

Simulering av urban flom ved bruk av data fra værradar.

Petter Reinemo

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Knut Alfredsen, IVM

Medveileder: Sveinung Sægrov, IVM
Yisak Sultan Abdella, SINTEF Energi AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk

NTNU
NORGES TEKNISK NATURVITENSKAPLIGE UNIVERSITET
Institutt for Vann- og miljøteknikk

Masteroppgåve i Vatnforsynings- og avløpssteknikk

Kandidat: **Petter Reinemo**

Tema: **Simulering av urban flom ved bruk av data frå nedbørradar.**

1. Bakgrunn

Flom i urbane område har eit stort skadepotensial og det er difor viktig å analysere slike episodar for å kunne analysere og dimensjonere leidningar og andre metodar for å handtere slike hendingar. Scenario for framtida viser og at vi kan få meir nedbør med høg intensitet, så det vil vere eit aukande behov for denne type analyser. Forståing av slike hendingar avheng av gode romlege nedbørdata med kort tidsoppløysing. Det er typisk praktisk vanskeleg å få god romleg nedbørdekning med tradisjonelle målarar, men radarmålingar gir god romleg dekning, men så langt meir upresise kvantitative data. I denne oppgåva skal radardata frå Rissa radar brukast til å analysere ei nedbørepisode i Trondheim hausten 2008. Radardata skal tilpassast Trondheim, korrigerast og brukast som utgangspunkt for simulering av kapasitet i leidningsnett og oversvømmelsar. Bakgrunn og teoretisk grunnlag for oppgåva bygger på prosjektarbeid hausten 2010.

2. Arbeidsoppgåver

Oppgåva vil ha følgjande hovuddelar:

1. Klargjere radardata for Trondheim, dette vil innebere projisering til rett koordinatsystem, klipping til rett område og konvertering av refleksjonsverdiar til nedbør. Eit system for enkelt å gjere dette skal etablerast.
2. Data frå nedbørradaren kjem i dag med 15 minutt tidsoppløysing, noko som er for grovt for den type analyse som skal utførast i oppgåva. Det må difor interpolerast kart med 1 minutt oppløysing mellom dei karta som radaren gir. Dette skal gjerast ved hjelp ei kryss-korrelasjonsmetode som simulerer nedbøren si rørsle over nedbørfeltet.
3. Det må gjerast ei vurdering av kor gode kvantitative data ein får ut frå radaren, og eventuelt korrigerast ved hjelp av observasjonsdata. Metodikken og korreksjonar må dokumenterast nøye i rapporten.

4. Dei ferdige karta frå oppgåve 3) skal brukast som inngangsdata i Mike Urban for å simulere effekt av nedbørhendinga i leidningsnett og område med oversvømmelsar skal kartleggast. Resultata frå dette skal samanliknast med observasjonsverdiar samla inn frå Trondheim kommune.
5. Vurder kor god modellen som tar utgangspunkt i radardata er samanlikna med modellar som brukar data frå målestasjonar.

3. Rettleiing, data og informasjon

Faglærer vert professor Knut Alfredsen ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU saman med forskar Yisak Sultan Abdella ved SINTEF Energi og professor Sveinung Sægrov ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. Kandidaten er elles ansvarleg for innsamling, kontroll og bruk av data. Hjelp frå dei ovanfor nemnde personane eller andre må refererast i rapporten.

4. Rapport

Struktur og oppsett av rapporten er viktig. Gå utifrå at målgruppa er teknisk personell på seniornivå. Rapporten skal skrivast som ein artikkel.

Rapporten skal innehalde eit samandrag som gir lesaren informasjon om bakgrunn, framgangsmåte og hovudresultata.

Rapporten skal ha innhaldsliste og referanseliste. Referanselista skal vere formatert etter ein eksisterande standard.

Denne oppgåveteksta skal vere inkludert i rapporten.

Formatet på rapporten skal vere B5 og den skal vere laga ved hjelp av eit tekstbehandlingssystem. Alle figurar, kart og bilete som er inkludert i rapporten skal vere av god kvalitet.

Kandidaten skal inkludere ei signert fråsegn som seier at arbeidet som er presentert er eins eige, og at alle bidrag frå andre kjelder er identifiserte gjennom referanser eller på andre måtar.

Det skal og lagast ein 1-sides poster i A3 format som presenterer hovudresultata frå oppgåva.

Frist for innlevering er 11. juni 2011.

Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU

Knut Alfredsen
Professor

Forord

Masteroppgaven bygger på litteraturstudiet "Bruk av nedbørradar for simulering av ekstremnedbør i urbanfelt" gjennomført av undertegnede høsten 2011. I mediene dukker det stadig opp nyhetssaker som omhandler store nedbørsmengder og urban flom som har ført til omfattende skader og store sosiale kostnader. At det i fremtiden spås et "villere og våtere" klima gjør at temaet vil bli mer aktuelt i årene fremover. Behovet for bedre analyser og kunnskap om hvordan å håndtere og forebygge slike situasjoner vil da også øke. Jeg håper at min masteroppgave kan være et bidrag til dette.

Det har vært et veldig interessant og inspirerende tema å jobbe med. Jeg har hatt god støtte fra hovedveileder professor Knut Alfredsen ved SINTEF Energi og NTNU. Knut har vært behjelpelig hele veien med både nyttige og konstruktive innspill. Forsker Yisak Sultan Abdella ved SINTEF Energi har delt velvillig av sine kunnskaper og ideer, som har vært uvurderlig i arbeidet med oppgaven. Han står blant annet bak Python scriptene for beregning av adveksjon, samt produksjon av radarbildene brukt i studiet.

Jeg vil også takke professor Sveinung Sægrov ved NTNU som har vært medveileder til masteroppgaven, Olav Nilssen i Trondheim kommune for tilgang på nedbørsdata, samt Tomas Eidsmo og Axel König i DHI for tilgang og support i Mike Urban.

Trondheim 7. juni 2012

Petter Reinemo

Sammendrag

Urban flom forårsaket av store nedbørsmengder har et omfattende skadepotensiale. Forskning viser at det kan forventes en økt frekvens av tilfeller med store nedbørsmengder i Norge i fremtiden, som øker risikoen for urban flom. For å kunne ta hensyn til den forventede utviklingen i planlegging, dimensjonering og rehabilitering av overvannsystemer er kunnskap om slike situasjoner viktig. Kraftig nedbør opptrer ofte med stor romlig variasjon og over korte tidsperioder. For å analysere slike situasjoner er det derfor nødvendig med god tidsmessig og romlig oppløsning av nedbørsdata. Tradisjonelle nedbørstasjoner representerer punktmålinger. Det kreves derfor et tett nettverk av nedbørstasjoner for å fange opp de romlige variasjonene samt maksimalverdier for tilfeller med lokalt kraftig nedbør. Et slikt nettverk er de fleste steder en mangelvare.

En værradar gir derimot verdier for et sammenhengende felt, slik at eventuelle romlige variasjoner av nedbøren blir fanget opp. Svakheten til radardata er at det ofte er knyttet stor usikkerhet til den kvantitative kvaliteten, samt at tiden mellom hver sveip ofte ikke tilfredsstillende urbanhydrologiske krav til tidsmessig oppløsning. Nesten hele Skandinavia er dekket av et nett av C-band værradarer, som gjør radarene til et potensielt verktøy for analyse av situasjoner med ekstremnedbør.

I studiet er ekstremnedbørstilfellet som oppsto i Trondheim by 13. august 2007 analysert. Nedbørstilfellet ble fanget opp av seks lokale nedbørstasjoner spredt over byen, samt en C-band værradar. Dataene indikerer at nedbøren opptrådte med store romlige variasjoner. Data fra værradaren er derfor viktig i analysen. Den romlige oppløsningen på radarbildene, produsert for situasjonsstudiet, er 250meter \times 250meter. For å bedre den tidsmessige oppløsningen til bildene, samt beskrive adveksjon, er det generert nedbørskart ved å interpolere mellom påfølgende radarbilder. Ved generering av nedbørskart er det gjort antagelser i forhold til nedbørens utvikling. En tidsmessig oppløsning på ett minutt er valgt og kvaliteten til kartene er vurdert. Kartene er justert opp mot observerte verdier ved nedbørstasjonene for å øke den kvantitative kvaliteten til dataene.

