

RADIATE - RADARPROGNOSE TIL VANDSEKTOREN



RADIATE – RADARPROGNOSER TIL VANDSEKTOREN

DATO: 25. september 2024

Projekt ID:

11.2020

Udgiver:

DANVA, Vandhuset, Godthåbsvej 83, 8660 Skanderborg

Udarbejdet af:

Malte S. Ahm

Rasmus Laursen

Janni M. Nielsen

Michael R. Rasmussen

Jesper E. Nielsen

Finansiering:

Vejledningen er finansieret af

VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

Samarbejdspartnere:

Aarhus Vand A/S ved Malte Skovby Ahm, Yansi Mary Jesuloganathan, Mathias Schan-dorff Arberg og Andreas Løvgaard.

Foreningen VeVa ved Rasmus Laursen.

Aalborg Forsyning A/S ved Katrine Meltofte Møller og Maria Jensen.

VandCenter Syd A/S ved Lasse Sørensen og Annette Brink-Kjær.

HOFOR A/S ved Jesper Nielsen Nissen og Lotte Krogh.

BIOFOS A/S ved Carsten Thirsing.

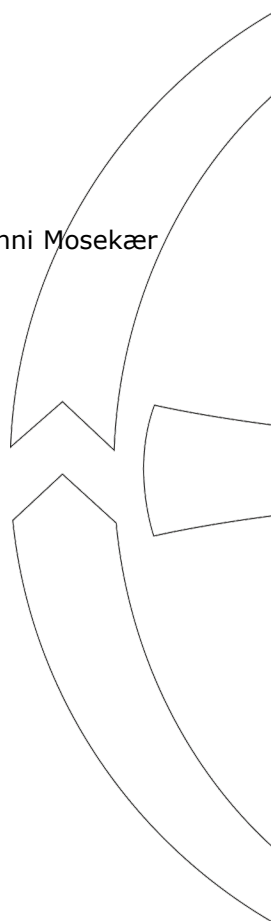
Aalborg Universitet, BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø ved Jesper Ellerbæk Nielsen, Janni Mosekær Nielsen og Michael R. Rasmussen.

Envidan A/S ved David Getreuer Jensen.

Dryp A/S ved Peter Rasch.

Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning):

Spildevand og klimatilpasning



Indholdsfortegnelse

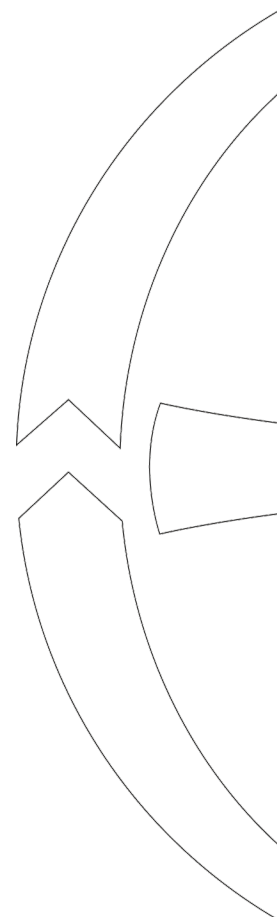
1	Sammenfatning	3
2	English summary	5
3	Introduktion	7
4	Projektets betydning for vandbranchen	10
4.1	Marked og anvendelsesmuligheder	11
4.2	Næste skridt	12
4.3	Formidlingsplan	13
5	Projektet	14
5.1	Formål	14
5.2	Output	15
5.3	Projektresultater	16
5.4	Konklusion	20
5.5	Perspektiver	20
6	Litteraturliste	22

Bilag

Bilag 1 - Opportunistiske regnsensorer til justering af radardata	24
Bilag 2 - Realtidsjustering af radardata med opportunistiske regnsensorer	37
Bilag 3 - Opportunistiske afstrømningsmålinger til radardata justering og now-castvalidering	45
Bilag 4 - KAMA - Et 'prototype' værktøj til forsyningsdrift og -planlægning	58

VeVa cases

Case 1 - KAMA - Forsyningsperspektiv og anvendelse (Aalborg Forsyning)	70
Case 2 - Radardata til hydrauliskemodeller (Aarhus Vand)	75
Case 3 - Udfordringer ved at identificere skybrud med radar (VandCenter Syd)	80
Case 4 - Realtidsstyring af rensningsanlæg (BIOFOS)	86
Case 5 - Spatial fordelt gentagelsesperiode (HOFOR)	89
Case 6 - Sammenstyring med prognosedata (HOFOR)	93
Case 7 - Uvedkommende vand i Ekeby (NSVA)	94

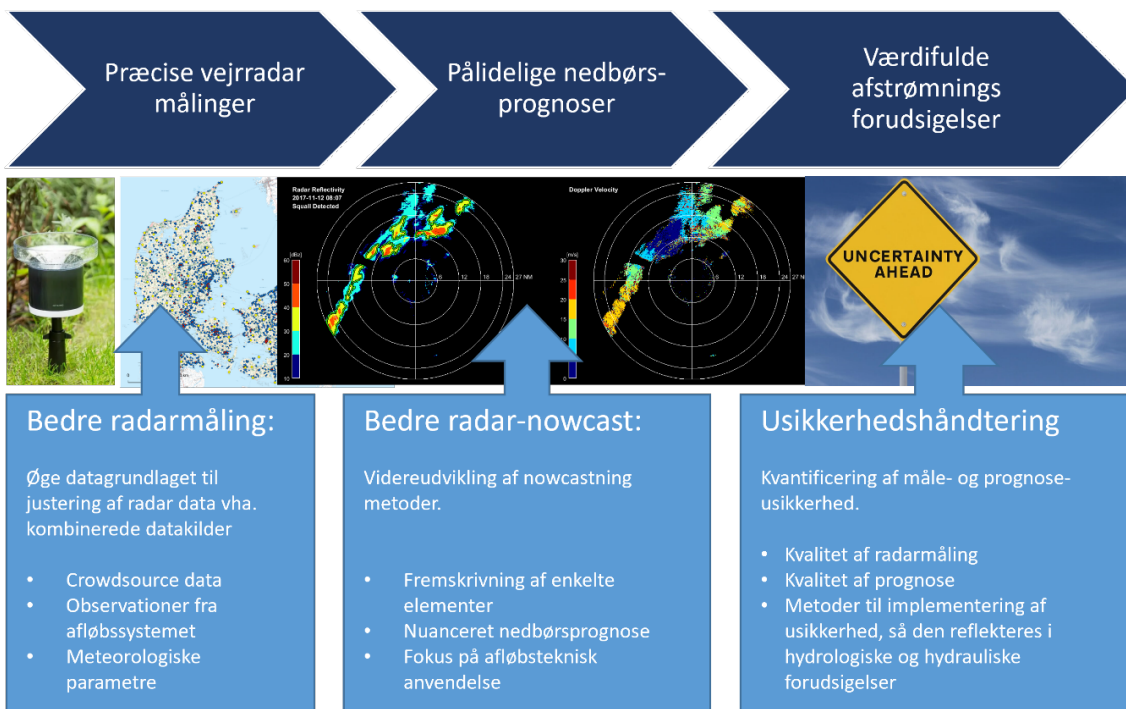


1 Sammenfatning

Teknologi og vidensniveau omkring brugen af vejrradardata i vandsektoren er moden til, at disse unikke data kan gøres anvendelige for hele vandsektoren. Der er fortsat en øget efterspørgsel på nedbørsdata - ikke kun i de punkter, hvor der i dag står regnmålere, men i alle punkter over hele Danmark.

Formålet med VUDP-projektet "RADIATE" er at opbygge den viden, som er nødvendig for at gøre vejrradarbaserede nedbørsprognoser nemt anvendelige og let tilgængelige for hele vandsektoren, samt demonstrere anvendelsen af disse operationelt på et prototypestadie.

Projektets tre hovedaktiviteter har været 1) udvikling af vejrradarbaserede prognosemetoder designet til vandsektorens specifikke behov, 2) implementering af vejrradarprognoser i VeVa's online løsninger samt formidling heraf og 3) Test og demonstration af VeVa's radar-nedbør og realtidsprognoser via cases hos forsyningspartnerne. Projektet indeholder også tre overordnede vidensopbygnings- og udviklingsaktiviteter til at understøtte hovedaktiviteterne. Sammenhængen mellem disse vidensopbygnings- og udviklingsaktiviteter er illustreret på Figur 1.



Figur 1: Illustration af de overordnede vidensopbygnings- og udviklingsaktiviteter i RADIATE projektet.

Målet med udviklingen og operationaliseringen har været at sikre nemmere adgang til data om nedbørens distribuerede (spatiotemporale) fordeling i en kvalitet, der umiddelbart kan anvendes og skabe værdi hos de fleste vandselskaber.

Projektet har nået sine mål. Der skal dog noteres, at dette er fjerde skridt på vejen til at gøre højopløselige nedbørsdata bredt tilgængelig og anvendt i vandsektoren. Første skridt var formulering af VeVaDaM, andet skridt var en operationel online processeringskæde af vejrradardata (på MVP-stadiet), tredje skridt var etableringen af *Foreningen VeVa* og dermed en fremadrettet governance struktur. Dette fjerde skridt var at udvikle og operationalisere (på prototypestadiet) en vejrradarbaseret nowcast, samt undersøge, hvordan nedbørsestimater og nedbørsprognoser kan få den bedste mulige pragmatiske kvalitet for hydrauliske og hydrologiske applikationer i vandsektoren. Den grundlæggende viden, governance og

infrastruktur er dermed på plads, og med videreudvikling på prototypen, hvor der introduceres mere stabilitet og en let adgang til dataene, kan denne nowcast vise sig at være meget værdifuld til fremtid styring af afløbssystemer og rensningsanlæg.

2 English summary

Technology and knowledge levels regarding the use of weather radar data in the water sector are mature enough to make these unique data applicable across the entire water sector. There is an increasing demand for precipitation data—not just at the points where rain gauges are currently located, but at all points across Denmark.

The goal of the VUDP project "RADIATE" is to build the knowledge necessary to make weather radar-based precipitation forecasts easily usable and accessible to the entire water sector, as well as to demonstrate their operational application at a prototype stage.

The project's three main activities have been: 1) developing weather radar-based forecasting methods tailored to the specific needs of the water sector, 2) implementing weather radar forecasts in VeVa's online solutions and disseminating them, and 3) testing and demonstrating VeVa's radar precipitation and real-time forecasts through case studies with utility partners. The project also included three overarching knowledge-building and development activities to support the main activities. The relationship between these knowledge-building and development activities is illustrated in Figure 2.

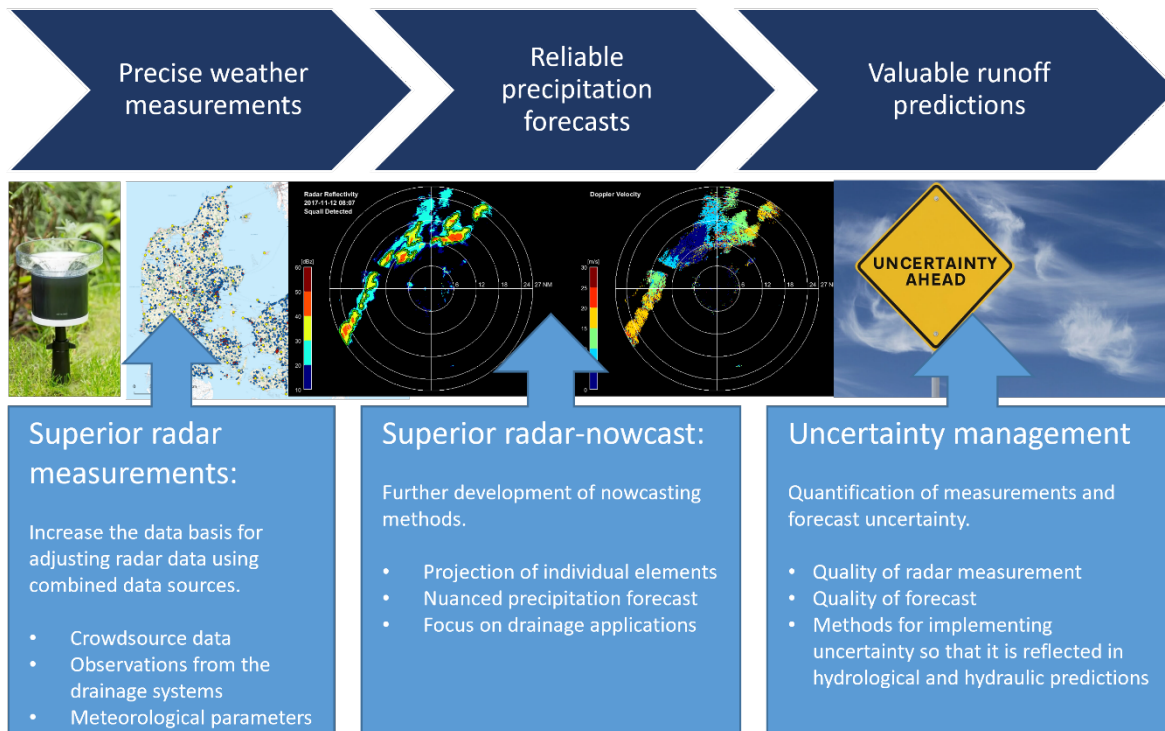


Figure 2: Illustration of the overlaying knowledge-building and development activities in the RADIATE project.

The goal of the development and operationalization has been to ensure easier access to data on the distributed (spatiotemporal) distribution of precipitation in a quality that can be immediately used and create value for most water companies.

The project has achieved its goals. However, it should be noted that this is the fourth step on the path to making high-resolution precipitation data widely available and used in the water sector. The first step was the formulation of VeVaDaM, the second step was an operational online processing chain of weather radar data (at the MVP stage), and the third step was the establishment of the VeVa Association and thus a forward-looking governance structure. This fourth step involved developing and operationalizing (at the prototype stage) a weather radar-based nowcast, as well as investigating how precipitation estimates and fore-

casts can achieve the best possible pragmatic quality for hydraulic and hydrological applications in the water sector. The fundamental knowledge, governance, and infrastructure are thus in place and, with the right efforts moving forward, can realize VeVa's ambitions.

3 Introduktion

VUDP-projektet "RADAIATE – Radarprognoser til Vandsektoren" tager udgangspunkt i VeVa (Vejrradar i Vandsektoren) samarbejdet, som blev etableret i sommeren 2016, og i 2020 blev grundlaget for Foreningen VeVa.

Foreningen VeVa er et udviklingsfællesskab med operationelle vejrdata services til dets medlemmer. Foreningens formål er at formidle vejrdata til medlemmerne i en kvalitet og form, som kan skabe et så optimalt grundlag som muligt for medlemmernes kortsigtede og langsigtede drifts- og investeringsbeslutninger i medlemmernes hovedvirksomhed.

Foreningens grundlag er samarbejde og en fælles hensigt om at gøre brugen af vejrdata til hydrologiske og hydrauliske formål gennemskuelige for alle på tværs af vandsektoren. I fællesskab vil vi sikre, at gode, pålidelige og kvalitetssikrede vejrdata er nemt tilgængelige via en fælles online platform for foreningens medlemmer, og at dette er baseret på åbne datamodeller samt transparente og veldokumenterede snitflader. Dette sikrer en øget tillid til og anvendelighed af vejrdata til hydrologiske og hydrauliske formål i vandsektoren.

Forud for dette VUDP-projekt (RADAIATE – Radarprognoser til Vandsektoren) har Foreningen udviklet en datamodel egnet til vandsektorens behov (VeVaDaM, <http://www.veva.dk/veva-dam/>) samt udviklet en operationel online dataprocessering, og -visualiseringsplatform (Ahm et al., 2020). Dette projekt bygger videre på det fundament, som VeVa har skabt, for anvendelsen af distribuerede nedbørsestimater i vandsektoren ved at gøre processering af vejrradardata transparent og nemmere tilgængelige for forsyningselskaberne.

Formålet med RADIATE projektet har været at udvikle og tilbyde nedbørsprognoser gennem VeVa til gavn for vandsektoren, og projektet gennemføres i tæt samarbejde mellem VeVa, vandselskaber, rådgivere og Aalborg Universitet. Projektet har overordnet været inddelt i tre aktiviteter:

- 1) Udvikling af vejrradarbaserede prognosemetoder designet vandsektorens specifikke behov.**
- 2) Implementering af vejrradarprognoser i VeVa's online løsninger samt formidling heraf.**
- 3) Test og demonstration af VeVa's radarnedbør og realtidsprognoser via cases hos forsyningspartnerne.**

Projektets udviklingsaktiviteter (del 1) er gennemført med udgangspunkt i forsyningsparternes behov og erfaringer, samt på baggrund af de C- og X-bånds radardata, som er tilgængelige via VeVa. Aalborg Universitet har stået for den konkrete metodeudvikling af radarbaserede nedbørsforudsigelser målrettet vandsektoren. Udviklingsaktiviteterne i denne del af projektet har bestået af følgende:

- Udforskning af opportunistiske afstrømningsmålinger og regnsensorer til justering vejrradardata og prognosevalidering.
- Udvikling af vejrradarbaserede prognosemetode designet forsyningernes specifikke behov, som kan implementeres i og udbredes af VeVa.
- Design og udvikling af robuste realtidsanalyser af vejrradardata og vejrradarprognoser samt udvikling af metoder til effektiv visualisering af resultater og datakvalitet målrettet forsynings planlægning og drift.

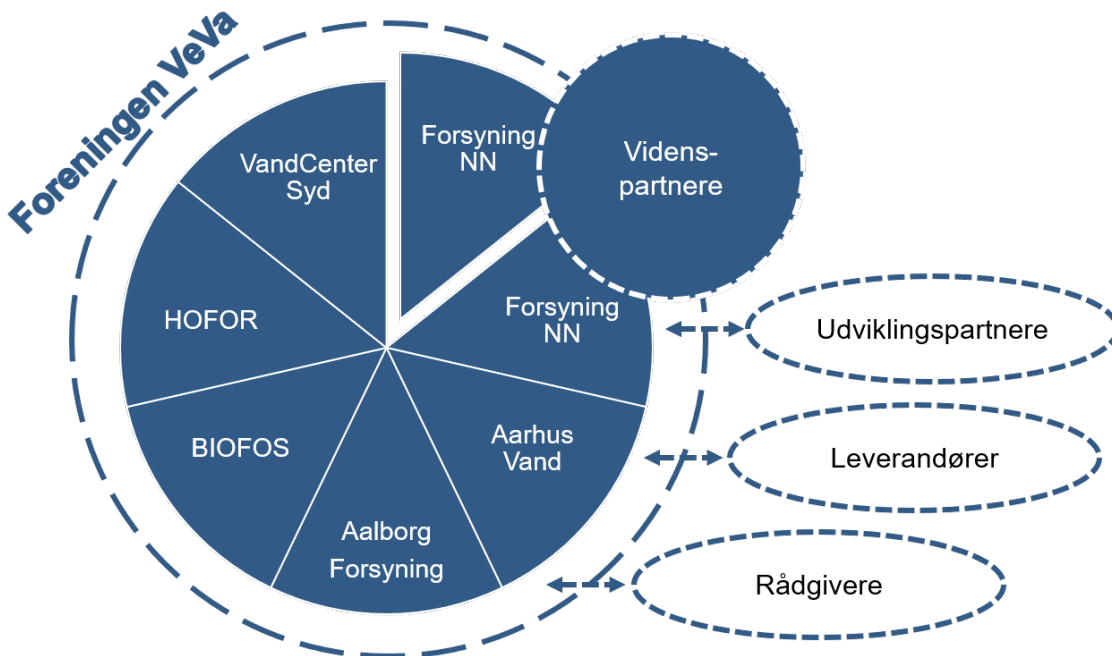
Projektets implementeringsaktivitet (del 2) har ligeledes taget udgangspunkt i forsyningsparternes behov og erfaringer. VeVa's online løsninger er blevet videreudviklet til at kunne

afvikle og formidle de udviklede vejrradarbaserede nedbørsprognoser fra del 1. VeVa har haft ansvaret for denne del af projektet og implementeringen er foregået i koordineret samarbejde med EnviDan og Dryp. Implementering i VeVa sikrer, at RADIATE projektets metoder og resultater er tilgængelige for branchen for fremtiden.

Projektets test og demonstrations aktiviteter (del 3) er foregået hos projektets forsyningspartnere og gennemført med udgangspunkt i den enkelte forsyningspartners behov og ønsker. Projektets test og demonstrations aktiviteter har været koordineret af VeVa og denne del af projektet har haft til formål, dels at sikre forsyningspartnernes gavn af projektet, men også for at skabe et referencekatalog for anvendelser af vejrradardata og vejrradarprognose ved vandselskaber til gavn for branchen og VeVas fremtidige virke.

Teamet bag projektet består af fem forsyninger af VeVa (Aarhus Vand, Aalborg Forsyning, VandCenter Syd, BIOFOS og HOFOR) samt Aalborg Universitet (Institut for Byggeri, By og Miljø), Envidan, Dryp og Foreningen VeVa.

Partnernes roller i projektet er defineret med afsæt i Foreningen VeVas partnerskabsmodel, som er illustreret på Figur 3. Ift. illustrationen og i dette projekt er Aalborg Universitet en videnspartner, og EnviDan og Dryp er udviklingspartnere.



Figur 3: Illustration af partnerskabet i Foreningen VeVa vist sammen med relationerne til videnspartnere, udviklingspartnere, leverandører og rådgivere. Illustrationen er vist med de fem founder forsyninger af VeVa.

Projektets tre overordnede aktiviteter har tjent som projektets primære arbejdsplaner, hvor Aalborg Universitet har været ansvarlig for den første (udvikling), og Foreningen VeVa har været ansvarlige for de andre (implementering og formidling, samt test og demonstration).

Aalborg Universitets rolle som videns- og udviklingspartner i projektet har været centreret om projekts metodeudvikling af radarbaserede nedbørsforudsigelser målrettet vandsektoren. Gennem anvendelsesorienteret forskning har Aalborg Universitet undersøgt og valideret eksisterende meteorologiske radarprognose principper til afløbsteknisk anvendelse og udvikle radarbaserede nedbørsprognosemetoder målrettet VeVa medlemmernes use-case. Ydermere er det Aalborg Universitets rolle i projektet at formidle projektets videnskabelige indhold og resultater nationalt og internationale gennem videnskabelige tidsskrifter og konferencer.

Envidan og Dryp har deltaget i projektet som udviklingspartnere, hvor de har assisteret Foreningen VeVa i implementering af de udviklede metodikker. Arbejdet har været centreret omkring operationalisering og teknologimodning.

Foreningen VeVa har haft det overordnede ansvar for operationalisering og implementering af de udviklede metodikker, samt været koordinator ift. forsyningspartnernes test og demonstrationscases. Dette inkl. løbende opsamling på behov og krav til udviklede metodiker, så det sikres, at det udviklede er værdiskabende for de deltagende forsyningselskaber og vandsektoren, når det implementeres i VeVas online løsninger.

De fem forsynings rolle i projektet er som end-users, og de har dermed fokus på, hvordan det udviklede bringes i anvendelse i vandsektoren, samt hvordan Foreningen VeVa bliver udbredt til flere forsyninger og dermed kommer hele vandsektoren til gavn. I tillæg hertil har Aarhus Vand været hovedansøger til projektet. Malte Ahm, ved Aarhus Vand, har været den overordnede projektleder og kontaktperson til VUDP. Yansi Mary Jesuloganathan og Rasmus Laursen har stået for koordineringen mellem parterne, samt forankringen af projektet i Foreningen VeVa for at sikre den varige værdiskabelse af projektet.

4 Projektets betydning for vandbranchen

Gode og pålidelige estimater af nedbørens stedlige og tidslige fordeling er essentielt for vandsektorens digitalisering og daglige arbejde i forbindelse med drift, vedligeholdelse, sårning, udbygning og klimatilpasning af landets afløbssystemer, overfladeløsninger og renseanlæg. Langt de fleste prioriteringer for en moderne forsynings regn- og spildevandssystem er nedbørsrelaterede. Det må derfor erkendes, at der i dag træffes store samfundsøkonomiske beslutninger baseret på et ufuldkomment datagrundlag. Klassiske regnmålere giver kun et delvist billede af nedbørens fordeling, men er samtidig vigtige for at kunne justere vejrradardataene til vandsektorens anvendelser. Vejrradarer kan derfor ikke i sig selv erstatte regnmålere, men kombinationen af disse datakilder forøger værdien væsentligt.

Formålet med VUDP-projektet "RADIATE" er at opbygge den viden, som er nødvendig for at gøre vejrradarbaserede nedbørsprognoser nemt anvendelige og let tilgængelige for hele vandsektoren, samt demonstrere anvendelsen af disse operationelt på et prototypestadie. RADIATE projektet bygger ovenpå det allerede eksisterende fundament i Foreningen VeVa, og erfaringer og læringen fra det tidligere VUDP VeVa projektet (Ahm et. al, 2020).

Opdateret information om den aktuelle og nært forestående nedbørsbelastning af vandsystemerne er essentielt for at øge forsynings sikkerheden og tilføre miljøforbedring. Nedbørsforudsigelserne i RADIATE projektet bidrager hertil ved at estimere nedbørens belastning i den nære fremtid. Med præcise nedbørsforudsigelser er det muligt øget robusthed af regn- og spildevandstekniske anlæg. Dette kan f.eks. opnås ved at styre forsinkelsesbassiner, så tømningen koordineres på baggrund af afløbssystemets og/eller renseanlæggets aktuelle kapacitet, hvorved nødoverløb og evt. oversvømmelser reduceres og systemets funktionskriterie overholdes i en større del af tiden.

Præcise nedbørsforudsigelser er også værdifulde i tørvejr, da mange service og reparations opgaver f.eks. af pumpestationer kan resultere i nødoverløb, hvis det under arbejdet begynder at regne i oplandet. Med opdateret information om tørvejr i oplandet, er det ligeledes muligt hurtigt at identificere driftstop på en pumpestation, hvis der registreres overløb uden regn i oplandet. Præcise nedbørsprognoser bidrager med beslutningsstøtte til forsynings selskaberne i kritiske nedbørssituationer, hvor proaktive beslutninger og prioriteringer er nødvendige for at reducere omfanget af oversvømmelser i byen.

RADIATE projektets resultater er ved projektets afslutning overdraget til Foreningen VeVa, som vil varetage den fremadrettede governance og videreudvikling. Denne samtænkning af projekt og governance struktur skal understøtte:

- a) En åben standard for vejrradardata til hydrologiske og hydrauliske applikationer med tilhørende kvalitetssikret og justeret vejrradardataformat, som kan anvendes uden vejrradar-ekspertviden.
- b) Rammerne for et åbent økosystem med klart defineret datainterfaces og API'er for at opnå bedre sammenhæng mellem udviklede applikationer på tværs af udviklingspartnere, leverandører og rådgivere.
- c) En vedvarende governance, som videreudvikler og vedligeholder datamodeller, -formater og -processeringsinfrastruktur mv.
- d) En videns- og erfaringsbank for brugen af vejrradardata til hydrologiske og hydrauliske formål i vandsektoren og facilitere et fagligt netværk for VeVa medlemmer.
- e) Være med til at drive forskning og udvikling i anvendelsen af vejrradardata.

Kort opsummeret; accelererer udbredelse og anvendelse af vejrradardata til alle nedbørsrelaterede opgaver fra kundesupport til planlægning, dimensionering, klimatilpasning og styring i vandsektoren.

4.1 Marked og anvendelsesmuligheder

Markedet for og anvendelsesmulighederne af den udviklede teknologi i dette projekt strækker sig fra drift, vedligeholdelse, sanering, udbygning samt klimatilpasning af landets afløbssystemer, overfladeløsninger til renseanlæg mv., da alle disse opgaver er nedbørsrelaterede.

RADIATE tilfører miljøforbedringer og højner forsyningssikkerheden gennem øget robusthed af regn- og spildevandstekniske anlæg. Forudsigelse af den fremtidige hydrauliske belastning, som vejradarprognoser muliggør, giver tid til at forberede systemet til belastningen. Denne forberedelsestid er kritisk for f.eks. omstilling til regn-drift på renseanlægget, som gør at anlægget er i stand til at behandle den tilstrømmende vandmængde, hvorved bypass og overløb reduceres. Forberedelsestid er også kritisk for f.eks. at aktivere beredskab til oversvømmelser. Ligeledes kan en rettidig, tidlig og kontrolleret tømning af regnvandsbassiner forebygge nødoverløb og sikre en bedre udnyttelse af bassinet.

RADIATE giver mulighed for at også små og mellemstore forsyninger udenfor projektet direkte kan drage nytte af projektets resultater gennem Foreningen VeVa, hvorved miljøforbedringer og øget forsyningssikkerhed gennem anvendelse af vejradarprognoser ikke kun vil være forbeholdt landets største forsyninger.

RADIATE projektets resultater giver også eksportmuligheder for Foreningen VeVa i samarbejde med private aktører, da radarprognose-teknologien er direkte overførbart til det internationale forsyningsmarked.

Ved projektets afslutning er medlemmerne af Foreningen VeVa allerede i gang med at implementere resultaterne på forskellige vis i egne organisationen. Eksempler på dette kan findes i rapportens use case bilag.

Centralt for forsyningernes tiltag er, at de alle har til formål at bidrage til effektivisering, kvalitetsforbedringer, miljø- og klimaforbedring og forsyningssikkerhed for vandforsynings-selskaber.

RADIATE projektet bidrager til **Effektivisering** og **Professionalisering** i vandsektoren, da realtidspregninger for nedbøren muliggør en mere effektiv udnyttelse af eksisterende afløbs- og spildevandstekniske anlæg. Projektets resultater giver mulighed for store økonomiske og ressourcemæssige besparelser. Gennem en mere effektiv udnyttelse af eksisterende afløbs- og spildevandstekniske anlæg, reduceres behovet for nye anlæg og/eller anlægsudvidelser og opgraderinger til gavn for klima og miljø og i sidste ende forbrugernes vandpris. Væsentligt er også, at RADIATE muliggør at nye udbygninger og fremtidige renoveringer af vand-systemerne fra starten kan udvikles med styring indbygget i designet med henblik på at øge sikkerheden, forbedre driften, mindske miljøbelastningen og reducere fremtidige anlægsinvesteringer.

Effektivisering er den grundlæggende motivation bag forsynings-samarbejdet i Foreningen VeVa. Gennem samarbejde om udviklingen af generelle radardata baserede forsyningsorienterede værktøjer, reduceres investeringen i vejradarteknologi samt at samarbejdet og erfaringsudvekslingen mellem forsyninger øges. For at indløse effektiviseringspotentialerne arbejder foreningens medlemmer løbende med **kvalitetsforbedringer** af data og anvendelser, da det kan bidrage til væsentlige **kvalitetsforbedringer** af vandforsynings-selskabernes arbejdsområder og -opgaver.

Kvalitetsforbedringerne, som der har været fokus på i RADIATE projektet, er at øge præcisionen af nedbørsestimater og nedbørsforudsigelser til forsynings-selskaberne. Håndtering af nedbørsafstrømning i afløbssystemer og spildevandstekniske anlæg er centralt for vandsektoren og en vigtig komponent i digitalisering og modellering. Præcise nedbørsestimater og forudsigelser har potentiale i forbedring af kvaliteten i den daglige drift, vedligeholdelse, sanering, udbygning og klimatilpasning. Prognosebaseret styring af renseanlæg bidrager til kvalitetsforbedringer i form af reduceret miljøbelastning fra bypass gennem optimal omstilling til regn-drift. Prognosebaseret styring af afløbssystemer, gør det muligt at reducere de aflastede vand- og stofmængder fra overløb, samt i kritiske situationer at prioritere overløb

til recipienter med størst robusthed eller mindst påvirkning af badevand. Varsling af ekstremnedbør muliggør samtidig en tidlig varsling om oversvømmelser og derigennem bedre service for vandselskabernes kunder. Ydermere underbygger RADIATE projektet dokumentationen for nedbørens omfang og effekt på spildevandssystemet, og vil forbedre designet af fremtidens vandsystemer.

Effektivisering, Professionalisering og kvalitetsforbedringer bidrager alle til forbedringer inden for DANVA's fokusområder for **Vand, Natur og Klima**. Projektets resultater giver vandselskaberne nye muligheder for at forudsige vandsystemers belastning til styring, modellering og varsling til gavn for drift, vedligeholdelse, sanering, klimatilpasning af afløbssystemer, overfladeløsninger og renseanlæg. Dette underbygger bedre udnyttelse af spildevandsteknisk infrastruktur og anlæg, hvorved der opnås større beskyttelse af natur og vandmiljø og større robusthed mod fremtidens nedbørsklima med reducerede CO₂-emissionskrævende udvidelser af kloaksystemet.

Realtidsmodellering, varsling og styring giver beslutningsstøtte og handlemuligheder i kritiske situationer, hvor korrekt prioritering er nødvendig for at afbøde skadernes omfang på natur, miljø og urbane områder. RADIATE projektet bidrager til opfyldelse af FN's verdensmål gennem potentialet for: (**SDG 6**) at forbedre spildevandsrensning og vandkvalitet, (**SDG 13**) at styrke robusthed og tilpasningsevne til fremtidens klima, (**SDG 14**) at reducere vandmiljøbelastning og (**SDG 15**) at reducere og prioritere recipientbelastning. Herudover (**SDG 17**) gennem styrket og udvidet partnerskab samt teknologioverførsel og viden gennem Foreningen VeVa.

4.2 Næste skridt

Projektet er bevidst forankret i **Foreningen VeVa**, for at sikre implementering og videreudvikling. Formålet med formaliseringen via en forening er at åbne samarbejdet op, så alle vand- og spildevandsforsyningselskaber i Danmark kan blive medlemmer, samt etablere et framework for, hvordan VeVa kan indgå i partnerskaber med videnspartnere, udviklingspartnere, leverandører og rådgivere. Kravet er dog, at medlemmer og partnere allerede anvender eller vil anvende vejrradardata og vil deltage i den videre udvikling af anvendelsen af vejrradardata til gavn for vandsektoren.

Det er foreningens formål at **formidle vejrdata til medlemmerne** i en kvalitet og form, som kan skabe et så optimalt grundlag som muligt for medlemmernes kortsigtede og langsigtede drifts- og investeringsbeslutninger i medlemmernes hovedvirksomhed. Foreningen skal sikre, at vejrdataene er tilgængelige for medlemmerne via online applikationer.

Foreningen skal **vedligeholde og videreudvikle den software, de datamodeller og algoritmer mv.**, som foreningen ved stiftelsen har fået overdraget fra stifterne af foreningen. Foreningen kan desuden udvikle nye applikationer og skal i givet fald stille disse til rådighed for medlemmerne som en del af medlemskabet og kontingentbetalingen.

Foreningen er en ikke-erhvervsdrivende forening, og foreningens økonomi skal **hvile i sig selv**, så foreningens udgifter dækkes af medlemmernes kontingentbetalinger. En del af foreningens indtægter i form af kontingentindbetalinger skal **anvendes til forskning og (videre)udvikling af datamodeller, algoritmer og applikationer mv. med henblik på at optimere den service og platform**, som foreningen skal tilbyde medlemmerne.

Foreningen **udøver ikke erhvervsmæssig virksomhed** og kan ikke sælge eller stille ydelser og services til rådighed for andre end sine medlemmer.

I 2024 vil Foreningen VeVa starte aktiv formidling af sit budskab og løsninger med henblik på at udvide antallet af medlemsforsyninger, samt arbejde aktivt ind i de syv VeVa use case, som er vedlagt denne rapport.

Foreningen VeVa's vedtægter og den udviklede infrastruktur er udformet således, at der kan bygges kommercielle løsninger oven på denne platform. Foreningen vil løbende se nærmere på forretningsgørelse og eksport af konceptet. I første omgang vil der være fokus på samarbejde og udbredelse til vores nærmeste naboer i Skandinavien.

4.3 Formidlingsplan

RADIATE projektets resultater er formidlet gennem såvel nationale som internationale formidlingskanaler:

- Online Tech talk omkring foreningen VeVa og RADIATE i samarbejde med DNNK. Januar 2021. <https://www.dnnk.dk/event/tech-talk-en-verden-i-forandring-ned-boer-nu-i-dag-i-gaar-og-i-fremtiden-hvordan-haandterer-vi-vejrd-data-i-vandsektoren-veva/>
- Artikel i Dansk Vand magasinet: Ny måde at bruge vejrradardata på. <http://www.e-pages.dk/danva/246/> (side 44-46). August 2021.
- Bidrag til DMI's pressemeddelelse omkring åbne data, og hvordan disse data kan hjælpe vandsektoren, december 2021. <https://www.dmi.dk/nyheder/2021/kampen-mod-oversvommede-kaldre-oprustes-med-frie-radardata/>
- Præsentation til H22 City Expo, Helsingborg, Sverige, juni, 2022.
- Præsentation til IWA World Water Congress & Exhibition, København, Danmark, September 2022.
- Præsentation til SMHI Workshop on high-resolution rainfall observations with different sensors and for different applications, Norrköping, Sverige, April 2023.
- Præsentation til OpenSense workshop on opportunistic rainfall sensors, Krakow, Polen, Juni 2023.
- Videnskabelig artikel udgivet i Atmospheric Research. Janni M. Nielsen, Remco C.Z. van de Beek, Søren Thorndahl, Jonas Olsson, Christoffer B. Andersen, Jafet C. M. Andersson, Michael R. Rasmussen, Jesper E. Nielsen, 2024. Merging weather radar data and opportunistic rainfall sensor data to enhance rainfall estimates. Atmospheric Research, vol 300, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107228>
- Videnskabelig artikel udgivet i Journal of Hydroinformatics. Janni M. Nielsen, Michael R. Rasmussen, Søren Thorndahl, Malte K. S. Ahm, Jesper E. Nielsen, 2024 Can stormwater runoff measurements be used for weather radar rainfall adjustment?, 26(5), <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.172>
- Præsentation til European Junior Scientists Workshop, Saint Maurice en Valgaudemar, Frankrig, Maj 2024
- 2 præsentationer til IWA World Water Congress & Exhibition, Toronto, Canada, August 2024.

Formidlingen af RADIATE projektets resultater vil fremadrettet være en integreret del af Foreningen VeVa's virke, samt indgå i Aalborg Universitets forskningsformidlinger. Formidlingen vil både ske via faglige netværk samt i nationale og internationale tidsskrifter.

5 Projektet

VUDP-projektet "RADIATE – Radarprognoser til vandsektoren" har forløbet fra den 1. januar 2021 til den 30. november 2023, og har haft et samlet budget på 2,5 mio. kr. Projektet bygger oven på de fundamentale projektresultater etableret gennem VUDP-projektet "Vejrradardata – tilpasset og klar til anvendelse for hele vandsektoren og deres kunder".

Flere af parterne i projektet har valgt at øge deres bidrag til projektet i løbet af projektperioden, hvorved det samlede realiserede budget for projektet er ca. 3 mio. Parallelt har parterne i projektperioden investeret ca. 5 mio. yderligere i relateret forskning, udvikling, operationalisering og implementering, samt i test, demonstration og formidling via Foreningen VeVa og egne organisationer.

5.1 Formål

Formålet med VUDP-projektet "RADIATE – Radarprognoser til vandsektoren" har været at udvikle og tilbyde nedbørsprognoser gennem Foreningen VeVa til gavn for vandbranchen. Aktiviteterne i RADIATE projektet har overordnet været inddelt i følgende tre overordnede elementer:

- 1) Udvikling af vejrradarbaserede prognosemetoder designet vandsektorens specifikke behov, samt metoder til at anvende opportunistiske nedbørsobservationer til justering af radardata i områder med få eller ingen officielle regnmålere.**
- 2) Implementering af vejrradarprognoser i VeVa's online løsninger (cloud infrastruktur, processeringskæde samt data- og visualiseringsplatform) samt formidling heraf.**
- 3) Test og demonstration af VeVa's radarnedbør og realtidsprognoser via cases hos forsyningspartnerne.**

Disse tre overordnede aktiviteter har bidraget til at udvide Foreningen VeVas service til også at inkludere vejrradarbaserede nedbørsprognoser, for herigennem at gøre nedbørsprognoser operationelle og tilgængelige til hele vandsektoren gennem VeVas landsdækkende service.

Foreningen VeVas ambition er at udbrede anvendelsen og værdien af højopløselige vejrradardata, vejrradar baserede nedbørsestimer, og vejrradar baserede nedbørsprognoser til vandsektoren. Før Foreningen VeVa og RADIATE projektet eksisterede der ikke tilgængelige radardataprodukter eller vejrradarprognoser anvendelige for den danske vandbranche. Derfor var anvendelsen af vejrradarnedbør og radarbaserede nedbørsprognoser forbeholdt en snæver skare primært bestående af de største forsyningsvirksomheder i Danmark. RADIATE projektet udfylder dette behov i branchen og har været med til sikre et forsat samarbejde mellem forsyningsvirksomheder, universiteter og rådgivere i vandsektoren, og dermed at nye og fremtidige ideer, metoder og anvendelser kan deles gennem VeVa til glæde for alle.

5.2 Output

Ved udgangen af projektet er det muligt for Foreningen VeVa at producere radarbaserede nedbørsprognoser baseret på RADIATE NOWCAST til dets medlemmer. Nowcasteren er udviklet og designet til at fungere sammen med VeVas eksisterende radardata processeringskæde og opererer derved direkte på VeVa's radardataprodukter i VeVaDAM h5-formatet.

RADIATE NOWCAST kan prognosticere radarnedbør for forsyningernes egne X-bånds vejrradarer, DMI's C-bånds vejrradarer og for kompositter af flere vejrradarer (X- og C-bånd). Med RADIATE NOWCAST er VeVa således i stand til at levere radarnedbørsprognoser for hele Danmark, og potentielt hele Skandinavien.

I projektet er radardataværktøjet RADIATE KAMA udviklet. RADIATE KAMA er udviklet i tæt samarbejde med forsyningsparterne i projektet og baseret på behov defineret af dem. RADIATE KAMA er baseret på analyser af vejrradardata og vejrradarprognoser i realtid. Via en effektiv visualisering af analysens resultater bringes relevante radardata og prognoser i direkte anvendelse til drift og forsyningsformål. RADIATE KAMA værktøjet er i projektet demonstreret på et prototypestadie for et enkelt forsyningsområde, Aalborg Forsyning.

Ved afslutningen af projektet er der opbakning blandt Foreningens VeVas medlemmer til videreudvikling af RADIATE KAMA til et MVP (minimal viable product) stadie inkl. operationalisering og implementering som en del af VeVas online services, hvorved RADIATE KAMA gøres tilgængelige for alle medlemmer.

Arbejdet med opportunistiske nedbørsmålinger på baggrund af telemastdata, private vejrstationer og niveaumålinger i regnvandsbassiner, har vist, at der er et stort potentiale for at anvende opportunistiske nedbørssensorer i kombination med vejrradar.

Det er demonstreret, at opportunistiske nedbørsmålinger kan bidrage til opnå mere pålidelige nedbørsestimater, når disse fusioneres med vejrradardata. Dette er på trods af, at den enkelte opportunistiske nedbørsmåling ofte er forbundet med væsentligt større usikkerhed end hvad der normalt forventes af SVK-regnmålere.

Det er vist, at opportunistiske nedbørsmålinger, på grund af det høje antal af observationspunkter, kan anvendes til at sikre datakvaliteten af radarnedbør til samme niveau, som ved anvendelse af SVK-netværket. Arbejdet har resulteret i udvikling af metoder til automatisk sanering og kvalitetssikring af opportunistiske nedbørsmålinger og metoder til fusion og justering af radarnedbør. Det er dermed gjort muligt at anvende opportunistiske nedbørsmålinger i områder med få eller ingen SVK-regnmålere. Det er dog vigtigt understrege, at disse metodikere er udviklet til 'proof-of-concept' og er således stadig på forsøgsstadiet. En evt. fremtidig operationalisering og implementering i VeVa ligger udover projektet.

