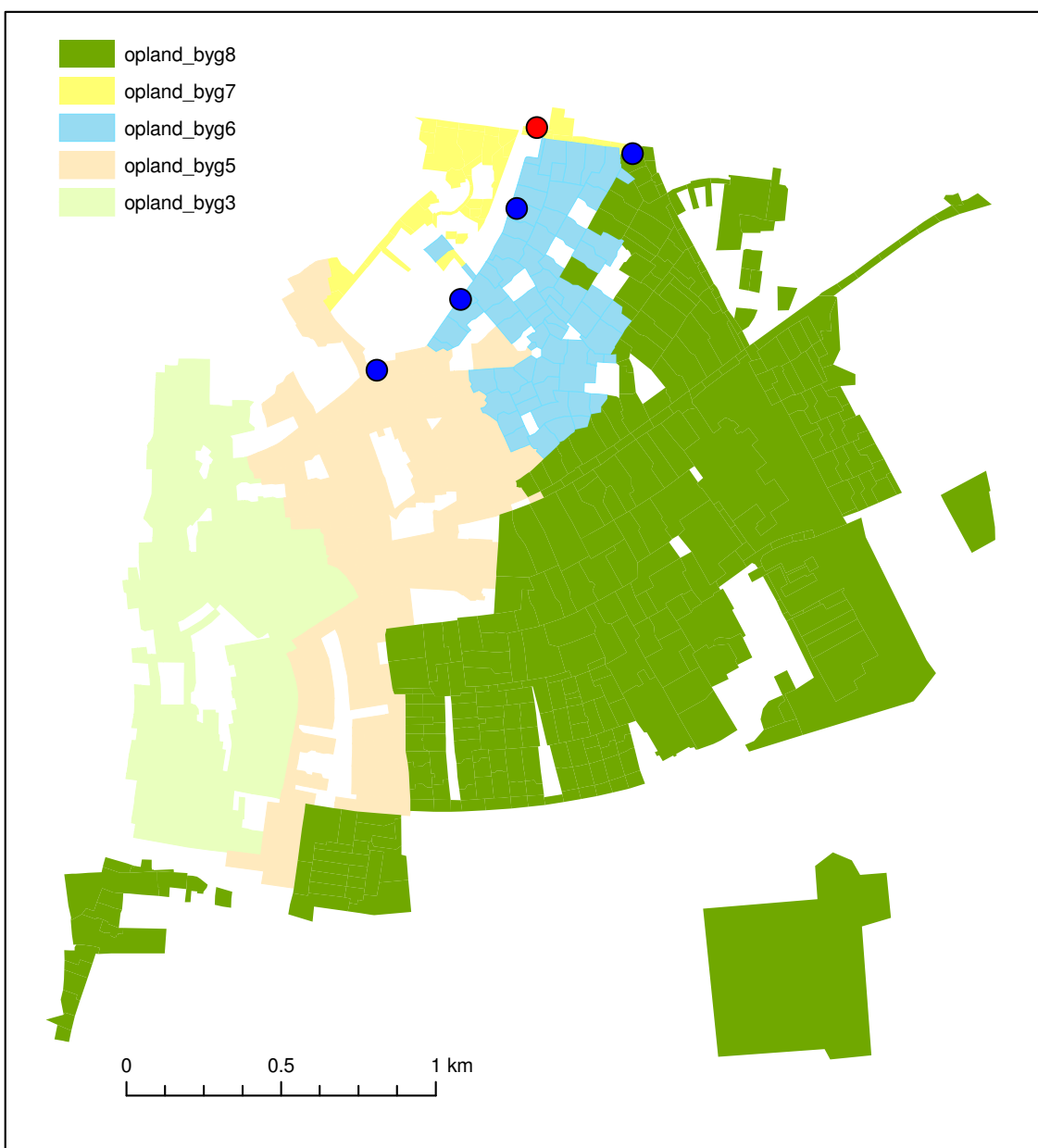
Figur 5.4.3.a Validering af regnprognosen baseret på regnvejrdata i perioden 19. maj 2009 – 1. maj 2010. De fuldtoptrukne linier angiver middelværdien og de stiplede plus-minus en gange spredning.



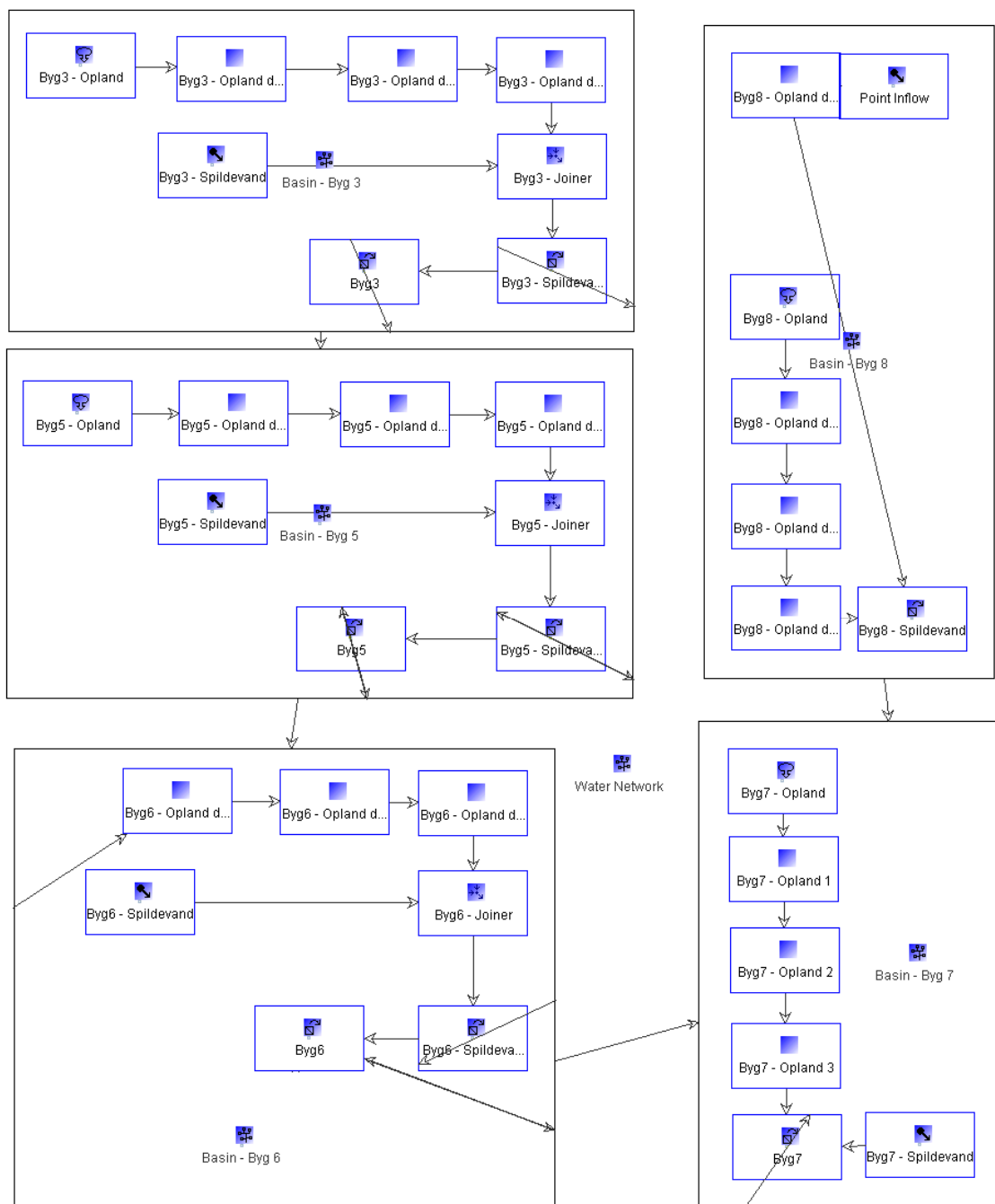
## 5.4.4

**Opbygning af afstrømningsmodel og resultater**

Odense modellen er bygget over de fem oplande der afstrømmer til Munkedammen. Disse kan ses på nedenstående figur 5.4.4.a. Da der er meget styring i Munkedammen er styringsstrategierne lagt ind som en del af modellen.

**Figur 5.5.4.a**

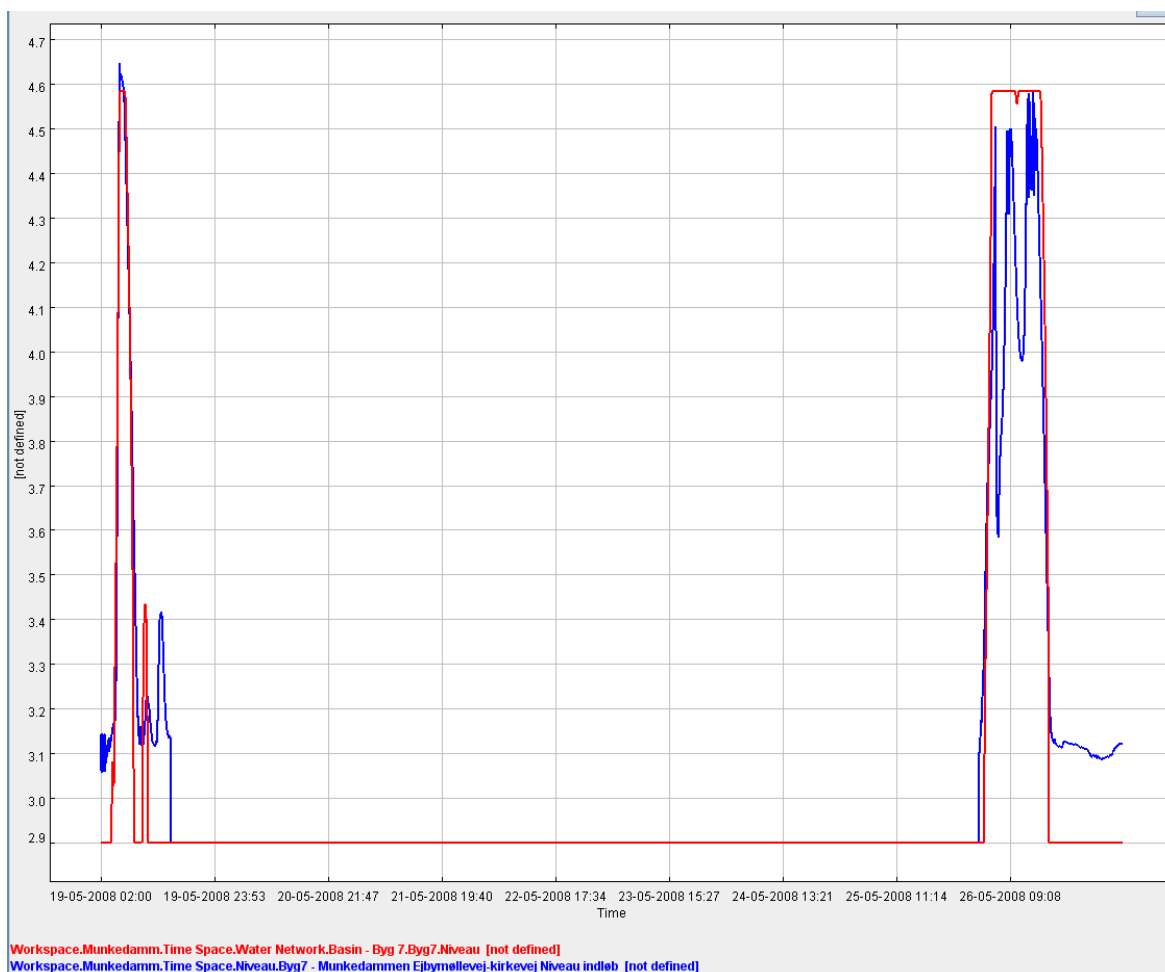
Oplande til Odense modellen med angivelse af prognosepunkt (rød) og øvrige kalibreringspunkter (blå).



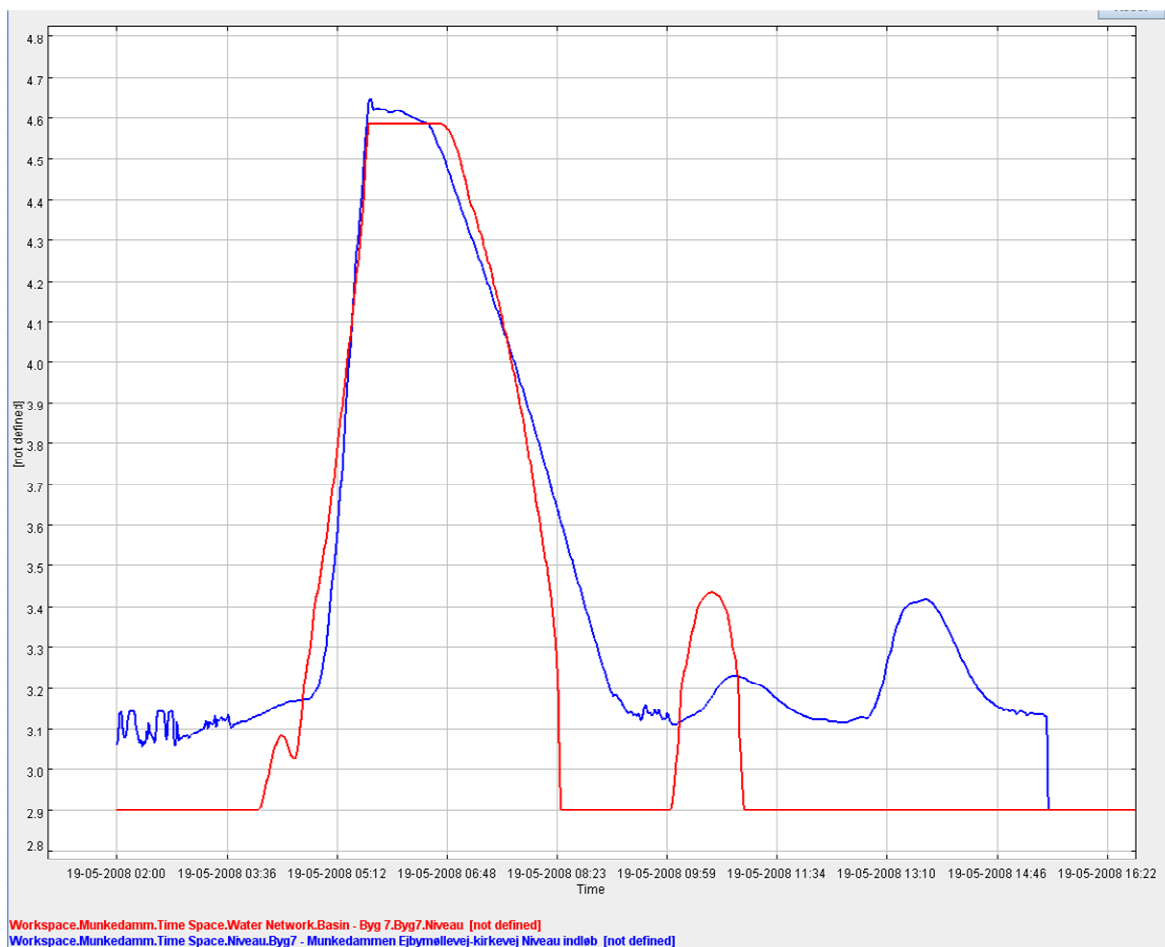
**Figur 5.5.4.b**  
**WaterAspects modellen for Odense.**

## Kalibrering

Modellen er kalibreret ud fra niveau målinger i tre forskellige bygværker i Munkedammen bassinledning. Historiske data for såvel niveauer som status af spjæld i det enkelte bygværker i bassinledningen har været tilgængelige for kalibreringsperioden sidst i maj 2008. Figur 5.5.4.c viser de målte og modellerede niveauer fra den kalibrerede model for det bygværk, der er længst nedstrøms i ledningen. Figur 5.5.4.d viser et zoom ind på hændelsen d. 19/5 2008.



**Figur 5.5.4.c**  
Målt og modelleret niveau i bygværk 7 i Munkedammen bassinledning. Den blå linje er det målte.



**Figur 5.5.4.d**  
 Zoom ind på hændelsen d. 19/5 2008.

### Systemet i brug

Det har inden denne afrapportering ikke været muligt at opnå konsistente resultater og tilhørende eksempler for niveau prognoserne i Odense. Dette bero på et sammenfald af flere forskellige forhold:

- den lange isvinter
- en efterfølgende omlægning af overførelsen af radar data fra Odense radaren til AAU's server (med et længere afbrud i forbindelsen til følge)
- ændring i spjæld funktion i forhold til den oprindeligt opbyggede model
- systemet og modellens relativ høje kompleksitet

Model beregninger, kommunikation af radar data og SRO data har nu længe kørt meget stabilt. Modelberegningerne viser imidlertid at der er behov for større ændringer i modellen for at tag højde for ændrede spjæld funktioner og den tilhørende styring.

Det forventes at de nødvendige justeringer og opsamling af erfaringer kan ske hen over sommeren 2010.

#### 5.4.5

##### **Vurdering og perspektiver**

Der har i projektperioden været problemer med hardware på Odense-radaren, hvorfor der i vinter 2009 og forår 2010 har været få anvendelige data. DHI har i maj 2010 udskiftet noget af hardwaren og ved projektafslutningen fungerer radar og datakommunikation tilfredsstillende.

Kalibreringen af Odense radaren er noget usikker på grund af en ikke-hensigtsmæssige placering af regnmålerne i forhold til radaren. Normalt vil den dynamiske kalibreringsprocedure håndtere en usikker statistisk kalibrering, men eftersom der kun har været en online-regnmåler placeret i Odense har denne kalibrering også været noget usikker.

Regnprognosen for Odense har fungeret stabilt og ser ud til at give fornuftige resultater indtil en prognosehorisont på ca. 30 min.

Som tidligere beskrevet giver den opstillede prognose mulighed for optimering af styringen af spjældene i bassin-ledningen ved Munkedammen, hvilket kunne føre til en reduktion af aflastning til åen uden øget risiko for oversvømmelse i oplandet.

Odenses afløbssystem er indrettet med store bassinvoluminer, hvor der under regn tilbageholdes en blanding af spildevand og regnvand, for at undgå aflastning til de omgivende vandløb, å og havn. Der ligger et stort potentiale i at benytte en radarbaseret prognose til fyldning og tømning af bassinerne, så der i videst muligt omfang undgås aflastninger. Oplysningen om hvilke deloplande kan forventes at modtage den største mængde nedbør, kan også benyttes aktivt i beslutninger vedrørende hvilke bassiner bør tømmes først og hvilket renseanlæg det er mest hensigtsmæssigt at tømme bassinerne til på et givent tidspunkt.

---

## 5.5

### Slagelse

SK Spildevand A/S i Slagelse har i øjeblikket stort fokus på optimering af processerne på Slagelse Renseanlæg. I den sammenhæng er det naturligt at overveje om effektiviteten af regnstyring (ATS) kan forbedres med et tilhørende radar varsel. På Slagelse Renseanlæg kan ATS opstartes ud fra nedbørsmålinger i oplandet, hvilket er en velfungerende løsning i de fleste tilfælde. Men nogle gange udebliver dette varsel eller også kommer det senere end man kan ønske sig.

Slagelse har ikke selv en X-bånd lokal radar. Løsningen her har i stedet været at indhente radardata fra DMI's C-bånds radar på Stevns.

Prognosepunktet, som er anvendt i dette projekt, er tilløbet til Slagelse Renseanlæg, hvilket er angivet på figur 5.5.a.



**Figur 5.5.a**  
Den røde nål angiver placeringen af renselanlægget i Slagelse (baggrundskort fra Google Earth).

### 5.5.1

#### Radaropsætning og resultater

Til regnprognosen for indløbet til Slagelse Centralrenseanlæg anvendes DMI's vejrradar placeret på Stevns, ca. 60 km fra Slagelse.

**Tabel 5.5.1.a** Specifikationer for Stevns-radaren

Frekvens	5.625 GHz
Bølgelængde	5.0 cm
Udgangseffekt	250 kW
Rækkevidde	240 km (100 km kvantitativt)

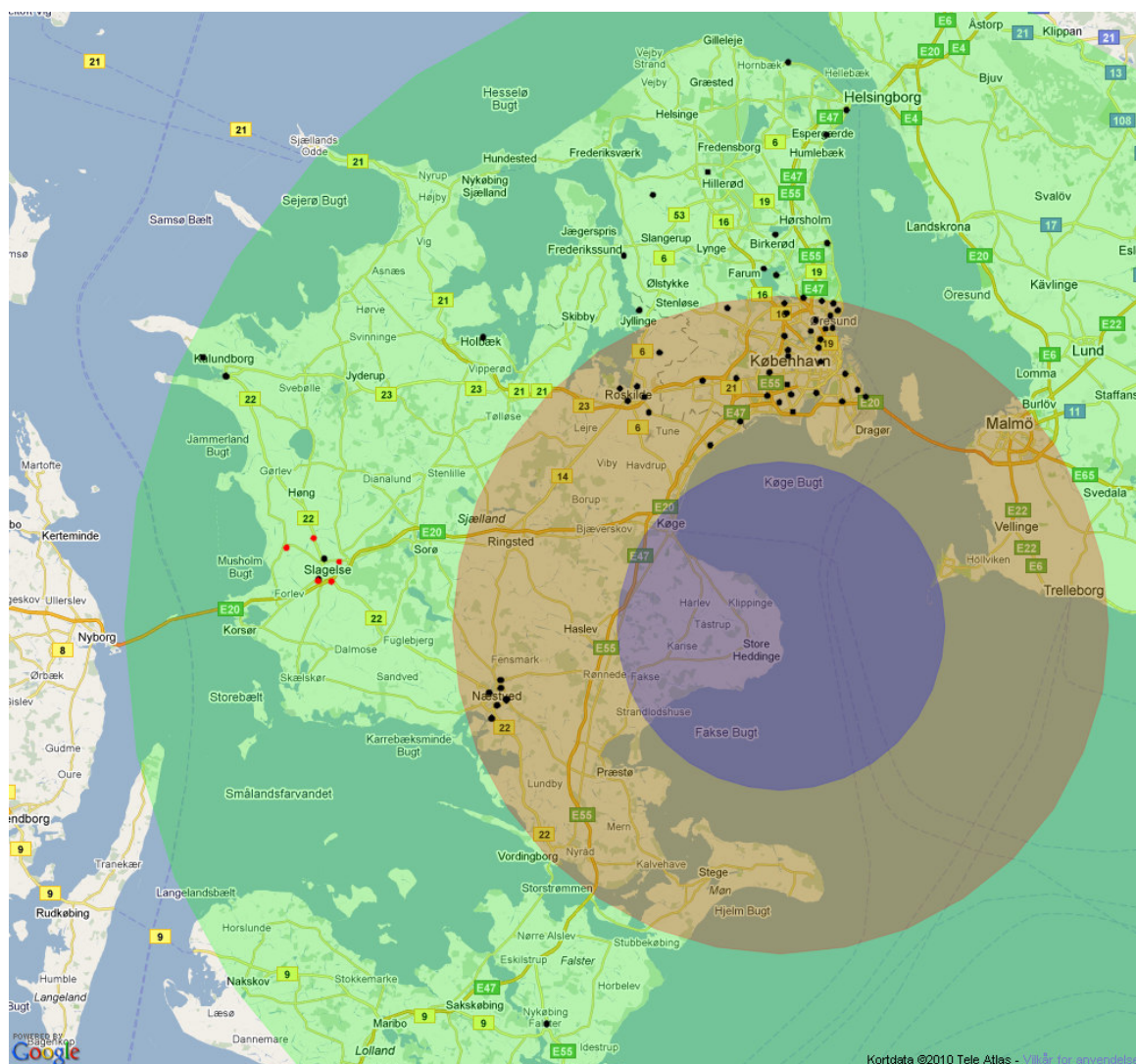
Stedsopløsning	2000 x 2000 m
Tidsopløsning	10 min
Vertikale skanningsvinkler*	0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.4, 4.5, 8.5, 13.0, 15.0
Ejer	Dansk Meteorologisk Institut
Driftsansvarlig	Dansk Meteorologisk Institut
Fabrikat	Ericsson/ECC
Placering	Stevns
Koordinat	UTM Zone 33 (N 6.136.442, E 718.734)
Datakommunikation	FTP til DMI-server
Driftstid i projektet	26. maj 2009 – 1. juni. 2010
Nedetid	8.1 %

\* DMI's radar skanner i flere vertikale vinkler modsat de lokale radarer som skanner med én vertikal vinkel. DMI's data repræsenterer derfor et volumen af atmosfæren. Dette volumen opdeles i et antal såkaldte cappilag, og de data der anvendes i dette projekt er et udtræk af det nederste cappilag (tættest ved jordoverfladen)

Stevns radaren er placering på Sjælland medfører at der er hele 63 SVK-regnmålere inden for den 100 km radius som DMI's anbefaler som største radius for kvantitativ bestemmelse af nedbør figur 5.5.1.a. I regnprognosen anvendes dog data helt ud til 240 km. Radaren er kalibreret efter standard Marshall-Palmer værdier ( $A=200$ ,  $B=1.6$ ). Det har dog været nødvendigt at justere disse værdier en smule i forhold til de regndybder der er observeret i spildevandskomiteens regnmålersystem (Figur 5.5.1.e). På figur 5.5.1.b – figur 5.5.1.d ses de lineære regression mellem de 63 SVK-regnmålere som er anvendt til den statiske kalibrering og Stevns-radaren. Disse er også beskrevet i tabel 5.5.1.b. Der er anvendt data fra 19. maj 2009 – 1. maj 2010 til kalibreringen.