Gjennom en romlig analyse av resultatene konkluderer studiet med at nedbørskartene beskriver fordeling og utvikling til nedbøren i større grad enn interpolert nedbør mellom nedbørstasjonene.

Det er funnet en sammenheng i forholdet mellom akkumulert nedbør fra nedbørskart og nedbørstasjon. Det er tydelig at nedbørskartene, for situasjonsstudiet, underestimerer for økende 5 og 10 minutter akkumulerte nedbørsverdier.

Situasjonsstudiet ble modulert ved bruk av fire kalibrerte Mike Urban modeller. Verdier fra nedbørskart og interpolert nedbør ble brukt som inngangsdata. Modellene som tok utgangspunkt i data fra nedbørskart ga kritisk trykkehøyde i flere ledningsstrek i områder med skadesteder enn modellene basert på interpolert nedbør.

Studiet viser at bruk av data fra en C-band værradar er egnet for analyse av en ekstremnedbørsituasjon. Metodikken benyttet i studiet kan være godt egnet for analyse av lignende tilfeller med kraftig nedbør.

Abstract

Urban floods caused by extreme precipitation can result in large damages and high social costs. Studies prove that an increasing frequency of situations with heavy precipitation in Norway is expected in the future, which can increase the risk of urban floods. It is therefore important to understand and analyse these situations to obtain knowledge for planning, dimension and rehabilitation of urban drainage systems. Heavy precipitation often occurs with a high spatial variation and over a short period of time. High spatial and temporal resolution of the rainfall data is therefore essential in analysing of these types of events. Traditional gauge stations represent point measurements with means that a dense network of gauges often is required to catch up the spatial variations of a rainfall. Such networks are most places not present. Weather radars give values for an extended field, which means that spatial variations of precipitation can be caught up. The weakness in the use of radars is that there is often uncertainty regarding the quantitative quality of the radar data. The time steps between each radar scan often do not satisfy the requirements of temporal resolution of the data for use in urban hydrology. Almost all the Scandinavian countries are covered by a net of C-band radars, with means that the radars are a potential tool in the use for analysing of situations with extreme precipitation.

In this study, the extreme rainfall event that occurrence in the city of Trondheim 13th August 2007 is analysed. The rainfall was observed by 6 local short-term raingauges and a C-band weather radar. The precipitation data indicated that the rainfall occurred with high spatial variations. The spatial resolution of the radar pixels, produced for the study, is 250 meters \times 250 meters. To increase the temporal resolution and describe the advection it was interpolated precipitation maps between following radar images. Some assumption was made due to the progress of the rainfall. A temporal resolution of one minute was chosen. The precipitation maps were adjusted towards observed values by the gauge stations to increase the quantitative quality of the radar data.

Through a spatial analyse of the results the conclusion is that the precipitation maps to a greater extent manage to describe the spatial variations and progress of the rainfall than interpolated precipitation.

Cohesion was found in the relationship between accumulated precipitation values given from precipitation maps and gauge stations. It is clear that the precipitation maps underestimate for increasing 5 and 10 minutes accumulated values.

A hydrological modelling of the case study was done by using four calibrated Mike Urban models. Values from the precipitation maps and interpolated precipitation were used as input data. The models based on data from the precipitation produced more critical pressure in several pipes in areas with registered damage than the models based on interpolated values.

The study shows that the use of data from a C-band weather radar is suitable for analyse of an extreme rainfall event. The methodology used in this study can be suitable for analyses of similar situations with heavy precipitation.

Innhold

Forord	III
Sammendrag	V
Abstract	VII
1. Introduksjon	1
2. Situasjonsstudie	3
3. Data	5
3.1 Nedbørsdata	5
3.2 Hydrologiske modeller	6
4. Metode	9
4.1 Behandling av data	9
4.2 Analyse av data fra situasjonsstudiet	13
4.3 Hydrologisk modulering av situasjonsstudiet	14
5. Resultater	17
5.1 Produksjon og justering av nedbørsdata	17
5.2 Resultater fra analysen	24
5.3 Resultater fra hydrologisk modulering av situasjonsstudiet	27
6. Diskusjon	31
7. Konklusjon	37
8. Videre arbeid	39
9. Referanseliste	41

Bilag A: Python script

Bilag B: Forhold i akkumulerte verdier fra nedbørstasjon og nedbørskart

Bilag C: Produksjon av justeringskart

Bilag D: Tilpassing av data fra nedbørskart til Mike Urban

Bilag E: Resultater fra Mike Urban modulering

Bilag F: Digitalt bilag.

Figurliste

Figur 1: Adresseavisen 14. august 2007 (Wollamo og Lien, 2007).....	3
Figur 2: Korttidsnedbørstasjonene i Trondheim.	5
Figur 3: Mike Urban modeller og registrerte skadesteder.....	7
Figur 4: Illustrasjon av genererte nedbørskart mellom radarbildene sveipet 17:15 og 17:30..	17
Figur 5: Utviklingen til nedbøren ved stasjonene gitt fra nedbørstasjonene og genererte nedbørskart.	18
Figur 6: Justeringsfaktorens utvikling i nedbørsfrontens retning.....	20
Figur 7: Plott av akkumulert nedbør fra nedbørstasjon mot ujusterte nedbørskart for 5 og 10 minutter.	20
Figur 8: Maksimal 10 minutters akkumulert nedbørsutvikling fra stasjoner i nedbørsfrontens retning.....	21
Figur 9: Utviklingen til nedbøren ved stasjonene gitt fra nedbørstasjonene og justerte genererte nedbørskart.	22
Figur 10: Akkumulert nedbør gitt fra nedbørstasjonene, radarbilder og genererte nedbørskart.	24
Figur 11: Fordeling av akkumulert nedbør gitt i et snitt i nedbørsfrontens retning gitt av genererte nedbørskart og radarbilder.....	25
Figur 12: Akkumulert nedbør over feltet for hele nedbørstilfellet gitt fra IDW og genererte nedbørskart.	25
Figur 13: (a) Differanse i akkumulert nedbør mellom nedbørskart og IDW. (b) Områder der absolutt verdi av differansen mellom nedbørskart og IDW er < 1	26
Figur 14: Akkumulert nedbør for tidsrommet 17:25 til 17:26 gitt av IDW og justerte nedbørskart.	26
Figur 15: Akkumulert avrenning til ledningsnett fra Mike Urban modellene med inngangsdata nedbørskart, Thiessen polygon og IDW.....	27
Figur 16: Hydrogram fra ledningsstrek mot et utløp, Fredlybekken.....	28
Figur 17: Hydrogram fra ledningsstrek, Lerkendal.....	28
Figur 18: Hydrogram fra ledningsstrek, Lerkendal.....	28
Figur 19: Hydrogram fra ledningsstrek, Møllenberg.	29
Figur 20: Hydrogram fra ledningsstrek, Singsaker.	29

Tabelliste

Tabell 1: Tidspunkt for maksimale nedbørsverdier.....	19
Tabell 2: Akkumulerte verdier fra nedbørstasjoner og nedbørskart, samt justeringsfaktor....	19
Tabell 3: Maksimal akkumulert nedbør per minutt gitt fra nedbørstasjon og justerte genererte nedbørskart.....	23
Tabell 4: Akkumulert nedbør for hele nedbørstilfellet (17:00 - 18:00) gitt av nedbørstasjonene og justerte genererte nedbørskart.....	23
Tabell 5: Andel av betraktet felt der absolutt differanse er mindre enn en gitt akkumulert verdi for hele nedbørstilfellet.....	26

1. Introduksjon

Urbane flommer forårsaket av ekstremnedbør har et omfattende skadepotensiale og kan påføre samfunnet store sosiale kostnader. En definisjon av ordet "ekstremnedbør" er gitt av Norges Meteorologiske Institutt (Met.no) som "så kraftig at liv og verdier kan gå tapt om ikke samfunnet er spesielt forberedt på situasjonen". Det forventes en økt frekvens av ekstremnedbør i Norge i framtida (Hanssen-Bauer et al., 2009). Forventningen medfører at risikoen for urban flom forårsaket av store nedbørsmengder også vil øke.