Projektets forsyningspartnere har arbejdet med specifikke cases (VeVa Cases), for anvendelse af radardata og prognoser til drift og forsyningsformål. Dette har resulteret i seks velbeskrevne anvendelses cases samt en syvende "bonus case" fra NSVA, som tilsammen udgør en status for forsyningspartnere arbejde med anvendelse af radardata, samt demonstrere værdien af og sætter retning for den fremtidige videreudvikling af vejrradardata og prognose applikationer i Foreningen VeVa.

5.3 Projektresultater

Opsummeringen af projektets resultater er valgt inddelt i seks afsnit. Første afsnit omhandler den nowcast, som er udviklet og demonstreret i projektet, og andet afsnit omhandler det udviklede værktøj KAMA, hvis formål er at bringe nedbørsdata og nedbørsprognoser baseret på vejrradardata i anvendelse i forsyningernes drift og planlægningen heraf.

Tredje, fjerde og femte afsnit omhandler resultaterne fra arbejdet med opportunistiske nedbørsmålninger, og hvordan disse kan bruges til at forbedre og validere nedbørsestimater og nowcast. Sidste afsnit opsummerer de use cases (VeVa cases), som forsyningerne har arbejdet med i løbet af projektperioden.

5.3.1 RADIATE NOWCAST

Der er i projektet udviklet en radar nowcaster, der leverer vejrradardata baseret forudsigelser af nedbør. RADIATE NOWCAST er udviklet i tæt samarbejde med VeVa, og er designet til at operere og fungere sammen med VeVa's radardataprocesseringskæde.

Radarprognoserne produceres på baggrund af VeVa's producerede radardataprodukter og opererer direkte på VeVa's VeVaDAM H5-format. På baggrund af VeVa's processerede radar-data og radar kompositter, evaluerer RADIATE NOWCAST nedbørens bevægelse og prognosticerer herudfra nedbøren op til to timer frem gennem Co-Trec metoden (Thorndahl & Rasmussen, 2013).

Den udviklede nowcaster i projektet, producerer forudsigelser af nedbøren for hele Danmark i en spatial opløsning på 500x500m og med en tidslig opløsning på 1 minut. Fremskrivningshorisonten er 120 minutter. I projektet har det været prioriteret, at nowcasterens grid-produkter følger grid-definitionerne i det Danske Kvadratnet (Danmarks Statistik, 2019), hvorved dataene er bedre geografisk orienteret ift. andre typer af data, som forsyningerne anvender.

RADIATE NOWCAST er udviklet med en stor grad af fleksibilitet, og kan producere nedbørsforudsigelser på national skala, på baggrund radar komposit data fra flere radarer (C- og X-bånd), men kan også producere nedbørsforudsigelser på lokal skala på baggrund af en enkelt C- eller X-båndsradar. Den operationelle modenhed vurderes at være på prototype / MVP-stadiet, hvilket var målet indenfor projektets ramme. Videre operationel modning ligger uden for projektet og vil blive varetaget af VeVa.

Som led i udviklingen af RADIATE NOWCAST er en prototype til et nyt VeVaDaMnowcast H5-format udviklet. I dette nye format er det muligt at lagre en komplet nowcast-forudsigelse inklusiv den seneste radar observation, hvorved dette format muliggør en systematiseret arkivering af nowcasterens nedbørsprognoser. Dataformatet indeholder udover selve prognosen også relevante metadata herfor. Det forventes at prototype formatet, med små justeringer kan modnes til det endelige og standardiserede VeVaDaMnowcast H5-format til udveksling af nedbørsforudsigelser baseret på RADIATE NOWCAST.

RADIATE NOWCAST er i projektet implementeret og integreret i VeVa's datahåndtering og radardata processering, hvormed radar baserede nedbørsprognoser gennem RADIATE projektet er blevet tilgængelige for Foreningen VeVas medlemmer i realtid. Ydermere, er nedbørsprognoser fra RADIATE NOWCAST implementeret i demonstrationsapplikationen RADIATE KAMA, hvor nedbørsanalyser af nedbørsprognosen udstilles og opdateres i realtid.

5.3.2 RADIATE KAMA

I RADIATE projektet er radardataværktøjet RADIATE KAMA udviklet, som har til formål at bringe vejrradardata og vejrradarprognoser i anvendelse til drift og planlægning gennem radardata- og prognoseanalyser. RADIATE KAMA er udviklet til at levere kvantitativ radar-

datainformation i realtid til drift og forsyningsformål. Værktøjet er udviklet til et prototype-stadie i projektet. Videre operationel modning ligger uden for projektet og vil blive varetaget af VeVa.

RADIATE KAMA er en demonstration af anvendelsen af analyseret radardata, og er udviklet i tæt samarbejde og ud fra ønsker og behov defineret af projektpartnerne i RADIATE. Værktøjet er i regi af RADIATE projektet udviklet for et enkelt forsyningsområde (Aalborg Forsyning) for at demonstrere potentialet og mulighederne for anvendelse af radardata og radarprognoser til forsyningsformål.

For at sikre anvendeligheden af KAMA, indeholder værktøjet få men relevante dataanalyser. Dette gør, at brugeren har mulighed for let at visualisere den ønskede analyse uden besvær grundet for mange irrelevante muligheder. Datavisualiseringen i KAMA foregår gennem en webbrowser, hvorved værktøjet er gjort lettilgængeligt.

RADIATE KAMA er opdelt i 3 separate dele:

- 1) *KAMA Radiate: Regn*, som indeholder radaranalyser på reeltidsdata.
- 2) *KAMA Radiate: RegnArkiv*, som indeholder radaranalyse på historisk data.
- 3) *KAMA Radiate: RegnPrognose*, som indeholder analyser af prognosticeret radar-data.

KAMA Radiate – Regn og RegnArkiv indeholder 5 forskellige radaranalyser:

- 1) Regndybde
- 2) Skybrudsanalyse
- 3) 10 minutters maksimal intensitet, med tilhørende gentagelses periode.
- 4) 30 minutters maksimal intensitet, med tilhørende gentagelses periode.
- 5) 60 minutters maksimal intensitet, med tilhørende gentagelses periode.

KAMA Radiate - RegnPrognose indeholder 6 forskellige radaranalyser:

- 1) Regndybde
- 2) Skybrudsanalyse
- 3) 10 minutters maksimal intensitet, med tilhørende gentagelses periode.
- 4) 30 minutters maksimal intensitet, med tilhørende gentagelses periode.
- 5) 60 minutters maksimal intensitet, med tilhørende gentagelses periode.
- 6) Tørvejranalyse

Gennem denne online visualisering er det hurtigt og effektivt at navigere frem til den relevante analyse. I det designede webinterface har det været centralt at kunne kommunikere dataanalysernes resultater effektivt og entydigt. Dette har resulteret i at analyserne visualiseres gennem specialdesignede farveskalaer, som er specifikke for hver analyse. Farveskalaerne er kraftigt ikke-lineære, hvilket muliggør visualisering af kraftig og let nedbør med samme skala. Ydermere er farveskalaerne bestående af flere farvepaletter, hvor overgangene mellem paletter er valgt ud fra hvilke værdier, der er yderst relevante at skelne mellem i forsyningsformål.

I designet af RADIATE KAMA har der været fokus på at inkludere regnmålerobservationer som en integreret del af værktøjet, med det formål at sikre brugerens tillid til værktøjets troværdighed. Dette er gjort ved at gøre det let for brugeren gennem RADIATE KAMA at sammenligne radardataene med jordobservationer. SVK-stationer fremgår som røde prikker på kortet i RADIATE KAMA, og ved at klikke på den enkelte SVK-station er det muligt at se

tidsserien samt akkumuleret nedbør målt af den enkelte regnmåler. Foruden regnmålerdata angives radarmålt nedbør i den pixel, som dækker regnmåleren, hvorved det simpelt og effektivt er muligt at vurdere, hvor godt de målte radardata passer med SVK-observationen.

I Bilag 4 findes en detaljeret beskrivelse RADIATE KAMA.

Det er af VeVa besluttet at RADIATE KAMA skal implementeres permanent i VeVa og derved gøres tilgængelig for alle VeVa's medlemmer. Som tidligere beskrevet, så ligger den videre operationelle modning udenfor projektets ramme.

5.3.3 Opportunistiske nedbørsmålinger i RADIATE

Jordobservationer af nedbøren er nødvendige for at opnå pålidelige radarobservationer for hydrologiske og hydrauliske anvendelser i vandsektoren. I Danmark har vi SVK-netværket, som måler punktnedbør med høj præcision. Sammenlignet med andre lande er densiteten af SVK-netværket forholdsvis højt, men ikke desto mindre er der områder i Danmark med ingen eller kun få SVK-regnmålere. SVK-netværket er ujævnt fordelt og primært koncentreret omkring byområder. Denne inhomogenitet i jordobservationer har uundgåeligt en effekt på kvaliteten og pålideligheden af regnmåler-justeringen af radarnedbør. Derfor er det i RADIATE undersøgt, om opportunistiske (alternative) nedbørssensorer kan anvendes som supplement til SVK.

En nøjagtighed og præcision svarende til den, der opnås med SVK-stationer, kan ikke forventes ved brug af billigere eller mere lettilgængelige regnobservationer. Dog kan andre typer regnobservationer være med til at øge densiteten af jordobservationer, og såfremt en tilstrækkelig kvalitet kan opnås, er det muligt, at de i kombination med SVK-stationer kan forbedre vejrradarobservationer i områder med få eller ingen SVK-måler.

I RADIATE er regnmålinger fra private vejrstationer fra Netatmo (Personal Weather Stations, PWS) og signaldæmping mellem telemaster (Commercial Microwave Links, CML) undersøgt. Fælles for PWS og CML er, at densiteten er mange gange højere end SVK-netværket. I Danmark er der i alt ca. 200 SVK-stationer, mens der til sammenligning er ca. 7.000 Netatmo PWS-stationer og op mod 10.000 CML-forbindelser. Fælles for CML og PWS er dog også at kvaliteten af nedbørsmålingen med de to systemer med størst sandsynlighed er ringere end, hvad der kan forventes af SVK-systemet.

Bilag 1 beskriver, hvordan data fra PWS og CML i RADIATE projektet er undersøgt og analyseret for et caseområde i Danmark, som dækker Nordøst Sjælland inklusive København. I dette casestudie er der anvendt data fra ca. 1100 Netatmo-stationer, 190 CML-forbindelser og 70 SVK-stationer over en periode på et år. Bilaget indeholder også en detaljeret beskrivelse af måleprincipperne for nedbørsmåling for hhv. Netatmo og telemastdata. Endvidere indeholder bilaget resultaterne af laboratorie test af 5 Netatmo regnmålere.

Konklusionen på dette arbejde er, at opportunistiske regnmålinger fra Netatmo og CML, som udgangspunkt indeholder rigtig mange fejl og utroværdige målinger, men at den høje densitet af målepunkter muliggør automatisk kvalitetskontrol, som kan forbedre de opportunistiske målinger. Det har desuden vist sig muligt at tilpasse og kvalitetskontrolmetodikken af de Vos et al. (2019) til at fusionere de to typer af opportunistiske regnmålinger til ét datasæt, som præsterer bedre end de to individuelle datatyper med kvalitetskontrol.

Det er konklusionen, at der er et potentiale i at anvende disse to typer af opportunistiske regnmålinger, og dermed muligt at gøre brug af disse data. Det skal i denne sammenhæng noteres at CML data, generelt er væsentligt mere kompliceret at arbejde med end data fra Netatmo.

5.3.4 Justering af radardata med opportunistiske regn sensorer

De opportunistiske regnmålinger fra Netatmo og CML er i RADIATE projektet blevet anvendt til justering af radardata, for herigennem at undersøge, hvorvidt det er muligt at opnå en sammenlignelig radardatakvalitet, som ved justering på baggrund af SVK-data.

Med udgangspunkt i caseområdet, som dækker Nordøst Sjælland inklusive København, er de opportunistiske regnmålinger fra Netatmo og CML anvendt til at justere radardataene fra DMI's C-bånds radar på Stevns. Resultatet heraf er sammenlignet med nedbørsobservationerne fra SVK-netværket. Bilag 2 indeholder en mere detaljeret beskrivelse af analysen.

Det unikke ved denne tilgang er, at radardata-justeringen er foretaget uden brug af SVK-data, som derimod udelukkende er anvendt til at validere radardatajusteringen. Normalt er dette ikke muligt, da der ikke er SVK-stationer nok til at sikre en stabil justering og uafhængig validering. Den høje densitet af opportunistiske regnmålinger i kombination med uafhængige SVK-målinger, gør det ydermere muligt at evaluere radardata justering, som er spatialt fordelt. I bilag 2 er de tre undersøgte justeringsmetoder beskrevet nærmere. Herunder MMB-metoden (Moving Median Bias), som er udviklet i RADIATE projektet.

Resultaterne demonstrerer, at der er et stort potentiale i at anvende opportunistiske regnmålinger til radardatajustering. Konklusionen er, at tiltros for at opportunistiske regnmålinger, selv efter automatisk kvalitetskontrol, sandsynligvis indeholder fejlmålinger, så er det muligt at drage fordel af den høje densitet af målepunkter. Justering af radardata med den udviklede MMB-metode, resulterer i radarnedbør som:

- 1) præsterer bedre end de opportunistiske regnmålinger, der er anvendt til justeringen, og
- 2) er i god overensstemmelse med SVK-netværkets observationer i den uafhængige validering.

Det er således demonstreret, at i områder uden SVK-regnmålere, kan opportunistiske regnmålinger fra PWS og CML være med til at sikre justeringskvaliteten af radardata.

Forsyningselskaberne kan overveje, om Citizen Data kan være en relevant strategi for inddragelse af borgere, og samtidig øge densiteten af nedbørsobservationer til justering af radardata i specifikke områder, ved at uddele Netatmo-stationer til områdets beboere.

5.3.5 Opportunistiske afstrømningsmålinger til radardata justering og nowcast validering

I RADIATE projektet er mulighederne for at opnå pålidelige arealintegrerede regnestimater undersøgt ud fra opportunistiske afstrømningsmålinger foretaget i regnvandsbassiner. Der er adskillige fordele ved at anvende bassiner til at opnå opportunistiske regnsensorer. I urbane områder er der ofte mange regnvandsbassiner, hvilket muliggør en høj densitet af observationer i områder, som er interessante, når radardata bruges til prognostisering eller analyser i urbane områder.

Regnvandsbassinerne er ofte let tilgængelige og flere bassiner monitoreres allerede, hvorved anvendelse af bassiner til afstrømningsmålinger medfører en mindre meromkostning i disse bassiner. Derudover er afstrømningsmålingerne og dermed regnestimaterne ikke sensitive over for mindre spatiale forskydninger, da opsamlingsarealet er betydeligt større end regnmålere. Dette gør bassiner oplagte til evaluering af performance af radar nowcast, da der kan evalueres på konsekvensen af nedbøren i afløbssystemet.

Den hydrologiske reduktionsfaktor for et specifikt opland er som oftest usikker og bruges som kalibreringsparameter i afløbsmodeller. Gennem metoden udviklet i RADIATE beregnes den hydrologiske reduktionsfaktor for oplandet uafhængigt af regnmålere inden for oplandet. Dette giver værdifuld information for forsyninger om oplandene og deres respons på nedbør. Denne indsigt kan bruges i afløbsmodellering til at opnå mere pålidelige modeller.

Bilag 3 indeholder en mere detaljeret beskrivelse af metoden, samt resultater fra casestudie i Frejlev, Aalborg, med 9 måneders data. Metoden til at opnå regnestimater på baggrund af afstrømningsestimater kan anvendes til historisk justering af radardata, analyser, design og validering af radar nowcast modeller. Dog er anvendelsesmulighederne begrænset i realtid pga. tidsforskydning for afstrømningen og udløb fra bassinerne.

5.3.6 VeVa use cases

Projektets forsyningspartnere har arbejdet med specifikke cases (VeVa Cases) for anvendelse af radardata og -prognoser til drift og forsyningsformål. Dette har resulteret i 7 VeVa cases som er vedlagt som bilag:

- VeVa case 1: "KAMA – Forsyningens perspektiv og anvendelse" (Aalborg Forsyning)
- VeVa case 2: "Radardata til hydrauliskemodeller" (Aarhus Vand)
- VeVa case 3: "Udfordringer ved at identificerer skybrud med radar" (VandCenter Syd)
- VeVa case 4: "Realtidsstyring af rensningsanlæg" (BIOFOS)
- VeVa case 5: "Spatial fordelt gentagelsesperiode" (HOFOR)
- VeVa case 6: "Sammenstyring med prognosedata" (HOFOR)
- VeVa case 7: "Uvedkommende vand i Ekeby" (NSVA)

De 7 VeVa Cases demonstrerer den brede vifte af muligheder, potentialer og udfordringer der er forbundet med anvendelse af vejrradardata og vejrradarprognoser i forsyningsøjemed. Den opnåede viden og erfaring fra disse cases udgør ikke blot en status, men er et solidt fundament for den fortsatte udvikling af vejrradardata- og prognoseapplikationer inden for VeVa-foreningens samarbejde og services. De danner således grundlaget for at fastlægge retningen og fokus for fremtidige initiativer og innovationer til effektiv udnyttelse af vejrradarløsninger i Vandsektoren.

5.4 Konklusion

Projektet har nået sine mål. Gennem projektet er der udviklet og etableret en operationel vejrradarbaseret nowcaster, som er skaleret til anvendelse i hele Danmark. Dette har sikret at højopløselige realtids-radarprognoser for nedbør er bredt tilgængelige for den Danske vandsektor gennem Foreningen VeVas services også efter projektafslutning. Realtids-radarprognosemetodikerne er ved projektets afslutning implementeret i VeVas online service til et prototypeniveau, hvorved VeVa's medlemmer kan begynde at få erfaringer med anvendelse af disse data.

Via dette projekt har partnerne demonstreret, at der kan udvikles vejrradarløsninger og -teknologier på baggrund af fælles afstemte ønsker til anvendelser på tværs af forsyningerne. Projektet har dermed ikke 'kun' resulteret i konkrete teknologiske fremskridt, men har også bidraget til at styrke samarbejdet mellem partnere, fremme teknologisk diffusion fra universitet til anvendelse, og skabt et fælles grundlag og fokus for den videre udvikling af avancerede vejrradarløsninger i regi af Foreningen VeVa til gavn for den danske vandsektor.

5.5 Perspektiver

De udviklede metodikere og software i projektet er generelt udviklet til et konceptuelt eller prototype stadie. Der har været fokus på at vise og demonstrere kernefunktionalitet og muligheder i anvendelsen af vejrradardata og -prognoser.

RADIATE KAMA er et godt eksempel på udnyttelse af radardata og nedbørsprognoser. Det anbefales Foreningen VeVa at få fokus på de simple og mere direkte anvendelser af radardata i stedet for at fokusere på de højthængende frugter. RADIATE KAMA er en god demonstration af, hvordan en simple tilgang til udviklingen af anvendelser kan skabe stor værdi for foreningens medlemmer.

I projektet er der demonstreret et stort potentiale i at anvende opportunistiske nedbørsmålninger. Det er vist, at det i områder, hvor der er langt mellem SVK-regnmålerne er meget

fordelagtigt at anvende Netatmo regnmålere som justeringsgrundlag for vejrradardata. Andre fordelagtige data er afstrømningsdata fra afløbssystemet mv. F.eks. afstrømningen til regnvandsbassiner, hvor der forventes forsat udvikling på området i det kommende VUDP-projekt BAMSE (bassinmonitorering til brug for design- og systemeffektivisering). Det vurderes at datahåndtering og direkte integrering ligger udenfor VeVas kerneområde, men der opfordres til, at forsyningerne arbejder videre med dette.

IWA-konferencen i Toronto viste, at der er stor international interesse for anvendelsen af vejrradardata i kombination med sensorer i afløbssystemet. Hertil stor interesse i, hvordan forsyninger kan arbejde sammen omkring dette, og bringe det i anvendelse i forsyninger.

Overordnet vurderes det, at der er et stort potentiale for anvendelse af vejrradardata i vandsektoren. Det anbefales, at der findes en vej igennem til de simple anvendelser, så de lavthængende frugter kan plukkes og nydes.

6 Litteraturliste

Ahm, M. S., Jesuloganathan, Y. M., Rasch, P., Jensen, D. G., Nielsen, J. E., & Rasmussen, M. R. (2020). DANVA VUDP-projektrapport: Vejrradardata – Tilpasset og klar til anvendelse for hele vandsektoren og deres kunder. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. DCE Technical Reports Nr. 297. <https://vbn.aau.dk/da/publications/danva-vudp-projektrapport-vejrradardata-tilpasset-og-klar-til-anv>

Danmarks Statistik (2019). Det Danske Kvadratnet.

Thorndahl, S., & Rasmussen, M. R. (2013). Short-term forecasting of urban storm water runoff in real-time using extrapolated radar rainfall data. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 897-912.

de Vos, L. W., Leijnse, H., Overeem, A., & Uijlenhoet, R. (2019). Quality control for crowdsourced personal weather stations to enable operational rainfall monitoring. *Geophysical Research Letters*, 46(15), 8820-8829.

Andre relevante rapporter fra forsknings- og udviklingsprojekter

Ahm, M. (2017) Ph.D. Thesis: Adjustment of rainfall estimates from weather radars using in-situ stormwater drainage sensors, Department of Civil Engineering, Aalborg University.

Jensen, D. G. (2015) Ph.D. Thesis: Combining weather radar nowcasts and numerical weather prediction models to estimate short-term quantitative precipitation and uncertainty, Department of Civil Engineering, Aalborg University.

Nielsen, J. E. (2013) Ph.D. Thesis: Combining C- and X-band weather radars for improving precipitation estimates over urban areas, DCE Thesis, 53, Department of Civil Engineering, Aalborg University.

Nielsen, J. E., Thorndahl, S., Rasmussen, M. R. (2016) Sammenligning af disdrometerobservationer og Spildevandskomiteens regnmålersystem, DCE Technical Report, 200, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.

Rasmussen, M. R., Thorndahl, S., Grum, M., Neve, S., Borup, M. (2008) Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg, København.

Thorndahl, S., Rasmussen, M. R., Neve, S., Poulsen, T. S., Grum, M. (2010) Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg II, DCE Technical Report, 95, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.

Andre relevante artikler i internationale peer-reviewed tidsskrifter

Ahm, M., Rasmussen, M. R. (2017) Weather Radar Adjustment Using Runoff from Urban Surfaces, *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(5), DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001299](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001299)

Berne, A., Delrieu, G., Creutin, J.-D., Obled, C. (2004) Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 166-179. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.002>

Borup, M., Grum, M., Linde, J. J. & Mikkelsen, P. S. (2016): Dynamic gauge adjustment of high-resolution X-band radar data for convective rainstorm: Model based evaluation against measured combined sewer overflow. *Journal of hydrology*, 539, 687-699. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.002>

Einfalt, T., Arnbjerg-Nielsen, K., Golz, C., Jensen, N.-E., Quirnbach, M., Vaes, G., Vieux, B. (2004) Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 186-202. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.004>

Jensen, D. G., Petersen, C., Rasmussen, M. R. (2015) Assimilation of radar-based nowcast into HIRLAM NWP model. *Meteorological Applications*, 22(3), p. 485–494. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/met.1479>

Löwe, R., Thorndahl, S., Mikkelsen, P. S., Rasmussen, M. R., Madsen, H. (2014) Probabilistic online runoff forecasting for urban catchments using inputs from rain gauges as well as statically and dynamically adjusted weather radar. *Journal of Hydrology*, 512(1), p. 397–407. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.027>

Löwe, R., Mikkelsen, P. S., Rasmussen, M. R., Madsen, H. (2013) State-space adjustment of radar rainfall and skill score evaluation of stochastic volume forecasts in urban drainage systems. *Water Science and Technology*, 68(3), 2013, p. 584–590. DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2013.284>

Marshall, J.S. and Palmer, W.M. (1948) The distribution of raindrops with size. *Journal of meteorology*, 5, 165–166. DOI: [http://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)

Nielsen, J. E., Beven, K., Rasmussen, M. R. (2015) GLUE Based Marine X-Band Weather Radar Data Calibration and Uncertainty Estimation. *Urban Water Journal*, 12(4), p. 283–294. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2013.871044>

Nielsen, J. E., Thorndahl, S., Rasmussen, M. R. (2014) A Numerical Method to Generate High Temporal Resolution Precipitation Time Series by Combining Weather Radar Measurements with a Nowcast Model. *Atmospheric Research*, 138(1) p. 1–12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.015>

Nielsen, J. E., Thorndahl, S., Rasmussen, M. R. (2014) Improving Weather Radar Precipitation Estimates by Combining two Types of Radars. *Atmospheric Research*, 139(1), p. 36–45. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.12.013>

Nielsen, J. E., Jensen, N. E., Rasmussen, M. R. (2013) Calibrating LAWR Weather Radar using Laser Disdrometers. *Atmospheric Research*, 122, p. 165–173. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.017>

Nielsen, J. E., Thorndahl, S., Rasmussen, M. R. (2013) Development of Method for X-band Weather Radar Calibration. *Journal of Hydroinformatics*, 15(4), p. 1326–1339. DOI: <http://doi.org/10.2166/hydro.2013.126>

Schilling, W. (1991) Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research*, 27(1–3), 5–21. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-8095\(91\)90003-F](http://dx.doi.org/10.1016/0169-8095(91)90003-F)

Thorndahl, S., Einfalt, T., Willems, P., Nielsen, J. E., Ten Veldhuis, M.-C., Arnbjerg-Nielsen, K., Rasmussen, M. R., and Molnar, P. (2017) Weather radar rainfall data in urban hydrology, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1359–1380, DOI: <http://doi.org/10.5194/hess-21-1359-2017>

Thorndahl, S., Nielsen, J. E., Jensen, D. G. (2016) Urban pluvial flood prediction: a case study evaluating radar rainfall nowcasts and numerical weather prediction models as model inputs, *Water Science and Technology*, 74(11), p. 2599–2610. DOI: <http://doi.org/10.2166/wst.2016.474>

Thorndahl, S., Smith, J. A., Baeck, M. L., Krajewski, W. F. (2014) Analyses of the temporal and spatial structures of heavy rainfall from a catalog of high-resolution radar rainfall fields. *Atmospheric Research*, 144(1), p. 111–125. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.013>

Thorndahl, S., Rasmussen, Michael R. (2013) Short-Term Forecasting of Urban Storm Water Runoff in Real-Time using Extrapolated Radar Rainfall Data. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), p. 897–912. DOI: <http://doi.org/10.2166/hydro.2013.161>

Thorndahl, S., Rasmussen, M. R. (2012) Marine X-band Weather Radar Data Calibration. *Atmospheric Research*, 103, p. 33–44. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.023>

Bilag 1 - Opportunistiske regnsensorer til justering af radardata

For at opnå pålidelige radarobservationer af nedbør er jordobservationer nødvendige til biasjustering af radardata. Regnmålinger af høj kvalitet er nødvendigt for at opnå høj præcision og nøjagtighed af justeret radardata. Dette gør SVK regnmålere essentielle i justering af vejrradar. Biasjustering af radardata med jordobservationer kræver ydermere et tæt netværk af regnmålere, og justering i realtid eller til nowcasting kræver et yderligere tæt netværk for at kunne justere, inden regnen rammer oplandet af interesse. Til trods for en høj densitet af meteorologiske regnmålere i Danmark i sammenligning med mange andre lande, er der områder, der ikke er dækket af regnmålere. I de større byer er der ofte op til flere regnmålere, men selv i disse områder kan kvaliteten af radarobservationer være begrænset af densiteten af jordobservationer.

En nøjagtighed og præcision svarende til den, der opnås med SVK-stationer, kan ikke forventes ved brug af billigere eller mere lettilgængelige regnobservationer. Dog kan andre typer regnobservationer være med til at øge densiteten af jordobservationer, og såfremt en tilstrækkelig kvalitet kan opnås, er det muligt, at de i kombination med SVK-stationer kan forbedre vejrradarobservationer. Derfor er der i RADIATE undersøgt hvad potentialet er for at anvende opportunistiske regnsensorer til justering af vejrradar for at opnå højere kvalitet af radardata, end når udelukkende SVK-stationer bruges til justering. Opportunistiske regnsensorer er sensorer, der kan anvendes til måling af nedbør, og som ikke er udviklet enten med formål i at måle nedbør eller med formål i at bruge målingerne i meteorologiske applikationer.

Der er tidligere foretaget adskillige studier med henblik på udvikling af metoder til at måle regn med opportunistiske sensorer og afdækning af potentialet for at anvende forskellige sensorer til regnobservationer. Flere forskellige metoder er afdækket, hvoraf billedgenkendelse og -behandling fra offentlige overvågningskameraer, målinger af intensitet af vinduesviskere i biler, private vejrstationer med regnmålere og signaldæmpning mellem telemaster kan nævnes.

Kvaliteten af regnobservationer foretaget med opportunistiske sensorer er typisk lavere end kvaliteten af meteorologiske regnmålinger og ofte ukendt. Dog udgør den ofte betydeligt højere densitet en væsentlig fordel. Den højere densitet medfører en øget sandsynlighed for, at særligt konvektive regnhændelser med mindre stedlig udbredelse måles. Flere observationspunkter, der kan bruges til justering, medfører ydermere en øget mulighed for at justere radarobservationerne inden regnen rammer det betragtede opland og dermed potentielt en højere nøjagtighed af nowcastet nedbør i oplandet.

I RADIATE er regnmålinger fra private vejrstationer og signaldæmpning mellem telemaster anvendt til at undersøge potentialet for anvendelse af opportunistiske regnsensorer til radarjustering. Nogle producenter af private vejrstationer som f.eks. Netatmo gør data tilgængeligt på deres webside i realtid, hvis brugeren accepterer dette. Denne type vejrstationer er populære i Danmark og andre lande, hvormed densiteten af jordobservationerne er høj. Dog er kvaliteten af stationerne afhængig af både hardware, software og installation, hvilket gør, at nøjagtigheden af målinger fra den enkelte station er ukendt. Særligt i byområder er antallet af telemaster højt, hvilket gør denne datatype fordelagtig. Et telemastepar består af to sendere og modtagere, der henholdsvis udsender og modtager mikrobølgesignaler. Fysiske forhindringer mellem masterne dæmper signalet, hvilket vil forekomme, hvis der er nedbør mellem telemasteparret. Dæmpningen i signal kan omsættes til regnintensiteter, hvilket er gjort som en del af forskningen i RADIATE.

Private vejrstationer fra Netatmo

Netatmo vejrstationer består af et inde- og udemodul og hertil kan tilkøbes vind- og regnmålere. Som opportunistiske regnsensorer er udelukkende stationer med regnmålere af interesse. Regnmålerne fra Netatmo er vippekarsmålere produceret i plastik. Opsamlingsarealet er 133 cm², og producenten specificerer måleområdet til 0,2-150 mm/time med en opløsning på 0,1 mm svarende til vippekarsstørrelsen. Regnmåleren fra Netatmo er vist på figur B1.1.

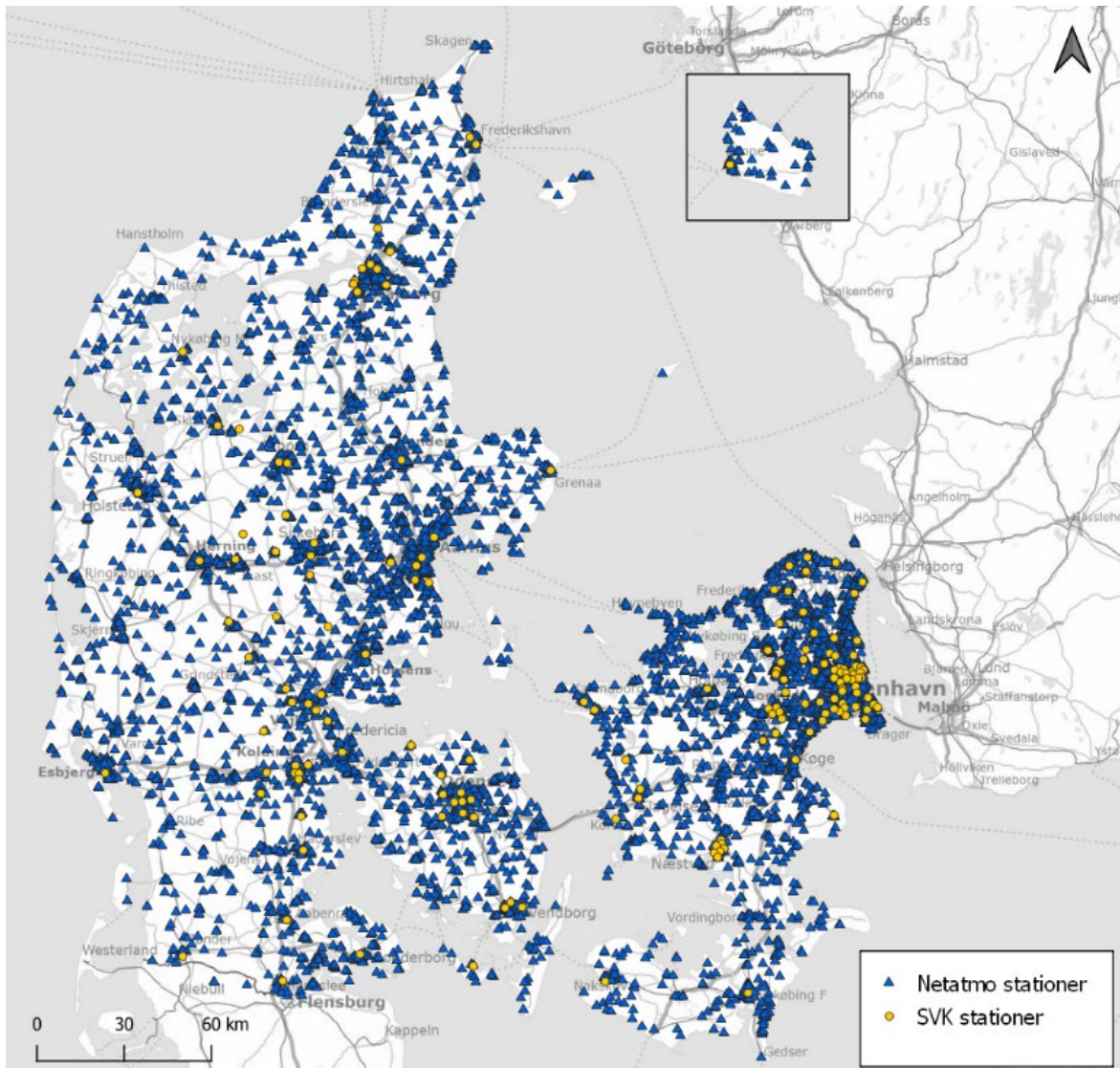


Figur B1.1: Netatmo regnmåler.

Regnen måles ud fra registrering af vip, og data sendes trådløst til hovedmodul, hvorfra det uploades til en server. Regnmålingerne kan ses på Netatmos vejrkort, som er tilgængeligt for alle med en Netatmo bruger. Derudover kan målingerne tilgås gennem API. Regnmålingerne har en tidlig opløsning på 5 minutter og uploades automatisk med 10 minutters mellemrum, hvormed de er tilgængelige i nærrealtid.

Densiteten af private regnmålere er betydeligt højere end densiteten af SVK-stationer. Dette er gældende i både urbane og rurale områder, og det meste af Danmark er dækket af et relativt tæt netværk af Netatmo stationer som vist på figur B1.2. Private regnmålere er korreleret med populationen, hvorfor der er væsentligt flere Netatmo stationer i urbane områder end i de rurale områder. Dette er dog ikke en udfordring, hvis radarobservationer anvendes til analyser og drift af afløbssystemer i byområder. Derudover er antallet af private regnmålere stigende, og potentialet for at udnytte private regnmålere er derfor også stigende i fremtiden.

Usikkerheden i regnmålinger fra Netatmo regnmålere skyldes usikkerheder i hardware, software og installation. Da regnmåleren er opbygget af plastik, kan der være betydelige usikkerheder i præcisionen af målingerne, som vil være forbundet med den faktiske vippekarsstørrelse i forhold til den oplyste på 0,1 mm, eventuel tiltning af vippekaret og vippemekanismen. Regnmålingerne uploades automatisk til en server og tilgås herfra, hvorfor eventuelle differenser mellem antal faktiske vip og uploadede vip vil betyde reduceret nøjagtighed af de tilgængelige målinger. I brugervejledningen til vippekarsmålerne er der givet anbefalinger til installation af sensoren, for at reducere usikkerheder forbundet med fysisk dække af regnmålerne fra f.eks. træer, huse eller nedfaldne blade i regnmåleren m.m.



Figur B1.2: Netatmo (~7.000) og SVK-stationer i Danmark i 2022.

Usikkerheder forbundet med hardware og software er undersøgt ved at foretage undersøgelser på 5 Netatmo regnmålere under kontrollerede forhold. Stationerne er undersøgt i laboratorium med kendt regnintensitet samt under naturlige forhold med kendte omgivelser.

Laboratorietest af nøjagtigheden af Netatmo

Nøjagtigheden af hardware og software af de 5 Netatmo stationer er kvantificeret i laboratorium under kontrollerede forhold og kendt regnintensitet. Forsøgene har til formål at fastsætte vippekarstørrelsen af Netatmo stationer og undersøge, hvorvidt denne afhænger af regnintensiteten. Desuden er det undersøgt, om der er overensstemmelse med antallet af reelle vip og antallet af vip uploadet til Netatmo serveren.

Forsøgene er foretaget med en peristaltisk pumpe, som leverer en stabil vandføring. Forsøgsopstillingen er vist på figur B1.3.



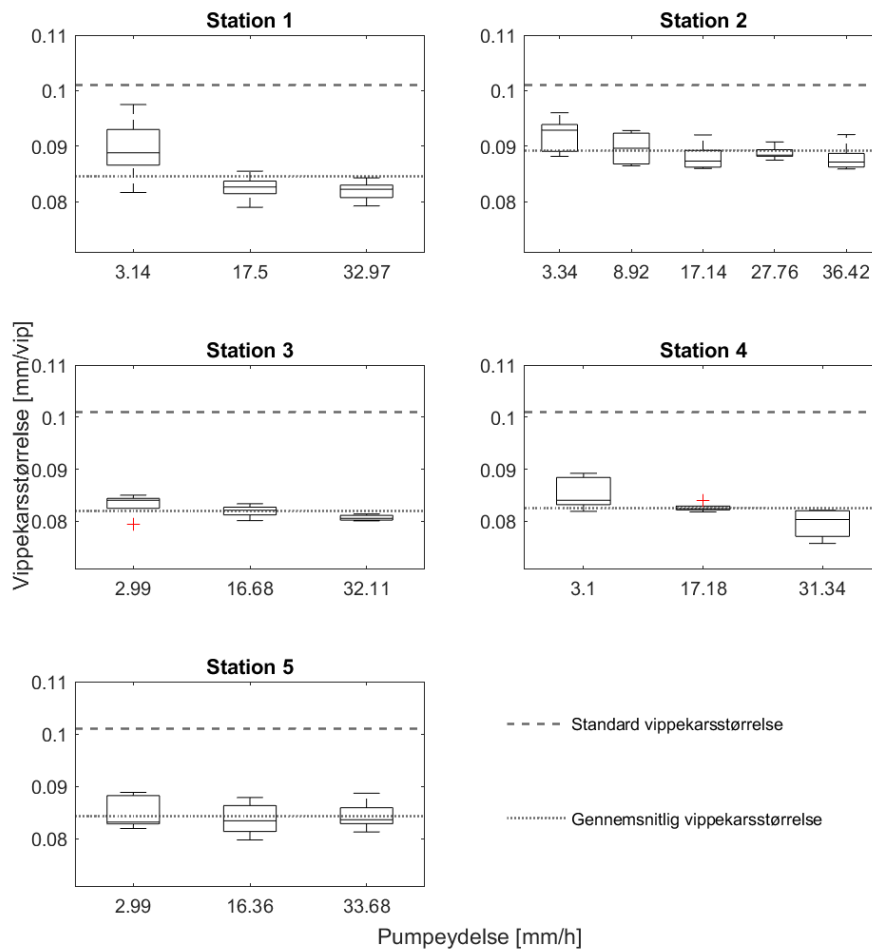
Figur B1.3: Forsøgsopstilling til test af Netatmo nøjagtighed i laboratorium med kendt regnintensitet.

Ved forsøgene er der foretaget målinger i 30 minutter. Under forsøgene er der leveret en konstant regnintensitet af den peristaltiske pumpe. Hver gang vippekaret i Netatmo stationen vipper, kan det høres, og antallet af vip er målt ved at lytte og registrere dette manuelt. Hvert 5. minut er antal talte vip og vægten af vandet, der er leveret af pumpen, noteret. Den nøjagtige regnintensitet leveret af pumpen er bestemt ud fra den noterede vægt af vandet, som herefter omregnes til intensitet ud fra densiteten af vandet og opsamlingsarealet på Netatmo regnmåleren. For at fastsætte densiteten af vandet er vandtemperaturen målt inden, forsøget påbegyndes, og efter forsøget er afsluttet.

Der er foretaget forsøg med henholdsvis lav, mellem og høj regnintensitet for at klarlægge, hvorvidt nøjagtighed og præcision afhænger af regnintensiteten. For at fastsætte, hvilke regnintensiteter, der har været nødvendige at foretage undersøgelser på, er der for en enkelt af de 5 stationer foretaget forsøg på 5 intensiteter (figur B1.4 station 2). Da der ved dette forsøg ikke er observeret betydelig forskel i målt vippekarstørrelse afhængigt af regnintensiteter over de 5 målte intensiteter, er det vurderet tilstrækkeligt at foretage forsøg på 3 intensiteter for hver af de øvrige 4 Netatmo stationer.

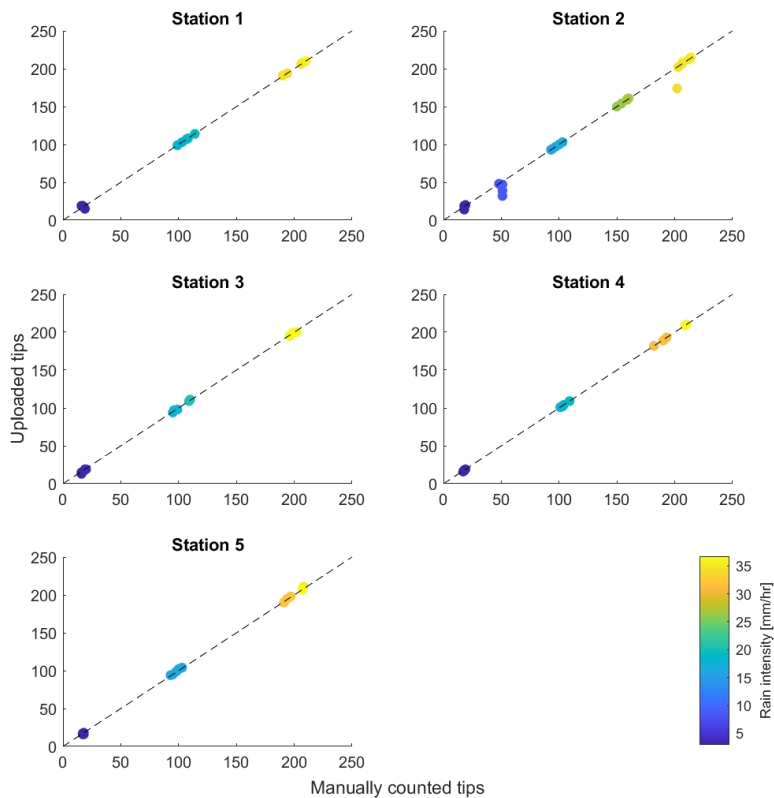
De beregnede vippekarstørrelser for hver station ved de forskellige regnintensiteter er vist på figur B1.4. Der ses en generel tendens til, at vippekarstørrelsen ud fra laboratorieforsøgene er lavere end den, der er opgivet af producenten. Derudover fremgår det af resultaterne, at der ikke er indikationer på, at vippekarstørrelsen afhænger af regnintensiteter, da der ikke er tydelige variationer i de målte vippekarstørrelser. Netatmo stationer burde dermed ikke være mere eller mindre præcise afhængigt af regnintensiteten ifølge forsøgsresultaterne. De mindre vippekarstørrelser på Netatmo stationer end den standard størrelse, der

er opgivet, er heller ikke nødvendigvis en udfordring. Dette skyldes, at det under naturlige forhold er meget usandsynligt, at regnmålerne skulle måle højere regnintensiteter end de reelle. Derimod er det forventeligt, at de målte intensiteter er for lave, – såfremt den korrekte vippekarsstørrelse er opgivet – da vindpåvirkninger, læ forhold og lignende er faktorer, som resulterer i mindre regn, der rammer regnmåleren, end under ideelle forhold. Herudfra er det vurderet, at Netatmo stationerne generelt er akkurate uafhængigt af regnintensitet, og at den mindre afvigelse (<0,02 mm/vip) fra standard vippekarsstørrelsen ikke bevirker en generel ringe præcision af Netatmo stationer.



