

Väderradarteknik inom VA-området - test av metodik

Nicholas South

Hossein Hashemi

Lisa Olsson

Seyyed Hasan Hosseini

Henrik Aspegren

Rolf Larsson

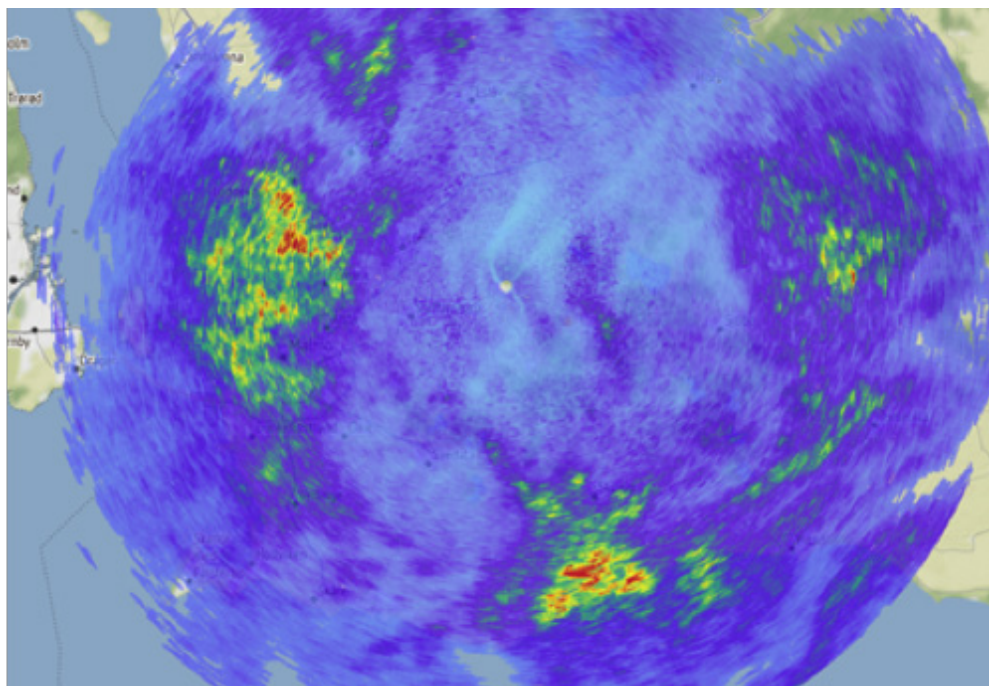
Ronny Berndtsson

Rajib Das

Anna Marmbrandt

Jonas Olsson

Andreas Persson



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SVU) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området.

Författaren är ensam ansvarig för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 14057
167 14 Bromma
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se
Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Väderradarteknik inom VA-området – test av metodik
Title of the report:	Weather radar technology within water- and wastewater treatment – test of methodology
Författare:	Nicholas South, Lisa Olsson, Henrik Aspegren och Anna Marmbrandt, VA SYD, Hossein Hashemi, Rolf Larsson, Ronny Berndtsson, Seyyed Hasan Hosseini, Rajib Das och Andreas Persson, Lunds tekniska högskola/Lunds Universitet och Jonas Olsson, SMHI
Rapportnummer:	2019-3
Antal sidor:	78
Sammandrag:	Under sommaren 2018 gjordes försök med X-bandsteknik på Dalby vattentorn i Lunds kommun – ett pilotprojekt som är det svenska startskottet för användning av väderradar inom VA-området. Rapporten redovisar en litteraturstudie av tekniken. Den jämför uppmätta regndata mellan radaranläggningen och stationära regnmätare, gör en analys av flödes- och bräddmätning i avloppssystem vid några regntillfällen, och ger förslag på praktiska tillämpningar av X-bandstekniken
Abstract:	The report consists of a literature study of X-band weather radar technology, a comparison of rain data between an X-band radar facility near Lund and rain gauges, an analysis of flow- and sewage overflow data during rain events and implementation ideas of the X-band radar
Sökord:	X-band väderradar, väderstyrning, varningssystem, nederbörds-mätning, C-band väderradar, bräddmätning, flödesmätning
Keywords:	X-band weather radar, weather based control, warning systems, rain gauge measurements, C-band weather radar, sewage overflow measurements and flow measurements
Målgrupper:	VA-huvudmän, VA-ingenjörer, konsulter, myndigheter, vattenvårdsföreningar och länsstyrelser
Omslagsbild:	Radarbild från 2018-08-30, skärmlapp från www.vasyd.informetics.se
Rapport:	Finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens webbplats www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2019
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB
Om projektet	
Projektnummer:	18-116
Projektets namn:	Väderradar inom VA-området – test av metodik
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling och VA SYD

Förord

Detta pilotprojekt utgör det svenska startskottet för VA-utveckling med väderradar där anläggningen på Dalby vattentorn i Lunds kommun är den första anläggningen med X-bandsteknik i Sverige. Denna teknik öppnar nya utvecklingsmöjligheter inom såväl hydrometeorologin som för VA-branschen. Det gäller inte minst driften av ledningsnätet, bland annat inom hydraulisk modellering, väderstyrning av ledningsnät och reningsverk samt utvecklingen av publika varningssystem. För att täcka upp detta breda spektrum innefattar rapporten både teoretiska avsnitt om väder-radartekniken och exempel på praktiska tillämpningar och analyser.

Projektet har genomförts under ledning av Nicholas South vid VA SYD. Gruppen har haft följande sammansättning:

VA SYD:

- Nicholas South – projektledare VA SYD
- Lisa Olsson
- Henrik Aspegren
- Anna Marmbrandt

Lunds tekniska högskola (LTH):

- Hossein Hashemi – projektledare LTH
- Rolf Larsson
- Ronny Berndtsson
- Seyyed Hasan Hosseini
- Rajib Das

Lunds universitet (LU):

- Andreas Persson

SMHI:

- Jonas Olsson – granskare och rådgivare i arbetsgruppen

Redaktörer och huvudsakliga skribenter för rapportsammanställningen har varit Nicholas South och Hossein Hashemi. Rapporten består av följande kapitel:

- Kapitel 1 och 2 (med huvudförfattarna Hossein Hashemi, Seyyed Hasan Hosseini och Rajib Das) är teoretiska till sin karaktär och består av en litteraturstudie inklusive en utvärdering av förutsättningar och begränsningar för X-bandstekniken. Översättning och återkoppling har gjorts av övriga i LTH/LU-gruppen.
- Kapitel 3 (med huvudförfattarna Nicholas South och Lisa Olsson) ger en översiktlig beskrivning och utvärdering av försöket med radarn i Dalby sommaren 2018. Utöver detta görs en jämförelse mellan väder-radarn och regnmätare med avseende på regnintensitet, regnmängd och varaktighet. I avsnitt 3.4 har Tomas Wolf från Sweco skrivit om hur väderradar kan integreras med VA SYD:s övriga mätare.

- Kapitel 4 är ett resultatkapitel där radardatan har analyserats. Avsnitt 4.1 ger en validering av radardata med avseende på ackumulerad regnmängd som har gjorts av LTH gruppen.
- I kapitel 5 ges förslag av Nicholas på konkreta utvecklingsmöjligheter inom VA-området och en framtidsutblick på nya forskningsområden.
- I kapitel 6 presenteras slutsatser och framtida arbete inom området.

Till projektets genomförande har bidrag erhållits från Svenskt Vatten Utveckling, VA SYD och Trelleborgs kommun.

Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning	6
Summary	7
1 Litteraturstudie om X-band väderradarteknik	9
1.1 Erfarenheter och internationell utblick	9
1.2 Fysikaliska principer	12
2 Förutsättningar och kritiska begränsningar för en X-band väderradaranläggning.....	13
2.1 Tekniska förutsättningar och begränsningar.....	13
2.2 Praktiska förutsättningar och begränsningar	15
2.3 Allmänna förutsättningar	15
2.4 Hantering av insamlade data – strategi för radaranvändning, datahantering och avläsning	15
2.5 Modifiering av nerladdade data – interpolering för massbalans	17
3 Utvärdering av testperiod från radaranläggningen i Dalby sommaren 2018.....	20
3.1 Introduktion Dalby väderradaranläggning	20
3.2 Introduktion VA SYD.....	22
3.3 Jämförelse radar – VA SYDs mätinfrastruktur.....	25
3.4 Effekter på ledningsnätet under regntillfällen augusti 2018	34
3.5 Extern utredning av VA SYDs mätningssamhet	39
4 Analys av mätdata från väderradarn.....	42
4.1 Jämförelse mellan regnmätare och radardata med avseende på ackumulerad nederbörds mängd.....	42
5 Förslag på tillämpningar baserade på mätdata från väderradar	54
5.1 Framtida förbättringar av väderradaranläggningen i Dalby	55
5.2 Efterkonstruktion – flödesmodeller och skadekravshantering.....	55
5.3 Utveckling av väderstyrda pumpstationer och reningsverk.....	56
5.4 Utveckling av varningssystem och prognosverktyg	59
6 Slutsatser.....	65
7 Referenser.....	67
Bilagor.....	72
Bilaga 1: Beskrivning av polarimetriska radarvariabler	72
Bilaga 2: Terminologi	73
Bilaga 3: SCN filstruktur	75

Sammanfattning

Under sommaren 2018 gjordes försök med X-bandsteknik på Dalby vattentorn i Lunds kommun – ett pilotprojekt som är det svenska startskottet för användning av väderradar inom VA-området. Rapporten redovisar en litteraturstudie av tekniken. Den jämför uppmätta regndata mellan radaranläggningen och stationära regnmätare, gör en analys av flödes- och bräddmätning i avloppssystem vid några regntillfällen, och ger förslag på praktiska tillämpningar av X-bandstekniken.

Förändrat klimat med intensivare regn ger problem i form av översvämningar och bräddningar. Regn behöver mätas bättre. Den traditionella regnmätaren är en ganska noggrann metod för att mäta nederbörd i en punkt. Fördelen med radar är att den kan samla väderdata från ett stort område och använda data i realtid.

Testperioden från juli till september 2018 visade att en X-bandsradar kan vara till stor nytta för en VA-organisation och bland annat ge möjligheter till varningssystem och väderstyrning av avloppssystemet. Den kan också förbättra indata till hydrauliska modeller och täcka upp där det inte finns regnmätare. X-bandstekniken har högre upplösning i både tid och rum än radar med C-band som används i dag av SMHI. Därför är X-band lämpad för användning i städer för att modellera dagvattensystem och för att utveckla varningssystem när det gäller urbana översvämningar. I en framtida permanent väderradaranläggning hos VA SYD ska radarn kombineras med fasta regnmätare.

Projektet gav resultat från fyra regntillfällen under augusti månad 2018. Framför allt var regnet i Trelleborg den 11 augusti intressant då de lokala regnmätarna visade stora variationer som kunde bekräftas och åskådliggöras av väderradarn. Däremot var det skillnad på den uppmätta nederbördsvolymen från radarn jämfört med regnmätarna, där radarn konsekvent visade för mycket uppmätt nederbörd. Det belyser vikten av att både undersöka regnmätarnas noggrannhet och att kalibrera radarn mot stationära regnmätare i samband med fortsatta tester. Studien visade att radarn hos VA SYD kan ge i bästa fall 0,5–1 timmes förvarning om skyfall, men genom samarbete med väderradar i Danmark går det att upptäcka större nederbördsområden tidigare förutsatt att regnen kommer västerifrån.

Väderradarn på Dalby vattentorn kommer att mäta nederbörd regionalt i den sydvästra delen av Skåne från och med 2019 då en permanent anläggning är tänkt att installeras i Dalby. Väderradartekniken kommer i framtiden att bli en central del i ett varningssystem för VA-verksamheten och dess kunder.

VA SYD har genomfört pilotprojektet tillsammans med Lunds tekniska högskola (LTH), Lunds universitet, Sweden Water Research och SMHI. Studien har gjorts med hjälp av analys av bearbetade radardata från en dansk IT-leverantör, från VA SYD:s brädd-, flödes- och regnmätare samt från nederbörds-mätare i Trelleborgs kommun. Radardata har analyserats i olika datorprogram av både LTH och IT-leverantören.

Summary

The purpose with the test period was to obtain an in-depth conclusion of how an X-band weather radar facility could be implemented in VA SYD's sewage utilities including weather radar data quality control and validation. The following parts constitute the report:

- A literature study and an evaluation of the critical parameters for a weather radar facility
- An evaluation with proposed sewage and WWTP applications from the weather radar data
- Validation of the radar data

VA SYD together with the Faculty of Engineering (LTH), Lund University, Sweden Water Research, and SMHI have collaborated in this project. VA SYD and SMHI made an analysis of the technology and localized a test site with idyllic conditions on the top of Dalby water tower in Lund municipality for the first X-band weather radar facility in Sweden. The X-band radar offers higher resolution compared to SMHI's C-band radar. The weather radar was installed from 2018-07-03-2018-09-12 to test the facility on Dalby water tower, Lund municipality. In addition to the VA SYD data, Trelleborg municipality has shared their precipitation data from their rain gauge stations.

The study includes an analysis of processed radar data from Informetix (IT-supplier) and LTH, and from VA SYD's rain-, flow, and sewage overflow gauges. Four precipitation events from August 2018 have been studied in which different datasets including rain gauge data in Trelleborg municipality have been analyzed. LTH processed and validated the radar data with a Matlab code while Informetix used a Python code.

The weather radar facility recorded precipitation on several occasions in August 2018. In particular, the event in Trelleborg on the 11th of August recorded a cloudburst event with local differences in accumulated rain amounts (0-15mm), which was confirmed and illustrated with the radar. However, some differences were observed between the recorded amounts of precipitation by the rain gauges relative to radar estimates. This shows the importance of accurate rain gauge measurements as well as calibrating the radar as the first steps for the future facility.

The study indicated that the VA SYD radar could offer VA SYD with a warning system in future with a margin as a best case from 0,5–1 hour while a collaboration with the HOFOR/BIOFOS facility in Copenhagen could extend the observational range of the radar further based on the condition that the rain front comes from the west. The next step would be to initiate a project where the X-band radar will be integrated with other methods of precipitation measurements, both observations and prognosis tools, which will be applied for water services and hydrological purposes.

The weather radar facility in Dalby will measure precipitation in the southwestern part of Scania from 2019 when a permanent facility will be installed. The weather radar technology will become a key component in a future warning system, which would benefit the Swedish sewage industry and its customers. With this project, the first Swedish research weather radar will be installed and it will contribute to the whole industry with the latest conclusions within radar technology applied in the water- and wastewater sector.

1 Litteraturstudie om X-band väderradarteknik

1.1 Erfarenheter och internationell utblick

Med framtidens klimatutmaningar behöver miljöforskare och ingenjörer bra hydrologiska data för att kunna utveckla framtidens städer. Även om det finns hydrologiska data, kan kvaliteten ibland vara bristfällig. Det visar sig ofta att antingen brist på data eller låg kvalitet på hydrologiska data leder till prognoser som är oprecisa. Detta i sin tur leder till krav på utveckling av ny mätteknik.

Det är uppenbart att kvantitativ mätning av regn har stor praktisk betydelse. Den traditionella regnmätaren utgör en relativt noggrann metod för att mäta nederbörd i en punkt. Numera ökar dock efterfrågan från meteorologer och hydrologer på bra mätningar av areell nederbörd över större områden. Den tekniska utvecklingen inom fjärranalys har lett till att radarteknologi och mätningar från satelliter även kommit till användning inom hydrometeorologi. Det är troligt att radar kommer att bli den standardmetod som kommer att kunna svara upp mot de krav på tillförlitliga och omfattande nederbördsdata som finns för hydrologisk analys och modellering. Orsaken är främst den unika förmågan hos radarn att mäta den rumsliga fördelningen av nederbörden. Dessutom gör denna teknik det möjligt att samla data för ett stort område baserat på hårdvara uppställd på en centralt belägen plats. Data kan också användas i realtid. Detta teknikområde beskrevs redan av Harrold (1965), World Meteorological Organization (1966), och Kessler (1968). Emellertid fanns det på den tiden fortfarande en del praktiska svårigheter med att operationellt utnyttja radar för kvantitativa mätningar.

En detaljerad rapport över hydrometeorologisk användning av radardata skrevs av Browning (1978). Denna litteratursammanställning diskuterar utvecklingen av radartillämpningar inom området och pekade på både styrkor och svagheter hos radarn som verktyg för att observera vatten i atmosfären. Den ger därigenom en balanserad bild av de möjligheter som tekniken har inom hydrometeorologin. Genom den mycket starka utvecklingen inom de berörda teknikområdena radarutrustning, data- och signalbehandling så har användningen av radar för nederbördsmätning ökat kraftigt och blivit mycket viktig (Einfalt m.fl. 2004).

Den påverkan som klimatförändringarna har på frekvensen av extrema nederbördstillfällen i många områden av världen leder till krav på utveckling av mer effektiv hydrologisk modellering. Urbana områden karaktäriseras av korta responstider och höga toppflöden vilket orsakas av hög andel impermeabla ytor. Därför är det extra viktigt att för tätbebyggda områden ha tillgång till regndata med hög upplösning i både tid och rum för att kunna simulera flödesförlopp med god noggrannhet. Detta är i sin tur en förutsättning för bra dimensionering av system som ska hantera dagvatten.

Det är uppenbart från flera studier att osäkerheten i urbana avrinningsmodeller i huvudsak orsakas av fel i nederbördsdata (se t.ex. Willems, 2001; Thorndahl m.fl. 2008; Schellart m.fl. 2012).

Många forskare runt om i världen har använt högupplösta väderradardata för att erhålla noggranna uppskattningar av nederbörd för användning i urbanhydrologiska tillämpningar (se t.ex. Austin and Austin, 1974; Yuan m.fl. 1999; Han m.fl. 2000; Tilford m.fl. 2002; Smith m.fl. 2007; Kramer and Verworn, 2009; Villarini m.fl. 2010; Gires m.fl. 2012; Schellart m.fl. 2012; Schellart m.fl. 2014; Goormans and Willems, 2013). Det rekommenderas en upplösning i rum och tid bättre än 100 m och 1 minut för sådana regndata (Einfalt 2003).

Även om det har skett en avsevärd utveckling av radartechnologin, d.v.s. vad gäller hårdvara, signalbehandling, algoritmer m.m., så återstår fortfarande skillnader mellan konventionella regnmätningar och radarbaserade mätvärden för en punkt. De metoder som används för att beräkna nederbördsintensitet från radarmätningar bygger på kunskap om atmosfärfysik och grundläggande radarteknologiska principer för antenner, frekvenser, bandbredd och polarisering. Dessutom behövs kunskap och metoder för databehandling avseende dämpning, störning av radarsignalerna och konvertering från reflektivitet till regn. Dessa fundamentala teoretiska aspekter på väderradar har beskrivits i detalj av Doviak and Zrni (1993), Collier (1996), Brangi and Chandrasekar (2001), Meischner (2004), Michaelides (2008), Rinehart (2010), Marshall and Palmer (1945), Austin and Austin (1974), Wilson och Brandes (1979), Smith and Krajewski (1991), Krajewski and Smith (2002), Einfalt m.fl. (2004), Delrieu m.fl. (2009), Krajewski m.fl. (2010), Villarini och Krajewski (2010), och Berne och Krajewski (2013).

De vanligaste typerna av väderradar i världen är S-band, C-band och X-band radarer. Dessa radar skannar atmosfären radiellt i flera höjdnivåer vilket resulterar i data från fullständiga 360-gradiga, kilformade volymer. Den tidsmässiga upplösningen för varje fullständigt varv/scan beror på hur fort radarn roterar och hur många höjdnivåer som scannas av. Radarn mäter den momentana regnintensiteten och därför blir radarernas tidsupplösning direkt avgörande för tidsupplösningen av uppmätt regnintensitet. Alla väderradar levererar scannade reflektiviteter med givna tidsintervall.

På 1980-talet och 1990-talet var det många universitet och forskningsinstitut i världen som använde mobila X-band Doppler radar för att undersöka de inre strukturerna i regn- och snöbyar (Sharif and Ogden, 2014). För detta syfte monterade man X-band radarn på flaket av en öppen lastbil och följde regnbyarna för att kvantifiera lokal nederbörd. Senare studier visade att X-band radar även kan användas för att komplettera eller ersätta C- och S-band radar för urbana tillämpningar med sikte på modellering av dagvattensystem och för varningssystem vad gäller urbana översvämningar. I början av 2000-talet började man att ta ner sina X-band radar från lastbilsflaken och i stället installera dem på högpunkter i terrängen och på byggnader för användning i realtidsmätningar av nederbördstillfällen, speciellt i urbana områden.

Tidsupplösning varierar mellan olika radartyper och är för S-band 10–15 minuter, för C-band 5–10 minuter och för X-band 1–5 minuter. Den rumsliga upplösningen är på motsvarande sätt för S-band 1 000–4 000 meter, för C-band 250–2 000 meter och för X-band 50–1 000 meter. Räckvidden varierar också med radartyp så att den är för S-band 100–200 km, för C-band 100–130 km och för X-band 30–60 km (se Tabell 1.1). Det finns ytterligare typer av radar som är specialkonstruerade för att mäta med hög tidsupplösning, ner till 15 sekunder, i speciella områden (van de Beek m.fl. 2010; Mishra m.fl. 2016). De typiska prestanda som gäller för de olika radartyperna visar att X-band radar har bättre upplösning i både tid och rum jämfört med C- och S-band radar och att den därmed alltså är mer lämpad för hydrologiska tillämpningar i urban miljö.

Tabell 1.1 Tekniska data för X-, C-, och S-band-radar.

Parameter	X-band	C-band	S-band
Räckvidd (radie)	30–60 km	100–130 km	100–200 km
Tidsupplösning	1 min	5–10 min	10–15 min
Rumsupplösning	0,05–1 km	0,25–2 km	1–4 km
Antenn, diameter	1–2 m	Upptill 4 m	Upptill 8 m
Våglängd	2,5–4 cm	4–8 cm	8–15 cm
Frekvens	8–12 GHz	4–8 GHz	2–4 GHz
Antal höjdvinklar	6	14	14

Hårdvara och den bakomliggande fysiken avgör i princip den rumsliga upplösningen för den resulterande regndataprodukten. Vanligtvis har X-band radar kortare räckvidd och mindre antenner än C- och S-band radar och har därigenom högre radiell upplösning, vilket i sin tur ger rumslig upplösning ner till 50 m. Av denna anledning föreslås det i senare studier (Lengfeld m.fl. 2013; Lengfeld m.fl. 2014; Trabal m.fl. 2013) att X-band radarobservationer används som alternativ till, eller som ersättning för, S- och C-band radar för att fylla de behov som finns vad gäller regn-data för modellering av urbana dagvattensystem, avrinningsmodellering av vattendrag, hydraulisk modellering, detaljerad information om extrema väderhändelser och för andra tillämpningar. Förutom bättre upplösning, så har radar som arbetar med höga frekvenser även en fördel i lägre kostnader vilket beror på mindre antenner än de som används för långvågig radar. X-band radar kan dessutom generera mätningar av nederbörd närmare jordytan genom sin kortare räckvidd. S- och C-band radar som mäter inom ett område med mer än hundra km radie kan inte mäta regn nära markytan eftersom radarsignalens nivå ökar med avstånd från själva radarstationen. Detta gäller dels på grund av att signalen skickas ut med en viss vertikal vinkel och dels på grund av att resultatet även påverkas av jordytans krökning. Vidare så måste observationer från ett par kilometers höjd över jordytan extrapoleras för att ge resultat avseende det regn som faller på marken. Dessa senare tekniker är begränsade och har dålig noggrannhet vilket leder till stor osäkerhet i uppskattad reflektivitet.

Under de senaste åren har antalet operationella X-band radarer i världen ökat kraftigt, särskilt för urbana områden och små avrinningsområden. Detta har skett tack vare att teknologin blivit etablerad och att den därmed erbjuder pålitlighet, bra prestanda och lägre krav på resurser och pengar för installation och underhåll i jämförelse med de mer vanliga C- och S-band radarsystemen. (se t.ex.. Antonini et. al. 2014; Antonini m.fl. 2017; Shah m.fl. 2015; Chandrasekar m.fl. 2012; van de Beek m.fl. 2010; Lengfeld m.fl. 2014). I en rapport (WIGOS, 2009) från världsmeteorologiska organisationen, WMO, konstateras det att antalet X-band väderradarer som då var i bruk i WMOs medlemsländer hade ökat till nästan 20 % av totala antalet väderradarer.

1.2 Fysikaliska principer

Användning av regndata baserade på väderradar har blivit mycket vanligt på grund av dess noggrannhet och särskilt på grund av dess höga upplösning i tid och rum. En väderradar mäter inte nederbörden direkt utan den mäter reflektiviteten som orsakas av partiklar längs radarsignalens bana. De olika radarvariablerna som mäts i ett polärt koordinatsystem, med radarantennen i centrum, är reflektivitet vid horisontell polarisation (Z_H), differentiell reflektivitet (Z_{DR}), differentiell fasförskjutning för utbredningen (Φ_{DP}), specifik differentiell fas (K_{DP}), och kopolar korrelationskoefficient (CC eller ρ_{hv}). Med hjälp av denna information utnyttjas uppmätta reflektivitetsvärden för att beräkna regnintensitet. Kvantitativ mätning av nederbörd med konventionella X-, C- och S-band radar baseras på teoretiska samband mellan radarns ut-effekt, uppmätt reflektivitet och regnintensitet (Marshall and Palmer, 1948; Battan, 1973). Radardata måste därefter behandlas ytterligare, genom kalibrering och validering, för att man ska få fram pålitlig regndata.

Därför är kalibrering och validering av väderradardata mycket viktiga steg innan dessa data kan användas i hydrometeorologiska tillämpningar. Första steget är att validera regndata från radarn mot konventionella regnmätare. Eftersom radardata är en slags fjärranalysdata så kan man förvänta sig skillnader mellan dessa och data uppmätta från de fasta regnmätarna. Den normala metoden som används för att kalibrera X-band radardata är att använda data från regnmätare placerade på olika platser i avrinningsområdet. Radarbaserade regnintensiteter baseras på empiriska samband mellan reflektivitet och regnintensitet som måste kalibreras och valideras med hjälp av andra landbaserade mättekniker. Denna typ av kalibrering/validering har dokumenterats av t.ex. Jensen (2002), Jensen and Pedersen (2005), Pedersen m.fl. (2008; 2010), Rollenbeck and Bendix (2006), Einfalt m.fl. (2005), Borup (2008), Rasmussen m.fl. (2008a), Thorndahl m.fl. (2010), and Thorndahl and Rasmussen (2012). I de följande delarna av rapporten kommer vi att beskriva den X-band väderradar som installerades och kördes under sommaren 2018 i Dalby. Därvid kommer vi att förklara tillämpliga algoritmer och hur vi validerat mot ett antal utvalda regnmätare i området. Vi kommer också att visa exempel på radarprestanda före kalibrering och s.k. bias-korrigerig.

2 Förutsättningar och kritiska begränsningar för en X-band väderradaranläggning

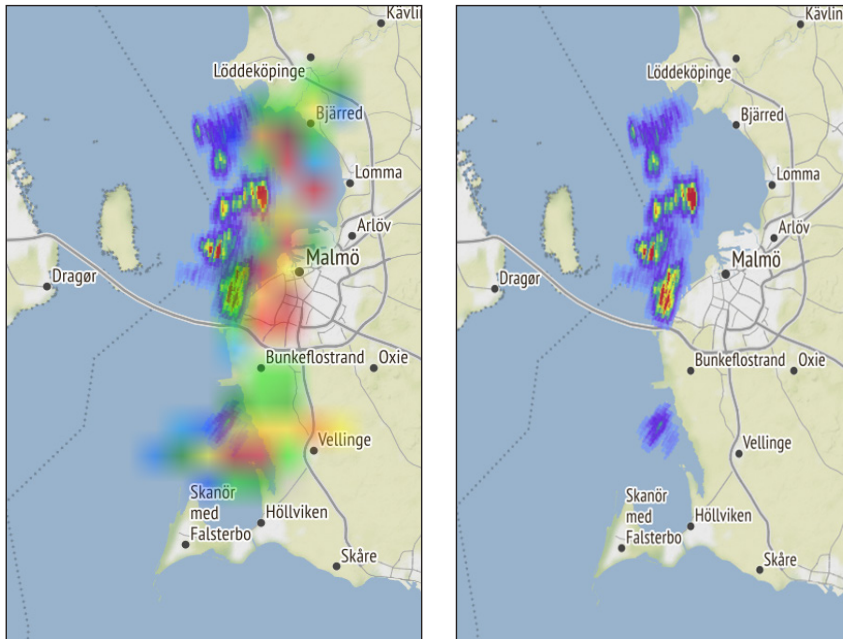
2.1 Tekniska förutsättningar och begränsningar

Medan konventionella regnmätare bara erbjuder punktmätningar av nederbörd, så kan radarinstrument leverera areella regnmätningar med hög rumslig och tidsmässig upplösning. De radarer som opererar på C-band eller S-band är mer vanligt förekommande för kvantifiering av regn eftersom dessa radarer inte lider av lika kraftig signaldämpning som X-band radar (van de Beek m.fl. 2010). Detta beror på att X-band radar arbetar med kortare våglängd men eftersom den samtidigt har en mindre antenn gör detta att upplösningen blir bättre. Detta gör också att X-band radar är ett prisvärt instrument för regnmätningar med hög rumslig upplösning över avstånd där signaldämpningen inte är ett avgörande problem (50–60 km radie). Dessa egenskaper uppmärksammades av hydrometeorologer redan på 1980-talet.