For å redusere risiko og skadeomfang forårsaket av ekstremnedbør er kunnskap omkring slike hendelser nødvendig. Kunnskap kan innlemmes i planlegging, dimensjonering og rehabilitering av overvannsystemer. Analyse av de hydrologiske applikasjonene ved ekstremnedbør krever en god tidsmessig og romlig oppløsning av nedbørsdata da nedbøren ofte opptrer med stor romlig variasjon og over korte tidsrom (Einfalt, 2005). Urbane områder er ofte karakterisert som mindre nedslagsfelt med en stor andel impermeable flater med en rask avrenningskarakteristikk. Det stiller spesielle krav til hydrologiske data (Schilling, 1991).

Tradisjonelt er nedbørstasjoner på bakken benyttet til å estimere utbredelsen av nedbør over et felt. Nedbørstasjonene gir gode kvantitative nedbørsverdier med god tidsmessig oppløsning. For å beskrive den romlige fordelingen av nedbør, basert på punktmålinger, er en rekke ulike interpolasjonsmetoder utviklet. At nedbørstasjonene representerer punkter medfører at det ofte kreves et tett nettverk av målere for å fange opp romlige variasjoner og toppene til nedbøren (Einfalt et al., 1998).

Værradarer kan gi en god romlig oppløsning av nedbørsdata da den angir verdier for et sammenhengende felt. Det er derimot knyttet større usikkerhet til den kvantitative kvaliteten til data fra en værradar enn fra tradisjonelle nedbørmålere (Abdella og Alfredsen, 2010b). En værradar sveiper nedbøren ved at den sender ut elektromagnetiske pulser. Pulser som treffer nedbørspartikler blir reflektert tilbake til radaren og måles som ekvivalent radarreflektivitetsfaktor (Z_e , dBZ), som er proporsjonalt med energien reflektert fra nedbørspartiklene (Wilson og Brandes, 1979). Z_e -verdien blir konvertert til den nedbørsverdien (R_{ii}) som opptrer på bakkenivå. Det er en rekke ulike feilkilder knyttet til bruken av R-verdi fra værradarer, som blant annet er belyst av Abdella og Alfredsen (2010b).

En enkel værradar kan ha et dekningsområde med en radius opp mot flere hundre kilometer. Dekningsområdet er avhengig av type radar. Nesten hele Skandinavia er dekket av et nett med C-band værradarer driftet av Met.no. Abdella og Alfredsen (2010b) gjorde en studie av data fra en C-band radar (radar Rissa) der konklusjonen er at det er potensiale i bruk av radardata for å gi kvantitative nedbørsverdier til bruk i hydrologisk modulering. Det er derfor grunn til å tro at værradarene kan være et mulig verktøy for analyse av situasjoner med lokalt kraftig nedbør.

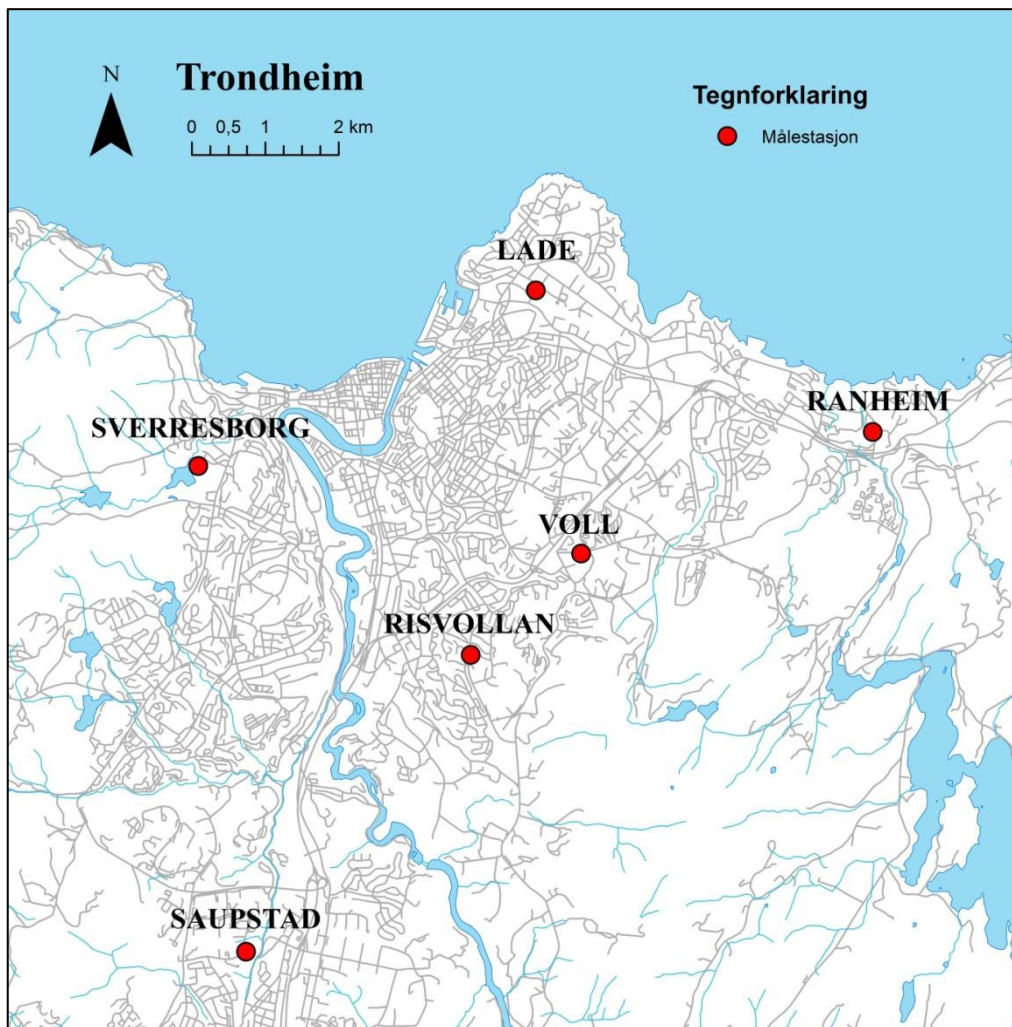
Formålet med dette studiet er å analysere et tilfelle med ekstremnedbør som forekom i Trondheim by (Norge) 13. august 2007. Situasjonen forårsaket en av de største urbane oversvømmelsene i Trondheims historie. Det ble registrert skade på 154 eiendommer, derav 140 registrerte kjelleroversvømmelser (Risholt et al., 2009). Nedbørstilfellet er studert med utgangspunkt i nedbørsdata fra 6 lokale korttidsnedbørstasjoner og en C-band værradar. Situasjonen er simulert i deler av området med registrerte skader, ved bruk av kalibrerte Mike Urban modeller.

3. Data

3.1 Nedbørsdata

Nedbørstasjoner:

6 lokale korttidsnedbørstasjoner i Trondheim registrerte nedbøren 13. august 2007. De er alle av typen Lambrecht vippepluviografer og registrerer nedbørsverdier med en oppløsning på 0,1 - 0,103 mm/min. Målerne registrerer knekkpunktverdier med en tidsmessig oppløsning på ett minutt. Plasseringene til nedbørstasjonene er vist i Figur 2. Stasjonene på Saupstad, Sverresborg, Lade og Ranheim driftes av Trondheim kommune, stasjonen på Risvollan driftes av Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Trondheim kommune og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), mens stasjonen på Voll driftes av Met.no.



Figur 2: Korttidsnedbørstasjonene i Trondheim.

