

Kombinerade X-bandsanläggningar som väderradar

Jämförelse med etablerade metoder för regnmätning

Nicholas South
Hans Hammarlund
Mattias Palo
Simon Granath
Emma Falk
Susanne Steen Kronborg
Andreas Bengtsson
Sofia Dahl
Sven Bengtsson
Henrik Aspegren
Jonas Olsson
Remco van de Beek
Rolf Larsson
Ronny Berndtsson
Hasan Hosseimi
Hossein Hashemi

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.

Författarna är ensamt ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se

RAPPORTENS TITEL	Kombinerade X-bandsanläggningar som väderradar. Jämförelse med etablerade metoder för regnmätning
TITLE OF THE REPORT	Multiple X-band radar data for operational use in public water utility sector. Comparison with established methods of rain measurements
FÖRFATTARE	Nicholas South, Hans Hammarlund och Mattias Palo, Tyréns, Simon Granath, Emma Falk och Susanne Steen Kronborg, VA SYD, Andreas Bengtsson, Sofia Dahl och Sven Bengtsson, NSVA, Henrik Aspegren, Sweden Water Research, Jonas Olsson och Remco van de Beek, SMHI, Rolf Larsson, Ronny Berndtsson, Hasan Hosseimi och Hossein Hashemi, Lunds tekniska högskola
RAPPORTNUMMER	2022-10
ANTAL SIDOR	52
SAMMANDRAG	Studien är en första utvärdering i Sverige av X-bandsteknik som väderradar. Den visar hur flera X-bandsradaranläggningar kan samarbeta och hur regninformationen kan användas för avrinningssimulering. Tekniken öppnar nya utvecklingsmöjligheter för VA-branschen. Det gäller inte minst driften av ledningsnätet, väderstyrning av ledningsnät och reningsverk, samt utvecklingen av publika varningssystem.
SUMMARY	In this research report, a new methodology has been developed in order to integrate several X-band radar data sets in to one complete set. Furthermore, a direct and an indirect evaluation have been conducted compared to stationary rain gauges and C-band radar. In the indirect analysis, the indata sets were integrated into runoff models for Ellinge and Lundåkra WWTP where the results were compared to measured incoming flow to the sewage plants.
SÖKORD	X-band väderradar, väderstyrning, varningssystem, nederbörds-mätning, C-band väderradar, flödesmätning
KEYWORDS	X-band weather radar, weather based control, warning systems, rain gauge measurements, C-band weather radar, and flow measurements
MÅLGRUPPER	VA-huvudmän, VA-ingenjörer, konsulter, myndigheter, vattenvårdsföreningar och länsstyrelser
RAPPORT	Finns att hämta hem som pdf från Vattenbokhandeln. https://vattenbokhandeln.svensktvatten.se/
UTGIVNINGÅR	2022
UTGIVARE	© Svenskt Vatten AB
REFERENS	South N., Hammarlund H., Palo M., Granath S., Falk E., Steen Kronborg S., Bengtsson A., Dahl S., Bengtsson S., Aspegren H., Olsson J., van de Beek R., Larsson R., Berndtsson R., Hosseimi H. och Hashemi H. (2022). Kombinerade X-bandsanläggningar som väderradar. Jämförelse med etablerade metoder för regnmätning. SVU-rapport 2022-10. Stockholm, Svenskt Vatten.

Om projektet

PROJEKTNUMMER	21-106
PROJEKTETS NAMN	Test av praktisk och teoretisk metodik av X-bandradar teknik
PROJEKTETS FINANSIERING	Svenskt Vatten Utveckling

Förord

Detta projekt utgör en första validering av X-bandsradar i Sverige, hur flera X-bandsradaranläggningar kan samarbeta och hur regninformationen kan tillämpas för avrinningssimulering. Den här tekniken 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.

Rapporten har två resultatdelar för att analysera X-bandsteknikens prestanda jämfört med andra mätmetoder för regn (C-bandsradar och stationära regnmätare). Den innehåller både en direkt jämförelse mellan X-band och stationär regnmätning och en indirekt jämförelse mellan de olika regnmätarmetoderna som indata i en avrinningssimulering. Rapporten avslutas med en diskussion och slutsatsdel som redovisar styrkor och svagheter med X-bandstekniken i förhållande till mer traditionella metoder inom regnmätning.

Arbetsgruppen har haft följande sammansättning:

Lunds tekniska högskola (LTH): Seyyed Hasan Hosseini, Hossein Hashemi, Rolf Larsson och Ronny Berndtsson.

NSVA: Andreas Bengtsson, Sven Bengtsson och Sofia Dahl.

SMHI: Jonas Olsson och Remco van de Beek.

Tyréns: Nicholas South, Mattias Palo (stöd till avrinningssimulering VA SYD) och Hans Hammarlund (stöd till avrinningssimulering VA SYD).

Sweden Water Research: Henrik Aspegren.

VA SYD: Simon Granath, Susanne Steen Kronborg och Emma Falk.

Nicholas South

Projektledare

Innehåll

Förord	2
Sammanfattning	4
Summary	5
Förkortningar	6
Förklaring av vetenskapliga begrepp	7
1 Introduktion	8
1.1 Problembild och målsättning med projektet	9
1.2 Genomförande	9
2 Uppbyggnad av piloter för validering av resultat	10
2.1 System för uppskattning av regn	10
2.2 Avrinningsmodeller – Ellinge och Lundåkra	11
2.3 Urval av regnhändelser	13
3 Regnhändelsernas egenskaper	16
4 Utveckling av regnmodeller baserat på två X-bandsradar	20
4.1 Nederbördsuppskattning med modeller för flera X-bandsradar	20
5 Direkt validering – jämförelse av radaruppskattat regn med data från markbaserade regnmätare	23
5.1 Metodik	23
5.2 Resultat	24
6 Indirekt validering – jämförelse med avrinningssimulering	26
6.1 Metodik	26
7 Statistiska analysresultat för avrinningssimuleringen	29
8 Diskussion	34
9 Slutsatser	37
9.1 Förslag till framtida arbete	38
Referenser	39
Bilaga A HDF5 dataformat	42
Bilaga B Detaljer kring regnberäkning	43
Bilaga C GIS ASCII dataprodukter	44
Bilaga D Namnstruktur för ASCII-filerna	45
Bilaga E Resultat från NSVA och VA SYD	46

Sammanfattning

Studien är en första utvärdering i Sverige av X-bandsteknik som väderradar. Den visar hur flera X-bandsradaranläggningar kan samarbeta och hur regninformationen kan användas för avrinningssimulering. Tekniken öppnar nya utvecklingsmöjligheter för VA-branschen. Det gäller inte minst driften av ledningsnätet, väderstyrning av ledningsnät och reningsverk, samt utvecklingen av publika varningssystem.

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.

Under 2018 genomfördes den första forskningsstudien med X-bandsradar (XR) inom VA-branschen i Sverige av VA SYD, LTH, Lunds universitet, Sweden Water Research och SMHI. Preliminära resultat presenterades bland annat i SVU-rapport 2019-3, Väderradarteknik inom VA-området – test av metodik. Där föreslogs det att en kombination av radarobservationer från ett nätverk av flera XR skulle vara en lösning på problemen när det gäller större fel och inkonsekventa resultat i regnuppskattningar från användning av enstaka XR.

I den här studien sammanlänkas alla XR-data i den överlappande zonen från två XR-anläggningar i Skåne. I projektet utvecklades två modeller för att beräkna regn, dels en empirisk linjär modell (REG), dels en helt datadriven modell som använder ett artificiellt neuralt nätverk (ANN). Beräknade regnvärden utvärderades på två sätt för att analysera X-bandsteknikens prestanda jämfört med andra mätmetoder för regn. Dels gjordes en direkt jämförelse mellan X-band och stationär regnmätning, dels en indirekt jämförelse mellan de olika regnmätarmetoderna som indata i en avrinningssimulering för två små urbana avrinningsområden, Ellinge och Lundåkra.

Resultaten från den direkta valideringen visade att XR kan användas för att beskriva regn i tid och rum på ett vederhäftigt sätt. Generellt sett förbättrades precisionen när överlappande observationer gjordes med två XR. Den enkla linjära beräkningsmodellen och den datadrivna modellen gav likartade resultat. En slutsats är att precisionen på regnprodukten kan förbättras genom att mer än en radarnivå används och genom att mätavståndet för XR ökas till 70 km.

Resultaten från den indirekta valideringen visade potentialen av att använda regn-data från ANN- och REG-modellerna. I Ellinge avrinningsområde gjordes simuleringar med en lokalt anpassad regnmodell som gav högre precision än simuleringar baserade på markbaserade regnmätare. I Lundåkra avrinningsområde användes en regnmodell som bara delvis var anpassad för det geografiska området, och det påverkade sannolikt resultatet. Där var precisionen vid simuleringarna mer likartad för de olika datakällorna.

I takt med att vi nu kan beskriva regn och dess rumsliga fördelning bättre måste också förståelsen utvecklas för hur avrinningsförloppet ska beskrivas. Exempel på områden som inte har beaktats på ett vederhäftigt sätt i studien är hur avrinningen påverkas av tillskottsvatten till ledningsnätet och av pumpar och magasin som skapar pulslignande resultat som stör den statistiska analysen.

Sammanfattningsvis visar studien att överlappande observationer som görs med två XR möjliggör ännu mer vederhäftiga uppskattningar av regn, och att det fortfarande finns potential att förbättra regndata för användning inom till exempel avrinningssimulering.

Summary

In 2018, the first research study with X-band radar (XR) data in the wastewater treatment sector was conducted by VA SYD, LTH, Lund university, Sweden Water Research and SMHI. Based on the preliminary results that were presented in this report (Hosseini et al., 2020), the conclusion was drawn that a combination of radar observations from several angles (levels) and a network av XR units would be a solution to the issues with data error and inconsistent rain measurement results from the use of a single XR-unit.

In this study, XR-data from NSVA and VA SYD XR-units in Scania (southernmost county in Sweden) is linked together. The purpose with this report is to integrate all XR-data, from double-polarization and several levels, in the overlapping zone from the two XR facilities in Scania. Results are concluded both from an empiric linear regression model (REG) and from a data driven numeric calculation model which uses an artificial neural network (ANN) to calculate 2D rain results with XR technology. Estimated 2D rain results were evaluated with two different methods:

- Direct validation with measured values with stationary rain gauges (tipping buckets)
- Indirect validation with a runoff model for two moderate sized catchments, Ellinge and Lundåkra WWTP catchment, with rain data both from ANN and REG-models and from stationary rain gauges in the area (indirect validation).

The results from the direct validation showed that:

- XR can be used as a method to describe rain over time with adequate quality
- In general, the precision was improved with data overlap from the two XR-data sets
- A linear multi-regression model and an ANN model gives similar results
- The precision of the rain product can be improved by using more than one radar level and by increasing the measurement range for XR-units to 70km.

The results from the indirect validation showed that the potential of using rain data from ANN and REG- models. In the Ellinge WWTP catchment were the runoff simulations conducted in a locally adapted model for representation of rain data, used with improved precision in comparison with stationary rain gauges. In the Lundåkra WWTP catchment the runoff simulations were conducted in an environment which was partially adapted to the local geographic conditions, and this probably had an impact on the results. For the Lundåkra WWTP catchment, the precision during the simulation was better in comparison to the different data sets for Ellinge WWTP catchment.

With the recent upgrades in our possibilities to measure rain and its spatial resolution, the research community and WWTP utilities must improve their understanding of the runoff process with new best practice methods. Two sets of error sources that are presented in the report and have an impact on the results were:

- A description of the extraneous water as a factor. In order to obtain a representative overview of flow levels/rates in the sewage network, both a fast and slow extraneous water component must be integrated in the runoff model. In this study, the sewage network model has integrated this component differently.
- Pumping stations- it is complicated to study the runoff results where there are pumps/ basins in the sewage network which creates a pulse bias that in turn makes statistical analysis more difficult.

In conclusion, overlapping analysis with two XR datasets enables improved rain estimations and possibilities to improve the rain products for applications in the WWTP sector such as runoff simulations.

Förkortningar

ANN	Artificiellt Neurtalt Nätverk, datormodell som används för att kombinera data från de två XR
ASCII	Format för XR regndataprodukter (American Standard Code for Information Interchange)
CR	C-band väderradar
dB	Decibel, logaritmerad skala med basen 10 använd som enhet för radar reflektivitet ($\text{dB Z} = 10 \times \log_{10}(Z)$)
DBZH	Horisontell reflektivitet i dB (XR variabel)
FAR	Falskt alarmförhållande, index som visar andel av tid som en radar visar fel regn
GHz	Gigahertz (GHz), radarfrekvens enhet som visar antal cykler per sekund
GIS	Geografiskt informationssystem
HDF5	Hierarkiskt dataformat version 5, format för rå XR data
KDP	Specifik differentiell fas i $^{\circ} \text{km}^{-1}$ (XR variabel)
L	Regnprodukt baserad på en enstaka vertikal skanning av en XR
MAE	Absolut medelfel (statistiskt kriterium vid simulering av regn)
MSI	Maximal 30-min stationsintensitet, använd som ett mått på extremt regn
NSE	Nash–Sutcliffe effektivitet (statistiskt kriterium för kvalitet på modellering)
PHIDP	Differentiell fas (XR variabel)
POD	Sannolikhet för upptäckt, tidsindex som visar förhållande som en radar visar korrekt regn
RATE	Regnintensitet i mm h^{-1} (regnprodukt)
rBIAS	Relativt fel, index som visar generellt fel i regnuppskattning (vanligtvis i %) i förhållande till observerat regn
REG	Empirisk multilinjär regressionsmodell använd för att kombinera data från två XR
RHOHV	Korrelation mellan horisontell och vertikal reflektivitet (XR variabel)
UTC	Koordinerad universell tid; i Sverige är klockan UTC+1 tim (+2) under normaltid (sommartid)
VRAD	Radiell hastighet i m s^{-1} (XR variabel)
XR	X-band väderradar
Z	Reflektivitet, mått på medeltal av tillbakareflekterad effekt av XR
ZDR	Differentiell reflektivitet mellan horisontella och vertikala värden i dB (XR variabel)

Förklaring av vetenskapliga begrepp

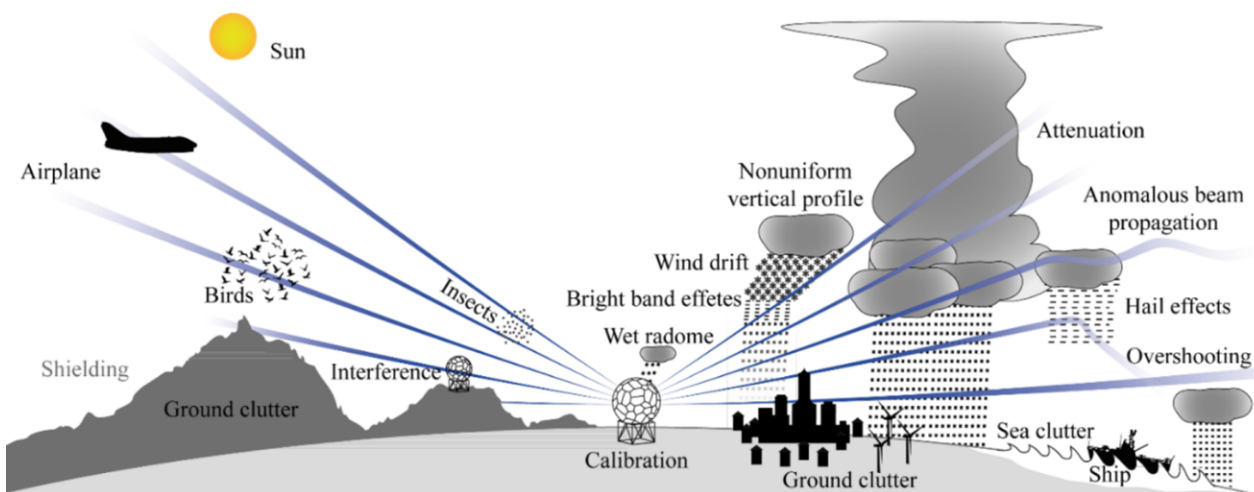
Term	Förklaring
ANN	Artificiellt neuralt nätverk; samlingsnamn för självlärande algoritmer.
Bin	Projektion i horisontalplanet av XR minsta enhet/observationsvolym.
CR	Radar som opererar i frekvensområde 4-8 GHz.
Direkt validering	Jämförelse av radardata med värden från markbaserade regnmätare.
Dubbelpolariserad	Radar med både vertikal och horisontell polarisering.
Dämpning	Mekanism varigenom radarsignalen tappar i styrka.
FAR	Rör frekvensen av felaktig regndetektering, utan hänsyn till storleken på felen.
HDF5	Filformat som används för att lagra data från XR.
Indirekt validering	Jämförelse av resultat mellan hydrauliska modeller med regn-input från markbaserade regnmätare och modeller med input från radardata.
MAE	MAE visar medelstorlek av individuella fel.
POD	Rör frekvensen av korrekt regndetektering, utan hänsyn till storleken på felen.
Radar-bin	Se bin.
RATE	Regnintensitet i mm/h, från radarleverantör, baserat på standardeviationer.
rBIAS	Visar den totala storleken på under- eller överskattning (baserat på positivt eller negativt tecken), men utan specifik information om storleken av de individuella felen, vilka kan ta ut varandra.
REG	Linjär regressionsmodell med flera variabler.
Regnmodell	Modell, baserad på viss princip och utvecklad för speciellt geografiskt område.
Regnprodukt	Kvantitativt uppskattat regn från XR.
XR	Radar som opererar i frekvensområde 8-12 GHz.
Överskjutning	När radarsignalen p.g.a. vinkel och avstånd rör sig ovanför ett regnområde.

1 Introduktion

Regndata som är högupplösta i både tid och rum behövs för prognoser om och modellering av dagvattenflöden och översvämningar i urbana områden (Ochoa-Rodriguez *et al.*, 2015; Thorndahl *et al.*, 2017). En regnmätare är ett rimligt noggrant instrument för att mäta regn i en punkt. Emellertid vet vi att regn kan variera kraftigt både i tid och rum. Av denna anledning kan lokala men betydelsefulla regnhändelser gå obemärkta förbi i områden med gles täckning av regnmätare.

En väderradar skickar och tar emot elektromagnetiska vågor upp till tiotals kilometer bort i atmosfären i den riktning som antennen har under bråkdelar av en sekund. Antennen kan installeras på en höjdpunkt och roteras för att skanna av regn. Vanligtvis är radarns antenn lätt vinklad uppåt för att i möjligaste mån undvika att radarvågorna träffar markytan när radarn roterar.

Under de senaste decennierna har fjärranalys av regn med hjälp av markplacerade väderradarer erbjudit alternativa eller kompletterande regndata med bättre upplösning i tid och rum jämfört med traditionella nätverk av regnmätare. Dock är radardata normalt behäftade med olika felkällor som har att göra med den indirekta mättekniken (se Figur 1.1). Typiska fel är sådana som beror på dämpning av radarsignaler som passerar ett regnområde vilket förhindrar upptäckten av ytterligare regnområde som ligger "bakom" det första regnet. Vidare uppstår typiska fel från överskjutning av målet p.g.a. för hög vinkel i förhållande till regnets nivå och störningar genom terräng, vegetation och byggnader (Einfalt *et al.*, 2004; Van de Beek *et al.*, 2016; Hosseini *et al.* 2020).



Figur 1.1

Möjliga felkällor för radardata. Källa VEVA (2022).

Trots dessa felkällor är väderradar ett av få verktyg som tillhandahåller högupplösta och vältäckande regndata, vilket är ovärderligt för olika tillämpningar som t.ex. avrinningsmodellering och översvämningssprognoser. Därför har också antalet hydrologiska studier som bygger på regnradar ökat kraftigt under de senaste decennierna (Kumjian, 2013; Thorndahl *et al.*, 2017).

I Sverige har SMHI sedan länge använt sig av nationellt täckande C-band radarer (CR) som efterhand uppgraderats från enkel till dubbel polarisering (se avsnitt 2.3). Utöver detta har VASYD och NSVA, som ansvarar för en stor del av kommunernas VA i västra Skåne, tillsammans med LTH investerat i Sveriges första nätverk av dubbelpolariserade X-band radarer (XR). En XR installerades i Dalby 2019 och en i Helsingborg 2020. Sweden Water Research och SMHI har också deltagit i detta samarbete som inkluderat

utvärdering och utveckling av tekniken sedan en första pilotstudie ägde rum 2018 (*South et al., 2019; Hosseini et al. 2020*).