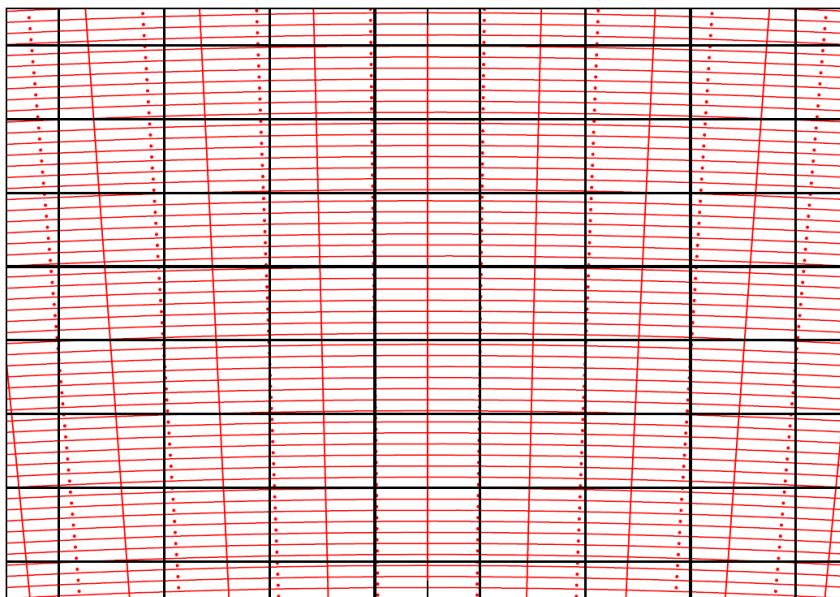
I jämförelse med vad som gäller för de långa våglängder som C- och S-band radarer arbetar med, så dämpas de signaler som X-band radar skickar ut högst väsentligt av vatten i flytande form utefter signalens bana. Dämpningen vid ett givet avstånd beror av droppstorleken vilken varierar och har en viss fördelning samt regnintensiteten (Lengfield m.fl. 2014). I kritiska fall, d.v.s. med mycket höga intensiteter så kan X-band radar-signalen fullständigt blockeras och inget regn mätas i ”skuggan” bakom det blockerande området. Detta är den största tekniska begränsningen av X-band radar i hydrometeorologiska tillämpningar. I kapitel 4 visas några exempel på tillfällen under sommaren 2018 då signalen från Dalbyradarn fullständigt blockerats. För att komma till rätta med detta problem så har många forskare föreslagit att man bör arbeta med ett nätverk av radarer. Ett sådant nätverk kan bestå av två eller flera X-band radarer, alternativt en kombination av C- eller S-band radarer tillsammans med en eller flera X-band radarer. Se Figur 2.1 för en jämförelse av nederbördsupplösningen mellan C-band och X-band väderradar.

Väderradar data produceras och lagras typiskt i ett polärt koordinatsystem med själva radarinstrumentet i origo. Detta innebär att de samplade volymerna ökar i storlek med avstånd från radarn. Även om en sådan data-mängd, i ett polärt koordinatsystem, är praktiskt användbart i meteorologi och för väderprognoser, så har andra tillämpningar (ex. hydrologi) behov av data i andra koordinatsystem. Vidare gäller att för många miljömässiga tillämpningar, behöver också väderradar data integreras med geospatiala data i ett kartesiskt koordinatsystem (Sharif och Ogden, 2014). I Figur 2.2 visas hur volymer i ett polärt koordinatsystem förhåller sig till rut-nätet i ett kartesiskt system som används rutinmässigt för rumslig analys av geospatial information. Dessa typer av tillämpningar, t.ex. hydrologisk

modellering, kräver att data konverteras och mappas om mellan koordinat-systemen.



Figur 2.1 Jämförelse i upplösning med avseende på radardata för en X-band radarbild (t.h) och en kombinerad X-band + C-band radarbild (t.v)



Figur 2.2 Skärningen mellan ett $150 \text{ m} \times 1^\circ$ polärt koordinatsystem (rött) och ett $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ kartesiskt system (svart) på ett avstånd av 58 km från origo (en radar) (Sharif och Ogden, 2014).

2.2 Praktiska förutsättningar och begränsningar

Som nämndes i föregående kapitel så måste de data som levereras i ett polärt koordinatsystem konverteras till ett kartesiskt system. Detta kräver ett avsevärt dataarbete men med dagens datorer och dess beräkningskapacitet så är det inget problem. Datalagring kan vara en annan praktisk begränsning eftersom X-band radarn skickar ut och tar emot signaler för sex olika vertikala nivåer och runt 360 grader för 50 km radie varje minut. Detta motsvarar 60 megabyte rådata per minut, vilket måste lagras direkt.

2.3 Allmänna förutsättningar

Den 3 juli 2018 installerades en X-band väderradar med specifikation enligt Tabell 2.1 vid 55,671° N och 13,359° E i Dalby, Lunds kommun, Skåne. Under en försöksperiod om 72 dagar samlade radarn in information om regn i området. Data sparas som en binär fil med fördefinierat format för varje skanning (ett varv för varje vinkel) till en server. Vid en antennrotationshastighet av 6 varv per minut, kan sex binära filer (.scn-fil) teoretiskt sparas per minut. För radarn i Dalby sparades fyra av dessa .scn filer varje minut till en Amazonserver där varje vinkel var 2°, 4°, 8° eller 10°. Varje .scn-fil är ungefär 15,2 MB i storlek. Detta innebär att den totala datamängden under hela provperioden var ca 6,48 TB (72 dagar).

Tabell 2.1 Specifikation av Compact Dual Polarimetric X-band Doppler väderradar WR-2100 (FURUNO).

Antennpolaritet	Dual polarimetric (vertikal och horisontell), samtidig transmission/mottagning
Frekvens	9,4 GHz
Strålbredd	2,7 grader (både horisontella och vertikala strålar)
Max uteffekt	100 W (både horisontella och vertikala strålar)
Vertikal strålvinkel	-2 till 182 grader (justerbar)
Antennrotation	16 varv per minut max. (justerbar)
Observationsräckvidd	60 km max
Skansätt	PPI, volymskan, sektor PPI, sektor RHI
Output-parametrar	Reflektivitetsfaktor Zh (dBZ), dopplerhastighet V (m/s), dopplerhastighet bredd W (m/s), korpolarisering differensfas ϕ_{dp} (grader), specifik differentiell fas KDP (grader/km), korrelationskoefficient mellan två polariseringar ρ_{HV} , differentiell reflektivitetsfaktor ZDR, regnintensitet R (mm/timme) (se Bilaga 1)
Datakorrektion	Avståndsförsvagning, regnförsvagning, dopplerhastighet, veckning
Dopplerhastighet	+/-48 m/s
Oönskad signal avlägsnande	Mark och behållare "clutter suppression" och interferensavvisning
Operationell temperatur	-10 to +50° C
Maximal vindhastighet	60 m/s
Effekt	100-240 VAC, enfas, 50/60 Hz
Effektkonsumtion	650 W max

2.4 Hantering av insamlade data - strategi för radaranvändning, datahantering och avläsning

Radardata sparas i sfäriska eller tredimensionella (3D) polära koordinater. Av denna anledning specificeras varje datamängd med en azimutvinkel, en höjdvinkel och en radiell koordinat. Eftersom Dalbyradarn har en strålbredd på 2,7 grader både horisontellt och vertikalt (se Tabell 2.1) får

varje datamängd en insamlingsvolym som ökar med avstånd från radarn. För enkelhet, emellertid, i de flesta applikationer illustreras radardata i ett kartesiskt eller polärt plan. Detta kräver att regnintensiteten inte förändras avsevärt i vertikalled vilket kan ifrågasättas på grund av faktorer som avdunstning och vind, speciellt i relation till intensiteter uppmätta vid större höjdvinkel. På grund av detta används de lägsta höjdvinklarna för att motverka oönskade vertikala effekter (Simpson and Fox, 2018). Radarn i Dalby lagrar data från fyra olika skanningar, en för varje speciell höjdvinkel. Höjd av insamlingsvolym som en funktion av avstånd från radar visas i Tabell 2.2. Till exempel, insamlade data på ett avstånd om 6 km från radarn sker nästan 200 m över mark, medan på ett avstånd om 40 km görs detta på en höjd av ca 7 km för fjärde skannivån (Tabell 2.2, Bilaga 2).

Tabell 2.2 Approximativ radartäckt yta, ekvivalent rektangelbredd och höjd för Dalbyradarn.

Avstånd (km)	Radartäckt gridyta (ha)	Ekvivalent gridbredd (m)	Skannivå för radartäckt volym för olika skanningar (m)			
			L1 (2°)	L2 (4°)	L3 (8°)	L4 (10°)
0,05	0,01	2,4	1,7	3,5	7,0	8,8
0,5	0,12	24	17	35	70	88
1	0,24	47	35	70	141	176
5	1,2	236	175	350	703	882
6	1,4	283	210	420	843	1 058
10	2,4	471	349	699	1 405	1 763
19	4,5	895	663	1 329	2 670	3 350
20	4,7	942	698	1399	2 811	3 527
30	7,1	1 414	1 048	2 098	4 216	5 290
40	9,4	1 885	1 397	2 797	5 622	7 053
50	11,8	2 356	1 746	3 496	7 027	8 816
50,1	11,8	2 361	1 750	3 503	7 041	8 834

På en plan yta har polära koordinater två dimensioner med azimuth och radiell enhet. Av denna anledning representeras data med area istället för volym. Denna area ökar med ökande avstånd från radarn medan den är konstant för varje radiellt avstånd. Teoretiskt, är den radiella upplösningen (avståndsupplösning) en funktion av radarpulslängden. Denna skulle kunna vara mycket liten. I praktiken bestäms den emellertid av lagringsutrymme och dataöverföringsbegränsningar (Thorndahl m.fl. 2017).

Avståndsupplösning för radarn i Dalby är 50 m. Av Tabell 2.1 framgår att maximalt avläsningsavstånd är 60 km. För denna pilotstudie var antalet avståndsdata för varje skanning (azimutvinkel) lika med 1 002. Således blir räckvidden av insamlade data 50,1 km. Tabell 2.2 visar också gridyta och ekvivalent gridbredd för olika avstånd från radarn. Det totala antalet skanningar är nästan alltid 887 för ett komplett skanningsvarv. Av denna anledning lagras värden motsvarande data för varje 0,406 grad ($=360/887$). Varje .scn-fil innehåller data motsvarande 888,774 ($887 \times 1\,002$) gridytor.

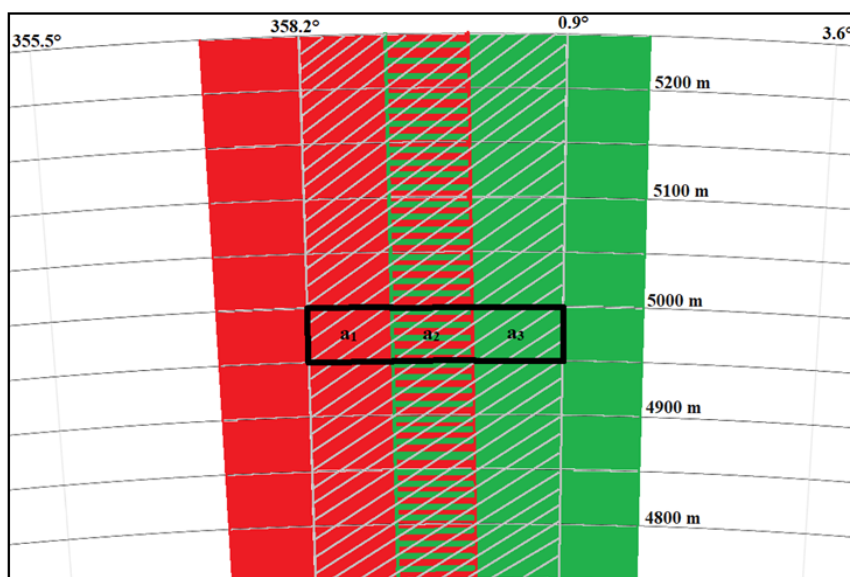
För att kunna läsa alla data i varje .scn-fil, utvecklades en kod i Matlab. Denna kod laddar ner och läser .scn-filer för varje specificerad tidsperiod och för alla höjdnivåer, se bilaga 3 för mer detaljer om programstruktur.

2.5 Modifiering av nerladdade data - interpolering för massbalans

Som nämnts ovan, blir medeländringen av azimutvinkeln i varje radarrotation mindre än strålbredden av radarn. Därför skapas en överlappning mellan närliggande gridceller och vissa närliggande skanningslinjer. Som exempel visar Figur 2.3 tre konsekutiva skanlinjer illustrerade i tre olika färger (röd, grå och grön motsvarar i respektive azimutriktning). Följaktligen kan en viss gridyta med storlek $50 \text{ m} \times 2.7^\circ$ som är placerad mellan avstånd 4,95 och 5,00 km och azimutvinkel $358,2^\circ - 0,9^\circ$ (markerad i tjock svart stil i Fig. 2) delas upp i tre delar a_1 , a_2 och a_3 . Radarn avläser bara regn från den grå skanlinjen för denna gridyta. Information om andra skanlinjer (röd och grön) som överlappar den grå skanlinjen registreras inte. Genom enkla aritmetiska samband kan radardata kompenseras genom information från alla skanlinjer med överlappning inom en given gridyta. För gridytan i Figur 2.3 kan denna beräknas som:

$$R_{\text{int}} = \frac{R_r (\alpha_1 + \alpha_2) + R (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + R_g (\alpha_2 + \alpha_3)}{2 (\alpha_1 + \alpha_3) + 3 \alpha_2}$$

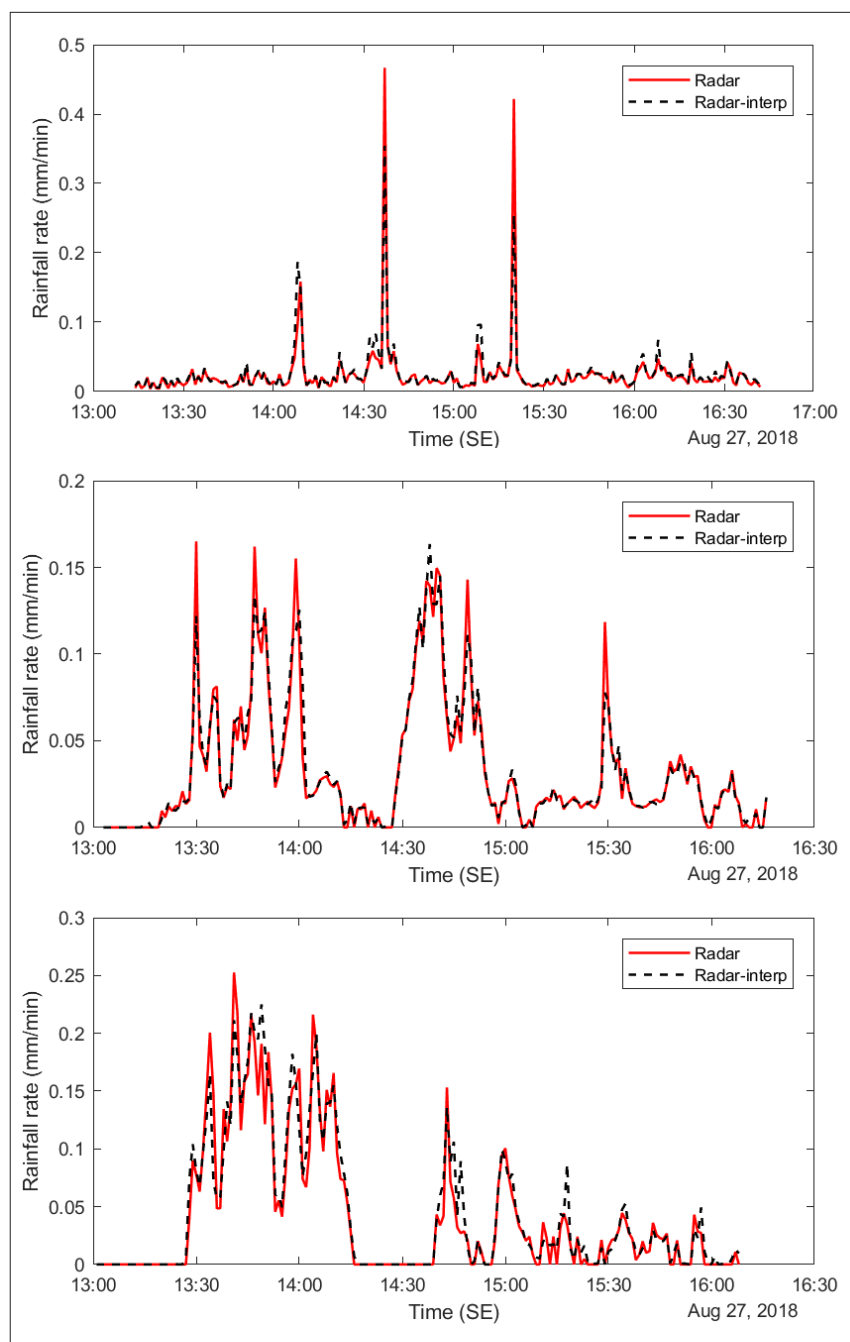
där R är initialt regn för gridytan medan R_{int} är modifierat interpolerat regn med hänsyn tagen till R_r och R_g radarregn för två närliggande skanlinjer (röd och grön) som överlappar den initiala skanlinjen.



Figur 2.3 Schematisk beskrivning av tre konsekutiva skanlinjer kring ett avstånd av ca 5 km, i rött, grått och grönt i motsols azimutriktning.

Således kan den utvecklade Matlabkoden interpolera nerladdade data och kompensera för överlappningen av varje gridyta. Av denna anledning sker ingen artificiell ökning av nederbördsintensitet. Beroende av den rumsliga variationen för regnet kan uppmätt och interpolerat regn skilja sig något åt. Figur 2.3 visar exempel på effekter av denna interpolation för tre olika gridytor. Således kan det finnas skillnader i varje intensitet, men maximala skillnader tenderar att förekomma för plötsliga höga intensitetsföränd-

ringar (Figur 2.). De aktuella gridlängderna motsvarade 1, 19 och 30 km för Figur 2.4 a, b och c. Som visas i Tabell 2.2 erhöles intensiteterna för griddytor motsvarande 0,24, 4,5 och 7,1 ha i ett kartesiskt plan.



Figur 2.4 Jämförelse mellan rå och interpolerade regndata från olika stora griddytor för a) Dalby, b) Arlöv c) Hammars Park se placeringen i tabell 3.1.

Interpoleringen i ovan nämnda beräkning ändrar bara data i griddytor och inte deras lokalisering/upplösning. Emellertid för de flesta applikationer av väderadarprodukter, t.ex. varningssystem för extremnederbörd, är interpolering ett måste för att anpassa och integrera data från olika system som t.ex. X-, S- och C-band radar, satellitdata och väderstationer som samlas in i olika koordinatsystem. Vid modellering av hydrologiska system krävs

nederbördsdata i regelmässiga gridnoder (Sharif and Ogden, 2014). Det bör emellertid noteras att Matlab-koden fortfarande är under utveckling för att kunna användas i interpolering för indata till hydrologiska modeller.

3 Utvärdering av testperiod från radaranläggningen i Dalby sommaren 2018

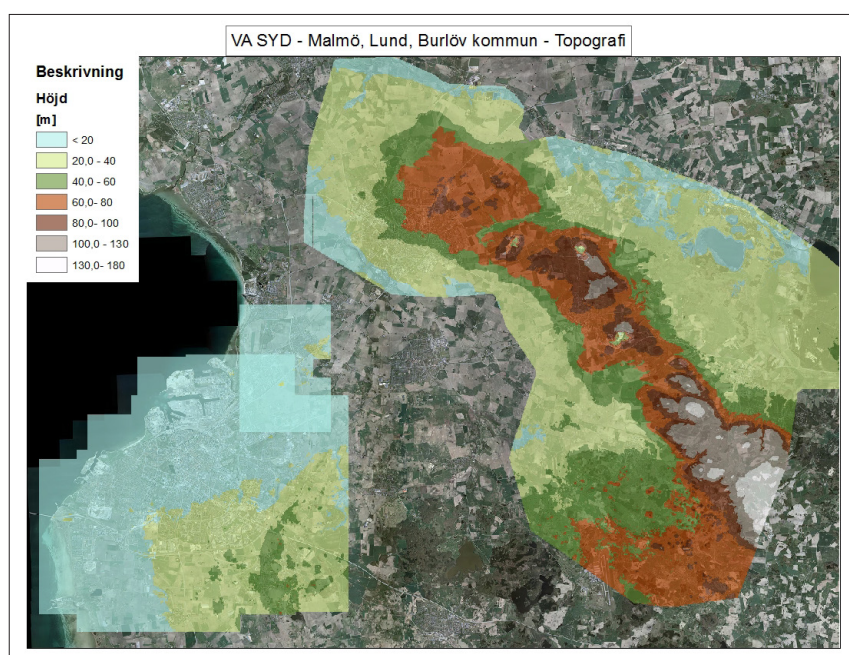
3.1 Introduktion Dalby väderradanläggning

VA SYD är ett kommunalförbund i sydvästra Skåne med medlemskommunerna Burlöv, Eslöv, Lund, Lomma och Malmö kommun, som levererar dricksvatten och renar avloppsvatten åt mer än en halv miljon människor. VA SYD har 2018 ca 350 anställda.

Under vintern 2017/2018 togs beslut att X-band väderradartechniken skulle testas och radarn placeras på någon av VA SYDs anläggningar. Valet av placering på VA SYDs anläggningar var för att minska risken för skade- görelse. Utöver detta eftersöktes en plats med följande kriterier:

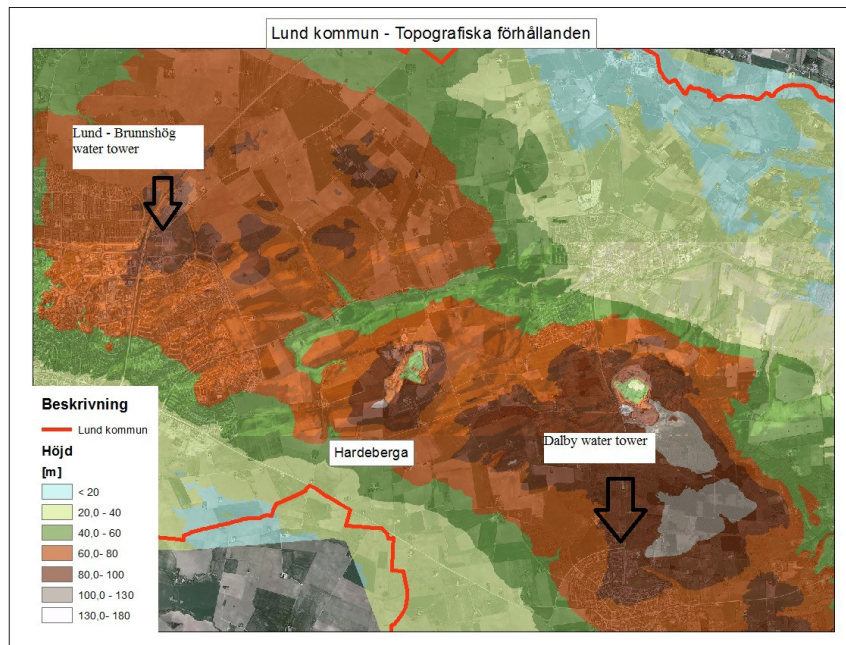
- Geografisk lämplighet – En plats som kunde täcka in hela VA SYDs område.
- Topografisk lämplighet – En plats som hade fri sikt och som låg högt i terrängen för att förhindra att radarbilden blev ofullständig pga. blockering av radarsignal från främmande föremål såsom skorstenar och mobilmaster.
- God internet-förbindelse – platser med fiber var önskvärt för att kunna erbjuda stabil överföring av data.

Lunds kommun är lämplig för placering av radar eftersom den ligger mellan Malmö och Eslövs kommun. Inom Lund går en höjdrygg som syns tydligt i Figur 3.1 och anläggningen för placering av radar valdes ut längs denna höjdrygg.



Figur 3.1
Topografisk analys av terräng i
Malmö, Lund och Burlövs kommun.

Tidigt insåg man att ett vattentorn var mycket lämplig för placering av väderradarn då denna anläggning är inhägnad samt har ett tak som erbjuder en installationsplats högt över närliggande bebyggelse. Av vattentornen på höjdryggen, se Figur 3.2, var Dalby vattentorn bäst lämpad eftersom denna plats inte skuggades av någon närliggande byggnad. Lämpligheten på placeringen bekräftades av SMHI med en topografisk analys.



Figur 3.2 Inzoomad topografisk analys av Brunnshög vattentorn och Dalby vattentorn. Även en anläggning i Hardeberga undersöktes.

För att kunna tåla bläst, åska och för att passa till Furunos väderradarprodukt byggdes ett stativ med åskledare med rejäl förankring i vattentornets tak, se Figur 3.3.

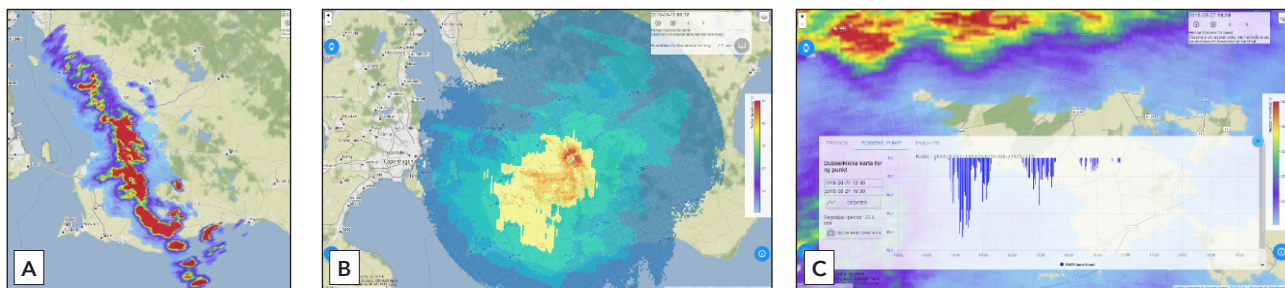
Den 3:e juli 2018 installerades väderradaranläggningen på taket av Dalby Vattentorn i Lunds kommun (se Figur 3.3). Efter lite komplikationer de första dagarna fungerade radarn och internetanslutningen från och med den 9:e juli. Testperioden pågick till den 12:e september då väderradarn avinstallerades. Väderradarn, en Furuno WR 2100-enhet, utlånades till projektgruppen under testperioden av Furuno. Samma typ av väderradar har tidigare installerats på flera ställen i Danmark, bland annat i Köpenhamn och Aarhus.

Under projekttiden har mätdata från radarn tillgängliggjorts via en realtidsuppdaterad webbtjänst från det danska företaget Informetcs. Verktuget fanns öppet tillgängligt på onlinetjänsten vasyd.informetcs.se. Tjänsten levererade bland annat minutupplösta bilder över nederbördsområdenas geografiska spridning (Figur 3.4 A) och möjlighet att se nederbörd över tid i en vald punkt, dels som ackumulerad nederbördsmängd i enskilda celler över hela täckningsområdet (Figur 3.4 B) och dels i en intensitetsgraf för den valda cellen (Figur 3.4 C). Det har även varit möjligt att ladda ner



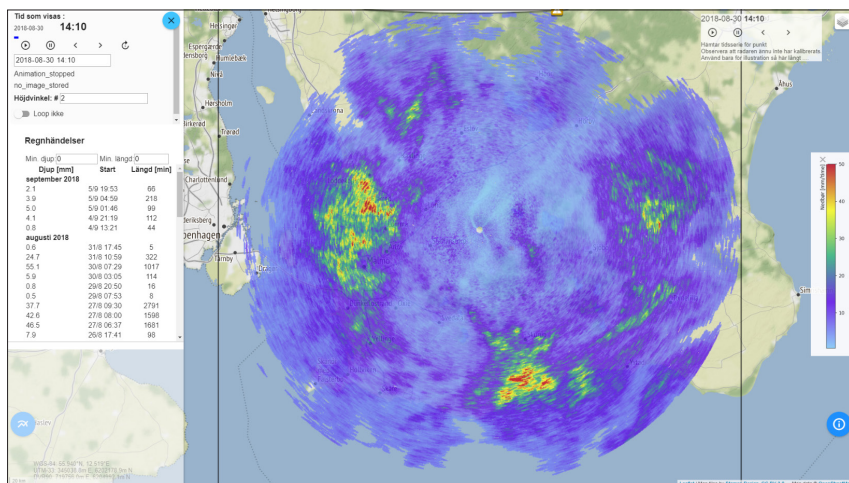
Figur 3.3 Väderradaranläggningen i Dalby med stativ, sommaren 2018

datafiler med beräknade nederbördsintensiteter för de tidsintervall och områden som visas i intensitetsgrafen (Figur 3.4 C).