Radardata:

Rådata fra radar Rissa leveres av Met.no. Radar Rissa er en Geomatronik C-band Doppler radar som er lokalisert 30-37 kilometer nord for Trondheim på posisjonen 63,69N og 10,20E, 616 meter over havet. Nedbøren blir sveipet med et intervall på 15 minutter, med en dekningsradius på cirka 180 kilometer. Radaren benytter en bjelkebredde på 1° og en høyde på 12 vinkler, der hver vinkel skannes med en bjelkeåpning på 1°. Den laveste høydevinkelen er 0,5° (Abdella og Alfredsen, 2010b). Z_e -verdiene er gitt i polarkoordinater, som betyr at den potensielle romlige oppløsningen til nedbørsdata avhenger av avstand fra radaren.

I studiet er Z_e -verdier fra den laveste høydevinkelen (0,5°) benyttet slik at verdiene i størst mulig grad representerer nedbøren som opptrer på bakkenivå. Hver radarcelle inneholder en uniform Z_e -verdi som gjelder for hele cellen. Z_e -verdien er gitt som gjennomsnittet av verdiene innenfor cellen. Den er beregnet ved å integrere de reflekterte verdiene i vertikal- og horisontal retning i det skannede volumet hver celle representerer.

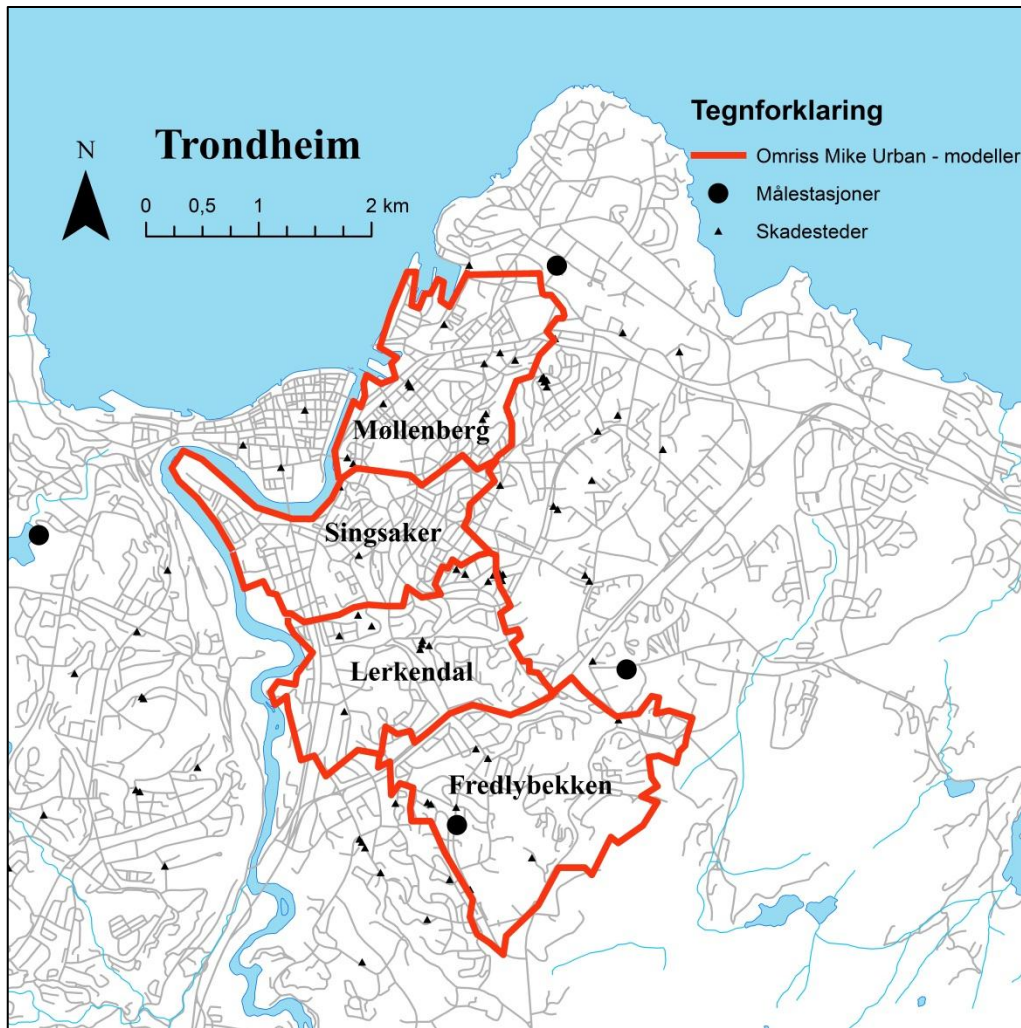
Verdiene er konvertert fra polarkoordinater til et kartesisk koordinatsystem i originalprojeksjonen (Azimuhal Equidistant, AEQD) ved bruk av arealvekting:

$$Z_e = \frac{\sum(Z_i \times A_i)}{\sum A_i} \quad (1)$$

Over Trondheim er den romlige horisontale oppløsningen til Z_e -verdiene i polarkoordinater cirka 250×500 meter. På bakgrunn av det er det produsert radarbilder med en romlig oppløsning på 250×250 meter for analyse av nedbørstilfellet 13. august 2007.

3.2 Hydrologiske modeller

Fire Mike Urban modeller, eid av Trondheim kommune, er benyttet for modulering av situasjonsstudiet; Møllenberg (260ha), Singsaker (225ha), Lerkendal (252ha) og Fredlybekken (343ha). Danske Hydrauliske institutt (DHI) har etablert og kalibrert modellene. Modellene dekker deler av området der det ble rapportert om skader 13. august 2007. Trondheim kommune satte i etterkant av ekstremnedbørhendelsen ned en prosjektgruppe som blant annet dokumenterte skadeomfanget (Risholt et al., 2009). De registrerte skadene er benyttet som sammenligningsgrunnlag opp mot resultatene fra modellkjøringene. Den finnes ingen tilgjengelige avrenningsdata fra hendelsen. Moduleringsområdet er vist i Figur 3 sammen med registrerte skadesteder.



Figur 3: Mike Urban modeller og registrerte skadesteder.

4. Metode

4.1 Behandling av data

Data fra nedbørstasjoner:

Det finnes ingen registrerte vinddata fra nedbørstasjonene som dekker hele nedbørstilfellet 13. august 2007. Nedbørsverdiene brukt i studiet er derfor ikke korrigert for vind. En rekke ulike interpoleringsteknikker er utviklet for å beskrive den romlige utbredelsen til nedbøren over et felt basert på punktmålinger. I studiet er Thiessen polygon og Invers Distanse Vekting (IDW) benyttet (Dingman, 2002). Metodene er mye brukt innen hydrologien for å angi romlig fordeling av nedbør. Prinsippene til interpolasjonsmetodene er beskrevet:

Thiessen polygon:

$$p_f = \frac{1}{A} \sum_{g=1}^G a_g \times p_g \quad (2)$$

p_f er beregnet nedbørsverdi gitt til felt f . a_g er areal av felt f som er representert av nedbørstasjon g . p_g er nedbørsverdi ved nedbørstasjon g . A er arealet til felt f .

Invers Distanse Vekting (IDW):

$$D = \sum_{g=1}^G d_g^{-b} \quad (3)$$

$$p_f = \frac{1}{D} \sum_{g=1}^G d_g^{-b} \times p_g \quad (4)$$

D er summen av inverse distanser (d_g^{-b}), der d_g er avstand fra nedbørstasjonene til betraktet punkt. b er en vektingskonstant satt lik 1 i studiet. p_f er beregnet nedbørsverdi gitt til felt/punkt f . p_g er nedbørsverdi ved nedbørstasjon g .

Ved interpolering av nedbørsserier, ved Thiessen polygon og IDW, til bruk i Mike Urban modellene er det tatt utgangspunkt i nedslagsfeltets senterkoordinater. Den produserte nedbørsserien er brukt universelt til hele modellen. Ved direkte romlig sammenligning mellom genererte nedbørskart og interpolert nedbør er IDW benyttet.