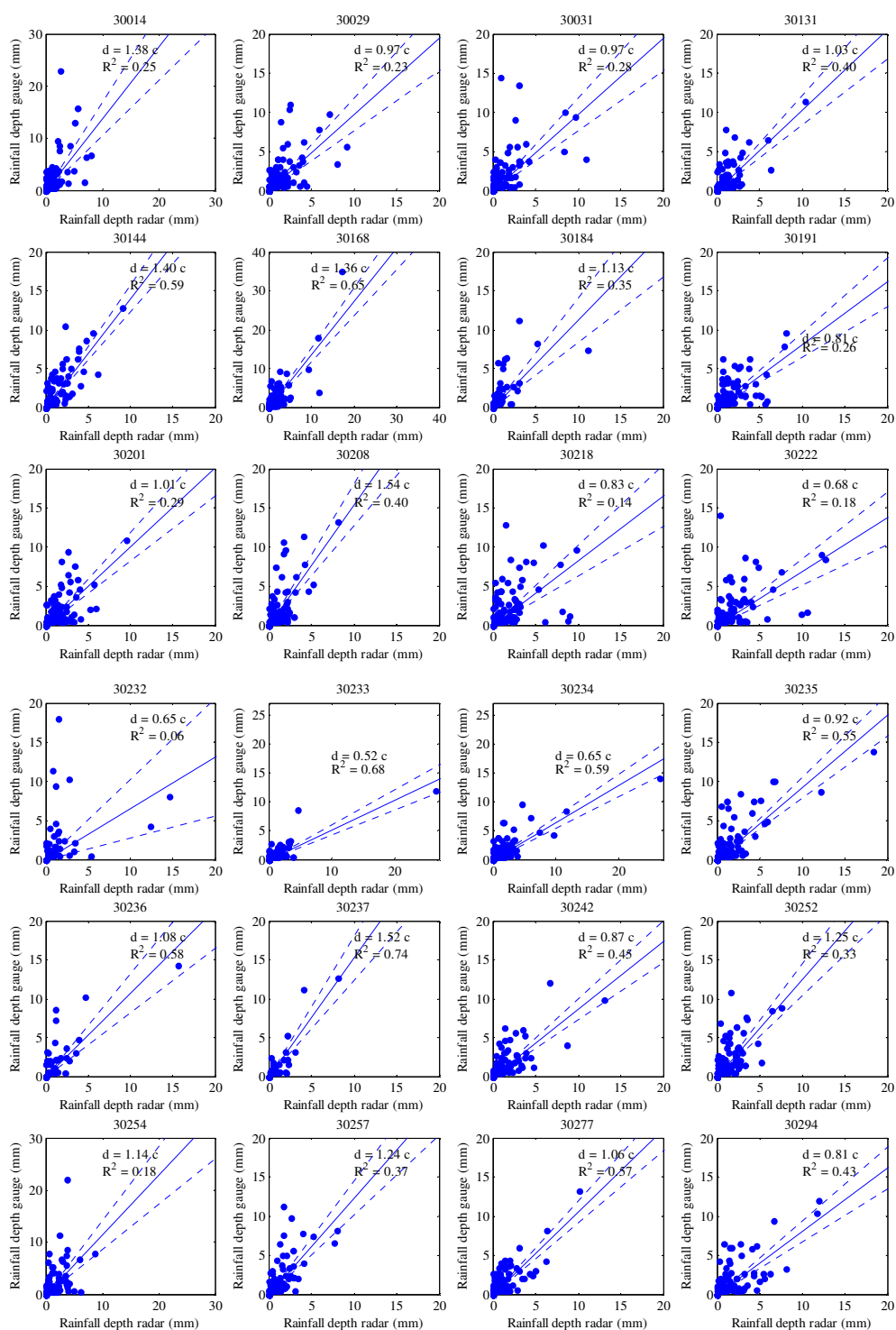
Umiddelbart er der større spredning end forventet på de lineære regressioner og dermed også på de hældningskoefficienter der er afbilledet på figur 5.5.1.e. Forklaringen formodes at ligge i den skalaeffekten ved at sammenligne en regnmåler på  $200 \text{ cm}^2$  med en C-bånds-radarpixel på  $2 \times 2 \text{ km}$ .



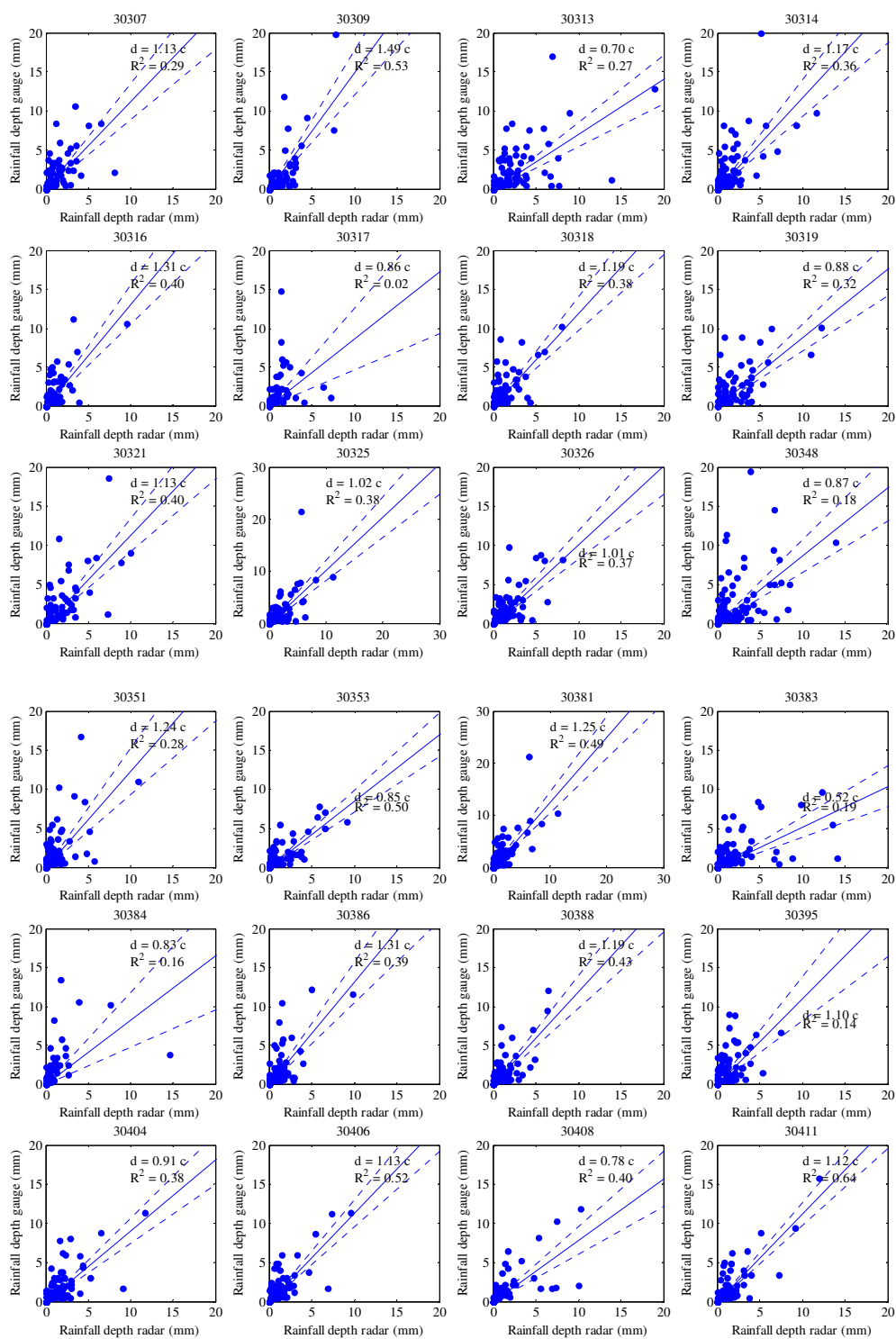


**Figur 5.5.1.a Blåt område: 0- 25 km fra radaren, rødt område: 25-50 km fra radaren, grønt område 50-100 km fra radaren. Sorte punkter: SVK regnmålere anvendt til statisk kalibrering, røde punkter on-line regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering.**

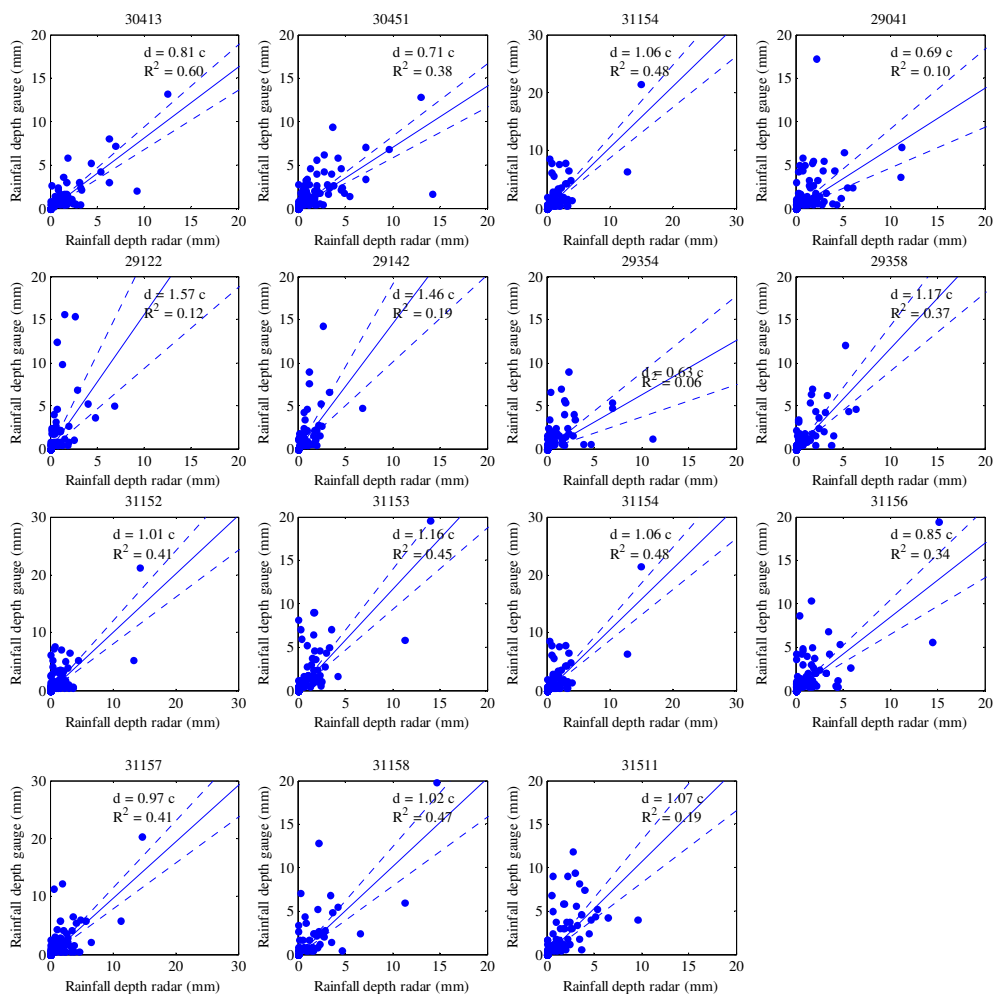
Som det fremgår figur 5.5.1.e er der ved C-båndsradaren ikke de samme problemer med afstandskorrektion som ved de mindre X-bånds-radarer, idet der anvendes samme kalibreringsparametersæt uafhængigt af afstanden fra radarens origo.



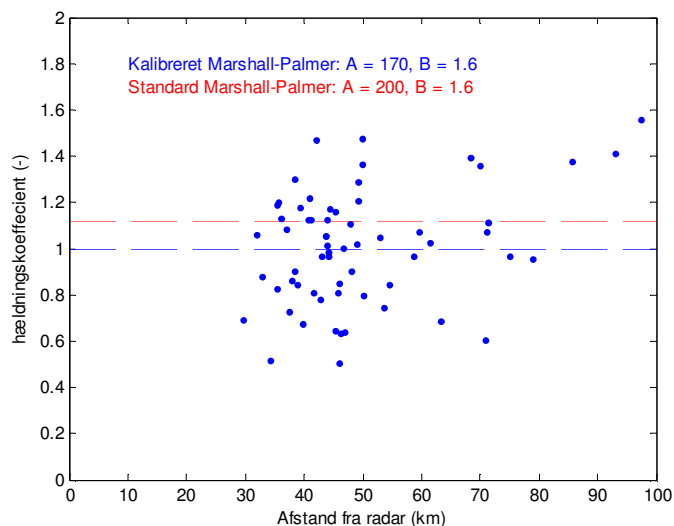
Figur 5.5.1.b Lineær regression mellem regnmålere og radar på hændelsesniveau



Figur 5.5.1.c Lineær regression mellem regnmålere og radar på hændelsesniveau



Figur 5.5.1.d Lineær regression mellem regnmålere og radar (approximeret Marshall-Palmer) på hændelsesniveau.



**Figur 5.5.1.e** Statisk kalibrering af Stevns-radar. Den stiplede blå linie angiver midelværdien af hældningskoefficienterne fundet ved ovenstående lineære regressioner og approximerede Marshall-Palmer konstanter, mens den røde stiplede linie angiver midelværdien fundet ved standard Marshall-Palmer konstanter.

**Tabel 5.5.1.b** Opsumming af statistisk kalibrering og anvendte SVK-regnmålere.

Regnmåler	SVK må- ler nr	Afstand til radar (km)	Regnmåler total sum (mm)	Radars total sum (mm)
Nordkystens Renseanlæg	30014	85.5	205.2	153.2
Helsingør Renseanlæg	30029	79.0	174.2	177.2
Sydskystens Renseanlæg	30031	75.0	194.2	169.8
Frederikssund Centralrenseanlæg	30131	61.3	131.8	132.4
Skævinge Pumpestation	30144	68.4	192.2	155.9
Hillerød Centralrenseanlæg	30168	69.9	221.8	195.0
Sjælsø Renseanlæg	30184	59.6	108.2	82.3
Furesø Park	30191	53.5	156.8	202.5
Vedbæk Renseanlæg	30201	58.7	170.2	181.2
Ordrup Kirkegård	30208	49.9	180.8	136.6
Stades Krog Overløbsbassin	30218	50.2	222.4	238.5
Søborg Vandværk	30222	45.2	191.8	254.3
Fuglegården	30232	46.9	112.8	97.2
Hellerup Kirkegård	30233	45.9	76.2	127.5
Delfinen	30234	46.2	152.2	207.6
Elmegården	30235	47.9	187.8	212.7
Lunden	30236	48.9	94.2	77.3
Ermelundsværket	30237	50.0	58.8	57.0
Stavnsholt Renseanlæg	30242	54.5	153.2	181.8
Gladsaxe Søvej	30252	49.2	194.0	158.9
Gladsaxe Vibevangenget	30254	47.7	205.6	182.1
Gladsaxe Stavnshøj Alle	30257	44.3	175.0	150.1
Jyllinge Renseanlæg	30277	52.8	147.0	140.7
Gerup Renseanlæg	30294	45.7	165.6	214.9
Træholmen	30307	36.9	153.2	133.7
Åvendingen	30309	42.1	126.4	115.8
Kløvermarksvej	30313	39.8	205.4	276.0
Kongens Enghave	30314	36.0	190.8	163.4
Måløv Renseanlæg	30316	49.2	128.0	100.7
Glostrup Genbrugsstation	30317	38.8	106.6	90.9
Hvidovre Vandværk	30318	35.4	147.0	119.2
Hvidovre Pumpestation	30319	32.8	168.8	186.5
Rødovre Vandværk	30321	41.2	181.4	174.7
Bispebjerg Hospital	30325	44.2	173.6	201.6

Lygten	30326	42.9	142.6	162.6
Wibrandsvej	30348	37.9	247.6	268.1
Tårnby Pumpestation 4	30351	35.6	157.6	120.1
Tårnby Renseanlæg	30353	37.4	111.2	144.5
Landbohøjskolen	30381	40.8	190.6	169.4
Avedørelejren	30383	34.2	149.8	233.7
Brøndbyvester Vandværk	30384	35.3	111.0	77.4
Albertslund Materielgård	30386	38.5	134.2	110.8
Høje Tåstrup	30388	39.4	127.8	120.0
Ishøj Varmeværk	30395	31.9	144.0	119.3
Vindinge Søbjergvej	30404	38.4	154.6	171.6
Roskilde Navervænget'	30406	40.8	143.8	134.8
Roskilde Nymarken	30408	42.7	107.4	128.6
Roskilde Renseanlæg	30411	43.9	152.0	146.5
Roskilde Søndre Ringvej	30413	41.6	100.2	143.3
Mosedede Renseanlæg	30451	29.7	177.2	226.6
Næstved Ny Præstøvej	31154	43.7	164.4	160.5
Holbæk Centralrenseanlæg	29041	63.3	147.4	160.2
Sønder Nyrup Renseanlæg	29122	97.4	132.4	71.4
Kalundborg Centralrenseanlæg	29142	93.0	104.8	71.3
Slagelse Centralrenseanlæg	29354	70.8	105.4	111.6
Slagelse Pumpestation	29358	71.3	107.0	97.3
Næstved Jakobshavn	31152	46.6	166.4	145.8
Næstved Parkvej	31153	45.3	166.4	130.0
Næstved Ny Præstøvej	31154	43.7	164.4	160.5
Næstved Chr. Winthers Vej	31156	46.0	148.6	149.5
Næstved Ellebækvej	31157	44.0	176.6	194.1
Næstved Maglegårdsvej	31158	43.8	125.4	121.9
Nykøbing F. Renseanlæg Nord	31511	71.1	189.4	162.0
Middel			154.0	153.4

## 5.5.2

### Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler

Stevns-radaren kalibreres dynamisk fem regnmålere koblet på Slagelse Kommunes SRO-system. De fem regnmålere er præsenteret på figur 5.5.1.a og i tabel 5.5.2.a

**Tabel 5.5.2.a On-line regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering**

Regnmåler	AAU Måler nr.	Kommunikation
Kirke Stillinge*	204	SRO via Krüger
Havrebjerg*	203	SRO via Krüger
Østervang*	202	SRO via Krüger
Slipset	201	SRO via Krüger
Kinavej	200	SRO via Krüger

\* Pga. dårlig kommunikation til SRO systemet har der været mange og længerevarende udfald på disse regnmålere.

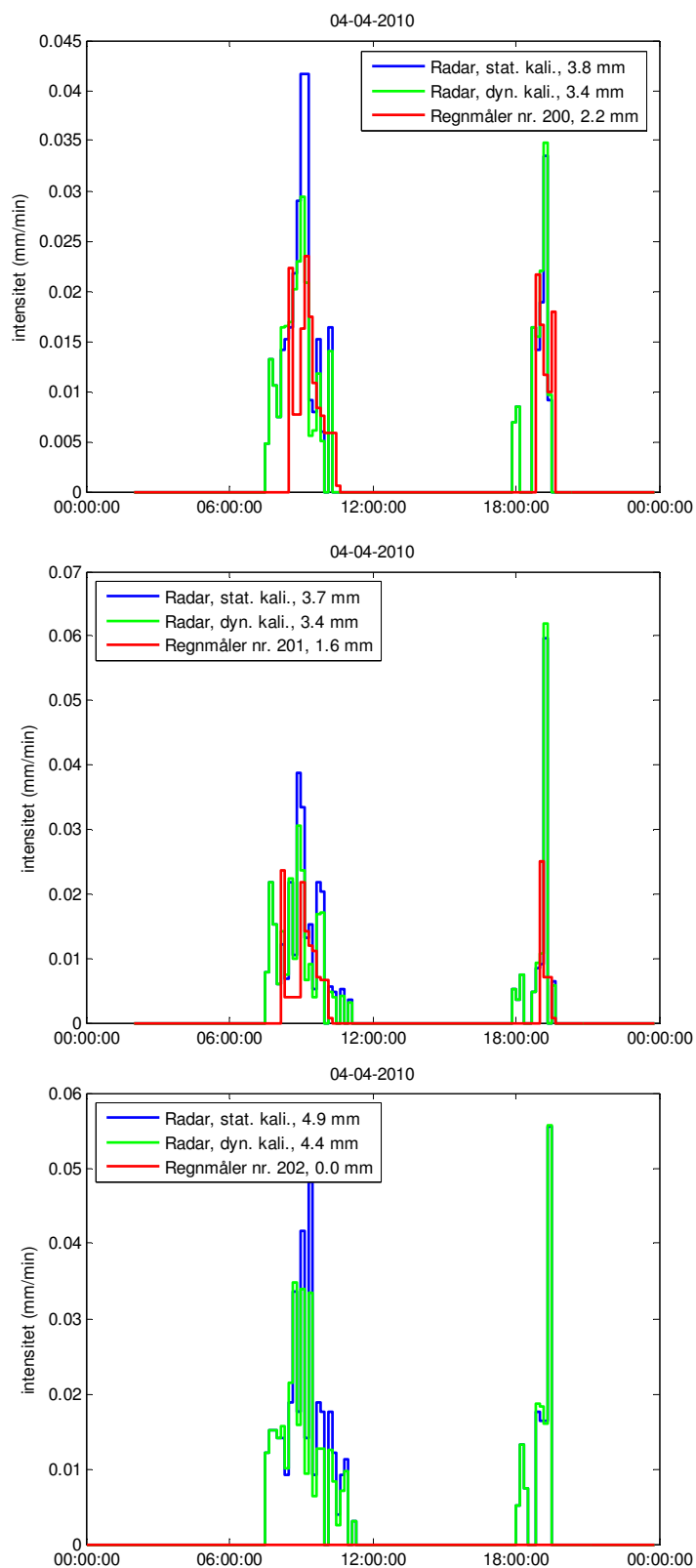
Der er valgt at vise to hændelseseksempler på den dynamiske og den statiske kalibrering. Den første hændelse fra den 4. april 2010 er vist på figur 5.5.2.a og 5.5.2.b og et eksempel på regnprognosen samme dag kl. 07.20 samme dag er vist på figur 5.5.2.c og valideret i figur 5.5.2.d. Hændelsen er forholdsvis lille, hvad angår regndybde, men er alligevel er hændelsen medtaget i afrapporteringen, for også at belyse hvordan den dynamiske kalibrering fungerer ved små regnhændelser. Umiddelbart er usikkerheden større ved en lille hændelse eftersom usikkerheden på regnmålerobservationen på 0.2 mm kan udgøre en anseelig procentdel af den samle-

de regndybde. Desuden bestemmes regnintensiteten ved at fordele de 0.2 mm jævnt ud over tiden mellem to på hinanden følgende vip. Dette medfører, at usikkerheden på intensitetsbestemmelsen ved en lave vippefrekvenser er større end tilsvarende ved høje vippefrekvenser.

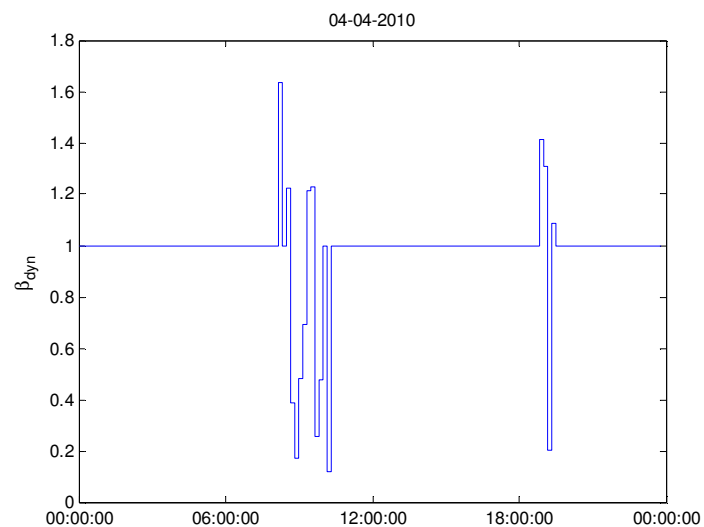
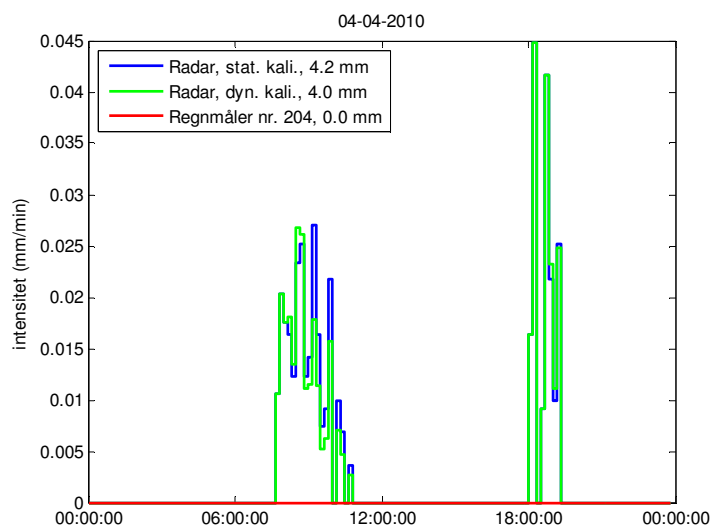
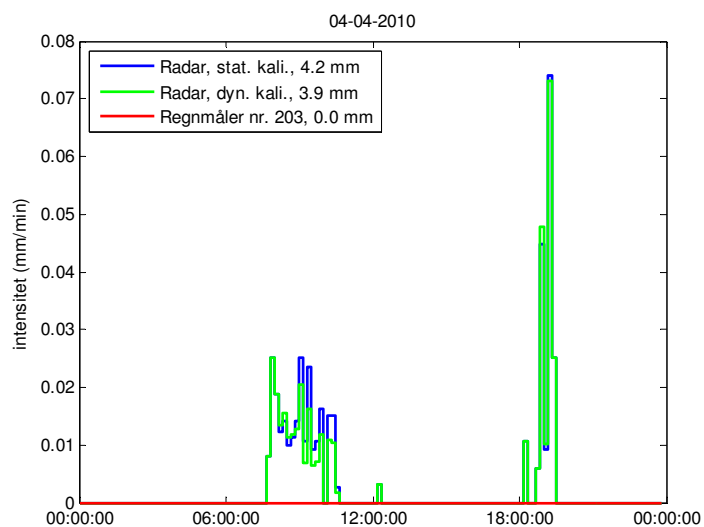
Ovenstående er grunden til forholdsvis dårlig overensstemmelse mellem radar og regnmåler i eksemplet. Tilsvarende ses et andet eksempel fra den 15. maj 2010 på figur 5.5.2.e, hvor der er bedre overensstemmelse mellem radar og regnmåler når man ser på den akkumulerede regndybde, dog der stadig nogen divergens mellem intensitetsniveauerne, og på grund af lave intensiteter har den dynamiske kalibrering ikke rigtigt sin berettigelse i dette tilfælde.