Figur 3.4 Skärmlapp från radarwebtjänsten vasyd.informetix.se. A) nederbördsintensitet, B) ackumulerad nederbördsmängd i samtliga grid celler, C) nederbörd över tid i vald punkt

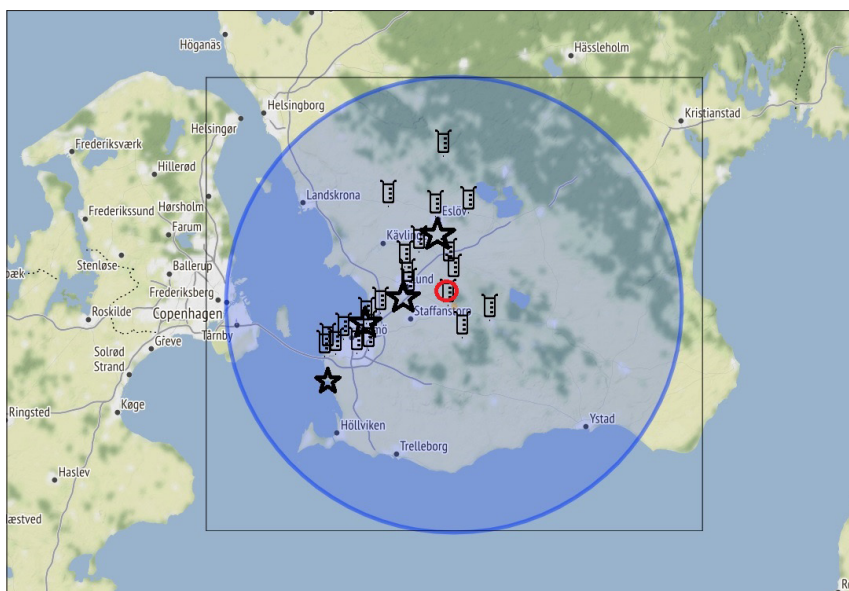
Placeringen av väderradarn på taket av vattentornet möjliggjorde fri sikt åt alla håll, med minimal blockering av radarsignalen. Regnet den 30:e augusti 2018 visar radarsignalens räckvidd i alla riktningar, se Figur 3.5.



Figur 3.5 Radarbild från VA SYD den 30:e augusti, 2018.

3.2 Introduktion VA SYD

VA SYDs avloppsreningsverk och pumpstationer för dag- och avloppsvatten är indelad i fyra större avloppsområden. Avloppsområdet för Klags- hamns ARV som innefattar Vellinge kommun och södra delen av Malmö och Limhamn. Sjölanda avloppsreningsverk har ett avloppsområde som innefattar övriga delar av Malmö och ett upptagningsområde som innefattar en del av kranskommunerna norr om Malmö. Ellinge ARV i Eslöv har ett avloppsområde som innefattar Eslöv kommun och en del andra byar omkring. Källby ARV i Lund har ett avloppsområde som innefattar större delen av Lunds kommun. En översiktsfigur över VA SYDs regnmätare, reningsverk och placering av väderradar samt väderradarns räckvidd visas i Figur 3.6.



Figur 3.6 Översikt av Dalby radarns regionala räckvidd blå cirkel, VA SYD regnmätare (mätglas), större reningsverk (stjärna) och plats för radarn (röd cirkel)

3.2.1 VA SYD regnmätare

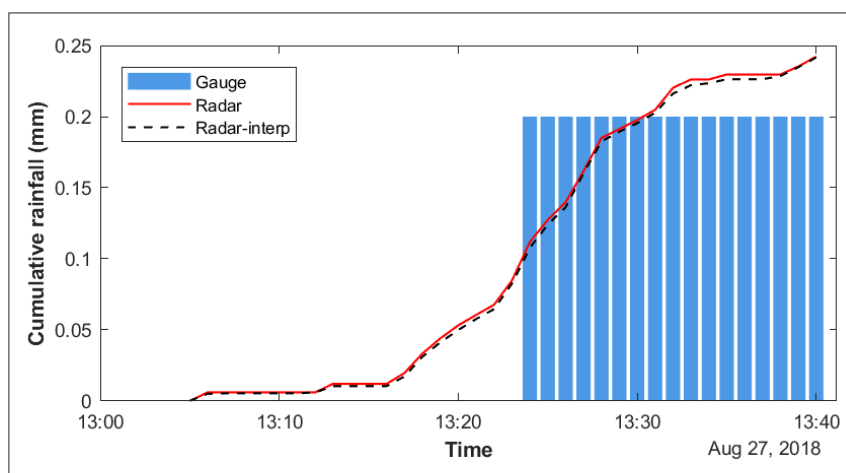
VA SYD förfogar över 22 nederbördsräknare inom verksamhetsområdet som visas i Figur 3.6. Tabell 3.1 redovisar dessa tillsammans med geografisk placering och avståndet till radarn i Dalby. Mätarna har företrädesvis placerats i de centrala delarna av kommunen eller i områden med kombinerat avloppssystem, geografisk placering ses i Figur 3.1.

Tabell 3.1 Placering av regnmätare omkring Dalby-radarn med avstånd.

Regnmätare namn	Latitud °N	Longitud °E	Avstånd till radar (km)
Arlöv PST	55.636	13.059	19
Åkarp	55.656	13.110	16
Eslöv	55.846	13.302	20
Marieholm PST	55.867	13.136	26
Billinge	55.964	13.330	33
Kungshult	55.854	13.417	21
Löberöd ARV	55.752	13.350	9
Örtofta PST	55.777	13.243	14
Lund Norra	55.712	13.204	11
Dalby	55.672	13.347	1
Genarp PST	55.608	13.396	7
Södra Sandby PST	55.721	13.365	6
Veberöd	55.642	13.492	9
Lund Södra	55.694	13.208	10
Stångby	55.747	13.196	13
Turbinen PST	55.605	12.981	25
Limhamn PST	55.585	12.924	29
Augustenborg	55.577	13.027	23
Djupadalsskolan	55.575	12.954	28
Bulltofta	55.609	13.068	20
Hammars Park PST	55.570	12.915	30
Höja	55.583	13.068	21

Ett nytt online-övervakningssystem och nya regnmätstationer håller på att testas och kommer att installeras framöver. I rapporten visas enbart mätresultat från mätare i Malmö, Lund och Eslövs tätorter samt från mätare i Trelleborgs kommun.

Nederbördsmätarna producerar rådata i form av elektriska pulser och när 0,2 mm regn fallit i mätaren registreras datum och tid för pulsen och mätaren töms. Ju fler registrerade pulser per minut, desto högre intensitet. Radarupplösningen kan emellertid registrera intensiteter t o m mindre än 0.01 mm/min. I Figur 3.7 illustreras att radarn får resultat av betydligt mindre regn (röd linje) än en stationär regnmätare (blå staplar). Detta visas tydligt under inledningen av ett mindre nederbördstillfälle vid Lund Södra mätaren under 2018-08-27.



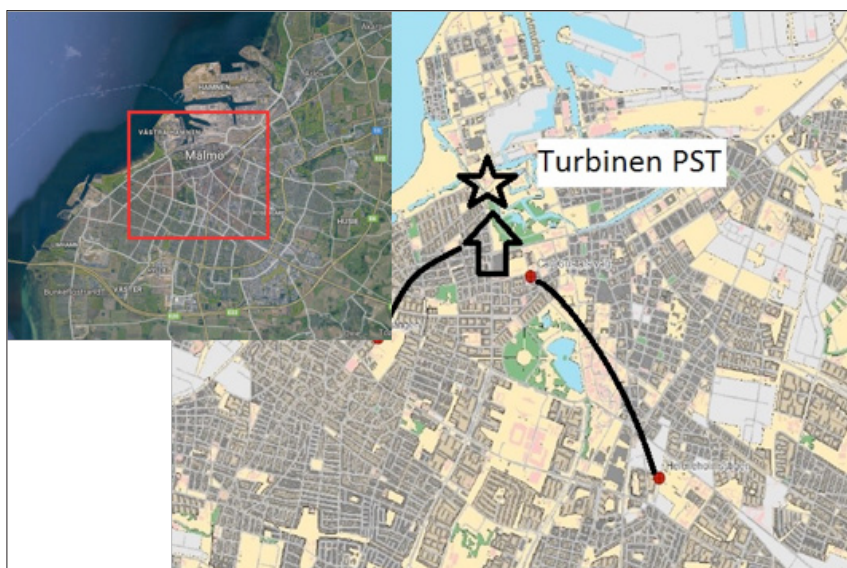
Figur 3.7 Exempel på registrering från radar respektive regnmätare (gauge) för mycket små nederbördsmängder (Lund Södra regnmätare).

3.2.2 VA SYDs flödesmätare

Sedan juli 2017 har VA SYD tre mätplatser för flödesmätning, samtliga på grövre självfallsledningarna inom Turbinens avrinningsområde i centrala delen av Malmö som sedan går vidare till Sjölanda ARV, i rördimensioner från 600 mm till 2 000 mm. Idag sitter de sju mätarna på dessa tre ställen i Malmö: Carl Gustavs väg, Gyllebogången och Heleneholmsstigen som visas översiktligt inklusive flödesriktning i Figur 3.8.

Varje mätpunkt mäter och registrerar flöde, flödeshastighet, nivå och temperatur en gång i minuten online i VA SYDs övervakningssystem och lagras i VA SYDs dataarkiv.

Efter att ha undersökt flödes- och nivådata på mätplatserna syns en tydlig en förhöjd nivå- och flödestopp kring regntillfällena den 10:e augusti och 13:e augusti samt även vid ett par mindre flödestopp kring 27:e augusti och 30:e augusti. Av dessa regntillfällen har regnet den 10:e augusti valts att studera närmare i kapitel 3.3.1.



Figur 3.8 Placering av de permanenta flödesmätarstationerna i Malmö (röda cirklar), generell flödesriktning på avloppsvattnet och plats för Turbinens pumpstation.

3.2.3 VA SYDs bräddmätare

VA SYD har bräddmätning på fyra platser: vid Turbinens pumpstation i centrala Malmö i Sjölundas avloppsområde, vid bräddluckan på Strandgatan i stadsdelen Limhamn i Malmö som är i Klagshamns avloppsområde, i Dalby och i centrala Lund.

Bräddmätningstationerna en nivågivare och kommunikationsenhet som skickar data till antingen VA SYDs övervakningssystem Uniview eller via en extern kommunikationsenhet Vealogg från Norconsult. I programmen finns det inbyggt en uträkningsformel som beräknar bräddvolym. I denna rapport har två exempel tagits upp från Strandgatan i Malmö och från Dalby i Lunds kommun. Mer information om mätresultaten finns i kapitel 3.4.2.

3.3 Jämförelse radar - VA SYDs mätinfrastruktur

I detta avsnitt jämförs data från projektets radar med annan mätdata som VA SYD tillgår: regnmätare, SMHI:s radardata samt bräddmätning. Detta för att bland annat visualisera de olika typerna av data och skapa ett underlag för diskussion om framtida möjligheter och hur radaranläggningen kan förbättras. De radardata som visas är från nivå 2; den näst lägsta höjdvinkeln (se avsnitt 2.3 Allmänna förutsättningar).

Under testperioden sommaren 2018 har nederbördstillfällen från följande dagar valts att studera av olika skäl:

- 10:e augusti – ett kraftigt men kortvarigt skyfall. Pedagogiskt exempel på regnets inverkan med avseende på dämning av nivån i avloppssystemet.
- 11:e augusti – ett lokalt skyfall över Trelleborg som visar på kraftiga lokala variationer i nederbördsintensitet. Radarn erbjuder nya möjligheter att se dessa lokala variationer med sin areellt heltäckande räckvidd.

- 13:e augusti – ett långvarigt regn med korta, intensiva toppar som gav upphov till bräddningar i systemet i Dalby exempelvis.
- 27:e augusti – en regnskur som tagits med för att jämföra erhållen data från radarn och regnmätaren.
- 30:e augusti – en pedagogisk bild som visar på radarns räckvidd och bekräftelse på att radarbilden inte störs av närliggande bebyggelse.

3.3.1 Jämförelse mellan regnmätare och radardata med avseende på regnintensitet, mängd och varaktighet

Under testperioden har väderradarar inte kalibrerats eftersom anläggningen endast skulle vara igång under två månader. Därför visar radarn okalibrerade resultat, testperioden blir därför mer ett sätt att visa på teknikens möjligheter t.ex. med den kompletta nederbördsbilden och räckvidden till havs för framtida varningssystem. En framtida, permanent radaranläggning kommer att kalibreras under anläggningens första månader som ett första steg för att kunna visa korrekt uppmätt nederbördsdata. Utöver detta kommer anläggningen att kalibreras kontinuerligt och jämföras mot stationära regnmätare.

I detta avsnitt jämförs väderradar- och regnmätardata från fyra nederbörds-händelser i augusti. Tre av händelserna (10, 12 respektive 27 augusti) anges för Malmö, Lund och Eslöv och en händelse (11 augusti) för Trelleborg. Händelserna skiljer sig åt med avseende på intensitet, varaktighet och spatial utbredning.

I Eslöv och Trelleborg används radardata från den gridcell (500 x 500 m) som regnmätaren befinner sig i, medan det för Malmö och Lund används en cell norr respektive väster om mätarens placering. Detta eftersom de aktuella mätarna i Lund och Malmö befinner sig i områden med radarbrus (störningar) där de aktuella gridcellerna inte ger en tillförlitlig bild. Därmed är det ett relativt kort avstånd mellan radarbilden och regnmätarna för Lund respektive Malmö tätort (<1 km) för att ge ett resultat utan radarbrus. Däremot ska det nämnas att detta avstånd ändå kan skapa en tidsfördröjning i figurerna som presenteras nedan.

Jämförelsen av regnhändelserna i avsnittet redovisas i tabellform med beräknad total nederbördsmängd och varaktighet för både regnmätardata och radardata och den beräknade skillnaden mellan dataseten. Utöver detta redovisas resultaten som Figurer med beräknad intensitet över tid från regnmätardata respektive radardata.

Händelse 1, 2018-08-10 – Försvagad radarstråle

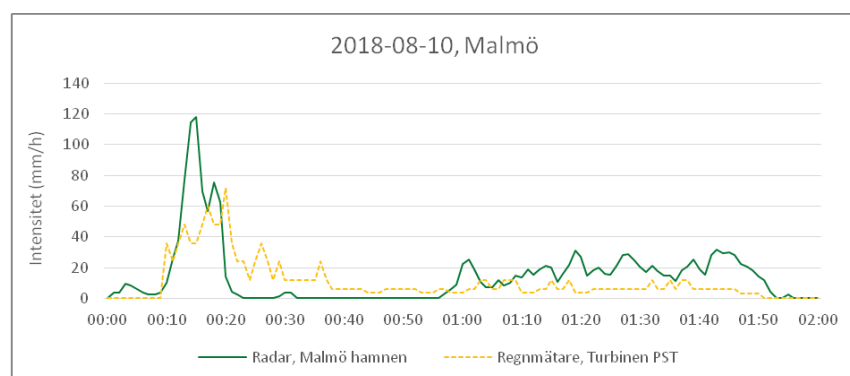
– regn som använts för analys av varningssystem i kapitel 5.1

Den 10 augusti 2018 drog ett kraftigt nederbördsområde in västerifrån över sydvästra Skåne. Total nederbördsmängd och varaktighet som uppmätts av regnmätare respektive radar i Malmö, Lund och Eslöv redovisas i Tabell 3.3, liksom skillnaderna mellan vad som uppmätts av dessa. Nedan redovisas även de uppmätta nederbördsintensiteterna på de olika platserna (Figur 3.9, Figur 3.10 och Figur 3.11). En bildserie med radarns ögonblicksbilder var 15:e minut kl. 00.00–02.15 visas i Figur 3.12. I Figurerna

framgår det att radarstrålen försvagas kraftigt under ett antal minuter efter midnatt, då ingen nederbörd registreras. Denna händelse diskuteras vidare i avsnitt 4.1 nedan.

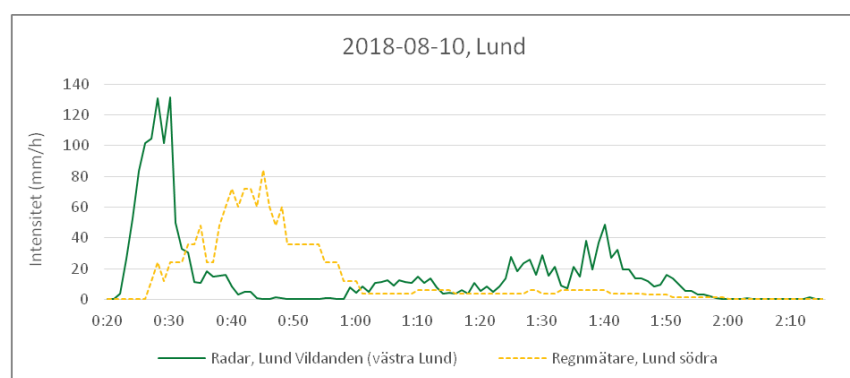
Tabell 3.3 Uppmätt total nederbördsmängd och varaktighet för regnhändelse 2018-08-10, av regnmätare respektive radar, på tre olika platser (centrala Malmö, södra Lund och Eslöv).

Plats	Total nederbördsmängd (mm)		Differens (mm) [Radar] - [regnmätare]	Varaktighet (tt:mm)		Differens (tt:mm) [Radar] - [Regnmätare]
	Regnmätare	Radar		Regnmätare	Radar	
Centrala Malmö	21,4	29	+ 7,6	01.39	01.54	+ 00.15
Lund	25,8	29,6	+ 3,8	01.32	01.51	+ 00.19
Eslöv	16,2	17,9	+ 1,7	01.16	01.38	+ 00.22



Figur 3.9 Uppmätt nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över centrala Malmö, 2018-08-10.

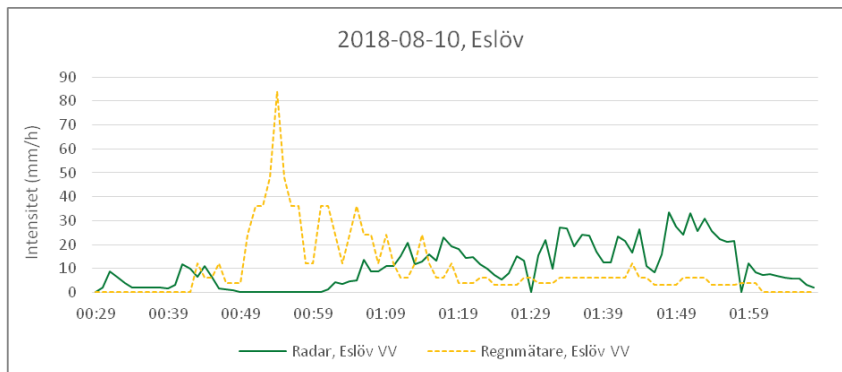
Som kan utläsas ur Figur 3.9 överensstämmer radarns respektive regnmätarens start- och sluttid för händelsen över Malmö någorlunda. Radarn uppmäter dock konsekvent en högre intensitet under större delen av regnfallet, förutom under en dryg halvtimme mellan 00.20 och 00.56 då radarn i princip inte registrerar någon nederbörd alls.



Figur 3.10 Beräknad nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Lund, 2018-08-10.

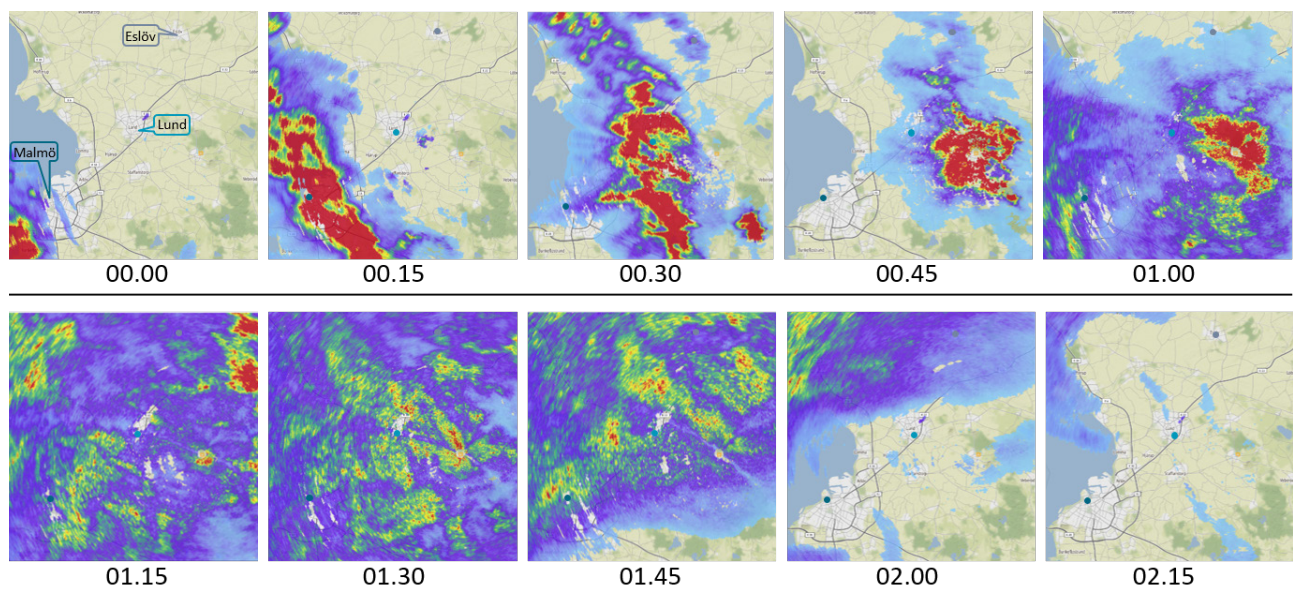
I Figur 3.10 syns ett liknande mönster över Lund, vad gäller den beräknade intensiteten. Den är i princip konsekvent högre i radarns mätningar än mätningar från regnmätaren. Den inledande, plötsliga, nederbördstop-

pen registreras några minuter tidigare av radarn jämfört med regnmätaren. Detta skulle kunna bero på lokala skillnader i nederbördsområdet – uppmätt radardata registreras inte för den gridcell som regnmätaren befinner sig i. Precis som över Malmö noterar radarn ingen eller en mindre mängd nederbörd under drygt 20 minuter.



Figur 3.11 Uppmätt nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Eslöv, 2018-08-10.

Ur Figur 3.11 framgår att den mest intensiva delen av regnhändelsen inträffade i Eslöv under de cirka tio minuterna då radarn inte uppmätte någon nederbörd. Under den senare delen av händelsen syns ett likande mönster som över Malmö och Lund, med konsekvent högre intensitet i radardata jämfört med regnmätardata.

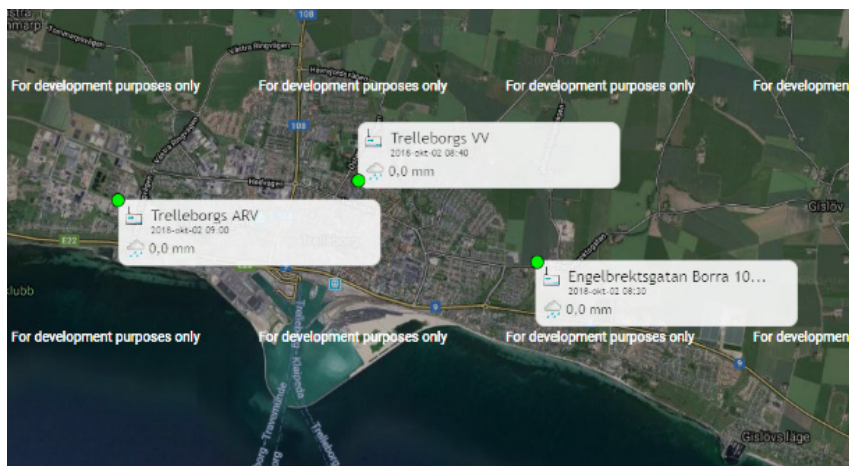


Figur 3.12 Bildserie över nederbördsområdet den 10:e augusti 2018.

I bildserien i Figur 3.12 ser det ut som att området kl. 00.45 är starkt koncentrerat runt själva radarn i Dalby, medan data från regnmätarna i Figur 3.9, Figur 3.10 och Figur 3.11 visar att nederbörden fortsätter eller till och med ökar i intensitet. Det här beteendet i radarbilden diskuteras i avsnitt 4.1.

Händelse 2, 2018-08-11 – Lokalt kraftigt regn över Trelleborg

Trelleborgs kommun delade med sig av nederbördsdata från sina mätstationer, vilket gjorde det möjligt att jämföra regnhändelser under projekt-tiden även där. Den 11 augusti drog ett kraftigt regnväder in över Trelleborgs stad under eftermiddagen. Det varade i ca 40 minuter, regnvädet hade stora lokala variationer inom staden och uppfyllde SMHI:s definition av skyfall med minst 1 mm regn under en minut (smhi.se). Figur 3.14 och 15 visar den uppmätta nederbördsintensiteten vid tre mätstationer i Trelleborg, med ca 2–3 km avstånd mellan varandra (se Figur 3.13). Tabell 3.4 redovisar uppmätt nederbördsmängd och varaktighet för de tre platserna i Trelleborg.

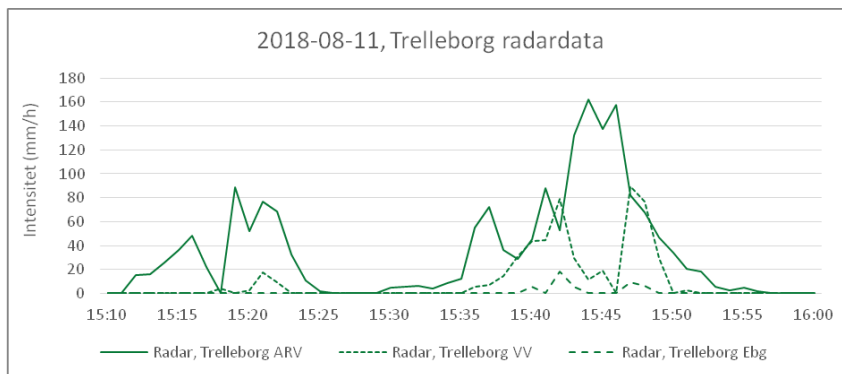


Figur 3.13 Geografisk placering av de tre regnmätarna i Trelleborg.

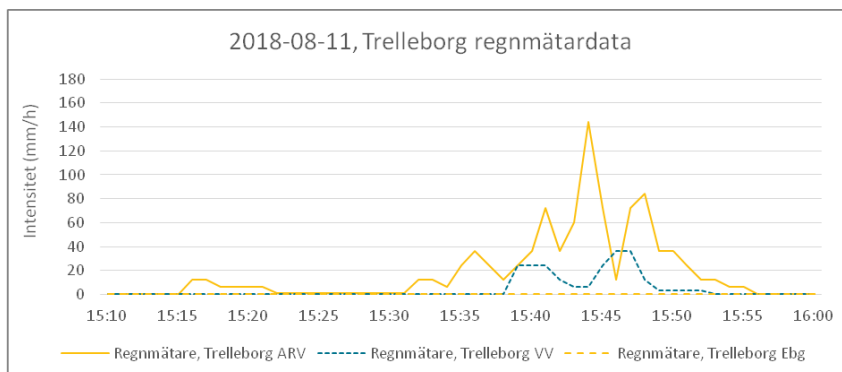
Tabell 3.4 Uppmätt total nederbördsmängd och varaktighet för regnhändelse under eftermiddagen 2018-08-11, av regnmätare respektive radar, på tre olika platser i Trelleborg.

Plats	Total nederbördsmängd (mm)		Differens (mm) [Radar]- [Regnmätare]	Varaktighet (tt:mm)		Differens (tt:mm) [Radar]- [Regnmätare]
	Regnmätare	Radar		Regnmätare	Radar	
Trelleborg ARV	15,6	30,9	+ 15,3	00.39	00.44	+ 00.05
Trelleborg VV	3,6	7,0	+ 3,4	00.14	00.15	+ 00.01
Trelleborg Ebg	0	1,6	+ 1,6	-	00.08	+ 00.08

De tre regnmätarna uppmätte tydligt olika nederbördsmängder under det korta skyfallet, och även radarn uppfattade dessa olika lokala skillnader. Den totala nederbördsmängden utifrån radardata beräknades dock till ungefär det dubbla gentemot regnmätarna. Figur 3.2 visar nederbördsintensiteten med radardata och Figur 3.3 visar nederbördsintensiteten med regnmätardata, vid de tre olika mätstationerna. För att enklare kunna jämföra regnen har x- och y-axlarna samma skala i de båda figurerna. Radardata hämtades för den gridcell i vilken den aktuella regnmätaren är placerad.



Figur 3.14 Uppmätt nederbörsintensitet från radardata över tre punkter i Trelleborg, 2018-08-11.