Data fra værradar:

Refleksjonsverdiene (Z_e), gitt fra radarbildene, blir konvertert til en nedbørsverdi som er representert på bakkenivå. Det er benyttet et standard Z-R forhold gitt av Marshall og Palmer (1948):

$$Z_e = a \times R_u^b \quad (5)$$

Z_e er refleksjonsfaktoren i mm^6/m^3 og R_u er ujustert nedbørsverdi i mm/h . Konstantene a og b er henholdsvis 200 og 1,6 for tilfeller med frontnedbør.

Abdella og Alfredsen (2010a) har utviklet et Python script som gjør Z-R konverteringen for et sett radarbilder. Scriptet er benyttet i studiet. Behandling av radarbilder, generering av nedbørskart for å beskrive adveksjon og justering av kart er gjort i originalprojeksjon (AEQD). Originalprojeksjonen er benyttet for å redusere problematikk rundt resampling av data (Engeland, Personlig kommunikasjon, 8. februar 2012).

Beregning av adveksjon:

Ved bruk av radarbilder til en detaljert analyse av ekstremnedbørsituasjoner vil en tidsmessig oppløsning på 15 minutter, som er sveipfrekvensen til radar Rissa, trolig ikke være tilfredsstillende. Spesielt i urbane felt stilles det krav om en høy tidsmessig oppløsning til hydrologiske data (Schilling, 1991). Adveksjon mellom påfølgende radarbilder er derfor tatt i betraktning. Med utgangspunkt i analyse av nedbøren for situasjonsstudiet, samt generelle urbanhydrologiske krav til inngangsdata er det benyttet et tidsskritt på ett minutt ved beregning av adveksjon.

Det er benyttet to Python script som beregner adveksjon mellom påfølgende radarbilder. Scriptene genererer nedbørskart med en gitt tidsmessig oppløsning og er vist i Bilag A. Det er gjort antagelse om at nedbørintensiteten har en lineær utvikling og at nedbørsfronten beveger seg med konstant hastighet mellom påfølgende radarbilder:

cross-corr.py estimerer adveksjonsvektoren som gir maksimal krysskorrelasjon mellom to påfølgende radarbilder. Det er gjort ved bruk av en springsteknikk. Scriptet gir nedbørens adveksjonsvektorer i x og y retning ($disp_x$ og $disp_y$). Verdiene er brukt videre i *advection.py*.

advection.py beskriver adveksjonen ved å generere nedbørskart mellom to påfølgende radarbilder. Både nedbørens forflytning og vekst/reduksjon i nedbørintensiteten er tatt hensyn til lineært. Scriptet baserer seg på følgende formler:

$$dx = \frac{disp_x}{n}, \quad (6)$$

$$dy = \frac{disp_y}{n}, \quad (7)$$

dx og dy gir forflytningen mellom hvert tidsskritt i . n er antall tidsskritt som skal genereres mellom to påfølgende radarbilder.

$$P(x, y) = x_0 + (dx \times i), y_0 + (dy \times i) \quad (8)$$

$P(x, y)$ gir posisjonen til en radarcelle etter tidsskritt i . x_0 og y_0 er posisjonen til en radarcelle i det første av de to påfølgende radarbildene.

$$Disp = \sqrt{disp_x^2 + disp_y^2} \quad (9)$$

$$Adv(i) = \sqrt{(dx * i)^2 + (dy * i)^2} \quad (10)$$

$$R_u(dx, dy) = R_1 \times \frac{disp - adv(i)}{disp} + R_2 \times \frac{adv(i)}{disp} \quad (11)$$

$Disp$ gir den totale forflytningen av nedbøren mellom de to radarbildene. $Adv(i)$ gir adveksjon/forflytning etter tidsskritt i . $R_u(dx, dy)$ beskriver vekst/reduksjon i nedbørsverdi for hvert tidsskritt i for en celle. R_1 og R_2 er nedbørsverdi i en gitt celle i de to påfølgende radarbildene. Det antas at alle nedbørscellene beveger seg i samme retning og med lik hastighet.

$$R_u(x, y) = R_u(x_0, y_0) + R_u(dy, dx) \quad (12)$$

$R_u(x, y)$ gir ujustert nedbørsverdi for posisjon $P(x, y)$. $R_u(x_0, y_0)$ er nedbørsverdien i en gitt celle i det første av de to påfølgende radarbildene.

Ved generering av nedbørskart er cellene i nedbørskartene gitt posisjoner som nødvendigvis ikke passer cellestrukturen til radarbildene. Det vil ved bruk av dataene være en fordel om alle kartene har samme cellestruktur. Nedbørskartene er tilpasset strukturen til radarbildene ved bruk av arealvekting på samme måte som i Formel (1).

Justering av nedbørskart:

De genererte nedbørskartene er basert på ujusterte radarbilder og må justeres opp i mot observerte verdier fra nedbørstasjonene på bakken for å øke den kvantitative kvaliteten. En justeringsfaktor er beregnet på lokasjonene til nedbørstasjonene. Faktoren er basert på Gjertsen (2002):

$$F_n = \frac{\sum G_i}{\sum R_i} \quad (13)$$

F_n er justeringsfaktoren til nedbørscellen som dekker en gitt nedbørstasjon. $\sum G_i$ er totalt akkumulert nedbør gitt fra nedbørstasjon, og $\sum R_i$ er totalt akkumulert nedbør fra de genererte nedbørskartene.

De akkumulerte verdiene er fra hele nedbørstilfellet (17:00 – 18:00, Normal tid). Fra nedbørskartene er verdiene beregnet ved å ta snittet av de 9 nærmeste cellene over en nedbørstasjon. På den måten er det tatt i betraktning at nedbøren ofte har en forskyvning i posisjon fra den sveipes cirka 1000 moh. til den når bakken. Tilfeller der nedbørstasjonen ligger helt i kanten mellom to nedbørsceller er også tatt høyde for ved å benytte gjennomsnitt. De beregnede justeringsfaktorene (F_n) gjelder kun for situasjonsstudiet.

Etter analyse av justeringsfaktorens (F_n) og nedbørens trend og utbredelse over feltet er første ordens regresjonskriging valgt for å beregne justeringsfaktorens utbredelse. Metoden er implementert i ArcGIS som "Universal kriging with first-order trend removal". Produksjon av justeringskart samt justering av nedbørskart er gjort i ArcGIS. Gjennom justeringskartet er alle nedbørsceller gitt en justeringsfaktor (F_c). Faktoren er multiplisert med nedbørsverdien i tilhørende nedbørscelle:

$$R_c = F_c \times R_u \quad (14)$$

R_c er justert nedbørsverdi [mm/h] i en gitt nedbørscelle, F_c er justeringsfaktor fra justeringskart i senter av tilhørende nedbørscelle og R_u er ujustert nedbørsverdi i nedbørscelle.

Projisering til UTM32 og klipping av områder:

Nedbørskartene er først projisert fra AEQD til UTM32 etter at alle analyser og justering av nedbørskart er gjennomført. I denne prosessen er et Python script utviklet av Abdella og Alfredsen (2010a) benyttet. Scriptet klipper også ut kartene til ønsket område.

4.2 Analyse av data fra situasjonsstudiet

Nedbørstilfellet er analysert med utgangspunkt i observasjonsverdier fra de lokale korttidsnedbørstasjonene, radarbilder, genererte nedbørskart mellom hvert radarbilde og skadene som ble innrapportert til Trondheim kommune.

Før serien med genererte nedbørskart ble justert er de analysert mot observerte verdier ved nedbørstasjonene. Antagelsene gjort om at nedbørintensiteten har en lineær utvikling og at nedbørsfronten beveger seg med konstant hastighet mellom påfølgende radarbilder er vurdert. Vurderingen gir også grunnlag for å si noe om det valgte tidsintervallet ved beregning av adveksjon er akseptabelt. Justeringsfaktor, nedbørens varighet og tidspunktet for maksimal nedbørintensitet er analysert ved hver nedbørstasjon.