Figur B1.4: Målt vippekarsstørrelse på de 5 Netatmo stationer ved 5 forsøg ved hver regnintensitet.

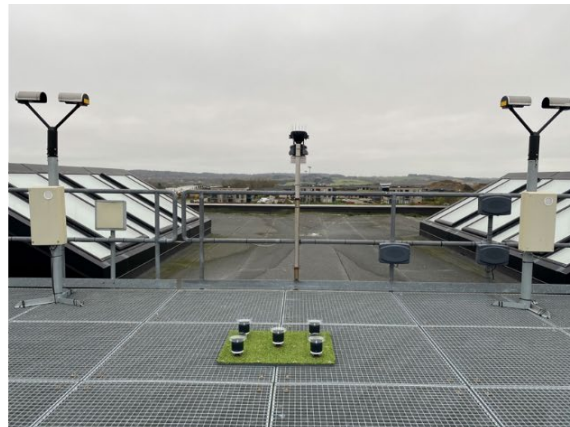
Antallet af målte vip er sammenlignet med antallet af vip uploadet til Netatmo serveren, og resultatet heraf fremgår af figur B1.5. Generelt er der god overensstemmelse mellem det reelle og uploadede antal vip. Der er dog få udfald (primært station 2), hvorved softwaren medvirker til mindre usikkerheder på Netatmo regnmålinger. Resultaterne viser dog tydeligt, at der ikke er betydelige fejl eller usikkerheder forbundet med upload af data, hvorved dette ikke kan betragtes som en betydelig fejlkilde. Hvis der ikke er internetforbindelse, uploades data naturligvis ikke, og dette kan være en udfordring ved realtidsanvendelse. Ved brug af Netatmo til justering af historisk vejrradar data er dette ikke et problem, da regnmålerne har en intern hukommelse, og når der genoprettes forbindelse til internettet, vil denne data uploades.



Figur B1.5: Sammenligning af antal talte og uploadede vip til Netatmos server. Regnintensiteten er angivet som farver på figuren.

Test af nøjagtigheden af Netatmo under naturlige forhold

For at teste Netatmo under naturlige forhold er der lavet en forsøgsopstilling som vist på figur B1.6. Formålet med forsøget er at undersøge de samme 5 Netatmo stationer, som er undersøgt i laboratoriet ved at sammenligne disse internt og med uafhængige regnmålinger under naturlige forhold. De 5 stationer er opstillet på en massiv plastplade ved specialdesignede holdere under hver station, som sikrer, at regnvandet kan strømme ud af stationerne efter hvert vip. Den massive plastplade er beklædt med kunstgræs for at sikre, at der ikke sker tilbagesprøjt under kraftige hændelser fra pladen og op i målerne. Desuden er målerne placeret med en vis intern afstand, som ligeledes sikrer, at der ikke er tilbagesprøjt fra én måler til en anden.



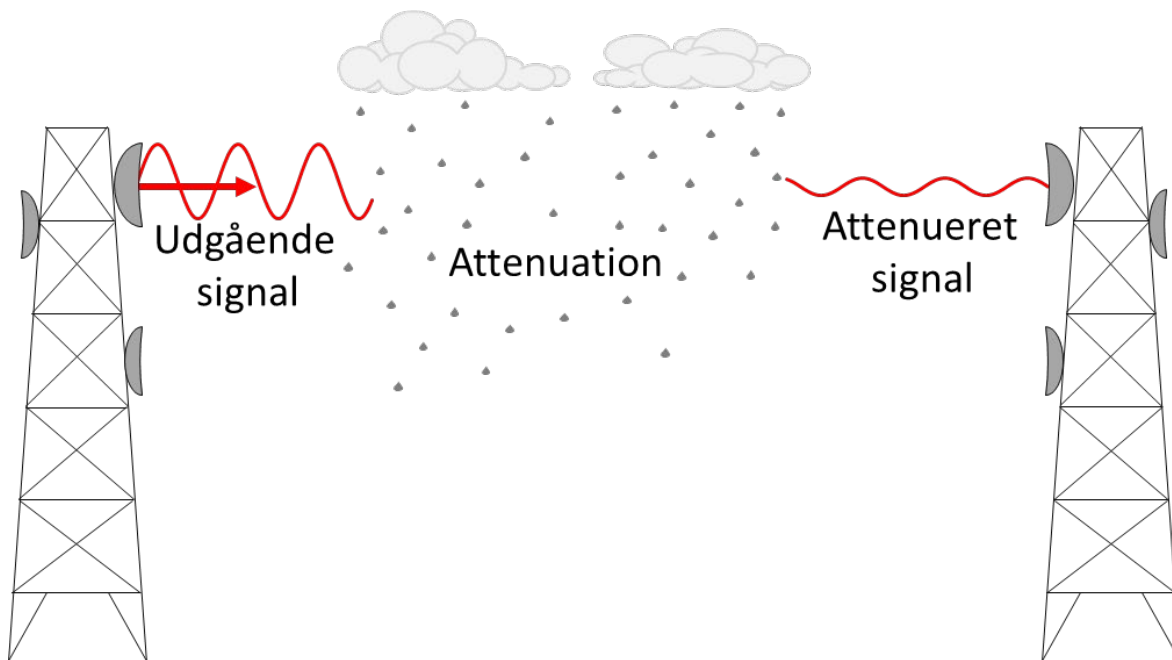
Figur B1.6: Forsøgsopstilling til undersøgelser af Netatmo regnsensorer under naturlige forhold. Til venstre ses opstillingen med specialfremstillede holdere. Til højre ses opstillingen med disdrometre til uafhængig validering.

Forsøget er foretaget i et område uden fysiske hindringer for måling af regn. Dog vil der på lokationen være vindforhold, som kan påvirke måleresultaterne. Dette er forventeligt at være tilfældet ved opstillinger på private grunde og derfor svarende til en forventet naturlig situation uden fysisk blokade. For at muliggøre uafhængig validering af forsøgsresultaterne er de 5 Netatmo stationer opstillet ved to disdrometre. Ved at anvende disdrometre er det muligt at kvantificere nedbørstypen, og det har dermed været muligt at frasortere dage med regn i måleperioden. Desuden giver disdrometre højopløselige og meget præcise nedbørsmålinger, som er anvendt til validering.

Ved forsøget er der foretaget undersøgelser af afvigelserne mellem de 5 stationer og derudover den samlede afvigelse mellem Netatmo og disdrometer. Dette faciliterer en kvantitativ analyse af både nøjagtighed og præcision. Det er ved undersøgelser krævet, at der inden for hver time er målt nedbør i både disdrometer og Netatmo, inden timen er brugt til sammenligning. Der er ved forsøgene observeret en generel god overensstemmelse mellem Netatmo stationerne imellem og med disdrometrene. Herudfra er det vurderet, at der er et potentiale for at anvende private vejrstationer fra Netatmo til justering af vejrradar.

Telemastedata som opportunistiske regnsensorer

Kommercielle mikrobølgeforbindelser (CML) mellem telemaster kan give linjeintegreerede målinger af nedbør. CML har været studeret igennem de seneste år som mulige metoder til måling af regn, og i RADIATE er der foretaget forskning i, om disse målinger har potentiale for at blive anvendt som opportunistiske regnsensorer til justering af vejrradar. Regnintensiteten bestemmes med telemastedata ud fra attenuationen mellem to telemaster som illustreret på figur B1.7.



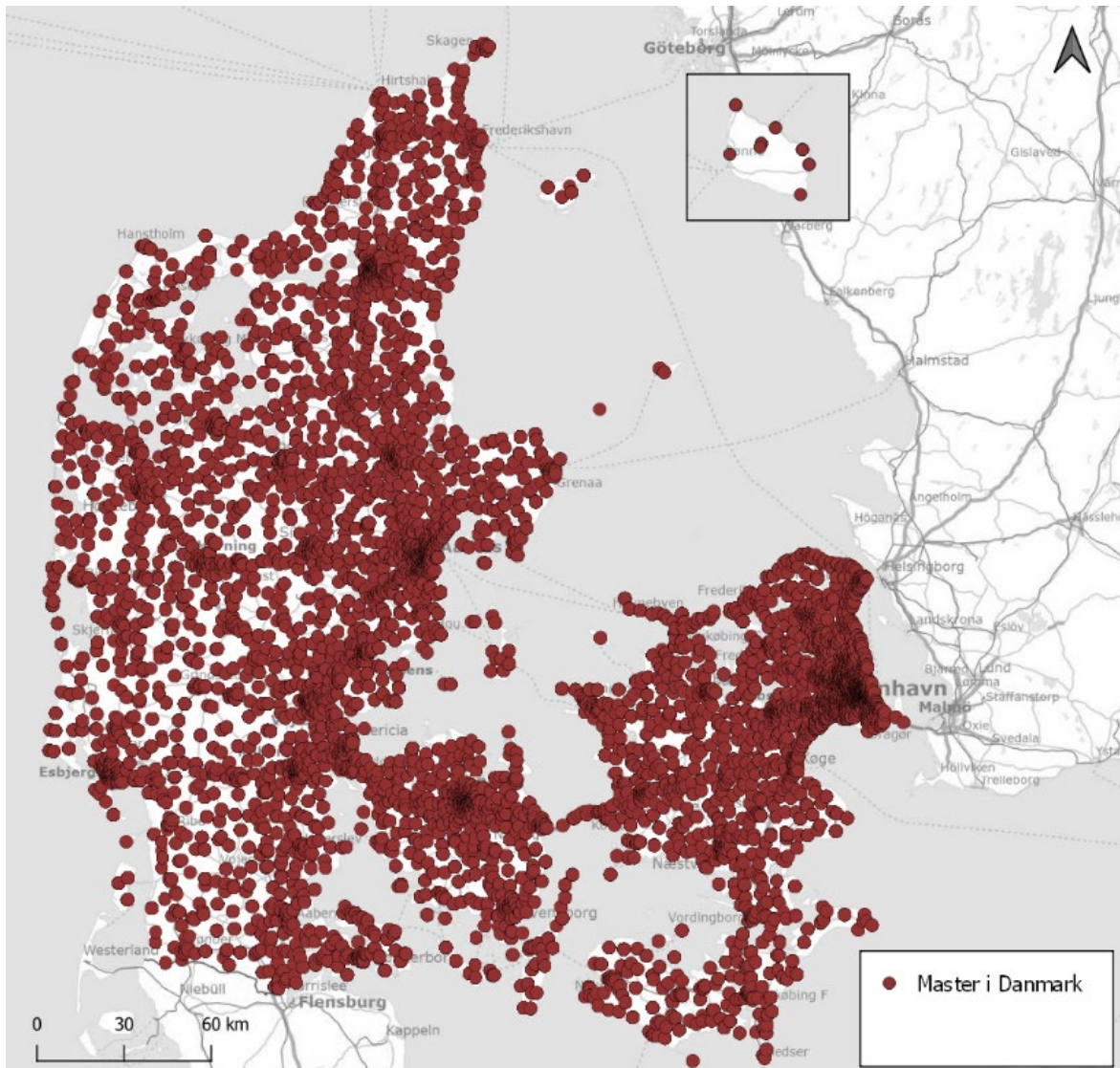
Figur B1.7: Konceptuel beskrivelse af regnmålinger ud fra telemastedata.

Anvendelse af mastedata kræver frigivelse af informationer fra teleselskabet. Frigives data fra flere teleselskaber, er det muligt at opnå en høj densitet af observationer, der kan anvendes til justering af vejrradar. Alle telemaster i Danmark er vist på figur B1.8, hvor hver enkelt lokation angiver en mast, som dermed udgør den ene halvdel af et mastepar. Figuren viser desuden samtlige master i Danmark, og det er derfor ikke sikkert, at data kan frigives fra samtlige master og dermed bruges til vejrradarjustering. Dog illustrerer det meget høje antal af master i Danmark potentialet for at anvende mikrobølgeforbindelser mellem telemaster som opportunistiske regnmålere.

For at bestemme regnintensiteter ud fra mikrobølgeforbindelser mellem telemaster foretages en klassifikation af våde og tørre perioder, en baselinejustering under våde perioder ud fra attenuationen i tørvejr, og dernæst omregnes det attenuationen til regnintensiteter ved følgende potensfunktion:

$$R = \left(\frac{k}{c}\right)^{1/d} \quad (\text{B1.1})$$

Hvori R er regnintensiteten, k er attenuationen, og c og d er parametre, som afhænger af frekvens og polarisering. Ved telemastedata afhænger attenuationen i langt mindre grad af dråbestørrelsesfordelingen, end det er tilfældet for radardata (Chwala & Kunstmann, 2019). Derfor er parametrene betydeligt mindre afhængige af den enkelte regnhændelse, og standardiserede parametre kan anvendes uden korrektioner ved brug af jordobservationer for hændelsen. Metoden og parametrene anvendt til beregninger af regnintensiteter i RADIATE er udarbejdet og udført af Det Svenske Meteorologiske og Hydrologiske Institut (SMHI), som der er etableret et samarbejde med i løbet af projektet med henblik på at udføre forskning i potentialet for at anvende mikrobølgeforbindelser til justering af vejrradar.



Figur B1.8: Samtlige telemaster i Danmark. Hvert punkt angiver placeringen af en enkelt mast i Danmark. Data er indhentet fra <https://www.mastedatabasen.dk/> (senest besøgt 28/09-2023).

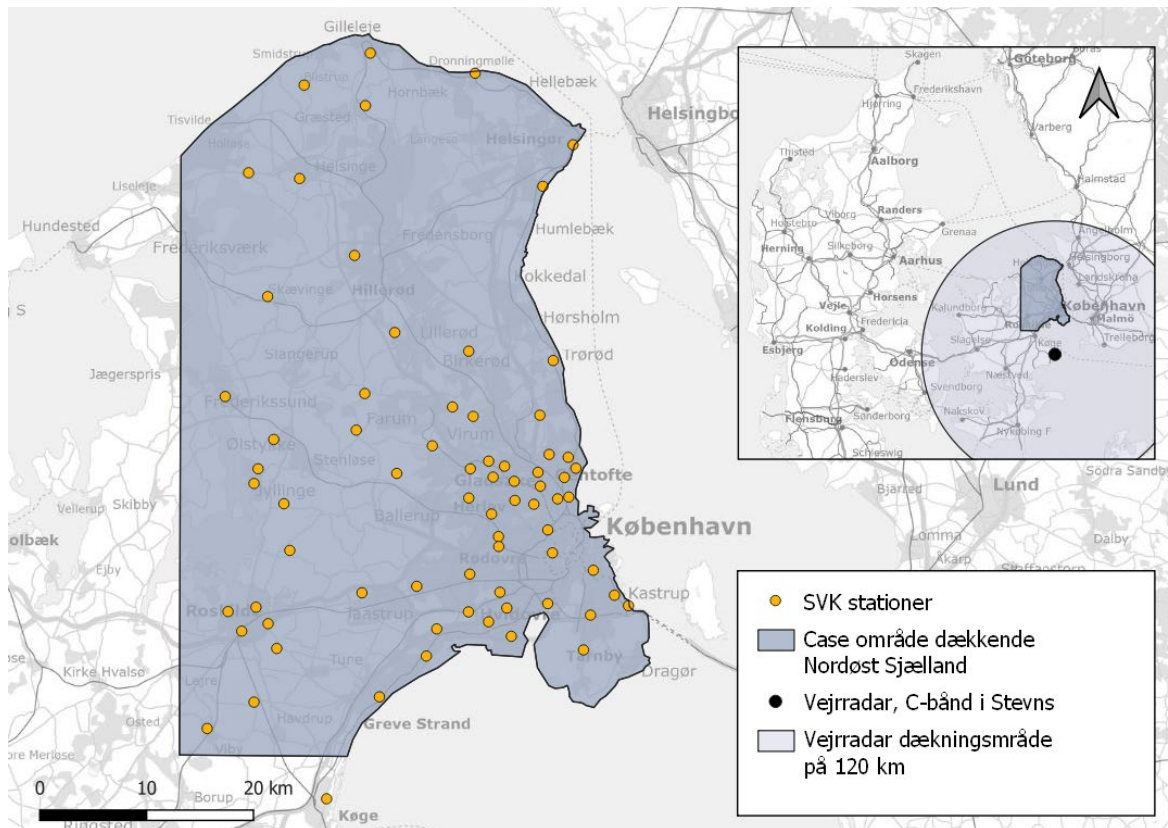
Procedure for automatisk kvalitetskontrol af opportunistiske regnsensorer

Da opportunistiske regnsensorer ikke kan forventes at levere regnmålinger af samme kvalitet som SVK-stationer, er det undersøgt, om kvalitetskontrol af dataen kan forbedre datakvaliteten. Der er udviklet flere forskellige metoder til kvalitetskontrol af både private regnmålere og mikrobølgeforbindelser (Bárdossy et al., 2021, de Vos et al., 2019, Båserud et al., 2020). Særligt kan der være regn, som ikke måles af opportunistiske regnsensorer, estimerede nedbørsdybder, som er væsentligt højere end de reelle, og generelle bias, hvorved en eller flere sensorer i længere perioder eller altid måler for høje eller lave regnintensiteter.

Der er i RADIATE indført proceduren for kvalitetskontrol af både Netatmo og telemastedata udarbejdet af de Vos et al. (2019). Dog er der foretaget justeringer i metoden, da det gennem studier er fundet, at justeringerne forbedrer kvalitetskontrollen. Denne metode er valgt, fordi det er muligt at udføre proceduren i realtid og derfor kan være relevant i realtidsjustering af vejrradar med opportunistiske sensorer. Ved metoden frasorteres regnmålinger, som

vurderes at være forkerte eller ikke mulige at sikre kvaliteten af grundet begrænset sammenligningsgrundlag, og derudover biasjusteres hver enkelt opportunistisk regnmåler ved sammenligning med de omkringliggende målere.

Der er udvalgt et caseområde, som dækker Nordøst Sjælland inklusiv København, som vist på figur B1.9. Området er valgt ud fra, at der er et tæt netværk af SVK stationer, som er brugt til evaluering af nøjagtigheden og præcisionen af opportunistiske sensorer. Området dækker 2.200 km², og 70 SVK stationer er lokaliseret inden for området. Desuden er området dækket af C-båndsradaren i Stevns.

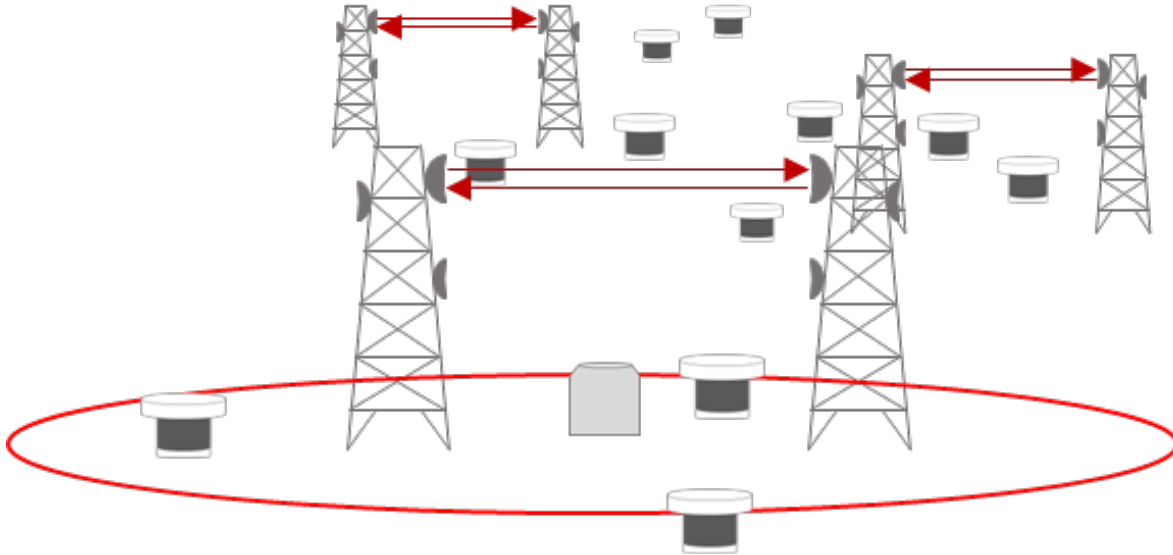


Figur B1.9: Case område anvendt i RADIATE til kvantificering af kvaliteten af opportunistiske sensorer.

Idet opportunistiske regnsensorer i RADIATE undersøges til justering af vejrradar, kan det være mere kritisk at medtage forkert data end at frasortere korrekt data. Er det derimod hensigten af anvende sensorerne til dannelse af et endeligt regnprodukt uden assimilering med vejrradar, kan det være betydeligt mere vigtigt at have en høj densitet af målere, og der kan accepteres flere forkerte værdier. Af disse årsager, er der ved udvikling af proceduren for kvalitetskontrol fokuseret på at frasortere tydeligt forkerte værdier eller stationer, der ikke kan kvalitetskontrolleres, på trods af, at dette i nogle tilfælde medfører frasortering af korrekte målinger.

I kvalitetskontrolsproceduren er det krævet, at der er minimum 5 Netatmo stationer inden for en radius af 5 km ved kontrol af Netatmo. For telemastedata kræves 5 nærliggende målinger inde for 10 km, da der er færre af disse. Alle målere, der ikke opfylder dette kriterie, frasorteres, da kvaliteten ikke kan kontrolleres. Desuden frasorteres målinger, hvis der ikke er målt nedbør af den enkelte station, mens medianværdien af de omkringliggende målinger er større end 0. Dette medfører, at målere, der er fysisk blokerede eller ude af drift, frasorteres. For at frasortere fejlagtigt høje regnmålinger er alle målere med målinger, der er mere end 10 gange medianen af de omkringliggende og mere end 5 mm/time højere end medianen.

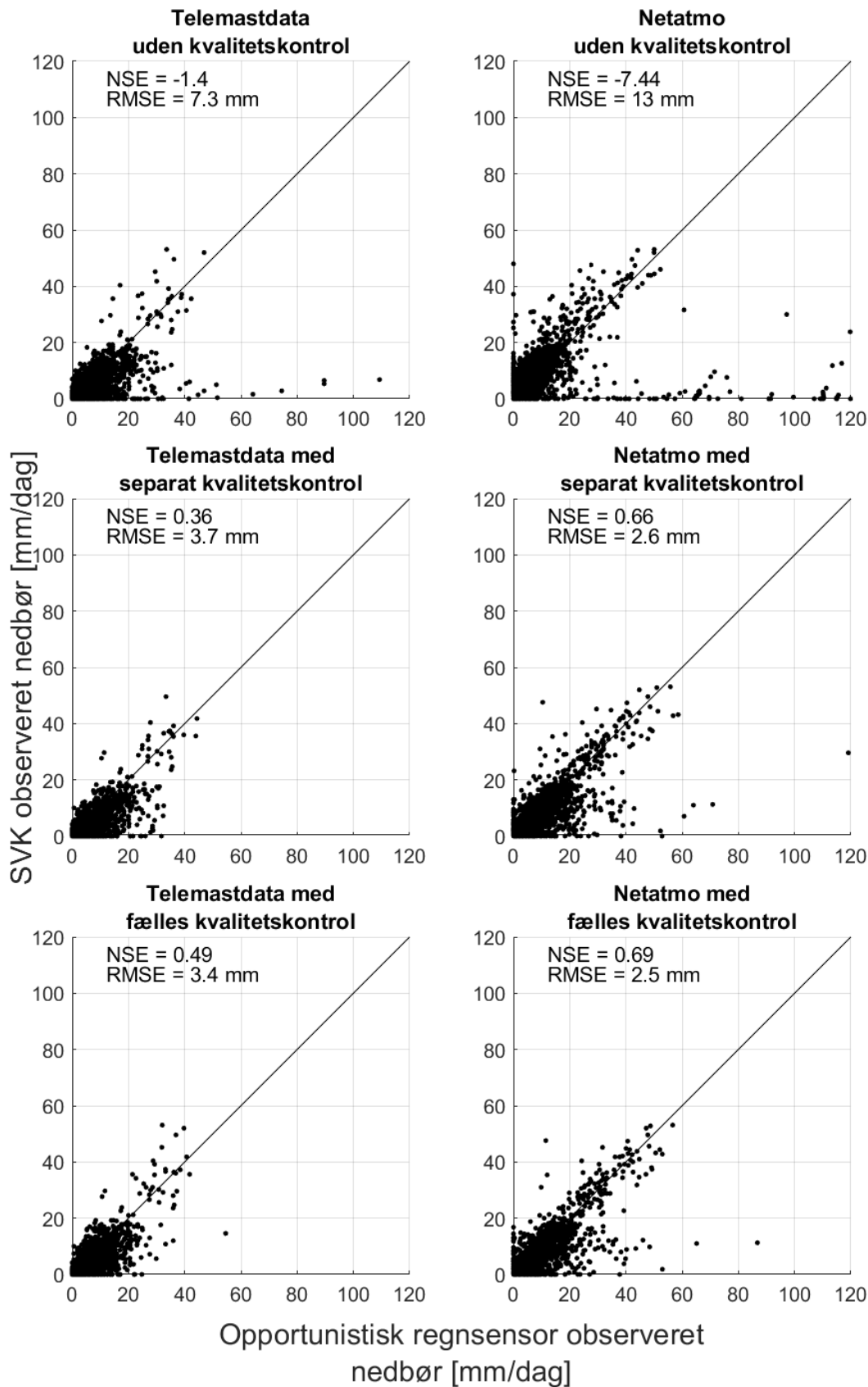
Kvaliteten af regnmålinger af Netatmo og telemastedata er evalueret ved at sammenligne med SVK-stationer. Medianen af alle stationer inden for en radius af 1 km fra en SVK-station er sammenlignet med SVK-stationen. Konceptet er illustreret på figur B1.10. Dette betyder, at kvaliteten af alle opportunistiske sensorer ikke er evalueret. Dog er sammenligningerne kun foretaget nær SVK-stationer, hvorved spatial variabilitet i nedbør ikke har en væsentlig indflydelse på evalueringen af kvaliteten.



Figur B1.10: Konceptuel beskrivelse af sammenligningsmetode ved evaluering af opportunistiske sensorer inden for en radius af 1 km omkring SVK-stationer

Der er foretaget kvalitetskontrol af regnmålinger fra Netatmo og telemastedata hver for sig og ved at kombinere de to typer regnsensorer til ét samlet dataprodukt. Ved at udføre kvalitetskontrol på et samlet opportunistisk regnsensorprodukt bestående af Netatmo og telemastedata assimileres de to datatyper. Dette er gjort for at studere, hvordan det bedst mulige regnprodukt til justering af vejrradar opnås. Resultaterne heraf fremgår af figur B1.11.

Der opnås betydelig forbedring af datakvaliteten af de opportunistiske sensorer ved at udføre automatisk kvalitetskontrol. Som det fremgår af figur B1.11, opnås den bedste kvalitet ved at assimilere de to opportunistiske datatyper og dermed danne ét opportunistisk regnprodukt, som kan anvendes til justering af vejrradar. Til trods for forbedringen er der fortsat fejlagtige værdier i det opportunistiske data, hvilket illustrerer, at der ikke opnås samme kvalitet af nedbørsmålinger ved anvendelse af disse som ved SVK. Yderligere justeringer af kvalitetskontrolsproceduren vil muligvis kunne forbedre regnproduktet, der opnås med opportunistiske regnsensorer. Dog er det vurderet, at der er opnået tilstrækkelig filtrering og kvalitetskontrol til assimilering af vejrradar, hvilket særligt er vurderet på baggrund af, at den anvendte metode er mulig at udføre i realtid, og dermed har betydeligt potentiale i forbindelse med radar nowcast produkter.



Figur B1.11: Regnmålinger fra telemastedata og Netatmo uden kvalitetskontrol (øverste række) med separat kvalitetskontrol (midterste række) og med fælles kvalitetskontrol (nederste række).

Referencer:

Bárdossy, A., Seidel, J., & El Hachem, A. (2021). The use of personal weather station observations to improve precipitation estimation and interpolation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 583-601.

Båserud, L., Lussana, C., Nipen, T. N., Seierstad, I. A., Oram, L., & Aspelien, T. (2020). TITAN automatic spatial quality control of meteorological in-situ observations. *Advances in Science and Research*, 17, 153-163.

Chwala, C., & Kunstmann, H. (2019). Commercial microwave link networks for rainfall observation: Assessment of the current status and future challenges. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(2), e1337.

de Vos, L. W., Leijnse, H., Overeem, A., & Uijlenhoet, R. (2019). Quality control for crowdsourced personal weather stations to enable operational rainfall monitoring. *Geophysical Research Letters*, 46(15), 8820-8829.

Bilag 2 - Realtidsjustering af radardata med opportunistiske regnsensorer

Da radarobservationer af regn udledes fra indirekte målinger af atmosfærens reflektivitet, er regnobservationerne afhængige af dråbestørrelsesfordelingen i nedbøren, hvilken kan variere mellem hændelser eller over enkelte hændelser. Konvertering fra reflektiviteten, som måles med radaren, til nedbør foretages ved anvendelse potensfunktionen fra (Marshall & Palmer, 1948):

$$R = \left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (\text{B2.1})$$

Hvor R er regnintensiteten, Z er reflektiviteten og A og b er parametre, som vil afhænge af dråbestørrelsesfordelingen. I praksis anvendes som oftest konstante parametre, hvorved omregningen af reflektiviteten ikke afhænger af hændelsen. Foruden variationer i dråbestørrelsesfordelingen, vil der være usikkerheder og variationer i regnintensiteten grundet blandt andet stråleblokering eller -forhindringer, højden, som CAPPI-laget er udtrykt for over jorden og atmosfæriske forhold. Derfor er justering af radarmålinger med jordobservationer nødvendige for at opnå pålidelige nedbørsmålinger med vejrradar. Denne justering foretages typisk ved anvendelse af at justere med multiplikative biasfaktorer, som er beregnes som forholdet mellem regnmålinger i regnmålere og regnmålinger med radar i tilsvarende pixels. Derfor er justering af vejrradardata afhængig af jordobservationer af høj kvalitet og med høj densitet for at opnå akkurate justeringer.

Realtidsanvendelse af vejrradar kræver et tæt netværk af jordobservationer, da det er nødvendigt at justere radarobservationerne, inden regnen rammer det betragtede opland for at opnå pålidelige målinger. Dette medfører, at densiteten af SVK-netværket i flere områder i Danmark er begrænsende for kvaliteten af vejrradarobservationer, der kan anvendes i realtid. Derfor er der i RADIATE undersøgt, om opportunistiske regnsensorer har potentiale for anvendelse i vejrradarjustering og særligt i realtid. Kvaliteten af SVK-regnmålere er dog betydeligt højere end den, som kan opnås med opportunistiske regnsensorer, og derfor bør SVK regnmålere indgå som essentielle målinger i vejrradarjusteringer i praksis.

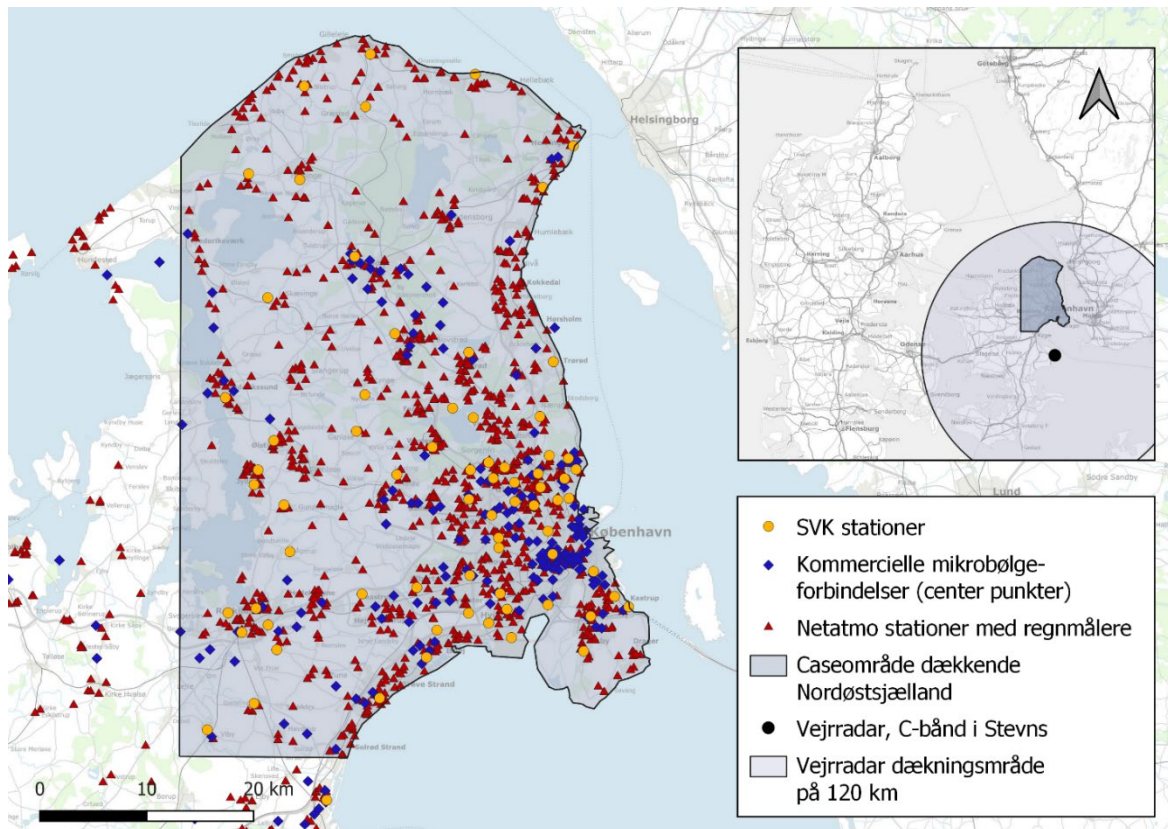
Justering af vejrradar foretages typisk med mean field bias (MFB) justering, hvor der beregnes en enkelt biasfaktor for hele området. Metoden er simpel, effektiv, hurtig og stabil. Derudover er MFB ikke følsom over for få forkerte jordobservationer, da biasfaktoren er udledt som en middelværdi over alle regnmåler-radar pixel par i området, og metoden er effektiv til fjernelse af generelle biaser for hele området (Smith & Krajewski, 1991, Thorndahl et al., 2017). Hvis større områder betragtes, kan der dog være betydelige variabilitet i regnen over området, hvilket bør medføre forskellige biasfaktorer, der bør anvendes i forskellige områder. Dette gør sig særlig gældende, hvis der foretages justeringer på kompositter, hvor MFB-justering af radarobservationer ikke nødvendigvis giver pålidelige regnmålinger over hele området.

Spatialt varierende biasjusteringer vil være hensigtsmæssige i større områder, og vil desuden muligvis kunne forbedre regnmålinger i mindre områder, da det giver mulighed for at justere lokalt i områder afhængig af dråbestørrelsesfordeling, stråleforhindringer eller spatialt afhængigt af højden, radarmålingen er foretaget i, over jordniveau. Dette kræver dog et tæt netværk af jordobservationer, hvor densiteten af SVK-netværket i flere områder i Danmark ikke er tilstrækkelig. Dette er medvirkende til, at opportunistiske regnsensorer har et potentiale for at udgøre et væsentligt supplement til SVK-netværket i vejrradarjustering.

Formålet med forskningen om justering med opportunistiske regnsensorer er at undersøge, om fusionering af vejrradar og opportunistiske regnsensorer kan give akkurate og præcise regnmålinger, som har relevans for historiske analyser, realtidsjustering og nowcast af vejrradarnedbør. For at foretage uafhængige studier af nøjagtighed og præcision af det fusionere-

rede regnprodukt, er SVK regnmålinger udelukkende anvendt til uafhængig validering. Fusionering af regnprodukter foretages vejradar observationer fra C-båndsradar, telemaste-signaldæmpninger fra Ericsson og private regnmålerstationer fra Netatmo. Telemastedata og private vejrrstationer som opportunistiske regnsensorer er nærmere beskrevet i bilag 1.

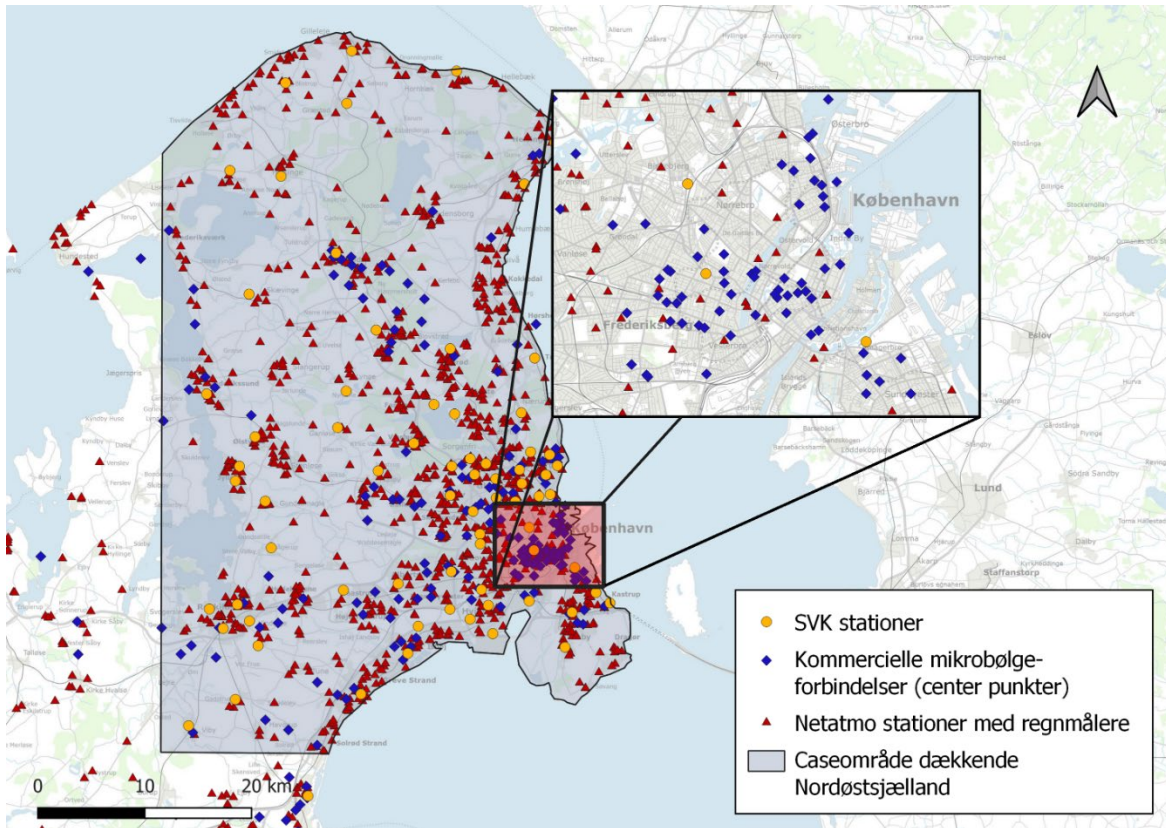
Der er foretaget studier i et område i Nordøstsjælland vist på figur B2.1. Området er udvalgt som caseområde grundet høj densitet af SVK-målere, som anvendes til uafhængig validering, samt høj densitet af opportunistiske sensorer for at undersøge, om den høje densitet af jordobservationer faciliterer spatialt varierende biasjusteringer, og om sådanne giver mere pålidelige regnestimater end MFB justering. Caseområdet dækker et areal på 2.200 km² og indeholder 70 SVK-stationer. Studiet er foretaget med data i perioden fra september 2019 – september 2020, hvor over 1.000 Netatmo regnmålere var aktive i området. Gennem Ericsson netværket, har der til dette studie være 186 telemastepar tilgængelige inden for området. Fusioneringen er foretaget med udgangspunkt i det kvalitetskontrollerede opportunistiske regnsensorprodukt, der er assimileret gennem kvalitetskontrollproceduren som beskrevet i bilag 1, da dette er det opportunistiske regnprodukt, som har den højeste nøjagtighed og præcision.



Figur B2.1: Caseområde anvendt til forskning i reeltidsjustering af radardata med opportunistiske sensorer.

Densiteten af både telemaster og private vejrrstationer er korreleret med befolkningstallet, hvilket medfører, at densiteten af opportunistiske sensorer er højst i urbane områder. Da vejrradardata som oftest anvendes til forudsigelser, analyser eller applikationer i urbane områder, kan det være en betydelig fordel, at densiteten af jordobservationer er højst i disse områder.

Der er til dette studie væsentligt flere private regnmålere end telemastepar, hvorfor private vejrstationer bliver mest betydende for det fusionerede produkt. Der er dog områder, hvor densiteten af telemastedata er højst, og disse observationer dermed får et betydeligt bidrag. Dette gør sig i særdeleshed gældende i den indre del af København, hvor boligtypen primært er domineret af lejligheder og etageejendomme. Som vist på figur B2.2, er der et begrænset antal private vejrstationer i dette område, mens der er et tæt netværk af telemastedata.



Figur B2.2: Caseområde med forstørrelse af indre København, hvor telemastedata dominerer i forhold til private vejrstationer med regnmålere.

Justeringsmetoder

Vejrradar og opportunistiske regnsensorer er i RADIATE fusioneret gennem 3 forskellige justeringsmetoder. Det er valgt at undersøge både spatiale konstante og varierende biasjusteringsmetoder for at klarlægge fordele og ulemper og fastsætte hvilken metode, der har det største potentiale for radarjustering med opportunistiske regnsensorer. De tre undersøgte justeringsmetoder er beskrevet i det følgende.

Der er foretaget justeringer over 2 forskellige tidsperioder: 24 timer og 6 timer. Døgnjusteringer er ofte anvendt til analyser med historisk data og giver ofte mere stabile justeringer, hvorfor dette er relevant. Justeringer på under et døgn er relevante i realtidsapplikationer og til radar nowcast. De 6 timer er et eksempel på justeringer foretaget på tidsskalaer under et døgn, og det skal bemærkes, at det er muligt at anvende kortere tidsskalaer. Gennem forskningen i RADIATE er det fundet, at justeringer på 4-8 timer giver tilnærmelsesvis samme præcision, mens justeringer på timebasis medfører ringere korrelation med SVK-stationerne.