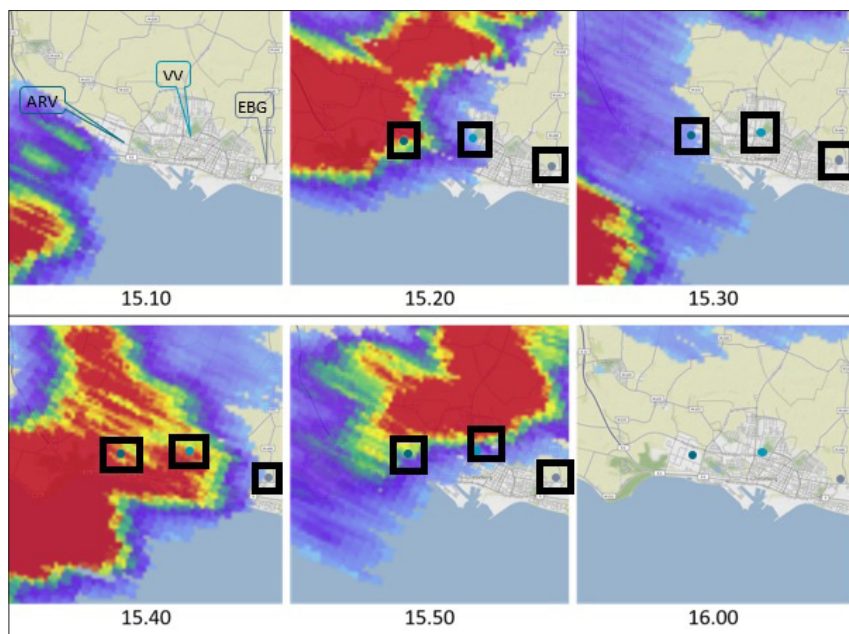


Figur 3.15 Beräknad nederbörsintensitet från tre regnmätare i Trelleborg, 2018-08-11.

I Figur 3.14 och Figur 3.15 framgår dels regnhändelsens stora lokala variation både i intensitet och total nederbörds mängd. Intensiteten uppmätt utifrån radardata är konsekvent högre än intensiteten som uppmätts utifrån regnmätardata.

Vid Trelleborg ARV (den västligaste stationen) uppmättes mycket kraftiga regnmängder, vid Trelleborg VV betydligt mindre och vid Trelleborg Engelbrekts gatan registrerades ingen nederbörd alls (den östligaste stationen). Regnmätaren vid Trelleborg ARV uppmätte 14,6 mm av totalt 15,6 mm mellan 15.30–15.55. Radarn registrerade dubbel nederbörds mängd under ungefär samma tidsintervall. Även vid Trelleborg VV noterar radarn dubbel nederbörds mängd under ungefär samma tidsspänn som regnmätaren. Vid Trelleborg Engelbrekts gatan uppmätte radarn 1,6 mm under åtta minuter medan ingen nederbörd registrerades alls i regnmätaren.

Figur 3.16 ger en indikation på hur regnvädrret rörde sig in över Trelleborg, där både geografisk utbredning och tidpunkter överlag stämmer med det som uppmättes i regnmätarna (markerade i bilden). Regnet var som synes kraftigt, lokalt och kortvarigt.



Figur 3.16 Bildserie över regnväddret under eftermiddagen i Trelleborg, 2018-08-11. Ungefärlig placering av regnmätarna är markerade med prickar.

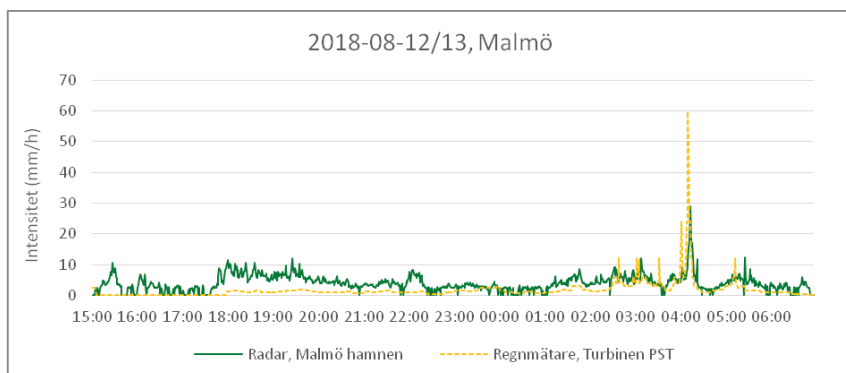
Händelse 3, 2018-08-12 – Långvarigt, lågintensivt regnområde

Under drygt ett halvt dygn, med start under eftermiddag/kväll den 12 augusti befann sig ett lågintensivt regnområde över sydvästra Skåne. Tabell 3.5 visar ackumulerad nederbörds mängd, händelsens varaktighet samt skillnaden mellan regnmätar- och radardata.

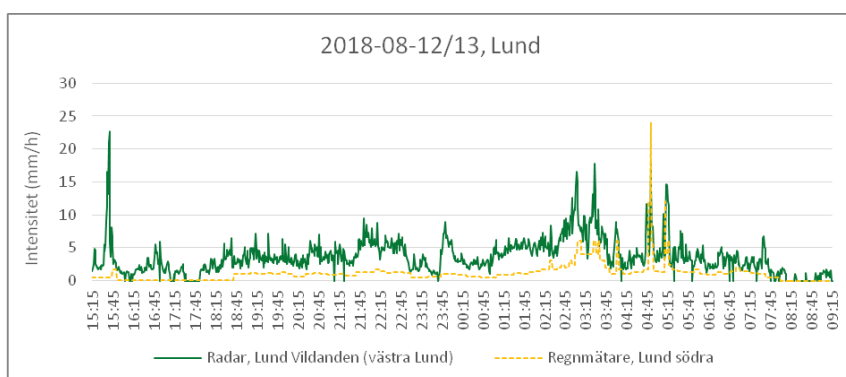
Tabell 3.5 Uppmätt total nederbörds mängd och varaktighet för regnhändelse under kvällen och natten den 12–13 augusti 2018, av regnmätare respektive radar, i Malmö, Lund och Eslöv.

Plats	Total nederbörds mängd (mm/h)		Differens (mm) [Radar]- [Regnmätare]	Varaktighet (tt:mm)		Differens (tt:mm) [Radar]- [Regnmätare]
	Regnmätare	Radar		Regnmätare	Radar	
Centrala Malmö	27,2	63,3	+ 36,1	12.25	15.45	+ 03.20
Södra Lund	20	65,4	+ 45,4	13.17	17.58	+ 04.41
Eslöv	18,8	43,5	+ 24,7	14.04	14.15	+ 00.11

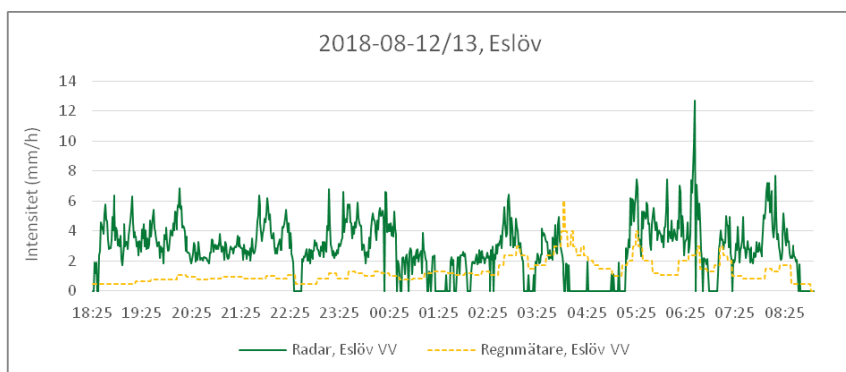
Ur Tabell 3.5 framgår det att radarn jämfört med regnmätarna noterar ungefär den tredubbla mängden nederbörd. I både Malmö och Lund har radarn uppmätt nederbörd under mer än tre respektive fyra timmar längre period än vad regnmätarna gjort. Ur Figur 3.17 och 3.18 syns det även att radarn här registrerar den första nederbörden i Malmö respektive Lund betydligt tidigare än vad som registreras av regnmätarna, ca tre timmar (ca 15,00 jämfört med ca 18,00–19,00). I Eslöv stämmer varaktigheten bättre överens mellan radarn och regnmätaren och av Figur 3.20 framgår att de noterade den första nederbörden vid ungefär samma tidpunkt. Dock uppfattade radarn ett svagt regn mellan kl. 15.30 och 16.00 även här, men det bedömdes inte vara sammanhängande med det efterföljande regnet eftersom tidsskillnaden mellan händelserna är mer än två timmer. Vid samtliga platser visar radarn en betydligt högre intensitet än regnmätarna.



Figur 3.17 Uppmätt nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Malmö, 2018-08-12-2018-08-13.



Figur 3.18 Beräknad nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Lund, 2018-08-12-2018-08-13.



Figur 3.19 Beräknad nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Eslöv, 2018-08-12-2018-08-13.

Över både Malmö och Lund (Figur 3.17 respektive Figur 3.18) registreras ett lågintensivt regn med en kulmen tidigt på morgonen den 13 augusti. Radarn visar högre värden än regnmätarna vad gäller intensitet, med undantag för intensitetstopparna på morgonen den 13 augusti. Då överensstämmer uppmätt intensiteten från radar och från regnmätare relativt väl, och de högsta topparna från regnmätaren överskrider till och med intensiteten från radardata.

Över Eslöv (Figur 3.19) noteras också något mer jämlika intensitetsvärden under natten/tidiga morgonen, men i övrigt ligger intensiteten utifrån radardata högre.

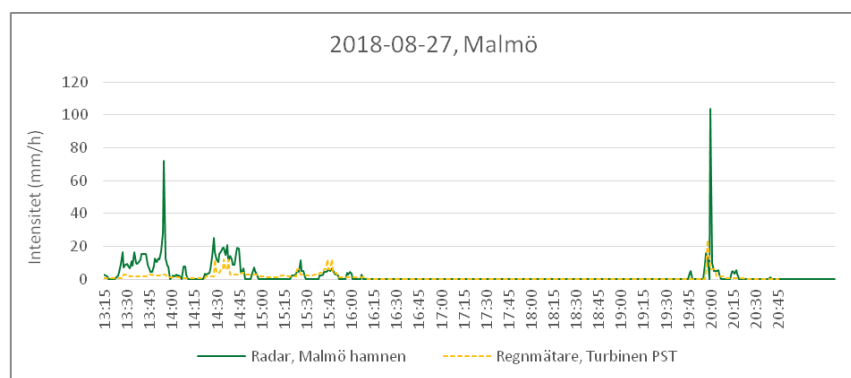
Händelse 4, 2018-08-27- skurar med varierande intensitet

Under eftermiddagen och kvällen den 27:e augusti 2018 passerade skurar över sydvästra Skåne. Det första området var mer långvarigt men mindre intensivt än det senare. Radarn visar högre värden än regnmätarna både vad gäller intensitet, total nederbördsmängd och varaktighet. Tabell 3.6 redovisar total nederbördsmängd, varaktighet samt skillnaden mellan vad som uppmätts av radar respektive regnmätare. Figur 3.20, Figur 3.21 och Figur 3.22 visar nederbördsintensiteten för de båda regnskurarna i Malmö, Lund respektive Eslöv.

Tabell 3.6 Uppmätt total nederbördsmängd och varaktighet för regnhändelser under eftermiddagen och kvällen den 27 augusti 2018, av regnmätare respektive radar, i Malmö, Lund och Eslöv.

	Total nederbördsmängd (mm/h)		Differens (mm)	Varaktighet (hh:mm)		Differens (hh:mm)
Plats	Regnmätare	Radar	[Radar]- [Regnmätare]	Regnmätare	Radar	[Radar]- [Regnmätare]
Skur 1						
Centrala Malmö	7,4	18,6	+ 11,2	02.43	02.52	+ 00.09
Södra Lund	5,4	19,7	+ 14,3	03.24	03.25	+ 00.01
Eslöv	5,8	18,6	+ 12,8	03.01	03.16	+ 00.15
Skur 2						
Centrala Malmö	1,4	4,6	+ 3,2	00.24	00.54	+ 00.30
Södra Lund	6	57,2	+ 51,2	01.46	01.57	+ 00.11
Eslöv	3	6,8	+ 3,8	01.11	01.31	+ 00.20

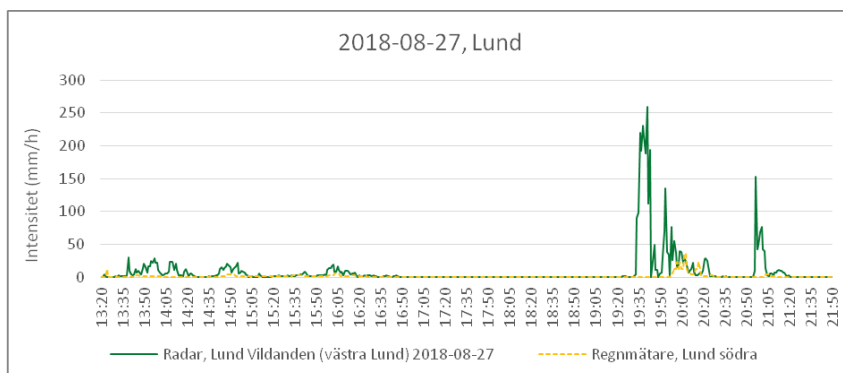
I de flesta fallen är det en faktor 2–4 i skillnad mellan radar och regnmätarens resultat, medan den för södra Lund noterar en nästan tio gånger så hög nederbörd som regnmätaren: 57,2 mm gentemot de 6 mm som regnmätaren noterat.



Figur 3.20 Beräknad nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Malmö, 2018-08-27.

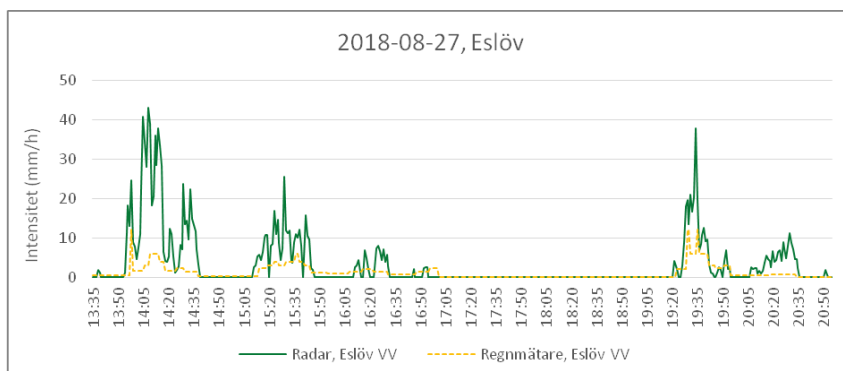
I Figur 3.20 syns det att tidpunkten för de flesta intensitetstopparna ser ut att korrelera någorlunda väl mellan de båda dataseten. Däremot är intensiteten i radardata är högre eller mycket högre än den i uppmätt

regnmätardata. Den första delen av nederbördshändelsen beräknad från radardata, kring 13.25–13.55, verkar i princip inte noteras av regnmätaren.



Figur 3.21 Beräknad nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Lund, 2018-08-27.

I Figur 3.21 syns det att den lågintensiva inledningen av skuren uppmätts som kraftigare utifrån radardata jämfört med regnmätardata. Topparna i intensiteten från radardata mellan 19.30 och 21.00 noteras i princip inte alls i regnmätarna. Det går dock inte att utesluta att skillnader kan förekomma på grund av avståndet mellan punkten för regnmätaren i sydöstra Lund och den gridcell i västra Lund där radardata hämtas.



Figur 3.22 Beräknad nederbördsintensitet från radar respektive regnmätare över Eslöv, 2018-08-27.

Mönstret i Figur 3.22 över Eslöv Vattenverk följer en liknande trend som den i Figur 3.21 över centrala Malmö. Intensitetstopparna registreras vid liknande tidpunkter i både radardata och regnmätardata, medan intensiteten beräknad utifrån radardata är flera gånger högre än den som beräknats utifrån regnmätardata.

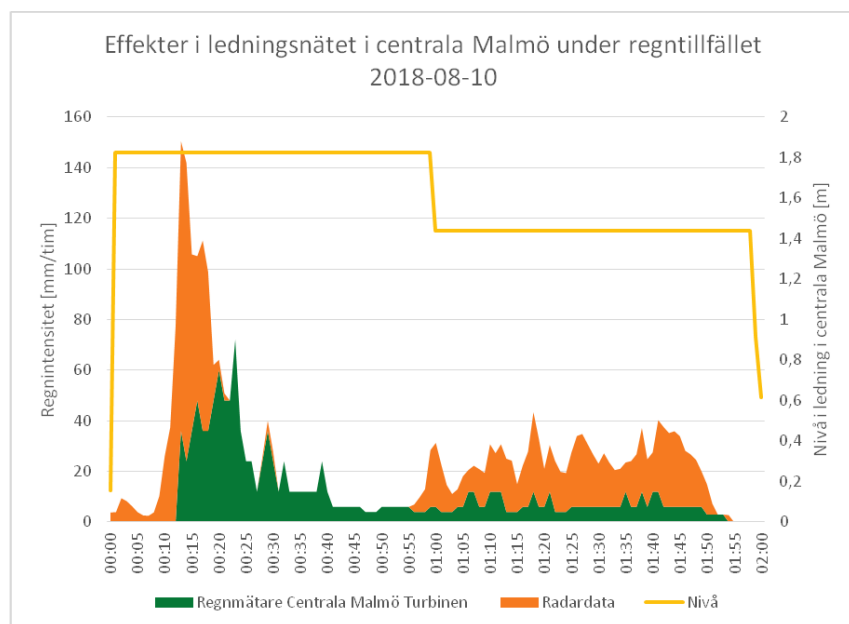
3.4 Effekter på ledningsnätet under regntillfällen augusti 2018

I detta kapitel har mätdata under regntillfällen från flödesmätare i centrala Malmö och bräddmätare i Dalby och centrala Malmö analyserats. Detta för att belysa de nivåförändringar i ledningsnätet som sker oerhört snabbt vid kraftiga regn och hur ledningsnätet bräddar vid olika regntillfällen.

3.4.1 Analys av flödesmätning i samband med regntillfället den 10:e augusti 2018

I Figur 3.4 visas ett tydligt exempel på nivåmönster från mätpunkten vid Carl Gustavs väg i centrala Malmö i Sjölunda ARV avloppsområde. Denna mätpunkt ligger i en av huvudavloppsledningarna i Malmö ger och överblick över det inkommande flödet till Turbinens pumpstation. Denna mätpunkt har valts att beskrivas närmare i rapporten för att visa regnets inverkan på nivån i ledningen.

Regnet den 10:e augusti var ett exempel på ett skyfall ($> 1 \text{ mm/min}$), dock endast under en kort tidsperiod på 10–15 minuter. Det fortsatte att regna fram till klockan 02.00 men med betydligt lägre intensitet. I Figur 3.4 visas hur nivån i den kombinerade avloppsledningen i centrala Malmö varierade över tid mellan 00.00 den 10:e augusti och 03.00 den 10:e augusti. Det visas tydligt på grafen hur nivån i ledningen stiger kraftigt vid midnatt under cirka 5–10 minuter och därefter kvarstår den höga nivån omkring 50 cm från hjässan av ledningen framtill 02.00 då nivån sänks igen. Det är en liten tidsskillnad mellan kurvorna beroende på att regnet börja falla i andra delar av avloppssystemet uppströms mätpunkten innan nederbördsområdet kom till platsen för regnmätaren och gridcellen för radarn, se Figur 3.23. Analysen har gjorts för att komma fram till vilka tidsmarginaler som finns för att framtida varningssystem. Detta studeras vidare i kapitel 5.1.

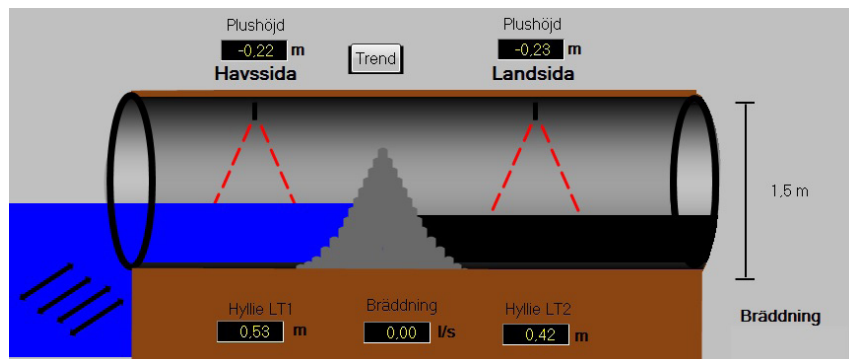


Figur 3.23 Nivåmätning i en kombinerad avloppsvattenledning i centrala Malmö mellan 00.00–02.00 den 10:e augusti 2018.

3.4.2 Analys av bräddningstillfällen vid regntillfällena den 10:e och 12–13:e augusti 2018

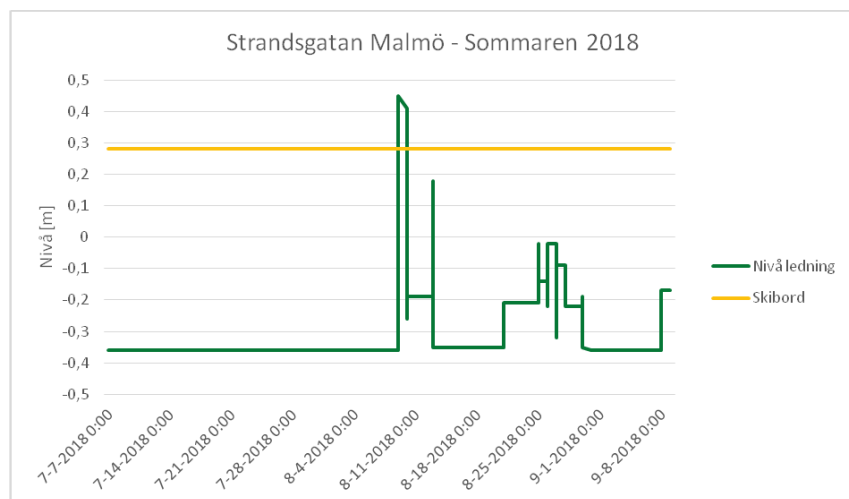
Under 2016 byggdes brädd- och dagvattenutloppet vid Strandgatan i Limhamn i Malmö i Klagshamns ARV avloppsområde. Brunnen är uppdelad i två delar och fungerar både som utlopp för dagvatten och som brädd-

utlopp när nivån i den kombinerade ledningen i Strandgatan blir alltför hög. I brunnen sitter även en fast ekolodsnivåmätare för att kunna studera nivåer i ledningen vid nederbörd. Mätdata från bräddbrunnen skickas till VA SYDs övervakningssystem Uniview där information kan hämtas ut. I Figur 3.24 visas en principskiss hur bräddmätningsstationen är uppbyggd.



Figur 3.24 Principskiss över bräddmätningsstationen i Limhamn/Malmö.

Skibordet bildar en barriär mot havet och har en övre kant på +0,28 m i RH-nivå, visat med den gula linjen i Figur 3.25. I Figur 3.26 summeras testperiodens bräddvattenmätning från 9:e juli till 10:e september 2018. Figuren visar att nivån i den närliggande kombinerade avloppsledningen har stigit markant natten mellan 9–10:e augusti 2018 och morgonen den 13:e augusti 2018. Den 10:e augusti översteg nivån i den kombinerade ledningen skibordsnivå, vilket har medfört att det har bräddat till Öresund.

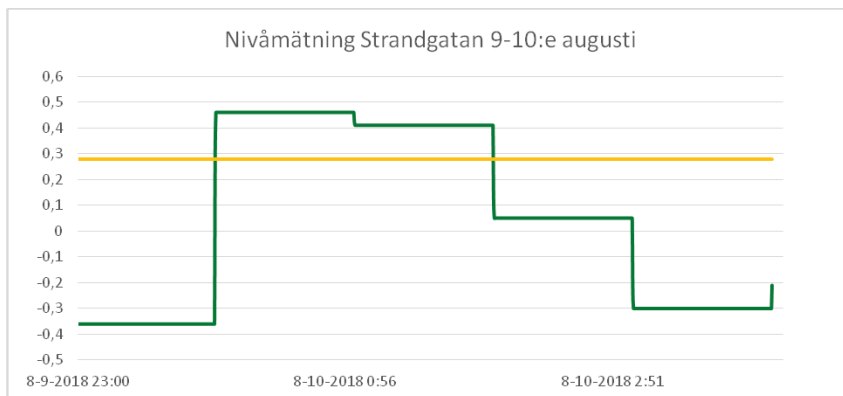


Figur 3.25 Nivåkurva från bräddmätningsstationen i Limhamn/Malmö under sommaren 2018 där grön linje visar uppmätt nivå i ledning och den gula linjen visar på vilken nivå skibordet i ledningen är installerad.

Analys av regntillfälle 2018-08-10 – Strandgatan Malmö

Mätdata visar att mellan midnatt och 02.00 den 10:e augusti stod nivån (grön linje i grafen) från ledningen i Limhamn i Klagshamns ARV avloppsområde högre än skibordet vilket gör att det i praktiken har brädd-

dat i två timmar, se Figur 3.26 som resultat och se en jämförelse med avseende på regnintensitet i Figur 3.28.

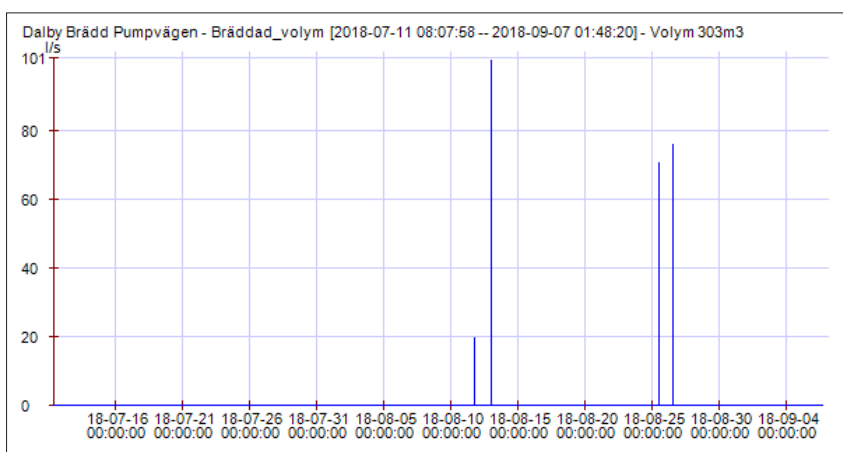


Figur 3.26 Nivåmätning från bräddmätningstationen i Limhamn/Malmö under skyfallet från den 9:e augusti kl. 23.00 till den 10:e augusti kl. 03.00. Den gröna linjen visar nivån i rikshöjdnivåsystemet under tidsperioden medan den gula linjen visar nivån på skibordet.

Analys av regntillfälle 2018-08-12-2018-08-13 – Dalby i Lunds kommun

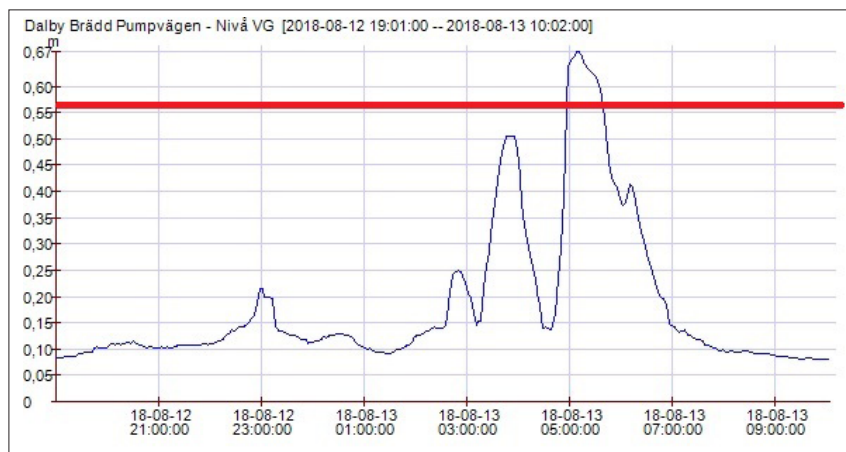
Ett annat intressant tillfälle som har analyserats i bräddningstillfället morgonen den 13:e augusti i bräddpunkten i Dalby. Detta tillfälle visar på hur markens vattenlagringsförmåga spelar stor betydelse vid regntillfällen om det kommer att brädda till recipient.

Bräddpunkten på Pumpvägen i Dalby i Lunds kommun i Källby ARV avloppsområde har nästintill enbart duplikat ledningsnät uppströms, undantaget ett litet område med omkring 20 fastigheter i västra Dalby som har kombinerat ledningsnät. Till skillnad från Strandgatan i Malmö har det inte bräddat vid regntillfället den 10:e augusti. Däremot bräddades det framförallt vid regnet den 13:e augusti och vid ett par tillfällen den 25:e och 26:e augusti, se resultat Figur 3.27.



Figur 3.27 Mätdata från bräddpunkten i Dalby. Resultaten visar på bräddtillfällen (x-axel) och flöde i l/s (y-axel). På den övre raden står den beräknade bräddvolymen. (© VeAinfo 2018)

Regntillfället den 12–13:e augusti har redogjorts för i kapitel 3.3.1 som visar både med radardata och nederbördsdata från regnmätare i området att regnet pågick under lång tid från eftermiddagen den 12:e augusti till morgonen den 13:e augusti. I den uppmätta nivådatan från bräddpunkten i Dalby skedde det en dämning med sin kulmen i två omgångar mellan 02.00–05.00 den 13:e augusti. Totalt bräddades 147 m³ vid detta regntillfälle där allt som överskred den röda linjen i Figur 3.28 bräddades till recipient.



Figur 3.28 Mätdata från bräddpunkten i Dalby. Resultaten visar på nivå (y-axel) under regntillfället den 12-13:e augusti, 2018. Den röda linjen visar den kritiska nivån på ledningen där spillvatten bräddas över till dagvattenledningen. (© VeAinfo 2018)

Enligt nederbördsdata från Dalbys regnmätare och radardata från zonen vid bräddpunkten erhålls nederbördsdata som summeras i Tabell 3.7.