I jämförelse med CR arbetar XR med en högre frekvens (8-12 jämfört med 4-8 GHz) och kortare våglängd (2-4 jämfört med 4-8 cm) och kan sålunda detektera mindre regndroppar. Genom detta ger XR mer detaljerade uppskattningar av regn, dock på bekostnad av mer dämpning av radarvågorna. Dessa förhållanden begränsar användningen av XR till kortare avstånd (50-70 km radie) men gör samtidigt att man kan använda mindre antenner vilket ger lägre kostnader för installation och drift jämfört med CR (100-130 km radie)

Mjukvara från tillverkaren översätter radarmätningarna till egenskaper hos radarns mål (baserat på dielektriska egenskaper som beror av fördelningen av regndropparnas storlek), vilket i sin tur kan relateras till regnintensitet.

Med tanke på ovanstående kan billiga högfrekventa XR förbättra observationer av regn i tid och rum för urbanhydrologiska tillämpningar (*Lengfeld et al., 2014; Thorndahl et al., 2017*). För att minska felaktiga uppskattningar vilka kan orsaka dålig prestanda för en enskild XR har tidigare studier föreslagit att kombinera flera XR med observationer från konventionella regnmätare (*Wang et al., 2013*), eller med andra typer av radarer (*Lengfeld et al., 2014; Lengfeld et al., 2016; Hosseini et al., 2020*). Dessutom har användning av dubbelpolariserade radarer, i stället för enkelpolariserade, rapporterats ge bättre uppskattningar av nederbörds mängd. Till exempel visades bättre prestanda från en studie i USA av regn på långa avstånd med hjälp av dubbelpolarisering jämfört med enkelpolarisering (*Simpson and Fox, 2018*). Teknik som bygger på dubbelpolarisering introducerades för konventionella S- och C-band radar för flera decennier sedan och har blivit vanliga under de senaste 10-20 åren. Dubbelpolariserande XR har också blivit vanligare och behöver därför studeras närmare.

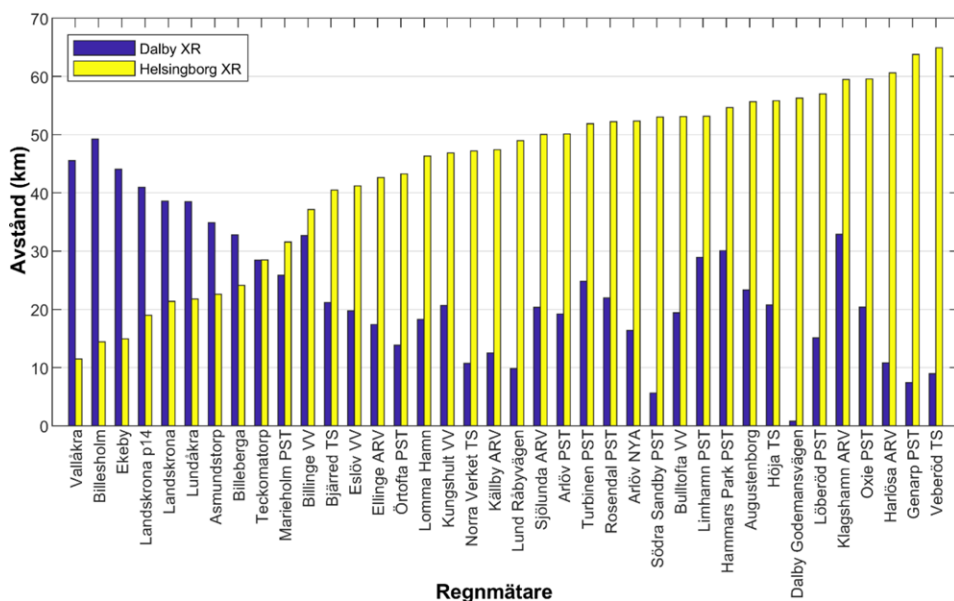
1.1 Problembild och målsättning med projektet

Baserat på preliminära resultat från studier av den första dubbelpolariserande XR i Sverige (*Hosseini et al., 2020*), föreslogs det att en kombination av radarobservationer från flera vinklar (nivåer) och ett nätverk av flera XR skulle vara en lösning på problemen vad gäller större fel och inkonsekventa resultat i regnuppskattningar från användning av enstaka en-nivå XR. Syftet med den nu aktuella studien är att sammanlänka alla data, från dubbelpolarisering och flera nivåer, i den överlappande zonen från två XR i södra Sverige. Detta skulle kunna resultera i en förbättrad regnprodukt. Med regnprodukt menas ett kvantitativt uppskattat regn från XR. Det främsta målet är att utveckla metoder för att kunna kombinera data som kommer från flera XR. Användning av XR blir allt vanligare i de nordiska länderna exempelvis för analys av flöden till reningsverk och kvantifiering av bräddningar.

1.2 Genomförande

I föreliggande rapport redovisas dels en empirisk linjär regressionsmodell (REG) och dels en helt datadriven beräkningsmodell som använder ett artificiellt neuralt nätverk (ANN) för att beräkna areella regn m.h.a. XR-mätningar. Beräknade areella regn utvärderades på två sätt:

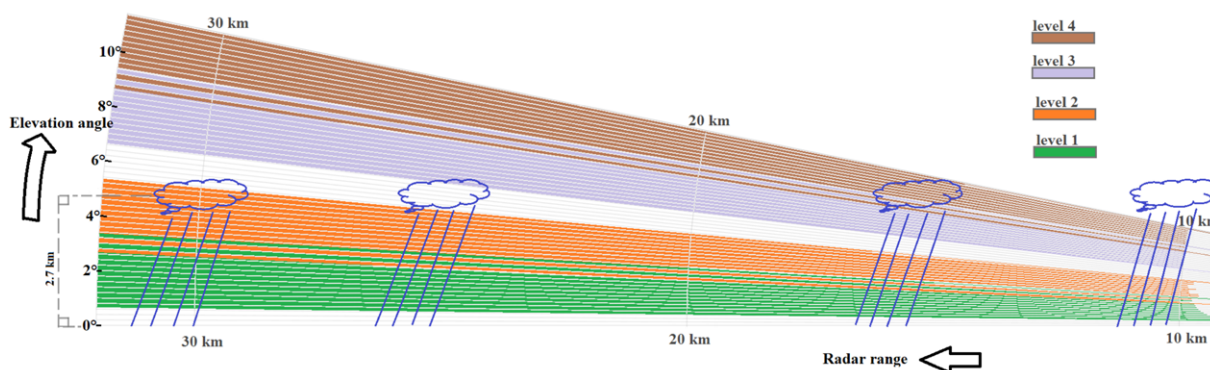
- direkt jämförelse med lokala in-situ värden från markbaserade regnmätare av typ tipping bucket (direkt validering)
- jämförelse med avrinningsmodellering för två små urbana avrinningsområden, Ellinge och Lundåkra, med regndata dels från ANN och REG-modellerna och dels från regnmätare i området (indirekt validering).



Figur 2.2

Avstånd mellan Dalby respektive Helsingborg XR och de 38 regnmätarna av typ tipping bucket som ligger inom det område som täcks av radarn. På den horisontella axeln tillhör de första nio stationerna NSVA medan resterande 29 tillhör VA SYD.

Radardata för undersökningsperioden fanns tillgängliga från en nivå för Helsingborgs XR motsvarande en höjdinkel av 2 grader och från fem nivåer för Dalbys XR motsvarande höjdvinklar 1,5, 2, 4, 6 och 8 grader. En illustrativ bild över hur detta ser ut i praktiken visas i Fig. 2.3.



Figur 2.3

Illustration av höjdvinklar från radar och hur det påverkar mätning av regn (South et al., 2019).

Från och med maj 2021, konverterades data från de båda XR till formatet HDF5 för mer praktisk lagring och bearbetning. Varje HDF5 fil motsvarar en minut och innehåller data från en XR och flera skanningar (360 grader rotation av antennen med svep på cirka 0,4-0,5 grader) för olika höjdvinklar. Mer detaljer finns i Bilaga A.

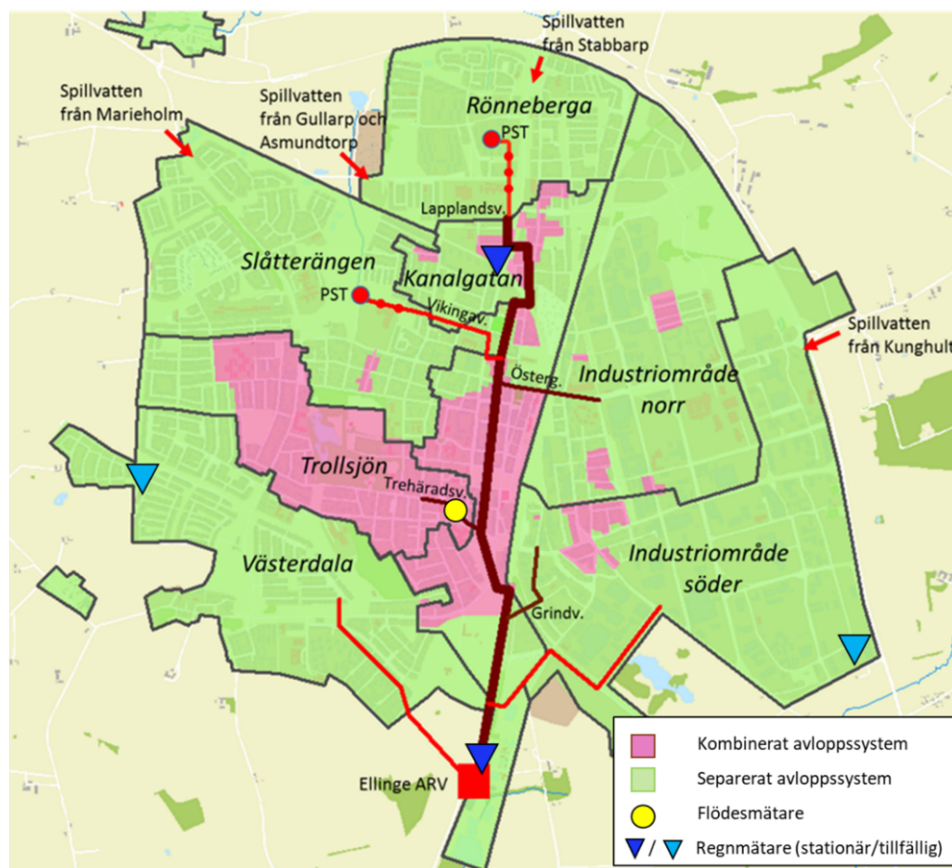
CR data (2kmx2km) från det nationella nätverket extraherades för områdena och tidsperioden för jämförelse. Det bör understrykas att C-band radardatan främst är anpassad för storskalig regnanalys över hela landet och inte småskalig radarmodellering som genomfördes i denna studie. C-band radardatan är därför med som en jämförelse men är egentligen inte jämförbar med lokala mätningar med regnmätare eller XR.

2.2 Avrinningsmodeller – Ellinge och Lundåkra

För utvärdering av de studerade areella regnen med stöd av hydrauliska avrinningsmodeller valdes två urbana avrinningsområden ut, Ellinge ARV upptagningsområde i Eslövs kommun respektive Lundåkra ARV upptagningsområde i Svalövs och Landskronas kommuner. Båda områdena valdes ut utifrån att det fanns en befintlig hydraulisk modell över avrinningsområdet samt att de låg inom räckvidden för de båda XR.

Avrinningsmodellen för Ellinge ARV upptagningsområde är upprättad i DHI:s programvara Mike+ och omfattar det spillvattenförande avloppssystemet för bl.a. Eslövs tätort, Marieholm och Örtofta. Avloppssystemet är till största delen uppbyggt med skilda ledningar för spill – resp. dagvatten, men ca 15 % avloppssystemet i de äldre delarna av Eslövs tätort är kombinerat, dvs spill- och dagvatten avleds i samma ledning. En översiktsbild visas i figur 2.4.

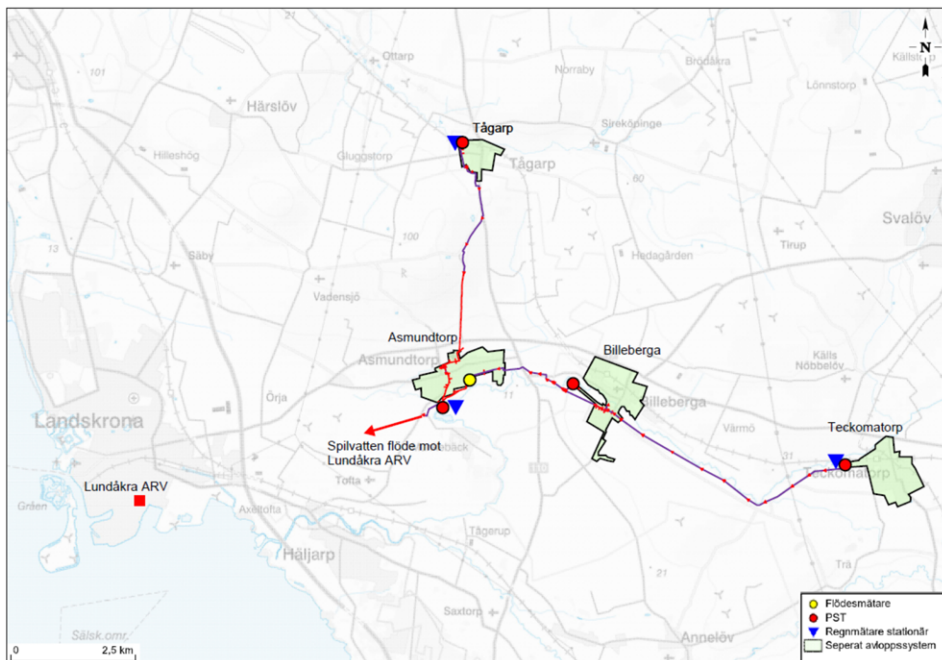
Under sommaren 2021 var ett antal portabla flödesmätare utplacerade i ledningsnätet som tillsammans med data från bl.a. pumpstationer och reningsverk utgör underlag för kalibrering av modellen. För projektet valdes den mätpunkt och delområde med störst andel snabb avrinning ut, vilket visas i figur 2.4. Delområdet, kallat Trollsjön, är ca 65 ha varav 90 % är kombinerat, flödesmätaren var placerad i en ledning med dimensionen 800 mm. Vid studiens start var modellens östra delar redan kalibrerad avseende andelen hårdgjord yta, men ej det utvalda delområdet. Syftet med piloten för Ellinge var att undersöka om XR möjliggör en bättre kalibrering av den snabba regnresponsen än kalibrering enbart mot regnmätare.



Figur 2.4
Delområdet Trollsjön,
det studerade
avrinningsområdet för
Ellinge.

Avrinningsmodellen uppströms Lundåkra ARV är upprättad i Mike+ och beskriver spillvattensystemet med pumpstationer, öppna magasin, tryckledningar, självfallsledningar och överföringsledningar inom och mellan orterna Tågarp, Billeberga, Teckomatorp och Asmundtorp. En översiktsbild över avloppsområdet visas i figur 2.5. Den här modellen täcker ett större avrinningsområde än den för Ellinge ARV. I samband med att modellen upprättades kalibrerades den med hjälp av flödesmätningar samt uppmätta regn från två regnmätare av typen tipping bucket placerade i Teckomatorp och Landskrona. Beskrivningen av den snabba regnresponsen justerades med Tid-Area-metoden och då främst med parametrarna belastning av hårdgjorda ytor samt koncentrationstid. Den trögare regnresponsen, som är påtaglig i modellen, justerades med

RDI-modulen (Rain Dependent Infiltration - en konceptuell modell för beskrivning av långsamma flöden till exempel dränering och inträngande grundvatten). Grunden till RDI- kalibreringen var 4-års högupplöst flödesdata från ett antal pumpstationer och en Parshall-ränna placerad i huvudledningen i Asmundtorp. Parshallrännan är den mät punkt som har valts ut för att i det här projektet studera den hydrauliska modellens överensstämmelse med uppmätta flöden för ett antal utvalda regnhändelser. Modellen har körts med regn dels från regnmätaren i Teckomatorp, dels med XR och CR.



Figur 2.5

Det studerade avrinningsområdet för Lundåkra ARV.

2.3 Urval av regnhändelser

Den period som studerats omfattade maj-september 2021. Denna period täcker in de regnmönster från sen vår fram till och med tidig höst som man vet kännetecknas av hög variabilitet i både tid och rum.

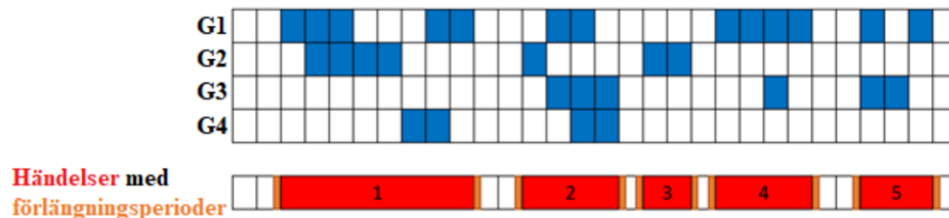
Det fanns flera utmaningar vad gäller urval av geografiskt område för regnhändelserna. Dessa utmaningar analyserades och hanterades på följande sätt:

Urvalet av händelser baserades på de 38 regnmätarna i studieområdet. Detta urval gjordes i stället för att använda hundratals radar bins, för att minska ner de datamängder som skulle hanteras på en lokal dator. En bin är en projektion i horisontalplanet av XR minsta enhet/observationsvolym. På grund av detta förfaringssätt, skulle en del regnhändelser kunna missas beroende på deras areella utbredning och förflyttning över eller bortom mätarna. Emellertid, med de 38 mätarna i det av XR täckta området, var det ändå möjligt att välja ut mer än tillräckligt med regnhändelser.

Regnmätarnas registreringar användes för att välja ut regnhändelser för vidare jämförelse med radardata (sannolikheten för detektering; POD) och bedömning av XR noggrannhet för regnuppskattningar. Emellertid, för att kunna inkludera andra förhållanden som t.ex. andel falska alarm (FAR) i studien, så var det nödvändigt att även ta med perioder då inget regn registrerades i regnmätarna.

Med hänsyn till ovanstående gjordes en mer omfattande definition av en regnhändelse genom att samla in ackumulerat regn för halv-timmes långa tidssteg för alla mätare, i stället för att använda de specifika tidpunkterna när en tippning inträffade i en enskild mätare. Sålunda betraktades en tippning i en enda av alla de 38 mätarna som tillräcklig

för att definiera en händelse för hela området och denna 30-min period. Med andra ord, såsom framgår av Fig. 2.6, separerades regnhändelserna av en eller flera 30-min tidssteg utan något noterat regn i någon av mätarna. Därför kunde också en viss händelse förlängas med mindre än 30 min före och efter utan att överstiga gränserna för omgivande händelser. Uppenbart registrerades inget regn i regnmätarna under dessa förlängningsperioder (se schematisk illustration i Fig. 2.6).



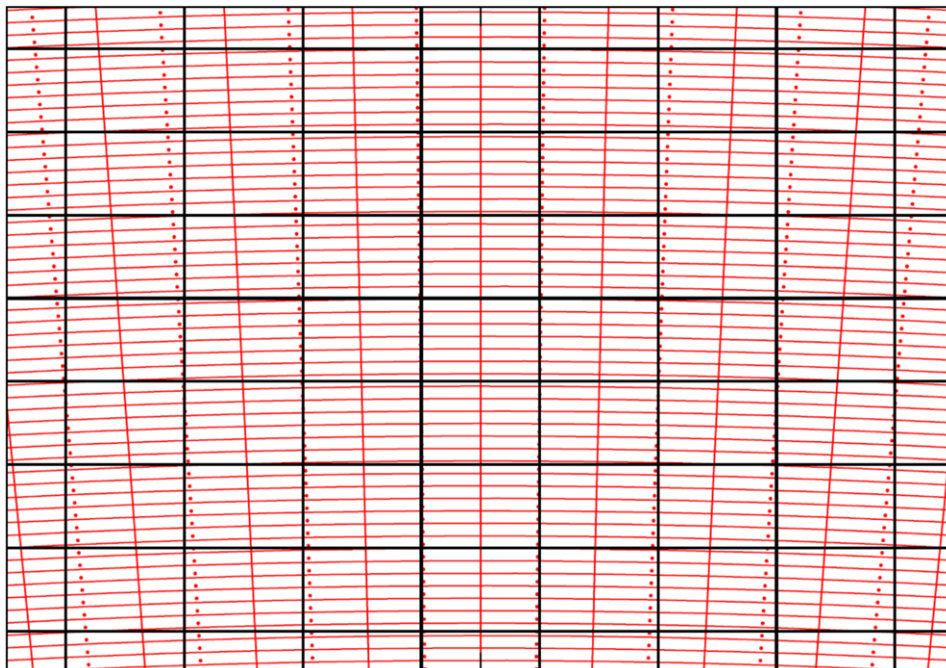
Figur 2.6

Skiss visande hur fem händelser väljs ut baserat på 30-min regn-tidsserier från fyra regnmätare (G1, ..., G4) med förlängningsperioder på mindre än 30 min före och efter.