Mean Field Bias

Mean Field Bias (MFB) justering er en spatialt konstant biasjusteringsmetode, hvor en enkelt multiplikativ biasfaktor gældende for hele området udledes. Biasfaktoren beregnes som en middelværdi af forholdet mellem opportunistisk regnsensorobserveret og radarobserveret nedbør i hver opportunistisk regnsensor-radar pixel par. Biasfaktoren beregnes på baggrund af hver time, hvor der er observeret regn med både opportunistisk regnsensor og vejrradar i den gældende pixel:

$$MFB = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^t R_O[k(i), m(i)]}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^t R_R[k(i), m(i)]} \quad (B2.2)$$

Hvor N er det samlede antal opportunistiske regnmåler-radar pixel par, t er tiden, med målt nedbør inden for justeringsperioden, R_O er opportunistisk regnsensor observeret nedbør og R_R er vejrradarobserveret nedbør. Da metoden anvender en middelværdi for hele området, vil enkelte tydeligt forkerte jordobservationer ikke have en væsentlig påvirkning, så længe antallet af opportunistiske sensorer er højt.

Inverse Distance Weighting interpolated Bias

Inverse Distance Weighting interpolated Bias (IDWB) justering er en spatialt variende biasjustering, hvor der for hver eneste radarpixel i området beregnes en tilhørende biasfaktor. Biasfaktoren beregnes ud fra IDW interpolation mellem faktorer, der beregnes i pixels med opportunistiske sensorer. IDW interpolation er en hurtig og effektiv interpolationsmetode, som har medført, at metoden er meget udbredt til fladeinterpolation af spatialt fordelte målinger generelt – herunder regnmålinger.

Afhængig af udglatningsgraden, der anvendes, kan metoden være følsom over for støj eller fejlagtige målinger. Disse kan give lokale "stifter" i de interpolerede biasfaktorer, hvorved usikkerheder på opportunistiske regnestimer propagerer ind i det fusionerede regnprodukt. Metoden er dog testet for at undersøge, om den spatiale interpolation forbedrer det samlede regnprodukt. IDWB faktoren for radarpixlen lokaliseret i punkt x_0 er beregnet ved følgende:

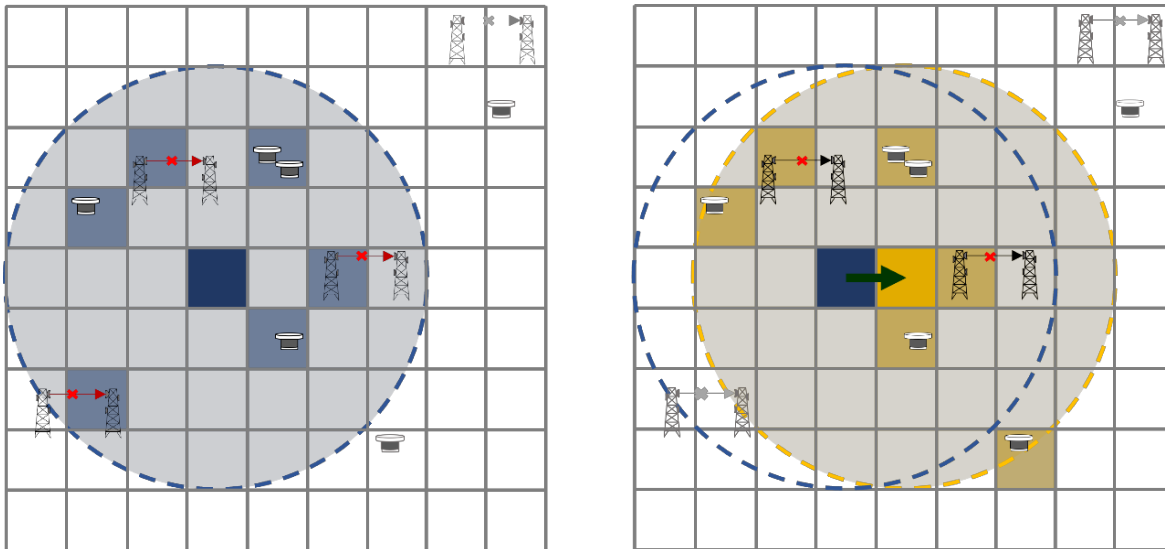
$$IDWB(x_0) = \sum_{i=1}^N \frac{w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \cdot B(x_i), \quad w_i = \frac{1}{(d)^p} \quad (B2.3)$$

Hvor B er biasfaktorer i punkterne x_i , w_i er vægtningskoefficienterne afhængigt af afstanden d mellem pixel x_0 og x_i , og p er potensparameteren, der afgør udglatningsgraden. Her er anvendt en standardiseret værdi for p på 2. IDWB faktoren beregnes for hver eneste pixel med opportunistiske regnsensorer for timer med observeret nedbør i både radar og opportunistisk regnsensor.

Moving Median Bias

Moving Median Bias (MMB) er en ny justeringsmetode udviklet i forbindelse med RADIATE projektet. Metoden er en spatialt variabel biasjustering, hvor en biasfaktor bestemmes for hver eneste radarpixel. Metoden adskiller sig væsentligt fra IDWB, idet den er baseret på medianværdier af omkringliggende biasfaktorer, og metoden giver derfor en mere jævn og stabil biasjustering i området. Dette medfører, at metoden er mindre sensitiv over for jordobservationer af lavere kvalitet og tydeligt forkerte observationer, da medianen medfører en filtrering af de beregnede biasfaktorer.

Biasfaktoren for hver enkelt pixel er udledt fra en medianværdi af biasfaktorerne nær den betragtede pixel. Da der anvendes medianværdier af biasfaktorer og ikke regnobservationer, er metoden samtidigt heller ikke følsom overfor spatial variabilitet i nedbør, hvis biasfaktorerne inden for det betragtede område ikke er væsentligt varierende. Afstanden, medianværdien bestemmes indenfor, er variabel og afhængig af antal ikke-frasorterede opportunistiske sensorer. Der er anvendt en minimumsafstand på 10 meter og en minimum 10 accepterede opportunistiske sensorer for at sikre tilstrækkeligt datagrundlag til at opnå en stabil biasjustering. En konceptuel skitse af metoden er illustreret på figur B2.3.



Figur B2.3: Konceptuel skitse af MMB metoden til fusionering af radardata og opportunistiske regnsensor data. Til venstre vises konceptet af biasfaktoren, der tildeles den mørkeblå pixel ud fra faktorer i de omkringliggende pixels med sensorer. Til højre er angivet justeringen af den mørkegule pixel, hvor medianværdien muligvis vil afvige fra den naboliggende, men grundet medianværdien være tæt på eller lig med de omkringliggende.

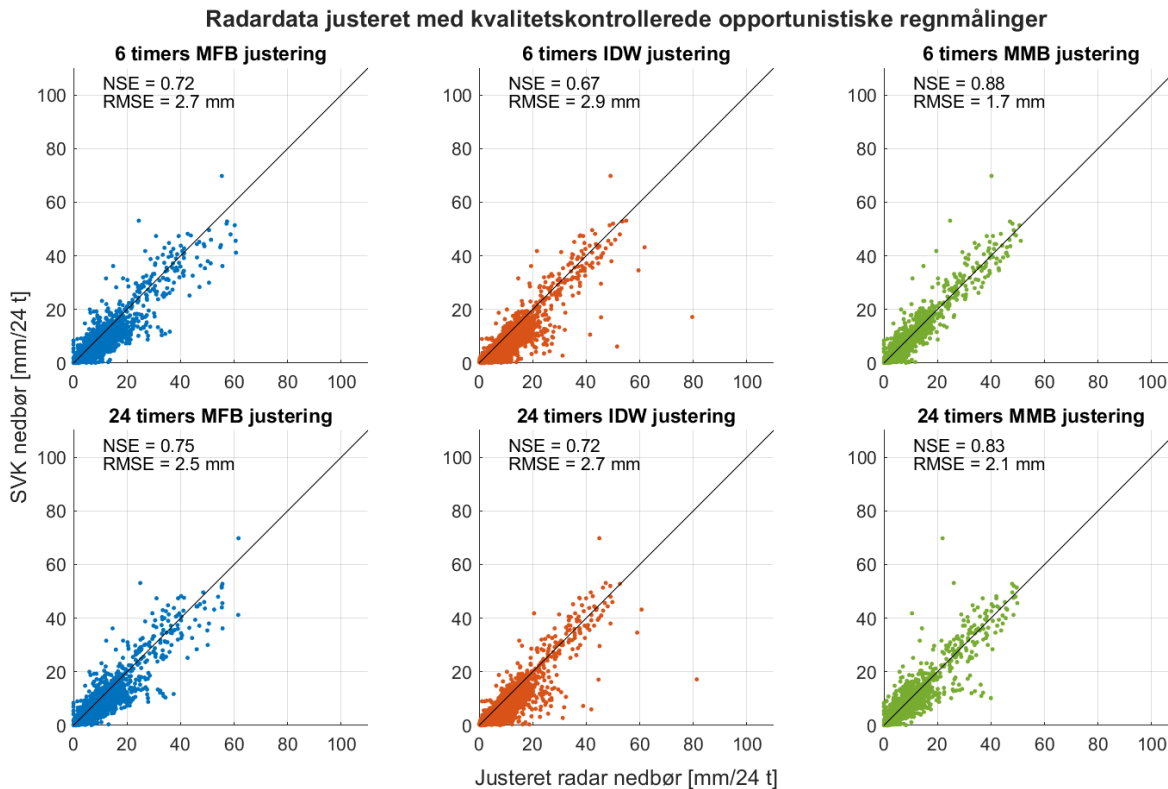
Resultater af justeringer

De kvalitetskontrollerede opportunistiske regnsensormålinger, som er assimileret gennem kvalitetskontrollproceduren beskrevet i bilag 1 er anvendt til fusionering med radardata. Resultatet af fusioneringen er sammenlignet med SVK-regnmålerens observationer fra perioden september 2019 – september 2020 med de 3 justeringsmetoder og er vist på figur B2.4. Observationerne fra SVK-netværket er udelukkende anvendt til validering, og indgår således ikke i justeringen af radardataene. Af figuren fremgår døgnakkumulerede værdier af det justerede radardata ved hver af de 3 metoder. For hver metode er justeringen foretaget på 6 og 24 timer.

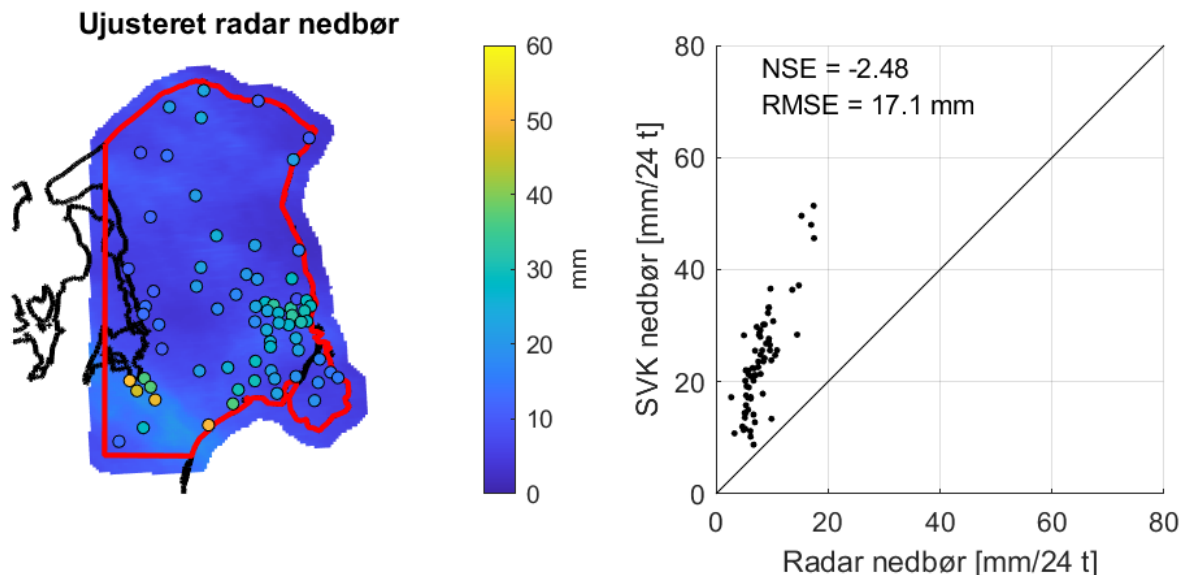
For alle 3 justeringsmetoder er der opnået høj nøjagtighed og præcision. NSE-værdier på 0,72-0,83 er opnået på daglig justering, hvilket er svarende til eller bedre, end der kan forventes opnået ved justering med SVK efterfulgt af afhængig validering mod SVK. Herudfra er det vist, at kvalitetskontrollerede opportunistiske regnsensorer har et betydeligt potentiale for anvendelse til vejrradarjustering.

For både daglig og 6 timers justering er de højeste nøjagtigheder og præcisioner opnået ved MMB justering. Ved denne metode opnås bedre resultater ved en kortere (6 timers) justering end ved daglig justering. Dette er muligt grundet den høje densitet af jordobservationer, som faciliterer en jævn men spatialt distribueret biasjustering, hvorved der justeres afhængigt af udviklingen i dråbestørrelsesfordelingen over tid. Desuden propagerer fejl fra opportunistiske sensorer mindre ind i dette regnprodukt end det, som er opnået gennem IDWB justeringen, hvilket er årsagen til det mere pålidelige regnprodukt med MMB end IDWB.

Et eksempel på en hændelse med høje nedbørsdybder i perioden er angivet på figur B2.5 hvor de ujusterede radarmålinger er sammenlignet med målinger fra SVK stationerne. Hændelsen er fra den 10. september 2019, hvor regndybder mellem 9 mm og 51 mm er målt med SVK. Som det fremgår af figuren, underestimerer radarmålingerne nedbørsdybden i hele området, når der ikke er foretaget nogen justering af radaren.



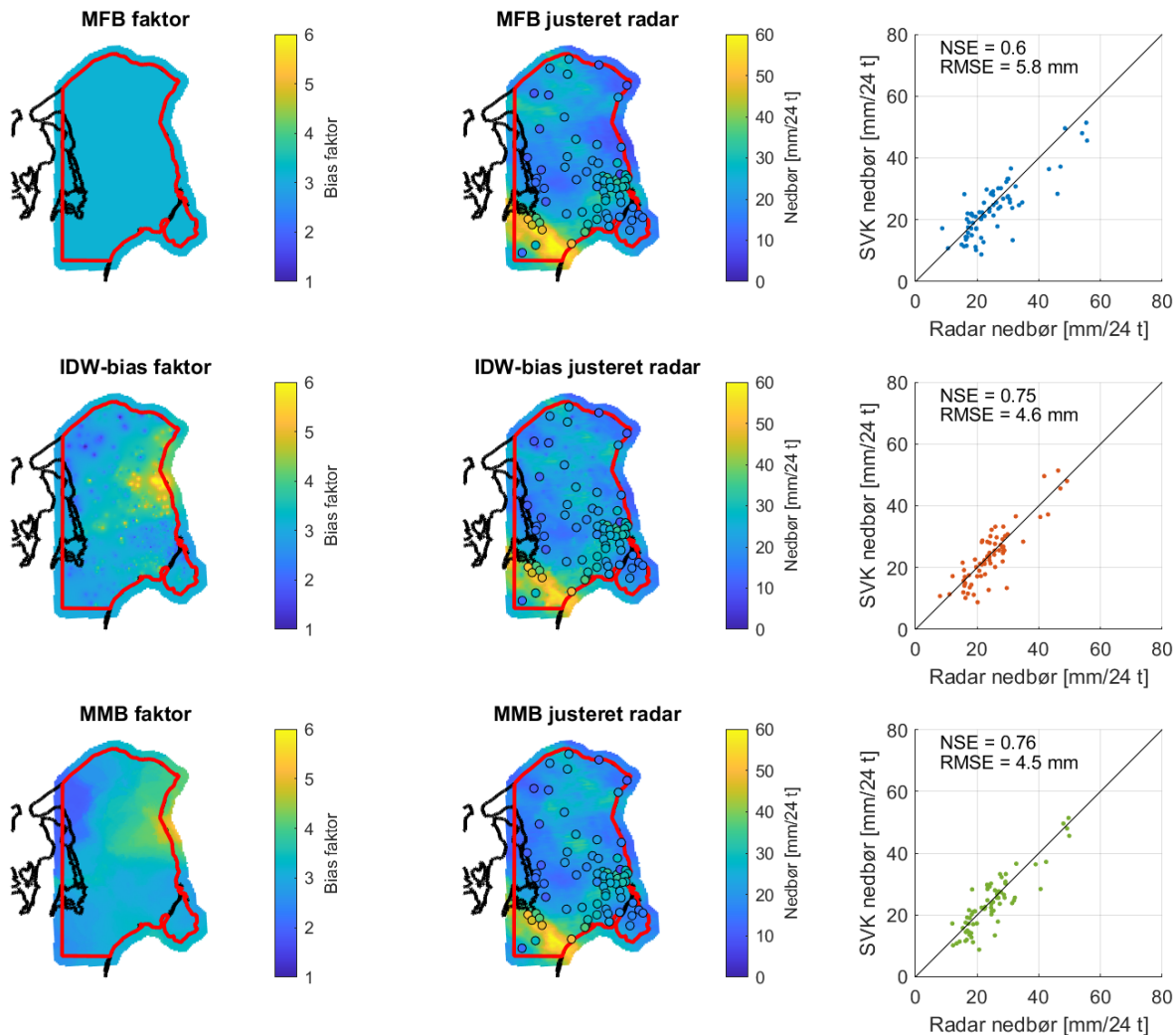
Figur B2.4: Døgnakkumulerede radarmålinger efter justering med kvalitetskontrollerede opportunistiske regnsensorer sammenlignet med SVK observationer. Justering på 6 timer (øverst) og 24 timer (nederst).



Figur B2.5: Ujusterede radarmålinger sammenlignet med SVK målinger fra den 19. september 2019.

De justerede radarprodukter for den 10. september 2019 fremgår af figur B2.6. Samtlige justeringer giver anledning til væsentlig forbedring. Af figuren fremgår det, at IDW interpoleret biasjustering giver anledning til "stifter" i biasfaktoren, hvilket er konsekvenser af usikkerheder i opportunistiske regnmålinger, som propagerer ind i det fusionerede regnprodukt. Dette giver meget høje gradienter i regnintensiteter, hvilket medfører, at denne metode ikke er vurderet så hensigtsmæssig som de øvrige to til justering af vejradardata, når dette gøres med opportunistiske data. Dette er på trods af performance parametre, som er nær

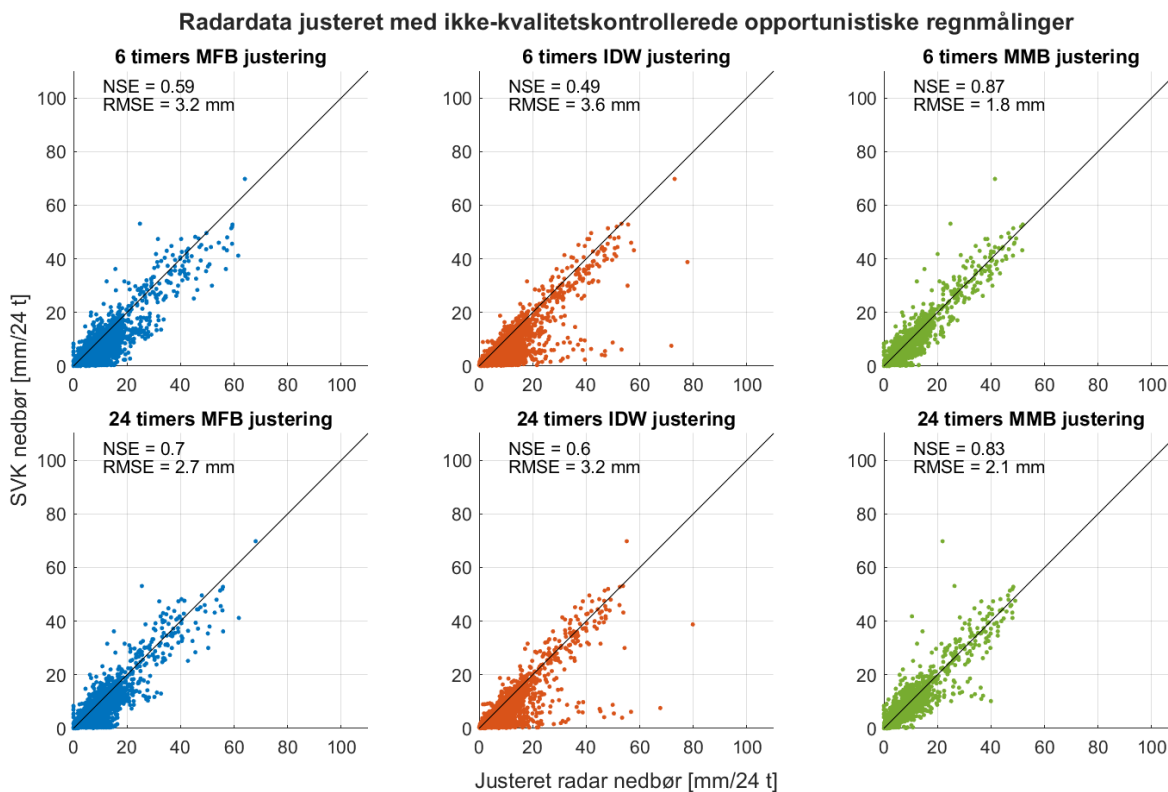
dem, der er opnået med MMB for denne hændelse. Det kan dog ikke afvises, at metoden er fordelagtig, såfremt der anvendes jordobservationer af høj kvalitet, således at fejl ikke propagerer ind i det samlede regnprodukt.



Figur B2.6: Biasfaktorer, justeret radardata og radardata sammenlignet med SVK stationer, 10 september 2019. Hver justeringsmetode er angivet som en række i figuren.

Justeringer med ikke-kvalitetskontrollerede opportunistiske regnsensorer

Kvalitetskontrollproceduren, der er anvendt på det opportunistiske data, er mulig at køre i realtid. Dog er det en tidskrævende proces, og det er derfor undersøgt, om pålidelige regnprodukter kan opnås med fusionering af radardata og opportunistiske regnsensorer, som ikke er kvalitetskontrolleret. Resultatet af dette fremgår af figur B2.7. Ved sammenligning med figur B2.4 fremgår det, at der særligt for MFB og IDWB ses et betydeligt større scatter ved brug af ikke-kvalitetskontrollerede opportunistiske data. Da MMB baseres på en medianværdier, indeholder metoden en filtrering, som medfører, at tydelige outliers ikke bidrager til det fusionerede produkt. Det er herudfra vurderet, at MMB giver pålidelige justeringer af vejradar, når disse justeres med opportunistiske regnsensorer. Dette er gældende for både kvalitetskontrollerede og ikke-kvalitetskontrollerede regnestimater fra opportunistiske regnsensorer.



Figur B2.7: Døgnakkumulerede radarobservationer justeret med ikke-kvalitetskontrollerede opportunistiske sensorer sammenlignet med SVK observationer. Justering på 6 timer (øverst) og 24 timer (nederst).

Referencer

- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, 5(4), 165-166.
- Smith, J. A., & Krajewski, W. F. (1991). Estimation of the mean field bias of radar rainfall estimates. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 30(4), 397-412.
- Thorndahl, S., Einfalt, T., Willems, P., Nielsen, J. E., Ten Veldhuis, M. C., Arnbjerg-Nielsen, K., Rasmussen, M. R. & Molnar, P. (2017). Weather radar rainfall data in urban hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1359-1380.

Bilag 3 - Opportunistiske afstrømningsmålinger til radarjustering og nowcastvalidering

Valideringer af radar nowcast foretages ofte ved sammenligning af nowcastet radardata med observeret radardata. Denne valideringsmetode er ikke nødvendigvis hensigtsmæssigt til evaluering af nøjagtigheden af nowcastet nedbør på jordoverfladen og dermed betydningen for afløbssystemer. Valideringer mod regnmålere giver derimod sammenligninger ved jordoverfladen, men grundet det begrænsede opsamlingsareal af regnmålere ($\sim 325 \text{ cm}^2$) medfører en lille forskydning i sted i nowcastet nedbør massive konsekvenser i performance evaluering. Mindre stedlige forskydninger vil derimod få beskedne konsekvenser for afløbssystemer grundet et væsentligt større opsamlingsareal. Dermed er valideringer af nowcastet nedbør mod regnmålere ikke nødvendigvis repræsentative for konsekvenserne i afløbssystemer.

Nowcastvalideringer mod arealintegrerede regnmålinger kan overkomme nogle af den førnævnte udfordringer. Desuden kan yderligere regnobservationer – foruden SVK observationer – medføre, at uafhængig validering muliggøres, da der ikke valideres mod observationer, som også er anvendt til justering af radardata. Arealintegrerede regnestimater kan opnå ud fra afstrømningsmålinger, og justering af vejradardata ud fra afstrømningsmålinger er studeret af flere eksempelvis Marx et al. (2006) og Ahm & Rasmussen (2017). Typisk anvendes flowmålinger med enten omkostningstungt udstyr eller besværlige opsætninger i kombination med disdrometre eller regnmålere i oplandet. Dette bevirker, at afstrømningsmålinger til radarjusteringer er en metode begrænset af omkostningstungt og vedligeholdelseskrævende udstyr i oplandene, og implementering af metoden er begrænset til få, specifikke områder.

I RADIATE er mulighederne for at opnå pålidelige arealintegrerede regnestimater undersøgt ud fra opportunistiske afstrømningsmålinger foretaget i regnvandsbassiner uafhængigt af regnmålere placeret inden for oplandet. Der er adskillige fordele ved at anvende bassiner til at opnå opportunistiske regnsensorer, hvilket er årsagen til, at netop denne metode er undersøgt i RADIATE. I urbane områder er der ofte mange regnvandsbassiner, hvilket muliggør en høj densitet af observationer i områder, som er interessante, når radardata bruges til prognostisering eller analyser i urbane områder. Flere forsyninger foretager allerede målinger i flere bassiner, og de øgede omkostninger ved implementering af metoden er dermed relativt begrænset.

Arealintegrerede regnestimater målt i afløbssystemet giver målinger af konsekvenserne i afløbssystemerne af en specifik regnhændelse, hvorved det er muligt at validere nowcastet nedbør ved sammenligning med den del af nedbøren, som reelt er relevant for afløbssystemerne. Samtidigt foretages regnestimaterne med et større opsamlingsareal, som kan være svarende til den spatiale opløsning af radarpixels.

Den hydrologiske reduktionsfaktor for et specifikt opland er som oftest usikker og bruges som kalibreringsparameter i afløbsmodeller. Gennem metoden udviklet i RADIATE beregnes den hydrologiske reduktionsfaktor for oplandet uafhængigt af regnmålere inden for oplandet. Dette giver værdifuld information for forsyninger om oplandene og oplandenes respons på nedbør, hvilket kan bruges i afløbsmodellering til at opnå mere pålidelige modeller.

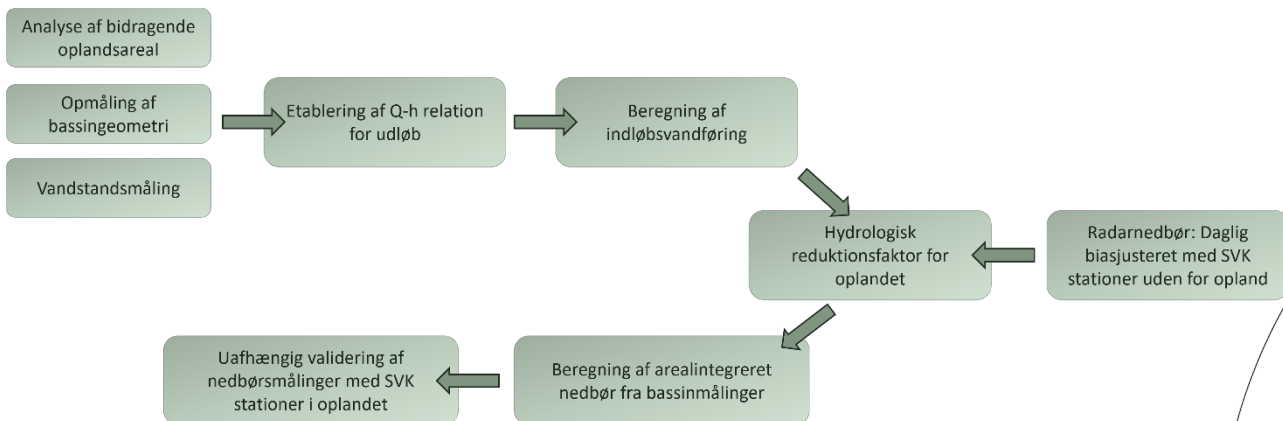
Det er valgt at anvende bassiner til opportunistiske afstrømningsmålinger, da der i urbane områder er et stort antal bassiner, hvilket giver mulighed for et tæt netværk af målere, som kan bruges til validering af radar nowcast. Desuden er bassinerne ofte lettilgængelige og flere bassiner monitoreres allerede, hvorved anvendelse af bassiner til afstrømningsmålinger medfører en mindre meromkostning i disse bassiner. Derudover er afstrømningsmålingerne og dermed regnestimaterne ikke sensitive over for mindre spatiale forskydninger, da opsamlingsarealet er betydeligt større end regnmålere. Dette gør bassiner oplagte til evaluering af performance af radar nowcast, da der kan evalueres på konsekvensen af nedbøren i afløbssystemet. Yderligere regnmålinger muliggør uafhængig validering af radar nowcast, da

der ikke valideres mod målinger, som er anvendt til justering. Dermed er der potentiale for, at der ikke blot opnås en bedre validering men også en mere korrekt evaluering af performance.

Metoden til at opnå regnestimater ud fra afstrømningsestimater kan anvendes til historisk justering af radardata, analyser, design og validering af radar nowcast modeller. Dog er anvendelsesmulighederne begrænset i realtid, da metoden forudsætter målinger af afstrømet nedbør, hvilket uundgåeligt medfører en forsinkelse på regnestimaterne.

Bassiner til afstrømningsmålinger

En konceptuel metodebeskrivelse til at opnå afstrømningsmålinger og regnestimater ud fra målinger i bassiner er vist på figur B3.1. Metoden kræver analyser af det bidragende opland for at bestemme arealet heraf, opmåling af bassingeometrien, hvilket kan opnås på forskellige måder, samt måling af vandstanden i bassinet. Ud fra dette, er det muligt at beregne udløbets Q-h relation og dermed bestemme udløbsvandføringen ved enhver målt vandstand. Ved kendskab til udløbsvandføringen og stigningen i vandstanden i bassinet under regnhændelser beregnes indløbsvandføringen. Dagligt biasjusteret radardata giver estimater af nedbøren over oplandet. Dette kræver regnmålere indenfor radarens dækningsområde, men ikke nødvendigvis inden for det betragtede opland. Ud fra radarbaserede nedbørsestimater og målte indløbsvandføringer over en periode estimeres den hydrologiske reduktionsfaktor for oplandet. Dette muliggør estimering af nedbøren, der er faldet i hele oplandet, ved måling af stigning i vandstanden i bassinet. For at eftervise, at der opnås pålidelige regnestimater med den præsenterede metode, er disse estimater valideret ved sammenligning med SVK regnmålere i oplandet, som ikke har været anvendt til beregning af afstrømningsmålinger eller regnestimater.

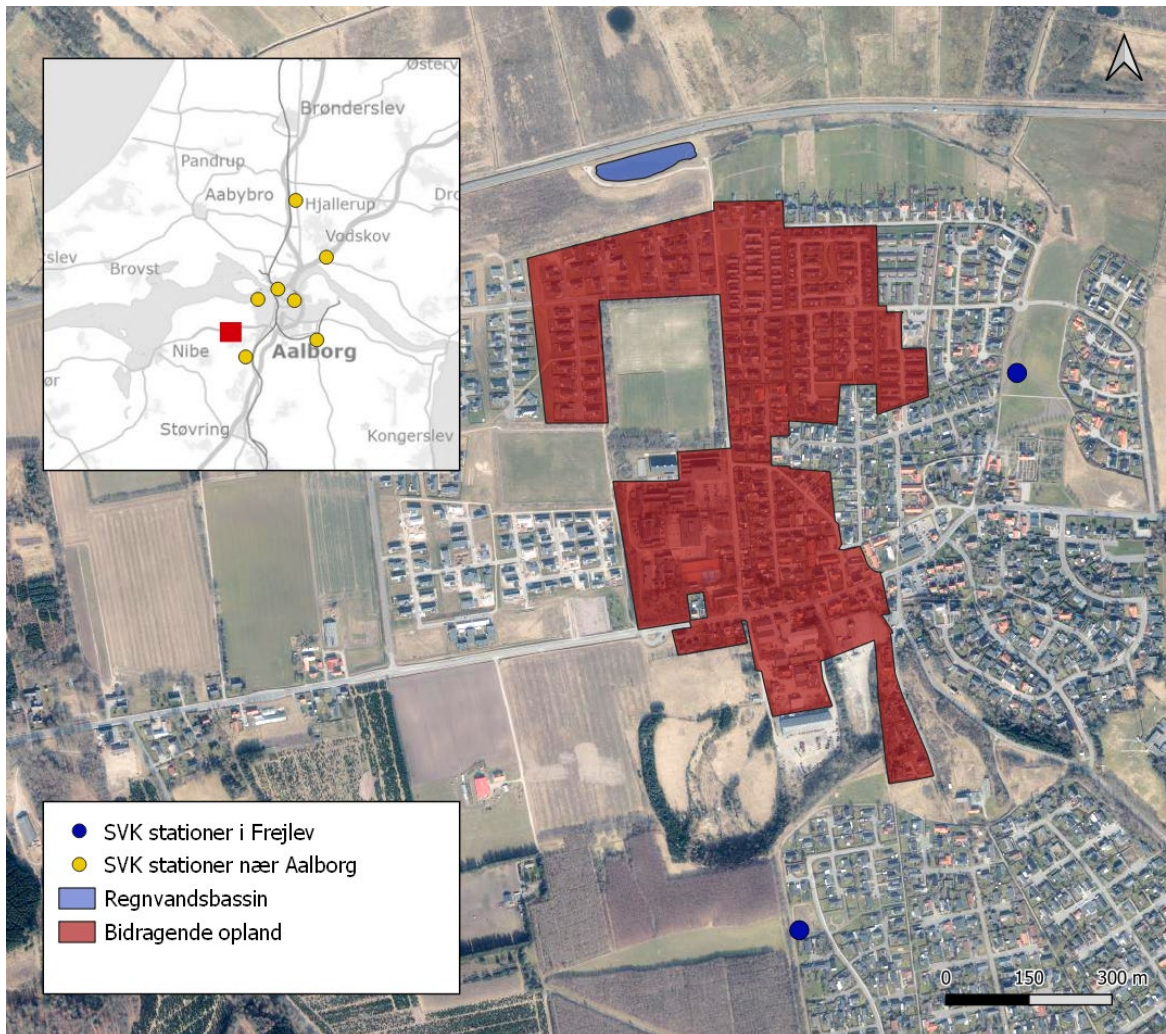


Figur B3.1: Konceptuel beskrivelse af metoden anvendt til at opnå opportunistiske afstrømningsmålinger til validering af radar nowcast.

Caseområde

Til udvikling af metoden til at måle afstrømning og estimere regndybder på oplandsskala er der udvalgt et caseområde. Området ligger i byen Frejlev omkring 10 km sydvest for Aalborg. Frejlev er en forstad til Aalborg og består primært af beboelsejendomme med omkring 3.000 indbyggere. Store dele af Frejlev er separatloakeret, og en del af byen udgør oplandsareal til et bassin i den nordlige del af byen (figur B3.2). Det bidragende opland til Frejlev er ca. 34,1 ha med en befæstelsesgrad på 46%.

Området er udvalgt til metodeudvikling, da der i Frejlev er to SVK regnmålere, som giver mulighed for udvikling af metoden med uafhængig validering mod hele to stationer. Stationerne er SVK station 5057 (nordlige station) og 5058 (sydlige station). Derudover er der nær Aalborg 7 SVK stationer, som i denne forskning er anvendt til daglig biasjustering af radardata fra C-bånds radaren i Sindal.



Figur B3.2: Caseområde i Frejlev med bassin i den nordlige ende af byen. De to SVK stationer i Frejlev (5057 og 5058) er markeret med blå. Øvrige SVK stationer nær Aalborg er markeret med gul.

Bassinet er designet med permanent vandspejl i kote 4,32 (kote for vandbremse), to indløb og et udløb. Vandbremsen i bassinet er oplyst at have en maksimal vandføring på 36 l/s. Fra bassinet udledes regnvandet til en mindre grøft, inden dette strømmer i Hasseris Å.

Måling af vandstand

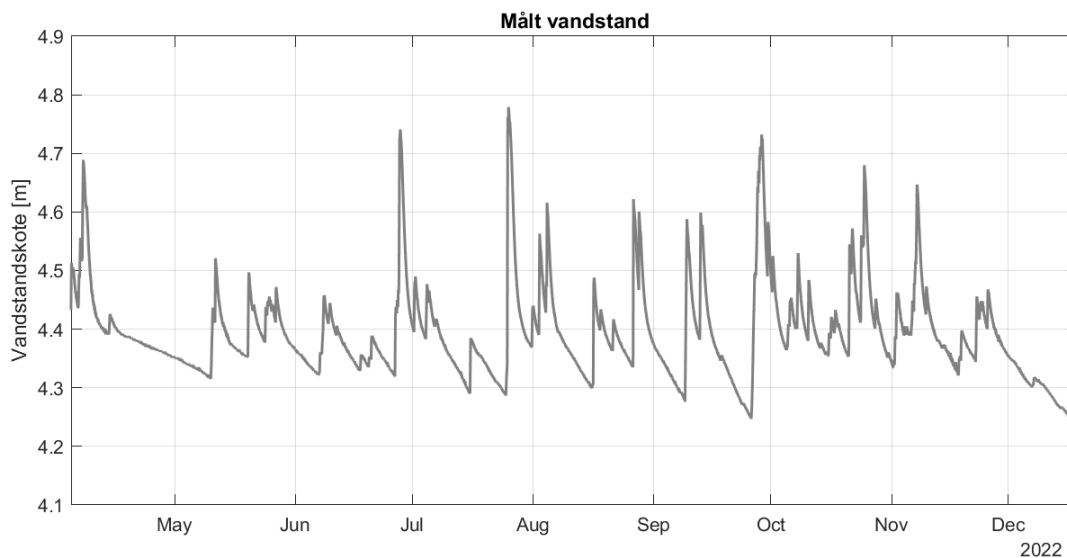
Vandstanden i bassinet er målt med en OTT ecoLog 500 fra (OTT HydroMet, 2023). Sensoren måler trykket, hvilket omregnes til en vandstand, med 5 minutters intervaller. Dataen sendes til en FTP server hver 6. time. Det er muligt at ændre hyppigheden for at sende data, hvorved data kan tilgås i realtid. Sensoren er placeret midt i bassinet i øst-vest gående retning for at minimere effekter fra vindopstuvning. Desuden er sensoren placeret relativt nær vandkanten for at sikre nem adgang.

Sensoren er monteret i et rør på en pæl (figur B3.3). Dette sikrer, at loggeren beskyttes bedst muligt mod tilgroning samtidigt med, at senderen er over vandspejlet. For let montering i bassinet, er pælen på forhånd støbt i en beholder, som dermed kan placeres i bassinet uden brug af værktøj.

Grundet måleusikkerheder og mindre bølger indeholder målte vandstande en vis mængde støj. Derfor er vandstandene filteret ved brug af et glidende gennemsnitsfilter med binomial udvidelse på $[1/2 \ 1/2]^n$. Vandstanden i bassinet er målt i en periode på 9 måneder i løbet af år 2022. De målte vandstande er vist på figur B3.4.



Figur B3.3: Opstilling til måling af vandstand i bassiner.



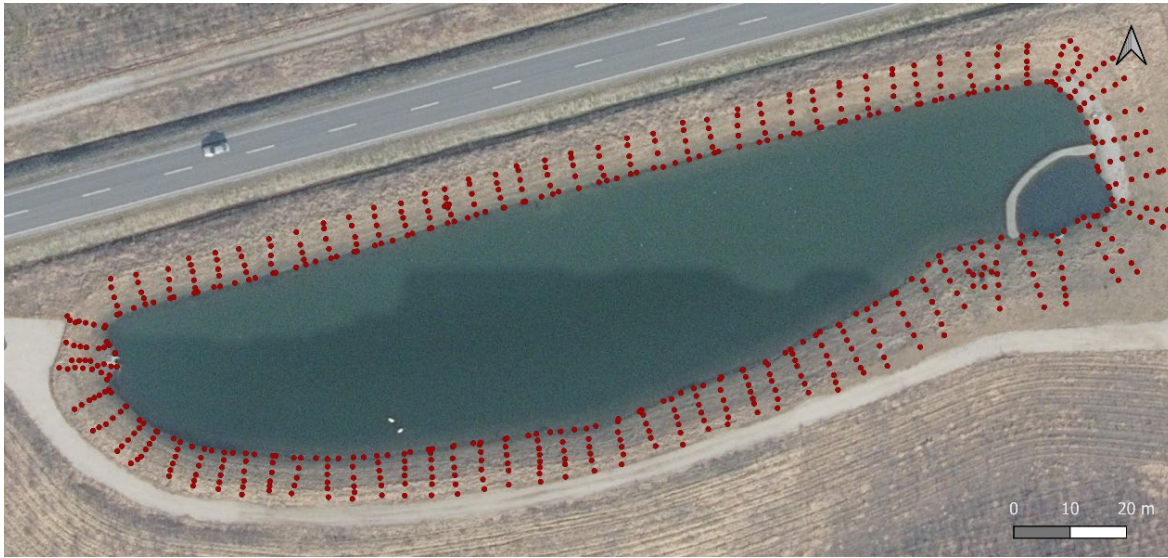
Figur B3.4: Vandstand målt i bassinet i Frejlev.

Tilfældig udvælgelse af valideringsdata

For at foretage en uafhængig validering af metoden er del af datasættet vist på **figur B3.4** udvalgt til validering. I datasættet er alle nedbørsdage i oplandet defineret, og heraf er 20% udvalgt med tilfældig udtagning til validering. Disse 20% af datasættet er svarende til 12 døgn med nedbør i oplandet. De øvrige 80% af datasættet anvendes til at fastsætte den hydrologiske reduktionsfaktor, som er nødvendigt for at opnå regnestimer ud fra de opportunistiske afstrømningsmålinger.

Opmåling af bassingeometri

Bassingeometrien er opmålt med to forskellige metoder: Opmåling med differential GPS og fotogrammetri. Opmålinger med differential GPS er ofte anvendt til at fastsætte geometrier af bassiner. Usikkerheden på differential GPS-opmålinger med RTK-streaming, som der er anvendt i dette projekt, er ned til få centimeter. Metoden forudsætter, at der foretages mange målinger med kort afstand for at sikre en nøjagtig repræsentation. Ud fra målingerne dannes en interpoleret højdemodel. Grundet de mange nødvendige målinger er metoden tidskrævende. Opmålingspunkterne foretaget ved bassinet i Frejlev med differential GPS er vist på figur B3.5. Der er i alt opmålt 650 punkter.