Tabell 3.7 Nederbördsdata för Dalby den 10:e och 12-13:e augusti 2018, samt ackumulerad nederbörd under dagarna innan respektive regnhändelse.

Regntillfällen	Uppmätt nederbördsmängd - regnmätare [mm]	Uppmätt nederbördsmängd - radar [mm]	Nederbörd innan regntillfälle
10:e augusti	19,4	24,9	0,8 mm perioden 2-9/8
12-13:e augusti	21,2	38,3	27 mm perioden 10/8-12/8 kl. 19

Som visat i bland annat avsnitt 3.3.1. visar radarn en större nederbördsmängd än regnmätaren. De uppmätta regnmängderna är dock i ungefär samma storleksordning vid de två tillfällena, speciellt med avseende på data från regnmätaren.

Att det har bräddat den 12–13:e augusti och inte den 10:e augusti är väldigt intressant. Det kan dock antas vara stor skillnad på marken förmåga att lagra vatten eftersom det inte regnat dagarna innan den 10:e augusti, medan regntillfället den 12–13:e augusti föregicks av nederbörd. Detta betydde i praktiken att markens förmåga att lagra mer vatten var begränsad inför regnet den 12–13:e till skillnad från den 10:e augusti.

Därmed är det ett troligt antagande att bräddningen vid regntillfället den 12–13:e augusti berodde på inläckage från marken till spillvattenledningen. Detta bakgrundsflöde i kombination med kulmen på regntillfället gjorde att nivån i ledningen steg för mycket och att det till slut bräddade över till recipient. Därför är fukthalt i marken något som är av betydelse för en framtida styrning av ledningsnätet.

Sommaren 2018 var historiskt torr med få nederbördstillfällen. När det väl regnade var det oftast i form av kraftiga, korta och ibland lokala skurar. I princip alla skadeanmälningar till VA SYD inträffade i samband med regntillfället den 10:e augusti. Då anmälde sex fastigheter i Malmö stad och fyra fastigheter i Genarp och Södra Sandby i Lunds kommun att de hade fått källaröversvämningar.

Baserat på tidsangivelser från kunder vid detta regntillfälle samt mätdata från regn- och flödesmätare har det möjliggjorts att beräkna i efterhand hur lång tid i förväg väderradar kunde se skyfallsmoln. Analysen har kunnat fastställa vilken tidsmarginal det blir mellan första signalen för skyfall på väg in över radarns räckvidd och när nederbörden börjar orsaka skador ute bland kunderna. För mer detaljerad analys om varningssystemet se kapitel 4.

3.5 Extern utredning av VA SYDs mätungsverksamhet

För att få en extern syn i detta projekt har Tomas Wolf från Sweco gjort en utredning i form av ett PM där han har undersökt mätinfrastrukturen inom VA SYD och hur dessa kan integreras med en framtida väderradar. I PM:et som har lagts in i detta kapitel ges en summering av de rekommendationer som Tomas gav VA SYD exempelvis på vilka förutsättningar som krävs av befintlig mätutrustning samt även förslag på pilottester inom VA SYD för framtida arbete.

Enligt PM Sweco (2018) samt även Thorndahl et. Al (2017) delas uppfattningen att det krävs mätverktyg med hög upplösning för användning av mätning i urbana miljöer. Som skrivs i PM:et, *”Upplösning påverkar användningen, ju större avrinningsområde desto mindre behov av högupplöst data. Karaktär av avrinningsområdet är viktig, hög upplösning är bra vid simulering av peak runoff, lägre vid simulering av stora avrinningsområde eller större reservoar. För högintensivt åskväder med liten utbredning är högre upplösning nödvändig med att observera långvarigt frontsystem. Därför ska väderradar som används i urbana miljöer ha en hög upplösning.”*

Vidare i PM:et sammanfattas rekommendationer från svenska och internationella riktlinjer samt råd från konsultens egna erfarenheter. Framför allt betonas vikten av en stationär regnmätarverksamhet som ger nederbördsdata av god kvalitet och följande rekommendationer ges:

- Det är nödvändigt att justera data från väderradar mot stationära regnmätare som är kalibrerade och visar både rätt summa nederbörd och korrekt nederbördsintensitet.
- Biasjustering med Mean Field Bias (MBF) baseras på kvot mellan ackumulerat regn i regnmätare och i motsvarande radarpunkter/-celler. Hela



Figur 3.28
Regnmätare där bristande underhåll
lett till att mätaren har satts igen.

radarfältet multipliceras med MBF-faktor som baseras på tidsintegral där fördelning och storlek av droppar (DSD) är konstant. Det är vanligt med timvis justering.

- Regnmätarnas placering är viktig. 1 mätare/10–20km² i urbana områden för användning och design av dagvattensystem. WMO (2008)

PM:et summerar: *"Sammanfattningsvis innebär detta att radarn inte kan leverera korrekta data utan att ständigt kalibreras mot stationära regnmätare på marknivå. Dessa måste vara online uppkopplade och väderradarns system ska kunna automatiskt hämta regndata och kalibrerajusterat resultat efter dessa data. Kalibreringsprocess ska ske automatiskt och ska vara driftsäker."*

Utöver detta betonas att det kvarstår en del arbete för att kunna nyttja radarn i framtiden för att skapa ett framtida varningssystem. Följande rekommendationer ges:

- Om VA SYD och andra samarbetspartners fortsätter med Infometrics och bestämmer sig för att köpa väderradar, måste både *mätning och databehandling förfinas*. Där ingår att testa andra inställningar, höjd-vinklar, förbättra filtrering av falska ekon, utesluta områden med felaktiga data, jämföra data med satellitbilder.
- *Dataöverföring och tillhörande beräkningar måste fungera felfritt*. Under försöksdriften fanns det ibland inga data i tidserien för en punkt trots att radarbilden visade på regn. Det fanns ganska stora skillnader i summa regn över en punkt om man jämför radardata med data från regnmätare för ett regn.
- *Befintliga regnmätare ska kvalitetssäkras*. Fysiska installationer ska ses över och förbättras vid behov, se Figur 3.28 som ett exempel på hur viktigt det är att underhålla regnmätare kontinuerligt.
- Det föreslås att installera en *enkel webbkamera ovanpå varje regnmätare* så att man kan kontrollera regnmätarens funktionalitet (igensatt/funktionell) och även att visuellt bekräfta om det förekommer nederbörd i punkten.
- *Alla regnmätare ska kopplas i ett online system*, förslagsvis till ett befintligt övervakningssystem. Den tekniska lösningen avgörs inte av kompatibilitetskrav, dvs. befintliga PLC och regnmätare utan regnmätare ska ha ett eget rådatauppsamlingssystem som är oberoende av andra VA SYDs-system samt har egen strömförsörjning och batteribackup. Systemet ska fungera felfritt även vid skyfall, storm och stora strömbrott. Nya regnmätare kopplas direkt online.
- Utöka antal regnmätare inom VA SYDs verksamhetsområde så att det finns *en regnmätare i varje ort där det finns avloppsledningsnät* och där det finns problem med källaröversvämningar eller översvämningar orsakade av ytvattenavrinning. I urbana miljöer ska antalet regnmätare ökas så att det uppfylls 1 mätare per 10–20km² samtidigt som betydelsefulla avrinningsområde täcks med regnmätning. Placering av nya regnmätare är säkrast inom VA SYDs egna anläggningar gärna på avloppsrenings- och dricksvattenproduktionsanläggningar då det finns personal på plats som kan underhålla regnmätarna.

- Tidsserier innehållande *nivå i berörda pumpstationer omräknad till RH 2000 höjdsystem* ska sparas i databasen. Ett tröskelvärde för varje pumpstation bestäms och meddelas varningssystemet. Systemet varnar driften om denna nivå beräknas att uppnås och när. Det kan vara bräddnivå eller lägsta källarnivå uppströms pumpstationen.
- Nivån och uppfyllnadsgrad i berörda fördröjningsmagasin för dagvatten och avloppsvatten mäts för att kunna styra deras användning baserat på radardata.
- Driften av fasta mätpunkter på avloppsnätet i Malmö ska kvalitetssäkras och antal av dessa punkter ska öka tills man övervakar flödet och nivå i alla strategiska punkter på avloppsnätet
- Fasta mätpunkter i Lunds avloppsnät ska upprättas för att ge kunskap om avloppssystemet så att åtgärder kan sättas in, ger möjlighet att följa upp åtgärder mot tillskottsvatten och övervakar ledningsnätet i Lund. Mätkampanjen från sommaren 2018 används för att bestämma lämpliga fasta mätpunkter.
- Kalibrerade hydrauliska modeller över avrinningsområden som har problem med källaröversvämningar eller som är strategiskt viktiga för avloppsnätets funktion ska kunna beräkna i realtid vilka flöden och nivåer man kan förvänta sig inom närmaste timmarna.

Slutligen föreslog i PM:et några testplatser inom VA SYDs ledningsnät i Malmö och Lund där det finns lämpliga pumpstationer och magasin där väderstyrning av ledningsnät skulle kunna vara aktuell. Dessa platser beskrivs i korthet i kapitel 5.3.

4 Analys av mätdata från väderradarn

4.1 Jämförelse mellan regnmätare och radardata med avseende på ackumulerad nederbördsmängd

Radar visar ögonblicklig regnintensitet med hjälp av reflektion av radarstrålen, medan regnmätare visar ackumulerat regn under ett tidsintervall eller tills en minimal regnintensitet har nåtts. Data från regnmätare behövs för att kalibrera och validera radardata och i detta avsnitt redovisas och jämförs nederbörd registrerad av radar på olika skannivåer med nederbörd registrerad i regnmätare. Radarn kan registrera mindre vattenvolymer än regnmätarna. Det är dock inte säkert att denna lilla volym verkligen kommer att nå marknivå. Mer information om regnmätarna beskrivs i avsnitt 3.1.

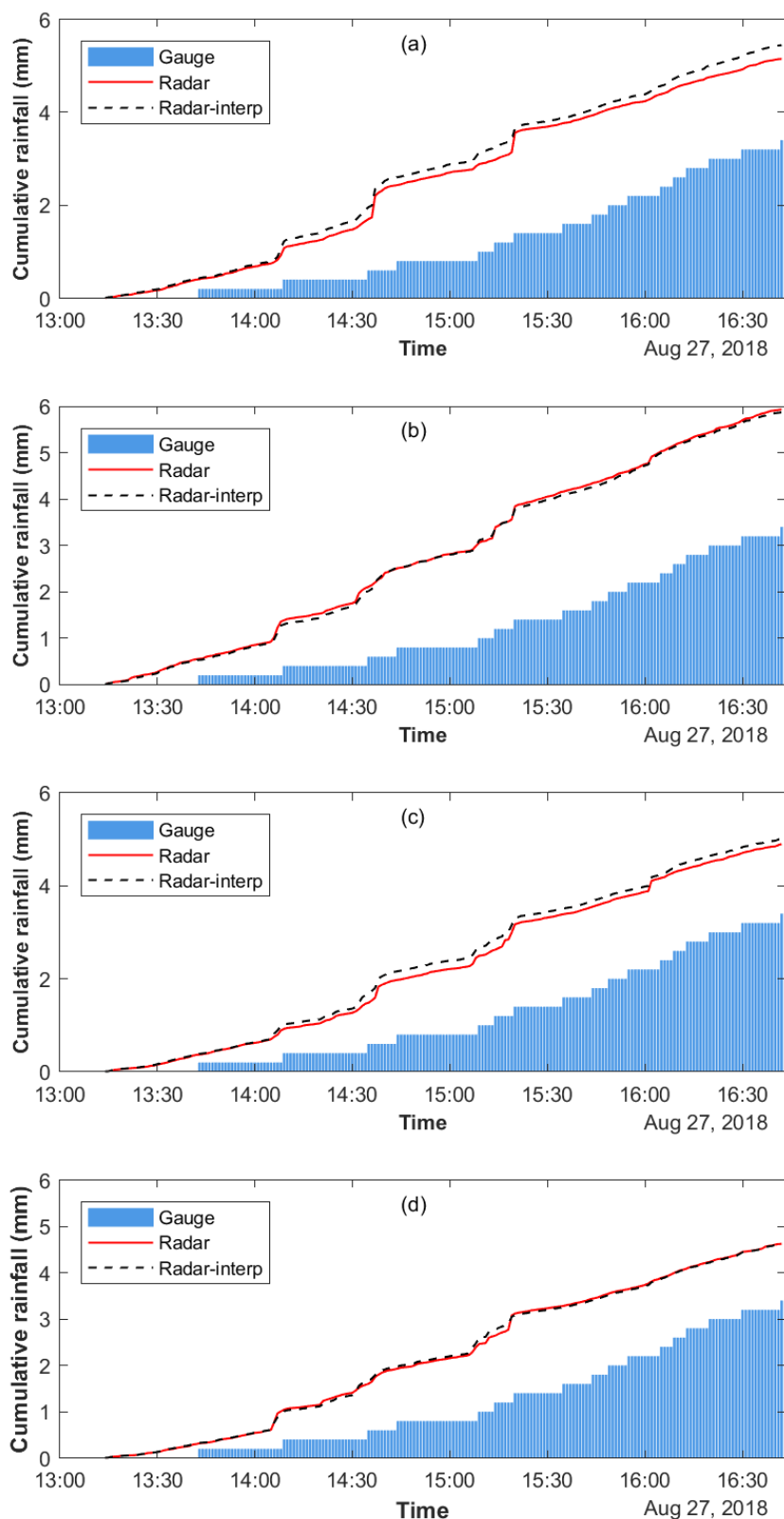
Figur 4.1–Figur 4.8 visar exempel på jämförelser mellan regnmätare och radarobservationer för olika skannivåer. Figurerna visar ackumulerat regn för två nederbördshändelser med olika längd för 10:e augusti 2018 visas i Figur 4.5–4.8 och 27:e augusti 2018 visas i Figur 4.1–4.4, med fyra regnmätare placerade på 1, 10, 19, och 30 km avstånd från radarn (Dalby, Lund Södra, Arlöv och Hammars Park). För validering av radar med hjälp av regnmätarobservationer är det fördelaktigt om brytpunkter för förändringar i regnintensitet överensstämmer någorlunda mellan radar och regnmätare. I detta fall kan kalibrering lättare göras.

Figur 4.1 visar att radarn generellt sett har god korrelation med regnmätaren i Dalby även om en överskattning görs för alla nivåer (Figur 4.1 a–d). Den generellt sett bästa skannivån verkar vara för nivå 4 med 1,2 mm överskattning (regnmätare 3,4 mm Figur 4.1 d). Figur 4.2 visar emellertid ett exempel på underskattning och ganska låg korrelation mellan radar och regnmätare. Skannivåer 1 och 2 (Figur 4.2 a och b) uppvisar bäst samband med ca 1,4 mm underskattning jämfört med Lund Södra regnmätaren. Figur 4.3 visar en liknande situation med en jämförelse mellan radar och regnmätaren i Arlöv. Resultaten är sämst för skannivå 4 (Figur 4.3 d). Sambandet är värre för regnmätaren i HammarsPark som ligger ännu längre bort (Figur 4.4). Figur 4.4 c och d uppvisar radarmätningar som inte ens gav utslag för skannivåer 3 och 4 efter en viss tid. Skannivåer 1 och 2 (Figur 4.4 a och b) kunde emellertid visa en bättre överensstämmelse mellan radar och regnmätare.

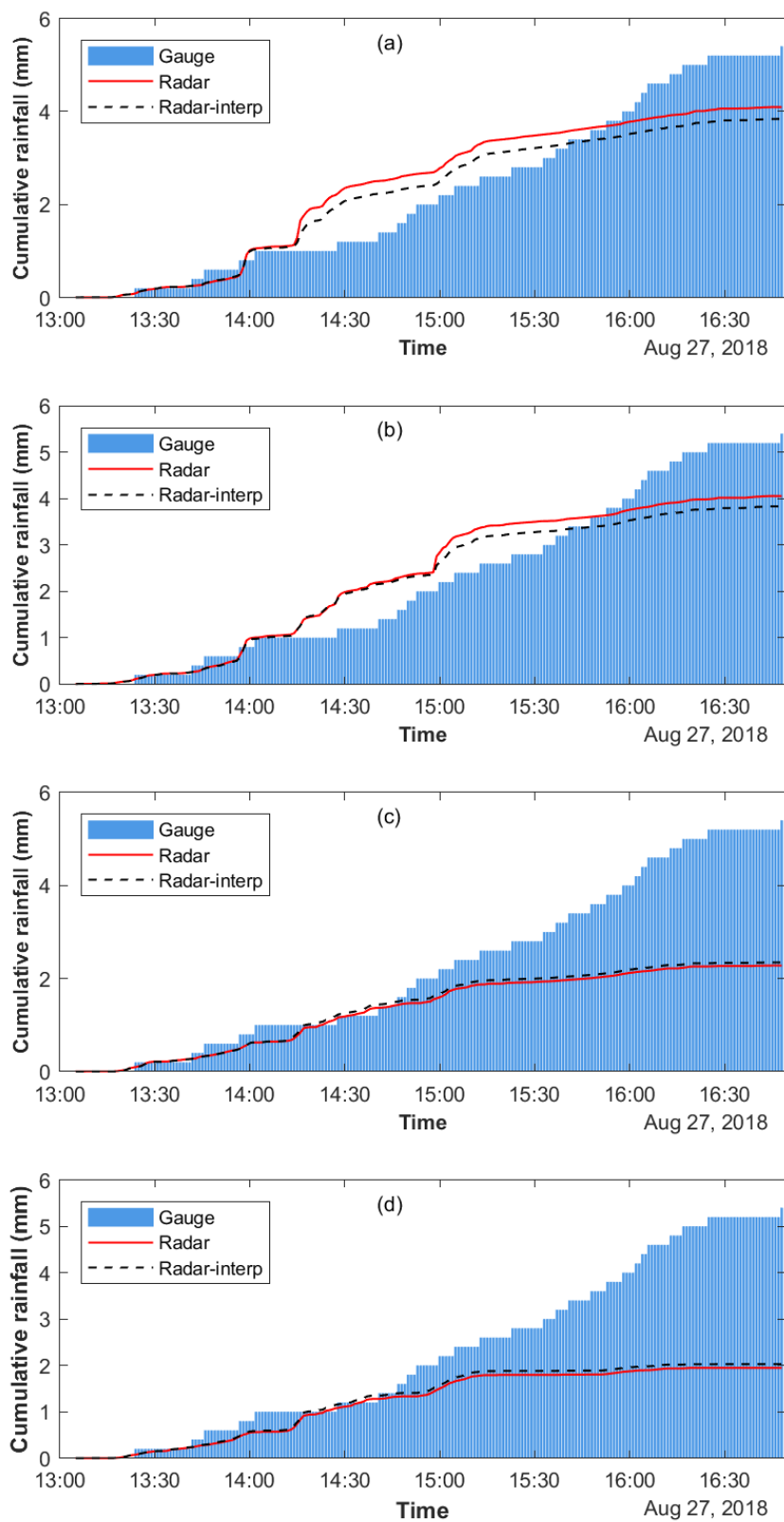
Resultat för den tidigare beskrivna intensiva nederbördshändelsen den 10:e augusti 2018 i Figur 4.6 och Figur 4.8, stödjer intrycket av att högre skannivåer (3 och 4) ger sämre resultat för långa avstånd. Tabell 2.2 visar att högre skannivåer snabbt ökar avståndet från radarn. Detta är förmodligen anledningen till sämre resultat för dessa p g a avdunstning och vindavdrift. Till exempel, uppvisades inget eller bara lite regn för nivå 4 för Hammars Park (Figur 4.4d och Figur 4.8d) medan nivå 1 och 2 indikerade regn. Tydligtvis innebär nivå 3 och 4 att radarsignalen hamnar ovanför de molnbildande processerna för vissa tillfällen. Medelhöjden för radarreflektio-

nen vid nivå 3 och 4 och Hammars Park är 4–5 km medan motsvarande värden för nivå 1 och 2 är 1–2 km (Tabell 2.2). Den schematiska bilden i Figur 4.9 illustrerar hur regn från ett moln på en höjd av 2,7 km kan behandlas med olika skannivåer och avstånd.

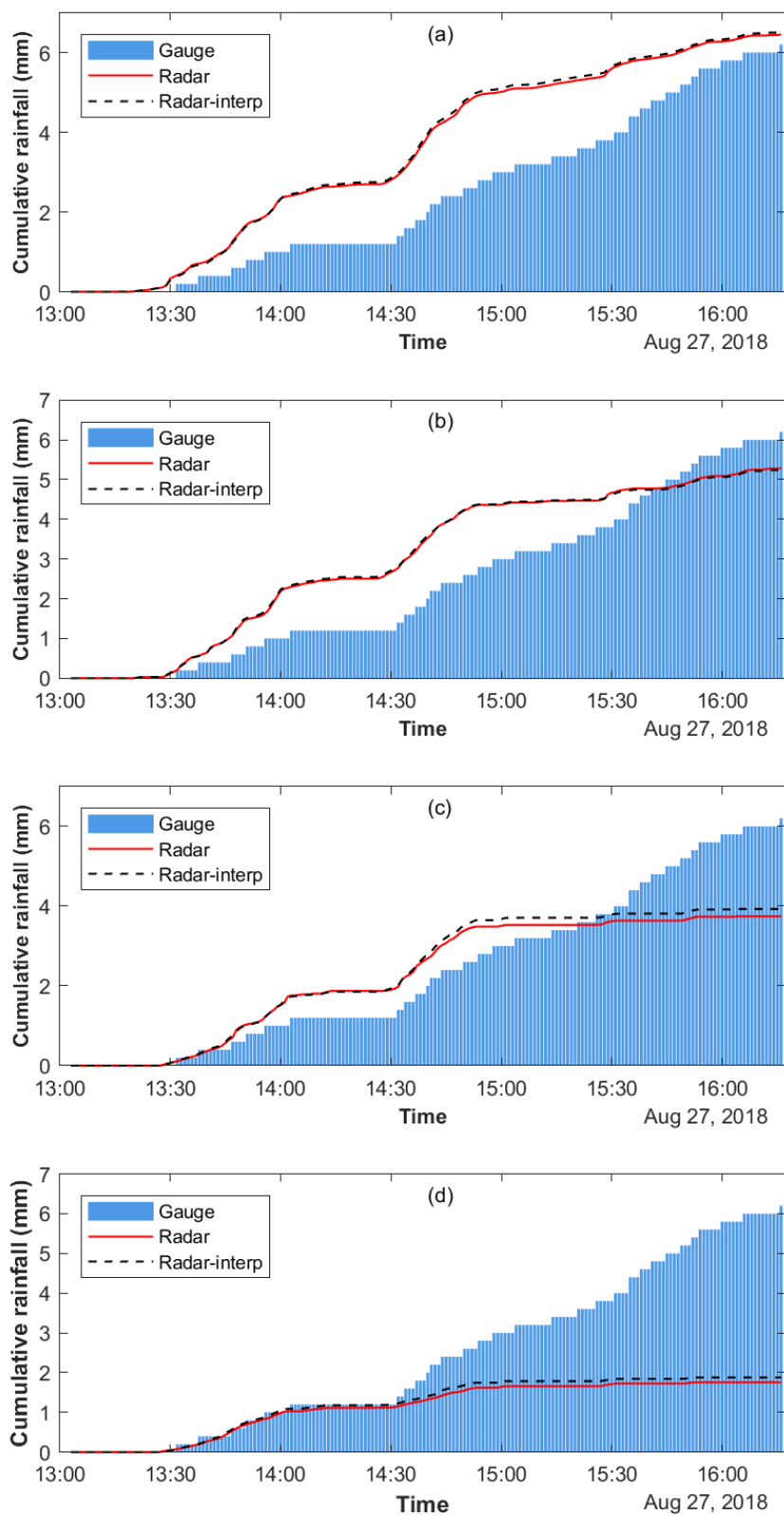
Specifikt för nederbördstillfället den 10:e augusti 2018 är att ingen skannivå kunde fånga regn under perioden 00.30–01.00 (Figur 4.7 och Figur 4.8) medan regnmätarna i Arlöv och Hammars Park registrerade kontinuerlig nederbörd till 01.53. Detta uppehåll i regnet kan emellertid ses under en kortare period vid 00.45 för Lund Södra (Figur 4.6). Samma tendens kan inte ses för Dalby (Figur 4.1). För att hitta orsaker till dessa uppehåll måste areella bilder av nederbörden undersökas enligt nedan.



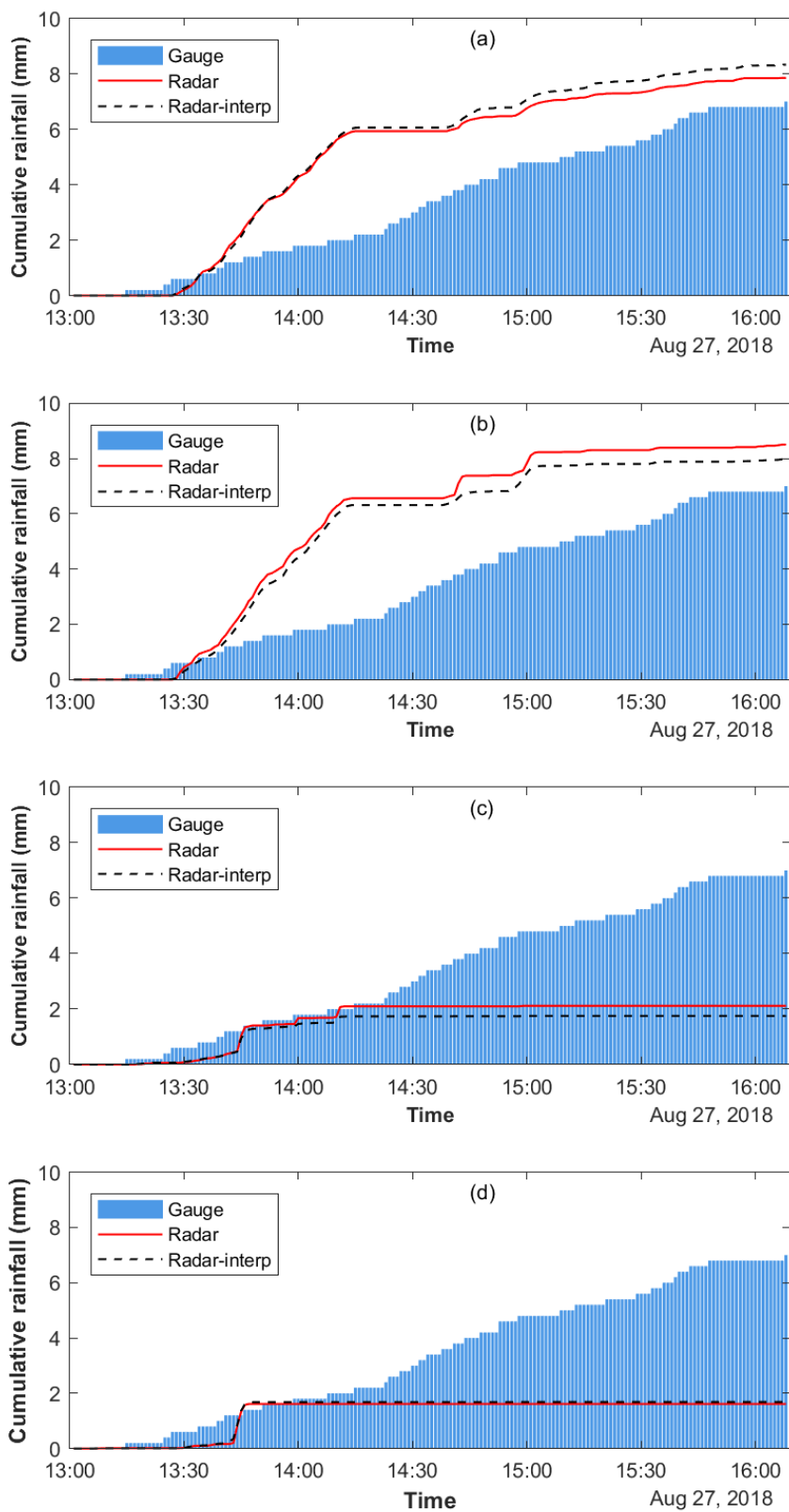
Figur 4.1 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Dalby regnmätare) för 2018-08-27, 13:14-16:42 med radarskanning från a) nivå 1 lägst, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4 högst



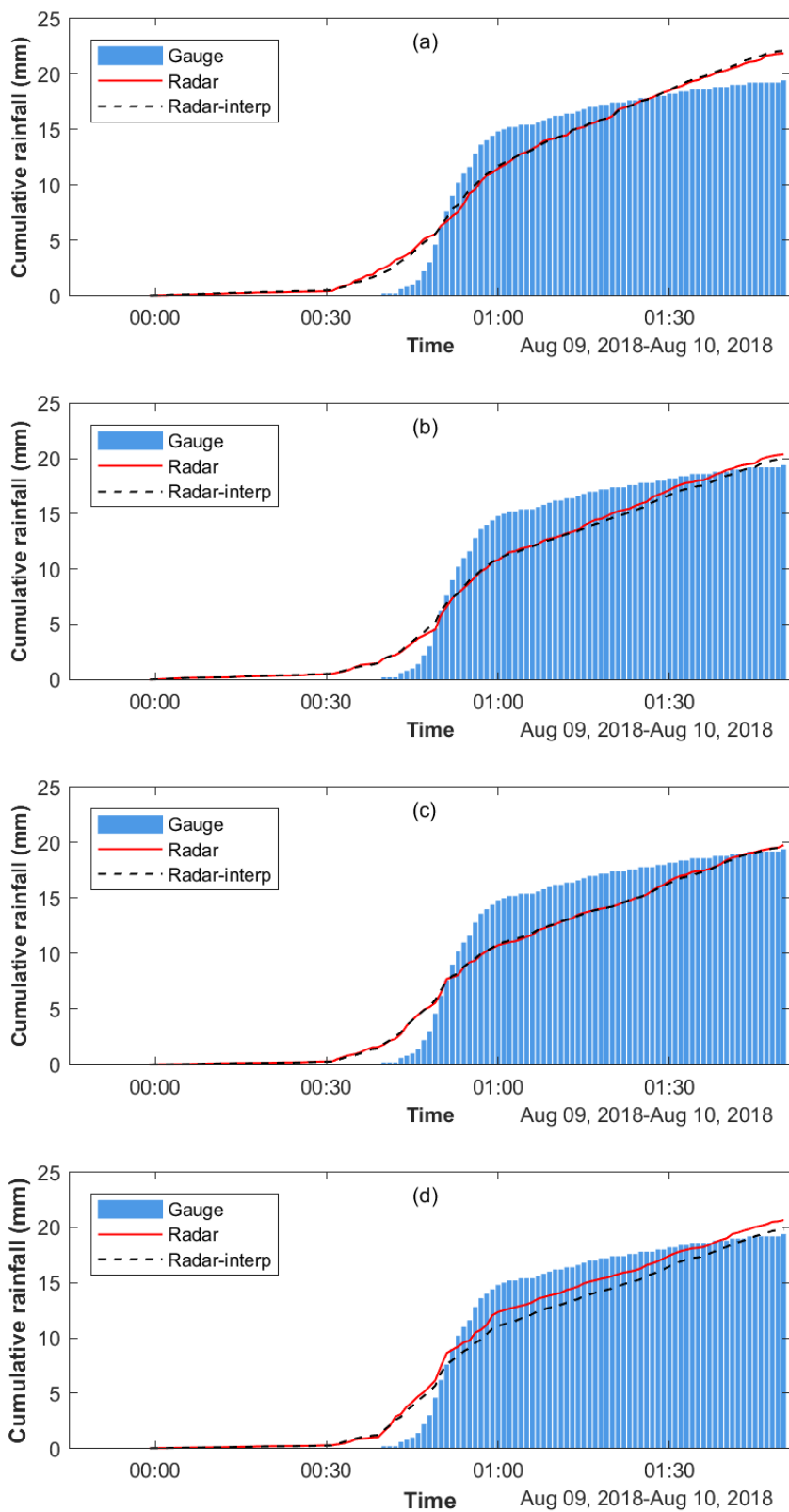
Figur 4.2 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Lund Södra 2018-08-27, 13:05-16:48 med radar-skanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.