---

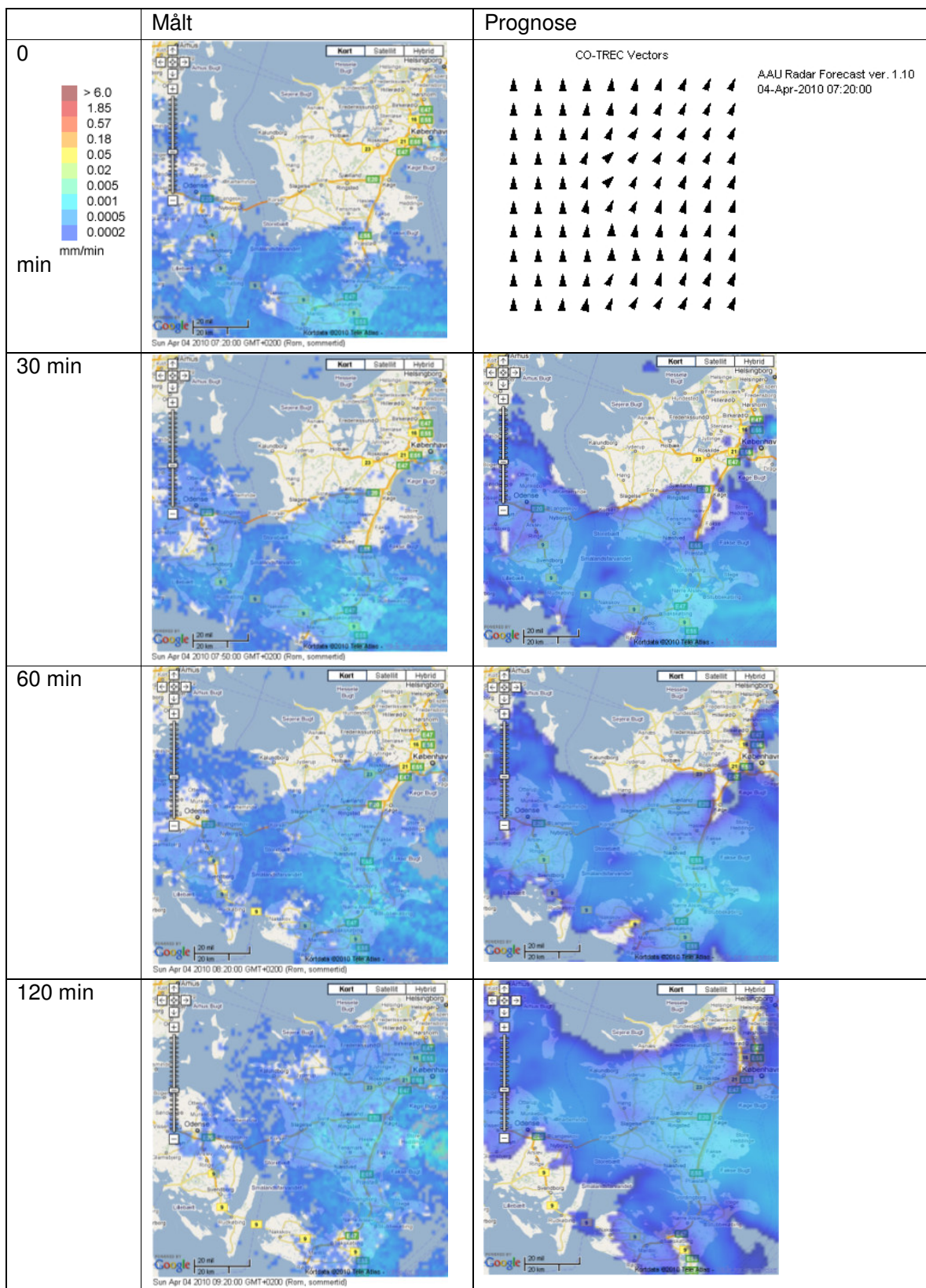




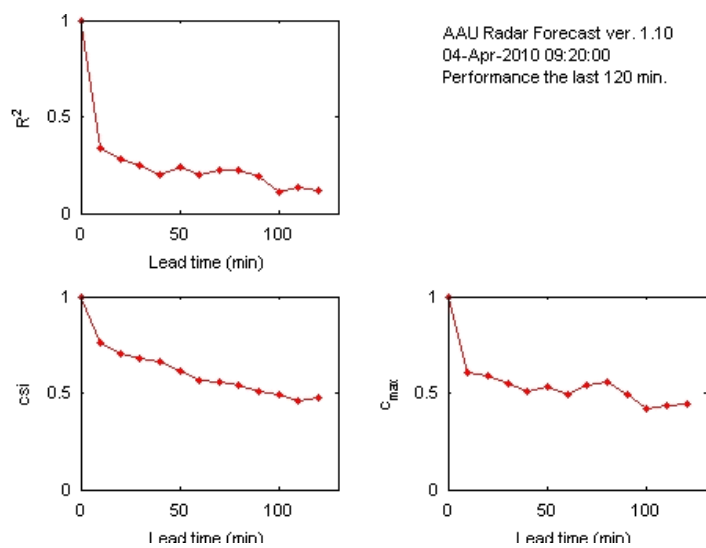
**Figur 5.5.2.a** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Stevns-radaren den 4. april 2010. Der har den pågældende dag ikke været kommunikation med regnmåler 202, 203 og 204.



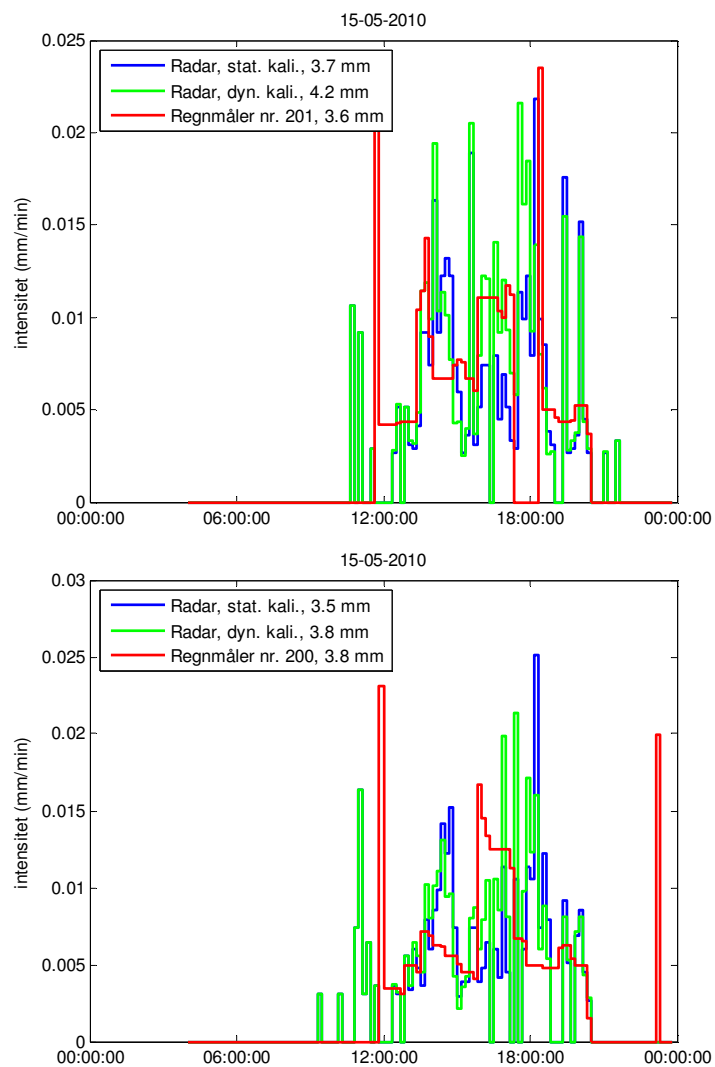
**Figur 5.5.2.b** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Stevns-radaren den 4. april 2010. Der har den pågældende dag ikke været kommunikation med regnmåler 202, 203 og 204. Nederste diagram viser variationen i den dynamiske kalibreringsfaktor.



Figur 5.5.2.c Målt og prognosticeret nedbør den 4. april 2010 kl. 7.20



Figur 5.5.2.d Validering af regnprognosen den 4. april 2010 kl. 9.20

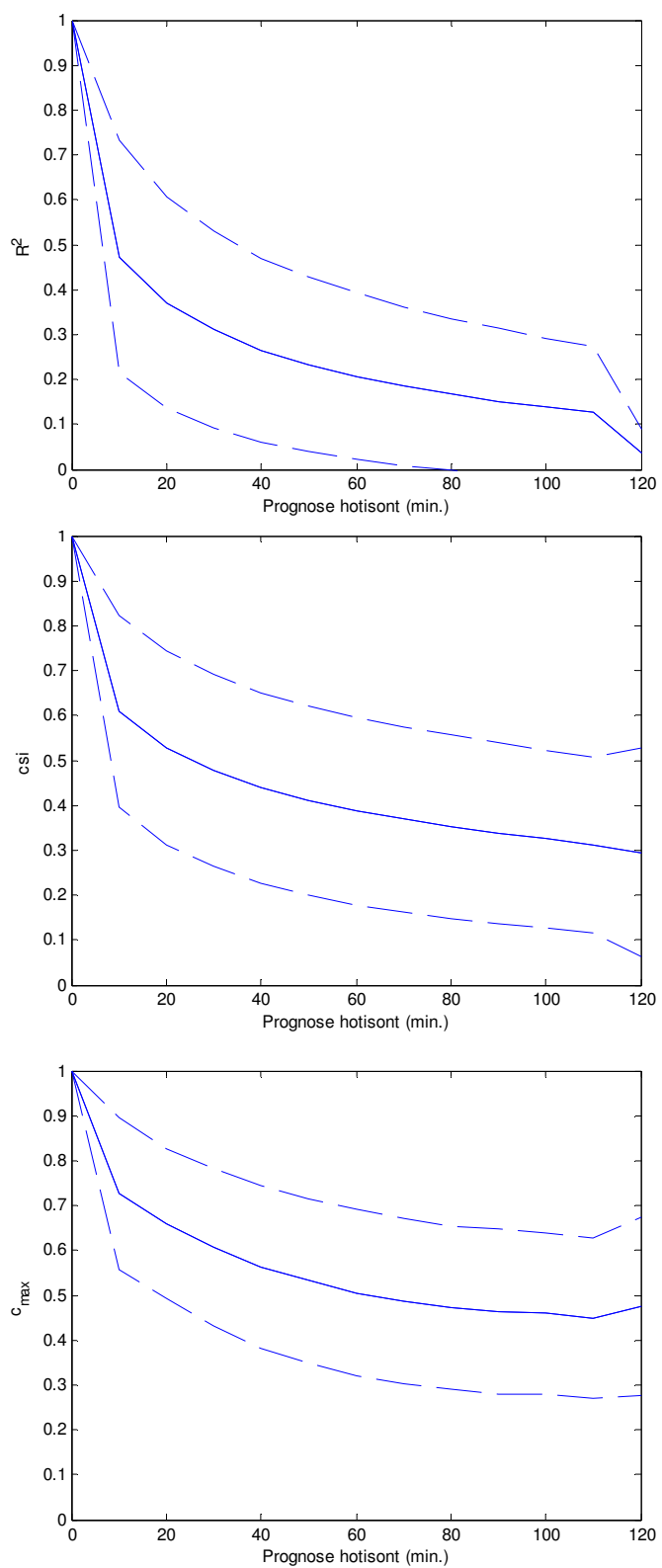


Figur 5.5.2.e Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Stevns-radaren den 15 maj 2010.

### 5.5.3

#### **Prognosevalidering**

På figur 5.5.3.a er de tre valideringsparametre afbilledet som funktion af prognosehorisonten på baggrund af regnvejrdata i perioden 26. maj 2009 – 1. maj 2010. Diagrammerne viser, at det i de fleste tilfælde er muligt at lave en kvantitativ forudsigelse af nedbøren med ca. en times prognosehorisont. Ud over en time bliver prognosen noget usikker. Det anbefales derfor at prognosen kun anvendes til bestemmelse af forekomst af regn eller ej i en 60 til 120 min. horisont.



**Figur 5.5.3.a** Validering af regnprognosen baseret på regnvejrdata i perioden 19. maj 2009 – 1 maj 2010. De fuldtoptrukne linier angiver middelværdien og de stiplede plus-minus en gange spredningen.

## 5.5.4

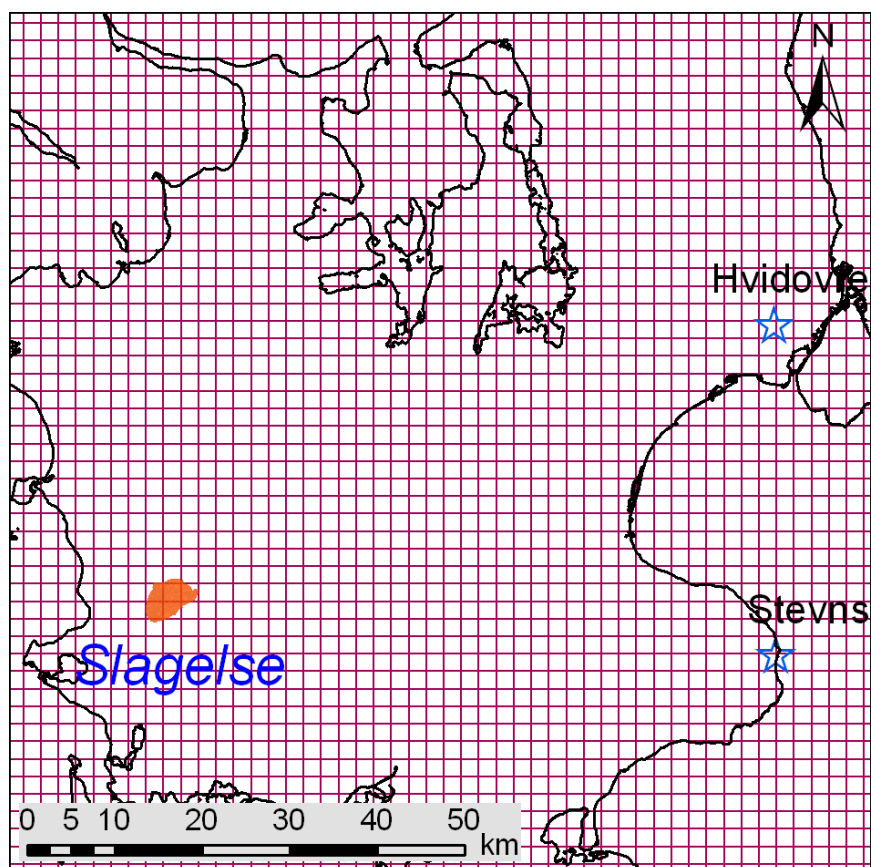
### Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

Modellen er opbygget så den simulerer tilstrømningen til renselanlægget fra Slagelse og omegn.

Indløbet til Slagelse renselanlæg er hydraulisk begrænset til ca. 500 l/s. Vandføringer over denne grænse går derfor i overløb, hvilket er indbygget i modellen.

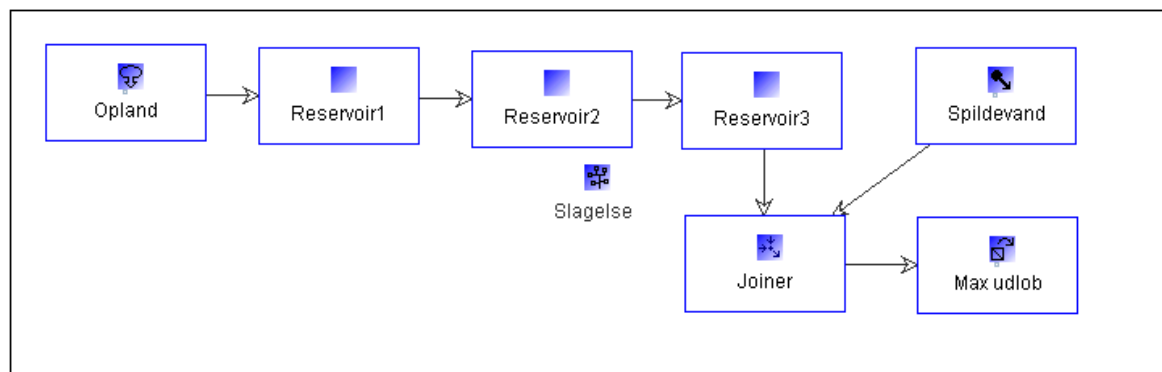
Hele oplandet er samlet som et enkelt delopland i modellen, se figur 5.5.4.a. Desuden fremgår placeringen af deloplandet i forhold til radargridet fra DMI radaren på Stevns.

En oversigt over WaterAspects modellen ses i figur 5.5.4.b. Som kalibrering er anvendt historiske data for tilløbet til renselanlægget, hvorfor modellen er kalibreret imod disse.



Figur 5.4.4.a.  
Oplandet for Slagelse i forhold til DMI radaren på Stevns. Placeringen af Hvidovres DHI radar er desuden angivet.

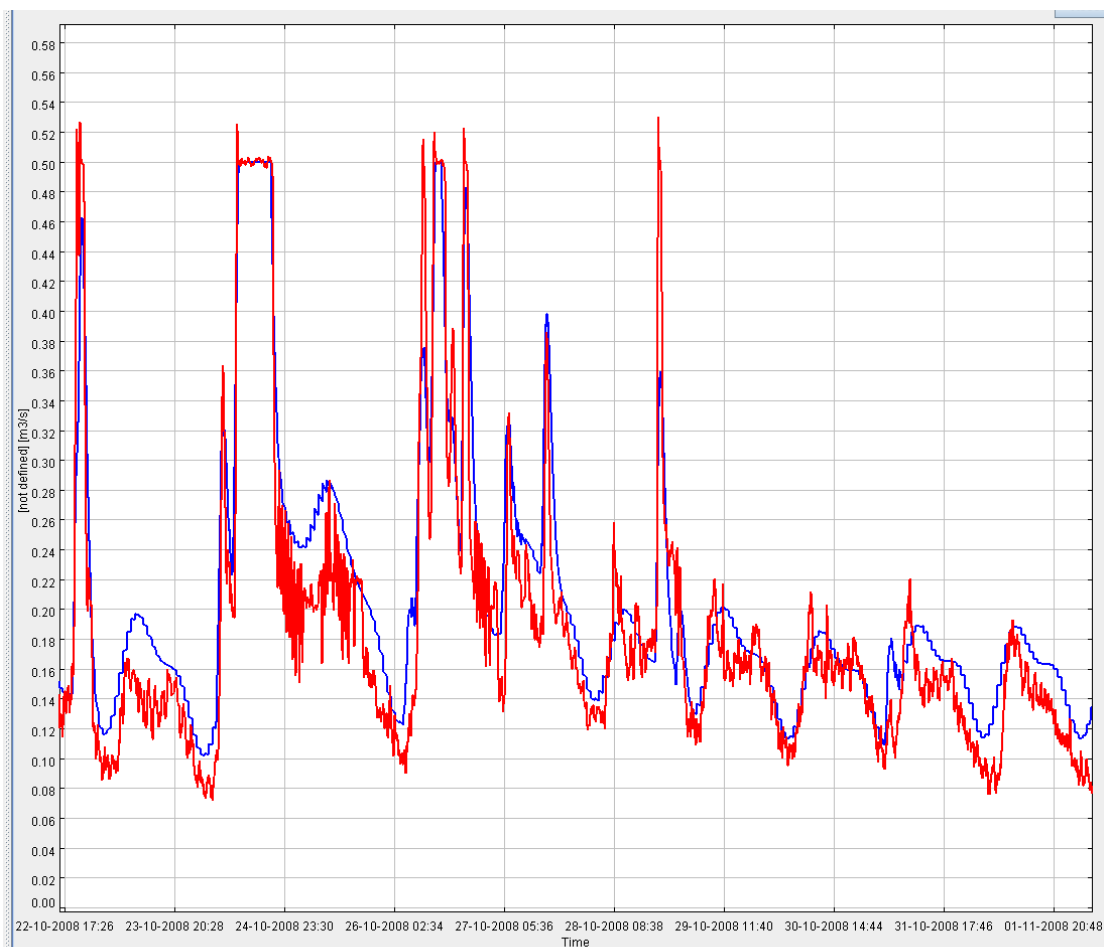




**Figur 5.5.4.b**  
Oversigt over WaterAspects modellen for Slagelse.

### Kalibrering

Modellen er kalibreret ud fra historiske måledata for tilløb til renselanlægget, for oktober måned 2008. Figur 5.5.4.c viser den målte og modellerede tilstrømning til renselanlægget i kalibreringsperioden.



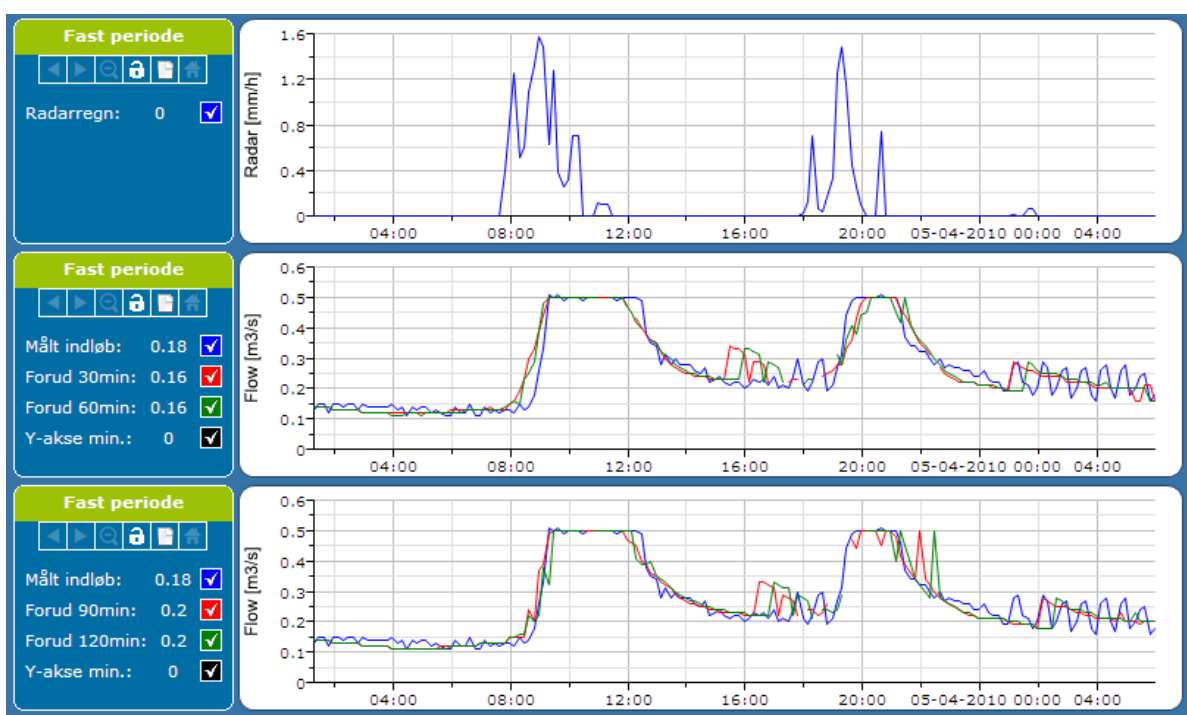
**Figur 5.5.4.c**  
Målt og modelleret indløb til renselanlægget. Den røde linje repræsenterer det målte.

## Systemet i brug

4. april 2010

Radaren viser, at der har været to regnhændelser den 4. april i Slagelse. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte er både de lange og korte afstrømningsprognoser rigtig gode. Både hvad angår tidspunkt for peak, afstrømningens varighed og for højt flowet blev. Dette gælder for begge regnhændelser, se figur 5.5.4.d.



**Figur 5.5.4.d**  
STAR brugerfladen fra 4. april 2010 i Slagelse.

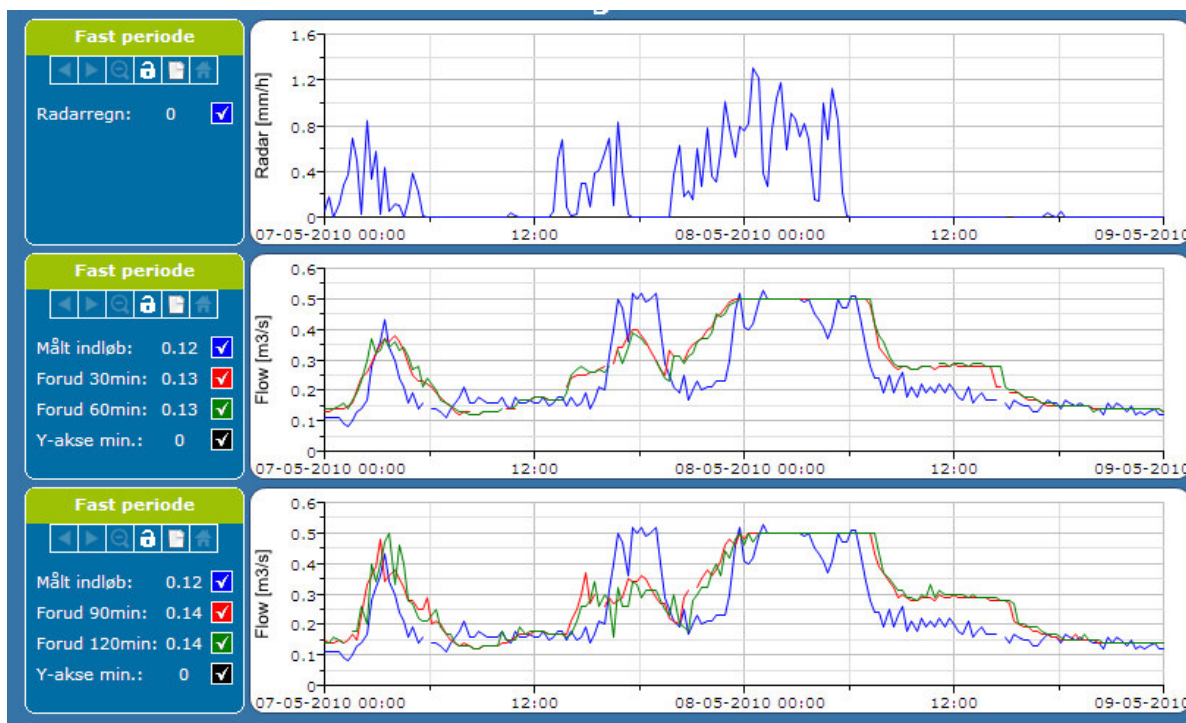
7. – 8. maj 2010

Radaren viser, at der har været tre regnhændelser den 7. – 8. maj 2010 i Slagelse. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel. se figur 5.5.4.e.

Den første regnhændelse har gode afstrømningsprognoser for både de korte og lange forudsigelser.

Derimod underestimeres den anden regnhændelse, og regnafstrømningen forudsiges før det måles. På tilsvarende vis forudsiges den tredje regn-

hændelse lidt for tidligt, men peakværdi og tidspunktet for maksimal afstrømning passer godt.



Figur 5.5.4.e  
STAR brugerfladen fra 7. – 8. maj 2010 i Slagelse.

### 5.5.5

#### Vurdering og perspektiver

Slagelse ligger ca. 75 km fra Stevns radaren, hvilket er inden for den 100 km radius hvor DMI anbefaler at anvende data kvantitativt. Dog skal det bemærkes at over halvdelen af det regn der falder i Danmark har en bevægelsesretning fra vest mod øst. Dvs. at en stor del af det regn der prognosticeres over Slagelse ligger uden for det kvantitative måleområde. her havde det været bedre hvis radar var placeret vest for Slagelse, men eftersom Rømhø og Virring radaren ligger længere væk end 100 km er det vurderet at Stevns radaren vil give den bedste nedbørsestimering over Slagelse.

Den statiske kalibrering af Stevns radaren giver gode resultater over Slagelse. Der har dog været problemer med datakommunikationen til 3 ud af de fem online regnmålere, hvorfor der i størstedelen af projektperioden kun er anvendt to onlineregnmålere til den dynamiske kalibrering.