De förlängda regnhändelserna innebär delvis inkludering (till okänd grad) av den tid som går åt för att samla regnvatten i mätarens skål innan den tippas över. På samma sätt inkluderas (delvis) tiden mellan tidpunkten när första (eller sista) droppen anländer till (eller lämnar) avrinningsområdet och när den observeras för första (eller sista) gången i regnmätarna under händelsen.

Som framgår av Fig. 2.6 är varaktigheten för ett regn i en enskild mätare vanligtvis och i medel kortare än varaktigheten för de definierade regnhändelserna. Därför var det inte orimligt att inkludera längre tidsperioder utan regnregistrering (5-min värden) för jämförelsen radar-regnmätare under regnhändelser och förlängningsperioder.

Baserat på ovanstående laddades HDF5 data ner för de förlängda händelserna (upp till 25 min) för direkt validering av uppskattade regn. För indirekt validering med hjälp av avrinningssimulering, där radarobservationer från flera hundra bins/celler var inblandade i uppskattningen av regn över avrinningsområdena, drogs förlängningen ner till fem min före och efter händelserna. En illustration av skillnaden bins/celler och grid (rutor) visas i Fig. 2.7.



Figur 2.7

Illustrativt exempel över skillnaden av polära bins/celler (röda rutor) och grid 1000x1000 m (svarta rutor) (Sharif och Ogden, 2014).

För att minska tiden för hantering av data, men utan att förlora moderata till kraftiga regnhändelser, screenades händelser från föregående steg baserat på intensitet. Sålunda beräknades maximal 30-min intensitet (MSI) för enskilda mätare som ett mått på lokal nivå för varje händelse. Detta gjordes som den högsta 30-min intensiteten för en händelse, observerad av någon av mätarna i det totala området täckt av de två XR. På grund av upplösningen på 0.2 mm hos mätarna så kunde minsta MSI vara 0.4 mm/h. Ett enkelt kriterium användes så att regnhändelser med MSI mindre eller lika med 2 mm/h exkluderades från den direkta valideringen. I praktiken kan sådana händelser generera avrinning om det fortsätter att regna kontinuerligt i flera timmar. Emellertid, som beskrivits ovan, var det endast händelser för vilka ingen av de 38 mätarna hade en intensitet över 2 mm/h som exkluderades. För alla andra tillfällen togs alla 38 mätare med vid jämförelsen med XR.

3 Regnhändelsernas egenskaper

Totalt registrerades 307 regnhändelser av regnmätarna enligt Tabell 3.1 och Fig. 3.1.

Regnuppskattningarna baserade på XR-mätningar validerades på två sätt:

- *Direkt validering*, genom jämförelse med alla tillgängliga regnmätare för regnhändelser med ett $MSI > 2 \text{ mm h}^{-1}$. Detta reducerade antalet regnhändelser till 86.
- *Indirekt validering* genom jämförelse av avrinning från avrinningssimulering, baserad på radaruppskattat regn å ena sidan och regn från regnmätare å andra sidan, med uppmätt avrinning i två delavrinningsområden (Lundåkra och Ellinge). Här minskade antalet regnhändelser på tillgängligheten på HDF5 filer. Således användes bara tillfällen då mer än 90 % av radardata var tillgänglig. Det framgår av Fig. 3.2 att det vanligtvis var Dalby XR som inte fungerade. Slutligen måste ett fåtal regn-avrinningstillfällen exkluderas på avsaknad av avrinningsmätningar (Tabell 3.2 och 3.3).

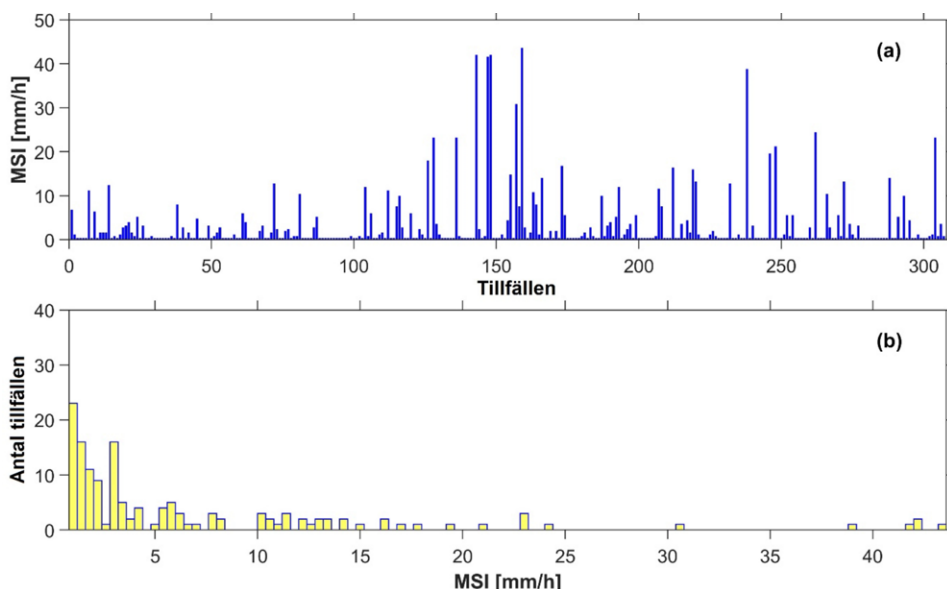
Efter val av regnhändelser lästes alla tillgängliga data in från de nerladdade HDF5 filerna med radardata. De dubbelpolariserade XR mäter en uppsättning variabler som DBZH (horisontell reflektivitet i dB), ZDR (skillnad i reflektivitet mellan vertikal och horisontell polarisering i dB), VRAD (radiell hastighet i m/s), RHOHV (korrelation mellan horisontell och vertikal reflektivitet, varierande mellan 0 och 1), PHIDP (fasskillnad), KDP (specifik fasskillnad i grader per km) och levererar dessutom RATE (regnintensitet i mm/h baserat på radarekvationer som beskrivits av *Hosseini et al. (2020)*).

Beteckningarna num och ID som allokerades till varje regnhändelse i Tabell 3.2 och 3.3 beskrivs i Bilaga D.

Tabell 3.1

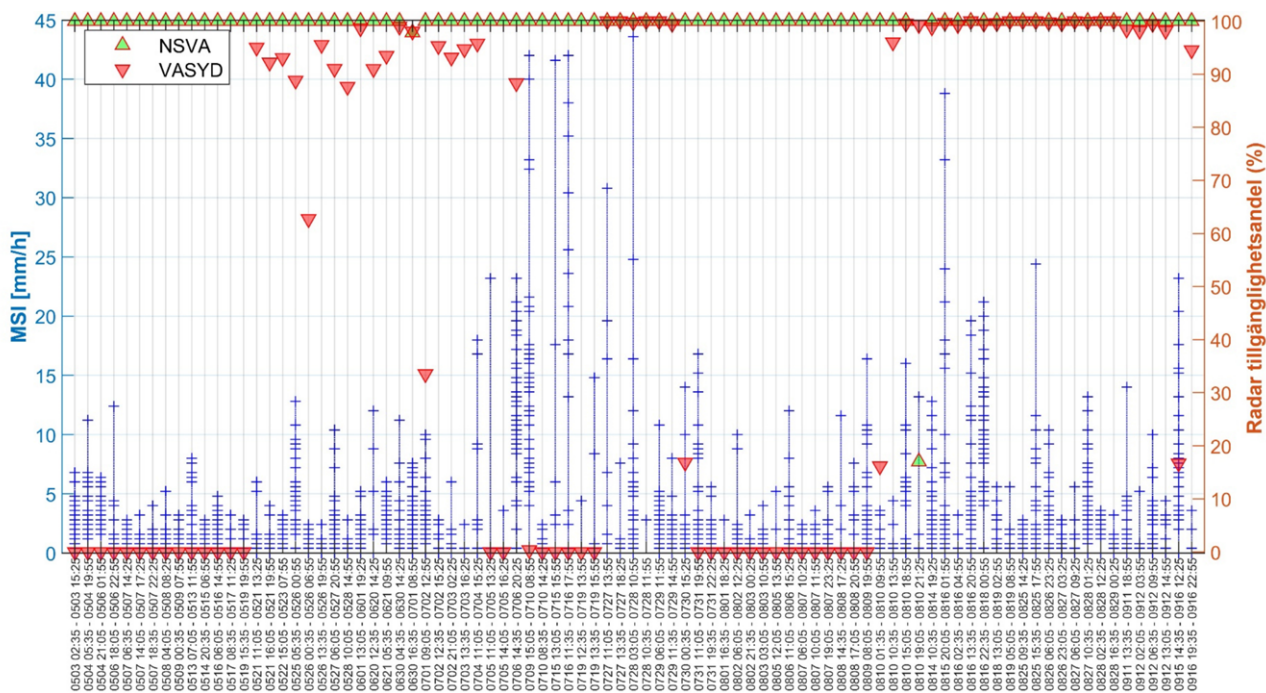
Statistisk sammanfattning av 307 regnhändelser under studieperioden baserat på halvtimmesvärden från 38 tipping bucket mätare inom det experimentella området.

Varaktighet av tillfälle (timmar)				Antal registrerande mätare per tillfälle				Genomsnittligt regndjup i registrerande mätare per tillfälle (mm)			
min	max	medel	St. avv.	min	max	medel	St. avv.	min	max	medel	St. avv.
0.5	28	2.4	4.1	1	38	8.2	11.9	0.2	32.3	1.3	3.3



Figur 3.1

Maximal 30-min stationsintensitet (MSI) värden för alla 307 regnhändelser/tillfällen observerade av 38 regnmätare (a) histogram för MSI värden (142 tillfällen) med intensitet högre än median MSI (0.8 mm/h) (b) Frekvens för antalet tillfällen med $MSI \geq 0.4 \text{ mm/h}$ (en tipp i mätaren) var 165.



Figur 3.2

MSI för regnhändelser från regnmätare samt tillgänglighet av radardata för dessa tillfällen. Den vänstra y-axeln visar MSI för olika regnmätare (+) för regnhändelser med minst 25-min varaktighet (horisontella axeln har formatet MMDD tim:mm enligt UTC) med en MSI>2. Högra y-axeln visar tillgänglighet (%) av radardata (HDF5 filer) för de två XR i Helsingborg och Dalby (nedåtriktade och uppåtriktade trianglar).

Händelsens num (av 43) _ ID (av 307)	Varaktighet (tim:mm)	Datum (MM/DD 2021) och lokal tid (tim:mm)		Antal registrerande mätare (av fyra)	Regndjup i registrerande mätare (millimeter)		
		Start	Slut		min	max	medel
2_262	1:40	08/25 17:55	08/25 19:34	2	2,2	4,6	3,4
4_270	2:40	08/27 08:25	08/27 11:04	3	0,2	3,8	1,6
5_254	3:10	08/19 07:25	08/19 10:34	4	0,2	1,0	0,7
7_260	4:10	08/25 11:55	08/25 16:04	3	0,2	1,0	0,7
8_163	5:10	07/29 08:25	07/29 13:34	4	1,4	4,8	2,6
9_246	6:40	08/16 15:55	08/16 22:34	4	5,2	15,8	9,0
11_274	9:10	08/28 04:55	08/28 14:04	4	2,4	3,0	2,8
12_272	14:10	08/27 12:55	08/28 03:04	4	10,4	15,8	13,1
14_159	7:10	07/28 05:25	07/28 12:34	4	2,0	7,0	4,0
15_238	5:10	08/15 22:25	08/16 03:34	4	16,6	24,4	19,9
19_248	25:40	08/17 00:55	08/18 02:34	4	17,2	26,0	22,7
20_164	2:40	07/29 13:55	07/29 16:34	4	0,4	4,4	2,2
21_293	2:40	09/12 08:55	09/12 11:34	4	0,8	1,0	0,9
25_87	5:40	06/01 15:25	06/01 21:04	4	0,4	2,0	0,8
26_288	4:40	09/11 15:55	09/11 20:34	3	2,0	3,6	2,6
29_115	15:40	06/30 18:55	07/01 10:34	4	4,0	7,8	5,6
31_126	3:40	07/04 13:25	07/04 17:04	3	1,6	9,6	5,3
32_77	5:40	05/26 15:55	05/26 21:34	3	0,4	1,2	0,7
31_126	3:40	07/04 13:25	07/04 17:04	3	1,6	9,6	5,3
37_106	3:40	06/21 07:55	06/21 11:34	4	0,8	1,2	1,1
40_62	3:10	05/21 18:25	05/21 21:34	4	0,4	1,4	1,1
41_81	14:10	05/27 08:25	05/27 22:34	4	0,2	7,2	3,6
42_104	1:10	06/20 14:55	06/20 16:04	0	-	-	-

Tabell 3.2

Statistisk sammanfattning
av regnhändelser för
avrinningssimulering
i Lundåkra med
0.5-timmesvärden för
regnmätare i Asmundtorp,
Billeberga, Teckomatorp
och Marieholm inom
avrinningsområdet.

Händelsens num (av 43) _ ID (av 307)	Varaktighet (tim:mm)	Datum (MM/DD i 2021) och lokal tid (tim:mm)		Antal registrerande mätare (av sex)	Regndjup i registrerande mätare (millimeter)		
		Start	Slut		min	max	medel
1_160	0:40	07/28 12:55	07/28 13:34	2	0,20	1,40	0,80
2_262	1:40	08/25 17:55	08/25 19:34	6	0,80	6,80	3,50
3_157	2:10	07/27 13:25	07/27 15:34	5	0,40	19,80	9,44
5_254	3:10	08/19 07:25	08/19 10:34	4	0,40	3,20	1,30
6_158	4:10	07/27 15:55	07/27 20:04	3	0,20	7,20	2,67
7_260	4:10	08/25 11:55	08/25 16:04	6	1,00	1,60	1,10
9_246	6:40	08/16 15:55	08/16 22:34	6	2,00	10,00	7,37
10_277	7:10	08/28 18:55	08/29 02:04	6	0,40	1,80	1,17
11_274	9:10	08/28 04:55	08/28 14:04	6	3,00	7,20	5,53
12_272	14:10	08/27 12:55	08/28 03:04	6	8,40	21,60	13,43
13_266	16:40	08/26 08:25	08/27 01:04	6	4,60	15,60	7,20
14_159	7:10	07/28 05:25	07/28 12:34	6	0,80	21,80	6,70
15_238	5:10	08/15 22:25	08/16 03:34	6	2,00	23,60	13,53
18_219	3:10	08/10 17:25	08/10 20:34	1	1,20	1,20	1,20
19_248	25:40	08/17 00:55	08/18 02:34	6	17,20	29,40	21,90
21_293	2:40	09/12 08:55	09/12 11:34	5	0,60	5,40	1,92
23_112	9:10	06/30 06:55	06/30 16:04	6	0,40	3,20	1,63
25_87	5:40	06/01 15:25	06/01 21:04	6	0,40	6,80	2,43
29_115	15:40	06/30 18:55	07/01 10:34	6	6,40	18,20	11,97
31_126	3:40	07/04 13:25	07/04 17:04	5	0,20	16,40	7,08
34_61	1:40	05/21 13:25	05/21 15:04	4	0,40	3,00	1,25
37_106	3:40	06/21 07:55	06/21 11:34	6	0,60	2,00	1,17
39_68	16:10	05/22 17:25	05/23 09:34	6	3,60	7,20	4,97
40_62	3:10	05/21 18:25	05/21 21:34	4	0,20	1,00	0,50

Tabell 3.3

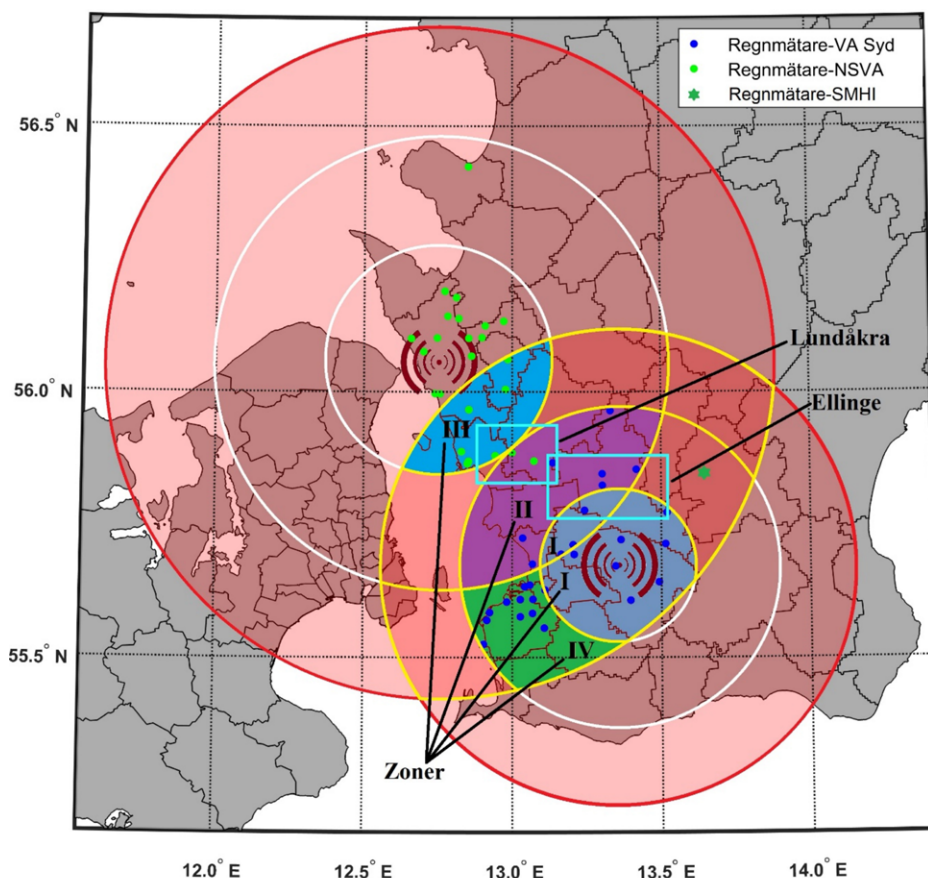
Statistisk sammanfattning
av regnhändelser för
avrinningsmodellering i
Ellinge med 0,5-timmes-
värden för regnmätare i
Eslöv, Ellinge, Kungshult,
Marieholm, Örtofta
och Löberöd inom
avrinningsområdet.

4 Utveckling av regnmodeller baserat på två X-bandsradar

I detta kapitel beskrivs nederbördsuppskattning med modeller för flera X-band radar, kort teori kapitel om empiriska multipel regressionsmodeller (REG) och artificiella neurala nätverksmodeller (ANN). Slutligen summeras metoduppläggen för framtagandet av regnprodukterna som användes i avrinningssimuleringarna.

4.1 Nederbördsuppskattning med modeller för flera X-bandsradar

Det finns några huvudsakliga felkällor (exempelvis dämpning och målöverskridande) som negativt påverkar kvaliteten på uppskattning av regn baserat på en enda XR (Hosseini *et al.*, 2020) som visas i figur 2.3. Denna studie har försökt inkludera avståndseffekter i radarmodelleringen genom att dela in studieområdet i fyra delområden och utveckla separata modeller för respektive delområde. Generellt sett definierades dessa delområden av ytor som begränsades av cirklar med radier 1/3, 2/3 och hela räckvidden för de båda XR. Som framgår av Fig. 4.2 avgränsades fyra zoner vilka tillsammans täcker in de 38 regnmätarna i det studerade området.