Justeringsfaktorene er vurdert med hensyn på romlig utbredelse og trender over feltet. Det er gjort analyse av akkumulert 5 og 10 minutters nedbør fra nedbørstasjon og nedbørskart. Om det er en sammenheng mellom justeringsfaktoren og akkumulert nedbør er undersøkt.

Analysene danner grunnlag for valg av metode for justering av nedbørskartene.

En god analyse er svært viktig for å sikre kvaliteten til nedbørskartene, slik at det blir valgt en tilfredsstillende justeringsmetode. Minste kvadratets metode (Kreyszig, 2006) er benyttet for å sette tall på sammenhenger og eventuelle utviklinger over feltet lineært. Avviket fra den lineære sammenhengen er beregnet ved determinanskoeffisienten (R^2 - verdi) (Nagelkerke, 1991).

Nødvendigheten av å ta hensyn til adveksjon med tilhørende intensitetsutvikling mellom påfølgende radarbilder for situasjonsstudiet er vurdert. Bruk av radardata med lav tidsmessig oppløsning anses som lite egnet for analyse av kraftige nedbørstilfeller og til bruk som kvantitative inngangsdata til hydrologiske modeller i urbane felt (Schilling, 1991). Fabry et al. (1994) beskriver at kvaliteten til de akkumulerte nedbørsverdiene øker med tidsmessig oppløsning av nedbørsdata. Det er derfor grunn til å tro at adveksjon mellom radarbildene i studiet må tas i betraktning. Forskjellen i akkumulert nedbør gitt fra ujusterte genererte nedbørskart med ett minutt oppløsning, radarbilder med 15 minutters oppløsning og observerte verdier ved nedbørstasjonene fra situasjonsstudiet er analysert. Hvert enkelt nedbørskart og radarbilde er satt til å representere gjennomsnittsverdien for tidsintervallet på henholdsvis ett og 15 minutter. Akkumulert nedbør over feltet er også vurdert ved å beregne verdiene i ett snitt gjennom feltet i nedbørsfrontens retning, ved bruk av ujusterte genererte nedbørskart og radarbilder.

Et av hovedmålene med å ta utgangspunkt i radardata ved analyse av situasjonsstudiet er å beskrive den romlige variasjonen til nedbøren utover det nedbørstasjonene er i stand til ved interpolering. En romlig sammenligning mellom data gitt fra nedbørskart og interpolert nedbør med IDW er gjort. Det er både sett på totalt akkumulert nedbør for hele nedbørsperioden, og akkumulert nedbør for et tidsintervall på ett minutt.

4.3 Hydrologisk modulering av situasjonsstudiet

Situasjonsstudiet er modulert ved bruk av fire kalibrerte Mike Urban modeller. De genererte nedbørskartene og interpolert nedbør ved Thiessen polygon og IDW er brukt som inngangsdata. For beregning av overflateavrenning fra hvert delfelt benytter modellene Tid-Areal metoden (DHI, 2011c). Feltparametere og hydrologiske parametere er kalibrert for hvert delfelt basert på tidligere nedbørstilfeller. Parameterne innebefatter: feltstørrelse, personekvivalent, andel tette flater, overflatemagasiner, konsentrasjonstid, hydrologiske tap, annet avrenningsbidrag og Tid-Areal kurve (DHI, 2011c). Strømningen i ledningsnett er styrt av Saint Venants ligningssett som innebefatter kontinuitetsligningen og momentligningen (DHI, 2011b):

Kontinuitetsligningen:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

Momentligningen:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{\partial Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(I_0 - I_f) = 0 \quad (16)$$

Q er volumfluks, t er tid, x er avstand fra knutepunkt, α er hastighetsfordelingskoeffisienten, A er areal av tverrsnitt, g er tyngdeakselerasjon, y er høyde på vannspeil, I_0 er bunnhelning og I_f er friksjonshelning.

Saint Venants ligningssett beregner dynamisk bølge numerisk for hele ledningsnett. Ligningssettet er i utgangspunktet kun gjeldende for frispelstrømning. Trykkstrømning i nettet er beregnet ved bruk av "Preissmann slot" (DHI, 2011b).

De genererte nedbørskartene er lagt inn i Mike Urban modellene ved at det er produsert en nedbørsserie fra hver nedbørscelle som dekker et antall delfelt i modellen. Delfeltene som er dekket av en nedbørscelle er gitt tilhørende nedbørsserie. I tilfeller der et delfelt er dekket av flere nedbørsceller er nedbørsserien fra den cellen som dekker delfeltets senterkoordinater benyttet. Metodikken er den samme som ble benyttet av Pedersen et al. (2006) til en lignende modulering og er beskrevet mer i detalj i Bilag D. Det finnes et verktøy for enklere å kunne benytte radarbilder fra LAWR (Local Area Weather Radar) inn i Mike-modeller (DHI, 2012). Verktøyet er ikke benyttet i studiet da det ble sett på som for tidkrevende å implementere.

For modellene som er kjørt med interpolert nedbør er det benyttet en universell nedbørsserie til hele modellen. Det er tatt utgangspunkt i modellområdenes senterkoordinater ved interpolering av nedbørsserier mellom nedbørstasjonene.

Effekten situasjonsstudiet hadde på ledningsnettet er undersøkt ved kjøring av Mike Urban modellene. Det er vurdert hvor gode modellene som tar utgangspunkt i radardata er sammenlignet med modellene som bruker data fra nedbørstasjonene. Vurderingen er gjort ved å sammenligne moduleringsresultatene opp mot registrerte skader samt sammenligne hydrografer i utvalgte punkter med hverandre. Total akkumulert avrenning til ledningsnettet gitt av hver nedbørsmetode i hvert modellområde er beregnet.

Moduleringsresultatene er analysert ved at maksimalt trykkehøyde (P_{maks}) beregnet i hvert ledningsstrek gjennom moduleringen registreres (DHI, 2011a):

$$P_{maks} = H_{vannnivå} - H_{topprør} \quad (17)$$

P_{maks} er maksimal trykkehøyde gitt i meter vann søyle (mVS), $H_{vannnivå}$ er høyeste registrerte trykk i kvotehøyde og $H_{topprør}$ er kvotehøyde til toppen av avløpsrør.

Minimumskrav til høyde mellom åpent sluk i kjellergulv og toppen av avløpsrør i tilknytningspunkt er i Norge 0,9 meter (Kommuneforlaget, 2008). 0,9mVS er derfor ansett som kritisk trykkehøyde (P_{maks}) i ledningsnettet med tanke på kjelleroversvømmelser, der annen spesifikk informasjon om skaden ikke foreligger.