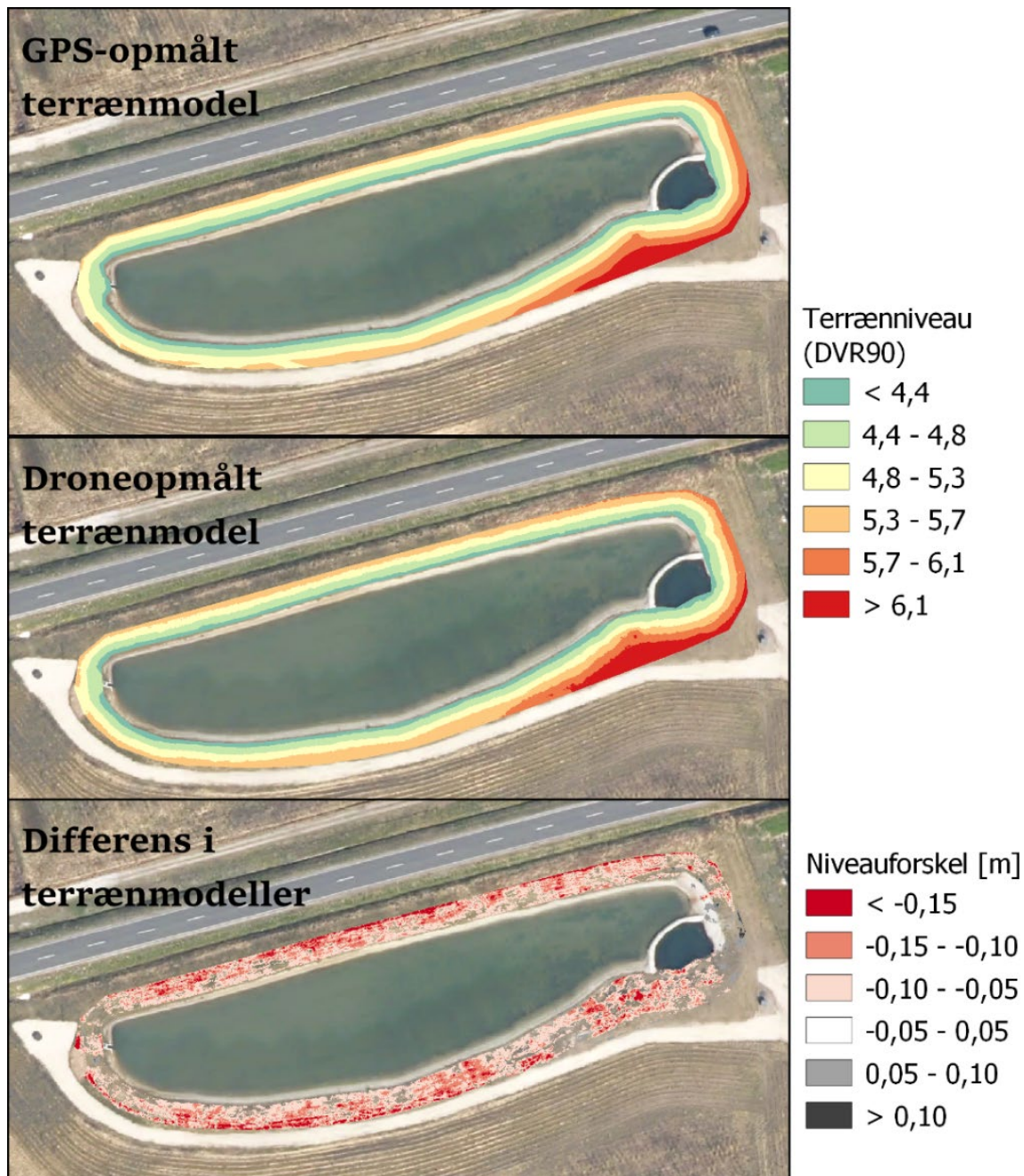
Figur B3.5: Punkter opmålt med differential GPS i bassinet i Frejlev.

For at undersøge, om det er muligt at opmåle bassinerne mere effektivt, er GPS-opmålingerne sammenlignet med fotogrammetri udført med billeder fra droneoverflyvninger. Ved denne metode forudsættes det, at der ikke er væsentlig beplantning eller højt græs om bassinet. Derudover kræves der enkelte kontrolpunkter med differential GPS for nøjagtig opmåling. Yderligere information om metoden, fordele og ulemper er beskrevet i Zhao et al. (2023). Billederne fra dronedeflyvningerne anvendes til at opbygge en 3D model, og herudfra dannes højdemodel. 3D modellen af bassinet i Frejlev er illustreret på figur B3.6.



Figur B3.6: 3D model opbygget ud fra fotogrammetri med fotografering med dronedeflyvninger.

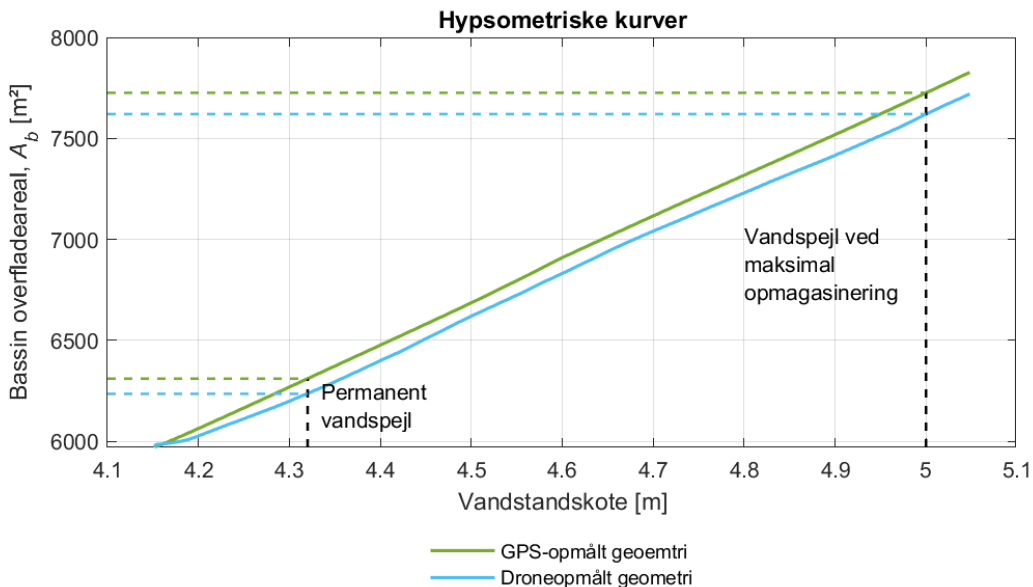
Højdemodellerne opbygget ud fra de to metoder samt differensen herimellem er angivet på figur B3.7. Heraf fremgår det, at der generelt er overensstemmelse mellem de to modeller. Nøjagtigheden ved fotogrammetri er meget høj. Dog kan højt græs give en forskel i de to metoder, da der med fotogrammetri måles på toppen af græsset. Dette er den største årsag til forskellen i de to modeller. Det skal dog bemærkes, at de største forskelle på de to modeller er omkring 15 centimeter og dermed ikke nødvendigvis afgørende for bestemmelse af bassinvolumenet og dermed ind- og udløbsvandføringen.



Figur B3.7: Terrænmodeller ud fra GPS-opmålinger (øverst) og droneopmålinger (midt) samt differensen i de to modeller (nederst).

Ud fra terrænmodellerne er der opstillet hypsometriske kruver for bassinet for de to metoder, som beskriver overfladearealet af bassinet som funktion af vandstanden (figur B3.8). Det

fremgår af figuren, at der er forskelle på de to kurver, hvilket er resultatet af differensen i terrænmodellerne.



Figur B3.8: Hypsometriske kurver for bassinet i Frejlev ud fra GPS-opmålt og droneopmålt geometri.

Q-h relation for bassinudløb

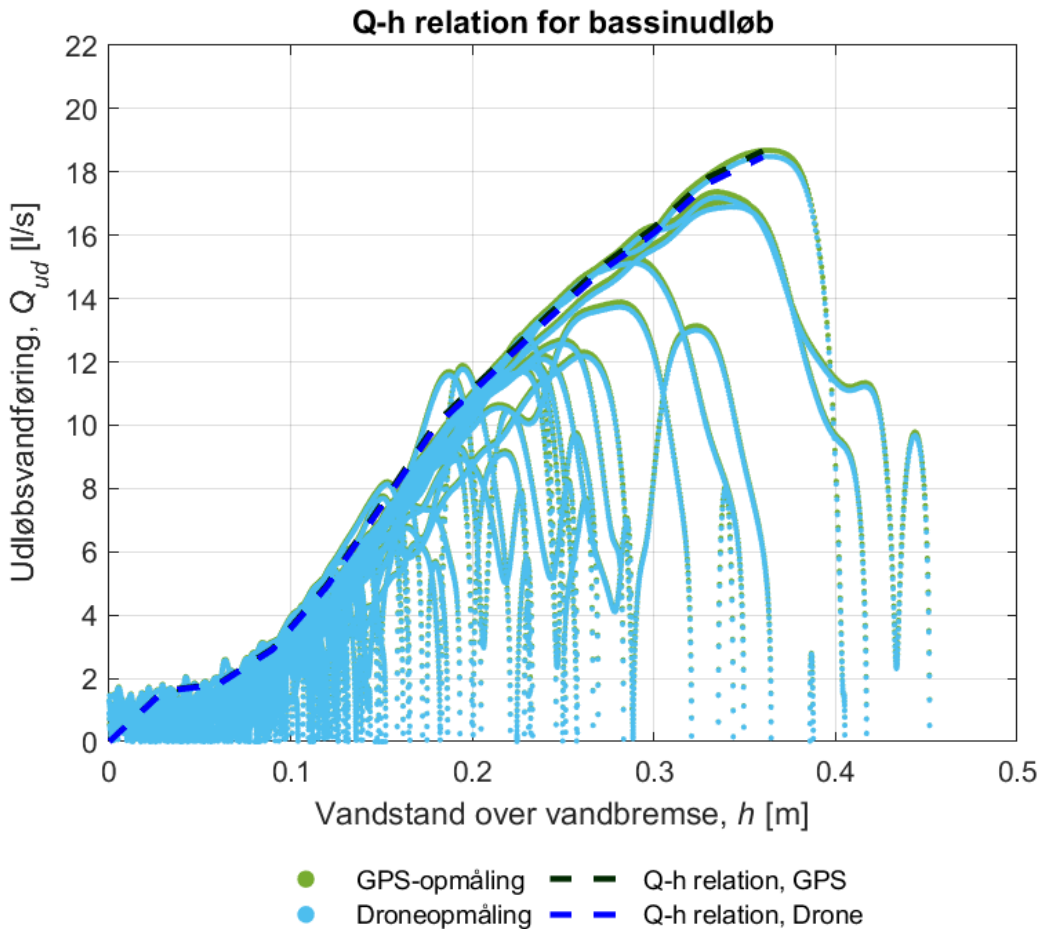
Udløbsvandføringen fra bassinet fastsættes ud fra de målte vandstande samt de hypsometriske kurver. Der er opstillet en massebalance for bassinet, som følgende:

$$Q_{ud}(h(t)) = \frac{dh}{dt} \cdot A_b(h(t)) + Q_{ind}(t) \quad (B3.1)$$

Hvori Q_{ud} er udløbsvandføringen afhængigt af vandstanden h til tiden t , og A_b er bassinets overfladeareal afhængigt af h til tiden t beskrevet ud fra de hypsometriske kurver, og Q_{ind} er indløbsvandføringen afhængigt af tiden t . I perioder uden indløbsvandføring kan udløbsvandføringen dermed beskrives ud fra volumenændringen over tiden i bassinet. Estimeres udløbsvandføringen med denne metode i perioder med indløbsvandføring > 0 , vil udløbsvandføringen underestimeres. Dette medfører, at Q-h relationen for udløbet kan beskrives ud fra en front af punkter, der beregnes, når hele måleperioden betragtes, da den maksimalt beregnede udløbsvandføring angiver vandføringen gennem vandbremsen, mens indløbsvandføringen er 0 l/s.

Q-h relationen er etableret empirisk ved at bestemme 99 fraktilen af målepunkter, som vist på figur fig:qh. Nær vandbremsen medfører måleusikkerheder betydelige usikkerheder, og det er derfor valgt at forcere en skæring ved niveauet for vandbremsen.

Q-h relationen for vandbremsen i udløbet er beregnet med både GPS-opmålt og droneopmålt geometri for at fastsætte, om forskellen i de hypsometriske kurver medfører forskelle i den beregnede udløbsvandføring. Som det fremgår af figur B3.9, er der forskellen mellem de beregnede punkter begrænset, hvilket leder til, at de to etablerede Q-h relationer ikke afviger fra hinanden. Dette viser, at der fotogrammetri kan bruges til opmåling af bassiner, og for opportunistiske afstrømningsmålinger har valget af metode ikke afgørende betydning.



Figur B3.9: Q-h relation for vandbremsen ved udløbet fra bassinet i Frejlev. Q-h relationerne er angivet med stiplede linjer.

Indløbsvandføringen til bassinet er beregnet ud fra massebalancen for bassinet, idet udløbsvandføringen udtrykkes for en hver målt vandstand med den etablerede Q-h relation.

Dagligt biasjusteret radarnedbør over oplandet

Radardata fra C-båndsradaren i Sindal er anvendt til at estimere regndybden i oplandet. Regnintensiteterne er bestemt ved brug af Z-R forholdet beskrevet i Marshall & Palmer (1948) med konstante potensparametre A og b , hvor der her er anvendt værdier på $A=200$ og $b=1.6$. Da parametrene i virkeligheden afhænger af dråbestørrelsesfordelinger, som varierer mellem regnhændelser, er justering med jordobservationer nødvendig. Radardataen er biasjusteret med mean field bias (MFB) faktor, som multipliceres med regnintensiteten:

$$MFB = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^T R_{SVK}[i(k), j(k)]}{\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^T R_R[i(k), j(k)]} \quad (B3.2)$$

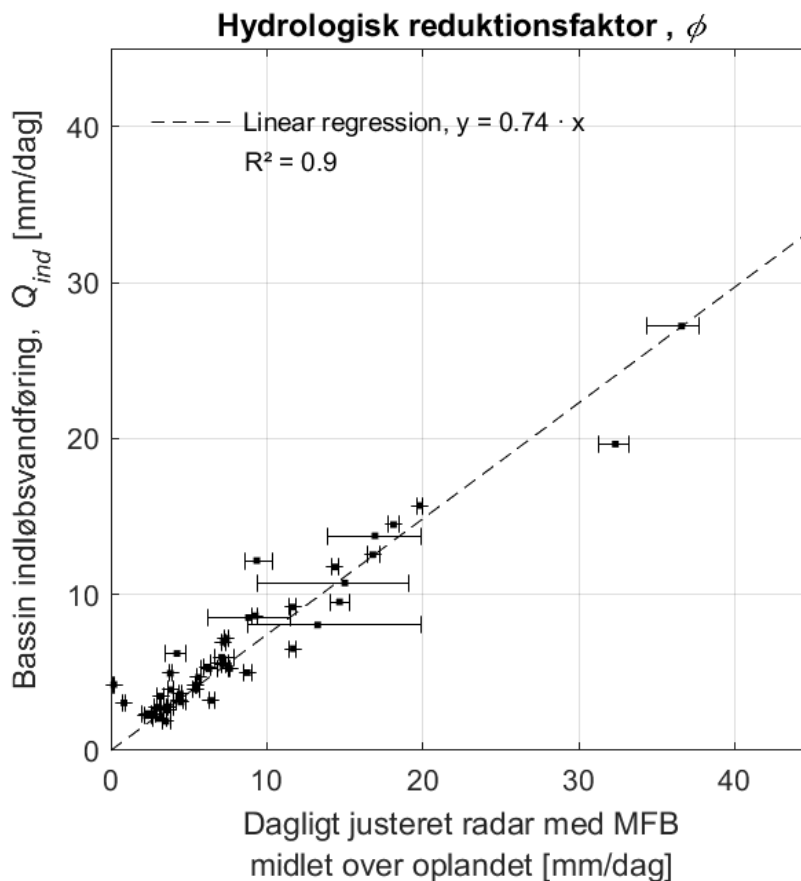
Hvor N er antal radar-regnmåler pixel par, T er antal timer med observeret regn i både regnmåler og radar, R_{SVK} er SVK-observeret regndybde for SVK-stationen lokaliseret i punkt $[i, j]$, og R_R er radarobserveret nedbør i den dertilhørende pixel.

MFB faktoren er bestemt ud fra de 7 SVK regnmålere nær Aalborg, og de 2 SVK-regnmålere i Frejlev er ikke anvendt til MFB justering, da disse anvendes til metodevalidering. Radardataen er justeret med en daglig MFB, hvormed én faktor beregnes pr. døgn.

Hydrologisk reduktionsfaktor

For at estimere regndybden i oplandet ud fra de opportunistiske afstrømningsmålinger kræves viden om den hydrologiske reduktionsfaktor. Den hydrologiske reduktionsfaktor angiver forholdet mellem volumen af regnvand faldet i oplandet og volumen af regnvand afstrømmet til bassinet. For at estimere volumen af regnvand faldet i oplandet er den dagligt biasjusteret radarnedbør over oplandet anvendt. Da flere radarpixels dækker oplandet, er der anvendt en middelværdi heraf til beregning af den hydrologiske reduktionsfaktor. Den hydrologiske reduktionsfaktor er bestemt ud fra de 80% af datasættet, som ikke er anvendt til validering.

Den hydrologiske reduktionsfaktor for Frejlev er angivet som hældningen på regressionslinjen vist på figur B3.10. De vandrette linjer på figuren angiver den stedlige variabilitet i nedbøren over oplandet målt med radardata. Der er i Frejlev beregnet en hydrologisk reduktionsfaktor på 0,74 svarende til en afløbskoefficient på 0,34. Med en R^2 -værdi på 0,9 er denne metode vurderet meget anvendelig til estimering af den hydrologiske reduktionsfaktor. Ydermere er den beregnede hydrologiske reduktionsfaktor i overensstemmelse med værdier, som oftest antages korrekte for denne type opland.

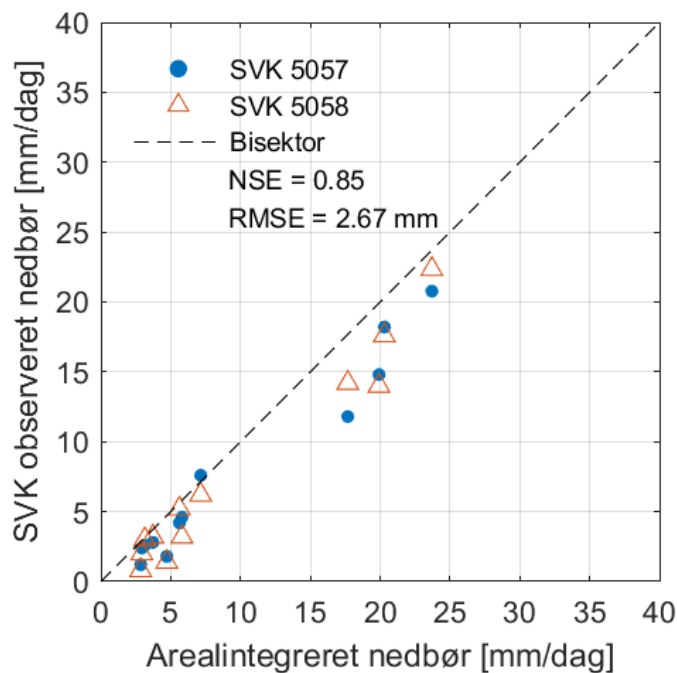


Figur B3.10: Hydrologisk reduktionsfaktor for oplandet i Frejlev bestemt ud fra hældningen på regressionslinjen.

Validering af regnestimater fra opportunistiske afstrømningsmålinger

Nedbøren i oplandet i Frejlev er estimeret ud fra indløbsvandføringen til bassinet på døgnbasis, oplandsarealet og afløbskoefficienten. Denne estimerede nedbørsdybde for oplandet er valideret ved at sammenligne med de to SVK stationer i oplandet på de 12 dage, som tilfældigt er udvalgt til validering. Grundet væsentlig forskel i opsamlingsarealet til bassinet og til regnmålerne vil stedlig variabilitet i nedbøren over oplandet altid medfører forskel i regnobservationer mellem de to metoder. Dog er denne differens i skala en fordel, når afstrømningsmålinger fra bassiner anvendes til validering af radar nowcast.

De arealintegrerede regnestimater bestemt ud fra afstrømningsmålinger og regndybder observeret med SVK er angivet på figur B3.11. Af figuren fremgår det, at der er forskelle i regndybder målt med de to metoder. Dog er der opnået en generelt god overensstemmelse vist med en NSE-værdi på 0,85. Det er vigtigt at bemærke, at de arealintegrerede regnestimater er bestemt uafhængigt af SVK-stationerne, og tilsvarende nøjagtigheder kan forventes i andre oplande uden SVK stationer, såfremt der i radarens dækningsområde og inden for rimelig afstand af det betragtede bassin er SVK stationer til biasjustering af radarnedbør.

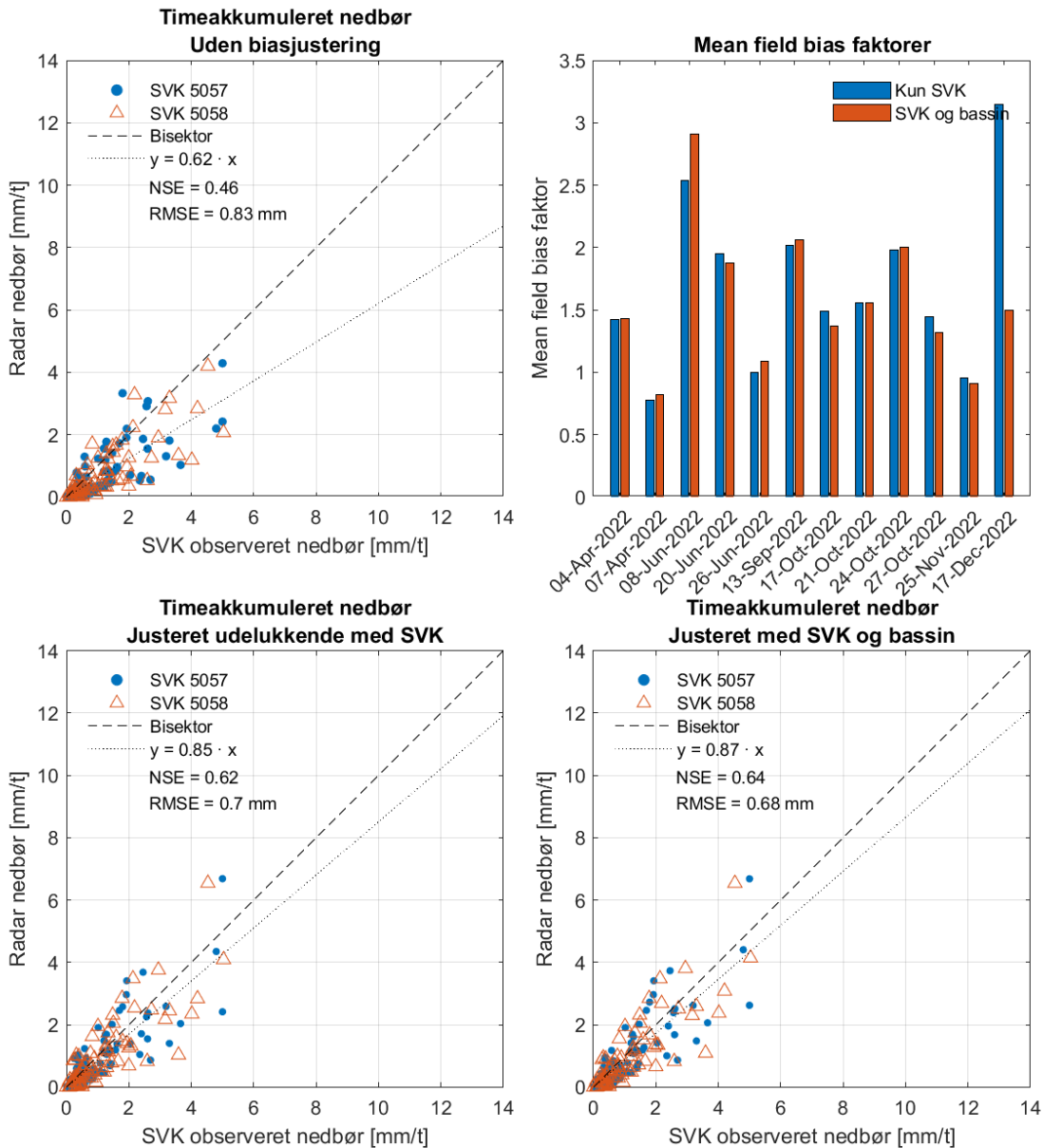


Figur B3.11: Sammenligning af SVK observeret nedbør og arealintegreret nedbørsestimater fra opportunistiske afstrømningsmålinger.

Ud fra denne sammenligning er det konkluderet, at opportunistiske afstrømningsmålinger er anvendelige til at estimere nedbør i oplande til bassiner. Da der med opportunistiske afstrømningsmålinger kan opnås præcise arealintegrerede regnestimater uafhængigt af SVK-stationer placeret inden for oplandet, er metoden vurderet yderst relevante til evaluering af performance af radar nowcast.

Radarjustering med opportunistiske afstrømningsmålinger

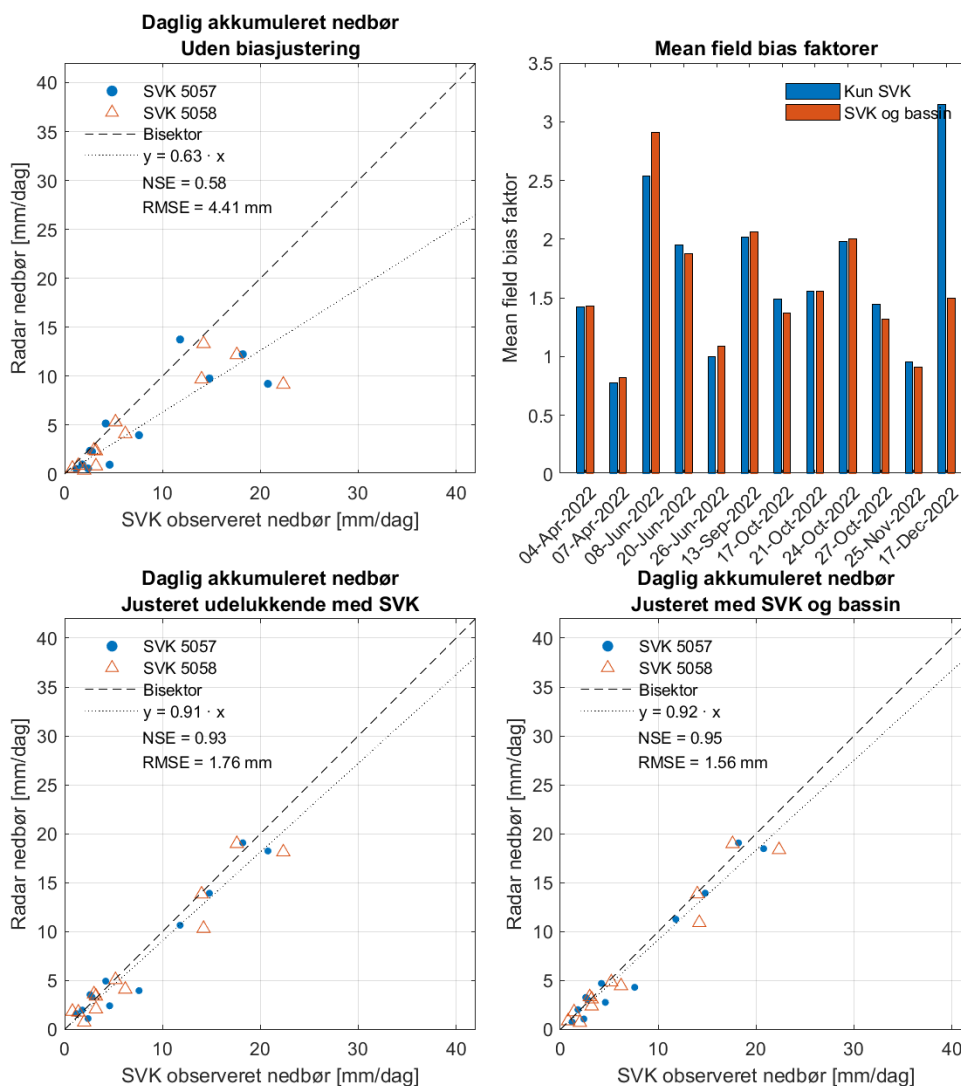
Da der kan opnås akkurate regnestimater ud fra opportunistiske afstrømningsmålinger, kan de arealintegrerede regnestimater ydermere anvendes til justering af historisk radardata. For at undersøge, om afstrømningsmålinger fra bassiner kan anvendes som supplement til SVK-observationer som jordobservationer, er der for de 12 valideringsdage foretaget justering af vejrradar med og uden inkludering af bassinet som jordobservation.



Figur B3.12: Performance af daglig biasjusteret radardata. Øverst venstre: Time akkumuleret radar nedbør under bias justering. Øverst højre: Daglig bias faktorer baseret på SVK alene og SVK og bassin. Nederst venstre: Time akkumuleret radar nedbør ved daglig biasjustering med SVK. Nederst højre: Time akkumuleret radar nedbør ved daglig biasjustering med SVK og bassin.

Det er ikke hensigten af opportunistiske jordobservationer af regn kan udgøre erstatninger for SVK-observationer. Derfor er bassinet i denne sammenligning udelukkende anvendt som supplement og der er ikke foretaget sammenligninger af, om bassinet alene giver en bedre eller ringere radarjustering end justering med SVK-observationer.

Der er foretaget justeringer med en daglig MFB. Radarobservationerne er sammenlignet med de to SVK-stationer i Frejlev, som ikke er anvendt til justering. Evalueringen er dermed foretaget med uafhængige jordobservationer. Performance af regnestimaterne med biasjusteret radar er foretaget på timeakkumuleret (figur B3.12) og døgnakkumuleret nedbør (figur B3.13). På figurerne er biasfaktorerne for hver af de 12 valideringsdage ydermere angivet.



Figur B3.13: Performance af daglig biasjusteret radardata. Øverst venstre: Daglig akkumuleret radar nedbør under bias justering. Øverst højre: Daglig bias faktorer baseret på SVK alene og SVK og bassin. Nederst venstre: Daglig akkumuleret radar nedbør ved daglig biasjustering med SVK. Nederst højre: Daglig akkumuleret radar nedbør ved daglig biasjustering med SVK og bassin.

Ved at biasjustere radardaten opnås tydelige forbedringer på både time- og døgnværdier. Biasjustering med de 7 regnmålere omkring Aalborg uden inkludering af bassinet giver regnestimater med høj nøjagtighed for både time- (NSE=0,62) og døgnakkumuleret (NSE=0,93) nedbør. Forbedringen ved at inkludere bassinet i biasjusteringen er dog begrænset. Dette skyldes, at nøjagtigheden og præcisionen ved justering kun med SVK-målere allerede er meget høj, og derfor er der svært at forbedre betydeligt. Derudover har bassinet kun en vægning svarende til en enkelt regnmåler, hvorfor denne kun vægter 1/8 i justeringen, hvis der er observeret nedbør i alle regnmålere på den pågældende dag. Dette er årsagen til de relativt beskedne ændringer i biasfaktorerne ved inkludering af bassinet i justeringen.

Der opnås en forbedring ved at medtage afstrømningsmålingerne fra bassinet i justeringen af radar. For både time- og døgnakkumuleret nedbør observeres en stigning i NSE-værdi på 0,02 og samtidigt et fald i RMSE-værdier. Derudover er det relevant at bemærke, at den generelle bias (udtryk ved regressionslinjens hældning) reduceres, når afstrømningsmålingerne medtages. Dette indikerer, at opportunistiske afstrømningsmålinger har et potentiale i justering af historisk radarnedbør.

Da det er vist, at nøjagtige regnestimater kan opnås gennem opportunistiske afstrømningsmålinger, og forbedringer er observeret ved at inkludere afstrømningsmålingerne i radarjustering, er det vurderet, at opportunistiske afstrømningsmålinger kan anvendes som supplement til SVK-regnmålere i radarjustering.

Referencer

Ahm, M., & Rasmussen, M. R. (2017). Weather radar adjustment using runoff from urban surfaces. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(5), E4015004.

Marshall, J. S., & Palmer, W. M. K. (1948). The distribution of raindrops with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, 5(4), 165-166.

Marx, A., Kunstmann, H., Bárdossy, A., & Seltmann, J. (2006). Radar rainfall estimates in an alpine environment using inverse hydrological modelling. *Advances in Geosciences*, 9, 25-29.

OTT HydroMet, 2023. Technical Data - OTT ecoLog 500 Water Level Logger, s.l.: OTT HydroMet GmbH, Germany.

Zhao, G., Rasmussen, M. R., Larsen, K. G., Srba, J., Nielsen, T. D., Goorden, M. A., Weizhu, Q. & Nielsen, J. E. (2023). Determine stormwater pond geometrics and hydraulics using remote sensing technologies: a comparison between airborne-LiDAR and UAV-photogrammetry field validation against RTK-GNSS. *Journal of Hydroinformatics*.

Bilag 4 - RADIATE KAMA: Et værktøj til forsyningsdrift og -planlægning med radardata og nowcast

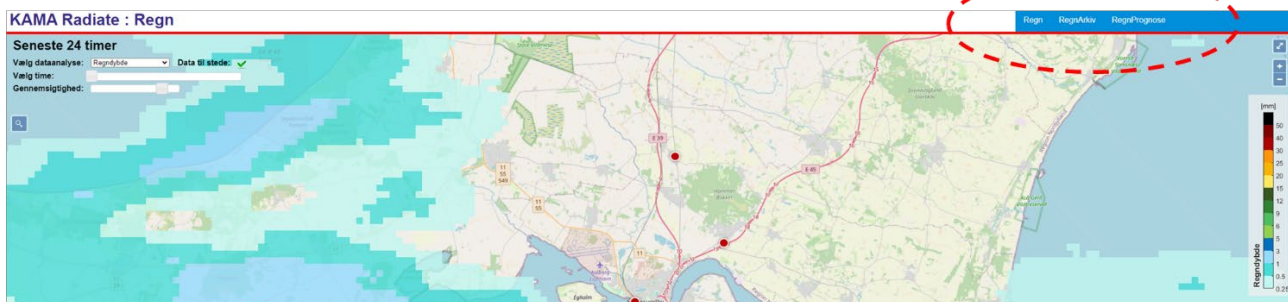
For at radardata er anvendeligt i drifts- og planlægning, er det nødvendigt at foretage analyser på dataen, da informationer som nedbørsdybder, maksimale regnintensiteter og skybrudsmålninger er afgørende for forsyningerne. Dette kan begrænse anvendelse af radardata i praksis til drift og planlægning, da analyser skal foretages lokalt og – for at være anvendelige til drift – også tilgængelige i realtid. Derfor er der i RADIATE udviklet et værktøj, som har til formål at bringe radardata og radar nowcast i anvendelse i drift og planlægning ved brug af radaranalyser. Værktøjet er udviklet til at levere kvantitativ radarinformation og være operationel til drift og forsyningsformål.

RADIATE KAMA er en demonstration af anvendelsen af analyseret radardata. For at udvikle et anvendeligt værktøj er KAMA udviklet i tæt samarbejde med brugerne og ud fra ønsker og behov defineret af projektpartnerne i RADIATE. Værktøjet er igennem projekt RADIATE udviklet for et enkelt forsyningsområde (Aalborg Forsyning) for at demonstrere potentialet og mulighederne for anvendelse af radardata og radar nowcast til forsyningsformål.

KAMA er opdelt i 3 separate dele, som hver indeholder relevante analyser af radardata: 1) KAMA Radiate: Regn, som indeholder radaranalyser på realtidsdata, 2) KAMA Radiate : RegnArkiv, som indeholder radaranalyse på historisk data, og 3) KAMA Radiate : RegnPrognose, som indeholder analyser af prognosticeret radardata.

Datavisualisering i RADIATE KAMA

Datavisualiseringen i KAMA foregår gennem en webbrowser, hvorved værktøjet er gjort lettilgængeligt for brugerne af produktet. Hver af de 3 analyseområder (Regn, RegnArkiv og RegnPrognose) tilgås gennem faner øverst i højre hjørne. Dette muliggør hurtig og let skift mellem analyseområder (figur B4.1).



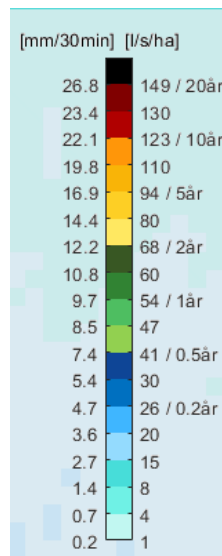
Figur B4.1: Datavisualisering i KAMA med mulighed for skift mellem de 3 områder: Regn, Arkiv og Prognose.

For at sikre anvendeligheden af KAMA, indeholder værktøjet få men relevante data. Dette gør, at brugeren har mulighed for let at visualisere den ønskede analyse uden besvær grundet for mange irrelevante muligheder. Den for brugeren korrekte definition af relevant data er sikret gennem tæt dialog med projektpartnerne.

Farveskalaer i KAMA

Med lineære farveskalaer er det meget vanskeligt at visualisere alle typer nedbør. Derudover er det nødvendigt at have en farveskala, som tydeligt indikerer relevante grænser for forsyningerne. I KAMA er alle farveskalaer dannet specifikt til hver analyse. Alle farveskalaer er kraftigt ikke-lineære, hvilket muliggør visualisering af kraftig og let nedbør med samme skala. Farveskalaerne er bestående af flere farvepaletter, hvor overgangene mellem paletter er valgt ud fra hvilke værdier, der er yderst relevante at skelne mellem i forsyningsformål. Nogle af farveskalaerne er desuden angivet med flere forskellige enheder og markeringer, som er relevante i drifts- og planlægningsformål. Et eksempel på en farveskala er angivet på figur B4.2.

Generelt er farveskalaerne opbygget, således at lave eller ikke-risikofyldte værdier er angivet med blålige nuancer, lidt højere værdier er angivet med grønne nuancer, og værdier, som kan være kritiske i forsyningsdrift eller -planlægning, er angivet med gule og røde nuancer. Særligt er overgangen mellem de grønne og gule nuancer gjort tydelig og anvendt til at indikere grænsen mellem værdier, der ikke er kritiske, og værdier, som er kritiske. På denne måde er det gjort meget effektivt at lokalisere kritiske regndybder eller -intensiteter.



Figur B4.2: Farveskala i KAMA til angivelse af 10 minutters maksintensitet. På farveskalaen er angivet relevante gentagelsesperioder samt intensiteter i 2 forskellige enheder relevante for forsyningsdrift og -planlægning.

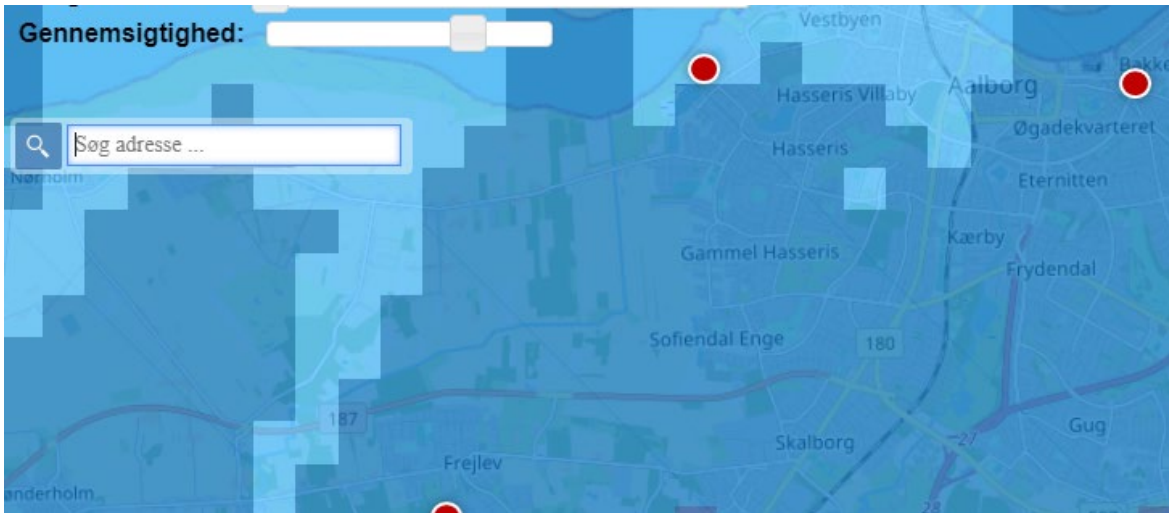
Visualisering af stedlig opløsning

På KAMA er radardataen visualiseret med diskret farvevisning, hvilket gør det muligt at aflæse værdierne for den enkelte pixel korrekt (figur B4.3). Alternativt kan dataen visualiseres lineært, hvilket medfører en udglatning af dataen. Dette gør dog, at den eksakte værdi for den enkelte pixel ikke kan aflæses med nøjagtighed. Diskret visualisering af dataen gør det derudover også muligt for brugeren at se den stedlige opløsning af radardataen. Med diskret visualisering er det dermed også simpelt for brugeren at se, om analyseresultaterne stammer fra C-båndsradar eller X-båndsradar.

Gennemsigtighed og adressesøgning

For at kunne navigere geografisk efter baggrundskort er det nødvendigt, at det viste radar-data illustreres med en vis gennemsigtighed. Dog vanskeliggør delvis gennemsigtighed korrekt aflæsning af farver illustreret på kortet. Derfor er det i KAMA muligt at kontrollere gennemsigtigheden af data med en slider, således at det er muligt at navigere geografisk og aflæse regnintensiteter, regndybder eller øvrige analyser korrekt.

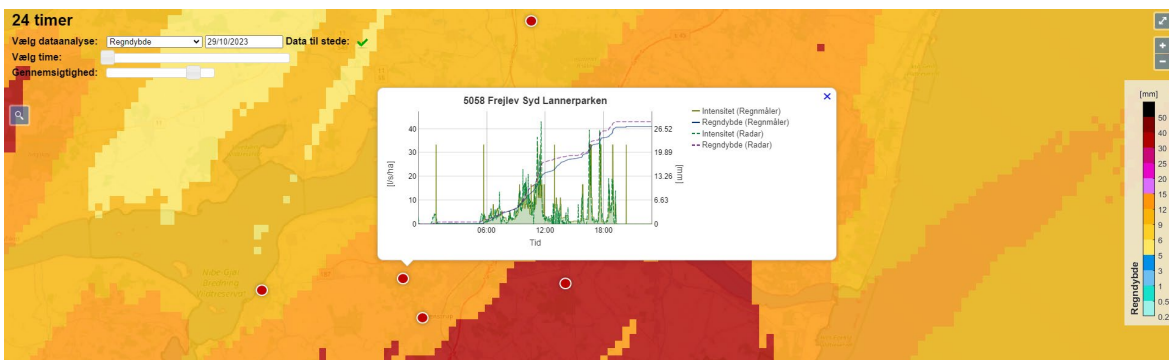
Projektpartnerne havde et stort ønske om at have adressesøgning som en del af KAMA. Denne funktion er vigtig i driftssituationer, hvor radaranalyser effektivt skal kunne aflæses på en specifik adresse. I KAMA kan adresser søges frem, og forslag til adresser gives, når indtastningen påbegyndes. Når en adresse succesfuldt er søgt frem, angives lokaliteten med en nål på kortet. Adressesøgning og slider til gennemsigtighed er vist på figur B4.3.



Figur B4.3: Adressesøgning og slider til valg af gennemsigtighed i KAMA.