Figur 4.1

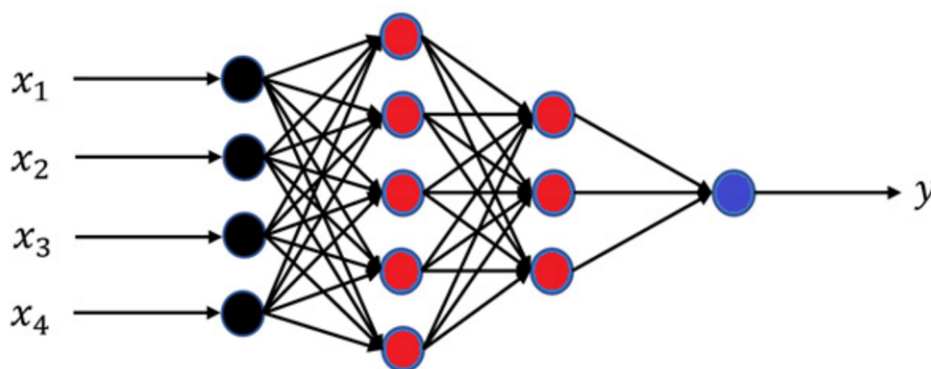
Avgränsningen av de fyra radarzonerna som täcker in de studerade 38 regnmätarna (zon I-IV markerade med olika färger). Zonerna definieras m h a 1/3, 2/3 och full räckvidd för de två XR (gula linjer) i studieområdet. Dessutom visas läget för de två avrinningsområdena Lundåkra och Ellinge via två heltäckande boxar (blåa rektanglar).

I Fig. 4.2 kan man även se att bland de fem definierade geometriska områden som täcker in regnmätarna är det minsta (definierat av 1/3 räckvidd för Dalby XR och 2/3 räckvidd för Helsingborg XR) väldigt litet och innehåller endast tre mätare. Detta område kan samtidigt ses som en del av ett större område som definieras av 1/3 räckvidd för Dalby XR och full räckvidd av Helsingborg XR. För att endast ha någorlunda stora zoner och mer radardata per zon och därmed mer generella radarmodeller, så slogs dessa två områden ihop till en enda zon, Zon I.

Sammanfattningsvis så kan zonerna som visas i Figur 4.2 beskrivas på följande sätt:

- Zon I: begränsas av 1/3 räckvidd för Dalby XR och full räckvidd för Helsingborg XR. Zon I representerar ett område som domineras av Dalby XR.
- Zon II: begränsas av 1/3 räckvidd och 2/3 räckvidd för båda XR. Zon II representerar ett område som förväntas påverkas ungefär lika mycket av data från de båda XR.
- Zon III: begränsas av 1/3 räckvidd för Helsingborg XR och full räckvidd för Dalby XR. Zon III representerar ett område som domineras av Helsingborg XR.
- Zon IV: begränsas av 1/3 och 2/3 räckvidd för Dalby XR plus 2/3 och full räckvidd för Helsingborg XR. Zon IV representerar ett område som förväntas ge en mindre betydelse för data från Helsingborg XR jämfört med Dalby XR.

Områdena i de olika zonerna användes för att uppskatta regn för de radar-bin som innehåller en regnmätare för direkt validering. Likaledes utvecklades modeller för de radar-bin som ligger i de studerade avrinningsområdena för indirekt validering. Dels utvecklades en datadriven empirisk linjär regressions-modell (REG) och dels en helt datadriven modell som använder ett artificiellt neuralt nätverk (ANN) för att beräkna regn. Kort summerat är ANN ett nätverk som har sammankopplade noder i tre eller flera lager. Ett neuralt nätverk består av vikter, en poängfunktion och en förlustfunktion. Först behöver ANN "lära sig" i en träningsperiod/återkopplingslinga där resultaten justerar vikterna. Detta återkopplingssteg behöver även en REG-modell göra för att kunna kalibreras. En principiell skiss av ett neuralt nätverk visas i Fig. 4.1.



Figur 4.2

Principiell skiss av en ANN-modell, Hosseini (2022), där $x_1 - x_4$ är input-variabler (t.ex. radarvariabler), två gömda lager med 5 respektive tre neuroner (röda) mellan input-lager (svart) och output-lager (blått) för beräkning av en output-variabel y (t.ex. regnintensitet).

Som nämnts ovan, användes ANN och REG-radarmodellerna för att uppskatta nederbörd baserat på skanningar på flera nivåer, för de två XR. Inledningsvis användes alla radarvariabler utom RATE för ANN simulering medan REG-modellen endast använde variabeln RATE. För att kunna jämföra regnmätarna med radarobservationerna på ett effektivt sätt ackumulerades minutvärden till 5-minutvärden, vilket oftast innebär tillräcklig tidsupplösning för analys av urban regnavrinning.

4.1.1 Empirisk multipel regressionsmodell (REG)

Marshall-Palmer ekvationen $Z=aR^b$ är en välkänd empirisk modell för att beräkna nederbördsintensitet (R) från radarreflektionen (Z som ett mått på reflekterad signalstyrka). Parametrarna a och b är vanligtvis konstanter även om det ibland har rekommenderats

att ha olika värden på a och b beroende på nederbördstyp (frontalt eller konvektivt regn). För dubbelpolariserade XR används samma typ av ekvation som Marshall–Palmer. Emellertid inkorporeras ibland radarvariabler som ZDR och KDP för att korrigera för dämpning i nederbördsräkningen.

Detaljer kring olika radarekvationer har beskrivits av Hosseini et al. (2020). I föreliggande studie användes bl. a. en enkel linjär multiregressionsmodell som beräknar hela den uppmätta nederbörden baserat på XR-data från endast en nivå (RATE) över studieområdet. Av denna anledning kan den kombinerade REG-produkten skrivas som en linjär funktion av uppskattad nederbörd på nivå 1 för Helsingborg XR (R_{H1}) och nivå 1–5 för Dalby XR (R_{D1} , R_{D2} , R_{D3} , R_{D4} , R_{D5}):

$$REG = \alpha_1 \times R_{H1} + \alpha_2 \times R_{D1} + \alpha_3 \times R_{D2} + \alpha_4 \times R_{D3} + \alpha_5 \times R_{D4} + \alpha_6 \times R_{D5} \quad (1)$$

där $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ är regressionsparametrar som fås från minsta kvadratmetoden. REG-modellen kan således beskrivas som en hybridmodell av regnprodukter från flera nivåer som har uppgrederats från en empirisk modell.

4.1.2 Artificiell Neural Nätverksmodell (ANN)

ANN är en av de mest populära modellerna för AI-förstärkt datadriven simulering i hydrologi. Kalibrering av ANN-modeller baseras på djupinlärande algoritmer som använder många neuroner fördelade över flera dolda lager. ANN-modeller är effektiva för simulering av komplexa icke-linjära system. Av denna anledning kan det förmodas att begränsningar hos empiriska modeller delvis kan avhjälpas med ANN. ANN-modellen som användes här utvecklades inom en annan parallell studie vid Lunds universitet finansierat av Innovationskontor Syd (Hosseini, 2021; Hosseini, 2022). Av denna anledning kommer vi här att huvudsakligen koncentrera oss kring de praktiska aspekterna för ANN-modellen och mindre om teorin bakom denna. Föreliggande ANN-modell använde 6 XR variabler (DBZH, ZDR, etc) från var och en av de tillgängliga höjdnivåerna från de två XR i motsats till RATE och REG-modellerna som är empiriska (se Bilaga B eller Hosseini (2022) för mer detaljer kring teorin).

4.1.3 Utvecklade regnmodeller – en sammanfattning

I sammanfattning användes följande metodik för att utveckla regnmodeller baserat på mätningar med de båda XR.

- De båda XR som använts finns i Dalby och Helsingborg och har räckvidd 50 respektive 70 km
- De båda XR hade en sammanlagd täckningsarea som omfattade ett område med totalt 38 regnmätare av typen tipping bucket (29 som tillhör VA SYD och nio som tillhör NSVA)
- XR i Dalby och Helsingborg skannade atmosfären (360 graders rotation av antennen) med fem olika höjdvinklar (1.5, 2, 4, 6, och 8°) per minut för VA SYD radarn. För NSVA radarn var det endast 2 graders vinkel. Operatören kan lägga till fler vinklar om detta krävs. Antalet vinklar påverkar resultaten och beskrivs mer i Kapitel 4.5.
- Varje skanning med radarn gav data för hela området med sex radarvariabler (DBZH, ZDR, VRAD, RHOHV, PHIDP och KDP) och en inbyggd uppskattning av regnintensiteten (RATE).
- All data från en minut av skanning från en radar sparas i en fil med format HDF5.
- I studien sammankopplas data från två XR för en sammanhållen, förbättrad uppskattning av regn.
- Två metoder för sammanslagning av mätningar från de två XR användes, dels artificiella neurala nätverk (ANN), dels empiriska regressionsmodeller (REG).
- Fyra regnmodeller motsvarande de fyra olika zonerna utvecklades för varje typ av metod (ANN och REG).

5 Direkt validering – jämförelse av radaruppskattat regn med data från markbaserade regnmätare

5.1 Metodik

I korthet användes följande metodik för den direkta valideringen av radaruppskattat regn med data från markbaserade regnmätare:

- Nederbördstillfällen, observerade av regnmätarna under maj-sep 2021, extraherades från det undersökta området.
- Studieområdet delades in i fyra zoner så att dessa innehöll alla 38 regnmätare.
- Tillfällen med maximal regnintensitet mindre eller lika med 2 mm h^{-1} för individuella mätare togs bort (baserat på ackumulerad 30 min nederbörd).
- Radardata laddades ner för ovanstående tillfällen. Utvalda radar-bin var sådana vars centrum var närmast läget för de 38 regnmätarna. Därefter räknades de ursprungliga data om från 1-min upplösning till 5-min regn. Detta innebär att medelvärden räknades ut för variablerna DBZH, ZDR, VRAD, RHOHV, PHIDP och KDP, medan värdena på variabeln RATE summerades över 5-min perioder för de utökade perioderna och de utvalda händelserna. Enheten för RATE konverterades därefter till mm regn.
- Två metoder för sammanslagning av de två XR användes, dels artificiella neurala nätverk (ANN) och dels empiriska regressionsmodeller (REG).
- Fyra regnmodeller motsvarande de fyra olika zonerna utvecklades för varje typ av simuleringsmodell (ANN och REG).
- Jämförelser gjordes mellan regnberäkningar baserade på radardata från enstaka XR-nivåer och regnberäkningar baserade på modeller av typ ANN och REG.
- POD, FAR, rBIAS och MAE användes som kvalitetskriterier för att utvärdera modellerna. De är mått som vart och ett är utvecklat för att undersöka en viss dimension av en modells förmåga. POD och FAR rör frekvensen av korrekt respektive felaktig regndetektering, utan hänsyn till storleken på felen. Dessa fyra mått används ofta i studier av regnmätning via fjärranalys, och är därför bra för att kunna jämföra med annan forskning inom området. rBIAS visar den totala storleken på under- eller över-skattning (baserat på positivt eller negativt tecken), men utan specifik information om storleken av de individuella felen, vilka kan ta ut varandra. MAE visar medelstorlek av de individuella felen.

$POD = 100 \times \frac{n_{11}}{n_{11} + n_{10}}$; varierar mellan 0 och 100 och 100% betyder perfekt passning

$FAR = 100 \times \frac{n_{01}}{n_{11} + n_{01}}$; varierar mellan 0 och 100 och 0% betyder perfekt passning

$rBIAS = 100 \times \frac{\sum(E_t - O_t)}{\sum O_t}$; varierar mellan $-\infty$ och ∞ och 0% betyder perfekt passning

$MAE = \frac{\sum |E_t - O_t|}{N}$; varierar mellan 0 och ∞ och 0 betyder perfekt passning

- O_t och E_t : observerat och estimerat regnvärde för 5-min tidssteg
- N : totalt antal 5-min tidssteg använt i beräkningarna
- n_{11} : antal tidssteg där $O_t \geq 0,2$ och $E_t > 0$

- n_{10} : antal tidssteg där $O_t \geq 0,2$ men $E_t = 0$
- n_{01} : antal tidssteg där $O_t = 0$ men $E_t \geq 0,2$
- CR utvärderades inte i den direkta valideringen utan enbart i kapitel 6. Detta eftersom CR är en mer välstuderad radarteknik och det finns många studier gjorda inom området.

5.2 Resultat

Tabell 5.1-4 visar en statistisk sammanfattning av jämförelser mellan observationer av 38 regnmätare och regnprodukter för enstaka XR nivåer och kombinerade XR för zon I-IV. Resultaten visar med tydlighet att XR ger goda regndata. Generellt sett förbättras regnprodukterna när två XR används vilket framgår av kvalitetskriterierna. Till exempel, i Zon I (Tabell 5.1), varierar POD mellan 65-89 % för enstaka nivåer (L1, L2 o.s.v.) och 91-93 % för ANN och REG. Man kan också se att dessa produkter är likartade i sin precision.

Enstaka nivåer har de högsta FAR och högsta positiva rBIAS och därmed största fel för L1 Dalby av alla zoner (Tabell 5.1-8). Förmodade felkällor är brus från höga objekt för en vinkel på 1,5 grader. L1 Dalby representerar observerade regn närmast marknivå. FAR på 34-59 % nivån för L1 Dalby och olika zoner innebär att 34-59 % av detekterat regn är fel. Således är ett högre POD för L1 Dalby jämfört med andra nivåer delvis en artefakt som huvudsakligen är orsakad av högt FAR. Å andra sidan kan lägre FAR för höga nivåer (t ex 14-29 % för L5 Dalby) vara relaterat till lågt POD.

Sålunda måste korrekt detektering av regn bekräftas av både högt POD och lågt FAR. Detta gäller för båda modellerna REG och ANN i motsats till de flesta resultaten från enstaka XR-nivåer som förklaras nedan i ett exempel. Till exempel, kan man se att för Zon I (Tabell 5.1) är värdena för POD jämförbara för L1 Dalby å ena sidan, och REG- och ANN-modellerna å andra sidan. Samtidigt är dock värdena för FAR väsentligt lägre för båda modellerna (REG och ANN) än motsvarande värden för L1 Dalby (3-4 % respektive 34 %) Liknande resultat kan även ses för de andra zonerna.

För felindikatorerna rBIAS och MAE, uppvisade både ANN och REG förbättringar för alla tillfällen jämfört med enstaka nivåer (Tabell 5.1-4). Skillnaden i MAE mellan ANN och REG är liten (något bättre för ANN). Emellertid avseende rBIAS, erhöles olika resultat för olika zoner:

i Zon I (Tabell 5.1) och IV (Tabell 5.4), är ANN bättre än REG.

i Zon II (Tabell 5.2), är REG bättre än ANN.

i Zon III (Tabell 5.3), är modellerna likvärdiga.

Oavsett förbättringar med REG och ANN jämfört med enstaka nivåer, var Zon III det område som var svårast att bestämma regn i med XR. För ANN och REG t ex, var MAE för Zon III (0,4 mm) nästan dubbelt så stort jämfört med MAE för de andra zonerna (0,18-0,23 mm). Inte bara REG och ANN modellerna utan också enstaka XR nivåer hade högre fel i detta område. Det låga POD för både enstaka nivåer och modeller för Zon III, visar att det är främst ett problem med detektion. Zon III är det område som har störst avstånd till Dalby XR och har därför problem med överskjutning och dämpning. Förmodligen hade bättre regnbestämning kunnat erhållas för detta område om flera multipla nivåer från båda XR hade använts. För att läsa mer om dataunderlaget som användes för kalibrering och validering se bilaga B.

XR Nivå/Modell	POD (%)	FAR (%)	rBIAS (%)	MAE (mm)
L1 Helsingborg	78,8	20,7	78,2	0,36
L1 Dalby	89,2	33,5	130,8	0,28
L2 Dalby	65,7	5,5	-6,2	0,26
L3 Dalby	72,1	7,4	6,6	0,26
L4 Dalby	78,7	11,9	21,3	0,26
L5 Dalby	72,6	14,3	17,7	0,27
REG	92,8	3,2	-15,5	0,20
ANN	91,4	4,3	-7,6	0,19

Tabell 5.1

Kvalitetskriterier för enstaka nivå och kombinerade XR för bestämning av 5-min regn vid regnmätare i *Zon I* baserat på data som inte användes för kalibrering av ANN- och REG-modeller.

XR Nivå/Modell	POD (%)	FAR (%)	rBIAS (%)	MAE (mm)
L1 Helsingborg	83,5	22,4	90,6	0,40
L1 Dalby	90,4	38,6	152,2	0,35
L2 Dalby	71,3	16,6	21,7	0,29
L3 Dalby	77,2	21,0	43,1	0,30
L4 Dalby	69,3	18,1	16,6	0,31
L5 Dalby	52,5	14,1	-32,5	0,32
REG	93,1	9,4	-9,5	0,23
ANN	89,9	6,5	-15,3	0,22

Tabell 5.2

Kvalitetskriterier för enstaka nivå och kombinerade XR för bestämning av 5-min regn vid regnmätare i *Zon II* baserat på data som inte användes för kalibrering av ANN- och REG-modeller.

XR Nivå/Modell	POD (%)	FAR (%)	rBIAS (%)	MAE (mm)
L1 Helsingborg	60,6	45,0	90,5	0,50
L1 Dalby	54,0	54,1	76,3	0,45
L2 Dalby	52,3	54,2	75,6	0,45
L3 Dalby	44,1	47,0	10,4	0,46
L4 Dalby	18,2	33,3	-75,0	0,45
L5 Dalby	5,5	28,6	-94,1	0,47
REG	65,6	23,5	-42,6	0,40
ANN	63,9	16,2	-44,3	0,40

Tabell 5.3

Kvalitetskriterier för enstaka nivå och kombinerade XR för bestämning av 5-min regn vid regnmätare i *Zon III* baserat på data som inte användes för kalibrering av ANN- och REG-modeller.

XR Nivå/Modell	POD (%)	FAR (%)	rBIAS (%)	MAE (mm)
L1 Helsingborg	83,0	26,3	115,9	0,43
L1 Dalby	95,3	58,5	868,2	0,75
L2 Dalby	72,9	39,1	126,9	0,32
L3 Dalby	81,0	19,7	67,6	0,32
L4 Dalby	77,8	19,6	32,4	0,30
L5 Dalby	52,6	14,2	-37,8	0,32
REG	96,4	11,8	-11,8	0,20
ANN	95,6	4,7	3,0	0,18

Tabell 5.4

Kvalitetskriterier för enstaka nivå och kombinerade XR för bestämning av 5-min regn vid regnmätare i *Zon IV* baserat på data som inte användes för kalibrering av ANN- och REG-modeller.

6 Indirekt validering – jämförelse med avrinningssimulering

6.1 Metodik

För att kunna använda de utvecklade radarmodellerna samt producera kontinuerliga nederbördsvärden för avrinningsmodeller, omvandlades värden i radar-bin till värden i varje rutnätspunkt. Förenklat innebär detta att, utifrån värden i de punkter som definieras av XR beräknas värden i ett geografiskt definierat rutnät med kvadratiske rutor, en s.k. kontinuitetsbevarande metod. Det finns flera olika metoder för detta i litteraturen, emellertid är de flesta inte kontinuitetsbevarande. Således användes en s.k. precis, kontinuitetsbevarande metod enligt Sharif & Ogden (2014). Det enda antagandet som lades till var att alla radar-bin är rektangulära. Emellertid har de en liten kurvatur i azimutal riktning.

Slutresultatet är 5-min nederbörd med värden i varje knutpunkt i ett rutnät med rutor 500 x 500 m. Genom kontinuitetsbevarande interpolering, fick varje radar-bin som låg helt eller delvis inom en kvadratisk ruta bidra till regnvärdet i rutan i proportion till sin area.

För den indirekta valideringen jämfördes avrinningen baserat på olika indata (stationära regnmätare, CR och XR) med observerad avrinning från Ellinge respektive Lundåkra avrinningsområde. Som framgår av Figur 4.2, 6.1 och 6.2, var huvuddelen av avrinningsområdena placerade i Zon I och II, men ett område i Lundåkra avrinningsområde var delvis även i Zon III. I denna utvärdering användes de utvecklade modellerna för närliggande Zon II även för områden av Lundåkra som befanns i Zon III.

Tre radarbaserade regnprodukter togs fram för avrinningssimulering och finns sparade i ASCII-format för varje nederbördstillfälle, nämligen ANN, REG och L. L indikerar en regnprodukt baserat på en enstaka nivå med RATE omräknad till 500 m rutnät för varje vinkelnivå. ANN och REG representerar kombinerade radardata med ANN och REG simulering. L produkten inkluderar regndata från 2-grader nivåskanning med Helsingborgs XR och Dalby XR för respektive Lundåkra och Ellinge avrinningsområden. Tabell 6.1 sammanfattar viktiga egenskaper för respektive produkt. Jämförelse mellan dessa tre produkter kan användas för att utvärdera fördelar med kombinerade XR jämfört med data från en XR. De kan också användas för att jämföra olikheter mellan ANN-produkter och produkter från L och REG-modeller.