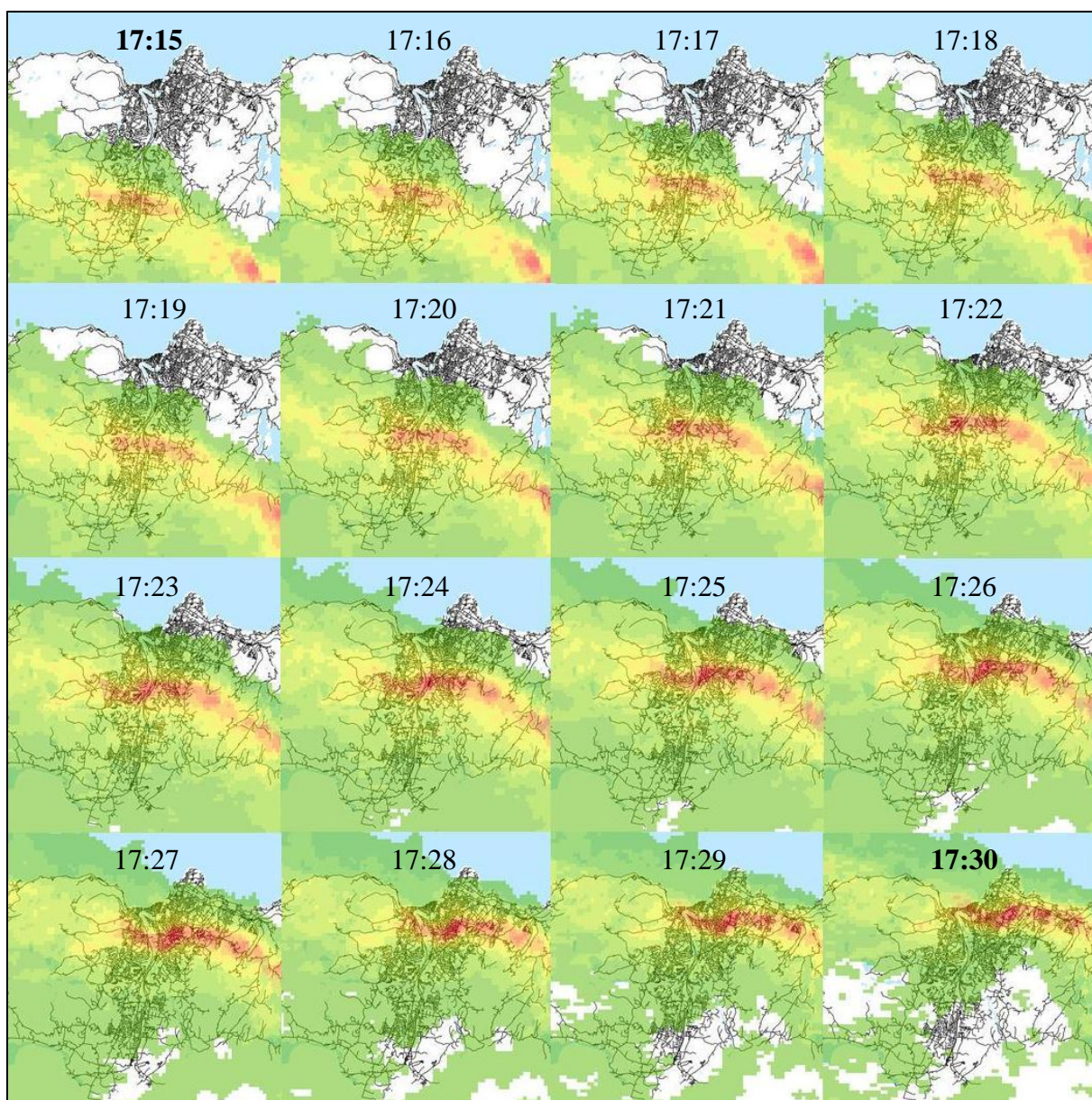
For å vurdere hvilken respons de ulike nedbørsmetodene gir på ledningsnettet med tanke på vannføring er det hentet ut hydrogrammer fra 5 utvalgte ledningsstrekk. Det er sett på et ledningsstrek ved et utløp, samt ledningsstrek ved 4 skadesteder spredt over de modulerte områdene.

5. Resultater

5.1 Produksjon og justering av nedbørsdata

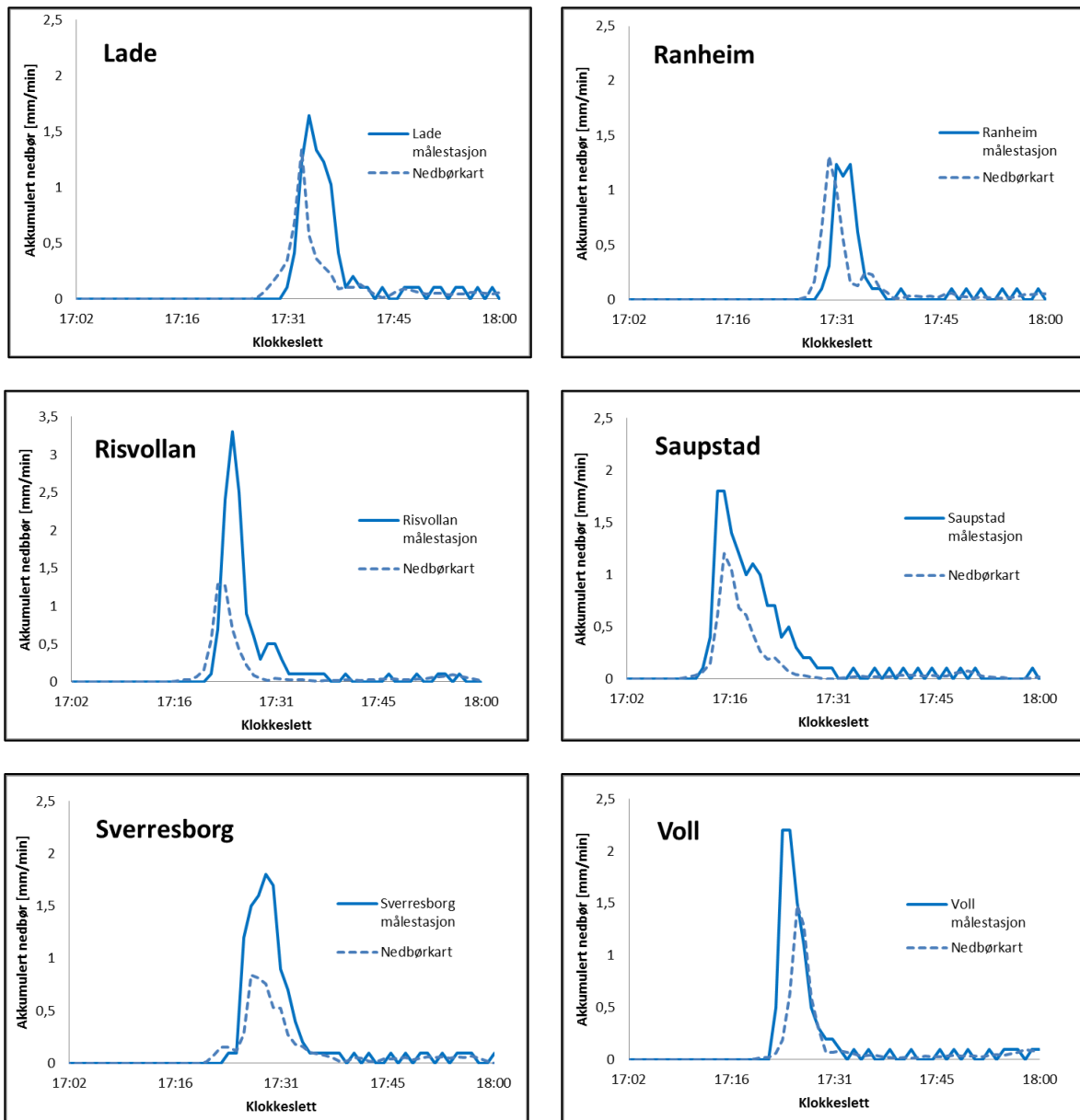
Ujusterte genererte nedbørskart:

Det er generert opp nedbørskart mellom påfølgende radarbilder for tidsrommet 17:00-18:00 (Normal tid) 13. august 2007, som beskriver adveksjonen. Figur 4 illustrerer beregnet adveksjon med ett minuttts oppløsning mellom radarbildene 17:15 og 17:30.



Figur 4: Illustrasjon av genererte nedbørskart mellom radarbildene sveipet 17:15 og 17:30.

Nedbørsverdier fra nedbørkartene er hentet ut ved nedbørstasjonene. Nedbørsutviklingen gitt fra kartene er sammenlignet mot den observerte utviklingen ved stasjonene. Sammenligning av utvikling er vist i Figur 5.



Figur 5: Utviklingen til nedbøren ved stasjonene gitt fra nedbørstasjonene og genererte nedbørskart.

Tidspunkt for når maksimal nedbørintensitet opptrer ved nedbørstasjonene gitt av stasjon og nedbørskart er vist i Tabell 1. Den tidsmessige variasjonen mellom nedbørskart og nedbørstasjon for når maksimal ett minutt akkumulert nedbør inntreffer er på ± 2 minutter.

Tabell 1: Tidspunkt for maksimale nedbørsverdier.