Afstrømningsprognoserne viser, at det med Stevns-data er muligt af prognosticere fornuftigt 1-2 timer frem, afhængig af forløbet af nedbøren. Det er derfor tydeligt at på grund af DMI's radars større rækkevidde er det muligt

af prognosticere længere frem i tiden i forhold til hvad det er muligt med LAWR-radarene. Kvaliteten og præcisionen af afstrømningsprognosen i Slagelse er bedre end hvad der typisk kan observeres ved prognosen ud fra nedbørsmålere alene. Selvom nedbørsprognosen i Slagelse i dag beregnes ud fra 5 regnmålere ved Slagelse (se fig 5.5.1.a), så er der alligevel nogle frontsystemer der rammer disse nedbørsmålere sent, eller helt forbigår dem. Dette fænomen vil særligt optræde ved frontsystemer kommende fra sydvest. Det vurderes derfor at radarvarsel vil kunne bidrage ved en væsentlig forbedring af ATS opstarten på Slagelse renseanlæg.

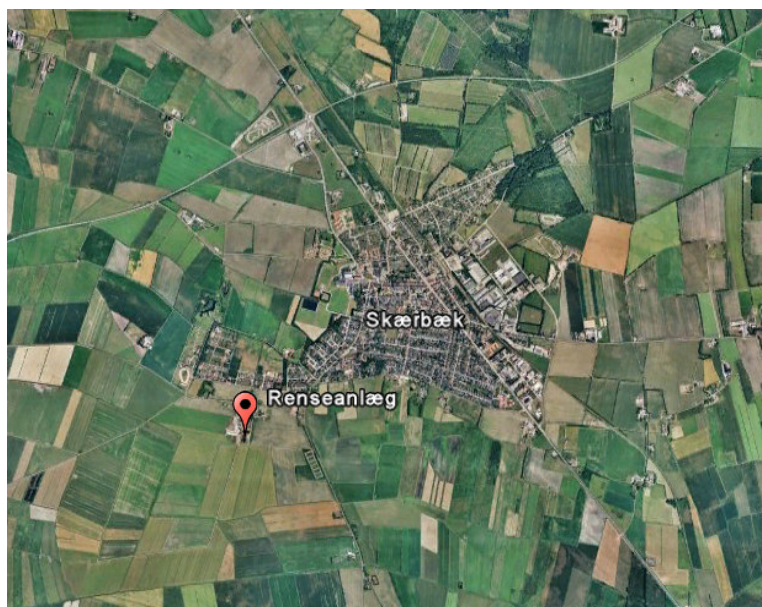
---

## 5.6

**Tønder**

Tønder Forsyning A/S har i øjeblikket fokus på optimering af pumpningen af spildevand til Skærbæk Renseanlæg. Der ligger i den forbindelse et potentiale i at tilrettelægge styringen af pumpestationerne i oplandet, således at der ikke pumpes mere vand til renseanlægget end dette kan behandle, og derved få en bedre udnyttelse af de tilgængelige volumener i afløbssystemet. I den sammenhæng er det naturligt at undersøge mulighederne for radarvarsling. Tønder har ikke selv en X-bånd radar fra DHI. Løsningen har i stedet været at indhente radardata fra DMI's C-bånds radar på Rømø.

Prognosepunktet, som er anvendt i dette projekt, er tilløbet til Skærbæk Renseanlæg, hvilket er angivet på figur 5.6.a.



**Figur 5.6.a**  
Den røde nål angiver placeringen af renseanlægget i Skærbæk (baggrundskort fra Google Earth).

## 5.6.1

**Radaropsætning og resultater**

Til regnprognosen for indløbet til Skærbæk renseanlæg anvendes DMI's vejrradar placeret på Rømø, ca. 35 km fra Tønder.

**Table 5.6.1.a** Specifikationer for Rømø-radaren

Frekvens	5.625 GHz
Bølgelængde	5.0 cm
Udgangseffekt	250 kW
Rækkevidde	240 km (100 kvantitativt)
Stedsopløsning	2000 x 2000 m
Tidsopløsning	10 min

---

Vertikale skanningsvinkler*	0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.4, 4.5, 8.5, 13.0, 15.0
Ejer	Dansk Meteorologisk Institut
Driftsansvarlig	Dansk Meteorologisk Institut
Fabrikat	Ericsson/ECC
Placering	Stevns
Koordinat	UTM Zone 32 (N 6.114.077, E 471.384)
Datakommunikation	FTP til DMI-server
Driftstid i projektet	26. maj 2009 – 1. juni. 2010
Nedetid	14.9 %

---

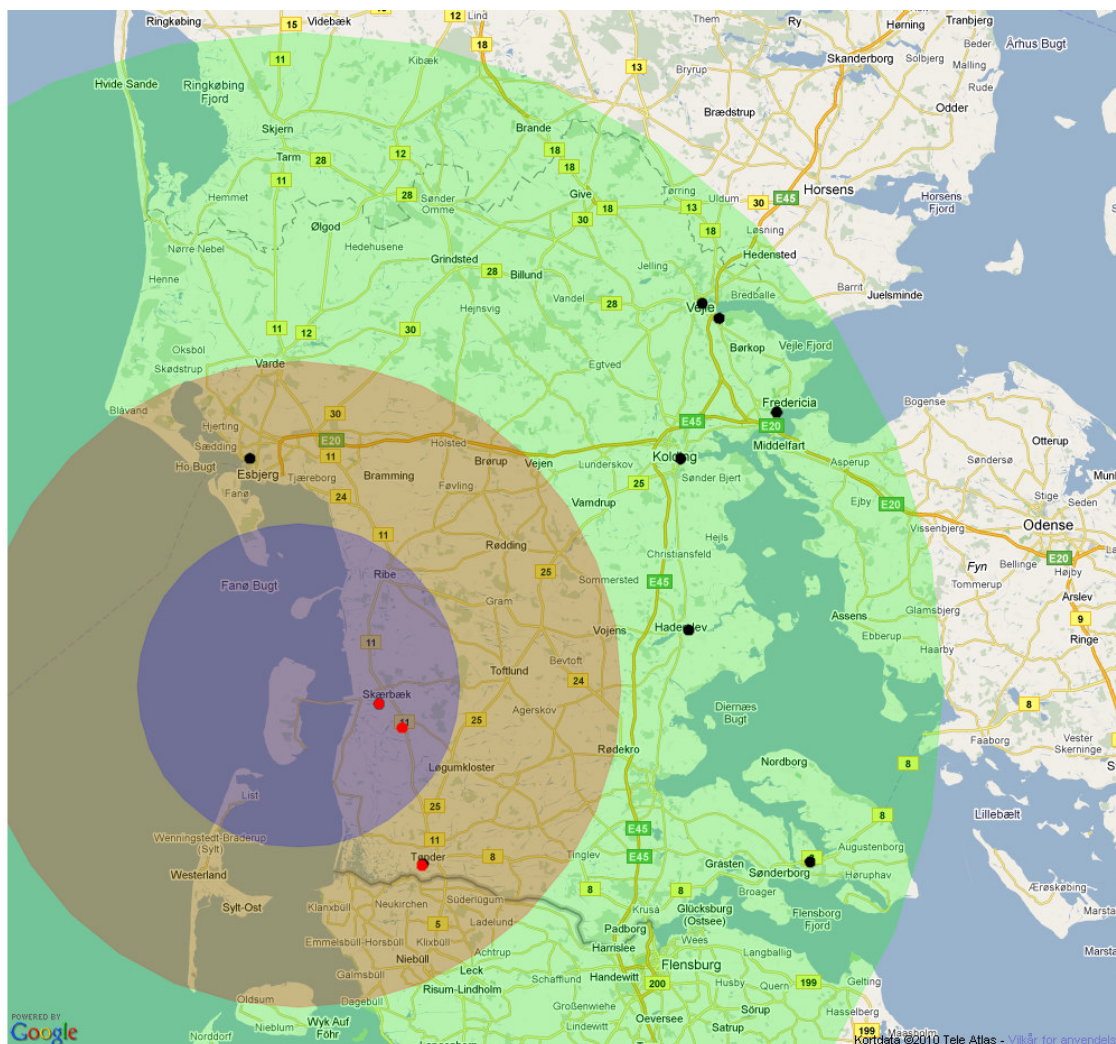
\* DMI's radar skanner i flere vertikale vinkler modsat de lokale radarer som skanner med én vertikal vinkel. DMI's data repræsenterer derfor et volumen af atmosfæren. Dette volumen opdeles i et antal såkaldte cappelag, og de data der anvendes i dette projekt er et udtræk af det nederste cappelag (tættest ved jordoverfladen)

---



**Figur 5.6.1.a DMI's radar på Rømø (DMI 2008)**



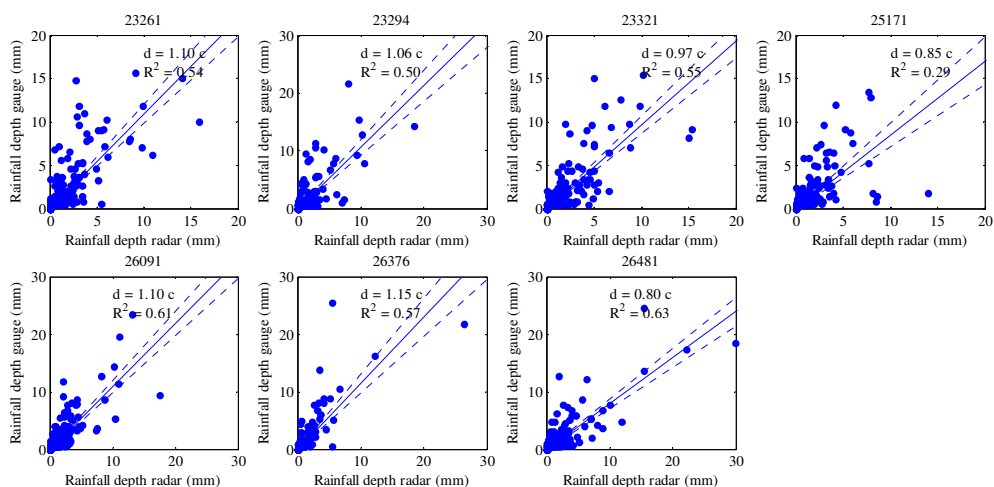


**Figur 5.6.1.b Blåt område: 0- 25 km fra radaren, rødt område: 25-50 km fra radaren, grønt område 50-100 km fra radaren. Sorte punkter: SVK regnmålere anvendt til statisk kalibrering, røde punkter online regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering.**

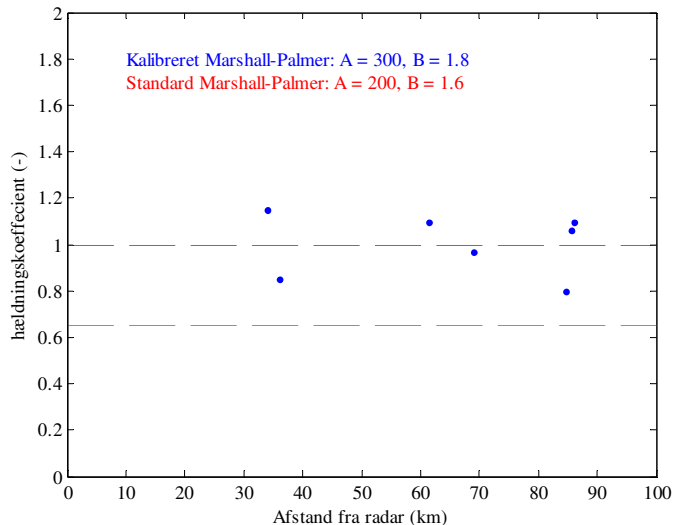
Rømø-radaren er placeret i et område uden nogle SVK-regnmålere tæt på radaren, dog er der syv i alt inden for en 100 km radius, jf. figur 5.6.1.b og tabel 5.6.1.b.

Radaren er som udgangspunkt kalibreret ud fra standard Marshal-Palmer konstanter, jf. 5.6.1.d, men på baggrund af de lineære regressioner mellem regnmålere og regnmålere i perioden 26. maj 2009 – 1. maj 2010 (Figur 5.6.1.c) er det fundet nødvendigt at justere på Marshal-Palmer konstanterne, således at middelværdien af regressionslinie-hældningerne bestemmes til 1. I den første del af projektperioden har standard-konstanterne været anvendt, og den dynamiske kalibrering har derfor været anvendt til at justere niveauerne på plads.

I tabel 5.6.1.b er de akkumulerede regndybder for hhv. radar og regnmålere angivet. Værdierne kan dog ikke umiddelbart sammenlignes med årsnedbøren, da der har været perioder, hvor enten regnmålere eller radar har været ude af drift. De akkumulerede mængder er et udtryk for de perioder, hvor alt har virket tilfredsstillende.



Figur 5.6.1.c Lineær regression mellem regnmålere og radar på hændelsesniveau



Figur 5.6.1.d Statisk kalibrering af Rømø-radar. Den stiplede blå linje angiver midelværdien af hældningskoefficienterne fundet ved ovenstående lineære regressioner og approximerede Marshall-Palmer konstanter, mens den røde stiplede linje angiver midelværdien fundet ved standard Marshall-Palmer konstanter.

På trods af at der kun findes syv regnmålere inden for 100 km radiussen vurderes den statiske kalibrering som forholdsvis valid, da den fundne marshall-Palmer konstanter ligger forholdsvis tæt på standard-værdierne.



**Tabel 5.6.1.b Opsummering af statisk kalibrering og anvendte SVK-regnmålere**

Regnmåler	SVK må- ler nr.	Afstand til radar (km)	Regnmåler totalsum (mm)	Radar totalsum (mm)
Vejle Centralrenseanlæg	23261	86.1	455.3	346.0
Fredericia Centralrenseanlæg	23294	85.6	307.6	249.0
Kolding Forrenseanlæg	23321	69.1	355.6	330.4
Esbjerg Renseanlæg Vest	25171	36.1	283.8	253.5
Haderslev Renseanlæg	26091	61.5	375.2	312.3
Tønder Centralrenseanlæg	26376	33.9	260.0	180.9
Sønderborg Vandværk	26481	84.7	330.8	350.7
Middel			338.3	289.0

## 5.6.2

### Dynamisk kalibrering og hændelseeksempler

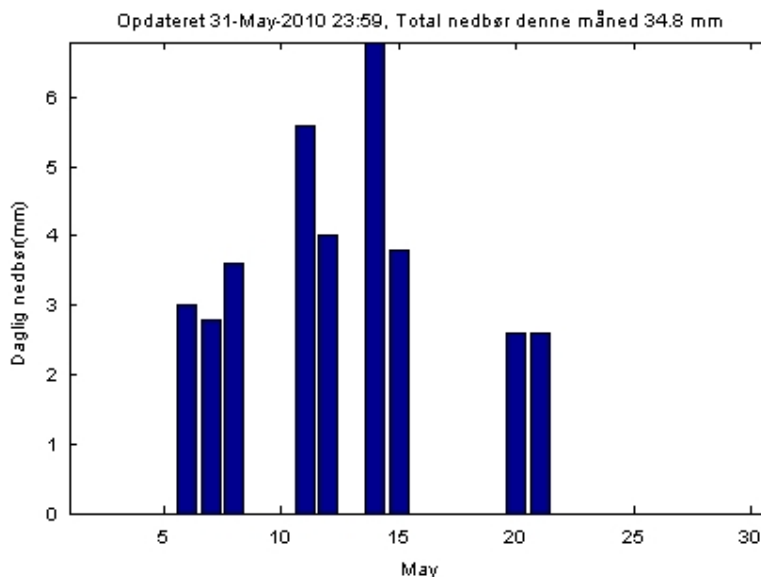
Rønmø-radaren er kalibreret dynamisk ved hjælp af tre af Aalborg Universitets online regnmålere, figur 5.6.1.b, tabel 5.6.2.a og figur 5.6.2.a. Data fra disse regnmålere lægges kontinuert på internettet, både som intensitetsplots samt akkumulerede daglige værdier, som fx vist på figur 5.6.2.b.

**Tabel 5.6.2.a Online regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering**

Regnmåler	AAU måler nr.	Kommunikation
Skærbæk renseanlæg	22	3G, direkte AAU
Døstrup pumpestation	29	3G, direkte AAU
Tønder renseanlæg	28	3G, direkte AAU



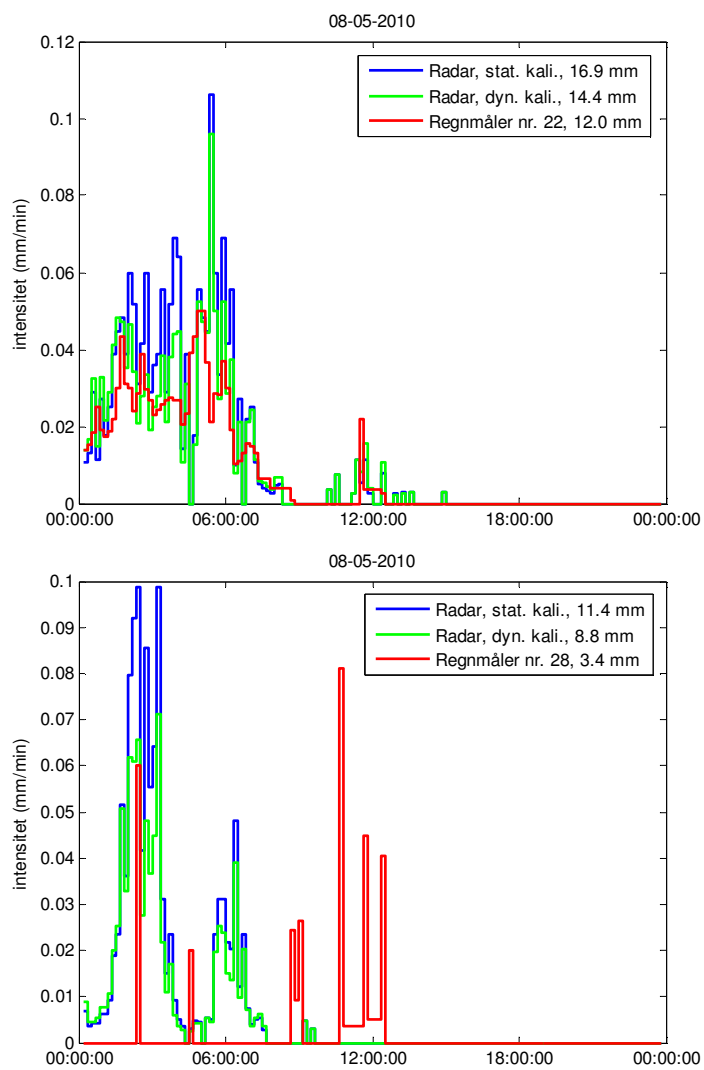
Figur 5.6.2.a AAU-regnmåler 28 opstillet ved siden af SVK-måler 26376 på Tønder centralrenseanlæg.



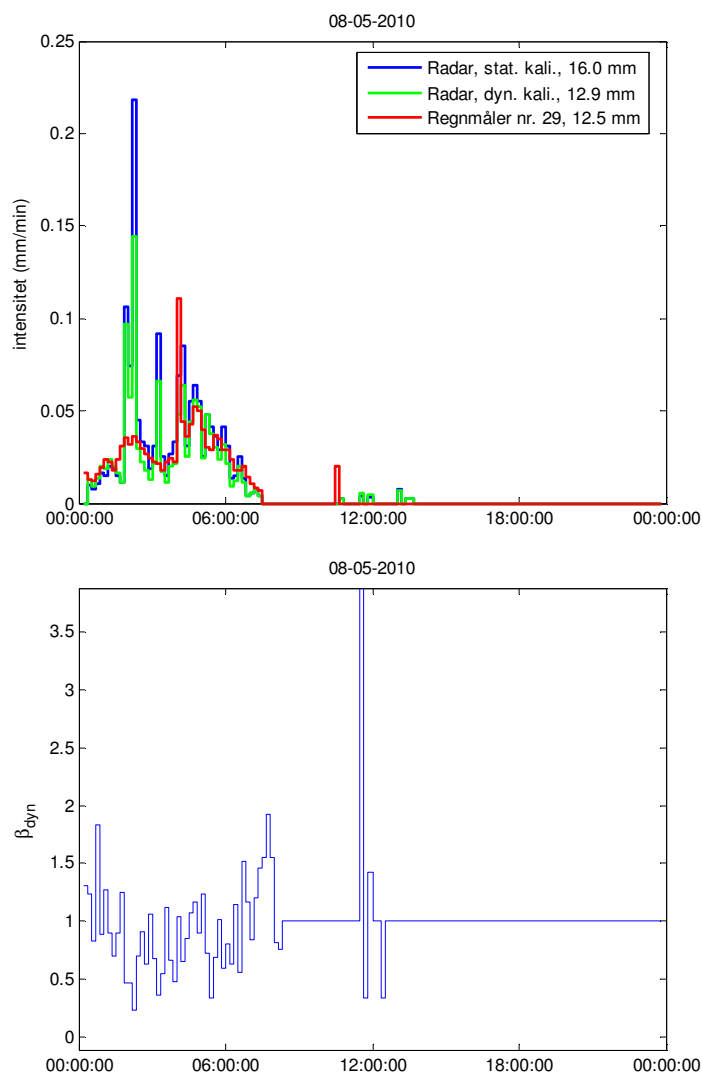
**Figur 5.6.2.b** Eksempel på ”online” plot af daglige akkumulerede nedbørmængder fra maj 2010, regnmåler 28.

Det er valgt at vise to hændelseseksempler på den dynamiske og statiske kalibrering, Den første hændelse, fra den 8. maj 2010, er vist på figur 5.6.2.c og figur 5.6.2.d og et eksempel på regnprognosen samme dag er vist på figur 5.6.2.e og valideret på figur 5.6.2.f.

Som det kan aflæses på figurene er der i regnmåler 22 og 29 (Døstrup og Skærbæk) registreret omtrent den samme nedbørmængde. Umiddelbart overestimerer radaren nedbøren en smule, men bliver justeret ”på plads” af den dynamiske kalibrering. I regnmåler 28 (Tønder) er registreret væsentligt mindre regn 3.4 mm, men ifølge radaren er der faldet 11.4 mm. Som det kan ses på figur 5.6.2.e er regnfronten afgrænset lige omkring Tønder og idet radaren måler over et langt større område ( $2 \times 2$  km) end regnmåleren ( $200 \text{ m}^2$ ) er dette et eksempel på en distribueret regnhændelse hvor skalaeffekten mellem regnmåler og radar er tydelig. Til sammenligning er der i SVK-regnmåler 26376 som er opstillet få meter fra regnmåler 28 ikke registreret nedbør den pågældende dag.

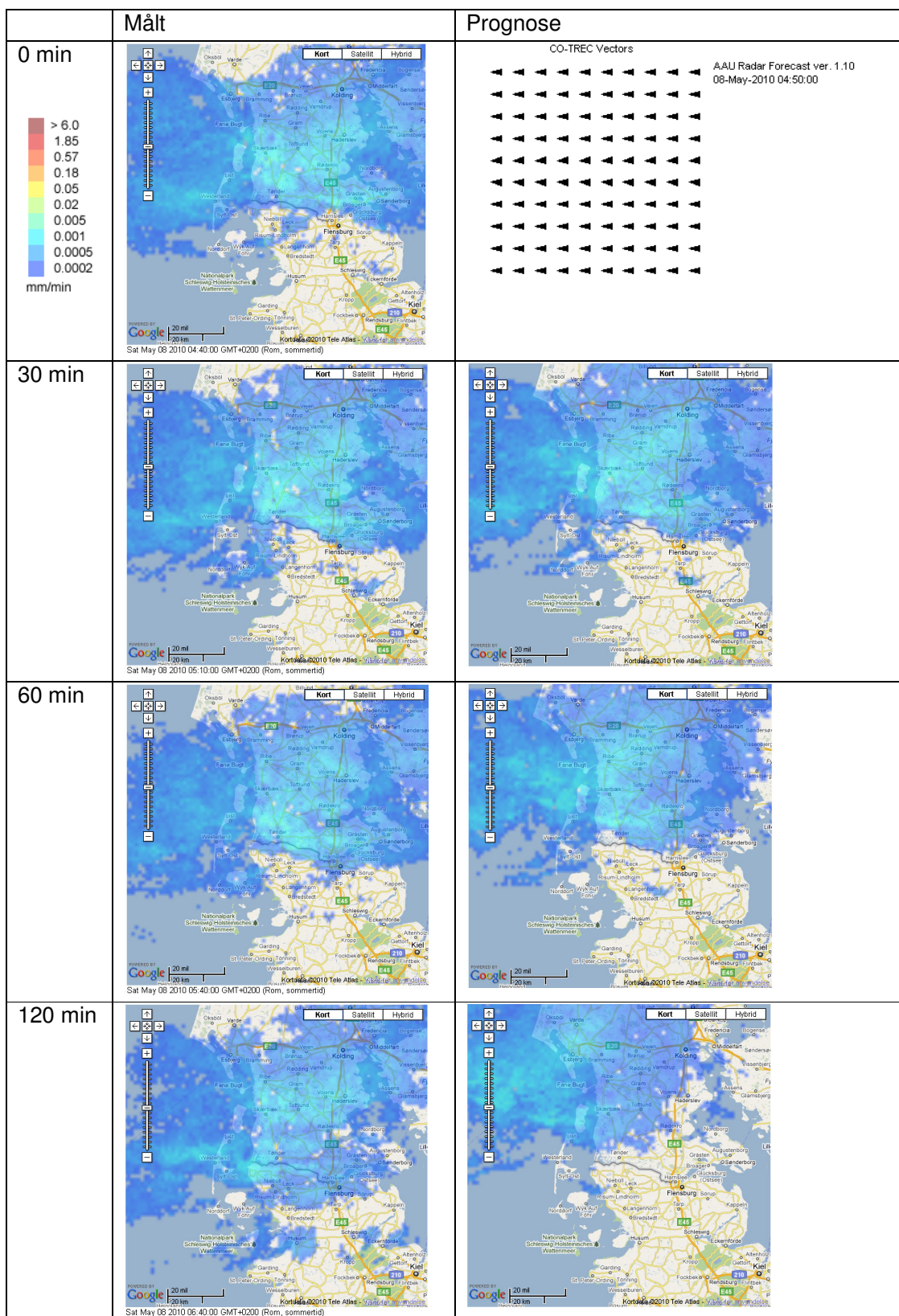


**Figur 5.6.2.c** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Rømø-radaren den 8. maj 2010.



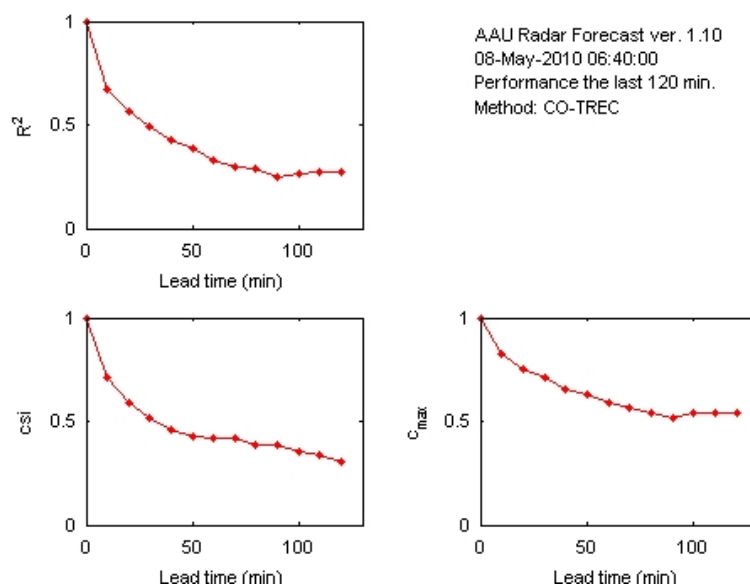
**Figur 5.6.2.d** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Rømø-radaren den 8. maj 2010. nederste diagram viser den dynamiske kalibreringsfaktor.