De beräknade nederbördsvärdena i rutnät sparades i GIS ASCII-filer. Varje fil representerar multipla tidssteg för ett nederbördstillfälle (se exempel i Bilaga C). Varje ASCII-fil har ett unikt filnamn med referens till innehåll. Filnamnet börjar med produkttyp och fortsätter med några extra termer. Till exempel, termen "fnoise" visar att produkten har blivit korrigerad med ett filter för att ta bort brus (för mer detaljer kring filnamn se Bilaga D).

Avloppsområde	L	REG	ANN
Ellinge	Alla rutnät: Kontinuitetsbevarande projektioner med RATE och 2°-nivå från Dalby XR.	Rutnät i Zon I: Kontinuitetsbevarande projektioner med RATE från alla nivåer och båda XR med REG- modell för Zon I. Annars: Kontinuitetsbevarande projektioner med RATE från alla nivåer och båda XR med REG- modell för Zon II.	Rutnät i Zon I: Kontinuitetsbevarande projektioner med 6 radarvariabler från alla nivåer och båda XR med ANN för Zon I. Annars: Kontinuitetsbevarande projektioner med 6 radarvariabler från alla nivåer och båda XR med ANN för Zon II.
Lundåkra	Alla rutnät: Kontinuitetsbevarande projektioner med RATE och 2°-nivå från Helsingborgs XR.	Alla rutnät: Kontinuitetsbevarande projektioner med RATE från alla nivåer och båda XR med REG- modell för Zon II.	Alla rutnät: Kontinuitetsbevarande projektioner med 6 radarvariabler från alla nivåer och båda XR med ANN för Zon II.

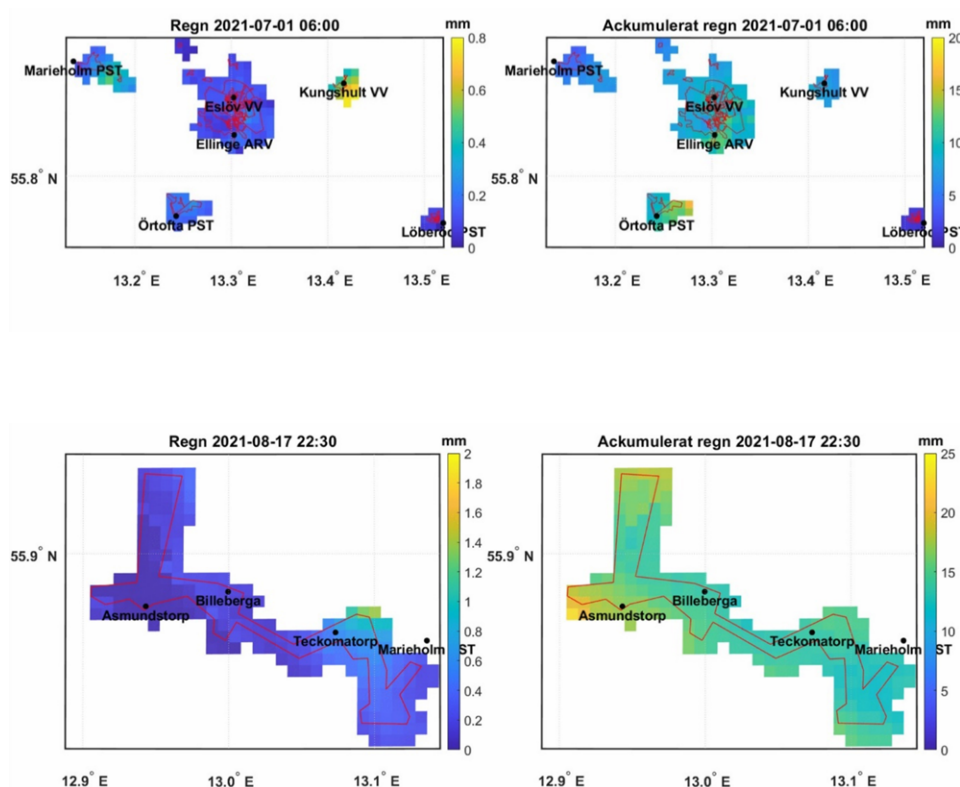
Tabell 6.1

Egenskaper för de tre olika regnprodukterna L, REG och ANN.

Utöver radarmodellerna (L, REG och ANN från XR-data) användes även:

- Stationära regnmätare
- C-band radardata

Figur 6.1 visar ett exempel på beräknad nederbörd för Ellinge avrinningsområde. Avrinningsområdet visas som ett rutnät med nederbörd. Nederbörd utanför avrinningsområdets gränser sattes till 0. Figur 6.2 visar samma sak för Lundåkra avrinningsområde. Avloppsområdena beskrivs mer utförligt i kapitel 2.2.



Figur 6.1

Exempel på nederbördsberäkning för Ellinge avrinningsområde. Figuren till vänster visar nederbörd under 5 minuter (07/01/2021 06:00 – 07/01/2021 06:04:59,99) medan figuren till höger visar ackumulerad nederbörd under ett helt nederbördstillfälle.

Figur 6.2

Exempel på nederbördsberäkning för Lundåkra avrinningsområde. Figuren till vänster visar nederbörd under 5 minuter (08/17/2021 22:30 – 08/17/2021 22:34:59,99) medan figuren till höger visar ackumulerad nederbörd under ett helt nederbördstillfälle.

Avrinningsmodellen för Ellinge kördes först för de utvalda regnhändelserna med regnindata från de stationära regnmätarna samt för L och ANN. Det beräknade flödet jämfördes med det uppmätta flödet och därefter korrigerades modellens avrinningsparametrar med hjälp av bl.a. en reduktionsfaktor för att få en så bra jämförelse som möjligt mellan uppmätt och beräknad flödesvolym. Reduktionsfaktorn beskriver hur mycket andelen hårdgjord yta behöver korrigeras i modellen. För regnserierna från C-band och stationen i Hörby konstaterades att överensstämmelsen mellan uppmätt och beräknat flöde var så pass dåligt att kalibrering inte kändes motiverat, en reduktionsfaktor på 0,9 sattes för dessa.

Under projektets gång tydliggjordes stora kvalitetsskillnader på resultaten från C-band vilket berott på ett tidsfel i databehandlingen. Detta gör att C-band resultaten kommer att visas partiellt men fokus kommer att ligga på de andra XR resultaten. Denna felkälla upptäcktes i slutskedet av rapporten och kunde tyvärr inte åtgärdas men belyses i slutsatser och sammanfattningen. I resultaten med SMHI regnmätaren i Hörby till Ellinge var det tydliga geografiska tidsförskjutningar i resultatet vilket tydliggjorde att regnmätaren var lokaliserad för långt bort i förhållande till avrinningsmodellens område. Därmed kommer även resultaten för Hörby regnmätaren enbart att redovisas delvis likt CR resultaten.

Efter den första kalibreringen redigerades regnprodukterna för L och ANN, men modellens individuella reduktionsfaktorer bibehölls för de nya beräkningarna. I tabell 6.2 visas de regn och reduktionsfaktorer som använts för utvärdering av resultatet.

Regnindata	Reduktionsfaktor
Stationära regnmätare	0,7
SMHI_Hörby	0,9
X-band (ANN)	0,9
C-band	0,9
X-band (L)	0,8

Tabell 6.2

Reduktionsfaktor för belastande ytor efter kalibrering i modellen för Ellinge.

7 Statistiska analysresultat för avrinningssimuleringen

I denna studie valdes nedanstående tre statistiska kvalitetskriterier för att utvärdera avrinningssimuleringen.

$$CC = \frac{\sum(O_t - \bar{O}) \times (M_t - \bar{M})}{\sqrt{\sum(O_t - \bar{O})^2 \times \sum(M_t - \bar{M})^2}}; \text{Korrelationskoefficient (kan variera mellan -1 and 1)}$$

$$NSE = 100 \times \frac{\sum(M_t - O_t)^2}{\sum(O_t - \bar{O})^2}; \text{Nash-Sutcliffe Effektivitet (kan variera mellan -oändlighet och 1)}$$

$$MAE = \frac{\sum|M_t - O_t|}{N}; \text{Absolut medelfel (kan variera mellan 0 och oändlighet)}$$

- O_t och M_t : observerad och simulerad avrinning på 5-min tidssteg (— indikerar medelvärde)
- N: totalt antal 5-min tidssteg (antal tidssteg varierar beroende på O-M par)

CC=1, NSE=1, MAE=0 innebär perfekt överensstämmelse. NSE<0 visar sämre simulering än vad som erhålls med medelvärde för avrinningen.

Resultaten för Ellinge avrinningssimulering, visas i Tabell 7.1.

Regnindata	CC	NSE	MAE (l/s)
Stationära regnmätare	0,62	0,15	20,11
StationHörby	0,05	-0,92	43,58
X-band (ANN)	0,77	0,54	15,75
C-band	-0,03	-0,34	44,09

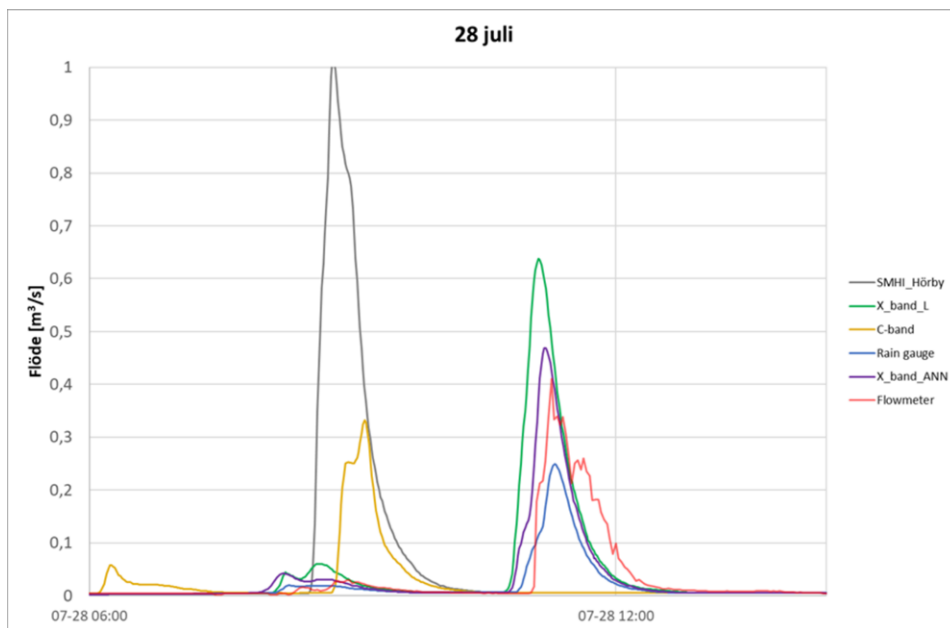
* CC=1, NSE=1, MAE=0 innebär perfekt överensstämmelse. NSE<0 visar sämre simulering än vad som erhålls med medelvärde för avrinningen.

ANN modellen presterade bäst i Ellinge enligt de valda kvalitetskriterierna, bättre än de stationära regnmätarna, för alla tre mått (Tabell 7.1). Resultaten från simuleringen med mätare SMHI_Hörby var sämre, vilket visar på vikten av att använda lokala indata, inom det modellerade området likt som konstaterades i kapitel 6. Även C-band presterade sämre, vilket konstaterades berodde på tidsfelkällor i konverteringen till modellindata som bekräftades vid slutfasen av projektet.

Hydrograferna som visas i Fig. 7.1. och Fig. 7.2. visar en jämförelse mellan uppmätt och simulerat flöde för regntillfället den 28 juli med regnindata från stationära regnmätare i Eslöv, en XR (X_band(L)), två XR (X_band_ANN), en regnmätare i Hörby respektive C-band radar. Överensstämmelsen mellan observerad och modellerad avrinning i figurerna illustrerar hur korrelationskoefficienten såg ut överlag i studien. Det sågs en generell trend att de stationära regnmätarna gav lägre resultat än det uppmätta värden från flödesmätaren. Då C-band och regnmätaren i Hörby presterade betydligt sämre redovisas inte resultatet för dessa i graferna för regnhändelserna 1 juli samt 17 och 18 augusti i Fig. 7.3 och 7.4. För samtliga regnprodukter varierar resultatet där det beräknade flödet underskattas för vissa regntillfällen och överskattas i andra. Vid en vidare finkalibrering av modellen finns det potential att få bättre resultat för samtliga regnprodukter.

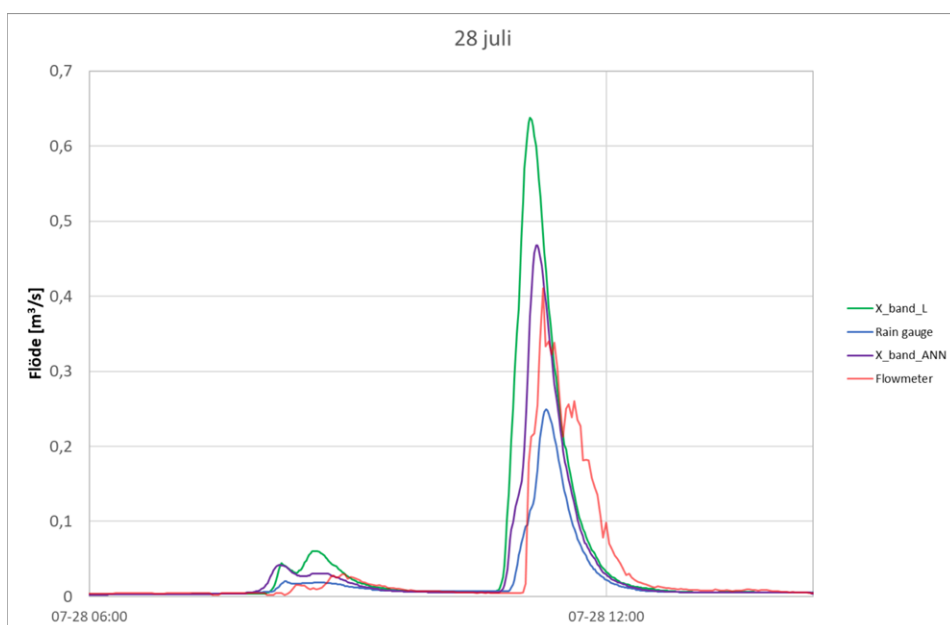
Tabell 7.1

Statistisk sammanställning av kriterier för avrinningsmodelleringen i Ellinge med olika indata för 5-min värden (jämförelse mellan observationer och simuleringar för avrinning och 24 regnhändelser).



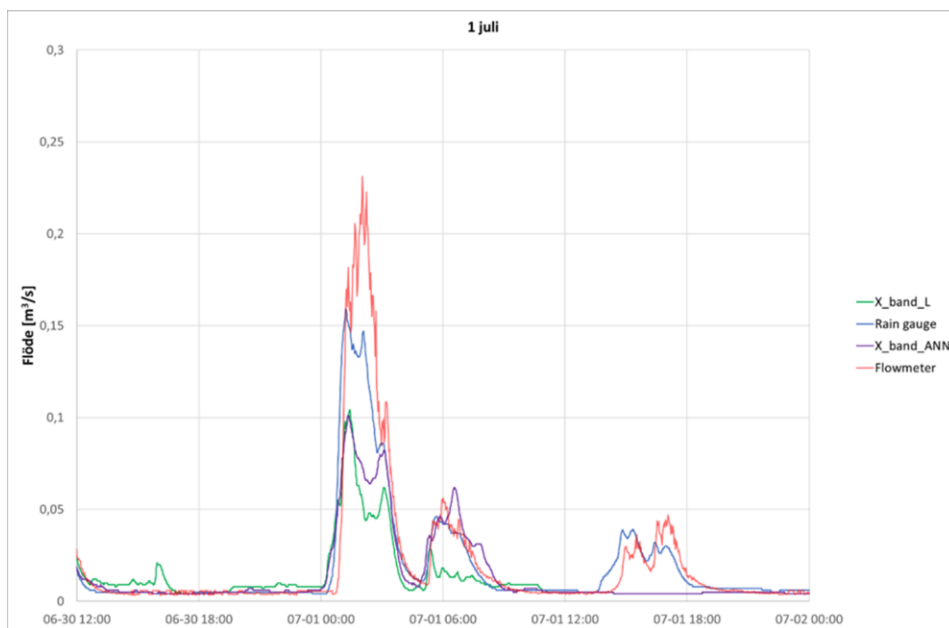
Figur 7.1

Simulerat flöde för nederbördstillfället den 28 juli jämfört med uppmätt flöde i delområdet för Ellinge. X-axel är tid, y-axel är flöde.



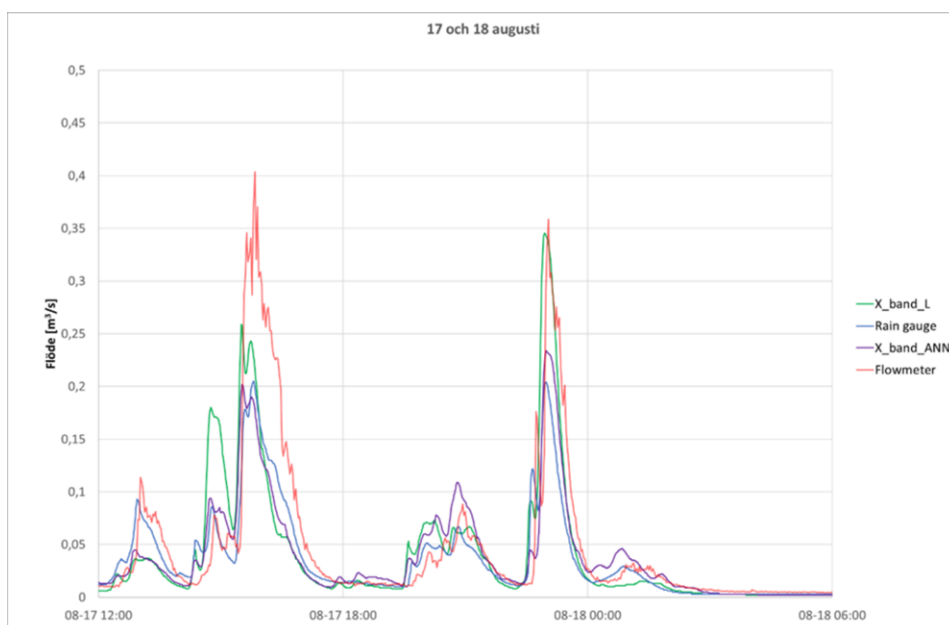
Figur 7.2

Simulerat flöde för nederbördstillfället den 28 juli jämfört med uppmätt flöde i delområdet för Ellinge. X-axel är tid, y-axel är flöde.



Figur 7.3

Simulerat flöde för nederbördstillfället den 1 juli jämfört med uppmätt flöde i delområdet för Ellinge. X-axel är tid, y-axel är flöde.



Figur 7.4

Simulerat flöde för nederbördstillfället den 17 och 18 augusti jämfört med uppmätt flöde i delområdet för Ellinge. X-axel är tid, y-axel är flöde.

I detta avsnitt summeras resultaten för avrinningssimuleringen för Lundåkra, vilket visas i Tabell 7.2.

Regnindata	CC	NSE	MAE (L/s)
Stationära regnmätare	0,76	0,19	4,83
X-band (L)	0,82	-0,13	5,53
X-band (ANN)	0,75	0,10	5,14
C-band	0,53	-0,27	6,52

* CC=1, NSE=1, MAE=0 innebär perfekt överensstämmelse. NSE<0 visar sämre simulering än vad som erhålls med medelvärde för avrinningen.

Tabell 7.2

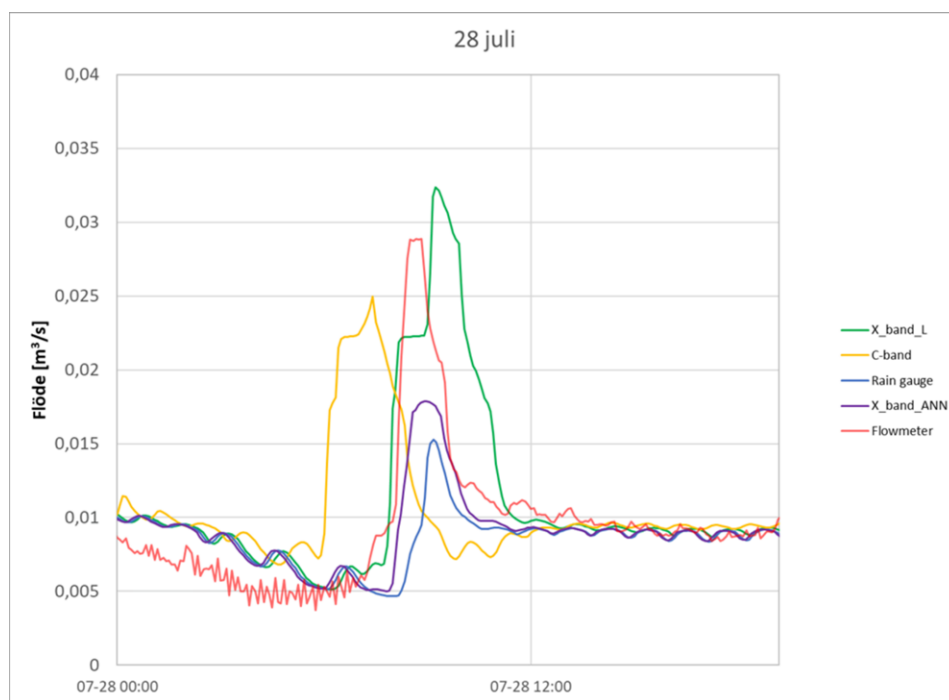
Statistiskt resultat av avrinningssimulering för Lundåkra med olika regnindata för 5-min tidssteg (jämförelse mellan observerad och simulerad avrinning för 24 regnhändelser).