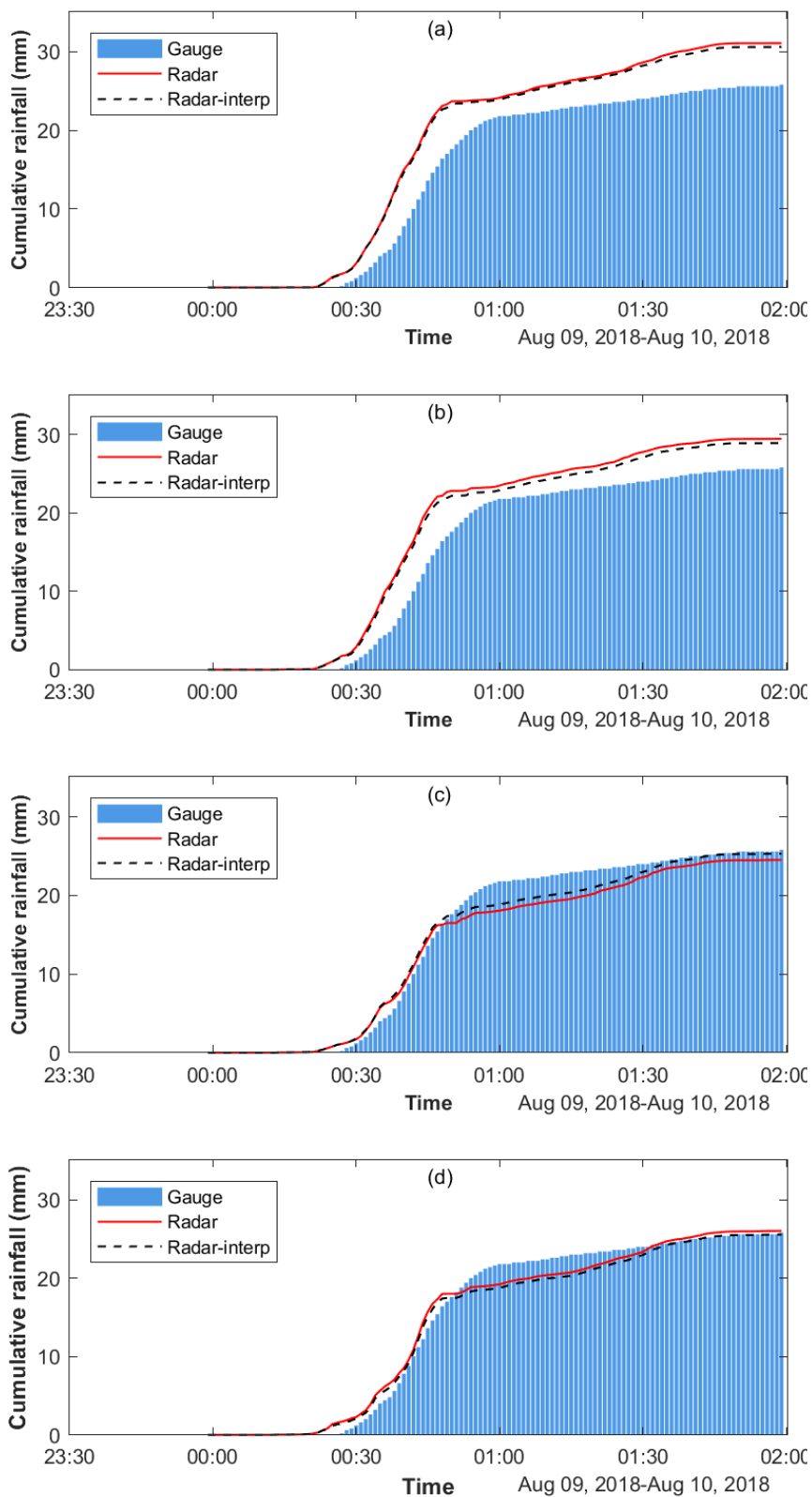
Figur 4.3 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regn-mätare (Arlöv 2018-08-27, 13:20-16:16) med radarskanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.



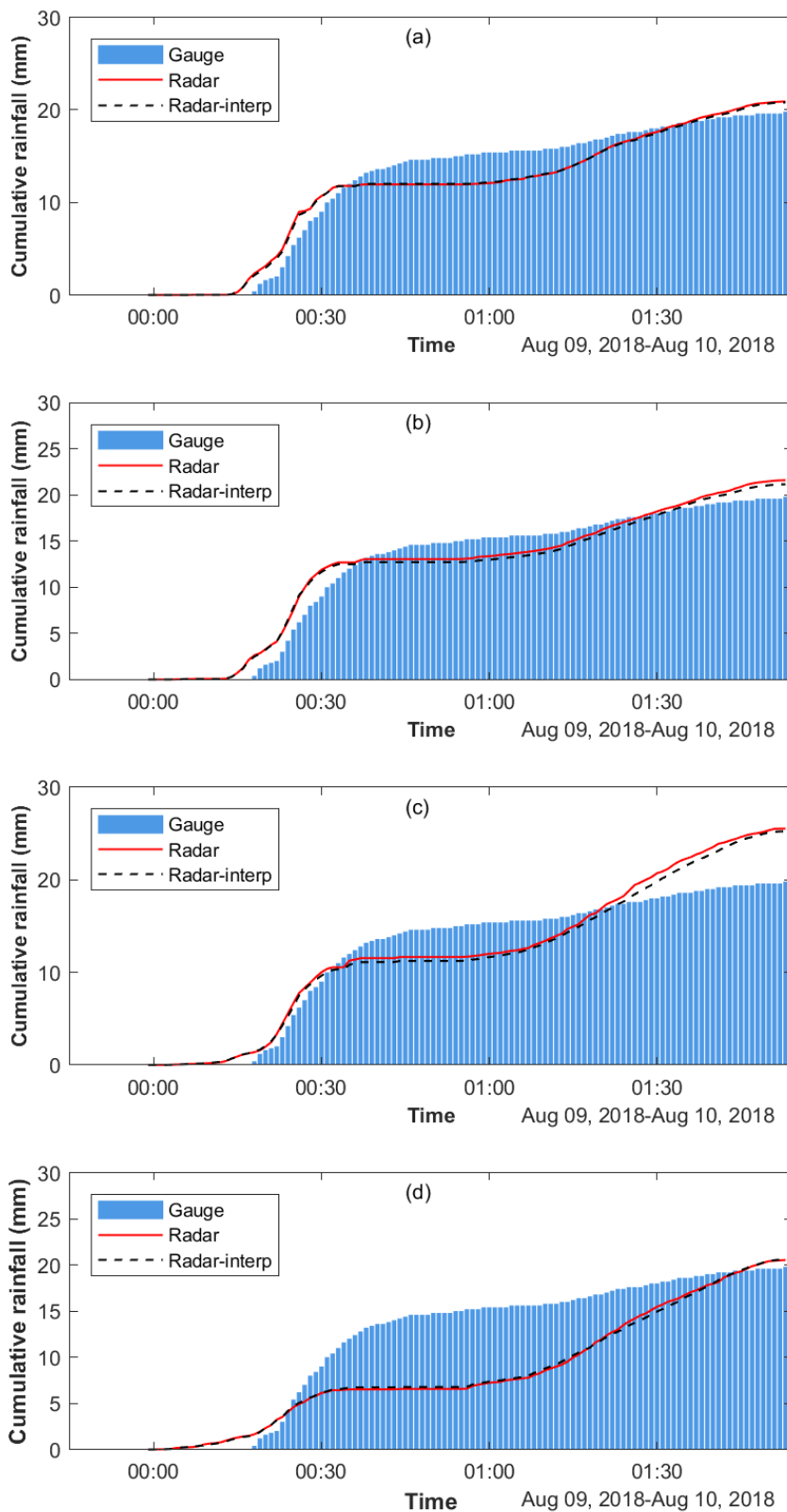
Figur 4.4 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Hammars Park 2018-08-27, 13:28-16:08) med radar-skanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.



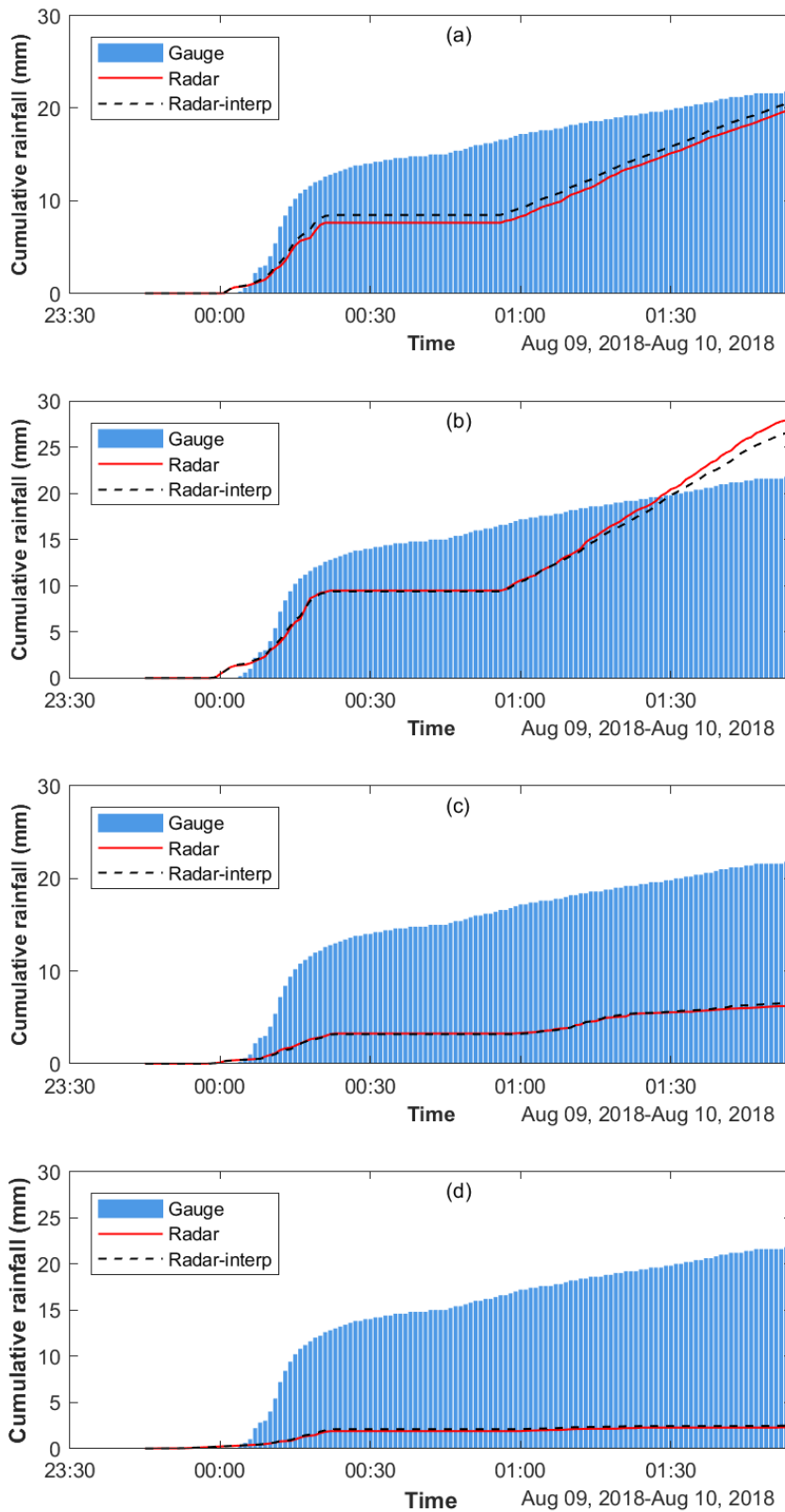
Figur 4.5 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Dalby 2018-08-10, 00:00-01:50) med radarskanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.



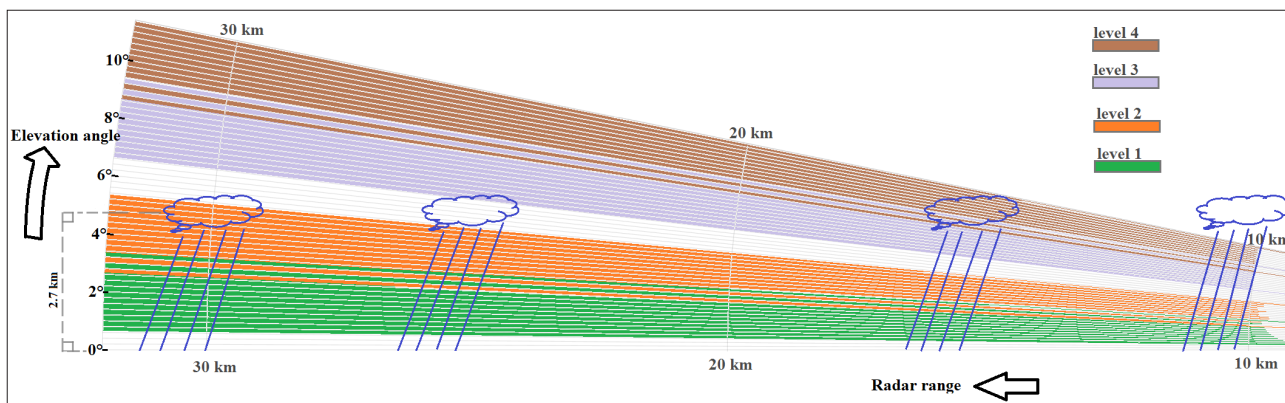
Figur 4.6 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Lund Södra 2018-08-10, 00:00-01:59) med radarskanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.



Figur 4.7 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Arlöv 2018-08-10 00:00-01:53) med radarskanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.



Figur 4.8 Jämförelse mellan ackumulerat regn från radar respektive regnmätare (Hammars Park 2018-08-10 00:00-01:53) med radar-skanning på a) nivå 1, b) nivå 2, c) nivå 3 och d) nivå 4.

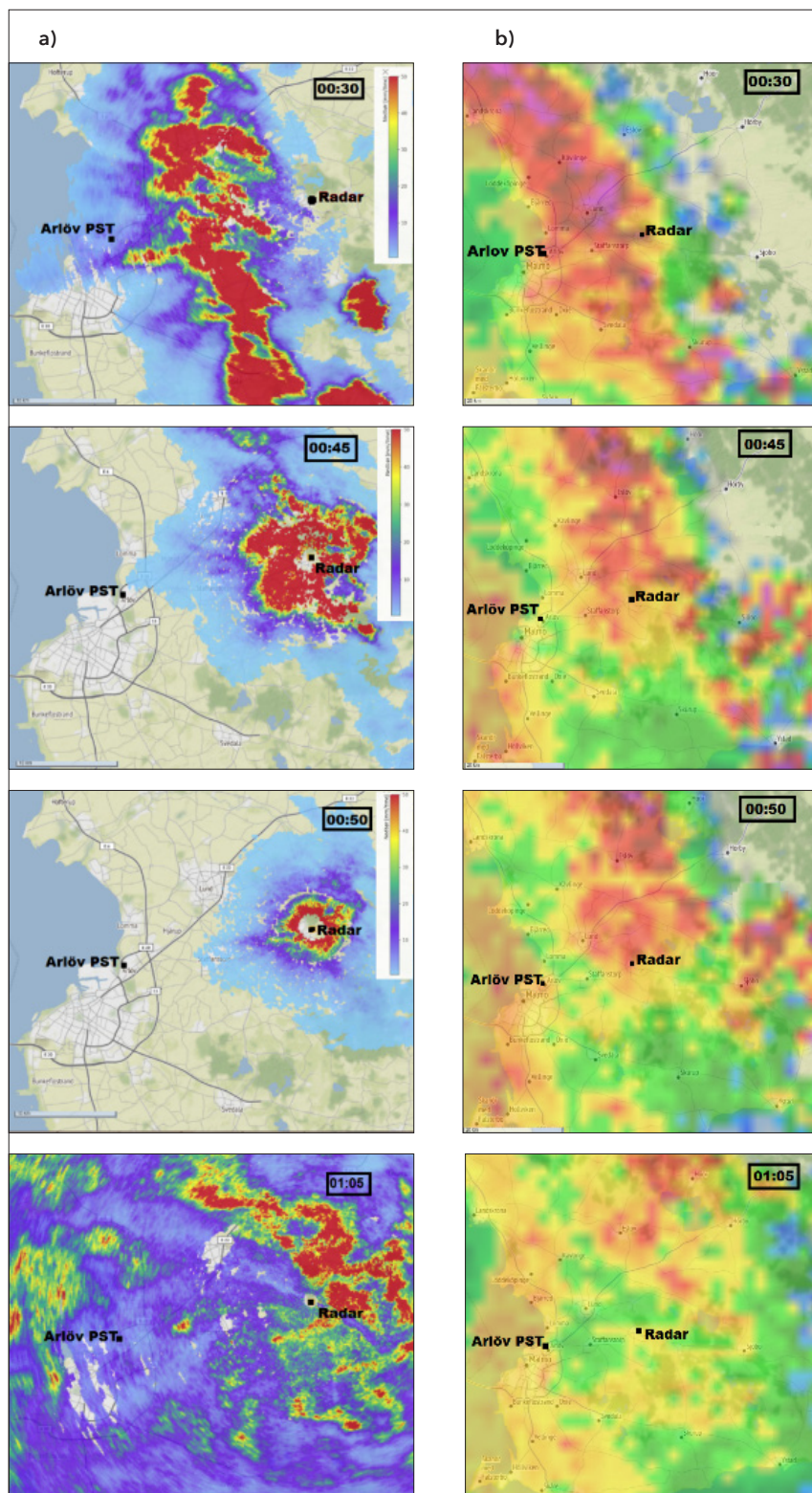


Figur 4.9 Ett schematiskt exempel som visar hur regn från ett moln på 2,7 km höjd kan observeras med hjälp av radarsignaler med olika höjdsvinkel beroende på avstånd från antennen.

Figur 4.10 visar areell radarnederbörd för flera tidpunkter omkring 00.45 (10:e augusti 2018). Enligt denna figur, t.ex. för 00.45, ses att radarsignalen inte kunde tränga igenom den intensiva nederbörden. Således reflekterades radarsignalen tillbaka från en mindre radie vid intensitetsmax i regnmolnet. Framförallt omkring 00.50 visar Figur 4.2 a att Arlövs regnmätare helt faller utanför radarns observationsradie. Detta är ett generellt problem för X-band radar. Lösningen på detta problem är att använda flera radar som kan täcka intensiv nederbörd från olika riktningar. Som ses i Figur 4.2 b, uppvisar C-band radarn från SMHI ingen reduktion i högre regnintensiteter som X-band radarn gör. Emellertid uppvisar X-band radarn högre areell upplösning som är fördelaktigt från urban synpunkt. Detta är en av anledningarna till att det är fördelaktigt att kombinera flera olika radartyper. C-band radarn kan också användas för att förutsäga tidigare att högintensiv nederbörd är på väg in tack vare att denna radar täcker en mycket större areell skala.

Efter att det högintensiva regnet har passerat ökar X-band radarns täckning igen. Detta kan ses t.ex. för 01.05 i Figur 4.10. Här ser man att täckningen ökar igen speciellt för lägre skannivåer och med relativt acceptabel uppskattning av nederbörd (Figur 4.7 och Figur 4.8).

Nästa steg i kalibreringsprocessen är att förbättra radarns korrelation med observerad regnmängd i regnmätarna. Efter detta bör en felkorrektionsfunktion utvecklas som är beroende på regnmätarens placering i landskapet. Denna funktion kommer att användas för att beräkna areell nederbörd i varje gridpunkt. Dessa data kan i sin tur användas för indata till regn-avrinningsmodeller och översvämningsvarning.



Figur 4.10 Jämförelse mellan areellt regn för 00.30, 00.45, 00.50 och 01.05 2018-08-10 och a) Dalby X-band radar och b) SMHI C-band radar (Arlövs regnmätare och Dalby radar i svart).

5 Förslag på tillämpningar baserade på mätdata från väderradar

Avrinningen från urbana miljöer är direkt eller indirekt kopplat till stadens avlopssystem och det är uppenbart att en förbättrad kvantitativ mätning av regn har stor betydelse för att förstå hur detta system fungerar vid regn och hur det kan styras i såväl realtid och även på längre sikt genom strategiska investeringar för att därigenom bättre tillgodose såväl ökade miljö- som kundkrav i ett klimat som dessutom förändras.

Det har framgått av tidigare kapitel att arbetet och önskemålet om att bygga upp en systemförståelse för det urbana avrinningssystemet inte är en ny företeelse utan skall ses som en del av en internationell utveckling. I Sverige gjorde VA SYD tester med utveckla realtidsstyrning av ledningsnät och reningsverk baserat på data från C-band väderradarar på 90-talet (VA-verket Malmö, 1998). Senare inleddes ett samarbete med forskare i Danmark kring prognosverktyg baserat på C-band radarer och inom detta arbete togs en prototyp fram på en X-band väderradar (Aspegren et al. 2001). Utvecklingen inom väderradartechniken kom sedan att fortsätta i framförallt Danmark och i By- og Landskabsstyrelsen (2009) beskrivs den första radarbaserade avloppsvattenprognosen med hjälp av radarmätning. Prognosen gjordes genom att beräkna kommande nederbörd 1–2 timmar framåt med hjälp av radar (C-band och X-band). Därefter matades resultaten in i modeller för avlopssystemet som beräknade det kommande flödet. METSAM-projektet la senare grunden till ett koncept som idag används i hydrauliska modeller i Danmark (Miljöstyrelsen Danmark 2012) och som inspirerat till liknande utvecklingsarbete i bl a Sverige.

Även i Sverige finns det ett stort intresse att använda och förbättra urbana avrinningsmodeller och styrningen av dessa och avsikten med det nu pågående Vinnofinansierade projektet Future City Flow är att i realtid demonstrera att hydrauliska modeller kan användas för att prognostisera effekten av förändrade flöden i avlopssystemet och utifrån denna kunskap optimera styrningen för att till exempel minska bräddning, minska risken för källaröversvämningar och för att optimera driften på reningsverken. Tillförlitligheten hos modellsvaren är till stor del beroende av kvaliteten och upplösningen av nederbördsdata.

Med väderradaranläggningen i Dalby får Sverige nu för första gången tillgång till en X-band väderradaranläggning och därmed kan även tekniken och utvecklingsarbete anpassat till inte minst svenska förhållanden inledas. I ett första läge har följande nedanstående tillämpningar kunna identifieras:

- Efterkonstruktion – flödesmodeller och skadekravshantering
- Utveckling av väderstyrda pumpstationer och reningsverk
- Utveckling av varningssystem och prognosverktyg

I detta kapitel kommer så förbättringsåtgärder av den befintliga X-band radarn i Dalby diskuteras vidare kommer de möjliga tillämpningarna att diskuteras med i detalj.

5.1 Framtida förbättringar av väderradaranläggningen i Dalby

Trots brist på regntillfällen i juli månad var testperioden under sommaren 2018 lyckad. Vid de regntillfällen som uppstod visade radarbilderna att de var av hög kvalitet och god precision, även om följande två förbättringspotentialer tydligt identifierades:

1. Blockering av radarbild vid tillfällen när kraftiga nederbördsområden är direkt ovanför radarn (se avsnitt 4.1)
2. Kalibrering av väderradarn för att undvika överskattning av regnmängder.

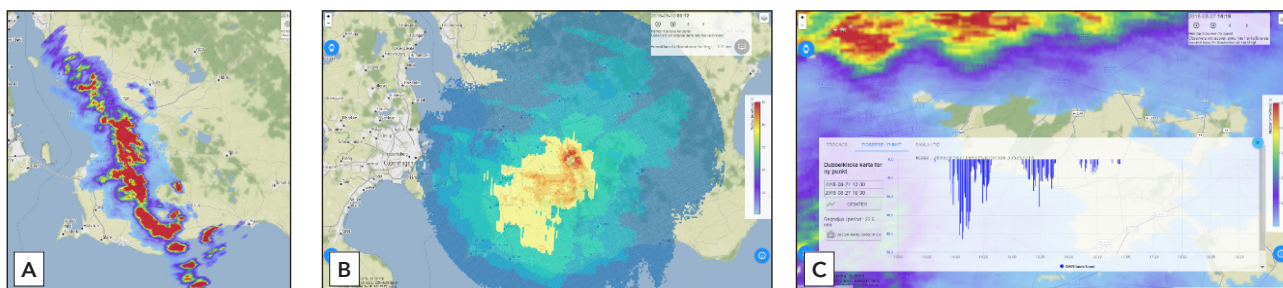
Gällande problem 1 är detta ett problem som kan lösas med genom att antingen att data från SMHI:s eller DMI:s väderradar (C-bandradar) används om X-bandradarn temporärt blockeras. En annan möjlig lösning är att det finns fler X-band väderradar i området där räckvidderna överlappar varandra. Därmed kan en radarbild ”lappas” ihop för att visa en komplett radarbild. Förslagsvis installeras en sådan ny väderradaranläggning närmare kusten för att få ännu tidigare förvarning om nederbördsområden som kommer in från Danmark.

Kalibreringen är något som kommer att åtgärdas i anslutning till en kommande permanent väderradaranläggning i Dalby. Vid en kalibrering av radarn justeras uppmätt nederbördsmängd gentemot stationära regnmätare i närområdet. Samtidigt görs även en biasjustering för att få bort brus som konstant visar på felaktiga regnområden.

5.2 Efterkonstruktion - flödesmodeller och skadekravshantering

Utöver verktyg som ska försöka tyda närstående regn in över Sverige erbjuder X-band väderradartechniken nya möjligheter att efterkonstruera regn. Till skillnad från C-band väderradar erbjuder X-band högupplöst nederbördsdata inom radarns räckvidd (visas i bild A i figur 5.1) och till skillnad från stationära regnmätare erbjuder X-band radar regnmätning överallt inom radarns räckvidd i zoner om 500x500m (visas i bild C). Utöver detta erbjuds en regional nederbördsbild där ackumulerad regnmängd i gridcell (500x500m) summeras i en och samma bild för att kunna visas regnens utfall, se bild B i figur 5.1.