Regnprognosen fra den 8. maj 2010 viser en front der bevæger sig fra øst mod vest og som det også er tilfældet ved de andre C-bånds radarer ser prognosen fornuftig ud ca. en time frem i tiden. Herefter er den kvantitative bestemmelse af nedbørsintensiteterne mere usikker. Som det kan ses på figur 5.6.2.e "går" regnen lidt sydligere end prognosticeret.



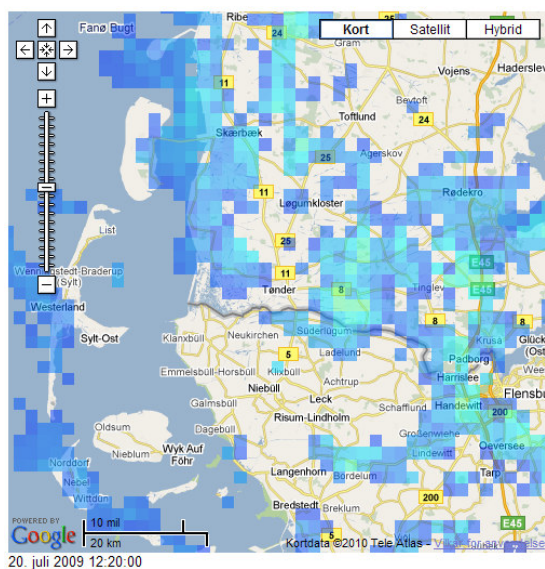
Figur 5.6.2.e Målt og prognosticeret regn den 8. maj 2010 kl 04.50



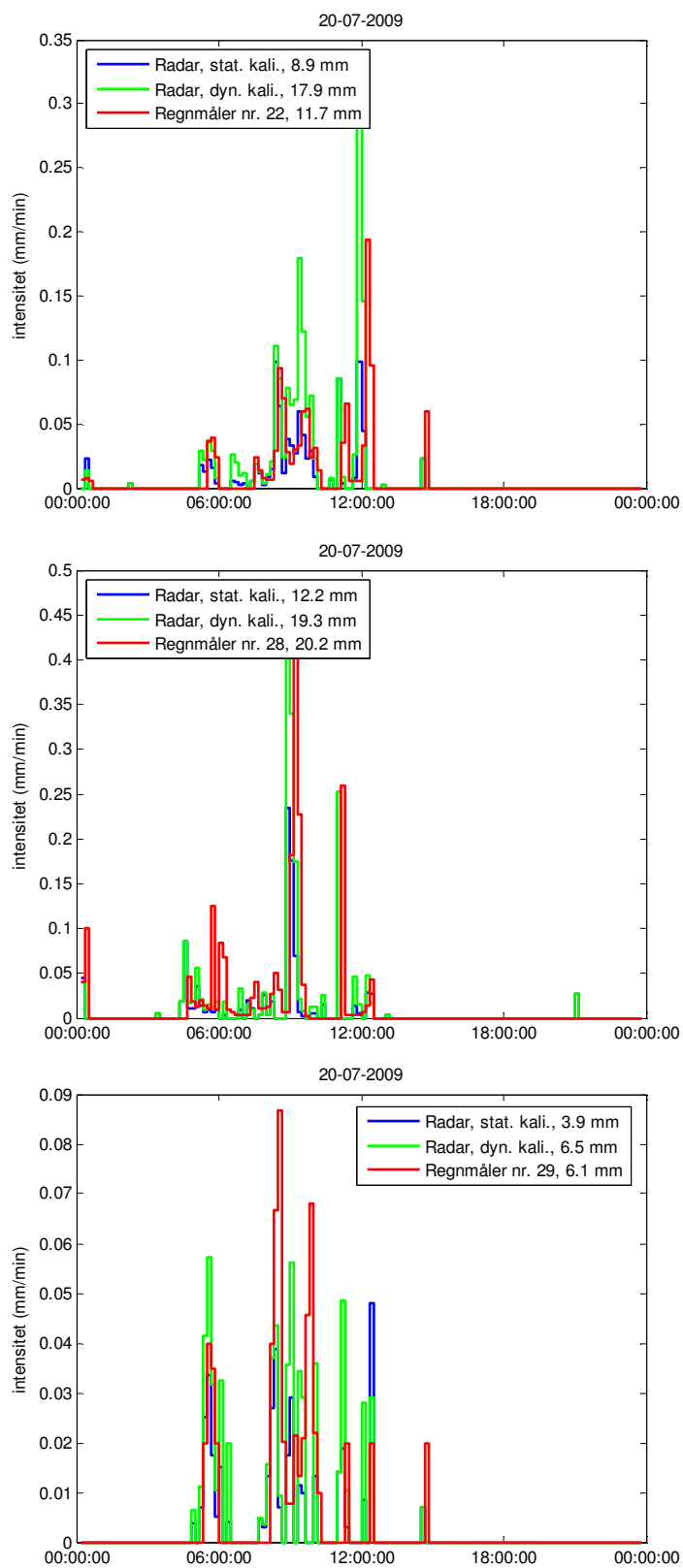


Figur 5.6.2.f Validering af regnprognosen den 4. april 2010 kl. 06.40

Det andet eksempel viser en hændelse fra den 20. juli 2009. Dette er ligeledes en ret distribueret regnhændelse, hvor der i Tønder er registreret dobbelt så meget regn som i Skærbæk, 30 km nordligere. På grund af at hændelsen er meget distribueret og den dynamiske kalibrering laver en midling af de tre regnmålere, betyder det at den dynamiske kalibrering overestimerer regnen i Skærbæk i dette tilfælde. Et eksempel på den distribuerede regn kan ses på figur 5.6.2.g.



Figur 5.6.2.g Eksempel på distribueret regn, den 20. juli 2009, kl. 12.20



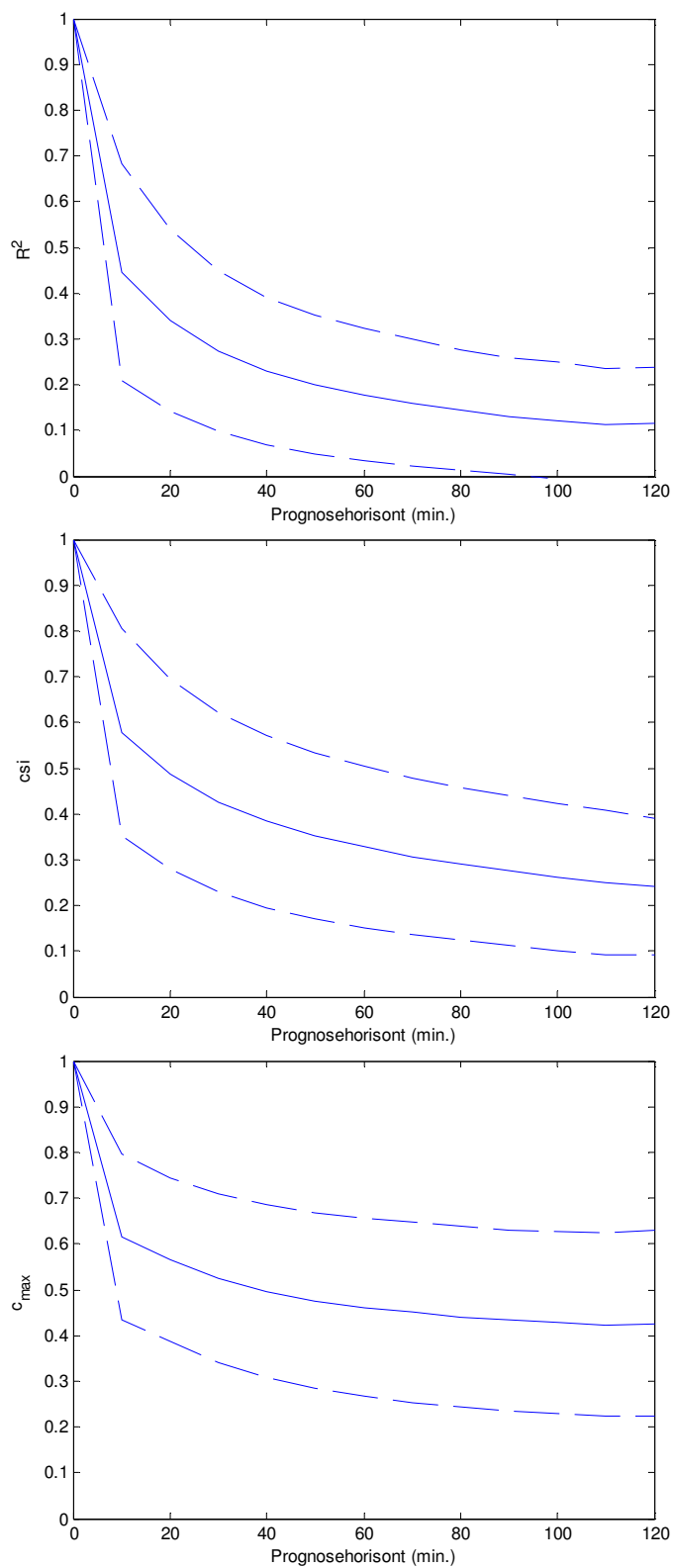
Figur 5.6.2.h Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Rømø-radaren den 20. juli 2009

### 5.6.3

#### **Prognosevalidering**

På figur 5.6.3.a er de tre valideringsparametre afbilledet som funktion af prognosehorisonten på baggrund af regnvejrdata i perioden 26. maj 2009 – 1. maj 2010. Anskuer man prognosen for hele perioden ser prognosen for Rømø-radaren ser fornuftig ud ca. 1 times horisont. Herefter bliver prognosen noget usikker og den kvantitative fastsættelse af nedbørsintensiteten er usikker. Dog er det muligt med nogen sikkerhed at fastlægge om der kommer regn eller ej, jf. forholdsvis høje værdier af CSI-indekset.





**Figur 5.6.3.a** Validering af regnprognosen foretaget med Rømø-radaren baseret på regnvejrdata i perioden 26. maj 2009 til 1. maj 2010. De fuldtoptrukne linier angiver middelværdien og de stiplede plus-minus en gange spredningen.

## 5.6.4

**Opbygning af afstrømningsmodel og resultater**

Modellen er opbygget så den simulerer tilstrømningen til renselanlægget fra Skærbæk og omegn. Pumperne, der pumper ind på renselanlægget, har en maksimal ydelse på ca. 600 m<sup>3</sup>/h, hvilket er indbygget i modellen.

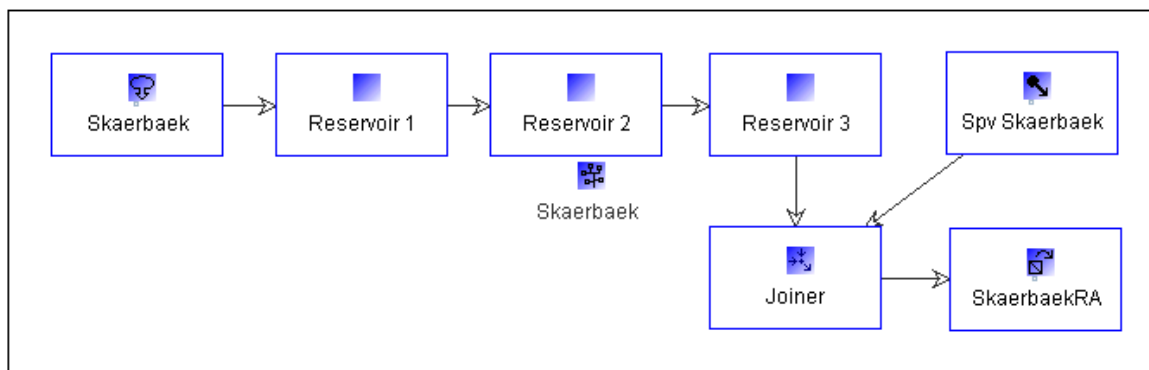
Selvom oplandet til Skærbæk renselanlæg er spredt i og udenfor Skærbæk, er oplandet samlet som et enkelt delopland i modellen, se figur 5.6.4.a. Desuden fremgår placeringen af deloplandet i forhold til radargridet fra DMI radaren på Rømø.

En oversigt over WaterAspects modellen ses i figur 5.6.4.b. Som kalibrering er anvendt historiske data for indpumpningen til renselanlægget, hvorfor modellen er kalibreret imod disse.



Figur 5.6.4.a

Oplandet for Skærbæk (rødt område) i forhold til grid fra DMI radaren (grøn cirkel) på Rømø. Rød cirkel er Skærbæk renselanlæg (baggrundskort fra Google Earth).

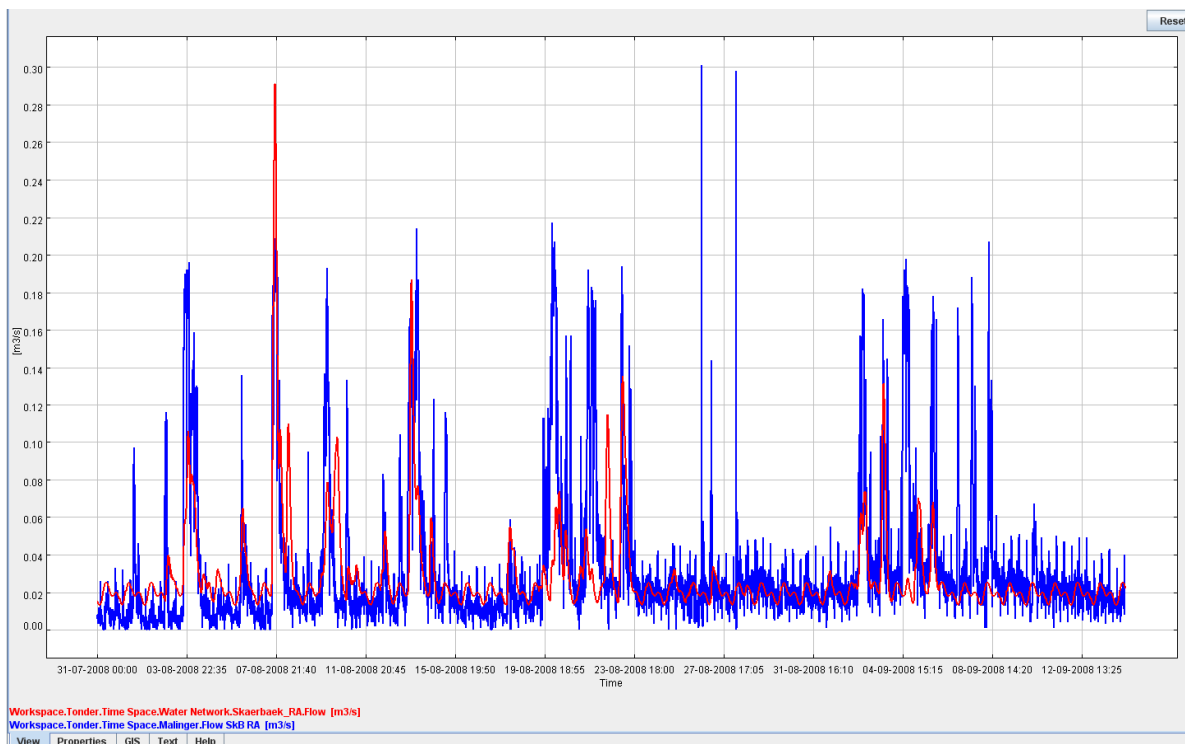


Figur 5.6.4.b

Oversigt over WaterAspects modellen for Skærbæk.

## Kalibrering

Modellen er kalibreret ud fra historiske måledata for tilløb til renseanlægget, for august måned 2008. Figur 5.6.4.c viser den målte og modellerede tilstrømning til renseanlægget i kalibreringsperioden.



**Figur 5.6.4.c**  
Målt og modelleret indløb til renseanlægget. Den blå linje repræsenterer det målte.

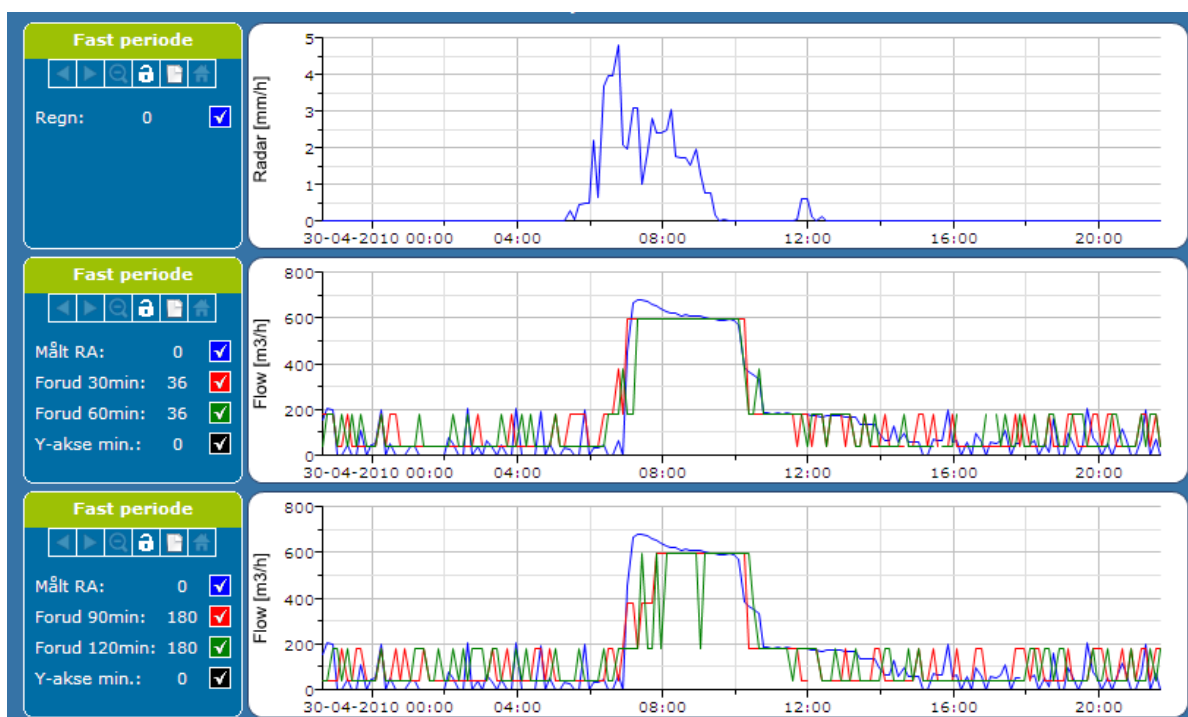
## Systemet i brug

30. marts 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelse den 30. marts 2010 i Tønder. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte er de korte afstrømningsprognoser rigtig gode. Både hvad angår tidspunkt for peak, afstrømningens varighed og for højt flowet blev. Se figur 5.6.4.d.

For de lange afstrømningsprognoser (90 og 120 min) forudsiges regnafstrømningen ca. 20 min senere, end det reelt blev tilfældet. Se figur 5.6.4.d.



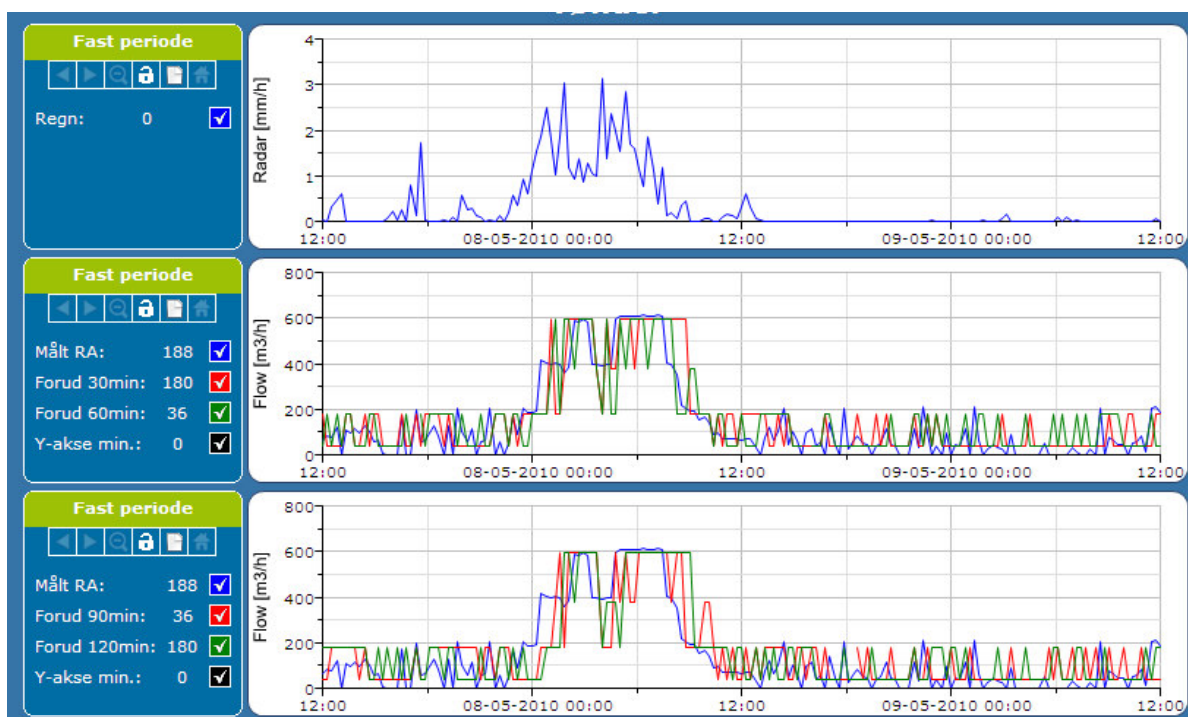
**Figur 5.6.4.d**  
STAR brugerfladen fra 30. marts 2010 i Tønder.

8. maj 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelse den 8. maj 2010 i Tønder. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel. se figur 5.6.4.e.

Af det målte indpumpningsflow kan det ses, at indpumpningen øges til ca. 400 m<sup>3</sup>/h omkring kl. 00:30, og øges til maksimum ca. 600 m<sup>3</sup>/h omkring to timer senere.

Både de korte og de lange afstrømningsprognoser har prognosticeret den maksimale regnafstrømning til at starte midt i det ovennævnte tidsinterval. Varigheden af regnafstrømningen stemmer godt overens med det målte. Se figur 5.6.4.e.



**Figur 5.6.4.e**  
STAR brugerfladen fra 8. maj 2010 i Tønder.

### 5.6.5

#### Vurdering og perspektiver

Oplandet til Skærbæk renseanlæg ligger helt perfekt i forhold til at prognosticere regn med Rømhø radaren, da radaren kan "se" langt mod Vest hvor størstedelen af regnen kommer fra.

På trods af få SVK-regnmålere i området vurderes den statiske kalibrering af radaren som valid. Den dynamiske kalibrering har også fungeret tilfredsstillende, bort set fra den ene regnmåler (nr. 28) placeret på Tønder renseanlæg, som har haft en del udfald pga. dårlig 3G forbindelse.

Da afstrømningstiden i kloaksystemet ikke er særlig lang er radarprognose omtrent den eneste måde hvorpå styring af afløbssystemet kan være på forkant med regnhændelserne. Flowprognoserne har desuden vist sig at passe godt sammen med de reelt målte flow ved Skærbæk Renseanlæg. En eventuel fremtidig styring af pumpestationer/renseanlæg kunne således have stor gavn af input fra det etablerede prognosesystem.

## 5.7

**Århus**

Det valgte prognose punkt i Århus afløbssystem er flow i Jægergaardsgade pumpestationen, der modtager al afstrømning fra den nordlige del af oplandet til Marselisborg renseanlæg. En prognose i dette punkt kan bidrage til en optimeret af fyldning og tømning af nogle af de store bassiner i oplandet og give mulighed for en tidligere opstart af regnstyringen på Marselisborg renseanlæg. Begge dele ville reducere antallet og mængden af aflastninger til badevandsområdet ud for Århus.



**Figur 5.7.a**  
Den røde nål angiver placeringen af Jægergaardsgades pumpestation.

## 5.7.1

**Radaropsætning og resultater**

Til regnprognosen for Århus anvendes DMI's vejrradar placeret i Virring, ca. 15 km fra Århus. Første fase af nærværende projekt blev gennemført med Århus Kommunes egen X-bånd's radar, men da den blev flyttet til en anden lokalitet i starten af projektperioden, er det valgt at gennemføre projektet med data fra DMI's radar i Virring i stedet, for at undgå at skulle skift af radar i løbet af projektet.