Visning af SVK-regnmålere

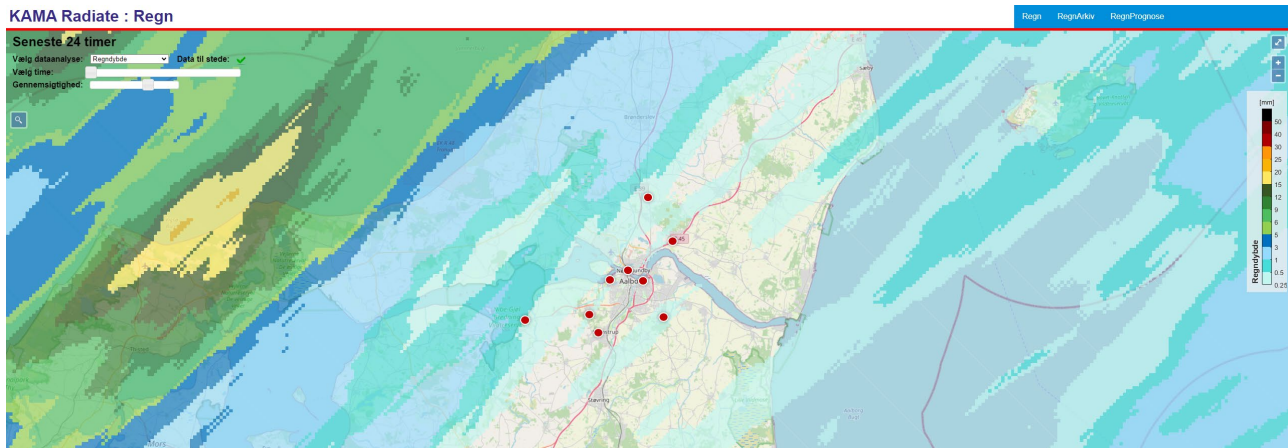
SVK-stationer og data herfra visualiseres i KAMA. Placeringer af SVK-stationer er angivet med røde prikker på kortet. Data fra stationerne visualiseres grafisk, når der klikkes på den enkelte station. Brugeren får her mulighed for at se tidsserien samt akkumuleret nedbør målt af den enkelte regnmåler. Foruden regnmålerdata angives radarmålt nedbør i den pixel, som dækker regnmåleren. Radardata og SVK observeret nedbør er vist med 1 minuts opløsning. Herved bliver det simpelt og effektivt for forsyningerne at aflæse nedbør målt med hhv. radar og regnmåler og dermed foretage en sammenligning for at vurdere, hvor godt den målte radardata passer med SVK-observationen. De målte regndybder er visualiseret med to akser for at muliggøre aflæsning med to forskellige enheder. Et eksempel på denne visualisering er vist på figur B4.4, hvor der også angives navn og ID for den betragtede SVK-station.



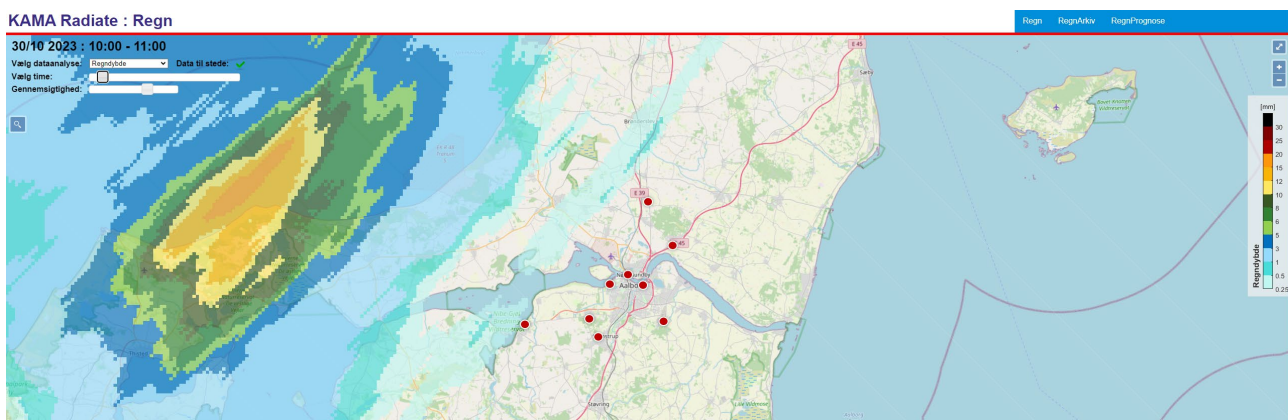
Figur B4.4: Visning af radardata og SVK-nedbør med tidsserier samt akkumuleret nedbør for stationen og den dertilhørende radarpixel.

Realtidsvisning af regn

Vælges fanen "Regn" i KAMA, vises realtidsmålinger af nedbør. På denne side visualiseres målinger fra de seneste 24 timer. Radaranalyserne vises med en opløsning på 1 time, og med en slider er det gjort muligt at vise resultaterne akkumuleret over de seneste 24 timer eller gennemgå døgnet time for time. Som udgangspunkt vises resultaterne summeret op over det seneste døgn (figur B4.5). Herudfra kan brugeren effektivt danne et overblik over, om der er områder inden for forsyningsområdet, som kræver opmærksomhed. For at undersøge, hvornår eventuelt kritisk nedbør er faldet, vælges timerne i det foregående døgn med slideren som vist på figur B4.6.



Figur B4.5: KAMA: Regn med visning af resultater af radaranalyser over de foregående 24 timer.



Figur B4.6: KAMA: Regn med visning af radaranalyser på timebasis inden for det seneste døgn.

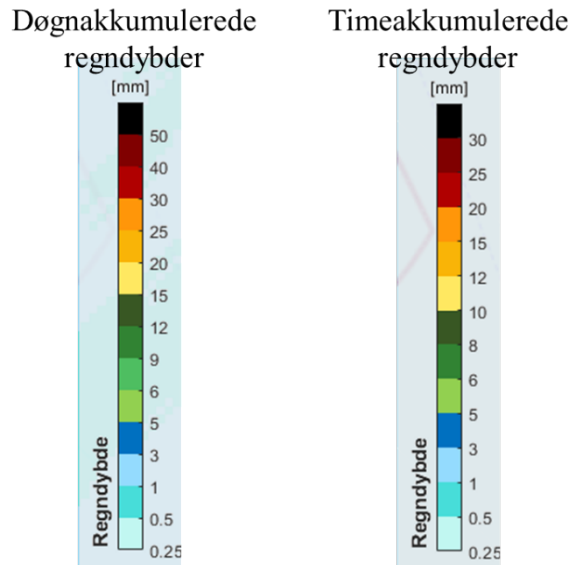
Radardataen er biasjusteret ud fra SVK regnmålere. For at foretage realtidsjusteringer af nedbør, er radardataen biasjusteret med en mean field bias justering baseret på observationer i de foregående 3 timer. Dette kræver naturligvis, at der er målt nedbør i de foregående timer. Er dette ikke tilfældet, er regnestimer fra radardata beregnet med konstante potensparametre uden biasfaktor.

I KAMA radiate: Regn er der 5 forskellige radaranalyser: Regndybde, skybrud, maksimal 10 minutters intensitet, maksimal 30 minutters intensitet og maksimal 60 minutters intensitet. For hver analyse er farveskalaer tilpasset, således at kritiske grænser og maksimale værdier er tilpasset behovet ved den enkelte analyse og tidsintervallet.

Regndybde

Analysen regndybde i KAMA: Regn angiver den beregnede summerede nedbørsdybde over det tidsinterval, der betragtes. Det vil sige, at som udgangspunkt vises den akkumulerede nedbør over det seneste døgn, og når døgnets timer gennemgås med slideren, vises den akkumulerede nedbør over den betragtede time.

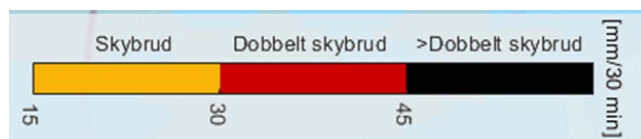
Der er for analysen regndybde udviklet to forskellige farveskalaer: en til døgnakkumuleret nedbør og en til timeakkumuleret nedbør (figur B4.7). For de lavere regndybder (< 5 mm) er de to farveskalaer ens. For større regndybder (>5 mm) er skalaerne forskellige, hvilket gør farveskalaerne langt mere anvendelige til aflæsning.



Figur B4.7: Farveskalaer udviklet til visualisering af hhv. døgnakkumuleret og timeakkumuleret nedbør i KAMA: Regn.

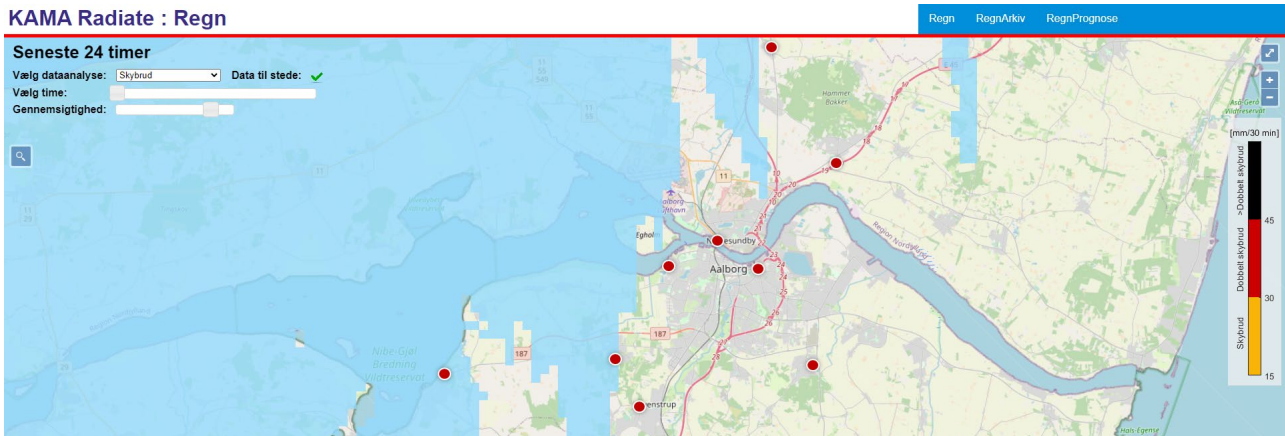
Skybrud

Analysen skybrud i KAMA radiate : Regn viser, om der er målt nedbør svarende til skybrud. Skybrudsanalysen er foretaget ved at klassificere, om der i løbet af 30 minutter er målt mere end 15 mm regn i nogle områder. Skybrud er visualiseret med en farveskala bestående af 3 farver, der indikerer hhv. skybrud, dobbelt skybrud og mere end dobbelt skybrud (figur B4.8)



Figur B4.8: Farveskala anvendt til at angive, om der er målt skybrud med radardata.

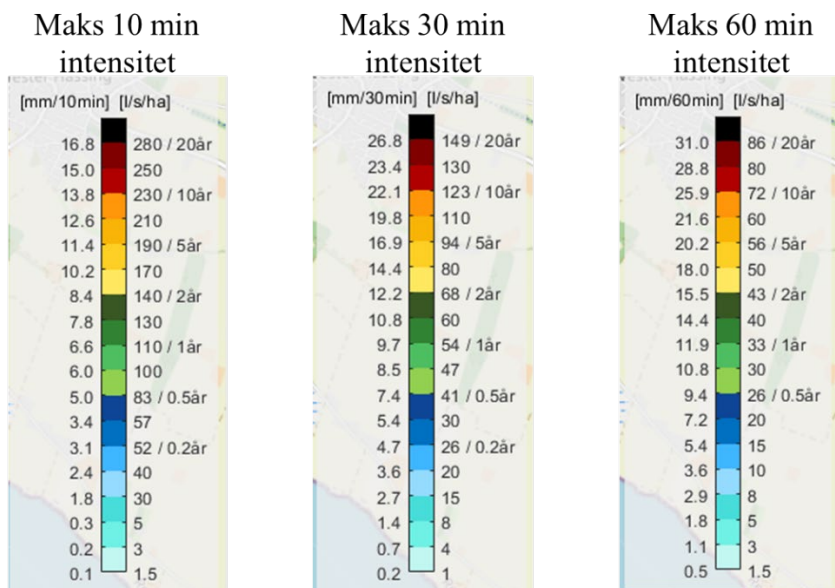
Foruden de 3 farver, der angiver skybrud, er målt nedbør, der ikke er mindre end skybrud visualiseret i KAMA: Regn. Her er alt nedbør < skybrud angivet med en lys blå farve for at indikere, at der er målt nedbør (figur B4.9).



Figur B4.9: KAMA: Regn visning af skybrudsanalyser i perioder uden skybrud med målt nedbør (vis med lys blå farve).

Maksimal regnintensitet

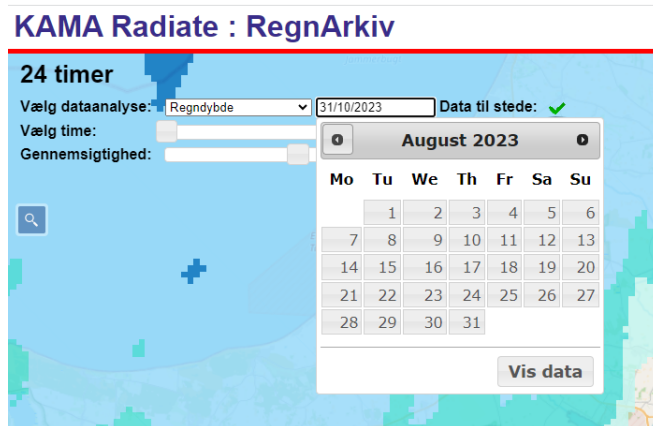
I KAMA er der tilgængelige analyser af maksimal 10, 30 og 60 minutters regnintensitet. Analyseresultaterne kan ved denne analyse aflæses i gentagelsesperioden for hændelsen, da dette ofte er relevant i forsyningsformål. Særligt relevant er det at vurdere, om regnhændelsen har intensiteter med gentagelsesperioder over eller under 2 år. Derfor skifter farveskalaen i KAMA fra grønne nuancer til gul ved denne grænse. Dermed er det meget let at se, om netop en gentagelsesperiode på 2 år er målt. Farveskalaerne er derfor også tilpasset i værdier afhængigt af, om der undersøges 10, 30 eller 60 minutters intensiteter (figur B4.10).



Figur B4.10: Farveskalaer anvendt i KAMA: Regn til visualisering af hhv. maksimal 10, 30 og 60 minutters regnintensiteter.

Historisk visning af regn

Ved valg af fanen "RegnArkiv" i KAMA dirigeres brugeren til en webbrowser med historisk visning af nedbør. I KAMA Radiate : RegnArkiv er det muligt at visualisere radaranalyser for historisk data ved at vælge den ønskede dag ved enten at indtaste dato eller anvende den indbyggede kalender-vælger som vist på figur B4.11. For simpelt at kunne identificere, om der er data for den pågældende dag, er der angivet et grønt flueben, hvis der er radaranalyser for den valgte dag (figur B4.11). Er der ikke radaranalyser tilgængelige, angives derimod et rødt kryds.



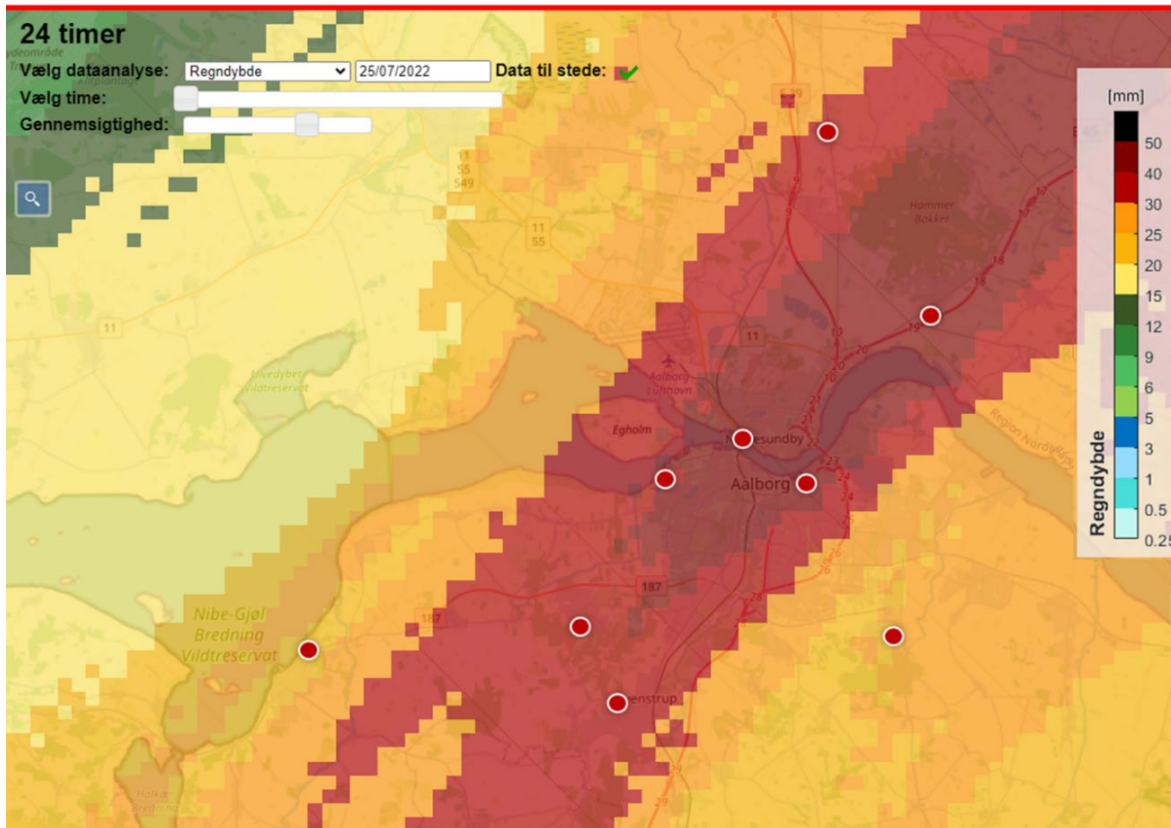
Figur B4.11: Datovælger indbygget i KAMA: Regnarkiv til at vælge tidspunkt for radaranalyser.

Som i KAMA Radiate: Regn er det ved historisk visning ligeledes muligt at se resultaterne af analyserne for hele det valgte døgn og for hver enkelt time ved at gennemgå døgnets timer med slideren under datovælgeren. For overskuelighed og anvendelighed er de samme farveskalaer anvendt i KAMA Radiate: Regn og KAMA Radiate: RegnArkiv. Ligeledes er de samme radaranalyser tilgængelige i de to faner.

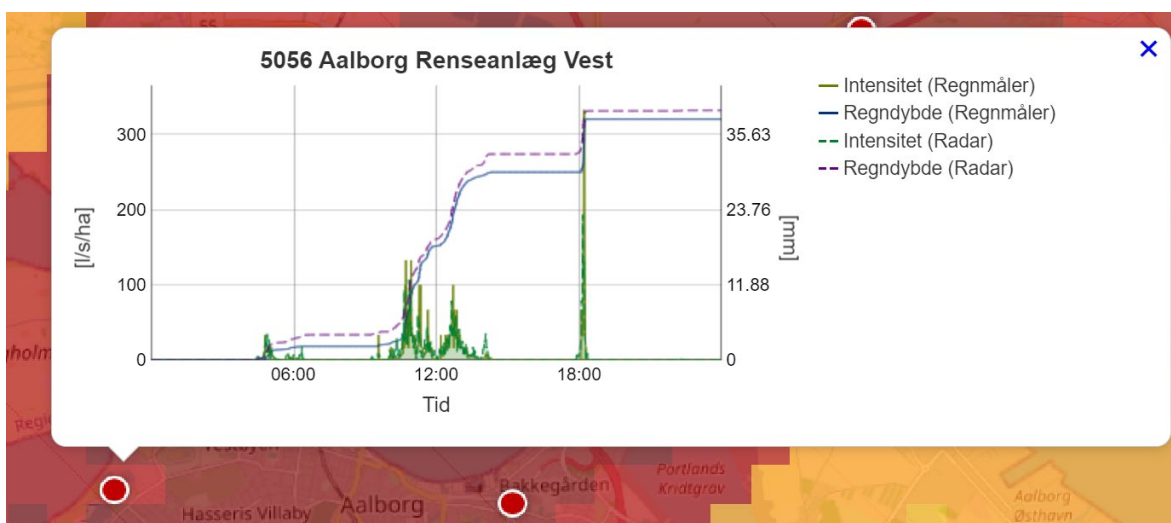
I KAMA Radiate: RegnArkiv er radardataen justeret med en mean field bias på døgnbasis. Dette vil sige, at dataen justeres med én faktor for det pågældende døgn regnet for hver regnmåler-radar pixel for timer med målt nedbør i både radar og regnmålere. Regnestimater vist i KAMA Radiate: RegnArkiv kan afvige fra estimater angivet i KAMA Radiate: Regn, da det ikke er muligt at anvende døgnjusteringsmetoden på realtidsdata. Dog giver radardata med døgnjusteringer de mest pålidelige regnestimater, og derfor er denne metode anvendt i KAMA Radiate: RegnArkiv.

KAMA: RegnArkiv den 25. juli 2023

Den 25. juli 2023 blev der med SVK-regnmålere i Aalborg Forsynings forsyningsområde målt regndybder op til 47 mm. Figur B4.12 viser regndybderne målt med radar på denne dag. Et eksempel på en sammenligning mellem SVK observeret nedbør og radar er vist på figur B4.13.

KAMA Radiate : RegnArkiv


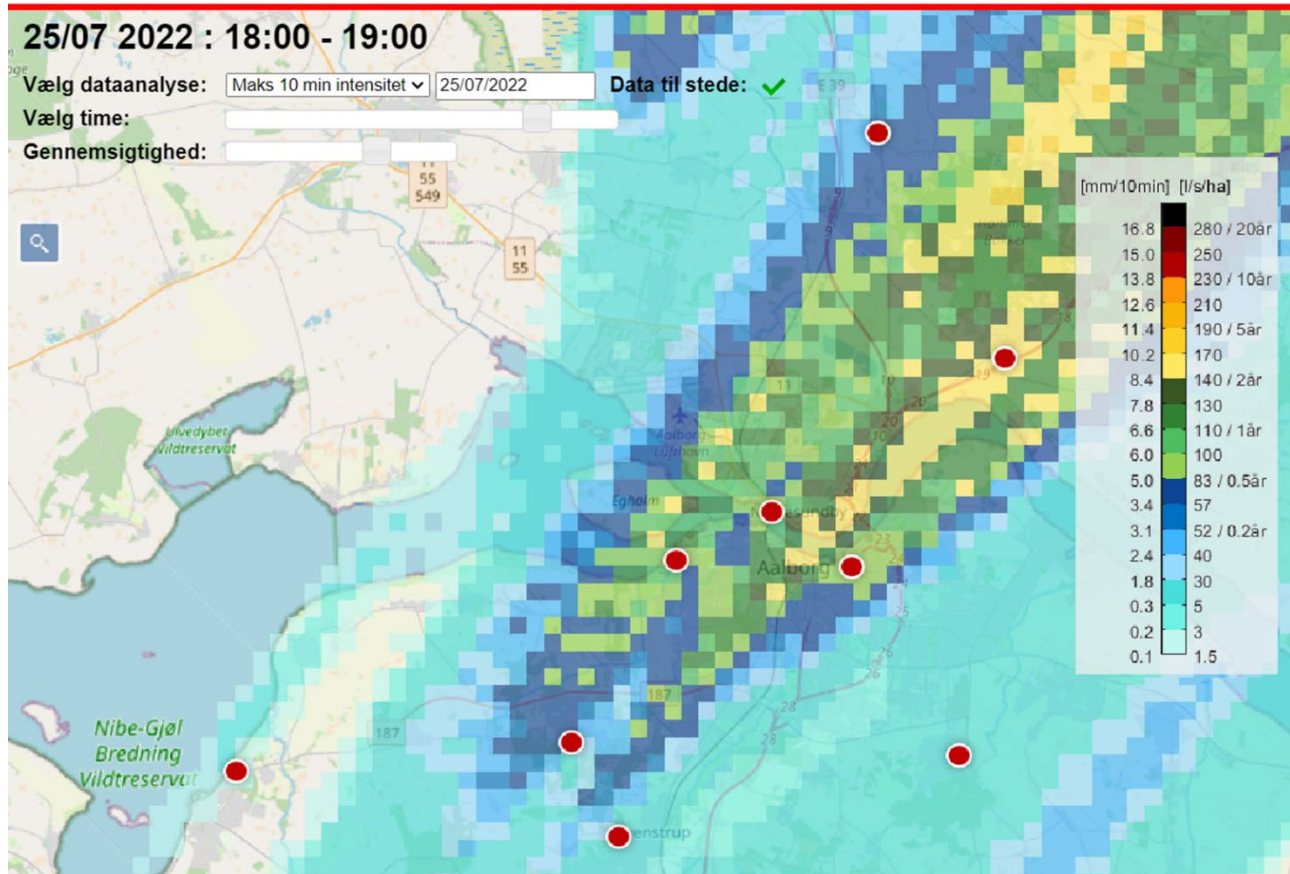
Figur B4.12: Regndybder målt med radar den 25. juli 2023 vist i KAMA Radiate: RegnArkiv.



Figur B4.13: Sammenligning mellem SVK regnmåler og radar. Eksemplet er vist for SVK-station 5056 Aalborg Renseanlæg Vest.

Maksimalle 10 minutters intensiteter for hændelsen er vist på figur B4.14, hvor nedbør målt mellem klokken 18 og 19 er vist. Af figuren fremgår det, at regnhændelsens maksimale 10 minutters regnintensitet overskrider en gentagelsesperiode på 2 år i nogle områder. Eksemplet viser, at det meget effektivt illustreres med KAMA, hvis der er regnhændelser med intensiteter, som kan være kritiske i forsyningsformål.

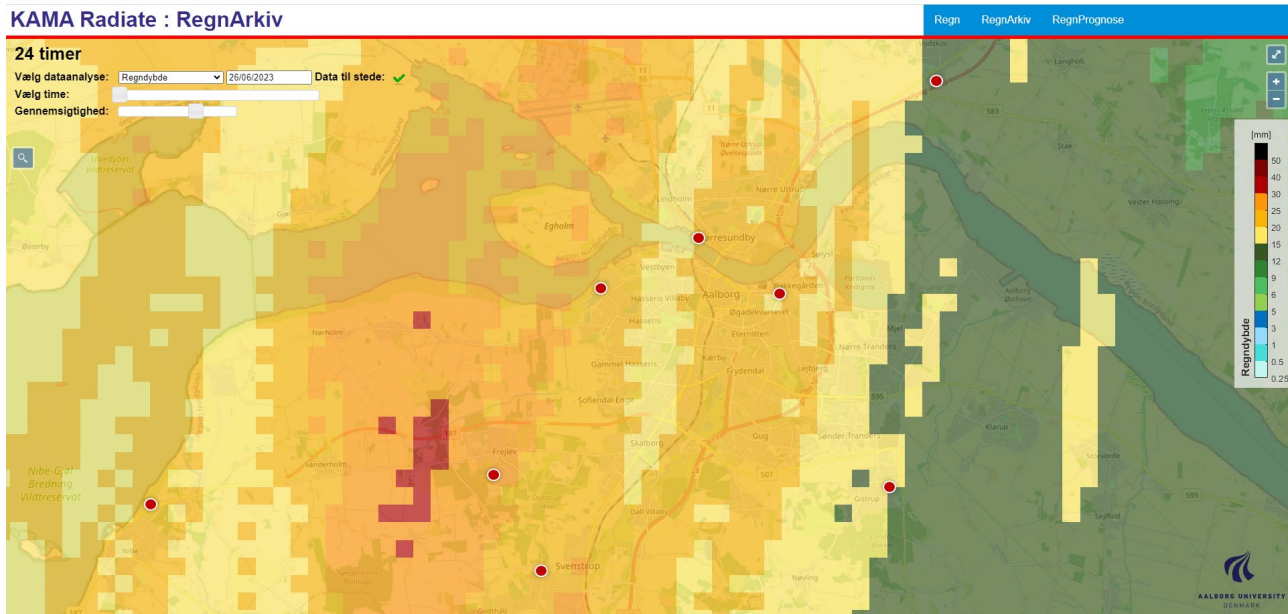
KAMA Radiate : RegnArkiv



Figur B4.14: Maksimale 10 minutters regnintensiteter vist i KAMA Radiate: RegnArkiv for hændelsen den 25. juli 2022 mellem klokken 18 og 19.

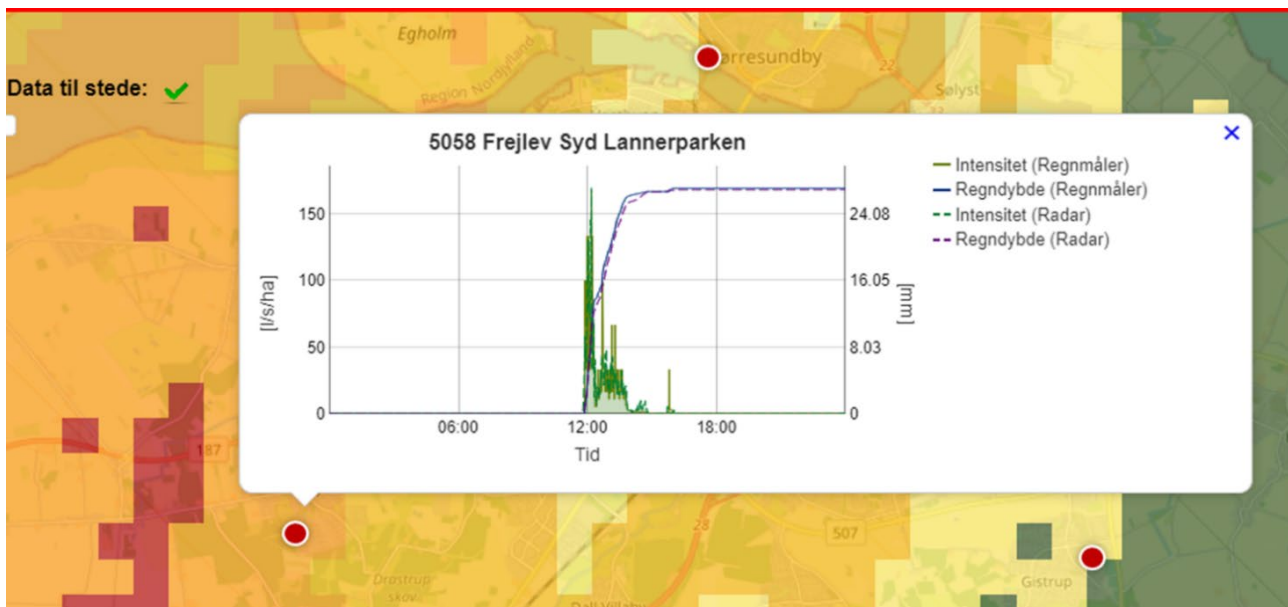
KAMA Radiate: RegnArkiv den 26. juni 2023

Den 26. juni 2023 blev der målt kraftig nedbør i store dele af Nordjylland. Af KAMA Radiate: RegnArkiv kan det ses, at der er målt op mod 40 mm i Aalborg Forsynings forsyningsområde (figur B4.15).



Figur B4.15: Regndybder målt den 26. juni 2023 i Aalborgområdet.

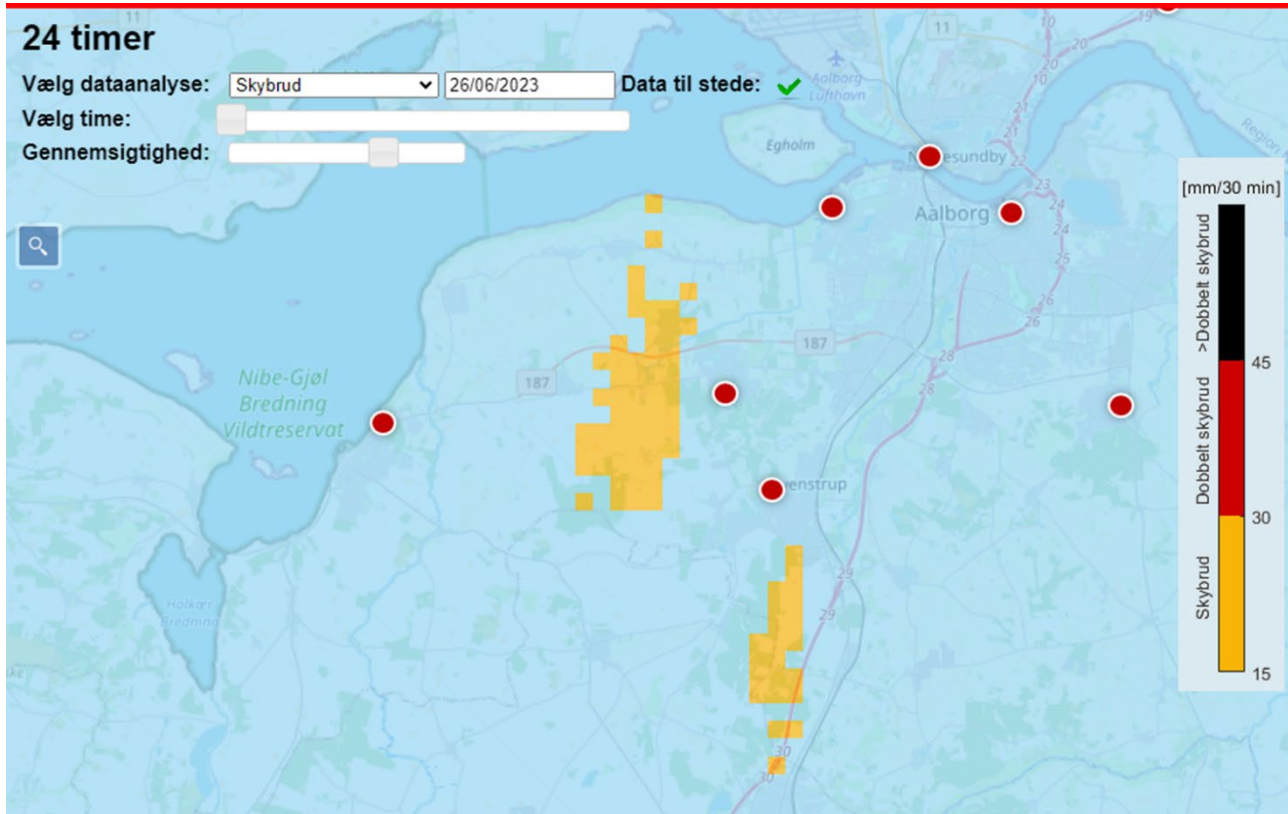
Ved sammenligninger mellem SVK-målere og radar ses det, at der er meget god overensstemmelse, og radaranalyserne er derfor forventet at være meget pålidelige ved denne hændelse. Et eksempel på en sammenligning mellem radar og SVK for denne dag er vist på figur B4.16. Her er regnmåleren med den højeste målte regndybde vist.



Figur B4.16: Sammenligning af radarmålt og SVK-observeret nedbør den 26. juni 2023 for regnmåleren med den størst målte regndybde.

Ingen af regnmålerne målte skybrud ved denne hændelse. Ligeledes er der med radar ikke målt skybrud i radar-regnmåler pixels. Dog er det i KAMA Radiate: RegnArkiv muligt at se,

at der med radaren er målt skybrud i andre områder. Skybrudsvisualiseringen for hændelsen fremgår af figur B4.17. Dette eksempel viser, at det med radar og med KAMA simpelt og effektivt er muligt at undersøge, om der i forsyningsområdet har været skybrud på trods af, at det ikke er målt med SVK regnmålere.

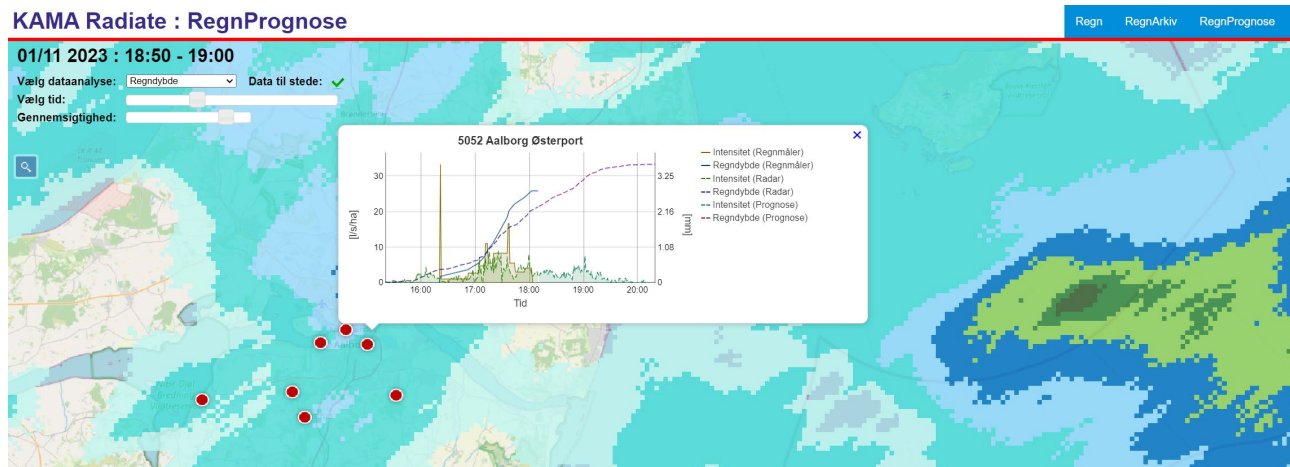


Figur B4.17: Skybrud målt med radar for den 26. juni 2023. Der er ikke målt skybrud i radar-regnmåler pixels eller med regnmålere i forsyningsområdet.

Visning af prognosticeret regn

KAMA radiate : RegnPrognose viser nowcastet nedbør for de næste 2 timer. Som udgangspunkt vises summen af de forskellige analyser i KAMA Radiate : RegnPrognose. For hver analyse er det muligt at gennemgå dataen i 10-minutters intervaller. Radardataen er i KAMA nowcastet med CO-TREC metoden og realtidsjusteret i forhold til SVK-observationer.

På samme måde som i KAMA Radiate: Regn og RegnArkiv er det i KAMA Radiate : RegnPrognose muligt at sammenligne radardata med SVK målere ved at klikke på målerne vist som røde prikker på kortet. Her vises regn observeret med både radar og regnmåler de foregående 3 timer og radar nowcastet regn de kommende 2 timer. Dette gør det muligt at sammenligne radar og regnmåler op til prognosen og dermed få en indikation af, hvor godt den estimerede nedbør kan forventes at performe. Et eksempel på visning af SVK og radar sammenligninger i KAMA Radiate: RegnPrognose er vist på figur B4.18.



Figur B4.18. Visning af radarestimer, radar nowcast og SVK-målinger i KAMA Radiate: Regnprognose.

I KAMA Radiate: RegnPrognose er 6 radaranalyser tilgængelige: Regndybde, skybrud, maskimale 10, 30 og 60 minutters intensiteter og tørvejr, hvoraf de første 5 er svarende til de analyser, der er tilgængelige for realtids- og historisk radardata.

Tørvejr analysen klassificerer, om der prognosticeres tørvejr, let regn eller kraftig regn. Analysen kvantificerer dermed ikke den forventede regndybde eller intensitet i detaljer. Tørvejr analysen er således en kvalitativ beskrivelse af om tørvejr kan forventes eller ej de næste to timer, og prognosen er relevant i situationer, hvor f.eks. drift og vedligehold af forsyningens systemer kræver vedvarende tørvejr.

Case 1 - KAMA – Forsyningens perspektiv og anvendelse (Aalborg Forsyning)



Baggrund og formål

Aalborg Forsyning er en multiforsyning, der foruden at håndtere spildevand og overfladevand fra borgerne i Aalborg Kommune også forsyner borgerne med fjernvarme, køling, gas og vand. Aalborg Forsyning er medstifter af foreningen VeVa og part i VUDP-projektet RADIATE.

I 2005 etablerede Aalborg Forsyning sammen med Aalborg Universitet (AAU) deres egen X-bånd radar. Dette foranlediget af ønsket om at kunne blive i stand til bedre at analysere regnhændelser og udbredelsen heraf. Bl.a. med henblik på at kunne planlægge og dimensionere robuste systemer til håndtering af overfladevand samt blive bedre til at forstå eksisterende system under forskellig regn. Men også for at kunne levere oplysninger til borgere om nedbør samt dokumentere ansvarsfordeling ved skybrud.

Aalborg Forsyning har i dag hjemmesiden www.aalborgvejrradar.dk, hvor borgere kan se, om der har været skybrud på deres adresse inden for de sidste 3 måneder og hvor de kan hente dokumentation for skybruddet til brug i forsikringsager. Dette er et produkt, som blev udviklet på baggrund af en skybrudshændelse d. 11. maj 2014 i Drastrup, som gav opstuvning til terræn og stueplan. Hændelsen blev ikke registreret på Aalborg Forsynings regnmålere, men kunne ses på radardata.

Aalborg Forsyning har foruden X-bånd radaren 9 SVK-nedbørsmålere placeret i forsyningens opland.

Motivation

Aalborg Forsyning har i mange år haft egen vejrradar. Ligeledes har det i flere år været ønsket, at bruger data herfra i større udstrækning. Ønsket har været, at få radardata ud og leve i organisation uden det krævede et stort kendskab til radardata fra den enkelte medarbejder.

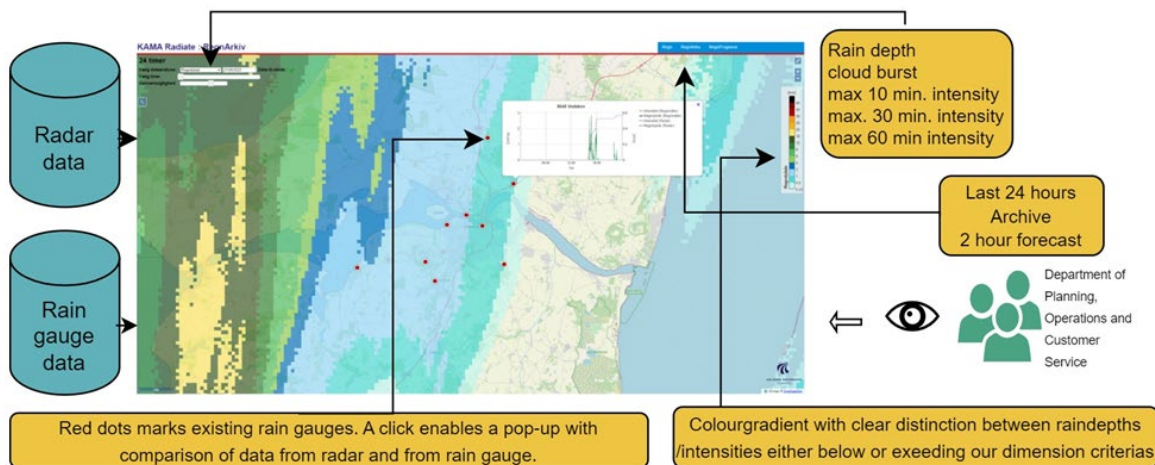
Aalborg Forsyning er en stor organisation og potentialet for brugen af radardata i organisationen er stor. Vi har en kundeserviceafdeling, der modtager henvendelser fra borgere vedrørende eks. opstuvningshændelser og kloakproblemer. En driftsafdeling, der anvender nedbørsdata til at håndtere og analysere driftsdata fra kloaksystemet herunder fejlmeddelelser, alarmer m.m. og en planlægningsafdeling, der bl.a. anvender nedbørsdata til analyse af opstuvningshændelser i kloaksystemet og som ønskede et bedre kendskab til kloaksystemet under forskellige nedbørshændelser.

Fælles for disse opgavetyper er, at nedbørsdata er en vigtig information. Derudover er det væsentligt, at data kan tilgås i den form og visning, som er relevant og brugbart for de forskellige afdelinger og medarbejdere.

Som usecase i RADIATE ønskede Aalborg Forsyning derfor at udvikle en platform, som kunne vise og give information om nedbøren i Aalborg Forsynings opland. En platform, som skulle understøtte bl.a. kundeservice, driften og planlæggere, uden det krævede, at man som medarbejder havde et stort kendskab til radardata og arbejdet hermed.