Nederbördsdata från bild B och C kan laddas ner i olika format (DFS0, DFS2, Excel) som kan användas till MIKE URBAN och MIKE FLOOD flödesmodeller som ”regnfiler”. Idag används annars regndata från nederbördsmätare men det ger en begränsad bild av det verkliga regn som fallit eftersom regnmängd kan skilja sig mycket lokalt. Därmed får flödesmodeller ett lyft med dessa heltäckande ”regnfiler” som blir regionala och täcker



Figur 5.1 Skärmlapp från radarwebtjänsten vasyd.informetics.se.
A) nederbördsintensitet, B) ackumulerad nederbörds mängd i samtliga grid celler, C) nederbörd över tid i vald punkt

in hela avloppsområden. Slutligen erbjuder de heltäckande regnfilerna från väderradararn en möjlighet att simulera hur nivåerna i ledningsnätet har sett ut i flödesmodellerna t.ex. MIKE URBAN och kan jämföra detta med nivåmätare i ledningsnätet såsom VA SYDs flödesmätare i kapitel 3.2.2 för att kalibrera modellerna efter uppmätta värden.

Efter kraftiga skyfall blir det tyvärr skador bland VA-abonnenterna och årligen mottas skadekrav för mångmiljonbelopp från kunderna som vill ha ersättning för sina skador i form samt från försäkringsbolag som vill ha ersättning för sina utlägg till sina kunder. Därför görs det en bedömning om ansvar till skadan och där görs en bedömning om regnet som orsakat har varit ett 10-års regn, det vill säga ett regn som har en statistisk återkomstid på 10 år.

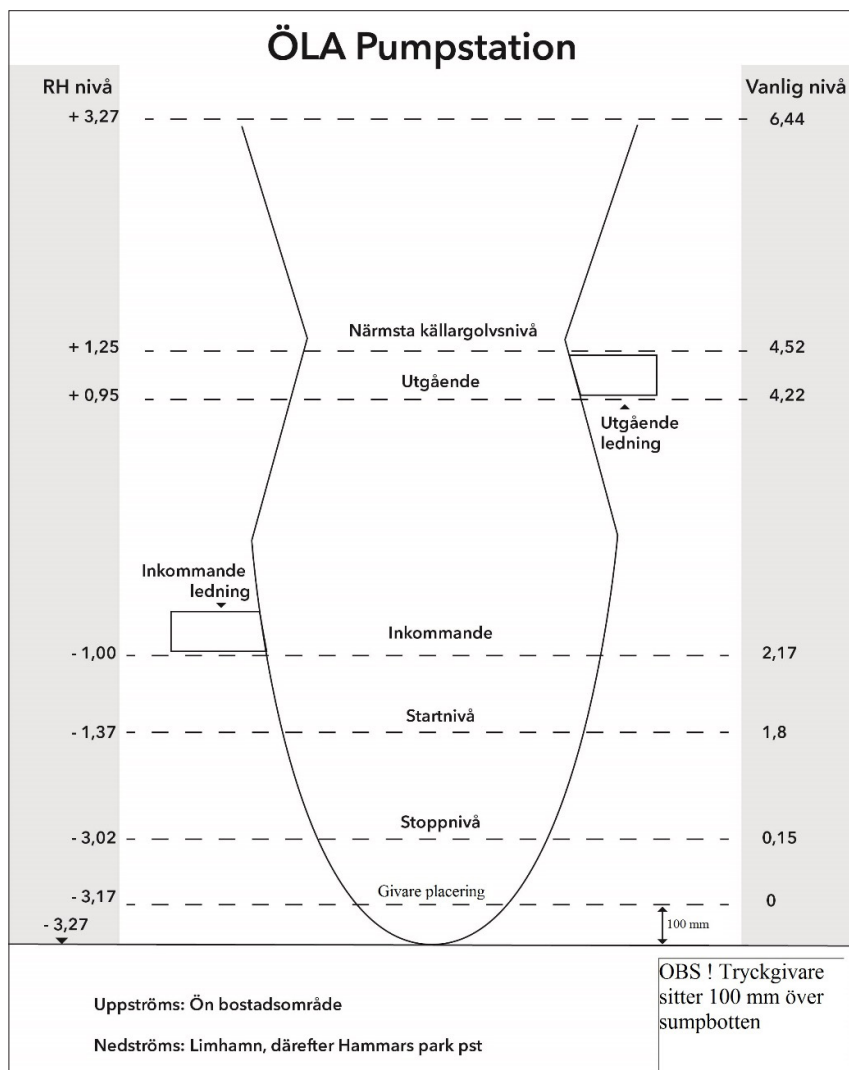
Om regnen har varit större än ett 10-årsregn får dagvattenssystemet dämna ovan marknivå och skador som uppkommit på abonnentens fastighet via ytavrinning på marken kan avslås av VA-huvudmannen. I normalfallet för att göra denna bedömning används den regnmätare som är närmst men det kan vara stora lokala variationer som både kan bli felvisande för kund/försäkringsbolag och VA-huvudman. En X-band väderradar erbjuder därmed en digital regnmätare som kan vara ett komplement till stationär regnmätare t.ex. om det inte finns någon lokal mätstation i närheten eller för att göra en noggrannare bedömning med två regnmätserier.

5.3 Utveckling av väderstyrda pumpstationer och reningsverk

Väderradararn kan användas för att vara del i olika styralgoritmer för att mer intelligent styra olika tekniska komponenter som finns på ledningsnätet och på reningsverken i realtid. I händelse av ett annalkande eller pågående lokalt regn kan t.ex. pumpstationer och reningsverk styras utifrån en förbättrad kunskap om regnhändelsens art och karaktär.

Konceptet att styra pumpstationer och reningsverk efter väder görs i Danmark bland annat i Köpenhamn enligt HOFOR/BIOFOS (2018) och Vezzaro och Grum (2014). Även i andra städer såsom Dresden i Tyskland Beeneken et. Al (2013) och Consenza i Italien Garofalo et. Al (2017) har det visats vilken potential och lyckade resultat det finns att styra VA-infrastruktur (pumpstationer, reningsverk och ledningsnät) efter väder.

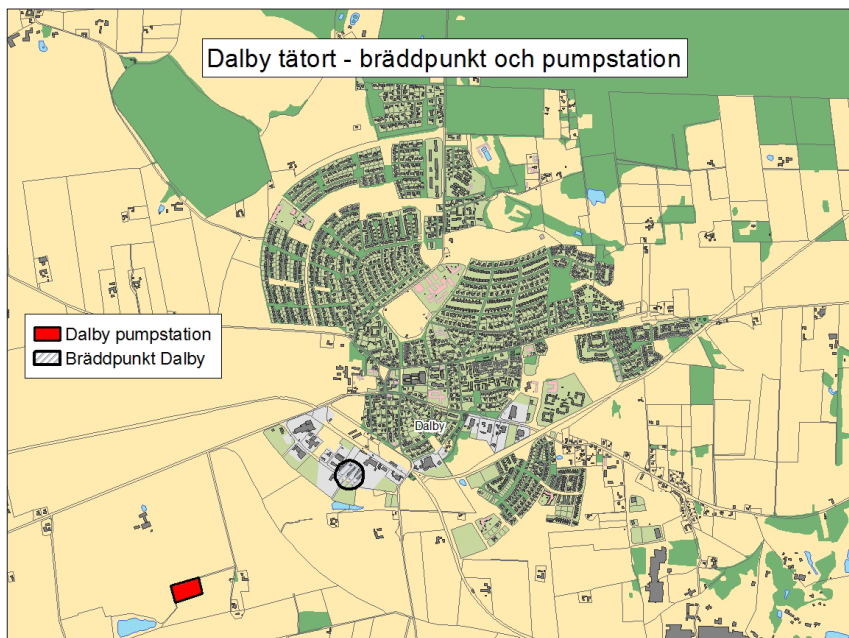
Styrningen möjliggör att pumpstationer kan pumpa mer effektivt och mer volym kan distribueras till reningsverken innan ett regntillfälle inträffar. Idag har pumpstationen samma start- och stoppnivå oavsett väderlek (se schematisk bild i Figur 5.2). Ett upplägg som föreslagits internt på VA SYD är därför att pumpstationer i framtiden skulle kunna ha olika styrningsprogram för stationens start- och stoppnivåer vid olika väderlek. Detta medför att pumpstationen har lägre energiförbrukning vid torrväder och reducerar samtidigt risken för dämning av ledningssystemet uppströms pumpstationen vid nederbörd.



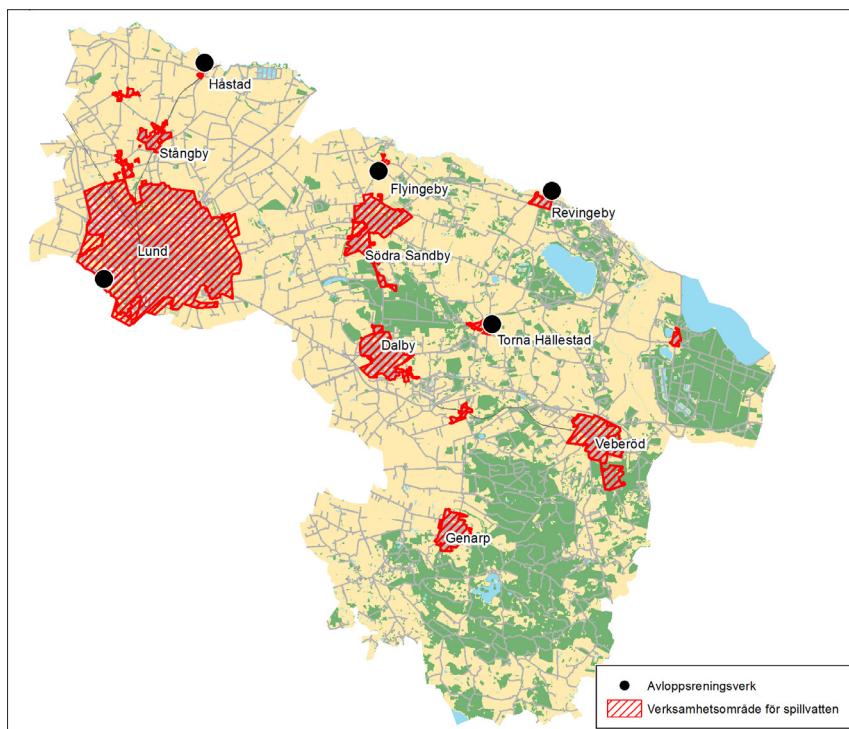
Figur 5.2 Dagens utformning på start- och stoppnivåer vid en pumpstation.

Efter en intern workshop på VA SYD har det konkretiserats två lämpliga testplatser för vidare arbete med väderstyrning av pumpstationer. Platserna som föreslogs var Dalby pumpstation (Figur 5.3) och anläggningen "Lilla Japan" utanför Veberöd. Båda anläggningarna ligger i Lunds kommun (Figur 5.4). Dessa platser anses båda vara lämpliga för pilotprojekt där väderstyrning kan provas. Detta tack vare att de två anläggningarna har en reservvolym som kan regleras efter väder. Tanken är att två styrnings-

program utvecklas: ett för torrvädersstyrning och ett för regnvädersstyrning. Vidare beräkningar och tester av väderstyrning vid dessa platser ska initieras under 2019. Utöver dessa anläggningar i Lunds kommun finns det flera platser i Malmö kommun med möjlighet att prova väderstyrning av VA-infrastruktur, t ex FJA pumpstation i norra Malmö.



Figur 5.3 Karta över Dalby där bräddpunkt och Dalby pumpstation är utmärkt.

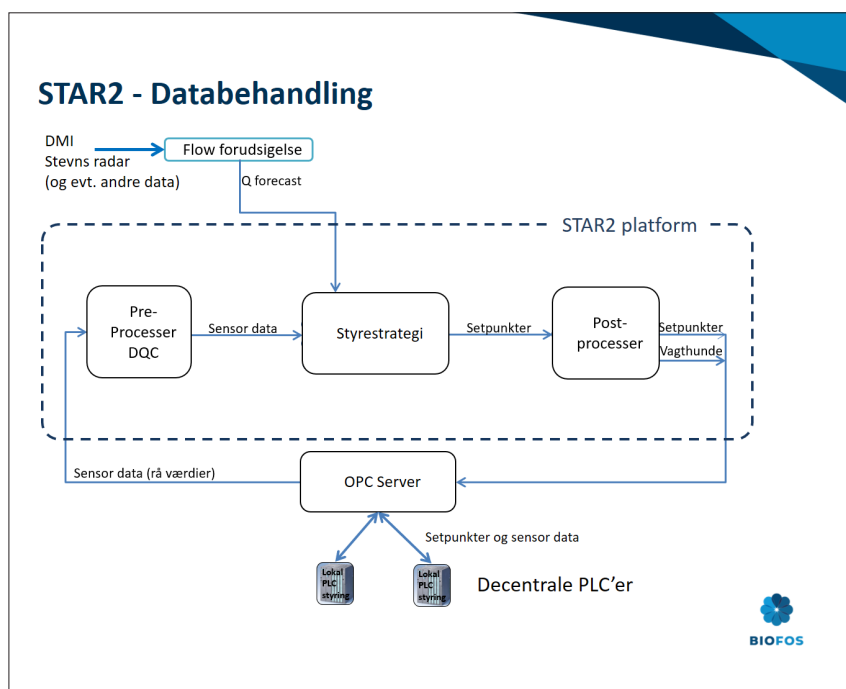


Figur 5.4 Översikt av verksamhetsområden för spillvatten i Lunds kommun där Lilla Japan ligger väster om Veberöd.

Enligt HOFOR/BIOFOS (2018) används väderstyrning idag på tre reningsverk i Köpenhamn. Styrsystemet Star2 tar dels emot mätsignaler från reningsverken (t ex flöden, syrehalt, nivå, närsalter och suspenderat material), dels från externa mätanläggningar såsom DMI:s C-bandradar och HOFOR/BIOFOS X-band radar.

Radardata från både C-band och X-band ger indata till flödesmodeller som i sin tur kan förutspå ett kommande flöde till reningsverken. Detta förutspådda flöde skickas in i Star2-systemet där även de lokala mätvärdena från reningsverken inkluderas. När tröskelvärden har uppnåtts – att systemets ”vakhundar” har utlöst – slår systemet om och blir regnväderstyrt. Värdena skickas sedan till en OPC-server och därefter vidare till lokala PLC:er (enkla datorer för styrsystem) som styr lokala processer, t ex nivåer. Dessa PLC:er skickar tillbaka information till OPC-servern som bearbetar all indata och i sin tur skickar ut nya värden/direktiv till Star2-systemet. Systemet fortsätter att styra med regnvädersstyrning tills det registrerar värden som visar på att det kan återgå till det ordinarie torrväderssystemet. Figur 5.5 visar en schematisk bild över Star2-systemets komponenter och processer.

Star2-systemet möjliggör att reningsverken i Köpenhamn kan reglera och optimera styrning av bland annat dosering av fällningskemikalier och extern kolkälla, slamålder och luftning i det biologiska reningssteget.



Figur 5.5 Schematisk bild över Star2-systemets uppbyggnad som styr ledningsnät- och reningsverkssystem i Köpenhamn.

5.4 Utveckling av varningssystem och prognosverktyg

Tack vare möjligheten till hög tidlig och rumslig upplösning av nederbördsdata finns det stor potential i användningen av X-bandradar för utveckling och implementering av varningssystem och korttidsprognoser

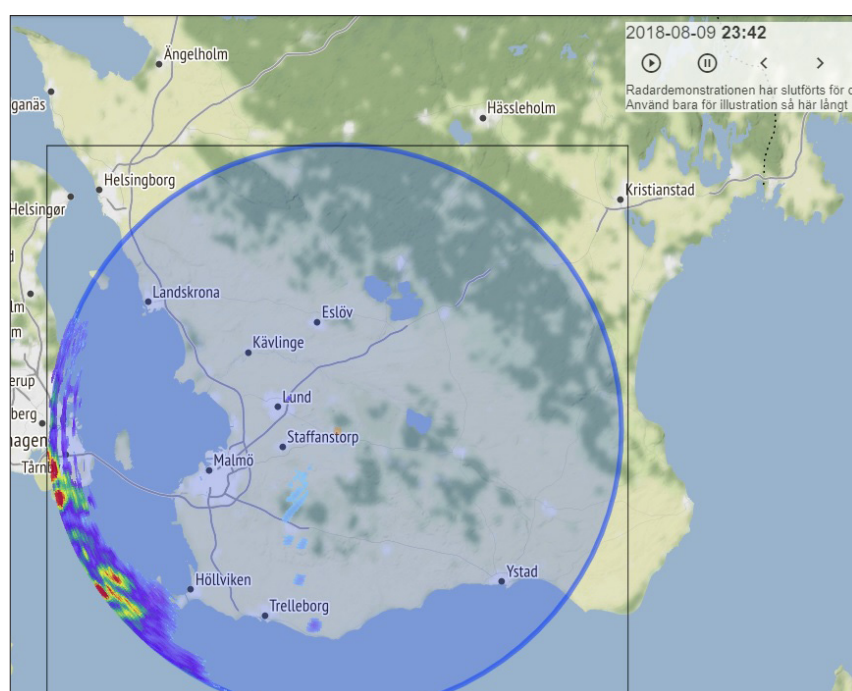
över urbana områden (Thorndahl et al, 2017). För att ytterligare förbättra den rumsliga upplösningen och minska risken för försvagning av radarstrålen vid kraftiga regn (som vid regntillfället den 10/8 2018) kan flera överlappande radaranläggningar kopplas samman i ett nätverk (Wang och Chandrasekar, 2009). För att ytterligare bredda informationen är det möjligt att kombinera nederbördsdata från C-band och X-band (Nielsen et al, 2013). I USA har det intersektoriella samarbetet CASA samlat universitet, industri och myndigheter för att utveckla högupplösta väderprognoser och varningssystem. Ett nätverk av flera X-bandradar i norra Texas producerar data som körs i onlinemodeller som i sin tur levererar detaljerade kortidsprognoser över området. Allmänhet och verksamheter kan ladda ner en mobilapp och få varningar vid risk för t ex översvämning, kraftig nederbörd eller åska (CASA, 2018).

I det nedanstående är regnhändelsen den 10/8 analyserad. Händelsen i är från ett meteorologiskt perspektiv gynnsam. Att man generellt skulle kunna förutsäga skyfall (på någorlunda rätt plats) av denna typ flera timmar i förväg baserat enbart på radarobservationer och manuell bedömning d.v.s. utan (fysikaliskt baserad) extrapolering framåt i tiden eller annan prognosering är utopisk men händelsen visar ändå på potentialen och att kunna använda X-band radarn för att få skarpare prognoser, genom integration med existerande högupplösta prognosprodukter, är ett spännande utvecklingsområde.

Erfarenheter från 10:e augusti 2018

– föreslagen varningssignal och tidsvinst

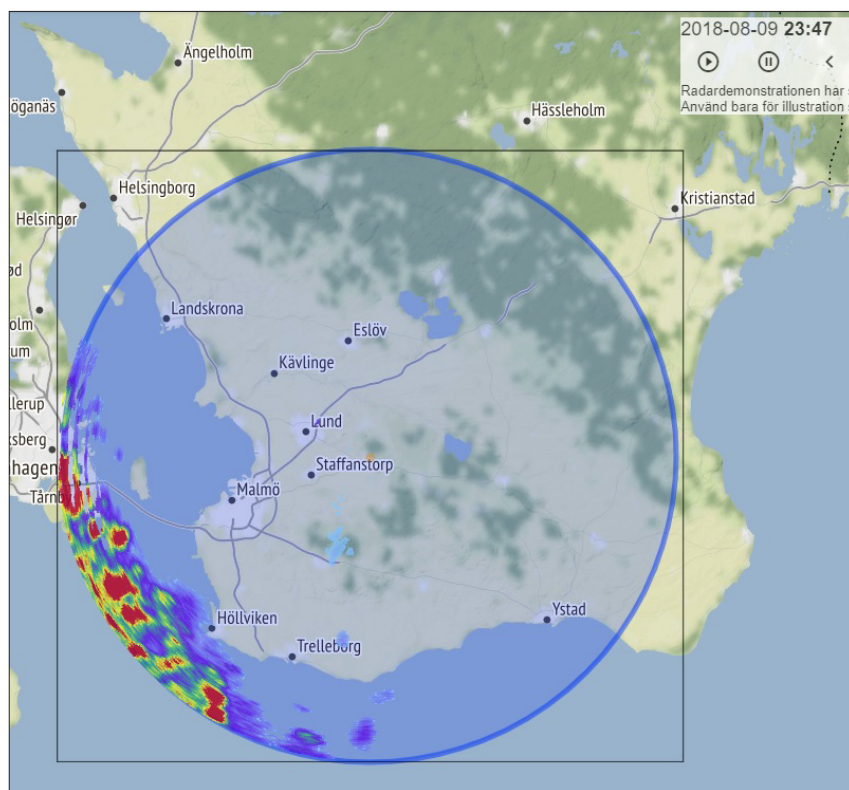
Radarbilder från regnet den 10:e augusti visar att väderradaranläggningen i Dalby registrerade skyfallsregnet för första gången klockan 23.42 den 9:e augusti, se Figur 5.6 för radarbild.



Figur 5.6

Radarbild från VA SYD med en första indikation på att ett skyfallsområde i syd-väst är på väg inom räckvidden för Dalbys väderradar.

Fem minuter senare (kl. 23.47) kunde det ses tydligt att nederbördsområdet över Öresund är av den dignitet att det skulle kunna orsaka skada över sydvästra Skåne, se Figur 5.7. Därmed kunde en varningssignal ha skapats kl. 23.47 och spridits vidare till lokala myndigheter.

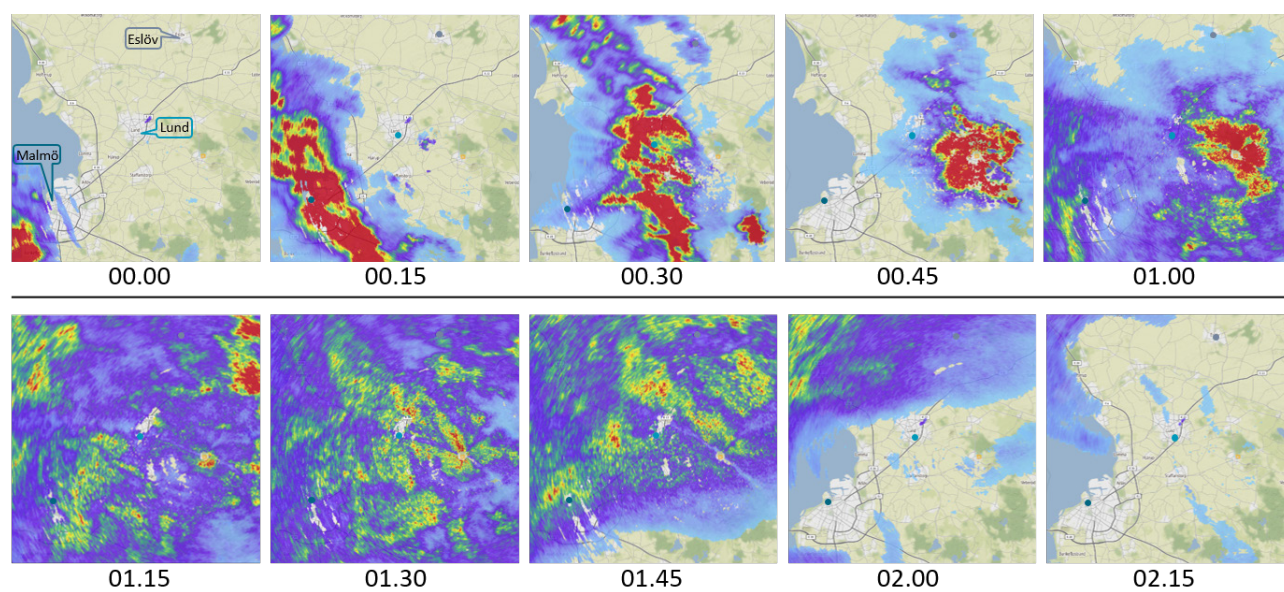


Figur 5.7 Radarbild från VA SYD där denna tidpunkt har tillräckligt stort nederbördsområde för att skicka en varningssignal till lokala myndigheter i Skåne.

De fyra källaröversvämningsskadorna i Malmö uppkom i olika delar av staden, varav en anmälare rapporterade kl. 00.15 att deras källarbrunn var fylld. Redan 30 minuter efter den ovan föreslagna tidpunkten för spridning av varningssignal började källaröversvämningarna i Malmö. I Södra Sandby och Genarp i Lunds kommun registrerade VA SYD ytterligare fyra källaröversvämningar och enligt väderradarerna fick dessa områden nederbörd från 00.32 respektive 00.42, alltså 45 respektive 55 minuter efter att det föreslagna larret skulle kunna ha distribuerats.

Med tanke på regnets kraftiga intensitet, närmare 90 mm/h registrerat på VA SYD regnmätare och värden över 100 mm/h registrerat på väderradar, fylldes ledningsnätet mycket snabbt. Vid flödesmätningen i Malmö steg nivån i ledningen kraftigt på enbart 5-10 minuter, och det är därför inte otänkbart att ledningsnätet var fullt efter tio minuters nederbörd. Med antagandet om att ledningsnätet i Södra Sandby respektive Genarp fylldes lika snabbt, inträffade källaröversvämningarna 55 minuter respektive 65 minuter efter den föreslagna varningssignalen. Figur 5.8 visar hur regnets förflyttas i området. Observationerna som diskuterats ovan summeras i Tabell 5.1. Summering av en uppskattad varningstid från väderradar i

förhållande till regnet start och när regnet började orsaka skador i form av källaröversvämningar i Malmö, Södra Sandby och Genarp.



Figur 5.8 Tidsserie som visar hur skyfallsområdet rörde sig under natten den 10:e augusti 2018.

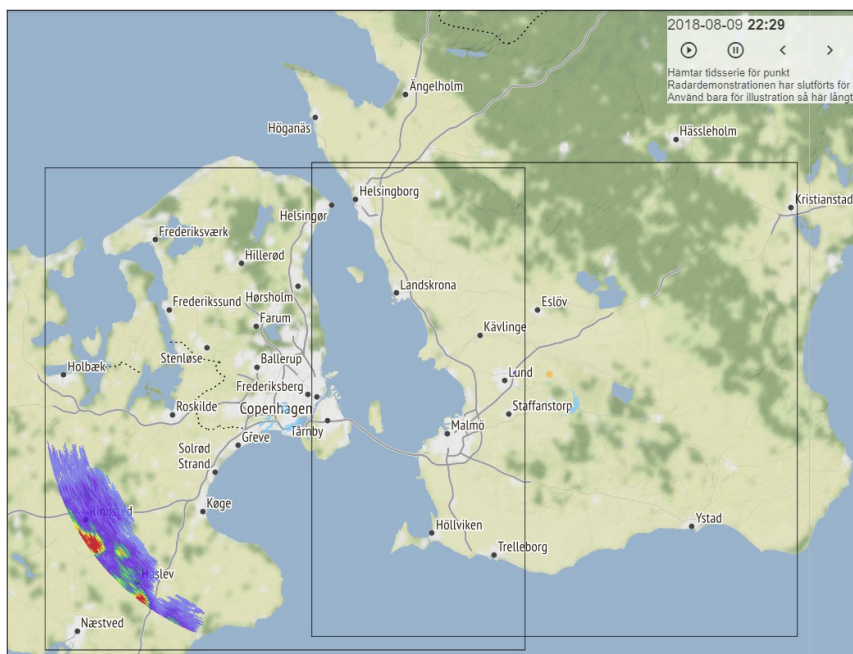
Tabell 5.1 Summering av en uppskattad varningstid från väderradar i förhållande till regnet start och när regnet började orsaka skador i form av källaröversvämningar i Malmö, Södra Sandby och Genarp.

Område	Möjlig varningssignal	Regn start	Skador i området	Tidsvinst
Malmö	23.47	00.05	00.15	28 minuter
Södra Sandby	23.47	00.32	00.42	55 minuter
Genarp	23.47	00.42	00.52	65 minuter

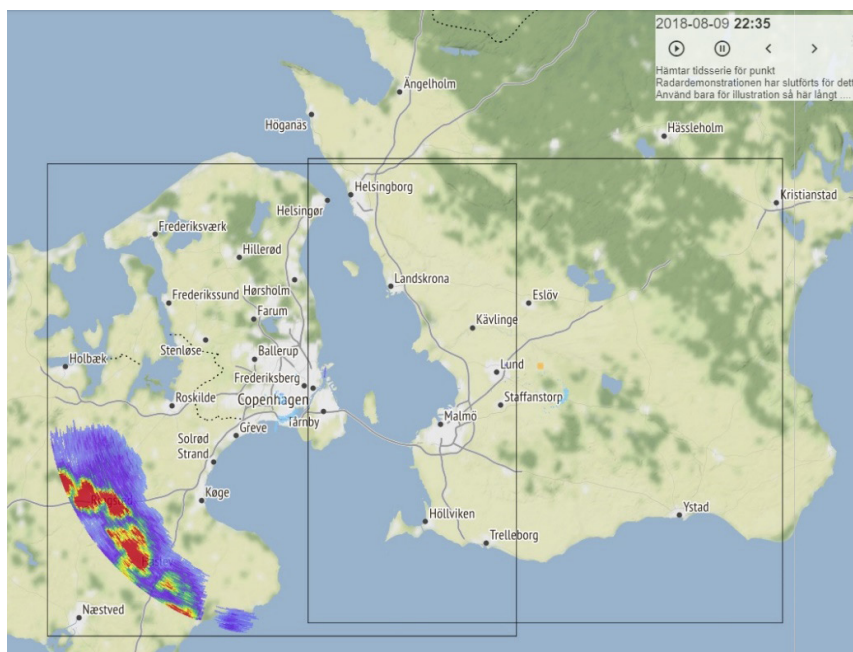
Under sommaren hade även HOFOR igång sin X-band-radaranläggning i Köpenhamn, också den en Furuno X-band väderradar. Eftersom nederbördsområdet den 10 augusti kom västerifrån, från Nordsjön och in över Danmark, upptäcktes nederbördsområdet tidigare av radarn i Köpenhamn. Enligt Figur 5.9 syntes regnet som orsakade skador inom VA SYDs kommuner redan klockan 22.30 den 9:e augusti.