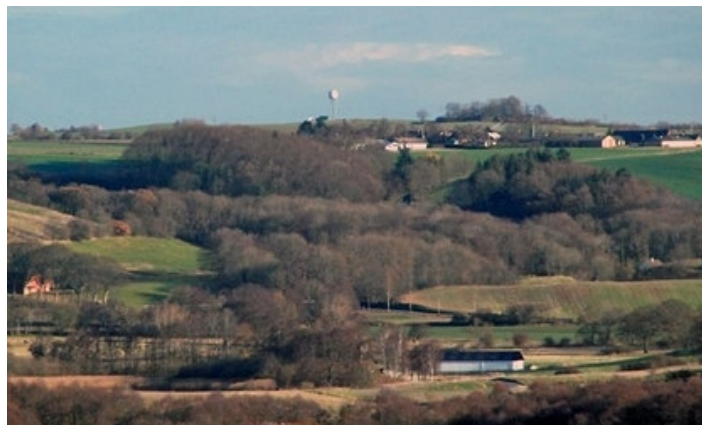
**Table 5.7.1.a** Specifikationer for Virring-radaren

Frekvens	5.625 GHz
Bølgelængde	5.0 cm
Udgangseffekt	250 kW

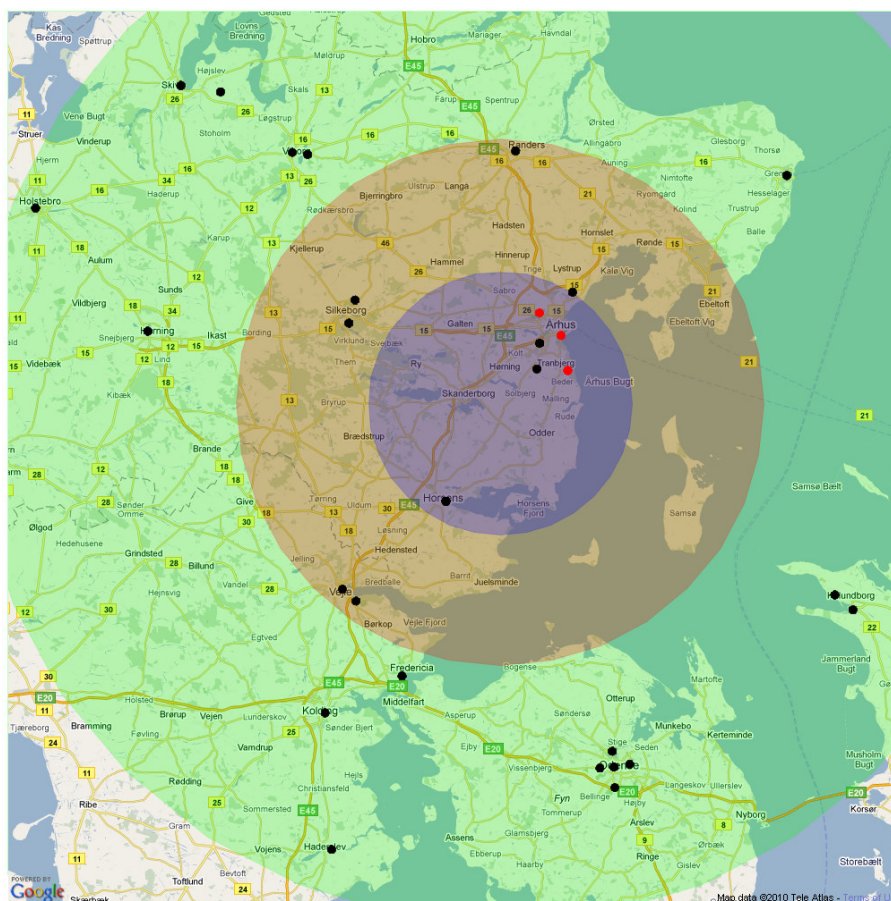


Rækkevidde	240 km (100 km kvantitativt)
Stedsopløsning	2000 x 2000 m
Tidsopløsning	10 min
Vertikale skanningsvinkler*	0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.4, 4.5, 8.5, 13.0, 15.0
Ejer	Dansk Meteorologisk Institut
Driftsansvarlig	Dansk Meteorologisk Institut
Fabrikat	Ericsson/ECC
Placering	Virring
Koordinat	UTM Zone 32 (N 6.209.225, E 563.861)
Datakommunikation	FTP til DMI-server
Driftstid i projektet	27. maj 2009 – 1. juni. 2010
Nedetid	29.0

\* DMI's radar skanner i flere vertikale vinkler modsat de lokale radarer som skanner med én vertikal vinkel. DMI's data repræsenterer derfor et volumen af atmosfæren. Dette volumen opdeles i et antal såkaldte cappilag, og de data der anvendes i dette projekt er et udtræk af det nederste cappilag (tættest ved jordoverfladen)



**Figur 5.7.1.a Virring radaren (Lokalavisen Skanderborg 2008)**

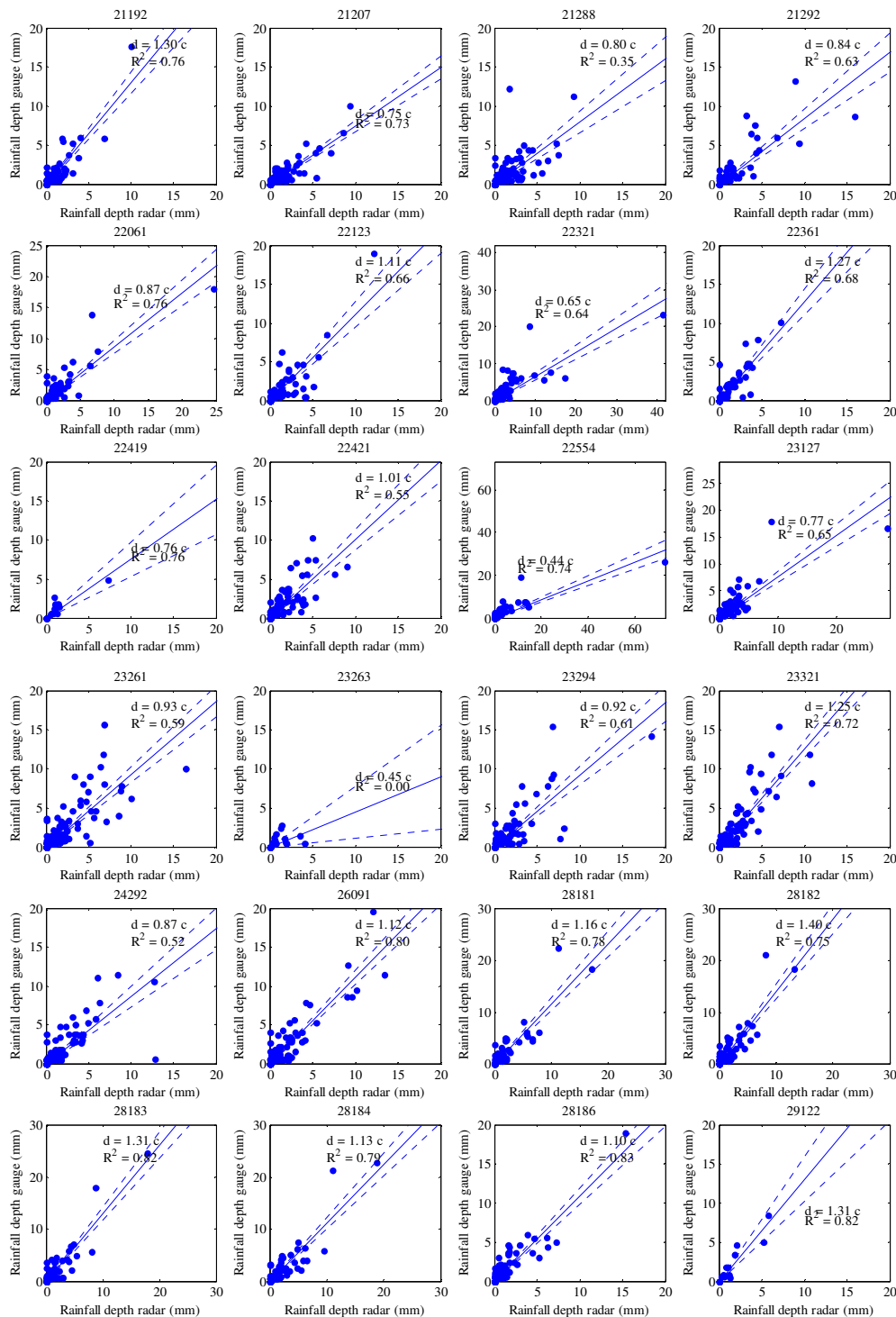


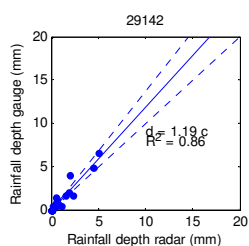
**Figur 5.7.1.b** Blåt område: 0- 25 km fra radaren, rødt område: 25-50 km fra radaren, grønt område 50-100 km fra radaren. Sorte punkter: SVK regnmålere anvendt til statistisk kalibrering, røde punkter online regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering.

Virring-radarens placering syd for Århus egner sig perfekt til måling og prognosticering af regn over Århus by. Inden for den 100 km radius som DMI anbefaler som størsteradius for kvantitativ måling er der placeret 25 SVK-regnmålere, figur 5.7.1.b og tabel 5.7.1.b.

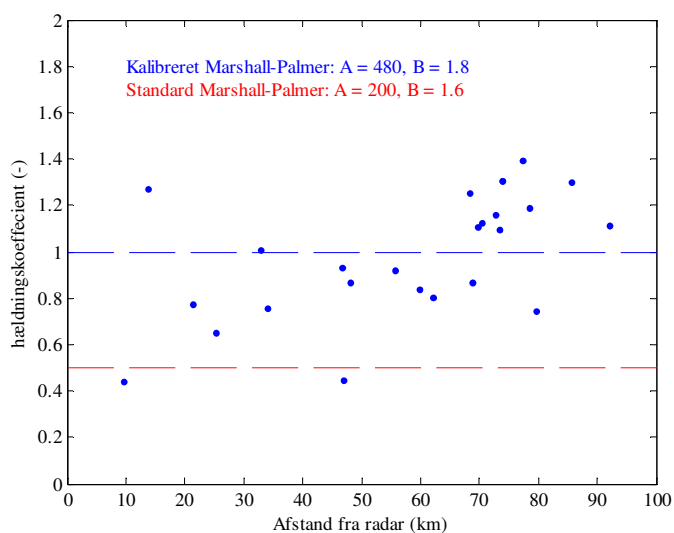
Som udgangspunkt er radaren kalibreret efter standard-Marshall-Palmer konstanter, men for at få forholdet mellem radar og de 25 regnmålere til at passe bedre, har det været nødvendigt at justere lidt på disse værdier. Resultaterne af dette ses i figur 5.7.1.c, hvor der er lineære sammenhænge mellem radar og regnmålere er fundet på baggrund af data fra perioden 27. maj 2009 – 1 maj 2010. Optegnes disse lineære hældningskoefficienter som funktion af afstanden fra radaren, fås figur 5.7.1.d. Her er der som forventet ingen sammenhæng mellem afstand fra radaren og hældningskoefficienterne.







Figur 5.7.1.c Lineær regression mellem regnmålere og radar på hændelsesniveau



Figur 5.7.1.d Kalibrering af Verring-radar. Den stiplede blå linie angiver middelværdien af hældningskoefficienterne fundet ved ovenstående lineære regressioner og approksimerede Marshall-Palmer konstanter, mens den røde stiplede linie angiver middelværdien fundet ved standard Marshall-Palmer konstanter.

Tabel 5.7.1.b Opsummering af statistisk kalibrering og anvendte SVK-regnmålere.

Regnmåler	SVK må- ler nr.	Afstand til radar (km)	Regnmåler totalsum (mm)	Radar totalsum (mm)
Skive Renseanlæg	21192	85.6	113.2	91.0
Skive Lufthavn	21207	79.5	106.4	139.2
Viborg Materielgård	21288	62.0	143.8	149.1
Viborg Hedeselskabet	21292	59.9	120.8	117.0
Randers Centralrenseanlæg	22061	48.1	134.0	117.3
Grenå Ådalen	22123	69.6	110.6	100.7
Egå Renseanlæg	22321	25.3	213.8	223.9
Viby J. Renseanlæg	22361	13.8	98.2	72.7
Silkeborg Forsyningsafdeling	22419	34.0	17.4	17.5
Silkeborg Vandværk	22421	32.7	156.2	132.4
Trankær Renseanlæg	22554	9.6	204.6	254.4
Horsens Centralrenseanlæg	23127	21.4	157.6	156.3
Vejle Centralrenseanlæg	23261	46.8	271.2	250.1
Vejle Pumpestation	23263	46.9	14.6	19.7
Fredericia Centralrenseanlæg	23294	55.7	171.8	157.2

Kolding Forrenseanlæg	23321	68.4	254.6	199.1
Herning Centralrenseanlæg	24292	68.7	164.4	148.5
Haderslev Renseanlæg	26091	92.0	214.6	177.3
Bolbro Højdebeholder	28181	72.8	156.4	127.7
Dalum Vandværk	28182	77.2	181.4	122.3
Ejby Mølle Renseanlæg	28183	73.8	153.2	112.4
Odense Nv Renseanlæg	28184	70.3	168.2	151.5
Odense Vandværk	28186	73.3	126.6	100.1
Sønder Nyrup Renseanlæg	29122	74.0	28.2	20.7
Kalundborg Centralrenseanlæg	29142	78.4	26.6	22.0
Middel			141.5	127.2

## 5.7.2

### Dynamisk kalibrering og hændelseseksempler

Som det fremgår på figur 5.7.1.d er der nogen spredning omkring regressionslinierne når man sammenligner radarens observationer med regnmængderne observeret i de enkelte regnmålere. For at gøre nedbørsprædiktionen med radaren så præcis som muligt er det derfor valgt yderligere at kalibrere radaren dynamisk – dvs. løbende justere intensitetsniveauerne på plads ved hjælp af online observationer i regnmålerne. I Århus blev det fra projektets start besluttet at benytte de regnmålere der er beskrevet i tabel 5.7.2.a til den dynamiske kalibrering. Fra projektperiodens start har der dog været problemer dels med kommunikationen til Århus kommunes SRO-system, herefter problemer hos DHI, som skulle opsætte overførslen. Da overførslen blev etableret var der problemer med dataformatet, hvilket alt i alt betyder at der ikke er etableret forbindelse til online data fra Århus før primo juni 2010.

**Tabel 5.7.2.a Online regnmålere anvendt til dynamisk kalibrering**

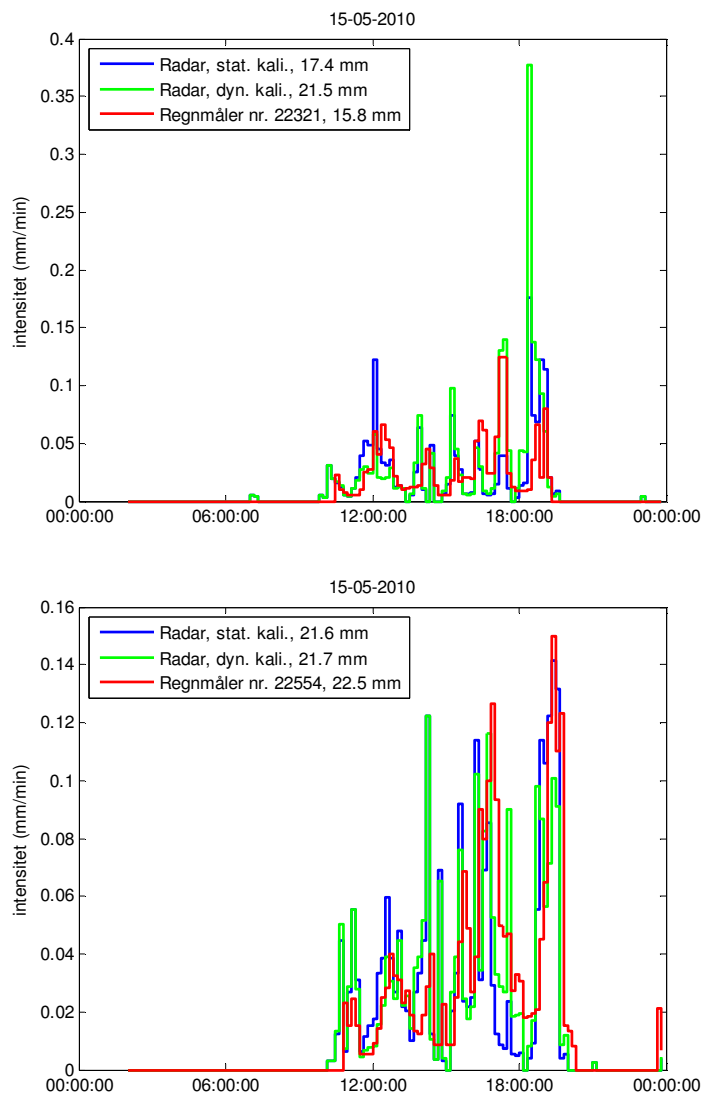
Regnmåler	AAU	SVK	Kommunikation
	Måler nr.	måler nr	
Marselisborg renseanlæg*	400	-	FTP til Århus Kommune
Trankær renseanlæg*	401	22554	FTP til Århus Kommune
Egå renseanlæg*	402	22321	FTP til Århus Kommune

\* Disse har først fungeret i projektet fra 1. juni 2010, og har derfor ikke været anvendt til dynamisk kalibrering.

Da den dynamiske kalibrering ikke har fungeret i realtid er der derfor valgt at simulere dynamisk kalibrering vha. tre af regnmålere koblet på spildevandskomiteens regnmålersystem. To af disse regnmålere er de samme som skulle have været anvendt online og som den tredje anvendes SVK regnmåler 22361, Viby J, renseanlæg.

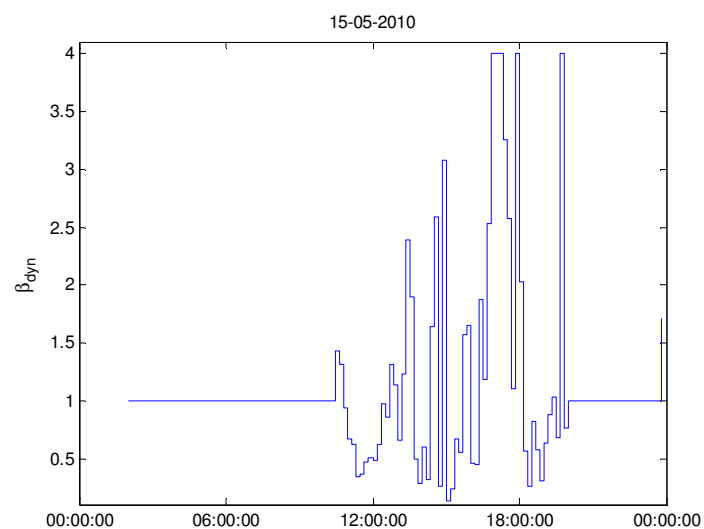
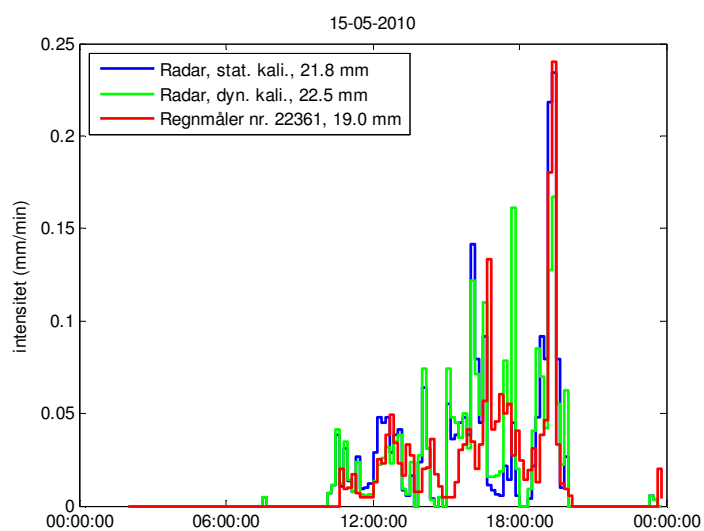
Der vises i det følgende to hændelseseksempler. Den første hændelse er fra den 15. maj 2010 og vises på figur 5.7.2.a og figur 5.7.2.b. Umiddelbart ligger radaren med den statiske kalibrering i dette tilfælde tæt på det der er observeret i regnmålerne. Den dynamiske kalibrering af radaren bevirker at

den akkumulerede regnmængde bliver lidt for stor i forhold til regnmålerne, men intensitetsniveauerne bliver mere realistiske.

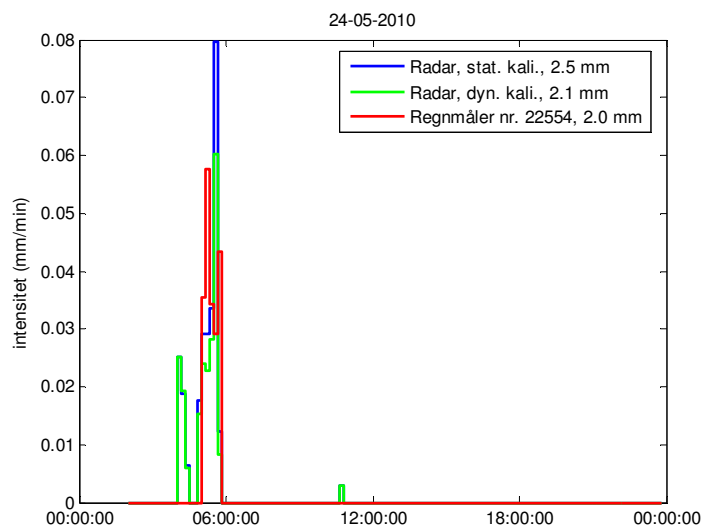
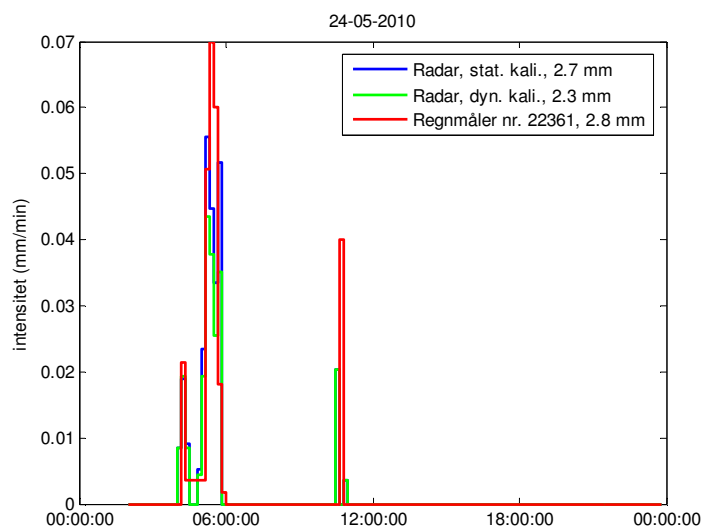


**Figur 5.7.2.a** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Virring radaren den 15. maj 2010. Den dynamiske kalibrering er gennemført off-line.

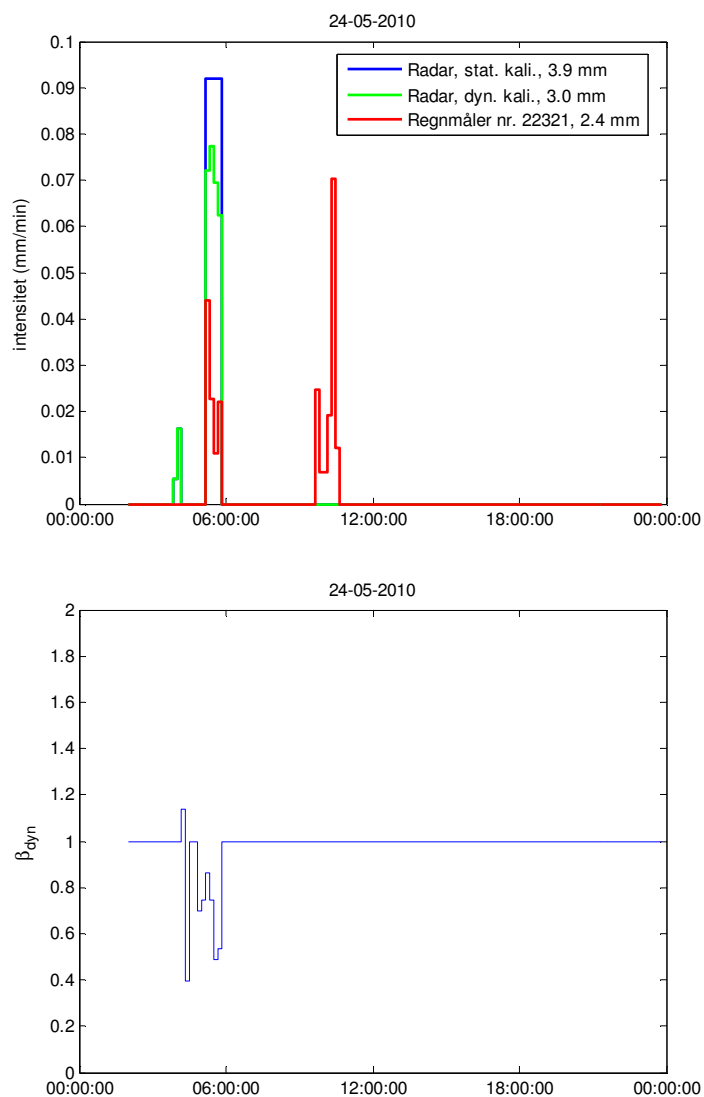
Intensitetskurver for det andet eksempel, fra den 24. maj 2010, er vist på figur 5.7.2.c og figur 5.7.2.d. Dette er en forholdsvis lille hændelse hvad angår regndybde, men dog relativt højintensiv. Regnprognosen, kl. 05.00 for den pågældende hændelse er vist på figur 5.7.2.e og valideret på figur 5.7.2.f. Prognosen er hæderlig ud til ca. 60 min. prognosehorisont, herefter bliver prognosen noget usikker.



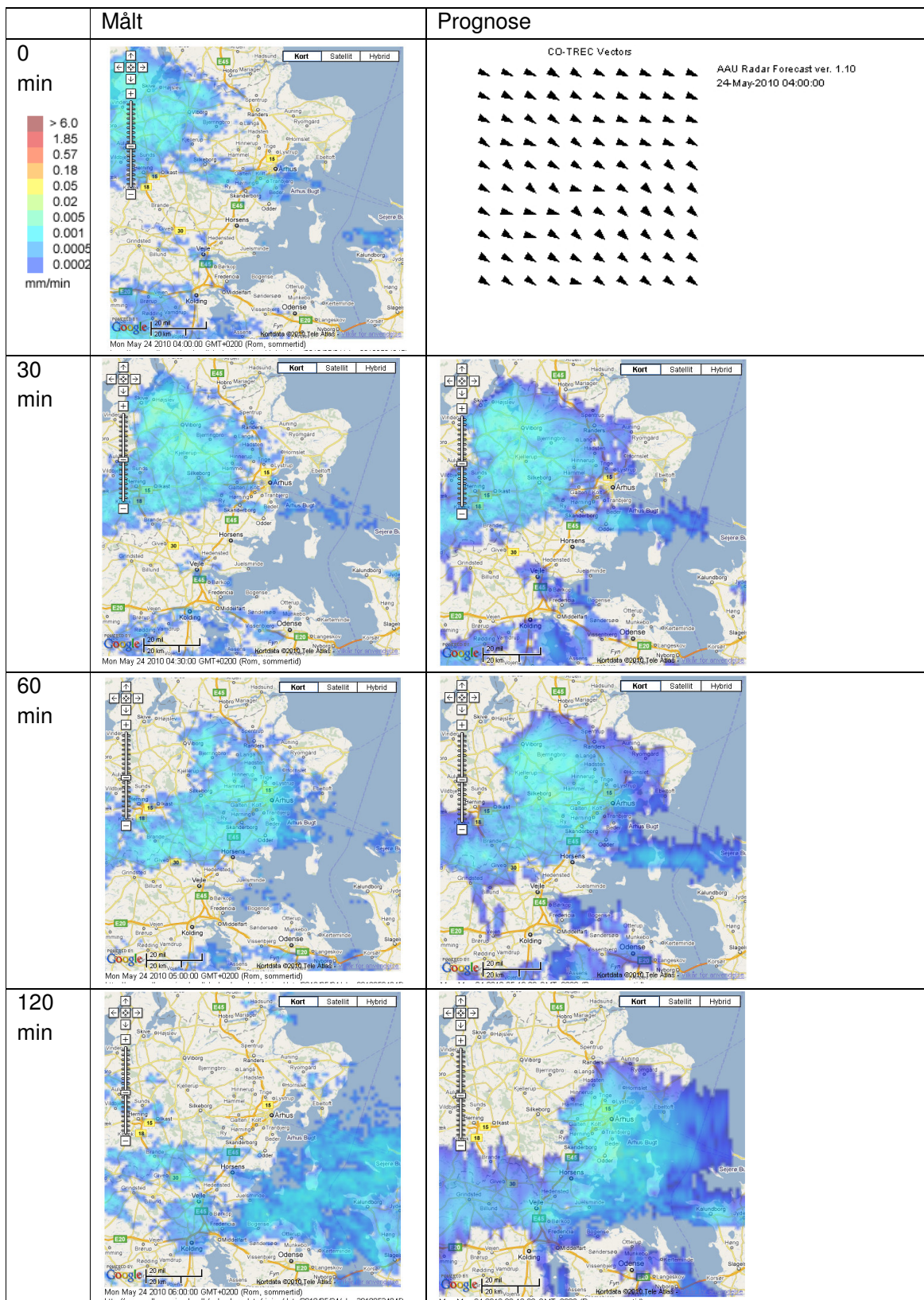
**Figur 5.7.2.b** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Verring radaren den 15. maj 2010. Den dynamiske kalibrering er gennemført off-line. Nederste diagram viser variationen i den dynamiske kalibreringsfaktor.