För Lundåkra presterade de olika datakällorna mera likartat än för Ellinge. I termer av CC presterar XR (L) något bättre än stationära mätare och ANN, medan de stationära mätarna ger ett något bättre resultat i termer av NSE och MAE. C-band ger något sämre värden men skillnaden mot stationära mätare och XR är mindre än för Ellinge. Det är dock en relativt stor spridning i resultaten. Vid olika typer av regnhändelser beskrivs avrinningen olika bra med modellen och det är inte entydigt en speciell typ av regnindata som är bäst för samtliga händelser.

Hydrograferna som visas i Figur 7.5 visar en jämförelse mellan uppmätt och simulerat flöde för regntillfället den 28 juli med regnindata från den stationära regnmätaren i Teckomatorp, en XR (Xband L), två XR (Xband_ANN) och C-band radar. Överensstämmelsen mellan observerad och modellerad avrinning för 28 juli representerar hur korrelationskoefficienten såg ut överlag i studien.

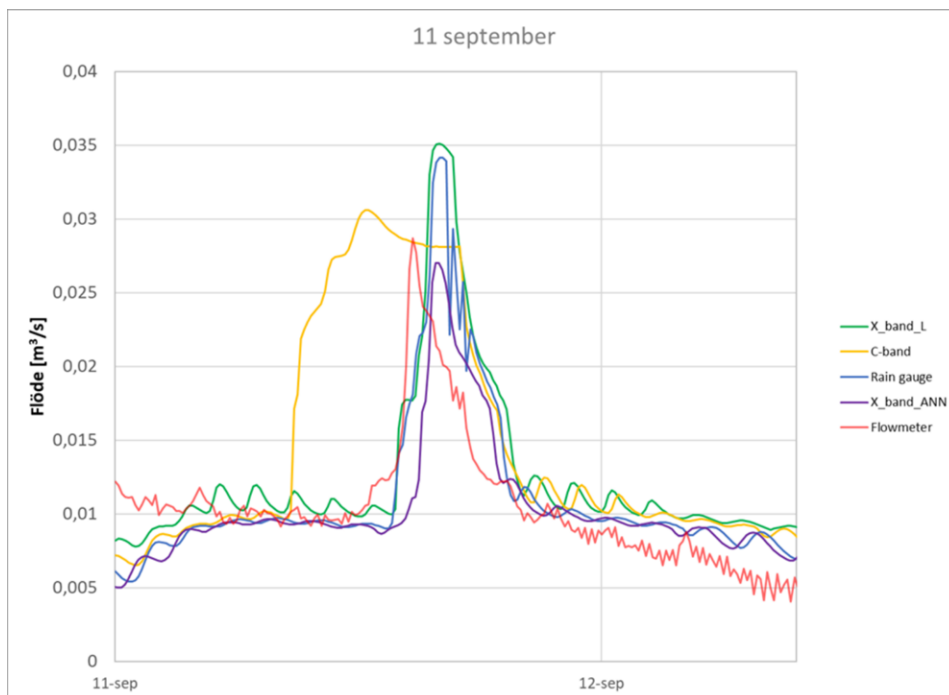
Hydrograferna som visas i Figur 7.6 visar en jämförelse mellan uppmätt och simulerat flöde för regntillfället den 11 september med regnindata från den stationära regnmätaren i Teckomatorp, en XR (Xband L), två XR (Xband_ANN) samt C-band radar. Flödeskurvans utformning med Xband ANN är vid det här regntillfället mycket lik den uppmätta, dock något förskjuten i tid. Xband LNSVA och den lokala regnmätaren skapar ungefär liknande flödeskurvor med ett högre toppflöde än uppmätt. SMHI:s C-band får ett betydligt mer utdraget beteende.

Jämförande hydrografer för fler regntillfällen finns i Bilaga E.



Figur 7.5

Simulerat flöde för nederbördstillfället den 28 juli jämfört med uppmätt flöde i delområdet för Lundåkra. X-axel är tid, y-axel är flöde.



Figur 7.6

Simulerat flöde för nederbördstillfället den 11 september jämfört med uppmätt flöde i delområdet för Lundåkra. X-axel är tid, y-axel är flöde.

8 Diskussion

XR-tekniken är förhållandevis ny i Sverige, första anläggningen installerades 2019 utanför Lund och den andra anläggningen installerades 2021 i Helsingborg.

Många problem har identifierats under arbetets gång som visar på vikten av samarbete och resursoptimering över anläggningsgränser när avancerade digitala mätinstrument införs vid våra VA-anläggningar. Den specifika målsättningen med detta projekt var att kombinera data från två XR till en samlad databas för att förbättra regnbestämning och avrinningssimulering. Således utvecklades och testades en empirisk linjär regressions-modell (REG), och en helt datadriven beräkningsmodell som använder ett artificiellt neuralt nätverk (ANN) för att beräkna regn.

Precisionen på beräknade regnvärden har utvärderats på två sätt:

- direkt jämförelse av lokala regnvärden med in-situ värden från markbaserade regnmätare av typ tipping bucket som sanna värden (direkt validering)
- jämförelse av avrinningsmodellering för två små urbana avrinningsområden, Ellinge och Lundåkra, med regndata dels från ANN och REG-modellerna, dels från regnmätare i området samt C-band och SMHI:s regnmätare (indirekt validering).

Resultaten från den direkta valideringen visar att radarn med fördel kan användas för att beskriva regn i tid och rum.

Generellt sett förbättras precisionen när överlappande observationer görs med två XR. Resultaten visar att en enkel linjär multiregressionsmodell och en ANN modell är likartade i sin precision. Studien visade också att om fler radarnivåer kan användas så kommer också de modellerna att förbättras. För Helsingborgs XR var bara en radarnivå tillgänglig för generering av regnprodukter inom detta projekt men för närvarande är fler nivåer tillgängliga.

XR i Dalby mäter på fem nivåer men registrerade fler störningar i dataserien. Detta resultat var oväntat och förekom inte lika mycket i pilotstudien 2019 då fyra nivåer användes. Helsingborgs XR har också utökat antalet nivåer till fem. Det kommer därmed att vara möjligt att fastställa om mätningen på lägst nivå störs mycket av omgivningen vilket misstänks vara orsaken till den lägre tillgängligheten för data från radarn i Dalby. En annan åtgärd för att förbättra regnprodukterna är att öka mätavståndet för XR från 50 till 70 km.

Sammanfattningsvis visar studien att överlappande observationer som görs med två XR möjliggör att än mer vederhäftiga uppskattningar av regn kan göras och att det fortfarande finns utvecklingspotential att förbättra regnprodukterna.

En indirekt jämförelse av resultat med avrinningssimulering baserat på regn med data från XR är komplex valideringsmodell eftersom den även innefattar effekten av en transformation av regn till flödesavrinning via en hydrodynamisk modellrepresentation av ledningsnätet. Det kan här finnas faktorer (exempelvis kända/okända bräddpunkter) i det fysiska ledningsnätet som påverkar det uppmätta flödet. RDI-modulen som ingår i modellen uppströms Lundåkra ARV (Rain Dependent Infiltration - en konceptuell modell för beskrivning av långsamma flöden till exempel dränering och inträngande grundvatten) komplicerar resultatet ytterligare och det är troligen lättare att göra dessa jämförande studier på en hydraulisk modell som endast beskriver den snabba regnpåverkan. Därmed påverkas resultaten till väldigt stor del att ledningsnätsmodellerna är uppbyggda och kalibrerade på olika sätt med RDI-modul för Lundåkra respektive utan RDI-modul för Ellinge.

Två lärdomar som blev tydliga med resultaten var:

- vikten att säkerställa eventuella felkällor i tid från regndatan (radar och regnmätare) och var konsekvent med vilken UTC tidskod som används.
- Stationära regnmätare måste vara nära en avrinningsmodell för att det ska generas ge representativa värden som resultat. I exemplet med regnmätaren i Hörby blev det tydligt att denna var inte tillräckligt nära för att ge representativa värden i avrinningsmodellen.

I Ellinge avrinningsområde var simuleringarna, där en lokalt anpassad modell för representation av regndata användes, av högre precision i jämförelse med regndata från en enskild radar eller markbaserade regndata. C-band gav något sämre värden men skillnaden mot stationära mätare och XR är mindre än för Ellinge. Detta beror troligen på att det studerade avrinningsområdet i Ellinge var betydligt mindre samt hade en större andel snabb regnrespons varför det är än viktigare med hög precision på regnets utbredning.

Vidare tydliggjordes i korrelationsfaktorn för Ellinge att regnmätare som regnprodukt troligen hade fått ett högre värde med en något högre reduktionsfaktor. I resultaten syntes tydligt hur det modellerade värde med stationär regnmätare som indata var konsekvent något lägre än uppmätt värde från flödesmätare vid reningsverk. Om denna reduktionsfaktor på 0,7 hade höjts något hade resultaten blivit måhända haft en högre korrelation till uppmätt flöde.

För Lundåkra var precisionen vid simuleringarna mer likartad för de olika datakällorna än för Ellinge. I Lundåkra avrinningsområde användes en regnmodell som delvis inte var anpassad för det geografiska området och detta hade sannolikt en effekt på resultatet. Resultat från simuleringar med C-band radardata från det nationella nätverket uppvisar som väntat större avvikelser i timing och nivå av kortvariga flödestoppar, vilket visar på nödvändigheten av högupplöst lokal regndata för urbanhydrologiska tillämpningar.

Men kanske än viktigare för resultaten i denna studie är att förstå att de avrinningssimuleringar som användes i den här studien inte är anpassade till den typ av högupplösta spatiala regnprodukter som XR tillhandahåller. Detta får konsekvenser för implementering och kalibrering av nuvarande modellverktyg. I takt med att vi nu kan beskriva regn och dess spatiala fördelning bättre måste även förståelsen för hur avrinningsförloppet skall beskrivas utvecklas. Två exempel som inte har beaktats på ett vederhäftigt sätt i denna studie är t.ex.:

- Beskrivning av tillskottsvatten – för att få en representativ bild över dämningarnivåer och flöden i ledningsnätet behöver både snabba och långsamma tillskottsvattenkomponenter beaktas. I denna studie har ledningsnätmodellerna beaktat denna aspekt olika.
- Pumpar – det är komplext att studera resultaten då det finns pumpar/magasin i systemet som skapar pulslänkande resultat.

I studien användes två olika kalibreringsprotokoll i de två avrinningsområdena och även mellan olika datakällor. För att ge representativa resultat i kalibreringen av tex Ellinge-modellen behövde modellens belastande ytor vara lägre för de stationära regnmätarna än för de radarbaserade regnprodukterna. Det finns ingen fysisk förklaring till varför olika de belastande ytorna skapade olika resultat beroende på vilken typ av regnprodukt. Inom projektet fanns det inte utrymme för att en djupare analys av fenomenet varför modellen kräver olika storlek på de belastande ytorna för olika regnprodukter, men en finkalibrering skulle sannolikt resultera i bättre resultat. Dock skulle det troligen vara en fortsatt skillnad i reduktionsfaktorn och för framtida studier hade en känslighetsanalys med flera olika reduktionsfaktorer rekommenderats med analyser för flera olika värden.

Ellinge och Lundåkra är geografiskt relativt små avrinningsområden och därmed blir påverkan på avrinningen av den spatiala regnfördelningen sannolikt för de flesta regn mer begränsad. För större urbana avrinningsområden krävs ett omfattande nät med stationära regnmätare att uppskatta den spatiala fördelningen av regn. Här har regnprodukter baserade på XR en betydande potential i kombination stationära regnmätare. XR ger t.ex. en större möjlighet att välja vilka regn som är lämpligast att kalibrera mot (oftast önskas vid kalibrering av den snabba regnresponsen regn med något större volym/intensitet samt att de är relativt jämnt fördelade över avrinningsområdet).

Detta projekt har varit kortvarigt och studier behöver göras under längre perioder för att kunna bedöma hur de utvecklade regnprodukterna kan användas för att förbättra olika flödeskomponenter i avrinningsmodeller. Beskrivning av regnhändelser baserade på XR ger möjlighet att i detalj studera hur den spatiala fördelningen regn påverkar olika typer av avrinningsområden. Det studerade avrinningsområdena har varit relativt små och det kan därmed förväntas att i ett mer komplext och större avrinningsområde som består av många delområden kommer tillförlitliga regnprodukter få en än större betydelse för att beskriva hur regnets dynamik och utbredning påverkar avrinningen över tid och rum och medverka till att ta fram produkter som även förutsäger och förvarnar om eventuella regn och översvåmningsproblematik.

9 Slutsatser

Det främsta målet med denna studie var att utveckla metoder för att kunna dra nytta av den mängd data som kommer från nätverk av XR, som blir allt vanligare i de nordiska länderna exempelvis till analys av flöden till reningsverk och bräddningar. Syftet med studien var att sammanlänka alla data, i den överlappande zonen från två XR i södra Sverige. I studien har utvecklats en empirisk linjär regressionsmodell (REG), och en helt datadriven beräkningsmodell som använder ett artificiellt neuralt nätverk (ANN) för att beräkna regn. Beräknade regnvärden har utvärderats på två sätt:

- Direkt jämförelse av lokala regnvärden med in-situ värden från markbaserade regnmätare av typ tipping bucket som sanna värden (direkt validering) och
- Jämförelse av avrinningsmodellering för två små urbana avrinningsområden, Ellinge och Lundåkra, med regndata dels från ANN och REG-modellerna, dels från regnmätare i området (indirekt validering).

Resultaten från den direkta valideringen visar att:

- XR kan användas för att beskriva regn i tid rum på ett vederhäftigt sätt.
- Generellt sett förbättras precisionen när överlappande observationer görs med två XR.
- En enkel linjär multiregressionsmodell och en ANN modell ger likartade resultat.
- Precisionen på renprodukterna kan fortsatt förbättras genom att använda mer än en radarnivå och genom att öka mätavståndet för XR till 70 km.

Sammanfattningsvis möjliggör överlappande observationer av XR att än mer vederhäftiga uppskattningar av den spatiala fördelningen av regn kan göras och att det fortfarande finns utvecklingspotential att förbättra dessa regnprodukter.

En direkt jämförelse av resultat från avrinningssimulering baserat på XR regn med data från markbaserade regnmätare är en komplex valideringsmodell eftersom den även innefattar effekten av en transformation av regn till flödesavrinning via en komplex hydraulisk modell.

Resultaten från den indirekta valideringen visar potentialen av att använda regndata från ANN och REG-modellerna. I Ellinge avrinningsområde var simuleringar där en lokalt anpassad modell för representation av regndata användes av högre precision i jämförelse med simuleringar baserade på markbaserade regnmätare. Därtill har det använts olika reduktionsfaktorer (0,7 för regnmätare och 0,9 för de andra regnprodukterna) vilket påverkat resultaten. För regnmätare hade en något högre reduktionsfaktor troligen gett bättre resultat i förhållande till det uppmätta värdet vid Ellinge.

I Lundåkra avrinningsområde användes en modell som enbart delvis var anpassad för det geografiska området och detta hade sannolikt en effekt på resultatet. För Lundåkra var precisionen vid simuleringarna mer likartad för de olika datakällorna än för Ellinge.

Men kanske viktigare att förstå i denna studie är att de avrinningsmodeller som användes i den här studien inte är anpassade till den typ av högupplösta spatiala regnprodukter av hög precision som radarn tillhandahåller. Detta får konsekvenser för implementering och kalibrering av nuvarande modellverktyg. I takt med att vi nu kan beskriva regn och dess spatiala och tidsmässiga fördelning bättre måste även förståelsen för hur avrinningsförloppet skall beskrivas utvecklas. Exempel på områden som inte har beaktats på ett vederhäftigt sätt i denna studie är, hur tillskottsvatten till ledningsnätet och fysiska regleringar såsom pumpar, ledningsnätets skick och magasin påverkar avrinningen.

9.1 Förslag till framtida arbete

Denna rapport är bland de första av sitt slag i Sverige där olika regnprodukter baserade på X band radar data har utnyttjats för simulering av avrinning från ledningsnät. Inom VA-modellering är det viktigt att integrera regn i en avrinningsmodell som är representativ mot uppmätt regn. I detta avseende erbjuder radartechniken möjligheter att kunna välja rätt nederbörds mängd och intensitet inom geografiska områden där en beskrivning av regnförlopp inte fångas av traditionella punktmätningar.

Ett uppenbart område som kräver vidare forskning är härvid att utveckla förståelsen för hur den spatiala fördelningen regn uppträder i tid och rum och hur den påverkar flödessimulering från olika typer av avrinningsområden. Härvid hade det även varit intressant att studera hur också större avrinningsområden påverkas och på vilket sätt olika modellkomponenter påverkas tidsmässigt till att högupplösta regndata mer frekvent börjar utnyttjas inom urban avrinningssimulering.

Referenser

American Meteorological Society, 2012: Rain. Glossary of Meteorology, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Rain>.

Cifelli R. & Chandrasekar V. (2010). Dual-polarization radar rainfall estimation. In: Rainfall: State of the Science, Vol. 191 (F. Testik & M. Gebremichael, eds). Geophysical Monograph Series, Washington, DC, pp. 105–126.

Malmö stad, 2016. Skyfallsplan för Malmö (Pluvial flood management plan, Malmö).

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

Hosseini S. H. (2019). Disastrous Floods after Prolonged Droughts Have Challenged Iran. *FUF-Bladet*, 2019 Jun 17, pp. 30–32.

Hosseini S. H. (2021). AI Assisted Radar Rainfall Algorithms for Advanced Engineering Decision Support Systems. Funding agency: Innovationskontor Syd., Sweden. 2021-2022.

Hosseini S.H. (2022). Advanced Remote Sensing Precipitation Input for Improved Runoff Simulation: Local to regional scale modelling. *Water Resources Engineering*, Lund University, 214 pp.

Hosseini S. H., Hashemi H., Berndtsson R., South N., Aspegren H., Larsson R., Olsson J., Persson A. & Olsson L. (2020). Evaluation of a new X-band weather radar for operational use in south Sweden, *Water Science and Technology*, 81(8): 1623–1635. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.066>

Kumjian M. R. (2013). Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: description of the polarimetric radar variables. *Journal of Operational Meteorology*, 1(19), 226–242.

Lengfeld K., Clemens M., Merker C., Munster H. & Ament F. (2016). A simple method for attenuation correction in local X-band radar measurements using C-band radar data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(11), 2315–2329.

Lengfeld K., Clemens M., Muenster H. & Ament F. (2014). Performance of high-resolution X-band weather radar networks – the PATTERN example. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(12), 4151–4166.

Li X. & Willems P. (2017). Performance of high-resolution quantitative precipitation estimation from a compact dual-pol x-band radar in Belgium with evaluation of different gauge-adjustment techniques. In: *Proceedings of EMS2017 Annual Meeting*, Dublin, Ireland.

Lim S., Cifelli R., Chandrasekar V. & Matrosov S. Y. (2013). Precipitation classification and quantification using X-band dual-polarization weather radar: application in the hydrometeorology testbed. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30 (9), 2108–2120.

Meteorological Service of Canada. MANOBS—Manual of Surface Weather Observations; OCLC: 907906587; Environment Canada: Gatineau, QC, Canada, 2015.

Met Office. Fact sheet No. 3: Water in the atmosphere, 2011, The Met Office, Exeter, UK.

Michelson D. B., Lewandowski R., Szewczykowski M., Beekhuis H., Haase G., Mammen T., Faure D., Simpson M., Leijnse H. & Johnson D. (2019). EUMETNET OPERA weather radar information model for implementation with the HDF5 file format version 2.3. Technical report, EUMETNET OPERA.