En varning inom Danmark från HOFOR/BIOFOS väderradar hade kunnat spridas kl. 22.35 och ytterligare en varning om att ett regnväder är på väg in som kan orsaka skada för Sverige hade kunde spridas 22.45. Se Figur 5.10 och Figur 5.11.

Ett Öresundssamarbete mellan VA SYD och HOFOR med öppen transparens mellan respektive radaranläggning hade möjliggjort en varningssignal redan klockan 22.45, cirka en timme innan VA SYDs radar såg nederbördsområdet. Det innebär en sammanlagd tidsvinst på 1,5 timmar för Malmö respektive Burlöv kommun och omkring 2 timmar för Lund respektive Eslöv kommun. Dessa tidsvinster är ungefärliga, och beror även på vindhastighet. Tabell 5.2 redovisar tidsangivelser för möjlig varningssignal

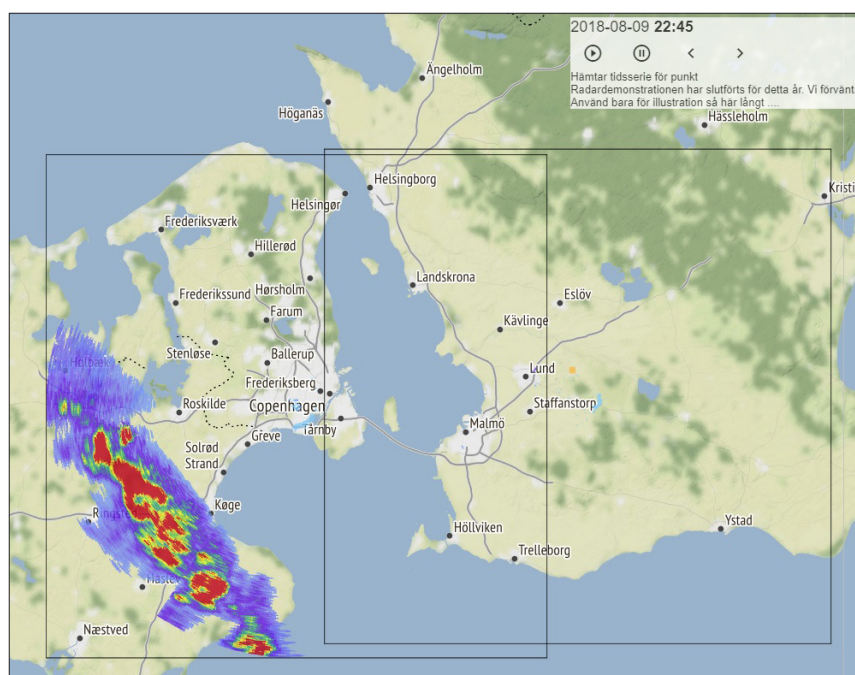


Figur 5.9 Radarbild från HOFOR där en första indikation på att ett skyfallsområde är på väg syns kl. 22.29 inom räckvidden för HOFORs väderradar.



Figur 5.10 Radarbild från HOFOR där denna tidpunkt har tillräckligt stort nederbördsområde för att skicka en varningssignal för danska myndigheter.

samt tidpunkter för nederbörd och skador, tillsammans med en uppskattad tidsvinst när data från HOFORs radar i Köpenhamn används.



Figur 5.11 Radarbild från HOFOR där denna tidpunkt har tillräckligt stort nederbördsområde för att skicka en varningssignal för danska och svenska myndigheter.

Tabell 5.2 Uppskattning av hur lång tid i förväg en framtida varningssignal skulle kunna ges från HOFOR respektive VA SYDs radaranläggning i förhållande till när regnen börjar samt när regnen skapar problem för fastighetsägaren i området.

Område	Varningssignal HOFOR	Varningssignal VA SYD	Regn start	Skador i området	Tidsvinst med HOFOR radar
Malmö	22.45	23.47	00.05	00.15	1 timme 30 minuter
Södra Sandby	22.45	23.47	00.32	00.42	1 timme 57 minuter
Genarp	22.45	23.47	00.42	00.52	2 timme 7 minuter

I Danmark pågår det liknande forskning som VA SYD/LTH/LU planerar att driva framtiden. I VEVA-projektet (Väderradar inom VA-sektorn) håller danska VA-förbund och företaget Informetecs på att utveckla verktyg och algoritmer som kan skicka en varningssignal och förutse inkommande nederbördsområdets rörelsebana baserat på bl a vind- och nederbördsdata från både X- och C-bandradar. En sådan utveckling skulle kunna möjliggöra mer konkret information för exempelvis VA SYDs driftpersonal om vart de ska åka eller vilket område som ska övervakas via SCADA för att optimera pumpstationer och reningsverk. Vidare möjliggör en varningssignal i förväg mer tid att ringa in jourpersonal och i allmänhet förbereda infrastrukturen inom VA SYD på kraftig nederbörd som är på väg in. På sikt finns också möjligheten att skicka ut varningar till allmänhet och verksamheter vid risk för kraftiga regn.

Ett Öresundssamarbete med HOFOR/BIOFOS och övriga VeVA-gruppen har inletts. Tanken är att detta samarbete under 2019 ska utvecklas för att effektivisera framtida möjliga verktyg – såsom ett varningssystem och delningssystem av radardata mellan länderna.

6 Slutsatser

Testperioden under sommaren 2018 visade att en X-band väderradaranläggning kan vara av stor nytta för en VA-organisation. Varnings-system och väderstyrning av VA-system utgör konkreta exempel på nya möjligheter som en X-band radar kan erbjuda. Utöver detta erbjuder en X-bandradar bland annat förbättring av indata till befintliga hydrauliska modeller och täcker upp där regnmätare inte finns.

Även om tekniken har potential finns det svagheter och insatser som måste göras innan en X-band väderradar är redo för användning. I rapporten har exempelvis vikten av att kalibrera radarn nämnts flera gånger; detta är bland det första som måste göras på en framtida permanent anläggning. Utöver lyckad kalibrering bör det övervägas att ha fler anläggningar i regionen för att kunna minska risken för försvagad radarstråle vid skyfallsregn, vilket under testperioden inträffade vid regnhändelsen den 10:e augusti. Däremot bidrar X-band radar med heltäckande regnmätning till skillnad från stationära regnmätare som erbjuder mätning enbart på en punkt och kan påverkas av lokala faktorer såsom vindbyar. Med flera radarer i regionen kan man få en sammanslagning av radarbilder som ser nederbördsregnen från flera håll för att bekräfta varandras uppmätta nederbördsresultat.

Vidare är kombinationen av X-band väderradar tillsammans med de befintliga C-band väderradarnätverken i Sverige och Danmark intressant för fortsatt utvecklingsarbete med SMHI men även DMI. Exempelvis inom utvecklingen av framtida prognosystem möjliggör kombinationen av indata från både C-band- och X-band radar nya förutsägelser och styrsystem som är väldigt spännande för VA-branschen. Vid omfattande skyfallsregn utgör de båda radartyperna viktiga komponenter, där C-band levererar en större helhetsbild och är mindre känslig för försvagning medan X-band ger en mer detaljerad upplösning men riskerar att missa viktig data på grund av försvagning. Därmed är X-band radar inte ett konkurrerande alternativ till det befintliga C-band väderradartekniken utan ska ses som ett värdefullt komplement.

Denna studie har även visat styrkan med samarbete över såväl kommungränser som internationella gränser. Väderradaranläggningen i Dalby täcker in 12 kommuner i Skåne, vilket gör den till en regional anläggning som öppnar upp för nya regionala samarbeten. VA SYDs samarbete med bl.a. Trelleborgs och Svedalas kommuner har visat på exempel hur X-band teknikens styrkor kan visa lokala skyfall, som regnet i Trelleborg den 11:e augusti. Ett regionalt mätnätverk av nederbördsrämmätare är ett framtida samarbetsprojekt som är intressant.

Även internationella samarbeten har inletts med danska HOFOR/BIOFOS under året. Analysen av ett framtida varningssystem visade på den potential och den styrka en gemensam radarbild kring Öresund skulle innebära. Då flera väderradaranläggningar täcker större arealer och ser kraftiga regnområden längre tid i förväg. Studien visade att VA SYD

radarn kan ge i bästa fall 0,5-1 timme förvarning medan med ett samarbete med HOFOR/BIOFOS och kan större nederbördsområden tidigare förutsatt regnen kommer västerifrån. Det är utopiskt att förutsäga skyfall (på någorlunda rätt plats) av denna typ flera timmar i förväg baserat enbart på radarobservationer och manuell bedömning d.v.s. utan (fysikaliskt baserad) extrapolering framåt i tiden eller annan prognosering. Utmaningen är att få ett varningssystem som stämmer med verkligheten.

Att använda X-band radarn för att få skarpare prognoser, genom integration med existerande högupplösta prognosprodukter, är därmed ett spännande utvecklingsspår. Ett nästa steg är att inleda ett större projekt där X-band radarn integreras med olika andra nederbördsprodukter, både observationer och prognoser, som sedan appliceras för olika VA-tekniska och hydrologiska ändamål. Ett internationellt samarbete är en grundförutsättning för framtida utveckling av dels bättre varningssystem, dels för ett ökat erfarenhets- och inspirationsutbyte för väderradartillämpningar inom VA väderstyrning på reningsverk och pumpstationer.

7 Referenser

- Antonini, A.; Melani, S.; Corongiu, M.; Mazza, A.; Ortolani, A. Radar Networking over the Tyrrhenian Sea. In Proceedings of the 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology ERAD 2014, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1–5 September 2014.
- Antonini, A.; Melani, S.; Corongiu, M.; Romanelli, S.; Mazza, A.; Ortolani, A.; Gozzini, B. On the Implementation of a Regional X-Band Weather Radar Network, *Atmosphere*, issue 8, vol. 25, 2017
- Assess the Current and Potential Capabilities of Weather Radars for the Use in WMO Integrated Global Observing System (WIGOS). In Proceedings of the Joint Meeting of the CIMO Expert Team on Remote Sensing Upper-air Technology and Techniques and CBS Expert Team on Surface Based Remote Sensing, Geneva, Switzerland, 23–27 November 2009. Available online: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/meetings/Upper-Air/ET-RSUATT-2/DocPlan.html>
- Austin, G., Austin, L., 1974. The use of radar in urban hydrology. *J. Hydrol.* 22 (1–2), 131–142.
- Beeneken, T., Erbe, V., Messmer, A., Reder, C., Rohlfing, R., Scheer, M., Schuetze, M., Schumacher, B., Weilandt, M., Weyand, M., 2013. Real time control (rtc) of urban drainage systems-a discussion of the additional efforts compared to conventionally operated systems. *Urban Water J.* 10 (5), 293–299.
- Berne, A. and Krajewski, W. F.: Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential?, *Adv. Water Resour.*, 51, 357–366, doi:10.1016/j.advwatres.2012.05.005, 2013.
- Bringi, V. N. and Chandrasekar, V.: *Polarimetric Doppler Weather Radar*, Cambridge University Press, 2001.
- Browning, K.A. Meteorological applications of radar, *Report on Progress in Physics*, 41 (1978), pp. 761-800.
- By- og Landskabsstyrelsen (2009) *Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg*. ISBN 978-87-92548- 28-3. Utgivare: By- og Landskabsstyrelsen
- CASA, 2018. <http://www.casa.umass.edu/main/research/urbantestbed>, hämtad 2018-12-13.
- Chandrasekar, V.; Wang, Y.; Chen, H. The CASA quantitative precipitation estimation system: A five year validation study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012, 12, 2811–2820.
- Collier, C. G.: *Applications of Weather Radar Systems: A Guide to Uses of Radar Data in Meteorology and Hydrology*, 2nd ed., Wiley, Chichester, England, 1996.

- Delrieu, G., Braud, I., Berne, A., Borga, M., Boudevillain, B., Fabry, F., Freer, J., Gaume, E., Nakakita, E., Seed, A., Tabary, P., and Uijlenhoet, R.: Weather radar and hydrology, *Adv. Water Resour.*, 32, 969–974, doi:10.1016/j.advwatres.2009.03.006, 2009.
- Doviak, R. J. and Zrnić, D. S.: Doppler Radar and Weather Observations, Academic San Diego Calif, 33, 562, 1993.
- Einfalt, T.: A User Perspective in Germany: What is Expected by Agencies and Government from Radar Data?, *Int. J. River Basin Management*, 1, 1–5, 2003
- Einfalt, T., Arnbjerg-Nielsen, K., Golz, C., Jensen, N.-E., Quirmbach, M., Vaes, G., and Vieux, B.: Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage, *J. Hydrol.*, 299, 186–202, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.004, 2004
- Furuno (2018) – Weblänk: <https://www.furuno.com/en/systems/meteorological-monitoring/WR-2100>. Daterad 2018-12-04
- Gires, A., Onof, C., Maksimovic, C., Schertzer, D., Tchiguirinskaia, I., Simoes, N., 2012. Quantifying the impact of small scale unmeasured rainfall variability on urban runoff through multifractal downscaling: a case study. *J. Hydrol.* 442–443, 117– 128
- Giuseppina Garofalo, Andrea Giordano, Patrizia Pirob, Giandomenico Spezzano, Andrea Vinci. (2017) A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems. *Journal of Network and computer applications* 78 (2017) 30-42
- Goormans, T., Willems, P., 2013. Using local weather radar data for sewer system modeling: case study in flanders, belgium. *J. Hydrol. Eng.* 18, 269–278.
- Han, D., Cluckie, I., Griffith, R., Austin, G., 2000. Using weather radars to measure rainfall in urban catchments. *J. Urban Technol.* 7 (1), 85–102.
- Harrold T W (1965) Meteorological Office Scientific Paper No 21 (London: HMSO)
- HOFOR/BIOFOS (2018) – Anvendelsen af radardata hos BIOFOS-ønsker til brug af radar, og andre data og erfaringer med Furuno radar. Presentation vid radarprojektmøte i Köpenhamn Mars 2018 av Carsten Thirsing från Biofos.
- Kessler E 1961 Proc. 9th Weather Radar Conf. (Boston: Am. Meteor. Soc.) pp13-36
- Kumjian, M. R., 2013: Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables. *J. Operational Meteor.*, 1 (19), 226-242, doi: <http://dx.doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119>.
- Krajewski, W. F. and Smith, J. A.: Radar hydrology: Rainfall estimation, *Adv. Water Resour.*, 25, 1387–1394, doi:10.1016/S0309-1708(02)00062-3, 2002.

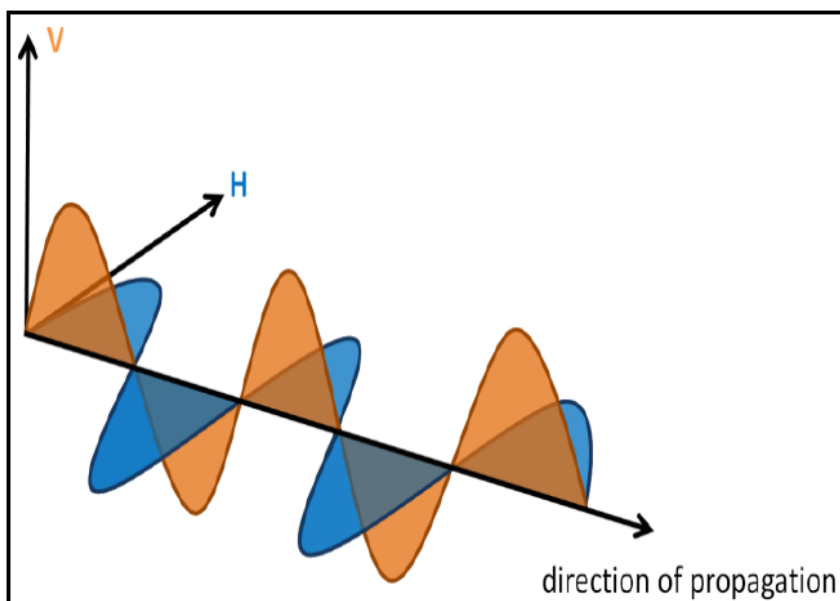
- Krajewski, W. F., Villarini, G., and Smith, J. A.: Radar-Rainfall Uncertainties: Where are We after Thirty Years of Effort?, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 91, 87–94, doi:10.1175/2009BAMS2747.1, 2010.
- Kramer, S., Verworn, H., 2009. Improved radar data processing algorithms for quantitative rainfall estimation in real time. *Water Sci. Technol.* 60, 175–184
- Lengfeld, K., Clemens, M., Münster, H., and Ament, F.: PATTERN: Advantages of High-Resolution Weather Radar Networks, in: *Proceedings of American Meteorological Society 36th Conference on Radar Meteorology*, Breckenridge, CO, USA, 16–20 September 2013.
- Lengfeld, K.; Clemens, M.; Münster, H.; Ament, F. Performance of high-resolution X-band weather radar networks—The PATTERN example. *Atmos. Meas. Tech.* 2014, 7, 4151–4166.
- Marshall, J. S. and Palmer, W. M.: The distribution of raindrops with size, *J. Meteor.*, 5, 165–166, 1948.
- Meischner, P.: *Weather Radar Principles and Advanced Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- Michaelides, S.: *Precipitation: Advances in measurement, estimation and prediction*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- Mishra, K. V., Krajewski, W. F., Goska, R., Ceynar, D., Seo, B.-C., Kruger, A., Niemeier, J. J., Galvez, M. B., Thurai, M., Bringi, V. N., Tolstoy, L., Kucera, P. A., Petersen, W. A., Grazioli, J., and Pazmany, A. L.: Deployment and Performance Analyses of High-Resolution Iowa XPOL Radar System during the NASA IFloodS Campaign, *J. Hydrometeorol.*, 17, 455–479, doi:10.1175/JHM-D-15-0029.1, 2016.
- Miljöstyrelsen Danmark (2012) METSAM, MiljøEffektiv Teknologi til intelligent SAMstyring af spildevandssystemer . Utgivare: Miljöstyrelsen Danmark.
- Nielsen et al (2009) Improvning weather radar precipitation estimates by combining two types of radars. *Atmospheric research* 139 (2014), s. 36–45.
- Rinehart, R. E.: *Radar for Meteorologists*, 5th ed., Rinehart Publications, 2010.
- Schellart, A., Liguori, S., Kramer, S., Saul, A., Rico-Ramirez, M.A., 2014. Comparing quantitative precipitation forecast methods for prediction of sewer flows in a small urban area. *Hydrol. Sci. J.* 59 (7), 1418–1436.
- Schellart, A., Shepherd, W., Saul, A., 2012. Influence of rainfall estimation error and spatial variability on sewer flow prediction at a small urban scale. *Adv. Water Resour.* 45, 65–75
- Shah, S.; Notarpietro, R.; Branca, M. Storm Identification, Tracking and Forecasting Using High-Resolution Images of Short-Range X-Band Radar. *Atmosphere* 2015, 6, 579–606.

- Sharif, H. O. and Ogden, F. L. 2014. Mass-conserving remapping of radar data onto two-dimensional cartesian coordinates for hydrologic applications. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 2190-2202.
- Simpson, M. J. and Fox, N. I. 2018. Dual-polarized quantitative precipitation estimation as a function of range. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 3375-3389
- SMHI (2018) smhi.se: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/rotblota-1.17339> (18-10-17)
- Smith, J.A., Baeck, M.L., Meierdiercks, K.L., Miller, A.J., Krajewski, W.F., 2007. Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Adv. Water Resour.* 30, 2087–2097.
- Smith, J. A. and Krajewski, W. F.: Estimation of the mean field bias of radar rainfall estimates, *J. Appl. Meteorol.*, 30, 397–412, 1991.
- Thorndahl, S., Beven, K. J., Jensen, J. B., and Schaarup-Jensen, K.: Event based uncertainty assessment in urban drainage modelling, applying the GLUE methodology, *J. Hydrol.*, 357, 421–437, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.027, 2008.
- Thorndahl, S., Einfalt, T., Willems, P., Ellerbæk Nielsen, J., 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, 1359-1380.
- Thorndahl, S. and Rasmussen, M. R.: Marine X-band weather radar data calibration, *Atmos. Res.*, 103, 33–44, doi:10.1016/j.atmosres.2011.04.023, 2012.
- Tilford, K.A., Fox, N.I., Collier, C.G., 2002. Application of weather radar data for urban hydrology. *Meteorol. Appl.* 9 (1), 95–104.
- Trabal, J. M., Colom-Ustariz, J., Cruz-Pol, S., Pablos-Vega, G. A., and McLaughlin, D. J.: Remote Sensing of Weather Hazards Using a Low-Cost and Minimal Infrastructure Off-the-Grid Weather Radar Network, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 2541–2555, 2013
- van de Beek, C. Z., Leijnse, H., Stricker, J. N. M., Uijlenhoet, R., and Russchenberg, H. W. J.: Performance of high-resolution X band radar for rainfall measurement in The Netherlands, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 205–221, doi:10.5194/hess-14-205-221, 2010.
- VA-verket Malmö (1998). Användning av nederbörds- och avrinningsprognoser för styrning av avloppssystem.
- Vezzaro, L., Grum, M., 2014. A generalised dynamic overflow risk assessment (dora) for real time control of urban drainage systems. *J. Hydrol.* 515, 292–303.
- Villarini, G. and Krajewski, W. F.: Review of the different sources of uncertainty in single polarization radar-based estimates of rainfall, *Surv. Geophys.*, 31, 107–129, doi:10.1007/s10712-009-9079-x, 2010.

- Villarini, G., Smith, J.A., Baeck, M.L., Sturdevant-Rees, P., Krajewski, W.F., 2010. Radar analyses of extreme rainfall and flooding in urban drainage basins. *J. Hydrol.* 381 (3–4), 266–286.
- Wang, Y och Chandrasekar, V.: Quantitative Precipitation Estimation in the CASA X-band Dual-Polarization Radar Network. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, okt. 2010 vol 27 p. 1665-1667
- Wilson, J. W. and Brandes, E. A.: Radar measurement of rainfall – a summary, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 60, 1048–1058, 1979.
- Willems, P.: Stochastic description of the rainfall input errors in lumped hydrological models, *Stoch. Env. Res. Risk A.*, 15, 132–152, doi:10.1007/s004770000063, 2001.
- World Meteorological Organization 1966 Tech. Note No 78 (Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization)
- Yuan, J., Tilford, K., Jiang, H., Cluckie, I., 1999. Real-time urban drainage system modelling using weather radar rainfall data. *Phys. Chem. Earth Part B* 24 (8), 915–919.

Bilaga 1: Beskrivning av polarimetriska radarvariabler

Konventionell singelpolarisation radar mäter tre variabler: radar reflektivitetsfaktor (Z), som är proportionell mot potensen av erhållen signal, dopplerhastighet (V_r), som bestäms av en potensviktad växling i medeldopplerfrekvens för målet för radarns mätning som involverar erhållen signalfas och dopplerspektrumbredd (W), som är ett mått på variabiliteten för dopplerhastigheten i mätvolymen. Bipolarisationsradar kan registrera dessa tre variabler både horisontellt (H) och vertikalt (V) (se Figur 8.1). Meningsfull information erhålls genom att jämföra amplituder och faser på signalerna som har reflekterats för H och V polarisationer, som ger ett nytt set av variabler. Skillnaden i logaritmisk reflektivitetsfaktorer för H och V polarisationer (t.ex. $Z_H - Z_V$, där Z_H och Z_V uttrycks i dBZ) kallas differentiell reflektivitet eller Z_{DR} . Genom att ta skillnaden i fasväxling mellan de två polarisationerna ger differentiell fasväxling eller ϕ_{DP} . Genom att beräkna korrelation mellan returnerad signal för H och V polarisation ger co-polär korrelationskoefficient, benämnd ρ_{hv} i vetenskaplig litteratur och CC i vanlig kommunikation. Fysikalisk tolkning av dessa variabler för olika typer av atmosfäriska fenomen är viktiga för meteorologiska applikationer och beskrivs av Kumjian (2013).

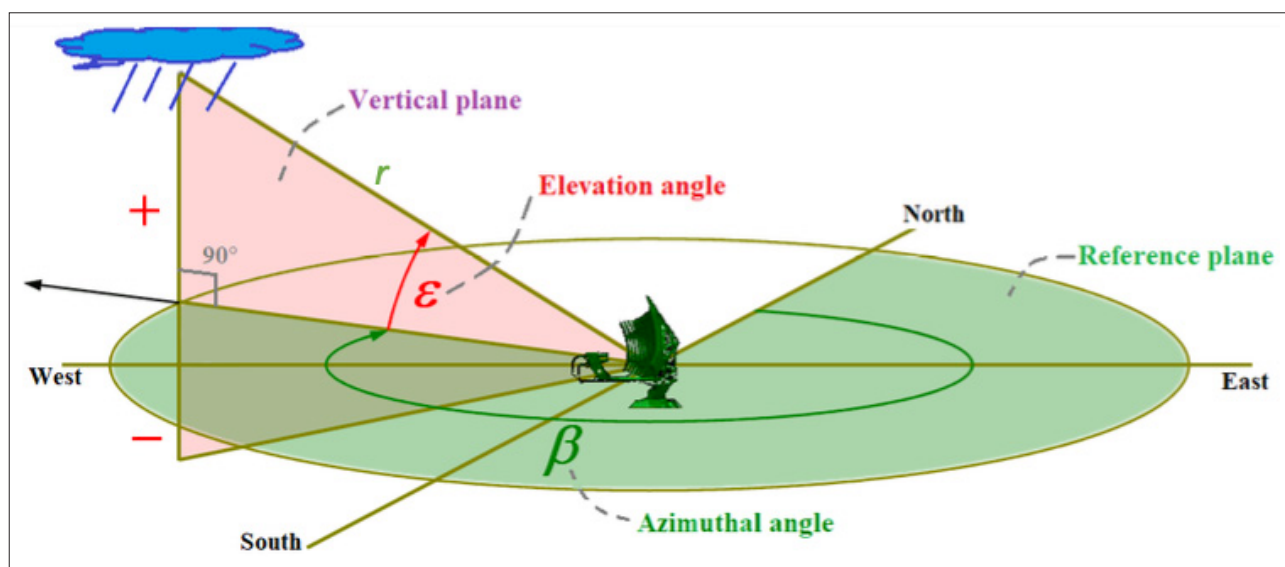


Figur 8.1 Schematisk illustration av samtidig utbredning av horisontell polarisering (blå) och vertikal polarisering (orange) för elektromagnetiska vågor. Planet i axlarna H och V kallas "polarisationsplan" och är normal till riktningen för vågutbredning (Kumjian, 2013)).

Bilaga 2: Terminologi

Dämpning: minskning av amplitud för en signal, elektrisk ström eller annan svängning.

Azimut: En azimuth, som mäts i grader eller radianer, är ett vinkelmått i ett sfäriskt (polärt) koordinatsystem. Vektorn från en observatör (radarn) till en viss punkt projiceras vinkelrät på ett referensplan; vinkeln mellan den projicerade vektorn och en referensvektor (norr) i referensplanet benämns azimuth (se Figur 8.2).



Figur 8.2 Skiss som illustrerar definitionen av azimuth (β) och höjdvinkel (ϵ) för en väderradar.

Kartesiskt koordinatsystem: Ett rektangulärt koordinatsystem där varje punkt i planet definieras via ett talpar (x,y) som avstånd från två vinkelräta axlar.

Höjdvinkel: Höjdvinkeln är vinkeln mellan horisontalplanet och siktlinjen till en given punkt, mätt i ett vertikalt plan. Referensriktningen (d.v.s. en höjdvinkel av noll grader) är en horisontell linje i riktning mot horisonten vilken utgår från antennen (se Fig. Bilaga 2).

Planpolära koordinater: De polära koordinaterna för en punkt ges av (r, β), där r är avståndet från origo (radarn) och ϵ är vinkeln för vektorn (medurs från referensriktningen, norr).

Sfäriskt (3D polärt) koordinatsystem: Ett koordinatsystem för en tre-dimensionell rymd där en punkts position bestäms av tre värden (r, β, ϵ): det radiella avståndet från origo (radarn) till punkten, den vertikala vinkeln mätt i förhållande till zenit (alternativt höjdvinkeln, vilken är 90 grader minus den vertikala vinkeln från zenit) och azimuthvinkeln för den ortogonala projiceringen av punkten (och dess vektor) på ett referensplan.

Bilaga 3: SCN fil struktur

MATLAB programmering användes för modifiering och validering av data som beskrivs i följande text. Data kunde läsas tack vare det binära formatet i .scn filen. Nerladdning av data kunde göras baserat på strukturen av alla .scn filer indikerat av filnamnet. Strukturen på filnamnet för .scn filerna är följande:

[Starttid: ÅÅÅÅMMDD_ttmss] [Höjdnivå: 01, 02, 03, ...]

[Moduleringssystem: 00, 01, 02, ...] [Extension (scn)]

T.ex. 20180827_210100_01_02.scn.



Box 14057 • 167 14 Bromma
Tfn 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se