**Figur 5.7.2.c** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Virring radaren den 24. maj 2010. Den dynamiske kalibrering er gennemført off-line.

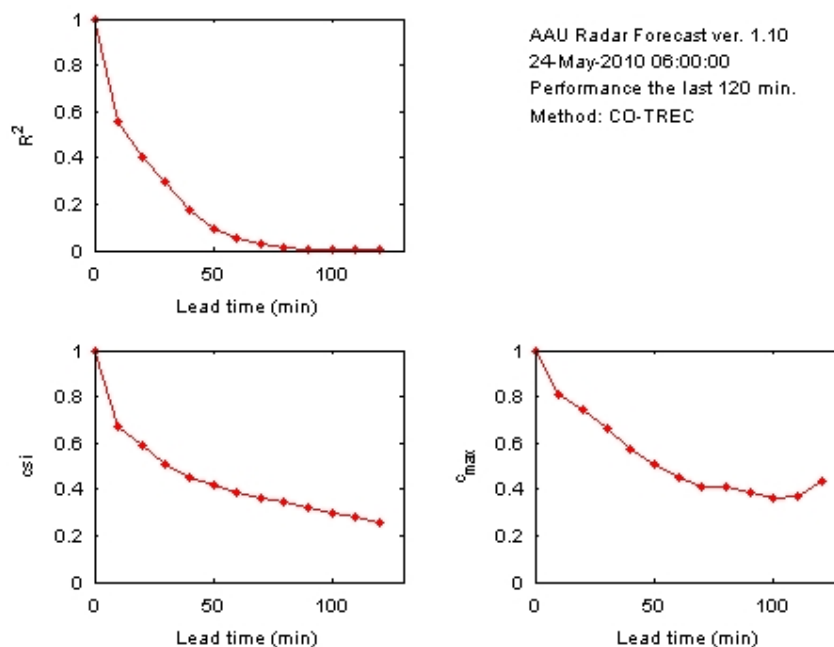


**Figur 5.7.2.d** Eksempel på statisk og dynamisk kalibrering af Virring radaren den 24. maj 2010. Den dynamiske kalibrering er gennemført off-line. Nederste diagram viser variationen i den dynamiske kalibreringsfaktor.





**Figur 5.7.2.e** Målt og prognosticeret nedbør den 24. maj 2010 kl. 06.00. Bemærk tidsstemplet er to timer forskudt ift. Figur 5.7.2.c og figur 5.7.2.d.

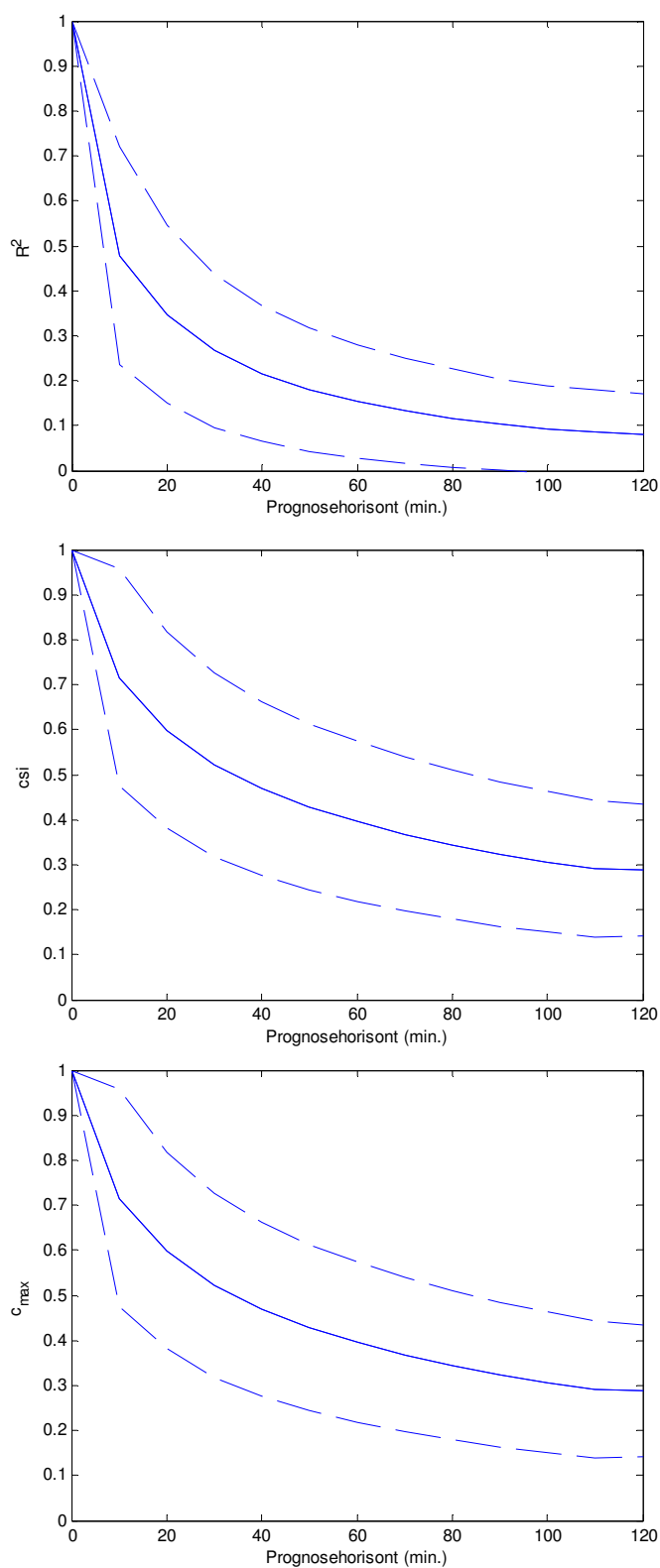


**Figur 5.7.2.f** Validering af regnprognosen den 24. maj 2010 kl. 08.00 Bemærk tidsstemplet er to timer forskudt.

### 5.7.3

#### Prognosevalidering

På figur 5.7.3.a vises en validering af regnprognosen i perioden 27. maj 2009- 1. maj 2010 ud fra de valideringsparametre der er beskrevet i afsnit 4.2. Parametrene er kun baseret på perioder med regn, ca. 840 timers nedbør i alt. Diagrammerne viser, at det i de fleste tilfælde er muligt at lave en kvantitativ forudsigelse af nedbøren med ca. en times prognosehorisont. Ud over en time bliver prognosen noget usikker. Det anbefales derfor at prognosen kun anvendes til bestemmelse af forekomst af regn eller ej i en 60 til 120 min. horisont.



**Figur 5.7.3.a** Validering af regnprognosen baseret på regnvejrdata i perioden 19. maj 2009 – 1 maj 2010. De fuldtoptrukne linier angiver middelværdien og de stiplede plus-minus en gange spredningen.

## 5.8

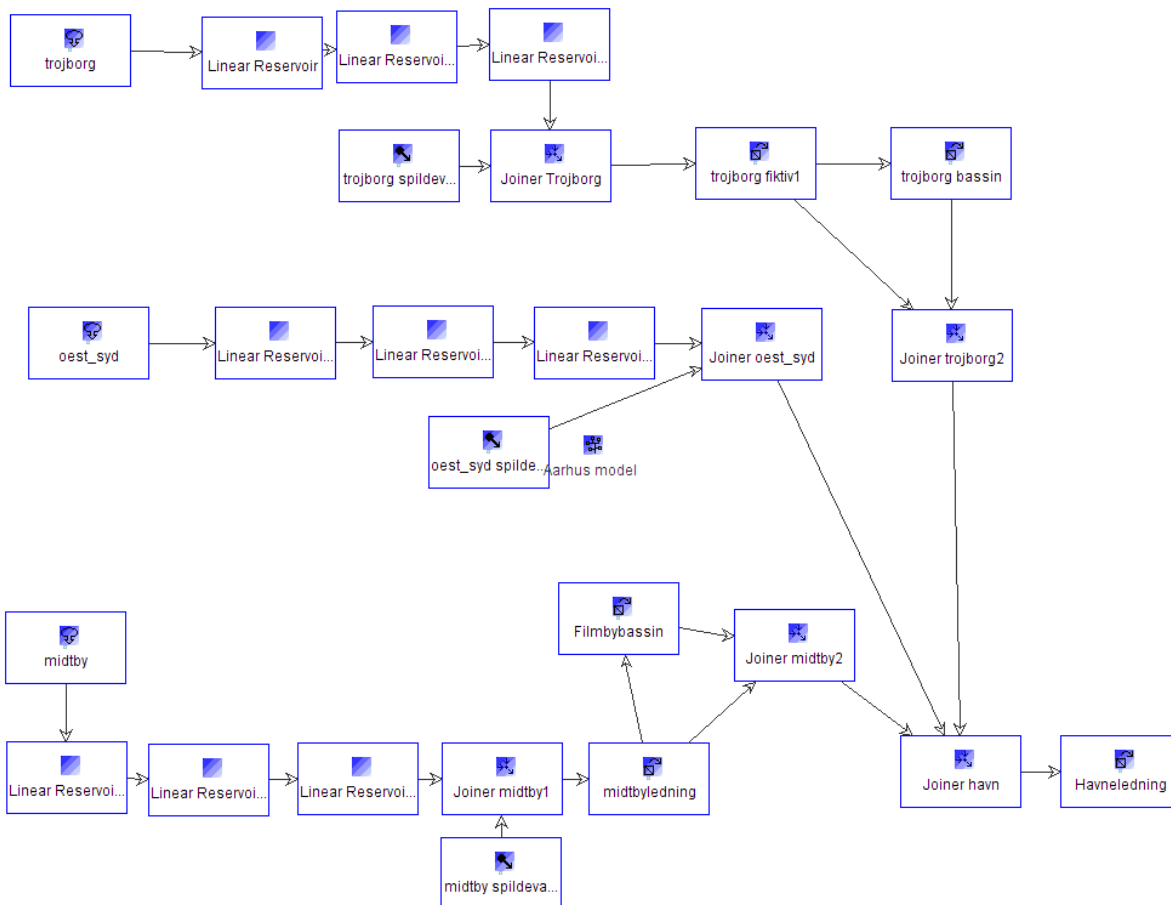
**Opbygning af afstrømningsmodel og resultater**

Aarhus modellen er bygget op omkring de tre oplande Midtby, Trøjborg og Øst/Syd, se figur 5.8.a. Afstrømningen fra alle tre oplande samles i bassinledningen *Havneledningen*. Jægergårdsgade Pumpestation (JGP) pumper fra denne ledning, og det er dette flow der er den primære parameter for Aarhus. Derudover er der to sekundære parametre i niveauerne i de to opsamlingsbassiner *Filmbybassinet* og *Trøjborgbassinet*, der ved spjældstyring opsamler afstrømning fra henholdsvis Midtbyen og Trøjborg. En oversigt over WaterAspects modellen kan ses i figur 5.8.b.



Figur 5.8.a

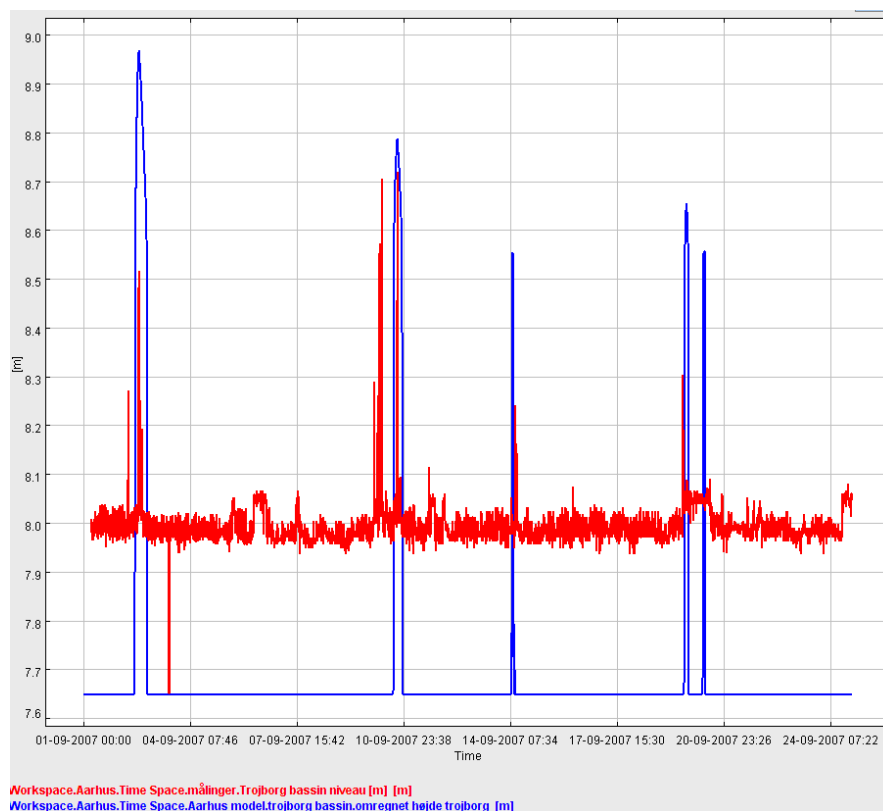
De tre oplande i Aarhus med angivelse af prognosepunkt (rød). Desuden fremgår radar (grøn) og radarens grid (baggrundskort fra Google Earth).



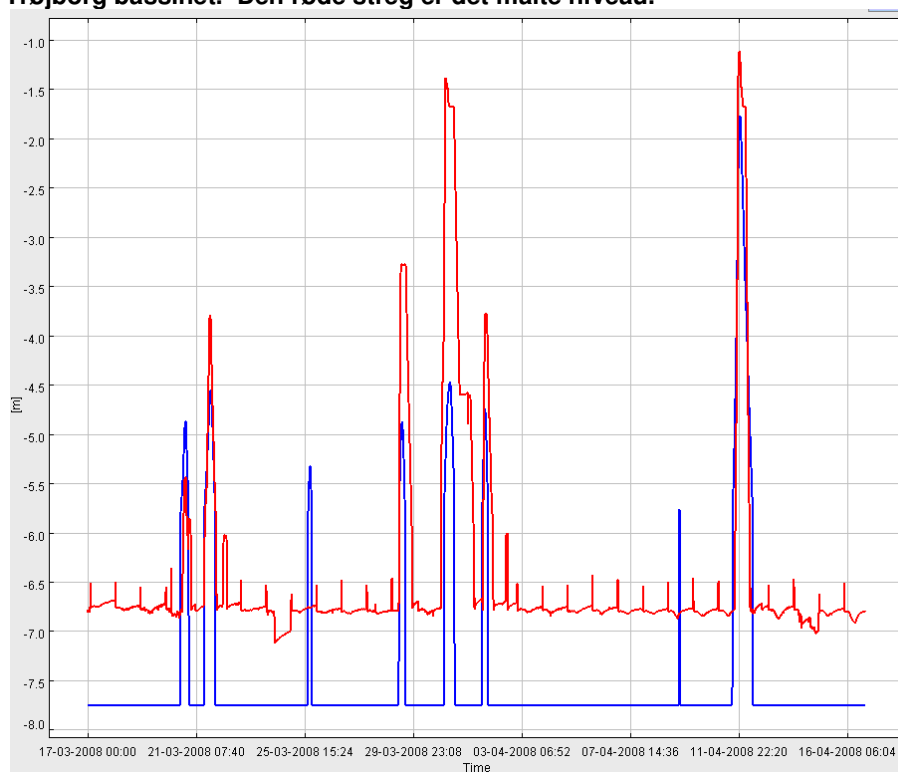
**Figur 5.8.b**  
Oversigt over WaterAspects modellen for Aarhus.

### Kalibrering

For alle de vigtigste punkter i systemet har der været historiske måledata til rådighed i form af flowmålinger eller niveaumålinger, eller begge dele. Kalibreringen er udført ud fra data for september måned 2007. De to nedestående figurer viser den kalibrerede model imod de historiske målte data for Filmby og Trøjborg bassinerne. Grunden til, at der er forskel i basisniveauet i bassinerne skyldes, at de to pumpe-sumpe reelt aldrig er helt tømte.



**Figur 5.8.c**  
Målt og simuleret niveau i Trøjborg bassinet. Den røde streg er det målte niveau.



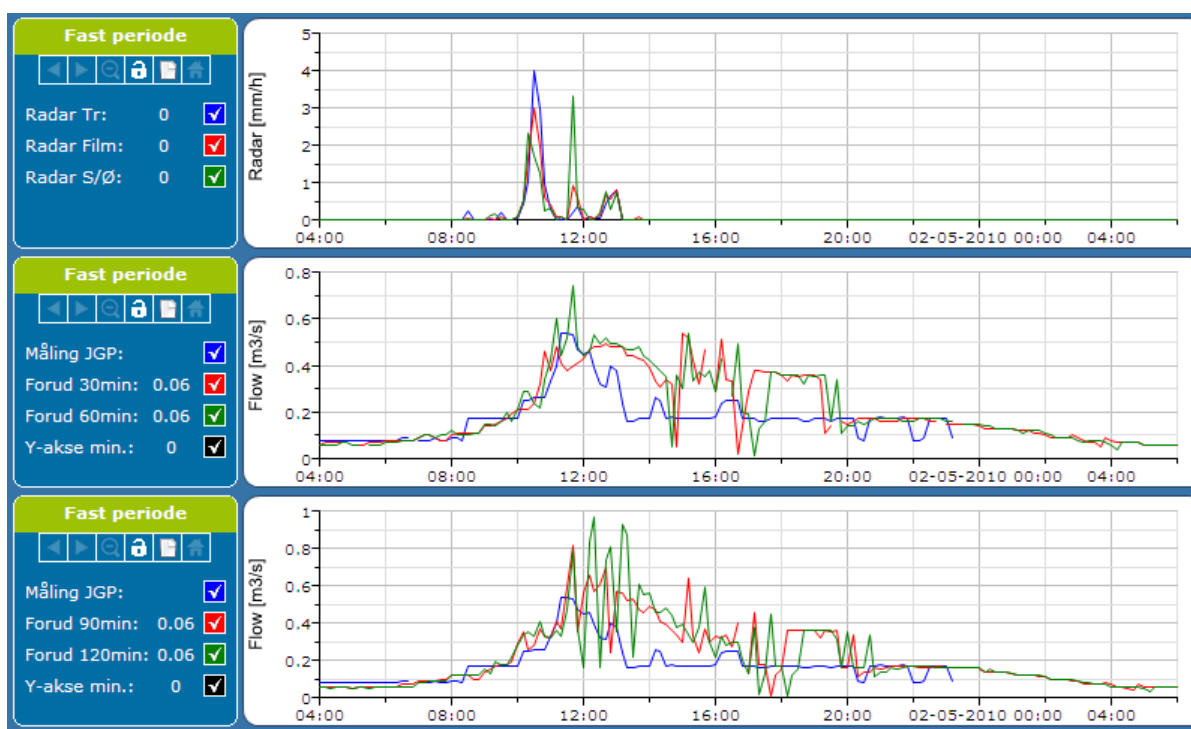
**Figur 5.8.d**  
Målt og simuleret niveau i Filmby bassinet. Den røde streg er det målte niveau.

## Systemet i brug

1. maj 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelser den 1. maj 2010 i Århus. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte passer tidspunktet for den øgede afstrømning godt, både for de lange og korte afstrømningsprognoser. Både de lange og korte afstrømningsprognoser viser dog en kraftigere regn end det reelt blev tilfældet, da både peakværdien er højere og regnafstrømningen varer læn- gere i modellerne. Ca. kl. 23 mistes signalet til SRO-systemet, derfor ha- ves ikke målinger fra PST Jægergårdsgade (JGP) i de to nederste dele af figuren. Se figur 5.8.e.



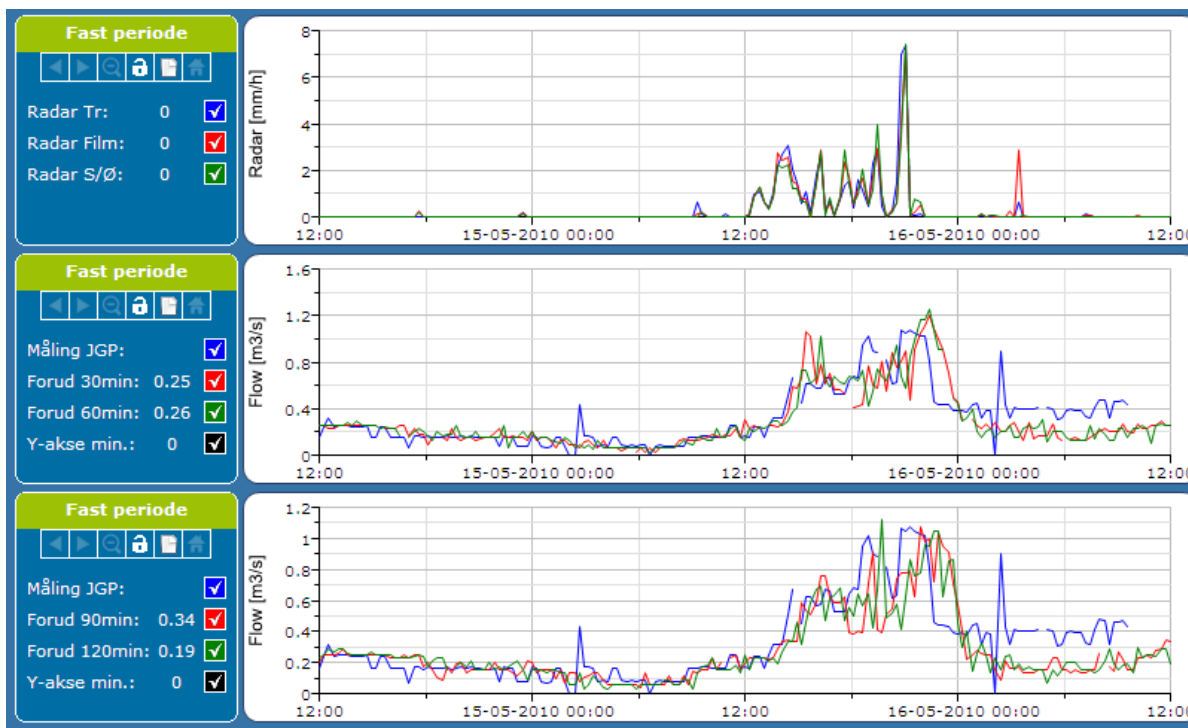
**Figur 5.8.e**  
STAR brugerfladen fra 1. maj i Århus.

15. maj 2010

Radaren viser, at der har været en regnhændelser den 15. maj 2010 i Århus. Forud for at regnen ramte oplandet, er regnafstrømningen blevet prognosticeret med 30, 60, 90 og 120 min varsel.

I forhold til det målte passer både tidspunktet for den øgede afstrømning godt og niveauet for peakværdien stemmer også godt overens. Dette gælder både for de lange og korte afstrømningsprognoser.

Fra midnat underestimeres den sidste del af regnafstrømningen i forhold til det målte. Dette skyldes formodentligt tømning af bassiner i oplandet, som ikke modelleres korrekt i regnhændelsen. Se figur 5.8.f.



**Figur 5.8.f**  
STAR brugerfladen fra 15. maj 2010 i Århus.

### 5.8.1

#### Vurdering og perspektiver

Overførsel af data fra Virring-radaren har i projektperioden været behæftet men forholdsvis mange fejl, hvilket har resulteret i en nedetid på omkring 30 %, hvilket i forhold til at kunne anvende systemet til realtidsstyring og regulering er for stor en andel. Dog skal det siges at en stor del af nedetiden skyldes at der mistes et tidsskridt eller to og sker det nogle gange om dagen, betyder det at den akkumulerede nedetid bliver stor.

Den statiske kalibrering for Virring-radaren anses som forholdsvis valid og ved sammenligning med regnmålerne giver radaren og regnmålerne regndybder i samme størrelsesordener. Dog har det som tidligere omtalt ikke været muligt at etablere kommunikation til online regnmålerne koblet på kommunens SRO for sidst i projektperioden, hvorfor det ikke har været muligt at gennemføre den dynamiske kalibrering i realtid.

Regnprognosen foretaget med Verring radaren er relativt god i forhold til Århus, da radaren kan "se" langt mod vest, hvor størstedelen af regnen kommer fra. Det vurderes at der kan laves en fornuftig prognose på regnen ca. 1 time frem i tiden. Havde Århus Vand's lokale radar været anvendt, havde denne prognosehorisont sandsynligvis været omkring det halve, dvs. ca. 30 min.

Afstrømningsprognoserne har givet gode resultater for prognosepunktet i Århus, som er Jægergårdsgade pumpestation. Den del af afløbssystemet, der indgår i afstrømningsmodellen er kompleks, da anvendelse af bassinerne i Trøjborg og Filmbyen styres af niveaumålinger og spjæld i afløbssystemet. Bassinerne er medtaget i afstrømningsmodellen, og har indgået i kalibreringen. Afstrømningsmodellen er dog ikke detaljeret nok til, at der har kunnet laves brugbare forudsigelser for disse sekundære punkter.

Det skal bemærkes, at et nyt stort bassin er under etablering centralt i Århus på Carl Blochs Gade. Det nye bassin forventes at blive taget i anvendelse sidst i 2010. Dette vil have indflydelse på tilstrømningen til Jægergårdsgade pumpestation og vil derfor formodentligt kræve en opdatering af afstrømningsmodellen.