Case beskrivelse:

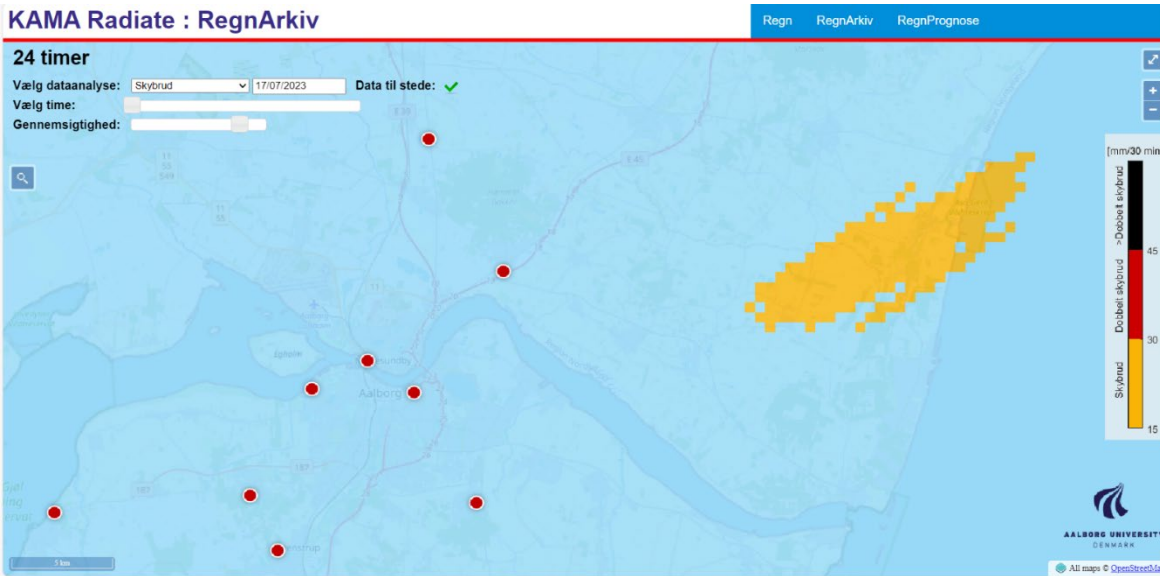
I et samarbejde med Aalborg Universitet blev det besluttet at udvikle et Minimal Viable Product (MVP) til visning af nedbørsdata fra radaren. Aalborg Forsyning udarbejdede kravspecifikationer ud fra dialog med potentielle brugere i organisationen og Aalborg Universitet har udviklet selve platformen, som fungerer som en hjemmeside med forskellige visninger af radardata i forsyningsområdet. En overordnet opbygning af platformen fremgår af nedenstående figur C1.1. Platformen har fået navnet KAMA og vil i nedstående blive anvendt.



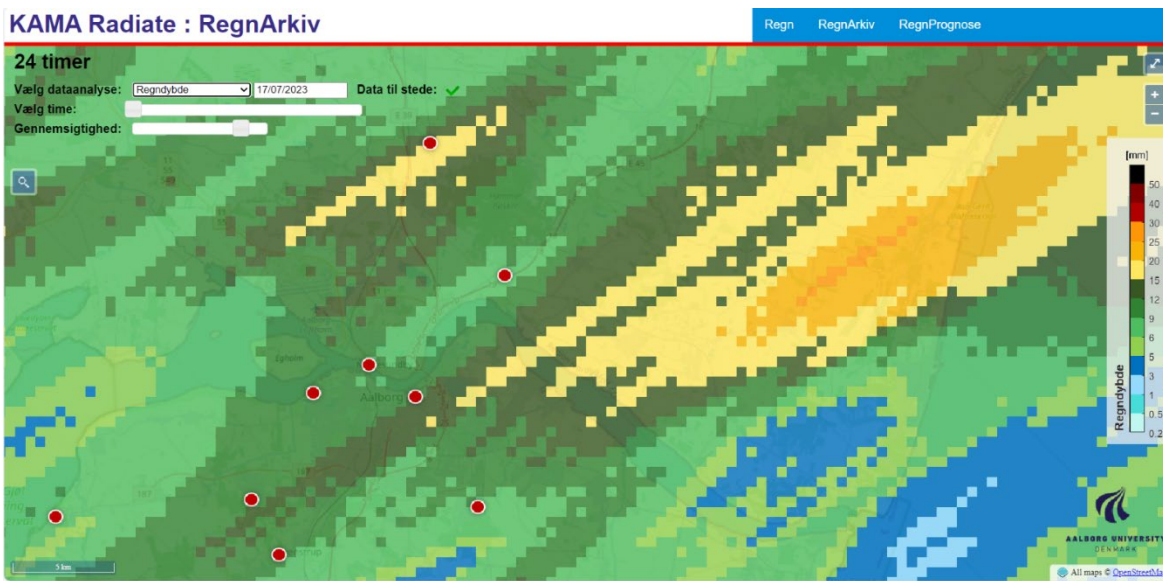
Figur C1.1. Viser opbygningen af nedbørsplatformen KAMA

Platformen KAMA består af tre visningslag – et for de sidste 24 timer, et med historiske data og et med 2 timers prognosedata. Visningen af data kan vælges i en dropdown menu med fem valgmuligheder defineret ud fra brugernes ønsker; regndybde, skybrud, max 10 min. intensitet, max 30 min. intensitet og max 60 min. intensitet. Signaturforklaringen består af en farvet skala med angivelse af enhed afhængig af den valgte visning; mm (regndybde), mm/30 min (skybrud), mm/10 min, l/s/ha samt gentagelsesperiode (intensitet). Eksempler på de forskellige visninger fremgår af nedenstående figur C1.2, C1.3, C1.4 og C1.5.

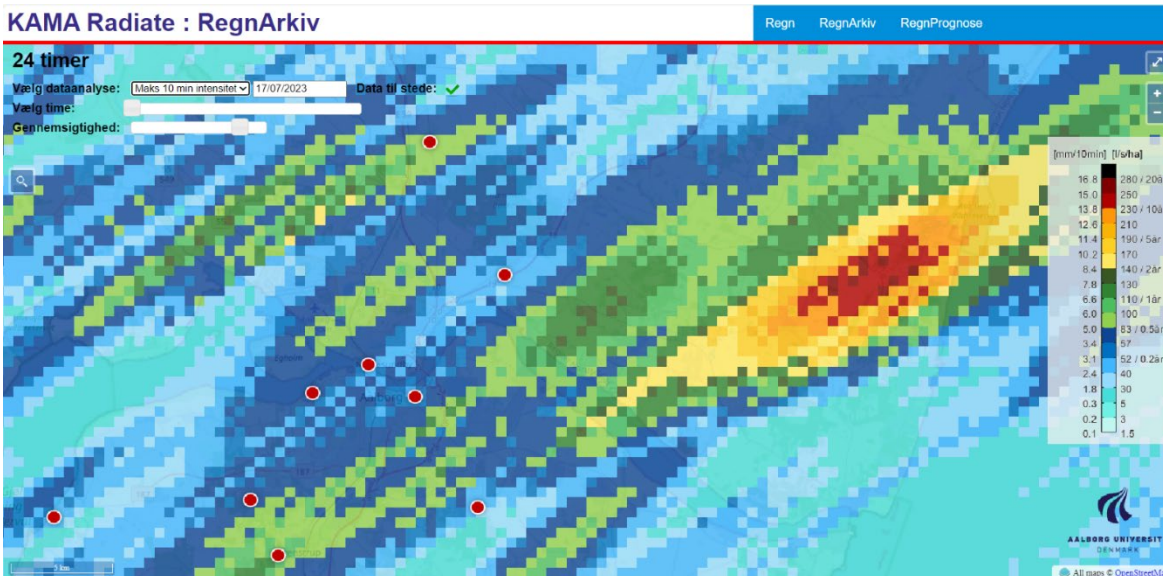
Nedbørsdata fra SVK-målerne fremgår også af platformen. Placeringen af SVK-målerne fremgår af røde cirkler og ved tryk på disse, vises data fra den givne regnmåler i regndybde (mm) og intensitet (l/s/ha). Data præsenteres i en graf sammen med radardata i tilsvarende punkt.



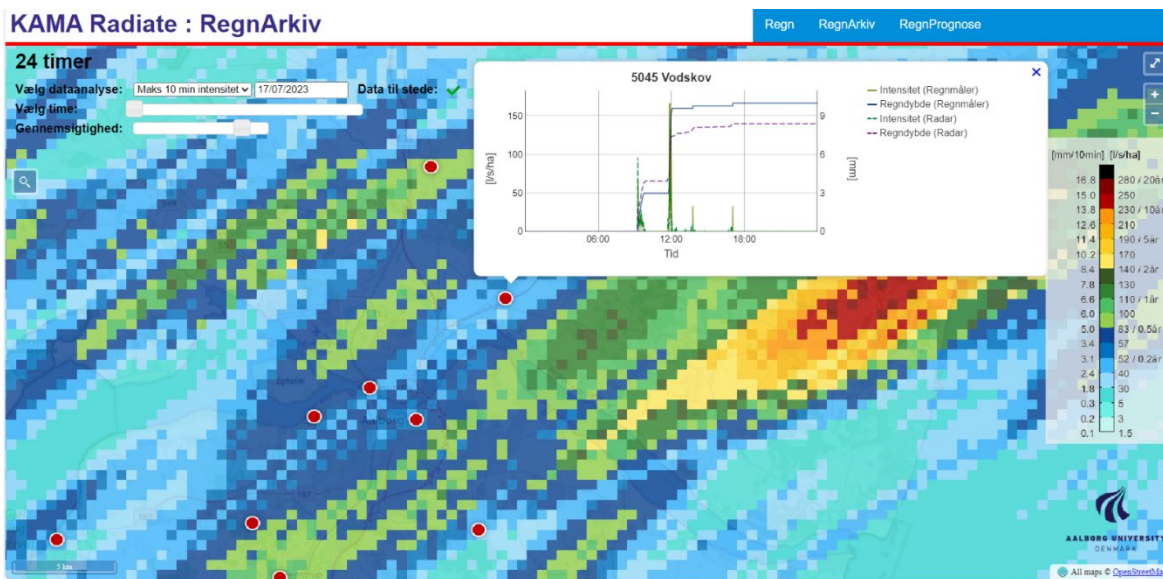
Figur C1.2. Radarbillede fra d. 17. juli 2023. Skybrud er valgt som visning. Som det fremgår af figuren, har der været skybrud i området ved Ulsted, hvor der ingen SVK-måler er (orange område). Signaturforklaringen er opdelt i skybrud, dobbelt skybrud og > dobbelt skybrud.



Figur C1.3. Radarbillede fra d. 17. juli 2023 hvor visningen er regndybde. Visningen fremgår i mm. Radarbilledet viser et varieret billede af regndybden og som det ses er der lokale nedbørshændelser (gule områder) som ikke registreres af en SVK måler (røde prikker).

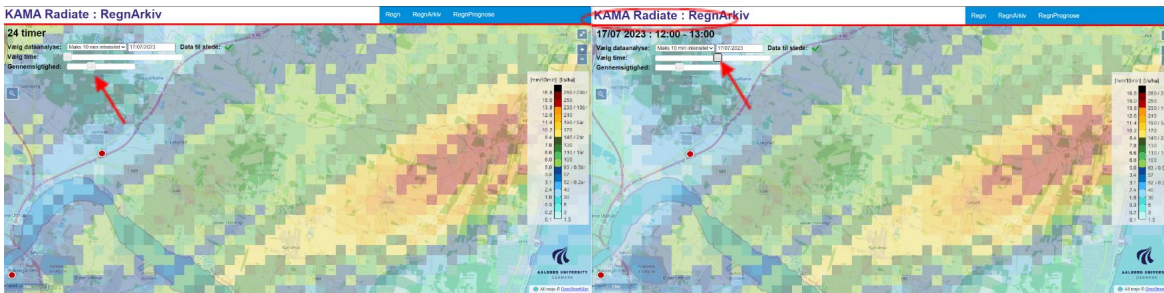


Figur C1.4. Radarbillede fra d. 17. juli 2023 hvor visningen er intensitet (10 min max). Visningen fremgår i l/s/ha og mm/10 min. Ligeledes er gentagelsesperiode angivet. Radarbilledet viser et varieret billede af intensiteten og som det ses er der lokale nedbørshændelser som overskrider Aalborg Forsyningsdimensioneringskriterie på 140 l/s/ha (rødt område) som ikke registreres af en SVK måler.



Figur C1.5. Visning af data fra SVK måler sammen med radardata. På figuren ses data fra SVK-station 5045 i Vodskov fra d. 17, juli 2023. Et eksakt tal fremkommer til højre i feltet ved at placere markøren på grafen.

Kortvisningen er udført med et farve overlay, hvor gennemsligtigheden kan justeres, så det er muligt at aflæse både lokalitet og nedbørsdata samtidig (figur C1.6). Derudover kan man vælge, om man ønsker at se den valgte visning (eks. regndybde) som sum for hele døgnet eller for en enkelte time over et givent døgn.



Figur C1.6. Gennemsigtighed på kortet og periode kan vælges.

Inputdata er radardata fra DMI's C bånd radar i Sindal. Vi har valgt at anvende DMI's radardata, da vores egen radar i perioder har været ude af drift.

Evaluering

I Aalborg Forsyning har vi gjort stor brug af nedbørsplatformen KAMA. Ved borgerhenvendelser vedrørende vand i kældre eller på terræn har platformen vist sig at give hurtig og nem viden om en given nedbørshændelse på et specifikt sted og et givent tidspunkt og dermed været et stærkt værktøj til at kunne give tilbagemelding til borgeren og træffe den rette beslutning om tiltag i den enkelte sag. Det har været hurtigt og nemt at få en indikation af, om der har været skybrud eller om nedbørshændelsen f.eks. har været over dimensioneringskriteriet. I flere sager har det ved brug af nedbørsplatformen vist sig, at det har været meget lokale kraftige nedbørshændelser, som har resulteret i opstuvning. Nedbørshændelser, som ikke er registreret på SVK-målerne, og som vi tidligere ikke havde den samme vished om og dokumentation for. Ligeledes har der omvendt også været sager, hvor vi ved opstuvningshændelser tidligere har tilskrevet det kraftig nedbør. Men hvor vi ved dialog med borgeren samt brug af de historiske radardata i platformens arkiv har kunnet konkludere, at det foruden nedbør også har været en kloakproblematik som med rette kunne udbedres eller forbedres.

Nedbørsplatformen er ligeledes anvendt i forbindelse med et projekt omhandlende uvedkommende vand. Aalborg Forsyning har i et større ældre separatkloakerede område haft mange henvendelser vedrørende opstuvning. Nærmeste SVK måler er placeret ca. 10 km fra området. Sammen med data fra IOT-loggere i kloaksystemet har platformen været et vigtigt værktøj. Ved at anvende visningslaget med historiske data har det været nemt at udvælge dage med forskellige nedbørshændelser. F.eks. dage med nedbørshændelser med en given gentagelsesperiode, med skybrud men også dage med eks. dagsregn og lav intensitet.

Perspektiver for videre arbejde

Platformen er som tidligere nævnt et MVP og der foreligger flere oplagte udviklingsmuligheder. Det kunne være:

- Integration i drifts SRO-system
- Kobling med Aalborgvejradar.dk (borgerhenvendt platform)
- Mulighed for valg af forskellige radarprodukter (eks. mosaik produkter)
- Mulighed for at vælge summeret nedbør for et givent opland.
- Udtryk for kvaliteten/troværdighed af data.

Case 2 - Radardata til hydrauliskemodeller (Aarhus Vand)

Baggrund

Aarhus Vands formål er at skabe sundhed gennem rent vand – til mennesker og planeten. Som medstifter af Foreningen VeVa og en del af VUDP-projektet RADIATE ønsker Aarhus Vand derfor at benytte vejrdata fra VeVa til at skabe mere kvalificerede regnininput til hydrauliskemodeller og realtidsstyring af afløbssystemet i Aarhus.

Motivation

I Aarhus Vand arbejdes der med at anvende radardata som nedbørsinput til hydrauliske beregninger. Her er det hensigten, at metoden skal anvendes til opgørelse af årlige aflastningsberegninger (PULS). Derudover skal det bruges i et "Måleprogram"-arbejde, hvor der anvendes nedbørsinput i de hydrauliske modeller for derefter at validere resultatet med målte værdier i kloaksystemet (f.eks. pumpestationer og vandniveau i brønde).

Samtidig er det en ambition at bruge nedbørsdata fra radar til realtidsstyring. Foreløbigt afventes adgang til middel areal regn (MAR) nedbørsfiler, hvorefter Aarhus Vand er testklar.

Med disse anvendelser forventes der mere kvalificerede afløbsberegninger og styring af afløbssystemet, som blandt andet skal føre til færre overløb og derfor også endnu højere vandkvalitet i Aarhus.

Case

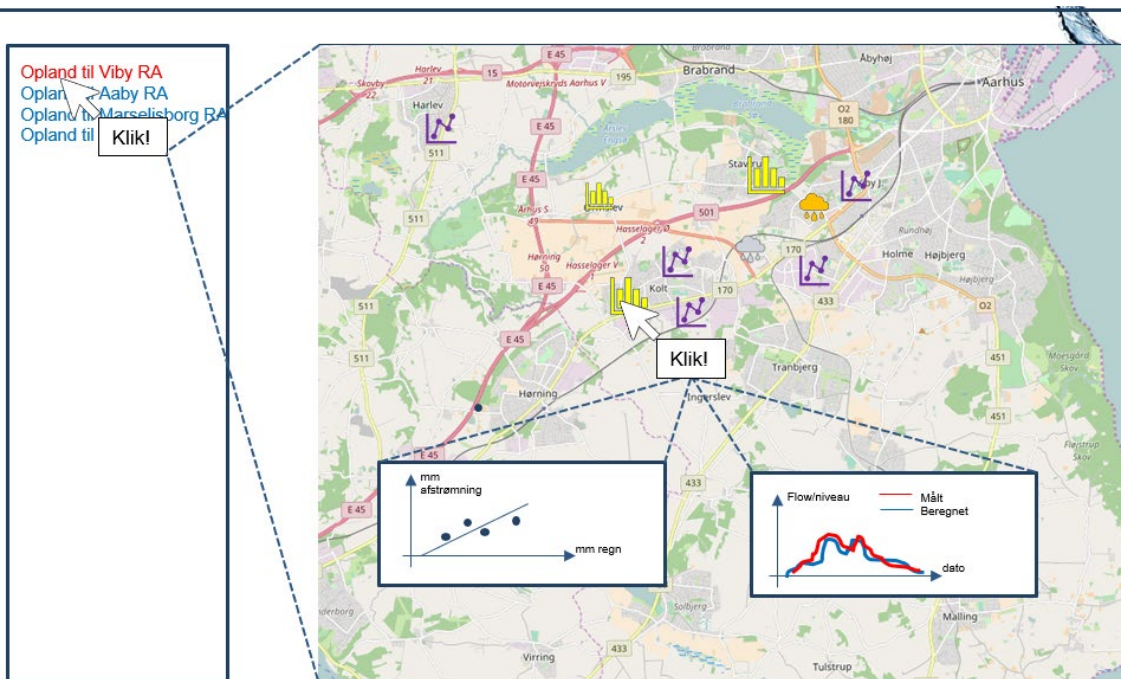
Måleprogram anvendes til at se effektiviteten af vores adskillellesprojekter. Her bruges målinger til at validere hydrauliske modeller, hvor der ønskes at bruge radardata som nedbør. På figur C2.1 er det illustreret hvordan Måleprogram tænkes at skulle anvendes. For hvert pumpeopland i de enkelte renseanlægsoplande skal det være muligt at tjekke hvor meget der afstrømmer til afløbssystemet ift. mængden af nedbør. Dette giver en indikation af fejkoblingsgraden for pumpeoplandet. Dette er resultatet af de udførte beregninger. Samtidig skal der være en sammenligning af målte og beregnede værdier.

Modellen beregnes (automatisk) så snart der er en regnhændelse for at se hvordan systemet reagerer. I arbejdet med Måleprogrammet er der også fundet de områder, der bøvler med uvedkommende vand. Dermed bliver det et evalueringsværktøj.

Mål med evalueringsværktøjet:

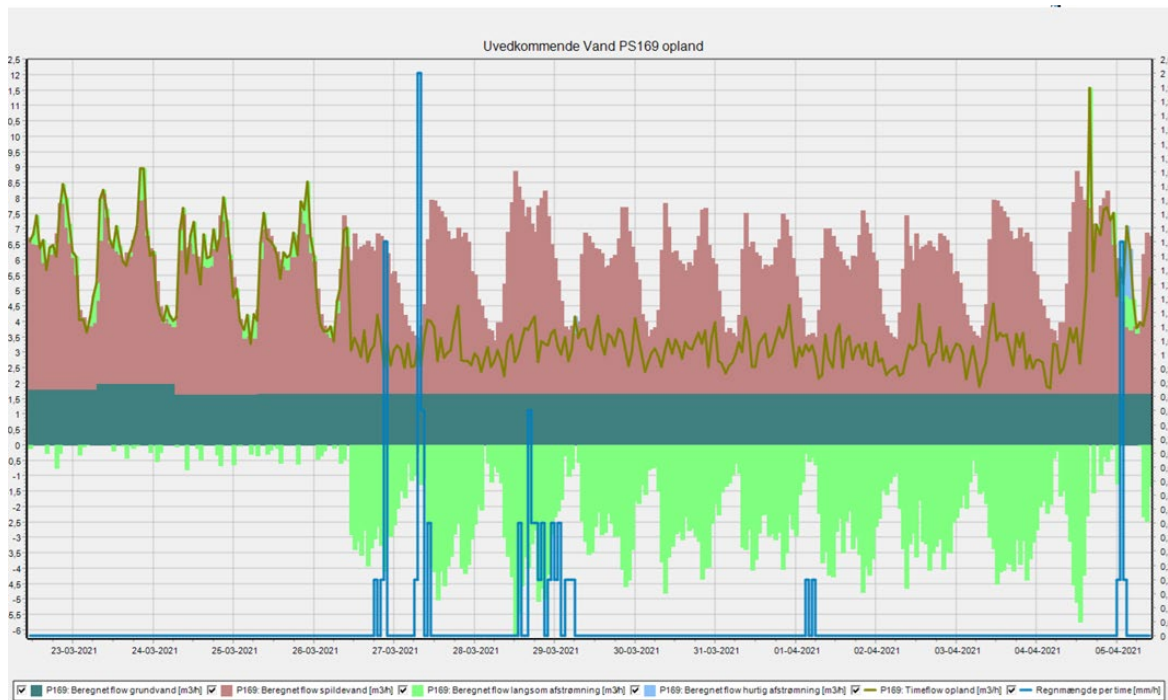
Kortsigtet strategi: Evaluering af effekten og se resultatet hurtigt, så det bliver synligt for forretningen (Evalueringsværktøjet)

Langsigtet strategi: Holde øje med hele vandsystemet i alle funktionssituationer jf. kort med vandstrømme – vi går fra "brandslukning" til "smart" overvågning. Udpegning af indsatser.



Figur C2.1. Illustration af Måleprogrammets anvendelse. Der kan klikkes på hver graf for at få vist resultater for det enkelte pumpeopland.

På figur C2.2 er der vist en dekomponeringskurve, der illustrerer om der er uvedkommende vand til stede i pumpeoplandet. Nedbøren, der også er illustreret på figuren, er fra den nærmeste SVK-måler. Det er hensigten, at nedbøren på disse dekomponeringskurver skal være illustreret med radardata, nærmere specifikt MAR (Mean Area Rainfall).



Figur C2.2. Dekomponeringskurve, der viser om der er uvedkommende vand i pumpeoplandet. Regnmængden er gengivet med data fra SVK-målere, der på sigt skal være data fra radarnedbør i stedet for.

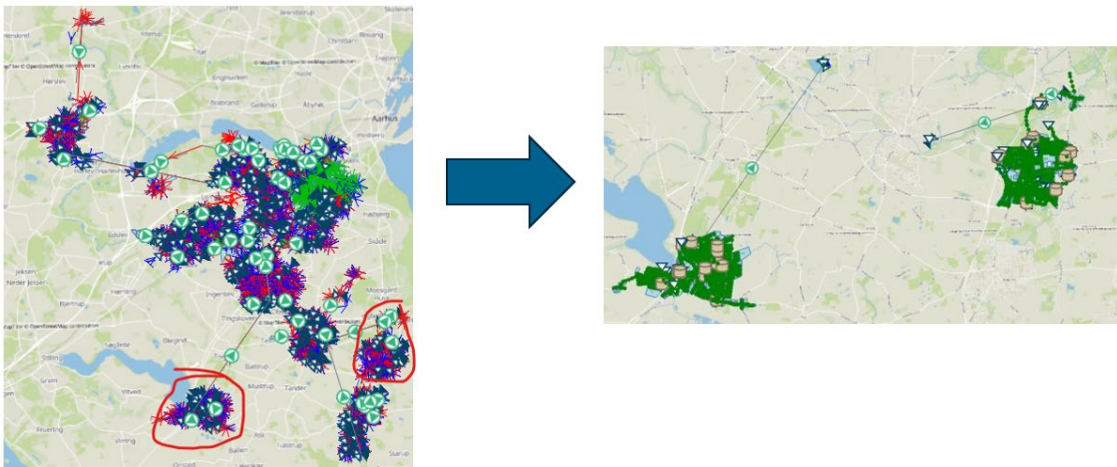
I 2024 forventes det, at aflastningsberegninger på overløb skal beregnes på baggrund af radardata som nedbørsinput i stedet for SVK-målere, der er spredt ud i Aarhus Kommune.

2023 beregninger køres med både med SVK-målere og radardata for at se forskel. Dette forventes færdig i 2024 med en konklusion på forskel. Der afleveres ikke aflastningsberegninger med radar på 2023 beregninger, men først i 2024.

Metodeanvendelse

I løbet af efteråret 2023 er der blevet testet med radardata som nedbørsinput i de hydrauliske modeller. Forskellige nedbørshændelser er blevet udvalgt, hvor modellerne er beregnet med data fra både SVK-målere og nedbør fra radarer. Disse resultater er herefter blevet sammenlignet med målinger.

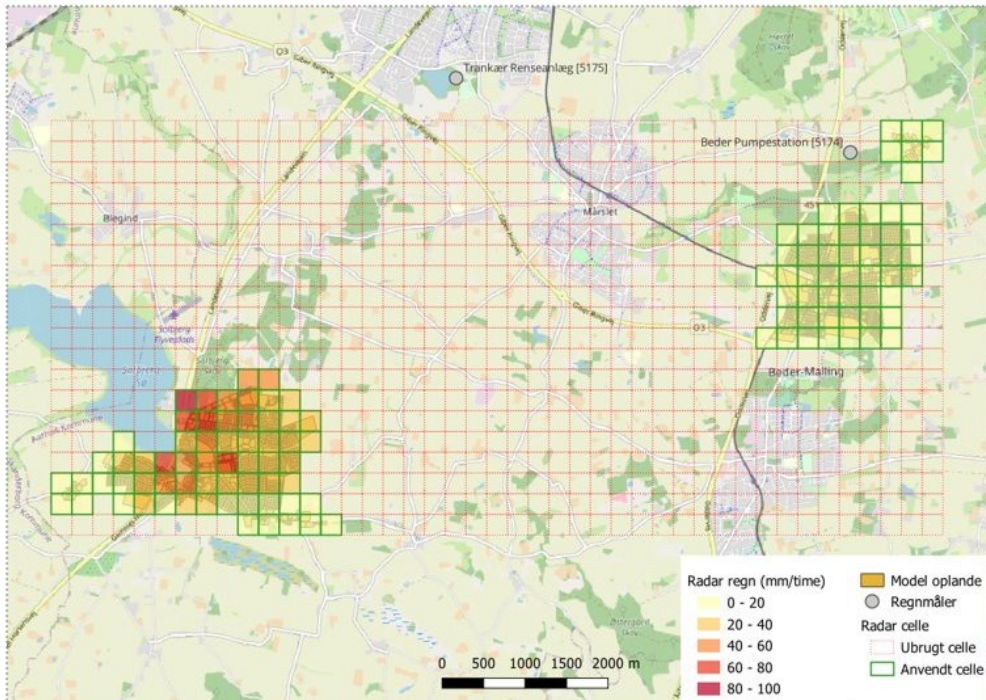
På figur C2.3 er et det geografiske caseområde vist for Beder og Solbjerg. Selve modelområdet er blevet afskåret fra den oprindelige model for renseanlægsoplandet i Viby. Dette er blot for at reducere beregningstid og har ikke noget med datamængden fra radarnedbør at gøre.



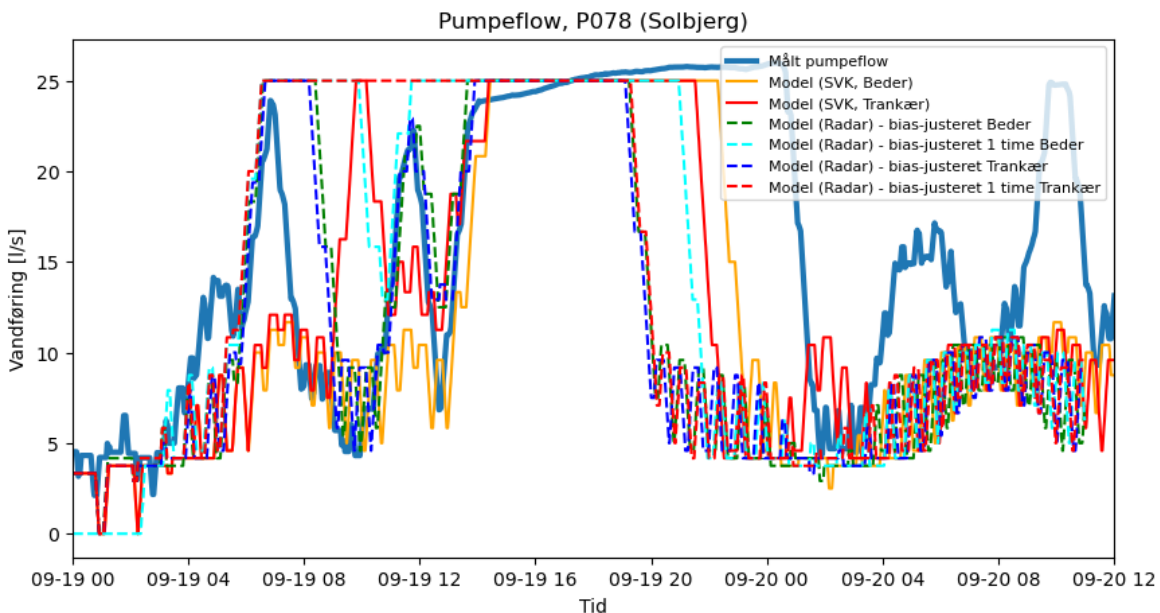
Figur C2.3. Caseområde for Beder og Solbjerg.

Den geografiske udstrækning af radarnedbøren for caseområdet er vist på figur C2.4. Det skal bemærkes at radarinputtet, i form af et grid, er afgrænset af den geometriske udformning af oplande i modellen. Dermed er celler, som er udenfor afgrænsningen, ikke med i beregningen, hvilket reducerer datamængden fra radarinputtet betragteligt. Samtidig er celler, der ikke berører oplande indenfor afgrænsningen, deaktiveret. Dette reducerer ikke datamængden, men er blot til illustration ift. hvor radarcellerne overlapper oplande i modellen.

Outputtet af beregningerne illustreret i grafer, som vist på figur C2.5. Her er det pumpe P078 som eksempel, hvor det målte pumpeflow er vist sammen med alle de beregnede værdier, som modellen har udregnet. Blandt de beregnede værdier, findes også modelresultater med radarnedbør som input.



Figur C2.4. Den geografiske udstrækning af radarceller, som er nedbørsinputtet i modellen. De farvelagte celler er blot et eksempel på en hændelse, hvor nedbøren er vist.



Figur C2.5. Illustration af pumpeflow for målte og beregnede værdier.

Som det er vist på figur C2.5 er der flere varianter af beregnede værdier, når der anvendes radardata som nedbørsinput. Dette viser også, at der ligger et arbejde i at få det bedste datagrundlag fra radarer, som kan beskrive den distribuerede nedbør bedst muligt.

Konklusion og Perspektivering

Målet med arbejdet har været at få de beregnede værdier med radardata som nedbørsinput, til at stemme bedre overens med de målte værdier. Det kan i sig selv være en udfordring, da der er flere usikkerheder, heriblandt modelusikkerheder. Modellerne for renseanlægsoplandene er kalibreret ud fra punktmålinger (SVK-målere), der ikke nødvendigvis er fyldestgørende for et større område. I case-området, hvor Solbjerg er inkluderet, ligger de nærmeste SVK-målere flere kilometer væk. Alligevel formår resultatet med radardata som input at matche flere af de målte værdier. Derfor skal der heller ikke konkluderes for tidligt ift. datakvaliteten af radardata i modeller.

Indtil videre er det blot og aflastningsberegninger, der beregnes på, når der anvendes radardata i de hydrauliske modeller. Dermed er kapacitetsberegninger og bassindimensionering blot muligheder, der kan udforskes i. Foreløbigt er det planen, at der skal udføres aflastningsberegninger med radardata som nedbørsinput. Og dette skal gøres på de modeller, der i forvejen er kalibreret på SVK-målerne. Resultatet af disse beregninger vil formentlig give et bedre fingerpeg ift. datakvaliteten af radarnedbør.

Case 3 - Udfordringer ved at Identificerer skybrud med radar (VandCenter Syd)

Baggrund

Vandcenter Syd er et af Danmarks største og ældste vandselskaber som bl.a. aftager spildevand fra ca. 236.000 spildevandskunder. Som medstifter af Foreningen VeVa og en del af VUDP-projektet RADIATE arbejder Vandcenter Syd med bedre at kunne identificere skybrud og kraftig regn i lokale områder.

Motivation

En af de vigtigste formål med brug af radar hos Vandcenter Syd er at kunne identificere hvilke områder der har været ramt af skybrud og generelt kraftig regn. Der blev i juni 2022 installeret en ny radar på Søndersø Renseanlæg, som dækker hele forsyningsområdet. Derudover har Vandcenter Syd 16 SVK-regnmålere placeret i Nordfyn og Odense. På trods af de mange regnmålere ses det ofte at konvektiv regn rammer på så lokal skala og det bliver dermed ikke nødvendigvis fanget af regnmålerne. Dette kan resultere i en situation hvor kunderne oplever oversvømmelser, men at det ikke kan dokumenteres med nedbørsdata. Formålet med radaren er at den kan måle over flader hvorved der opnås nedbørsmålinger overalt i oplandet. Dermed skulle det være muligt at udpege præcis, hvilke områder der har været ramt af kraftig regn. Det har derfor været vigtigt at nå til et punkt hvor radarmålinger har en stabilitet og nøjagtighed som gør at de kan anvendes til dette formål.

Case

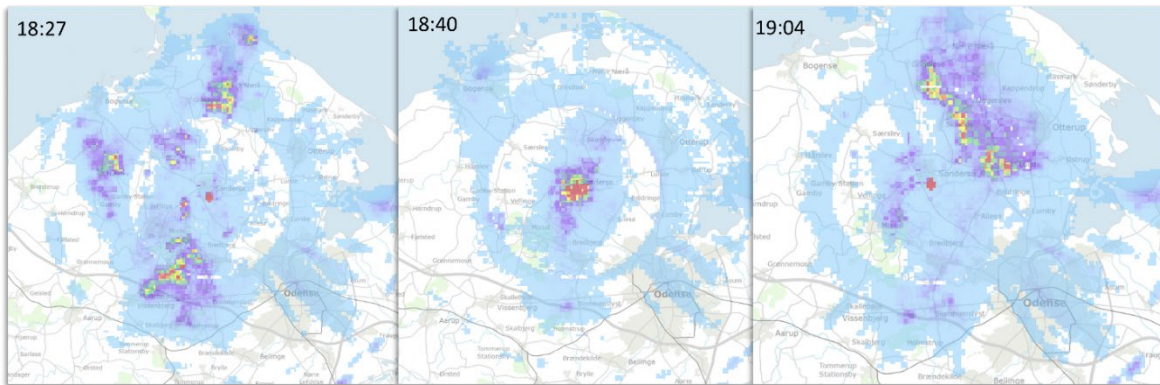
I forbindelse med at bestemme udbredelsen af kraftig regn har der været visse udfordringer som er beskrevet i det følgende. Fokus er at have nogle pålidelige målinger for at være sikre på at kan komme med et fornuftigt bud på regnmængder og -intensiteter uanset hvilket type regn der falder.

I projektperioden har der være op til flere intensive nedbørshændelser, blandt andet med adskillige skybrud. Disse meget kraftige hændelser har også vist nogle af de udfordringer der kan være med at måle på intensiv nedbør.

En af de effekter som er oplevet, er wetdome effekt hvor radaren ikke har kunne "se" når det har regnet i Søndersø hvor radaren står. Derudover har der været eksempler, hvor det tyder på at radardata er blevet dæmpet under kraftig nedbør, selvom det er svært at adskille dette helt fra wetdome-effekten. Eksempler på disse to ting er vist i det følgende.

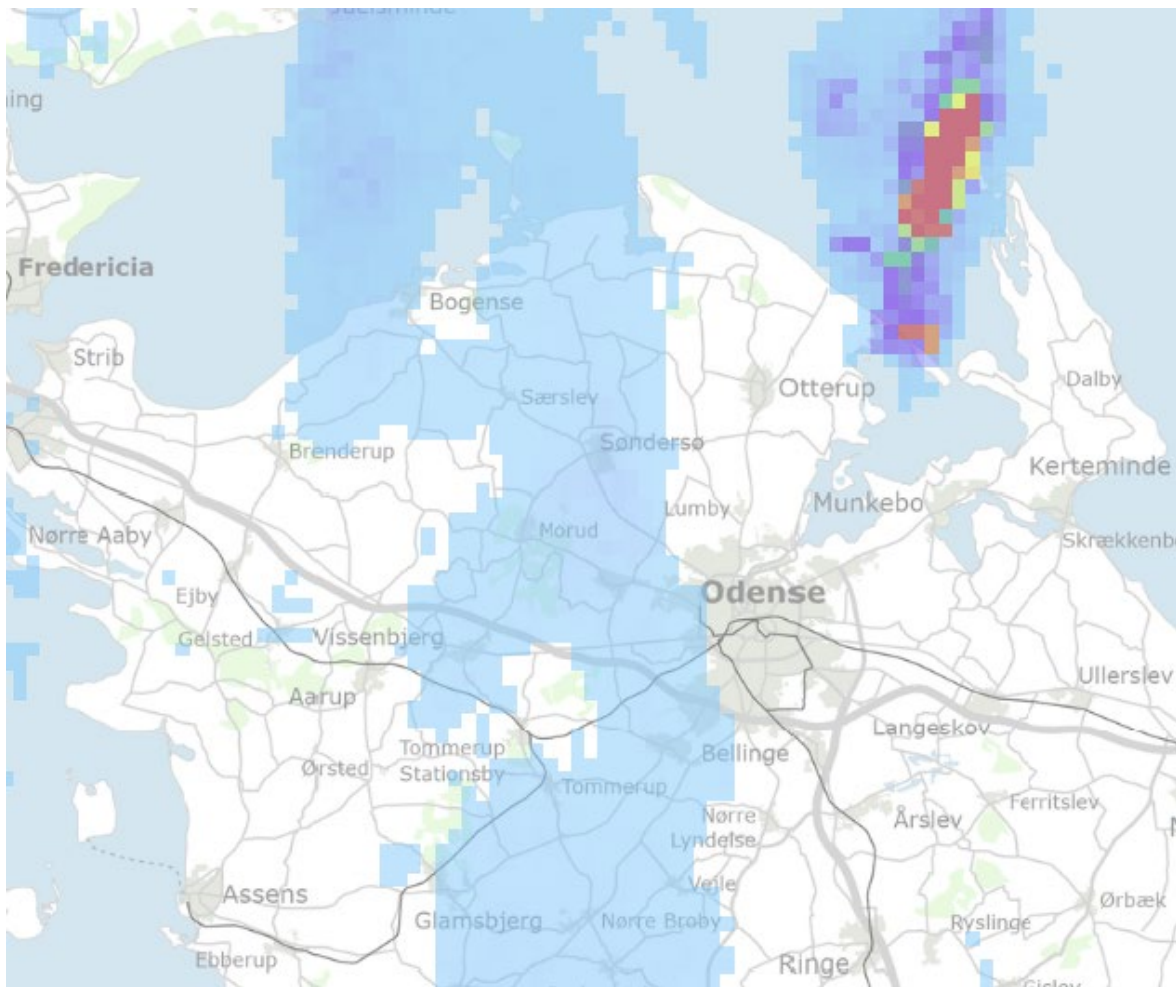
Wetdome effect

Figur C3.1, viser tre snapshots af en nedbørshændelse 26/8-2022 hvor nedbøren kommer fra vest/sydvest. Radaren kan se det meste af hændelsen (18:27), hvor der ikke ligger noget kraftig nedbør over radaren. Den kraftige nedbør rammer placeringen for radaren (18:40), hvor det ses at meget af signalet fra radaren forsvinder og den kun kan se helt tæt på. Da den kraftige nedbør har passeret Søndersø, kommer der signal igen hvor områderne med kraftig nedbør kan ses nordøst for radaren (19:04).



Figur C3.1. Radardata målt med radar i Sønderlø for hændelse 26/8-2022.

Wetdome effect er et kendt problem og det er ikke muligt at databehandle sig ud af det med data fra den givne radar da stort set alt signal forsvinder. Det bedste alternativ er derfor at anvende data fra andre radarer. Den samme hændelse er målt med DMI's radarer. På Figur C3.2 ses data for DMI's radarkomposit. Her kan det ses at der ikke er målt den samme intensitet over Sønderlø. Den fanger i stedet en kraftig celle nord for Otterup. Desværre er der ikke nogen DMI-radarer der er placeret optimalt i forhold til at måle i Odense. Det ser derfor også ud til at DMI's radarer ikke er i stand til at fange den kraftige hændelse i Sønderlø.



Figur C3.2. radardata målt med kompositdata for DMI-radarer for hændelse 26/8-2022 klokken 18:40.