Morbidelli et al. (2020). The history of rainfall data time-resolution in a wide variety of geographical areas. *Journal of Hydrology*, 590, 125258.

Ochoa-Rodriguez S., Wang L.-P., Gires A., Pina R. D., Reinoso-Rondinel R., Bruni G., Ichiba A., Gaitan S., Cristiano E. & van Assel, J. (2015). Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: a multi-catchment investigation. *Journal of Hydrology*, 531, 389–407.

Sharif H. O. & Ogden F. L. (2014). Mass-conserving remapping of radar data onto two-dimensional Cartesian coordinates for hydrologic applications. *Journal of Hydrometeorology* 15 (6), 2190–2202.

Simpson MJ and Fox NI (2018) Dual-polarized quantitative precipitation estimation as a function of range. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(6): 3375-3389.

South N., Hashemi H., Olsson L., Hosseini S. H., Aspegren H., Larsson R., Berndtsson R., Das R., Marmbrandt A. Olsson J. & Persson A. (2019). Väderradarteknik inom VA-området – test av metodik. SVU-rapport 2019-3, Svenskt Vatten Utveckling, Sweden.

Thorndahl S., Einfalt T., Willems P., Ellerbæk Nielsen J., Ten Veldhuis M.-C., Arnbjerg-Nielsen K., Rasmussen M. R. & Molnar P. 2017 Weather radar rainfall data in urban hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (3), 1359–1380.

Van de Beek C. Z. Leijnse H. Hazenberg P. Uijlenhoet R. 2016 Close-range radar rainfall estimation and error analysis. *Atmospheric Measurement Techniques* 9 (8), 3837–3850.

VEVA (2022). Webblänk: <http://www.veva.dk/wp-content/uploads/2017/04/WeatherRadarEchos.png> Hämtat 2022-04-19

Wang L.-P., Ochoa-Rodríguez S., Simões N. E., Onof C. & Maksimović C. (2013). Radar–raingauge data combination techniques: a revision and analysis of their suitability for urban hydrology. *Water Sciences & Technology* 68 (4), 737–747.

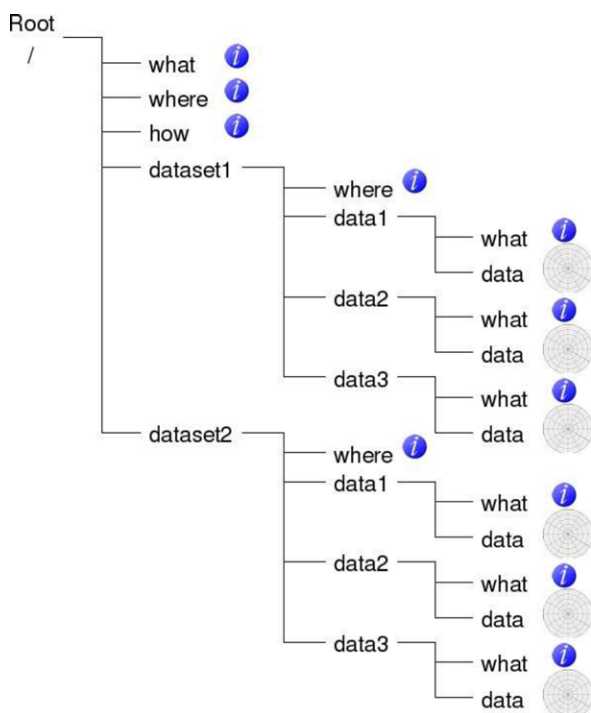
Wang Y. & Chandrasekar V. (2010). Quantitative precipitation estimation in the CASA X-band dual-polarization radar network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(10), 1665–1676.

Zhang, G. P. (2012). ‘Neural Networks for Time-Series Forecasting’, *Handbook of Natural Computing*, pp. 461-477. doi:10.1007/978-3-540-92910-9 14

Bilagor

Bilaga A HDF5 dataformat

Enligt *Michelson et al. (2019)* är HDF5 filerna organiserade efter en hierarkisk struktur med data under fyra huvudrubriker; “vad”, “var”, “hur” och “dataset” (Fig. A) för allmän användning. Varje HDF5 fil innehåller multipla vertikala skannade nivåer under en minut och representerar data för 3D polära koordinater specificerade av tre komponenter: azimuth, vinkelnivå och avstånd. För varje vinkelnivå, ökar upplösningen av den projicerade radardetekterade volymen på det kartesiska planet (radar-bin) motsvarande avstånd i azimuth (rotationsriktning). Avståndsupplösningen å andra sidan, är konstant (50 m för Dalby XR och 75 m för Helsingborg XR). HDF5 data från en nivå från Helsingborgs XR vid 2° vinkel och 5 nivåer från Dalby XR vid 1,5, 2, 4, 6 och 8° vinkel var tillgängliga för denna studie.



Figur A.1

Polär volym innehållande två vertikala skannade nivåer (Michelson et al., 2019).

Utöver plats och tid, innehåller HDF5 filerna radarvariabler som beräknas av ett program beroende av observationer av energiinnehåll och fas för de reflekterade signalerna (med referens till de överförda vågsignalerna). Radarvariabler som är relevanta i detta sammanhang är DBZH (horisontell reflektivitet i dB), ZDR (differentiell reflektivitet mellan horisontell och vertikal polarisering i dB), VRAD (radiell hastighet i m s^{-1}), RHOHV (korrelation mellan horisontell och vertikal reflektivitet, variabelvärde mellan 0 och 1), PHIDP (differentiell fas), KDP (specifik differentiell fas i grader km^{-1}), och RATE (regnintensitet i mm h^{-1} baserat på radarekvationer som beskrivits av *Hosseini et al., 2020*). Alla dessa variabler, förutom RATE, användes för beräkningarna av regnprodukterna genom ANN simulering. Å andra sidan, enbart RATE användes för den empiriska regressionsmodelleringen. Dessa beräkningsmetoder beskrivs noggrannare i följande sektioner efter beskrivning av grundläggande steg i uppdelning av data och studieområde avseende regnhändelser och avrinningsområde.

Bilaga B Detaljer kring regnberäkning

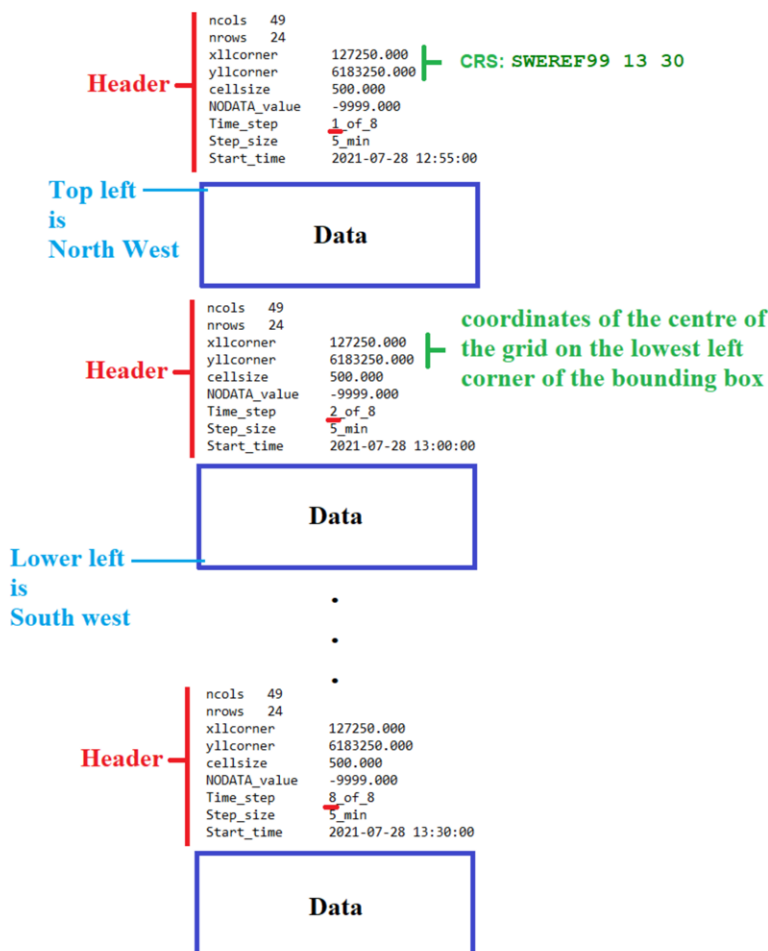
ANN-modeller tränades på en del av tillgängliga data (50-60 % beroende på zon) och resten av data användes delvis till en inom-processvalidering och delvis en post-processvalidering/testning. För REG användes också samma förfarande och deldatamängder för träning och validering. Valideringen användes också som ett test för att förhindra överkalibrering baserat på 15-20 % av data.

Antalet 5-min radar-regnmätarpar tillgängligt för modelleringen var 9,000–17,000 beroende på zon. För en jämn fördelning av regndata, speciellt för höga intensiteter (låg frekvens), valdes lika delar av data slumpmässigt ut för kalibrering-validering/testning enligt:

- observationer lägre än 95 %-percentilen
- observationer inom 95–97,5 %-percentilen
- observations inom 97,5–99 %-percentilen
- observations inom 99–99,9 %-percentilen
- observations högre än 99,9 %-percentilen

Bilaga C GIS ASCII dataprodukter

Rutnätsdata sparades i GIS ASCII-filer. Varje fil representerar ett regnhändelse och innehåller multipla tidsserier. Filerna innehåller rubriker mellan datablock (Fig. C.1). Storleken av datablocken motsvarar antalet rutnätspunkter inom varje avrinningsområdesbox, som är 28×50 för Ellinge och 26×33 Lundåkra. Datablocken består av 5-min regndjup i mm och -9999,000 indikerar saknade eller inte beräknade värden, t ex när en ruta är utanför det överlappande området mellan de två XR eller när rutan är utanför avrinningsområdet.



Figur C.1

Struktur på multitidssteg ASCII filer med regndata.

Tre olika beräknade regnhändelser beräknades och sparades i ovanstående ASCII filer med benämningen ANN, REG och L. ANN och REG är beräknade regn från de två sammanlänkade XR genom ANN och regressionssimulering. L betecknar regn från 2-graders vertikala skanningar för Helsingborg XR och Dalby XR inom Lundåkra och Ellinge avrinningsområde. Dessa beräknade regn kan användas för att studera vilka förbättringar som görs genom att kombinera data från två XR jämfört med bara en XR. Man kan också jämföra de olika beräkningsmetoderna.

Bilaga D Namnstruktur för ASCII-filerna

Datafilerna gavs namn som speglar innehållet. Filnamnet startar med typ av produkt med åtföljande termer. T ex, "fnoise" indikerar att de beräknade regnvärdena korrigerades med ett filter för att minska brus på olika nivåer (mellan 0,01 och 0,04 mm/5 min) i relation till medel RHOHV (om mindre än 0,95). Figur 6.1 och 6.2 visar att beräknade data bara representerar rutnät inom avrinningsområdena. Således finns också termen "SubPol" med för Lundåkra och "SubPols" för Ellinge. Slutligen, adderades också två andra index till filnamnen. Ett ID nummer adderades till varje regnhändelse baserat på kriteriet av minst en registrerande regnmätare oavsett värde för 30 minuters tidssteg baserat på tid (större ID värde indikerar ett mer nyligen förekommande regn). Utöver detta adderades ett nummer för regnhändelser som valdes ut över MSI gränsen ($>2 \text{ mm h}^{-1}$) som sorterades beroende på tillgänglighet ($>90\%$ av tiden) av HDF5 data och regntillfällets varaktighet i avtagande och ökande ordning. Av denna anledning har de första listade regnhändelserna inga saknade HDF5 filer och den kortaste varaktigheten (40 min). Till exempel, filnamnet "ANN__SubPols_fnoise_ev1_id160" betyder en ANN-beräknad produkt för det första regntillfället (dvs 100% tillgänglighet av HDF5 data från båda XR) som var det 160:e tillfället som observerades av regnmätarna efter 1 maj, 2021.

Slutligen, termen "oneEq" i filnamnen (för Lundåkra) visar att bara en ekvation/modell användes (baserat på zon II) för hela avrinningsområdet. För Ellinge, användes två ekvationer för zon I och II beroende på om rutnätet var inne i eller utanför zon I.

No.	Ellinge avrinningsområde	No.	Lundåkra avrinningsområde
1	*__SubPols_fnoise_ev1_id160	1	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev2_id262
2	*__SubPols_fnoise_ev2_id262	2	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev4_id270
3	*__SubPols_fnoise_ev3_id157	3	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev5_id254
4	*__SubPols_fnoise_ev5_id254	4	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev7_id260
5	*__SubPols_fnoise_ev6_id158	5	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev8_id163
6	*__SubPols_fnoise_ev7_id260	6	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev9_id246
7	*__SubPols_fnoise_ev9_id246	7	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev11_id274
8	*__SubPols_fnoise_ev10_id277	8	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev12_id272
9	*__SubPols_fnoise_ev11_id274	9	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev14_id159
10	*__SubPols_fnoise_ev12_id272	10	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev15_id238
11	*__SubPols_fnoise_ev13_id266	11	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev19_id248
12	*__SubPols_fnoise_ev14_id159	12	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev20_id164
13	*__SubPols_fnoise_ev15_id238	13	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev21_id293
14	*__SubPols_fnoise_ev18_id219	14	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev25_id288
15	*__SubPols_fnoise_ev19_id248	15	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev26_id288
16	*__SubPols_fnoise_ev21_id293	16	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev29_id115
17	*__SubPols_fnoise_ev23_id112	17	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev31_id126
18	*__SubPols_fnoise_ev25_id87	18	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev32_id77
19	*__SubPols_fnoise_ev29_id115	19	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev34_id126
20	*__SubPols_fnoise_ev31_id126	20	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev37_id106
21	*__SubPols_fnoise_ev34_id61	21	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev40_id62
22	*__SubPols_fnoise_ev37_id106	22	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev41_id81
23	*__SubPols_fnoise_ev39_id68	23	*__SubPol_oneEq_fnoise_ev42_id104
24	*__SubPols_fnoise_ev40_id62		

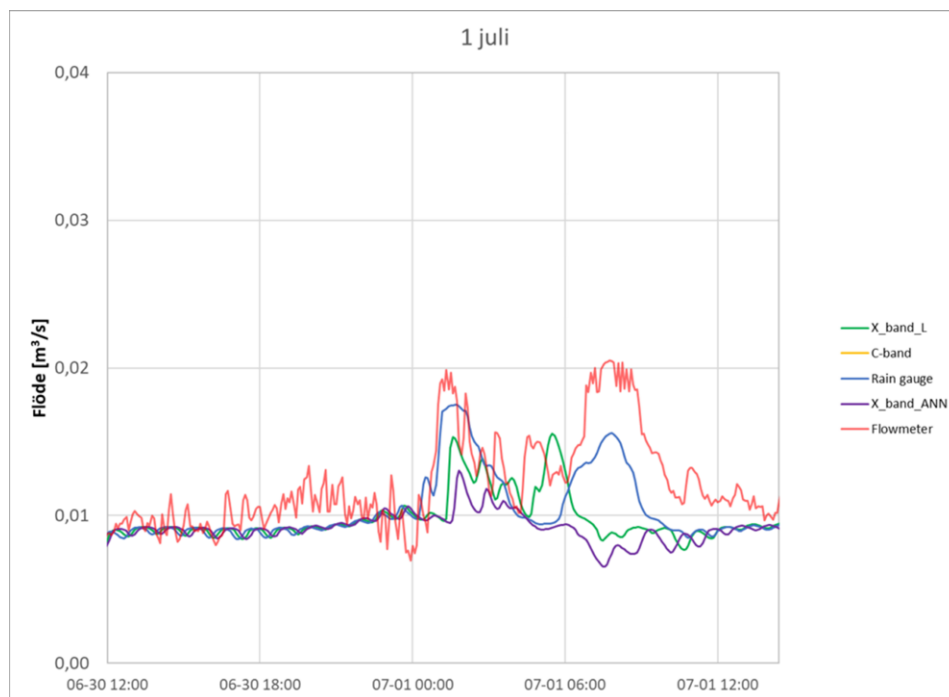
Tabell D.1

Komplett lista med filnamn för utvalda nederbördstillfällen som använts i regn-avrinningsmodelleringen (* kan vara antingen ANN, REG eller L produkt).