Radar baseret prognose af afstrømningen har flere perspektiver for spildevandssystemet i Århus. Det omfatter både en optimering af fyldning og tømning af bassiner, dynamisk valg af hvilket renseanlæg hvortil udvalgte deloplande skal afvande, omstilling til regnstyring på renseanlæggene og koordineret skylning med bassiner og ledninger. Det primære fokus i Århus er at optimere udnyttelsen af det eksisterende system, for dermed at undgå aflastninger og opnå så mange badevandsdage som muligt. Århus Vand A/S har iværksat et stortilet 4-årig projekt som går ud på at implementere en global/lokal styring for hele kloaksystemet og alle renseanlæg i det centrale Århus. I denne samstyriingsstrategi planlægges det at lade flowvarsel fra radar indgå som et vigtigt input. Århus oplandet er stort og komplekst opbygget, hvilket har gjort det vanskeligt at modellere præcist inden for det nærværende projekts givne rammer. Ud fra erfaringer fra de andre deltage-re i projektet må det forventes at Århus setuppet kan tunes bedre på plads med en ekstra indsats, under hensyntagen til igangværende anlægsprojekter og implementering af styring.

---



## 6.

**Diskussion**

Der er sket væsentlige forbedringer af den radarbaserede prognose af nedbøren i forhold til VBSS første fase. Primært er den forecastede intensitetsfordeling mere rigtig. Det skyldes den dynamiske kalibrering af radardata. Dette forudsætter at systemet er online på alle komponenter der bruges i generering af radardata og kalibrering.

I VBSS projektets anden fase har fokus været at føre systemet hen mod den automatiske drift af systemet. Det har specielt været en udfordring først i projektet, men har i løbet af den sidste del lykket mere tilfredsstillende.

**KRG bidrag****Data og datakommunikation**

Et projekt som nærværende afhænger af at have stabile dataforbindelser, så at man kan sikre at både modtagelse, behandling og videresendelse af data foregår kontinuert. I projektet er der hentet data fra forskellige servere hvert 5. og hvert 10. min hhv. for X- og C-bånds radarerne. Hvad angår C-bånds radarerne er der hentet data på DMI's FTP-server, hvilket har vist sig at være en forholdsvis stabil forbindelse, dog er der nogle gange oplevet synkroniseringsproblemer, dvs. at de aktuelle data er lagt på serveren senere end AAU's hentningsprocedure er gennemført, hvorfor der mistes et tidsskridt.

For X-bånds radarens vedkomne har datakommunikationen været lidt forskellig, fx hentede AAU data direkte på Odense-radaren i starten af projektperioden, men da der var problemer hvis der var flere logget på denne ad gangen kunne dataoverførselen ikke gennemføres. Senere i projektperioden blev data lagt på en FTP-server, for at undgå disse problemer.

I Hvidovre har der gentagne gange været problemer med at radaren er blevet slukket i op til flere dage ad gangen.

**Tabel 6.1.a: Oversigt over drifts- og nedetider**

	Driftstid (timer)*	Nedetid (timer)	Nedetid (%)	Nedetid under 1 times varighed (timer)
Aalborg	8760	639	7.3	8
Hvidovre og Egedal	8760	1578	18.0	318
Odense	8760	1676	19.1	332
Århus (Virring)	8760	2550	29.0	142
Slagelse (Stevns)	8760	722	8.1	271
Tønder (Rømø)	8760	1307	14.9	48

\* I perioden 1. juni 2009 – 1. juni 2010

Som det kan ses af tabel 6.1.a er der nogle steder en uacceptabel nedetid på systemet. Det skal bemærkes at nedetid er defineret hvis blot én af de beskrevne komponenter er nede.

Eksempel på fejlsituation:



**Figur 6.1.a Overvågning af Hvidovre radar**

Her er modtagelsen af data fra radar og regnmåler ok. Der bliver også lavet en prognose der overføres til præsentation på web. Desværre kan data ikke overføres til Krüger til videre bearbejdning. På trods af at det er én komponent der ikke er aktiv vil det hele blive registreret som nedetid.

Det bør også bemærkes at nedetid er også selvom der er tørvejr. Men det er klart et område der kræver mere opmærksomhed.

Med hensyn til on-line regnmålere har der været opsat et individuelt system for hver kommune. Online-regnmålerdata fra Slagelse, Hvidovre og Aalborg er hentet gennem kommunernes SRO-anlæg og via Krügers Star2 system. Her har det været muligt at hente regnmåler data med et tidsinterval på 2 min. Disse data er hentet som akkumulerede vip-registreringer. Dette sy-

stem har for nogle regnmåleres vedkomne kørt meget stabilt, mens der til andre regnmålere har været meget dårlige forbindelser til SRO'en, således at meget få data er nået frem til AAU, tidsnok til at kunne anvende dem til dynamisk radarkalibrering.

I Aalborg, Tønder, Hvidovre og Odense har AAU opstillet regnmålere eller koblet sig på eksisterende og etableret datakommunikation via 3G-internetforbindelser. Der er observeret problemer med dårlige forbindelser via 3G-netværket samt nedbrud af software, så målingerne i perioder ikke har kunnet anvendes i realtid.

I Århus var det meningen af der skulle etableres forbindelse direkte til en FTP-server koblet til kommunens SRO-system. DHI som skulle stå for denne forbindelse har haft adskillige problemer med at få dette til at virke. Herefter har der været problemer med AAU's kontakt til FTP-serveren. Det er derfor ikke lykkedes at hente data fra Århus før primo juni 2010.

Det der har været den største udfordring i forhold til at anvende on-line-regnmålerdata til dynamisk kalibrering er, at de forskellige systemer har kørt med forskellige tidsintervaller, forskellige dataformater og forskellig kommunikation. Den største udfordring har været at etablere tidlig synkronisering med radarerne på grund af de heterogene systemer.

I gennem en længere periode i starten af 2010 var der serverproblemer med at opretholde kommunikationen fra SRO systemerne til serveren med afstrømningsmodellerne. Dette førte til at datadrivere har måttet genstartes lokalt ude på SRO anlæggene flere gange (gælder kommunikationen til Tønder, Odense, Århus og Egedal). Problemet har også i 2-4 tilfælde ført til udfald under interessante regnhændelser og deraf tab af eksempler på afstrømningsprognoser under regn. Der blev fundet en holdbar løsning på problemet i maj 2010 og siden har kommunikation ud til SRO systemerne kørt stabilt uden behov for genstart af datadrivere.

Overførelsen af radardata fra prognoseserverne placeret hos AAU til afstrømningsserveren i Krüger har også kørt med en meget høj oppe tid, kun forstyrret i enkelte tilfælde pga. nedbrud i den eksterne internetforbindelse.

### **Radarkalibrering**

De to radartyper der er anvendt i projektet kalibreres på to måder:

- Den statiske kalibrering
  - Den dynamiske kalibrering.
-

For begge typer af kalibrering er det antaget at der kan bruges en lineær sammenhæng mellem reflektivitet og regnintensitet. Der er derudover antaget at hældningen på denne rette linje er kun afhængig af afstanden til radaren. Det er fundet at det er fornuftigt at have en 5-6 regnmålere inden for en afstand af 15-20 kilometer fra radaren. Optimalt skal de stilles med 3 km's afstand. Man kan sandsynligvis ikke klare sig med mindre end 3 regnmålere for at opnå en meningsfuld statistisk kalibrering.

Ved brug af den dynamisk kalibrering skal regnmåleren desuden være i online forbindelse, således at radarmålingen kan justeres senest en 2-3 minutter efter regnintensiteten er målt med regnmåler. Erfaringen fra dette projekt er at ud af de 5-6 regnmålere der skal være i området skal 3 være online for at opnå optimalt resultat.

Sammenligninger mellem dynamisk og statistisk kalibrering viser at den dynamiske kalibrering er overlegen når det kommer til at bestemme intensitetsfordelingen. Omkostningen er at estimatet på det akkumulerede volumen bliver en smule dårligere. For anvendelser hvor det er flowbestemmelse i afløbssystemet, der er vigtig er dynamisk kalibrering klart at foretrække. Omvendt hvis volumen er det vigtigste (f.eks. ved bassiner) kan en statistisk kalibrering være bedst. Det er derfor fornuftigt at producere begge estimater og overveje anvendelse først.

Undersøgelserne fra Aalborg viser en anden stor fordel ved den dynamiske kalibrering. Når magnetronen er ved at være slidt henfalder signalstyrken drastisk. Her vil det ikke være en fordel at bruge statistisk kalibrering, da den vil basere sig på de forudgående måneders måling. Her vil den dynamisk kalibrering løbende justere radaren efter den aktuelle kvalitet af magnetronen. Hvis man skulle kalibrere på traditionel vis, skulle man vente indtil at man have målinger nok til at foretage statistisk kalibrering. Det vil ikke være godt ved en online anvendelse af radar.

Der er også forskel på de to typer af radar der er anvendt. Erfaringen fra dette projekt viser at man ikke kan kalibrere X-båndsradaren ud over 20 km. Dvs. at de intensiteter der måles over 20 km kun kan være retningsgivende for om der er tale om svag eller kraftig regn. Det ses tydeligst med Egedal, hvor der er anvendt data fra Hvidovreradaren. Her må der konkluderes at det er for langt væk og at den endelige placering af Egedals egen radar vil løse dette problem.

For C-båndsradaren er der ikke samme problem med afstanden. Dog gør den grovere opløsning at spredning omkring kalibreringsværdien bliver større. Det skyldes primært at det er mere udfordrende at sammenligne en regnmåler, der måler i et punkt, med en 2000 m x 2000 m flademåling.

---

Der ses dog også forskelle i C-båndsradarerne. F.eks. er Tønder placeret tæt på Rømø radaren mens Slagelse er placeret 75 km øst for Stevns radaren. Selvom begge lokaliteter giver gode resultater er det klart at der er mindre spredning omkring resultaterne i Tønder end der er i Slagelse. Ved vestlig vind betyder det at data til prognoseberegningen stammer fra en afstand fra radaren hvor der er usikkerhed på intensiteten (over 100 km væk fra radaren).

### Radarprognose

Den anvendte metode til at genere prognosen kaldes CO-TREC og den har gennem det sidste år fungeret godt. Der er dog forskelle på konvektiv og strateform regn. Da store fronter kan ses på lang afstand og da de ofte er styret af meteorologiske processer med en stor længdeskala er de også mere forudsigelige. Omvendt er kraftige byger af deres natur meget flygtige og opstår og forsvinder hurtigt. En sammenligning af hvor god de forskellige performance kriterier er opfyldt er listet i tabel 6.2.b.

**Tabel 6.2.b kvalitet ved forskellige forudsigelseshorisont.**

	$R^2(15)$	CSI(15)	$C_{max}(15)$	$R^2(30)$	CSI(30)	$C_{max}(30)$
Aalborg	0.28	0.39	0.51	0.12	0.26	0.41
Hvidovre og Egedal	0.60	0.61	0.80	0.49	0.53	0.72
Odense	0.35	0.47	0.68	0.20	0.35	0.58
Middel	0.41	0.49	0.66	0.27	0.38	0.57

	$R^2(30)$	CSI(30)	$C_{max}(30)$	$R^2(60)$	CSI(60)	$C_{max}(60)$
Århus (Virring)	0.28	0.52	0.52	0.19	0.40	0.40
Slagelse (Stevns)	0.31	0.49	0.60	0.21	0.40	0.52
Tønder (Rømø)	0.30	0.43	0.53	0.20	0.34	0.48
Middel	0.30	0.48	0.55	0.20	0.38	0.47

Som det ses af tabel 6.2.b er der en klar faldende tendens des længere frem prognosen skal være. Generelt må det dog siges at der opnås acceptabel kvalitet for DHI radar for under 30 minutter og for DMI radar under 60 minutter. Det er interessant at se at Hvidovre radaren tilsyneladende virker meget bedre end resten af radarerne. Det skyldes desværre at der i data fra Hvidovre er meget stationær støj, hvor der er få pixel med meget store værdier. Det får prognosen til at sætte "farten" ned da støjen ikke bevæger sig. Når kvaliteten så efterfølgende beregnes korreleres støjen så med sig selv og giver gode resultater. Der bør arbejdes på en filtrering af denne støj for at få bedre resultater.

### Afstrømningsprognose

Resultaterne viser, at auto-kalibrering af afstrømningsmodellerne bidrager væsentligt til forudsigelsens kvalitet. Forudsigelsen har en kvalitet og robusthed, der gør den klar til at indgå i driften af spildevandssystemer. På kort sigt forventes det, at erfaring med auto-kalibrering under forskellige ty-

per hændelser og på forskellige oplande ville føre til yderligere finjustering af metoden. På langt sigt forventes det, at samarbejde med universiteter vil føre til nye og endnu bedre metoder til dataassimilering og føre til udviklingen af endnu bedre metoder til radarbaserede forudsigelser af flow og/eller niveau i spildevandssystemer.

Selve afstrømningsberegningerne inklusiv auto-kalibrering og har kørt med en oppe tid på over 95 %. Modelberegningerne er dog afhængige af, at rardata og SRO data er tilgængelige.

Når det regner i størstedelen af Danmark betyder det, at afstrømningsserveren er højt belastet, i det der kræves mange modelberegninger i auto-kalibreringen. I disse perioder responderer brugergrænseflade på hjemmesiden meget langsomt og der opstår en mulighed for at auto-kalibreringen ikke når at køre helt til ende i alle modelberegninger. Der er igangsat en opgradering af afstrømningsserveren til en nyere og mere optimeret serverversion med allokering af mere beregningskraft.

---

---

## 7.

### Konklusion

By og Landskabsstyrelsen ønskede i 2007 at Danske miljøvirksomheder og forskningsinstitutioner ville gå sammen og finde løsninger på at måle og håndtere de ekstreme regnhændelser, som med stigende hyppighed belaster vore byer.

I løbet af de cirka 2,5 år projektet har forløbet har i 8 forsyningsvirksomheder, Aalborg Universitet og Krüger A/S samarbejdet om at demonstrere at det med tilgængelig teknologi er muligt at skabe den nødvendige infrastruktur til at gøre vores spildevandstekniske systemer mere intelligente.

Projektet er gennemført i to faser. Fase 1 bestod primært af udviklingen af rygraden i prognosesystemet, herunder opbygning af modeller og infrastruktur. I løbet af første fase lykkedes det at opbygge systemet, men det stod klart at yderligere udvikling var nødvendig for at kunne skabe en prognose af tilstrækkelig høj kvalitet for anvendelse i styring. Dette blev således målet for anden fase, hvor det overordnede tema var etablering af online kalibrering og opdatering af nedbørsmodellerne og afstrømningsmodellerne. Ved hjælp af online nedbørsmålinger og flowmålinger i oplandet, lykkedes det i anden fase at kunne forudsige regnhændelserne i op til 2 timer med god præcision. Fra alle oplande er der således observeret hændelsesforløb hvor prognosen med fordel kunne have været bygget ind i en styringsstrategi.

Det gennemførte projekt har etableret et system der gør vejrradarbaseret styring af spildevandssystemer mulig. Som noget helt specielt er det lykkedes at etablere et system, der forudsiger intensitetens stedlige og tidslige fordeling og den efterfølgende afstrømning i udvalgte oplande – alt sammen i realtid. Det har været projektets ambition at i så stort omfang som mulig at gennemføre forudsigelser på regn og afstrømning mens de sker. Prognoser holdes op mod målinger løbende for at vurdere prognosens kvalitet. Kun på den måde kan man bevise at teknologien er operativ.

På baggrund af 5 lokale radarer og 3 DMI radarer er der med succes etableret en infrastruktur, hvor mange radarer og computere udveksler oplysninger om nedbør og afstrømning. Systemet er opbygget som et parallelt system, hvor hver prognose til forsyningsvirksomhederne er uafhængig af hinanden. På den måde er der opbygget en meget stor robusthed i den måde prognoserne er genereret. Systemerne kan distribueres decentralt, således at strømafbrydelser eller internetafbrydelser ikke påvirker driften. Alle resultater er offentligt tilgængelige gennem online websides.

---

Den frembragte løsning er på verdensplan unik, idet der meget få steder er brugt realtidsforudsigelser af afstrømning i afløbssystemer og ingen steder er der brugt et så massivt antal radarer af forskellige typer. Resultaterne er klart tilfredsstillende.

De gode resultater viser, at teknologien i dag er klar til at indgå i styringen af afløbssystemer og renseanlæg som en integreret del af driften. Det forventes, at der på basis af løbende erfaringer vil ske en finjustering af metoden men også at der på kort sigt ikke er grundlag for et egentligt udviklingssamarbejde i forhold til den aktuelle tilgang til prognostisering. På kort sigt bør der fokuseres på integration af afstrømningsprognosen i optimering af de respektive spildevandssystemer. På længere sigt forventes det at forskningen i Danmark og i udlandet vil føre til nye og bedre metoder til forudsigelse af regnafstrømning med tilhørende usikkerheder. Denne forskning vil i fremtiden pege på nye udviklingsbehov i det omfang metoderne forventes at kunne bidrage til en økonomisk, miljø- og/eller driftsmæssig gevinst for forsyningerne. Teknologien er nu moden til at der foretages en individuel implementering i styringsstrategier hos de deltagende forsyningsvirksomheder, og andre som måtte have behov for prognoser til deres styring.

Erfaringerne fra dette projekt viser nødvendigheden af at have stram kontrol med dataudvekslingen for at opretholde et stabilt dataflow. I en implementering bør der sættes særligt fokus på dette punkt i samspil ved en tilbagefaldsstrategi ved dataudfald eller ikke-pålidelige afstrømningsprognoser.

Systemet vurderes at være klar til brug, og vil forhåbentlig i fremtiden være et vigtigt input i optimeret styring af spildevandsanlæg i Danmark og andre steder i verden.

---



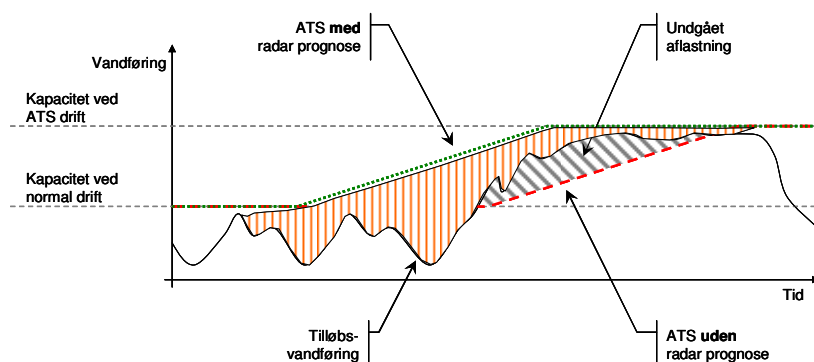
## 8. Perspektiver og anvendelsesmuligheder

Forsyninger i såvel Danmark som udland står overfor mange udfordringer, hvor blandt andet klimaforandringer, vandrammedirektivet og badevandsdirektivet er nogle af de service- og miljømæssige udfordringer, der nødvendigvis ikke trækker i samme retning.

Klimaforandringerne vil betyde mere pres på spildevandsinfrastrukturen og dermed flere aflastninger og oversvømmelser, såfremt der ikke foretages store investeringer i spildevandssystemerne. Vandrammedirektivet og badevandsdirektivet lægger yderligere pres på forsyningerne til færre aflastninger og sætter fokus på sundhed i vandmiljøet. Betragtes de nye Vandplaner er det et generelt krav, at der ikke må aflastes mere end 250 m<sup>3</sup> per red. ha. I mange af de danske spildevandssystemer er dette lig med store investeringer. I Danmark er der ligeledes sket en reorganisering af strukturen i kommunerne, hvor drift og myndighed er blevet adskilt samtidig med, at der er indført krav om effektivisering og prisloft.

Generelt set mødes forsyningerne i dag med krav om bedre udnyttelse af de eksisterende systemer og med et ønske om at minimere de anlægsinvesteringer, der skal fortages for at leve op til kravene. Intelligente prognosebaserede løsninger til optimering af spildevandssystemer fremstår som et særdeles kosteffektivt middel i bestræbelserne på at opnå disse mål

Den udviklede metode gør det muligt at forudsige en vandføring eller vandstand et vilkårligt sted i afløbssystemet. Af hensyn til beregningstiden skal disse punkter fastlægges på forhånd og kalibreres mod måledata. Det gør at man kan forudsige f.eks. hvad tilløbet til renseanlægget vil være eller hvor høj vandstanden vil være i et bassin. Denne evne til i realtid at forudsige tilstande i afløbssystemet op til 2 timer før hændelsen optræder, gør det muligt at træffe bevidste valg omkring hvordan renseanlægget eller afløbssystemet skal styres. En oplagt mulighed er at bruge systemet i forbindelse med regnstyring på renseanlæg. Her kan man reducere mængden af aflastet vand til recipienten signifikant ved at starte styringssekvensen på baggrund af en tilstrømningsprognose, se princip i figur 8.a. Lige så vigtigt, kan man afslutte styringssekvensen på det rigtige tidspunkt, når det kan ses at tilstrømningen vil aftage. Men også i forbindelse med samstyring, hvor overløb, spjæld, pumper indgår i en samlet strategi for optimering af driften af afløbssystemer, vil systemet være et vigtigt værktøj. Nogle komponenter i afløbssystemet kan styres direkte af systemet, mens andre dele skal styres som en kombination af prognose og online målinger i afløbssystemet.



**Figur 8.a**  
**Illustration af hvordan radar prognosen kan bidrage til undgået aflastning tidligt i starten af regnhændelser (skrårskraveret) og af det potentiale der yderligere kan opnås ved samtidigt at sammenstyre afløbssystem og renseanlæg. Det lodret - skraverede område indikerer ledig kapacitet på renseanlægget og kan anvendes i en samstyringsstrategi.**

Det beskrevne koncept er i sin nuværende udgave klar til at brug i en overvåget udgave på eksisterende afløbssystemer og renseanlæg. Det er vigtigt at fremhæve at det ikke kun er ekstreme hændelser med potentiale for store oversvømmelser der er målet for dette projekt. Mindre og hyppige hændelser kan også bedre håndteres og dermed reducere den akkumulerede belastning på recipienter. Det er specielt interessant, hvis man f.eks. ønsker at reducere mængden af sygdomsfremkaldende bakterier i badevand. I disse situationer kan aflastninger måske helt undgås ved at omdirigere og opstuve vandet i strategiske områder afløbssystemet.

Det er også muligt at bruge systemet som beslutningsstøtte, når kraftige regnhændelse truer med at overbelaste byernes afløbssystemer. Selvom en styringsstrategi i sig selv ikke vil være nok til at undgå oversvømmelser eller alvorlige aflastninger, vil det være muligt at prioritere sin indsats. Er der områder der erfaringsmæssigt kræver indgreb eller overvågning af driftspersonale, kan dette igangsættes i god tid før hændelsen optræder.

Der kan også være at kritiske vandstande i afløbssystemet, der bliver registreret i SRO anlægget uden at der er nedbørmæssig begrundelse for det. Det kan resultere i at f.eks. overløb træder i funktion pga. af tilstopning eller andet. Her kan vedvarende forskelle mellem registrering og modellering bruges til at fejlfinde i afløbssystemet.

Systemets evne til at kontrollere sig selv rummer store perspektiver for at opnå god driftsikkerhed og pålidelighed. Når systemet kan holde sine prognoser op mod målinger med vejrradaren eller målinger i afløbssystemet er der muligt i fremtiden at optimere systemet løbende og dermed reducere de usikkerheder der er ved prognosen. Er prognosen usikker pga. specielle

metrologiske forhold, kan systemet gå over til en sekundær og simpleere styringsstrategi. Det er vigtigt at have en tilbagefaldsstrategi når systemet bringes til anvendelse. Resultaterne fra dette projekt viser at der kan være forskel på prognosernes kvalitet fra hændelse til hændelse, men at der generelt god sammenhæng mellem det forudsagte og det målte.

Dette projekt skal ses i sammenhæng med de øvrige aktiviteter, som er under udvikling i Danmark. Der er større forskningsprogrammer, så som Storm and Wastewater Informatics (SWI), som søger at adressere forskningsmæssige perspektiver i anvendelse af f.eks. vejrradar til forbedret styring af afløbssystemer.

Der er en udvikling i gang med at etablere et netværk af lokale vejrradarer, hvor spildevandskomiteens vejrradarudvalg spiller en rolle. Inspirationen er fra Spildevandskomiteens regnmålernetværk, der gennem de sidste 20-30 år har vist vigtigheden af måling af nedbør. Vores nuværende standarder for håndtering af regnvand er i høj grad baseret på regnmålernetværket. Det er håbet at et lokalt/regionalt vejrradar netværk kan spille en tilsvarende rolle i fremtiden. Nærværende projekt vil netop være med til at understøtte en sådan udvikling, hvor data fra lokale vejrradarer indgår i en mere aktiv strategi for vore spildevandssystemer. Dette projekts resultater viser at man kan opnå gode resultater med de landsdækkende C-båndsradarer og at der derfor er gode muligheder for mange at komme i gang med teknologien. Det springende punkt er om der er reguleringsmæssige gevinster i at have disse prognoser. Det kan f.eks. for en række renseanlæg være en stor fordel at have en form for regnstyring aktiveret af en prognose, da det typisk kan forøge kapaciteten af anlægget uden at der skal laves nye bygningsværker.

---

## Litteratur

Einfalt, T., Arnbjerg-Nielsen, K., Faure, D., Jensen, N.-E., Quirmbach, M., Vaes, G., Vieux, B.E., Golz, C., 2004, Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. *J. Hydrol.* 299 (3–4), 186– 202

DHI, 2008, Billede fra <http://www.regn.dk>

DMI, 2008, Billede taget af Søren Overgaard, Dansk Meteorologisk Institut

Grum, M. , Neergaard Jacobsen, B. , Nørremark, J. and Thyme, J. (2005). Hydrological Modelling in Identifying the Unintended Rainfall-Runoff Contributions. International Conference of Urban Drainage, Copenhagen 2005.

Grum, M., Longin, E. and Linde, J. J. (2006). A Flexible and Extensible Open Source Tool for Urban Drainage Modelling: [www.WaterAspects.org](http://www.WaterAspects.org). Conference on Urban Drainage Modelling, Dresden 2006.

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

Liu, D., 2008, Nowcasting of precipitation with an X-band Local Area Weather Radar, Working paper Aalborg University, Department of Civil Engineering

Mecklenburg S, Joss J, Schmid W., 2000, Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm. *J Hydrol* 239: 46–68.

Overgaard, S., 2004, The VRIS format of weather radar data, Internt Notat, Dansk Meteorologisk Institut

Rinehart, R.E., Garvey, E.T., 1978. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature* 273, 287– 289.

Rinehart, R.E., 2004, Radar for meteorologists, Fourth Edition, Rinehart publications

Thorndahl, S, Rasmussen, M.R. (2009a) Calibration of a marine X-band radar for precipitation measurements, Draft Paper, Aalborg Universitet 2009.

---

Thorndahl, S. & Rasmussen, MR. (2009b). 'Challenges in X-band Weather Radar Data Calibration. UrbanRain09 : 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas : St. Moritz, Switzerland.

Thorndahl, S., Rasmussen, MR., Grum, M. & Neve, SL. (2009). 'Radar Based Flow and Water Level Forecasting in Sewer Systems: a danish case study., UrbanRain09 : 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas : St. Moritz, Switzerland

Van Horne, M.P.,2003. Short-term precipitation nowcasting for composite radar rainfall fields. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.