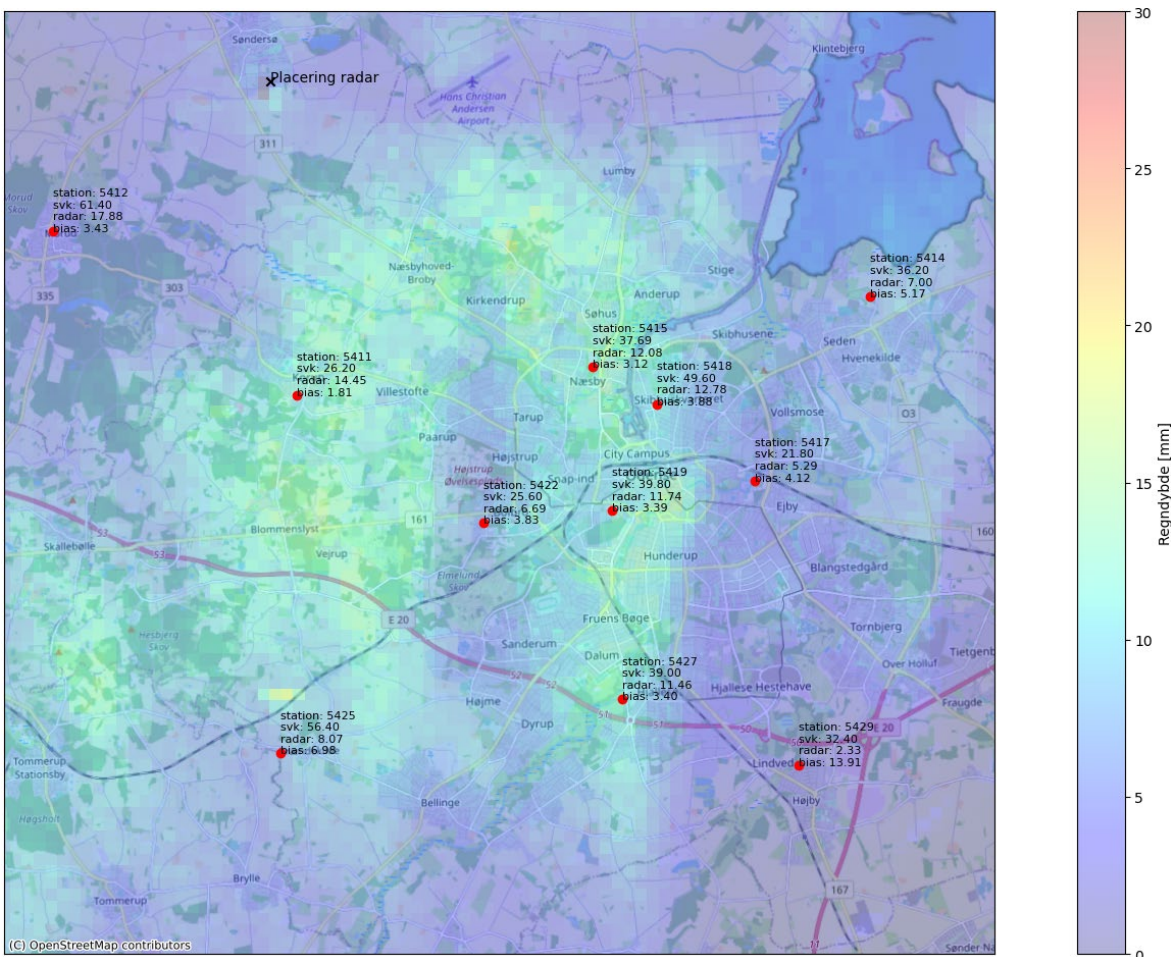
For at løse udfordringerne ved wetdome effect, vil det være en fordel at have en samlet komposit af radardata, så det er muligt at trække på andre kilder hvis en enkelt radar ikke er i stand til at måle. Det kræver også at radarerne er placeret tilstrækkelig tæt til at der er god dækning fra andre radarer. Ved den viste hændelse er der også udfordringer for Verringradaren med at måle.

Nedbørshændelse med skybrud over Odense

En anden kraftig hændelse der er undersøgt, er den 26/8-2023 blev der målt 27,8 mm på 30 minutter på SVK-måler 5418. Denne hændelse forårsagede mange udfordringer med vand på terrænen i området. Det var derfor et ønske at anvende radardata til at se præcis hvor meget der var faldet over de forskellige områder og om der var områder der havde været endnu hårdere ramt end det der var målt på denne station.

Ved denne hændelse var der ikke samme kraftige regn i Søndersø, hvorved der ikke burde være de samme udfordringer med wetdome effect.

Figur C3.3, viser målte regndybder for hændelsen om formiddagen d. 26/8-2023. Her ses det at SVK-regnmåler 5418 i Skibhuskvarteret har målt en regndybde på 49,6 mm, mens radaren kun har målt 12,78 mm. Det er kun omkring en fjerdedel af hvad der er målt med regnmåleren. Ved samme hændelse målte DMI's radar i Verring 20,05 mm der hvor regnmåleren er placeret.

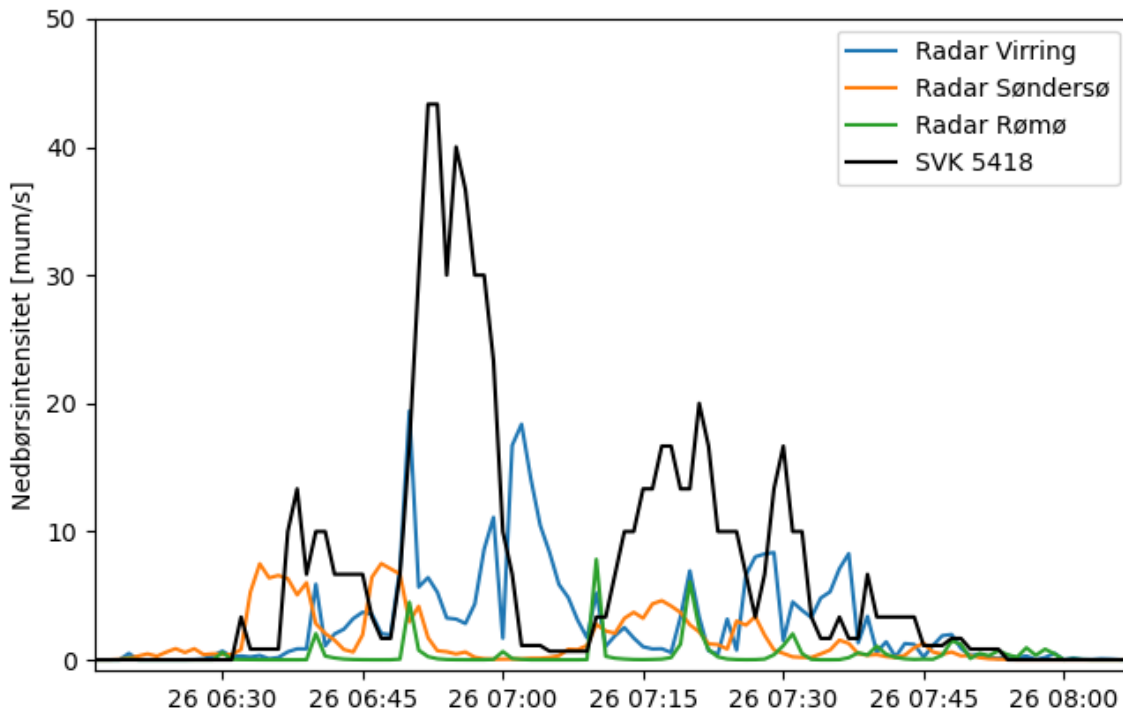


Figur C3.3. Målte regndybder i Odense under hændelsen om formiddagen 26/8-2023.

Længere væk fra radaren på den anden side af Odense ved regnmåler 5429 er der ved SVK-regnmåleren målt 32,4 mm. Med radaren i Søndersø er der målt 2,33 mm altså under en

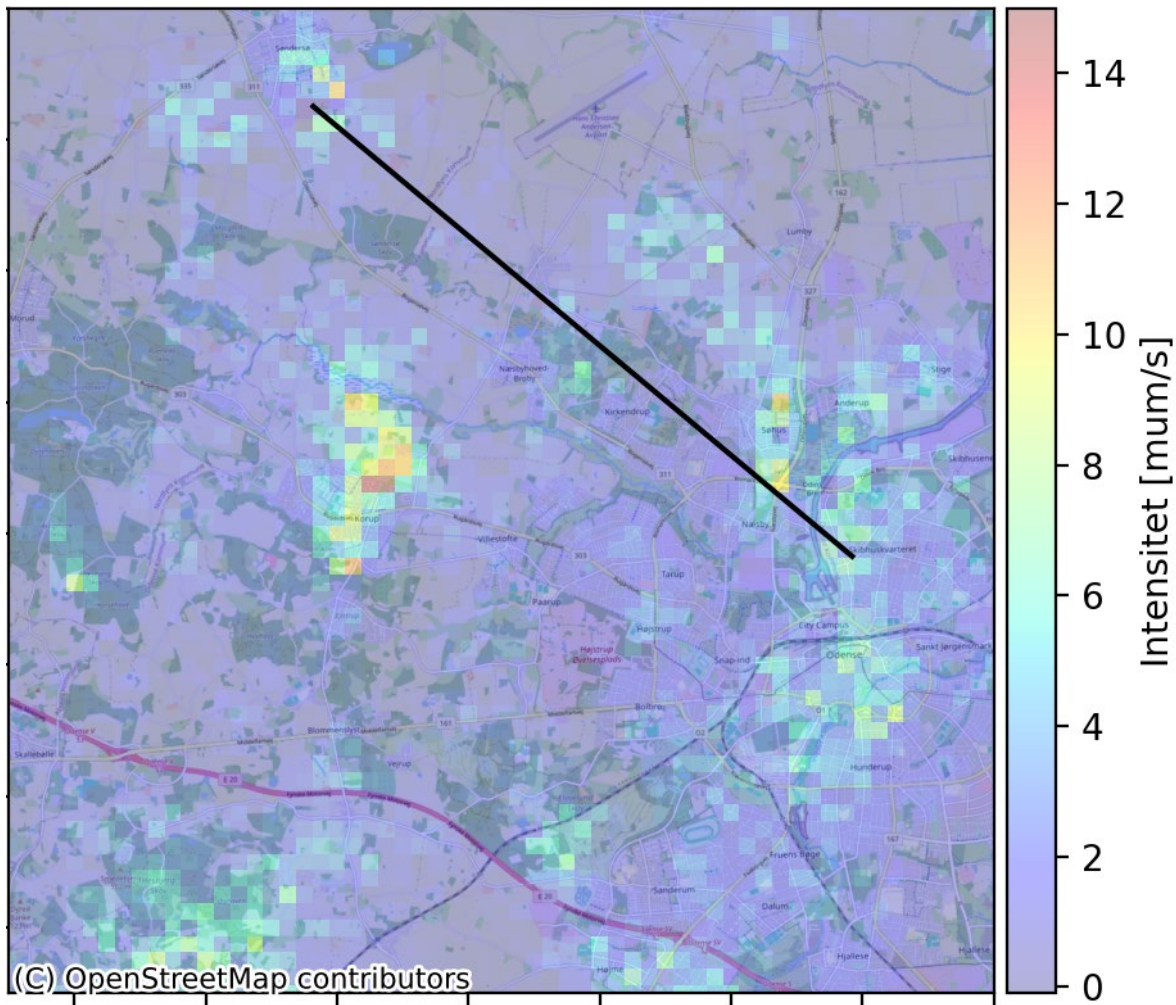
tiendedel af regnmåleren. Med DMI's radar i Virring er der ved samme hændelse målt 14,85 mm. Hvilket er lidt under halvdelen af hvad der er målt med SVK-regnmåleren. De store afvigelser fra regnmålerne viser at der er behov for andre datakilder for at have et robust datagrundlag til at vise hvor og hvornår der har været skybrud. DMI's radar er et supplement der hjælper lidt.

En analyse af tidsserierne for den kraftige hændelse viser at radar og regnmåler måler meget forskelligt. Efter klokken 6:52 hvor der måles intensiv regn med SVK-måleren på over 40 $\mu\text{m/s}$ er der ingen af de tre radarer der måler tilnærmelsesvis samme intensitet, som vist på Figur C3.4. Det forventes at det er fordi radererne ikke kan måle gennem den kraftige nedbør.

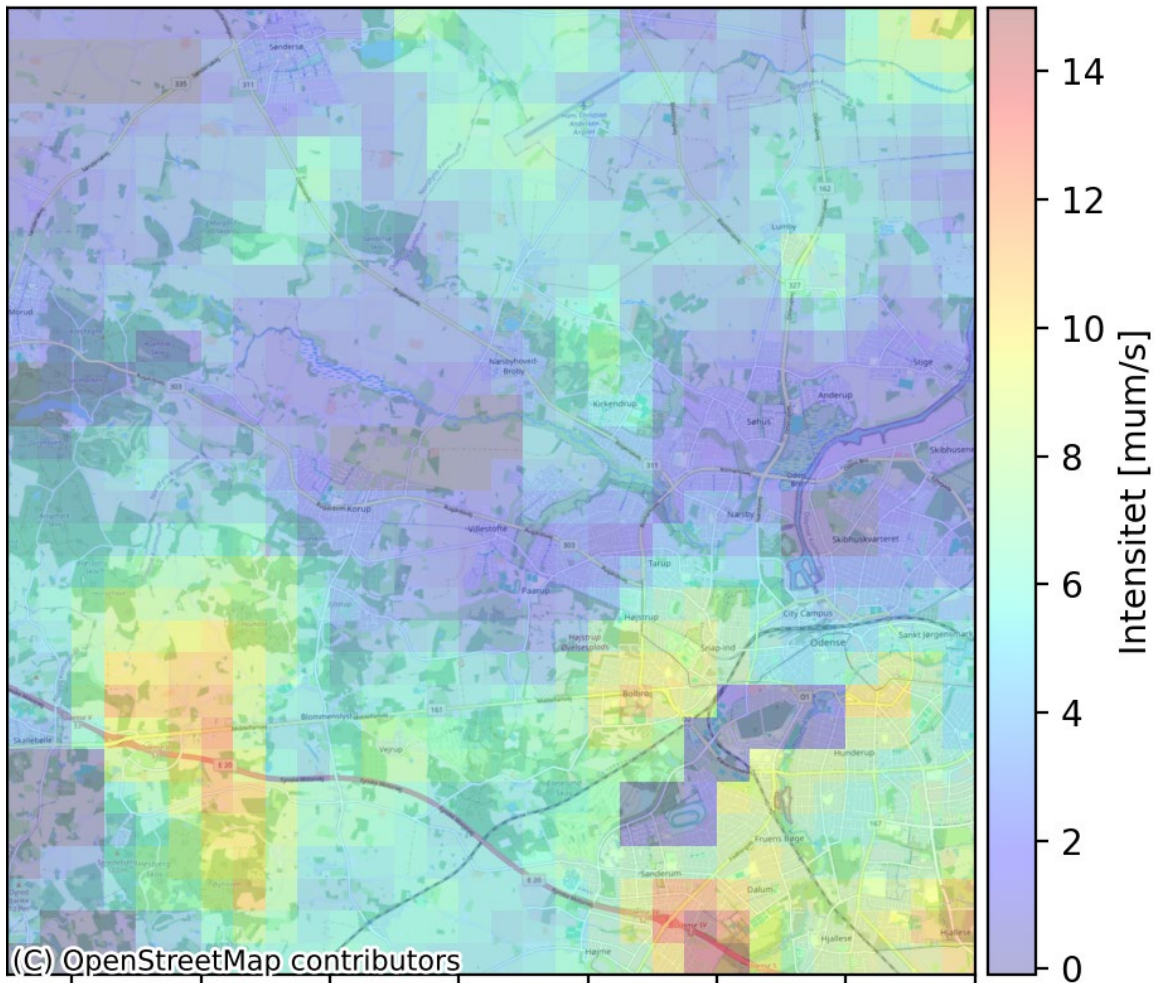


Figur C3.4. Målte nedbørsintensiteter ved regnmåler 5418 målt med SVK-regnmåler og radar.

På Figur C3.5, ses den målte regnintensitet klokken 7:18. Dette billede viser også hvad det er radaren har skulle måle igennem af nedbør når den måler ved regnmåler 5418. Øjebliksbilledet for intensiteten er også vist på Figur C3.6, målt med DMI's radar i Virring. Øjebliksbilleder er usikre med radar og specielt med DMI's C-båndsradar der kun måler hvert tiende minut. En sammenligning viser dog stadig at der er meget stor forskel på hvad de tre radarer fanger.



Figur C3.5. Målt nedbørsintensitet klokken 7:18, d. 26/8-2023, målt med radar i Sønderø. Den sorte streg er markeringen af hvad radaren måler igennem ved måling i punktet for regnmåler 5418.



Figur C3.6. Målt nedbørsintensitet klokken 7:18, d. 26/8-2023, målt med radar i Virring.

Konklusion og Perspektivering

De her eksempler er for nogle af de kraftige hændelser der har været på Fyn det sidste halvandet år. Formålet har været at kunne identificere hvor den kraftige nedbør er faldet. Det har ikke været muligt med det nuværende setup. Der har været klart mest fokus på at anvende radaren i Sønderø. DMI's radar i Virring har vist sig lidt bedre til at måle på disse hændelser, men har stadig store udfordringer. Ved radaren i Sønderø har det ikke været muligt at løse det med biasjustering. Det er ikke undersøgt om en biasjustering af radardata fra Virring kan bruges til at bestemme hvor den kraftige nedbør er faldet.

For at få god dækning er det vigtigt at få lavet en komposit med flere radarer. Det er ikke undersøgt hvor tæt radarer skal være placeret for at få en tilfredsstillende sikkerhed for gode målinger. Implementeringen af biasjusteret komposit og muligheden for at hente historisk data vil kunne hjælpe med at undersøge hvor god en præcision der kan opnås med flere radarer.

Case 4 - Realtidsstyring af rensningsanlæg (BIOFOS)

Baggrund

BIOFOS er Danmarks største spildevandsvirksomhed og renser vand for 1,2 mio. spildevandskunder i hovedstadsområdet. Som medstifter af Foreningen VeVa og en del af VUDP-projektet RADIATE arbejder BIOFOS på at gøre rensning af spildevandet i hovedstadsområdet endnu mere effektivt end det er i dag.

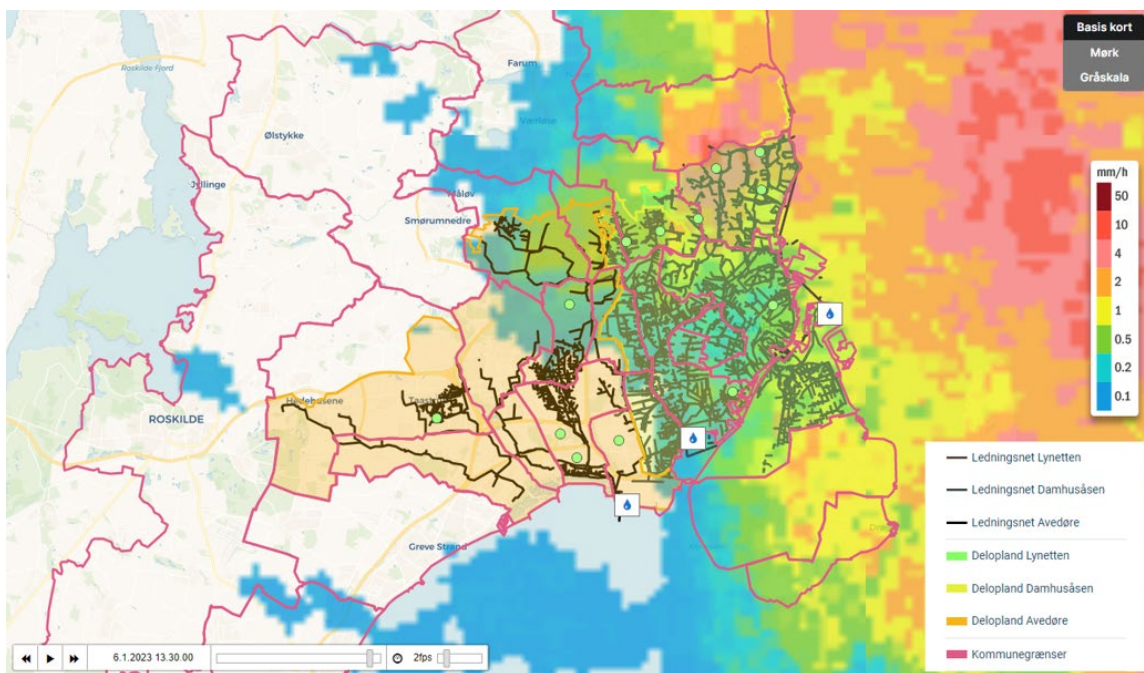
Motivation

BIOFOS er en del af VUDP-projektet RADIATE for at opnå bedre aktiv realtidsstyring af rensningsanlæg. Det tager ca. 1 time at stille rensningsanlæggene om til at kunne håndtere store mængder vand og undgå slamflugt. Med Foreningen VeVa's nowcastede data forventer BIOFOS at kunne tage et kvalificeret kig ud i fremtiden for at kunne omstille anlæggene til at modtage den større mængde vand rettidigt og dermed mindske slamflugten ved høje tilløbsflow.

Case

En aktiv realtidsstyring på rensningsanlægget der som input benytter radardata og et nedbørs forecast muliggør en tidlig omstilling af rensningsanlægget fra den normale tørvejrstyring til en aktiv regnstyring.

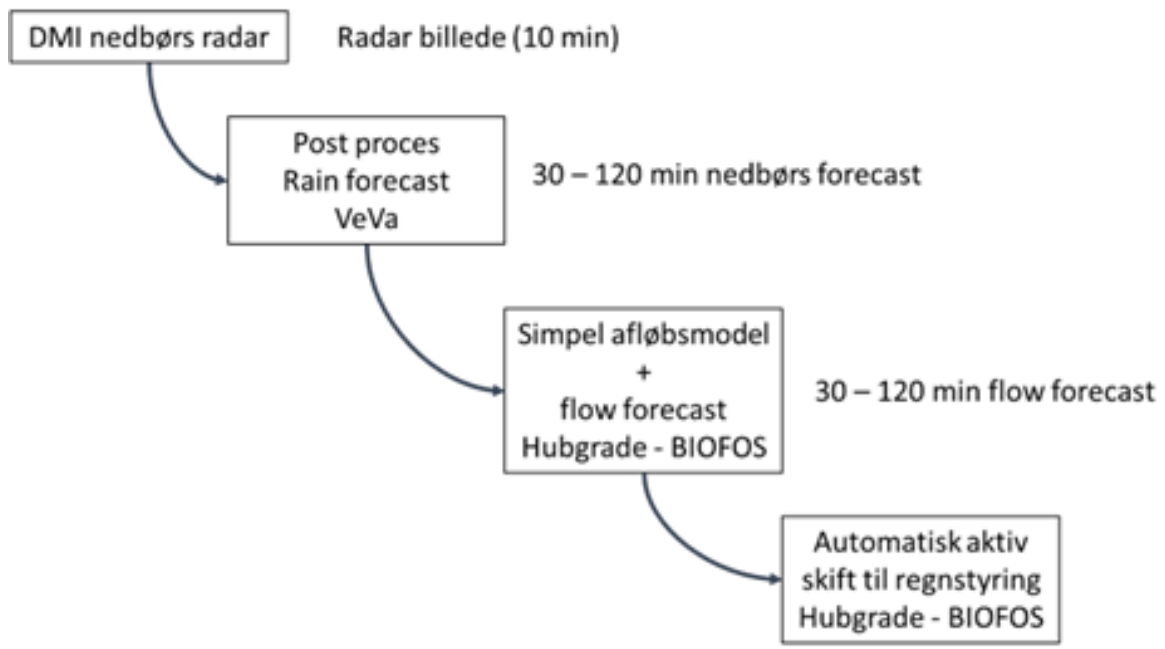
En aktiv nedbørsstyring på rensningsanlægget forbedrer afløbsresultatet under og efter en nedbørshændelse og mindsker risikoen for slamflugt fra de sekundære bundfældningstanke. Radardata og radar forecast giver en bedre beskrivelse af nedbørens spatiale fordeling over oplandet til rensningsanlægget som ikke findes ved brug af data fra regnmålere eller flowmålere. Flowmålere i oplandet kan ikke benyttes, idet transporttiden i et fælleskloakeret afløbssystem, som både håndterer spildevand og regnvand er for kort til at disse data kan benyttes til omstilling til regnstyringstilstanden.



Figur C4.1. Nedbør over BIOFOS rensningsanlæg

Et radarbaseret flowforecast kan derfor forbedre effektiviteten af regnstyringen idet renseanlægget kan omstilles til regnstyring inden regnen får det hydrauliske tilløb til at stige på renseanlægget. Som konsekvens af dette forbedres afløbsresultatet og risikoen for slamflugt minimeres når der benyttes en omstilling baseret på et radarbaseret flowforecast. Når regnstyringen på renseanlægget aktiveres ændres renseanlæggets konfiguration, således at en del af luftningstanks volumenet benyttes som en ekstra sekundær bundfældningstank. Dette betyder at slambelastningen af den sekundære bundfældningstank nedsættes og den biologiske del af renseanlægget kan nu håndtere en højere hydraulisk belastning med regn- og spildevand uden at afløbsresultatet forringes væsentligt. Når regnhændelsen er afsluttet og tilløbsflowet er under en givet tærskelværdi skifter styringen tilbage til den normale tørvejrstyring.

Automatisk skift mellem tørvejrstyring og regnvejrstyring på renseanlægget forudsætter at der foreligger en god og præcis nedbørs forecast, der beskriver nedbøren i de kommende timer. Når den radarbaserede nedbørsforecast kombineres med en hydraulisk afløbsmodel, kan man få et godt estimat på den kommende hydrauliske belastning og derved tilløbsflowet til renseanlægget eller flowet i andre vigtige centrale punkter i afløbssystemet.



Figur C4.2. Dataflow for realtidsstyring med brug af radarforecast fra VeVa's data backend system

Et radarbaseret flowforecast giver derved mulighed for at omstille renseanlægget, således at renseanlægget nu er forberedt til den forøgede hydrauliske belastning inden regnen rammer renseanlægget. Prognosen på tilløbsflowet til renseanlægget kan derved benyttes til en automatisk omstilling mellem tørvejrstyring og regnstyring. Omstillingen fra tørvejr- til regnstyringen tager ca.1 time for renseanlægget, og derefter er renseanlægget nu forberedt til den høje hydrauliske belastning. Omstillingen mellem tørvejrstyring og regnstyring kan også ske på basis af renseanlæggets tilløbsflowmålere, men dette er ikke lige så effektivt, så brug af et radarforecast muliggør en tidlig omstilling fra tørvejrstyring til regnstyring.

Tørvejrstyringen og regnstyringen med brug af det radarbaserede flowforecast er implementeret i BIOFOS Hubgrade processtyringssystem der benyttes på alle BIOFOS's tre renseanlæg der ved hjælp af en lang række onlinesensorer (flow, niveau, temperatur, ilt, suspenderet stof, turbiditet, næringssalte, slamspejl og det radarbaserede flowforecast) løbende optimerer driften af den biologiske vandbehandling således at man opnår det bedste afløbsresultat med et minimalt brug af ressourcer (el, fældningskemikalier m.v.).

Hubgrade systemet udregner løbende nye optimale sætpunkter der benyttes af vandbehandlingsens styring på basis af styringsbeskrivelser opsat af BIOFOS således at styringen hele tiden kører med de bedste og mest opdaterede setpunkter.

Konklusion

BIOFOS forventer at skabe en endnu mere effektiv rensning af spildevandet via realtidsstyring baseret på nowcastet data. De op til 120 min nowcasting af data inklusivt koncentrationstiden i afløbssystemet giver mere tid til at vurdere situationen og skifte til den korrekte styringsmetode, således der opleves mindre slamflugt og derved mere effektiv rensning af spildevandet.

Case 5 - Spatial fordelt gentagelsesperiode (HOFOR)

Baggrund

HOFOR står for både vandforsyningen og for at lede spildevand væk i otte kommuner: Albertslund, Brøndby, Dragør, Herlev, Hvidovre, København, Rødovre og Vallensbæk. Som medstifter af Foreningen VeVa og en del af VUDP-projektet RADIATE arbejder HOFOR på bedre at kunne beskrive gentagelsesperioderne under kraftige regnhændelser i oplandet med VeVa's Vejrraderdata.

Motivation

Regnmålere er traditionelt blevet anvendt til hydrauliske analyser af nedbørens effekt på afløbssystemer. Regnmålere er punktobservationer af nedbøren og derfor kun repræsentative inden for en begrænset radius pga. nedbørens variabilitet i tid og sted. HOFORs vejrradardata adderer betydeligt til den regnbeskrivelse, som kommer fra punktregnmålerne og tilvejebringer en langt bedre indsigt i hvor, hvornår og hvordan det regner. HOFORs vejrradarprojekt handler om at drage nytte af denne ny viden og finde anvendelser af den nye og forbedrede regnbeskrivelse. Det gøres ved at fokusere på to konkrete områder for anvendelse.

Vi undersøger her, om vi kan bruge vejrradar til at se noget, som vi ikke kan se ud fra punktobservationerne fra DMI og Spildevandskomitéen (SVK).

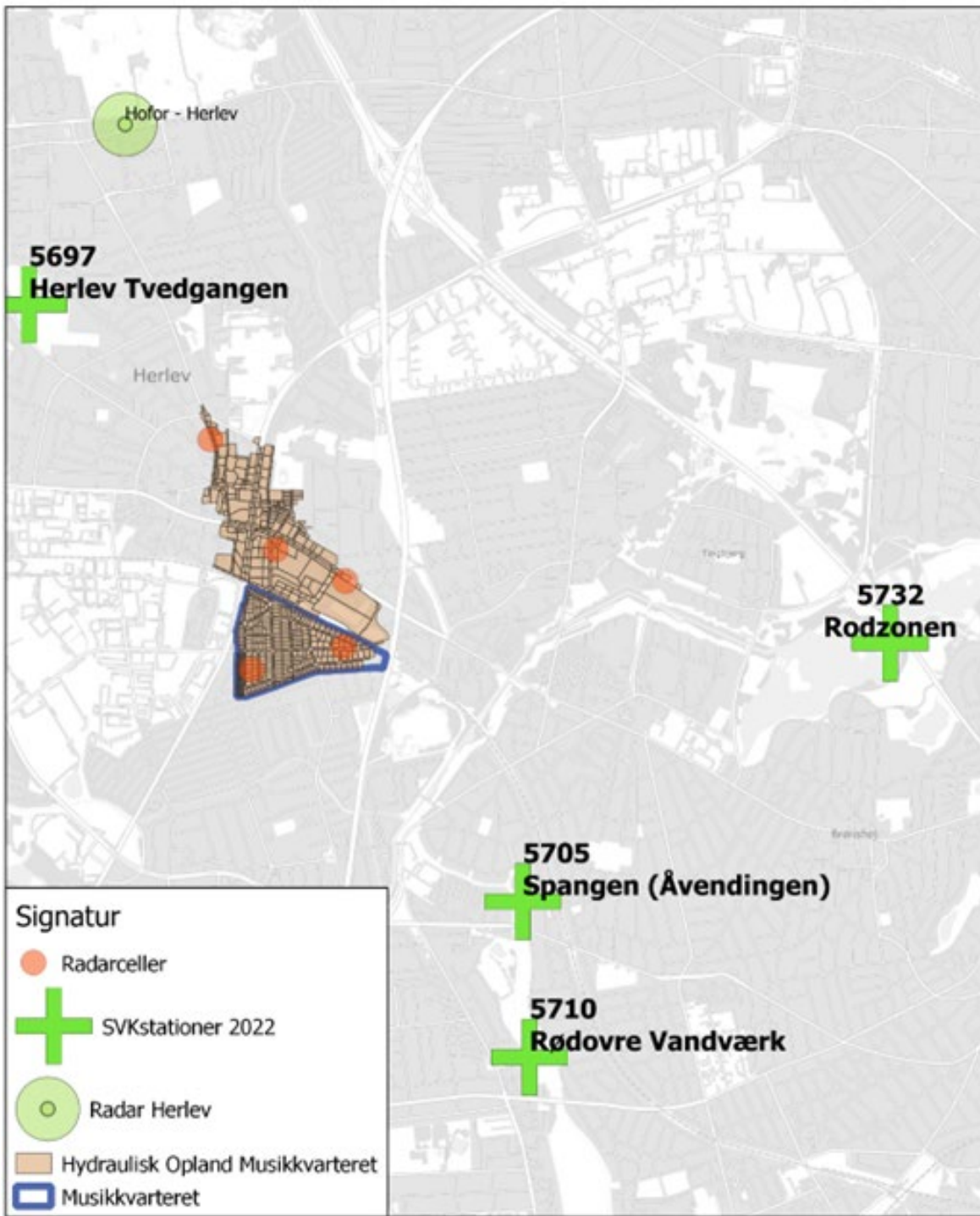
27. august 2022 faldt der store mængder nedbør over Københavnsområdet. HOFORs driftsafdeling har gennemgået data for SVKs regnmålere og noteret, at der faldt regn med en gentagelsesperiode på over 10 år et enkelt sted i HOFORs opland (Målestationen Åvendingen ved Harrestrup Å).

I "Musikkvarteret" i Herlev blev der konstateret oversvømmelser under hændelsen. HOFOR er på daværende tidspunkt i dialog med Herlev kommune omkring løsninger, som kan afhjælpe de oplevede problemer i oplandet. Et vigtigt grundlag for at forstå og løse problemerne er viden om hvilken nedbør, der gav anledning til oversvømmelserne. Det er ofte en udfordring at DMI's og SVKs målenetværk ikke kan fange alle regnens nuancer.

Den 27. august var der beretninger om private nedbørmålinger med langt større nedbørmængder end observeret i DMI og SVK målenetværket. Vi har derfor anvendt radarregnmålinger til at supplere den viden om regnhændelsen, som allerede findes fra de konventionelle regnmålere. HOFORs egen X-bånd radar i Herlev, måler ekstremt detaljeret og ville derfor være oplagt til formålet, men er her fravalgt til fordel for DMI C- bånd Radar på Stevns, da radaren var i opsætningsfasen under hændelsen.

Case

Et række centrale spørgsmål besvares i regnanalysen og her beskrives hvor meget regn der faldt over oplandet, hvilke intensiteter regnen faldt med og hvad gentagelsesperioderne for forskellige varigheder var.



Figur C5.1. Oplande og placering af nedbørsmålere og de beregnede radarceller

Det hydrauliske opland til Musikkvarteret ses på Figur C5.1, her fremgår også placering af benyttede SVK-målere og placering af radarceller i det hydrauliske opland.

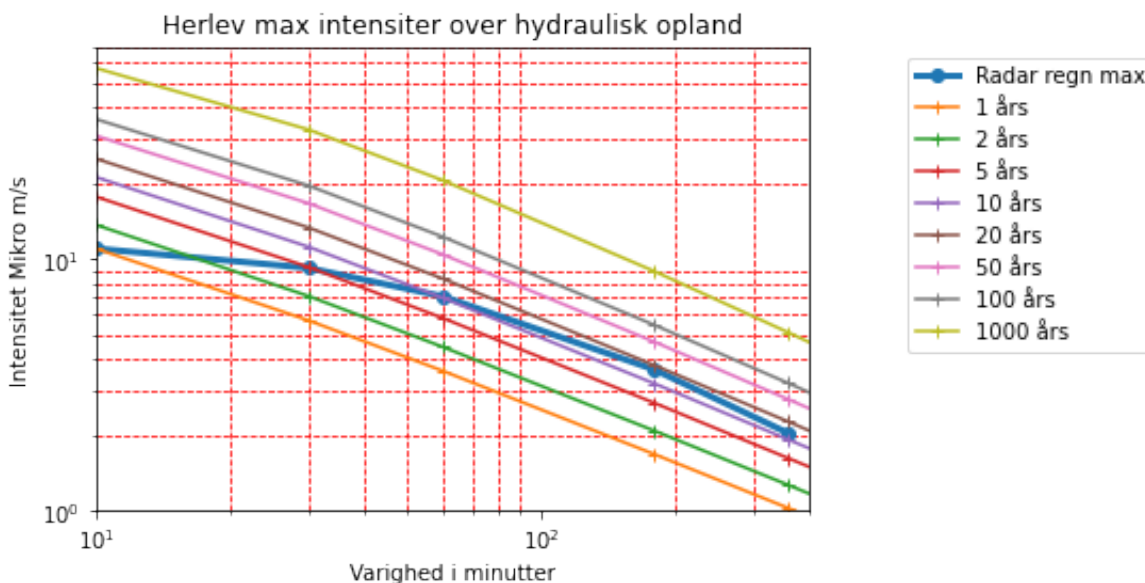
Beregnet gennemsnit af radarregnmålingerne findes ved at analysere radarregntidsserierne fra de 5 radarceller og fremgår af Tabel C5.1, hvor de sammenlignes med de nærliggende SVK-målere for nedbørsintensiteter (og dybde) over en periode på hhv. 10, 30, 60 og 180 minutter. Desuden er den samlede regndybde angivet.

Tabel C5.1. Sammenligning af intensiteter og dybder målt med SVK-målere og estimeret i radarceller

Estimeret / målt	10 min [$\mu\text{m/s}$]	30 min [$\mu\text{m/s}$]	60 min [$\mu\text{m/s}$]	180 min [$\mu\text{m/s}$]	360 min [$\mu\text{m/s}$]	Samlet regndybde
Middel radarregn	10,51	8,75 5,75 mm på 30min	6,84	3,53	1,85	40 mm
Middel SVK-målere	13,12	10,55 18,9 mm på 30 min	6,2	2,77	1,1	40 mm
Max radarregn	10,97	9,19 16,54 mm på 30 min	7,1	3,62	1,95	41 mm
Max SVK-målere	15,0	11,78 21,6 mm på 30 min	7,58	3,18	1,2	49 mm

Den største nedbørsdybde er målt på SVK-måleren Åvendingen, men for varigheder på 180 minutter viser radaren højere nedbørsintensiteter end SVK-målerne.

Endeligt er der fundet gentagelsesperioder for forskellige varigheder. I Figur C5.2 er den maksimale intensitet for de forskellige varigheder indtegnet sammen med standardkurver for de forskellige gentagelsesperioder.



Figur C5.2. Maksimale intensiteter ved forskellige regn varigheder

Gentagelsesperioden for de forskellige varigheder aflæst i Figur C5.2 og fremgår af Tabel C5.2.

Tabel C5.2 Gentagelsesperioder ved forskellige regnvarigheder

Varighed	Gentagelsesperiode
10 minutter	1 år
30 minutter	5 år
60 minutter	10 år
180 minutter	20 år
360 minutter	10 år

Konklusion

Det er muligt at tilvejebringe et mere retvisende dimensioneringsgrundlag og at udarbejde regnanalyser, steder hvor der ikke er placeret SVK-målere ved hjælp af vejradardata leveret af Foreningen VeVa.

Useasen har vist at radardata kan benyttes til at undersøge gentagelsesperioder spatialt fordelt over forsyningsoplandet for bedre at kunne evaluere afløbssystemet og forklare årsager til oversvømmelser, hvor der ingen data har været før.

Case 6 - Sammenstyring med prognosedata (HOFOR)

Baggrund

HOFOR står for både vandforsyningen og for at lede spildevand væk i otte kommuner: Albertslund, Brøndby, Dragør, Herlev, Hvidovre, København, Rødovre og Vallensbæk. Som medstifter af Foreningen VeVa og en del af VUDP-projektet RADIATE arbejder HOFOR på bedre at kunne beskrive gentagelsesperioderne under kraftige regnhændelser i oplandet med VeVa's Vejrraderdata.

Motivation

HOFOR vil i 2024 arbejde med vejrradar baseret regnprognoser til styring af bassiner på demonstrationsniveau. HOFOR planlægger en indsats, som går ud på at anvende tilløbsprognoser i en række centrale punkter i afløbssystemet baseret på vejrradardata. Formål er at optimere på tømning og fyldning af bassiner og derved forsøge at mindske spidsbelastning til rensesanlægget.

Case

HOFOR måler indsatsens succes ved at teste prognoseprodukterne på historiske regnvejrsdage og undersøge om dermed, anvendelse af prognoseprodukterne, kan reduceres i den maksimale tilstrømning til rensesanlægget Lynetten.

HOFORs fokus bliver at bruge prognoser til at tømme regnvejr-bassiner i den optimale rækkefølge således, at bassiner som forventes at blive belastet yderligere tømmes først, mens bassiner som ikke belastes yderligere ikke tømmes.

Prognostisering af tilløbet til et bassin kræver en omsætning af nedbør til afstrømning, hvor der tages højde for arealfordeling af regn, forsinkelser, overløb, spjæld og pumper i afløbssystemet. Afstrømningsprocessen beskrives gennem en statistisk afstrømningsmodel der på en enkel og robust måde beregner regnvandsafstrømningen fra overflader og ledningsnet til bassinerne i Oplandet til Rensesanlæg Lynetten. Fremgangsmåden tilgodeser en håndtering af effekterne af den stedlige varierende nedbør, som de er beskrevet i prognoser i projektet Radiate og tillader os at estimere de forventede tilstrømninger til bassiner i Lynettens opland uden brug af detaljeret hydrodynamisk modellering.

Konklusion

HOFOR ser en fremtid med nowcastede radardata, hvor der via realtidsstyring og sammenstyring kan minimeres overløb i systemet ved mere optimal udnyttelse af regnvandsbassinerne i oplandet. Dette kan gennem sammenstyring mellem HOFOR og BIOFOS også minimere belastningen på rensesanlæggene, så rensningen bliver endnu mere effektiv.

Case 7 – Uvedkommende vand i Ekeby (NSVA)

Baggrund

I Ekeby har NSVA store udfordringer med uvedkommende vand i spildevandssystemet, både mht. hurtig og langsom afstrømning. Dette resulterer i hyppige opstuvninger, både i brønde og pumpestationer, samt tilbagevendende oversvømmelser af kældre.

For at kunne fokusere vores fremtidige arbejde på de delområder, der bidrager mest med uvedkommende vand igangsættes dette projekt. Formålet er både at kunne undersøge delområder og at kunne udpege de områder, der bidrager mest med uvedkommende vand.

Omfang

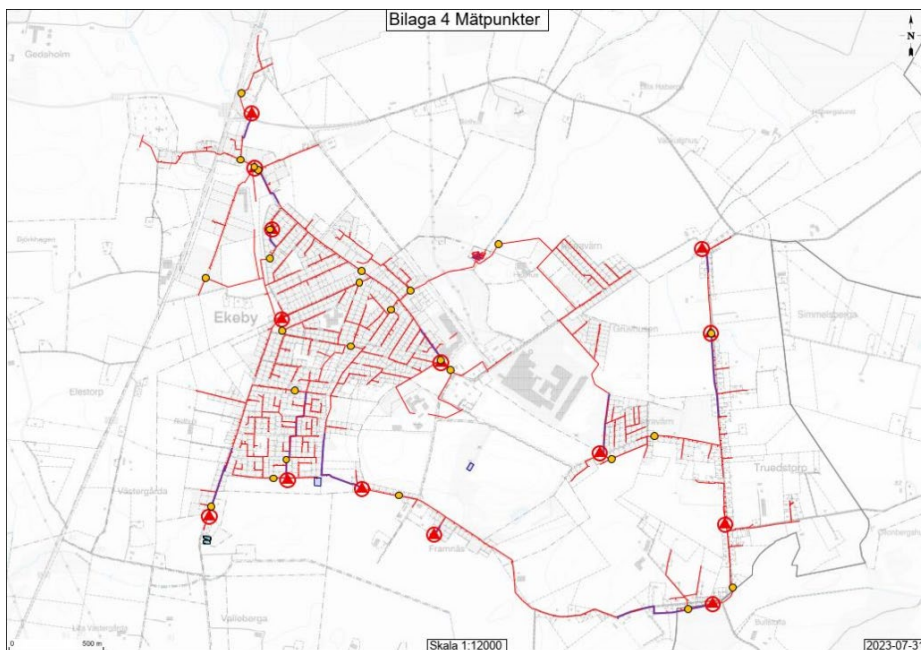
Arbejdet omfatter niveaumålinger med sensorer fra DRYP i 28 brønde, dataindsamling for alle pumpestationer af niveauer, flow og start/stoptider, samt nedbørs- og jordfugtighedsmåling i Ekeby. Data fra NSVAs X-båndsradar skal også bruges som input til analyserne.

Dataene indsamles over et år og analyseres for at beskrive effekten af både hurtig og mere langsom afstrømning af uvedkommende vand inden for hvert delområde. Det er planen, at resultatet fremlægges omkring årsskiftet 2024/2025.

Den omtrentlige placering af niveaumålere er vist som gule cirkler i figuren nedenfor. Regnmåler og jordfugtighedsmåler placeres på renseanlægget.



Figur C7.1. Omtrentlig placering af undersøgelsesområdet.



Figur C7.2. Placering af niveaumålere vist som gult punkt.