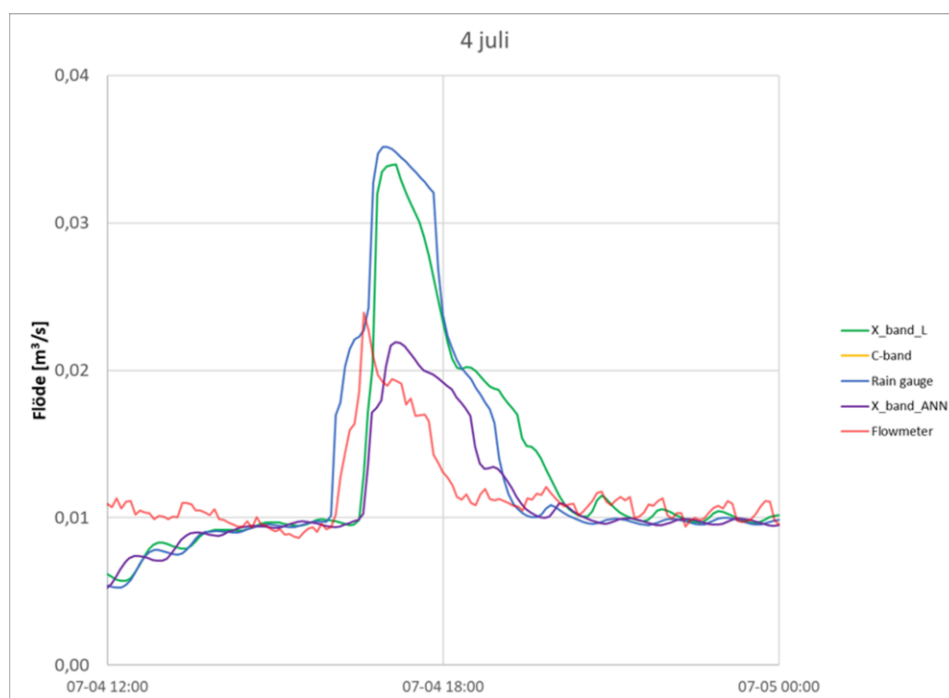
Bilaga E Resultat från NSVA och VA SYD

NSVA

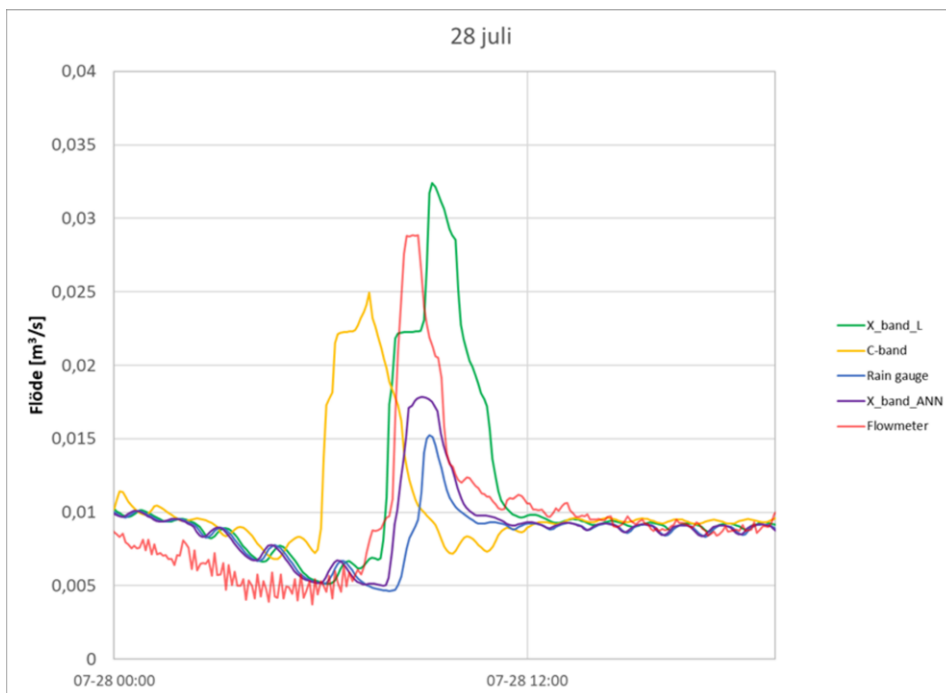
1 juli



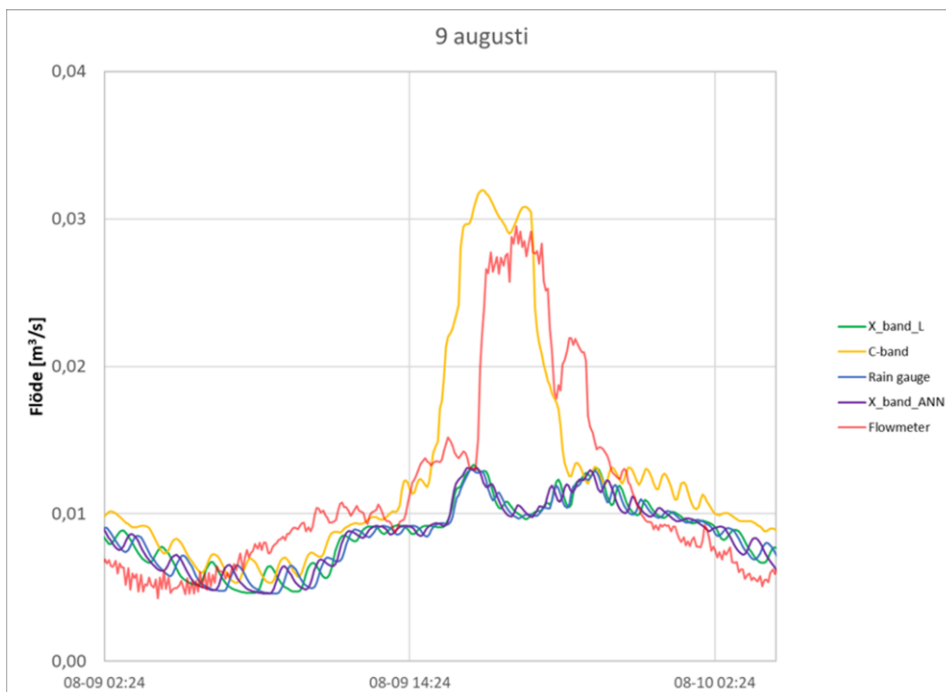
4 juli



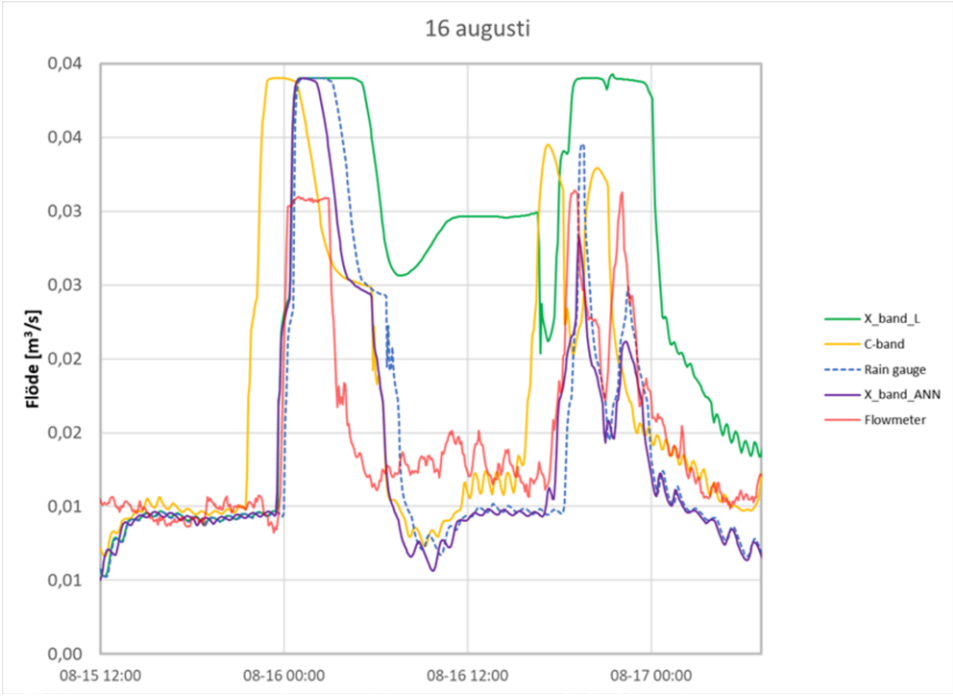
28 juli



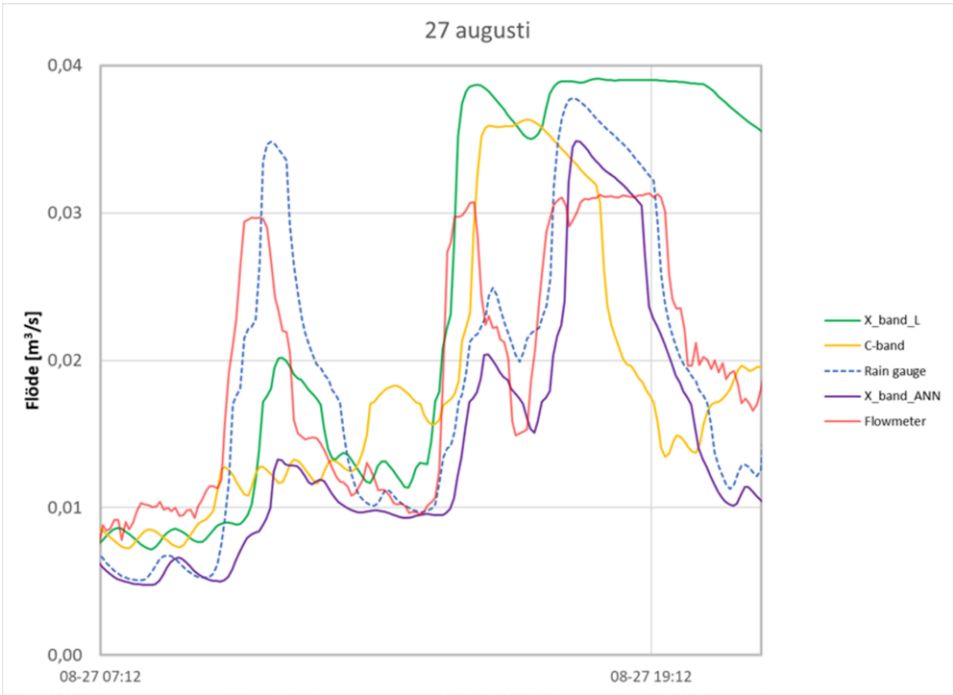
9 augusti



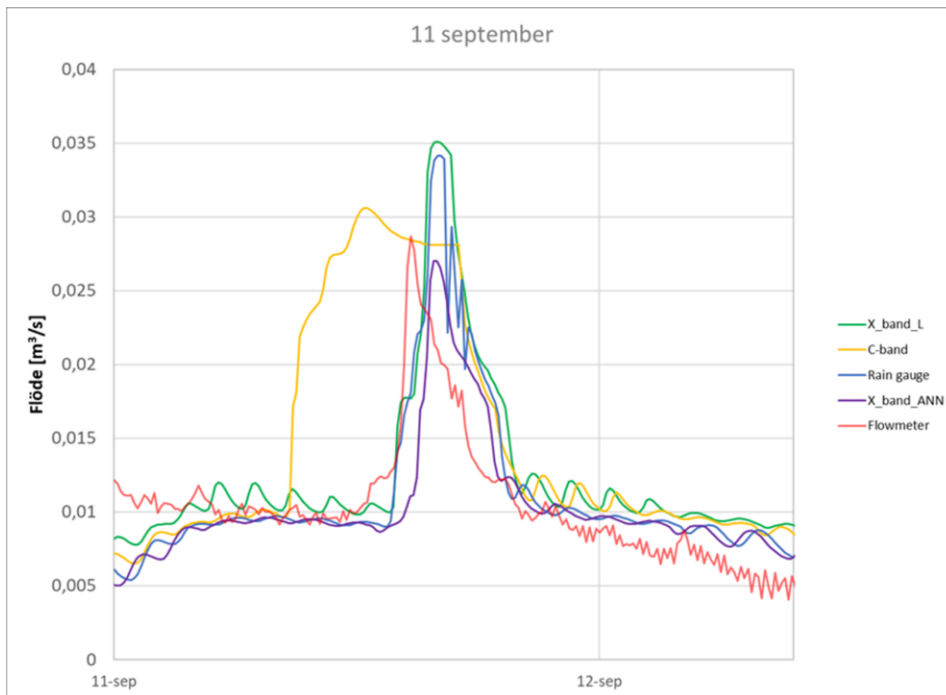
16 augusti



27 augusti

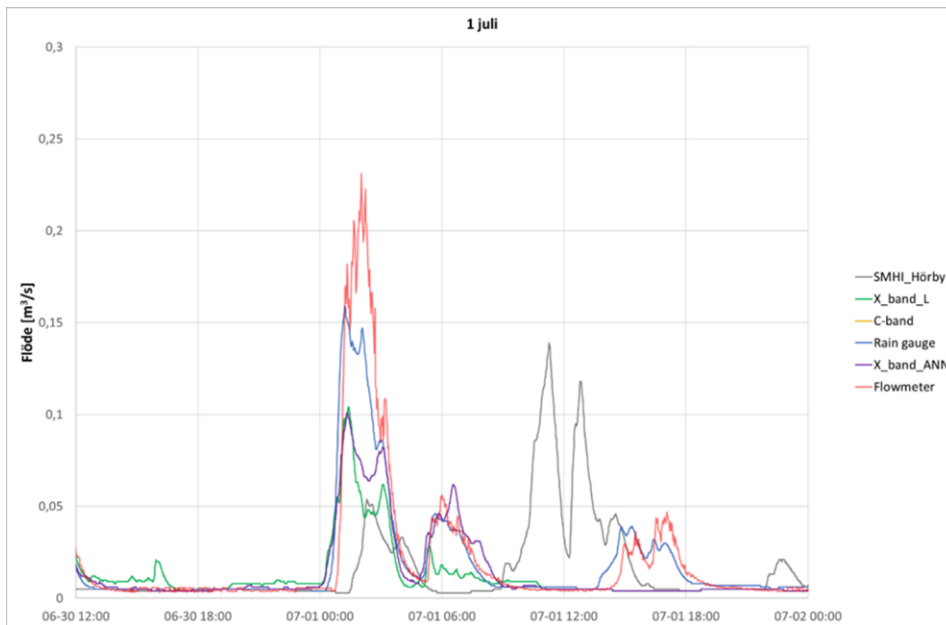


11 september

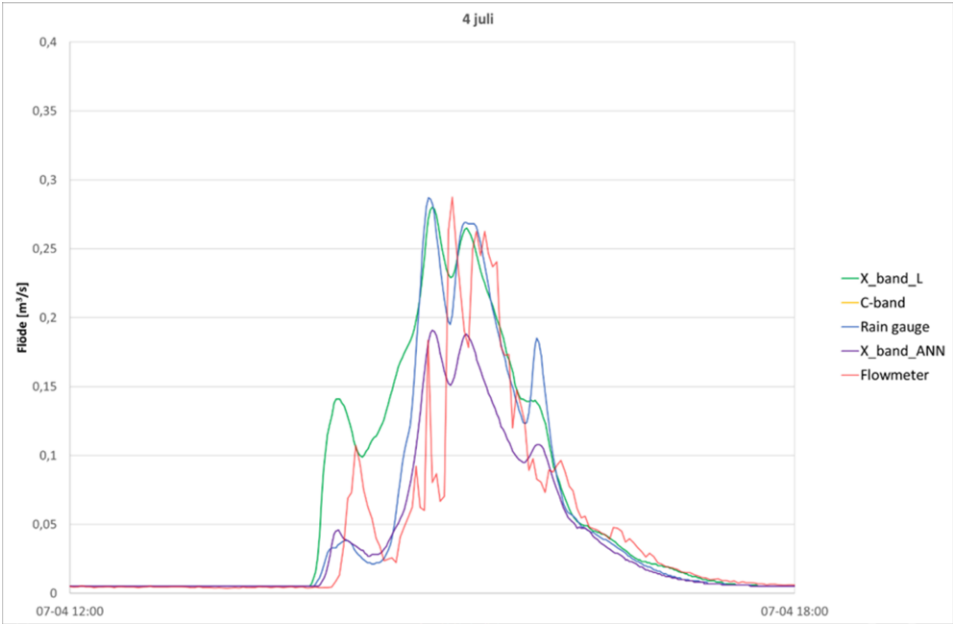


VA SYD

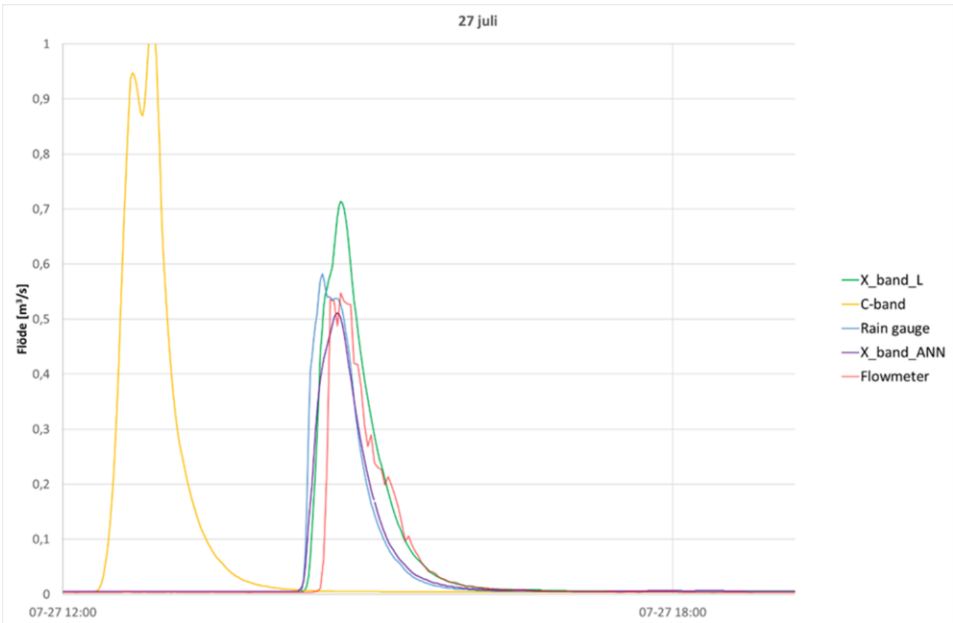
1 juli



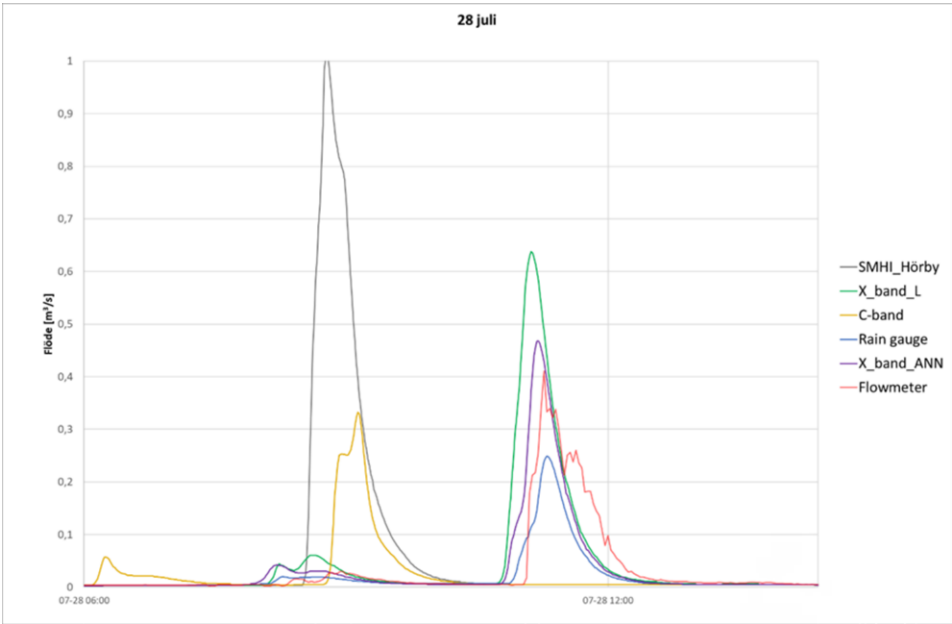
4 juli



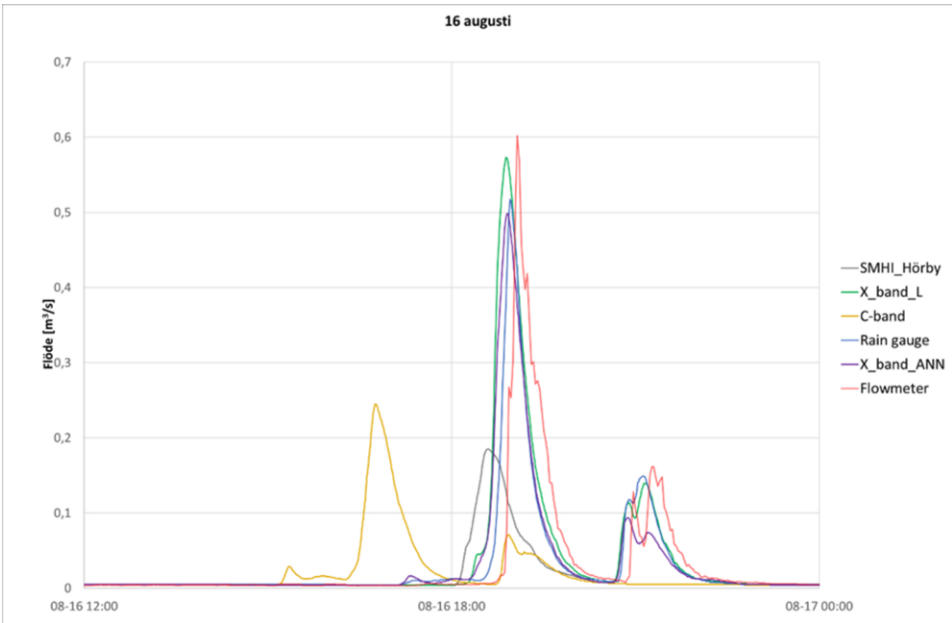
27 juli



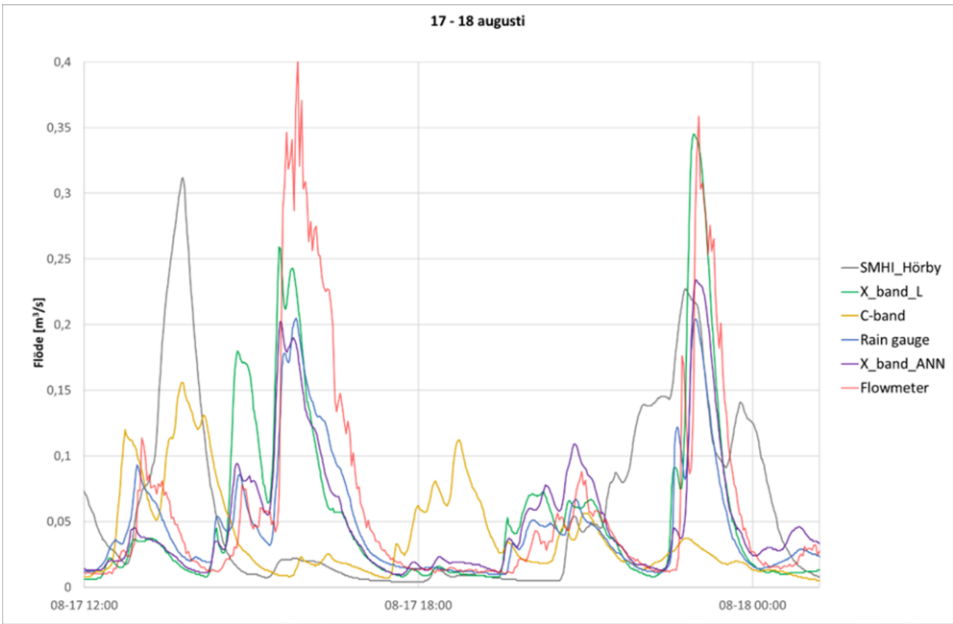
28 juli



16 augusti



17 augusti



Svenskt Vatten

UTVECKLING

Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten AB

POSTADRESS BOX 14057, 167 14 Bromma

BESÖKSADRESS Gustavslundsvägen 12, 167 51 Bromma

TELEFON 08-506 002 00

E-MAIL svensktvatten@svensktvatten.se

www.svensktvatten.se