Lokasjon	Klokkeslett (nedbørstasjon)	Avvik [min] (nedbørskart)
Lade	17:34	-1
Ranheim	17:31	-1
Risvollan	17:25	-2
Saupstad	17:16	0
Sverresborg	17:29	-2
Voll	17:24	2

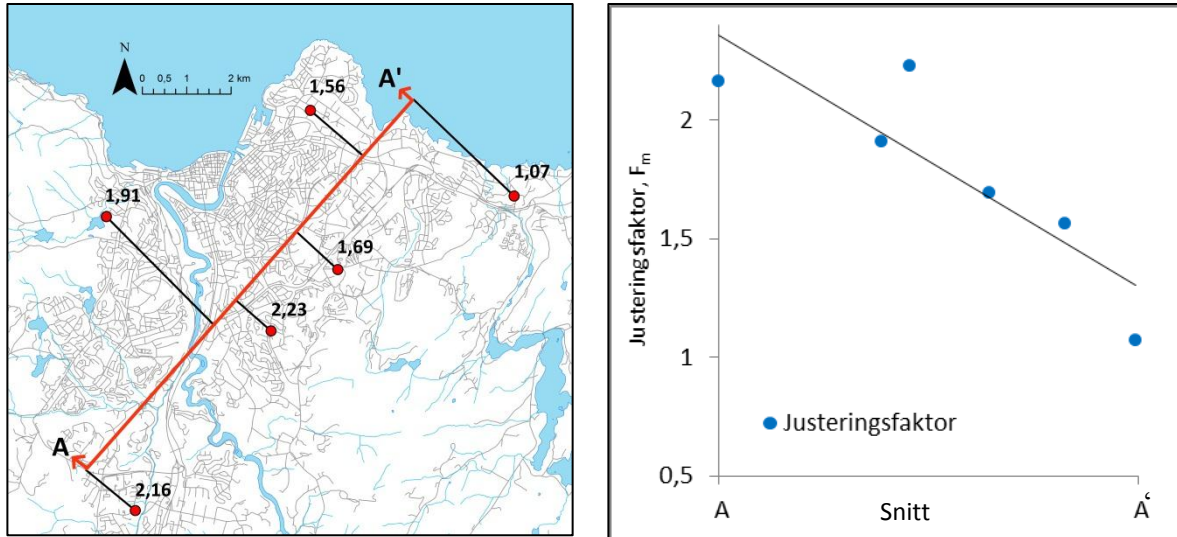
Justeringsfaktorer:

En justeringsfaktor (F_n) er beregnet ved nedbørstasjonene. Faktorene danner grunnlag for justering av nedbørskartene. Beregnet akkumulert nedbør fra ujusterte nedbørskart og nedbørstasjoner samt justeringsfaktor er gitt i Tabell 2.

Tabell 2: Akkumulerte verdier fra nedbørstasjoner og nedbørskart, samt justeringsfaktor.

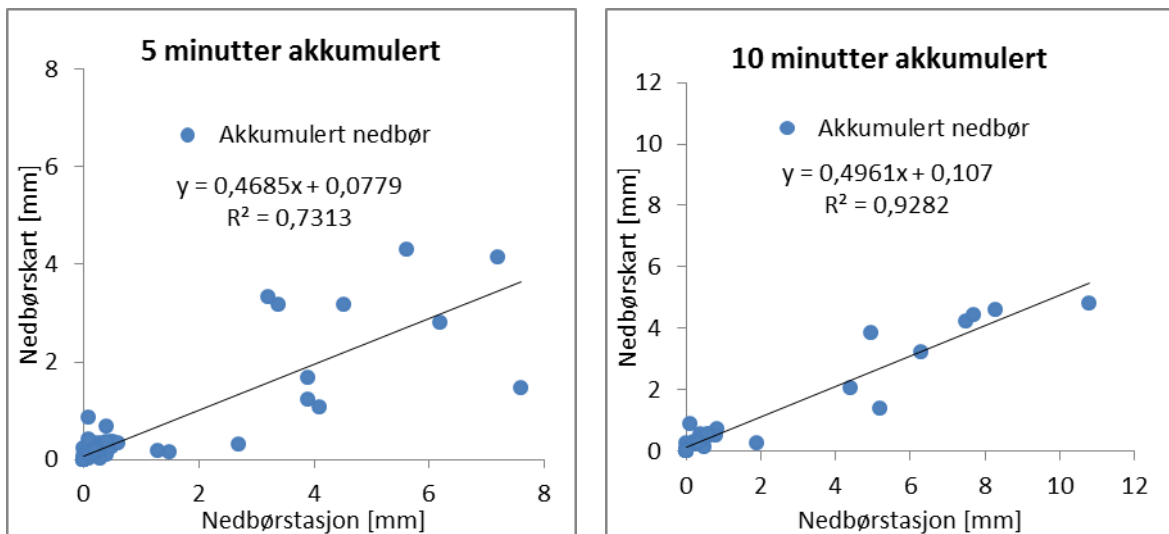
Lokasjon	Akkumulert fra nedbørskart [mm]	Akkumulert fra nedbørstasjon [mm]	Justeringsfaktor, F_n
Lade	5,71	8,91	1,56
Ranheim	5,38	5,77	1,07
Risvollan	5,97	13,30	2,23
Saupstad	6,52	14,10	2,16
Sverresborg	6,18	11,80	1,91
Voll	5,97	10,10	1,69

Justeringsfaktorens utbredelse over feltet er analysert. Det er funnet en tendens til at faktoren har en synkende utvikling i nedbørsfrontens retning. I Figur 6 er justeringsfaktor plottet i et snitt som følger nedbørsfrontens bevegelse. Faktoren beregnet på Risvollan er noe avvikende fra de andre verdiene sett fra en lineær sammenheng.



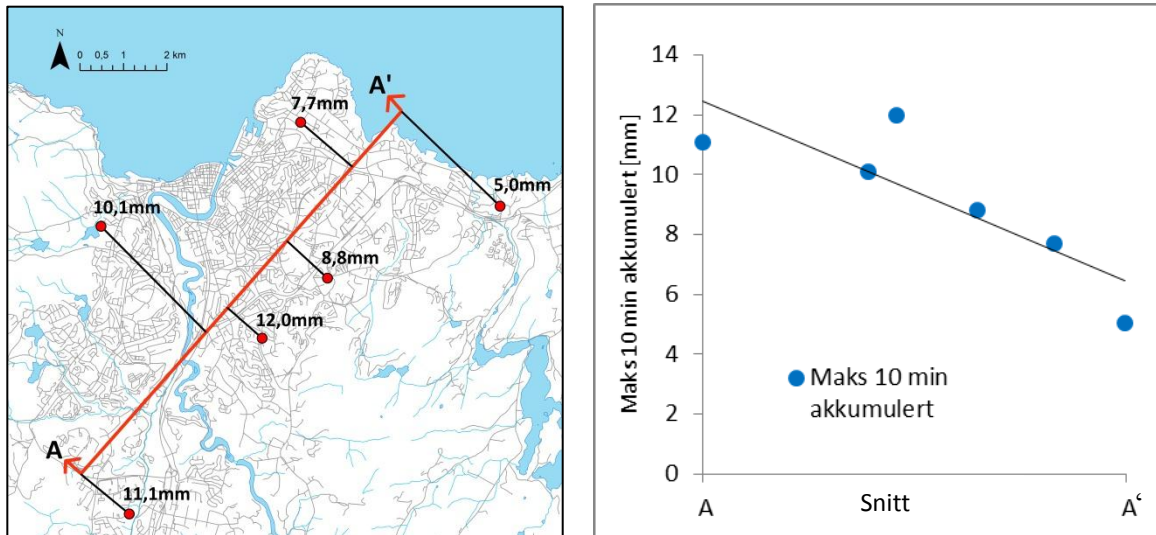
Figur 6: Justeringsfaktorens utvikling i nedbørsfrontens retning.

Sammenheng i registrerte 5 og 10 minutters akkumulert nedbør fra nedbørstasjon og nedbørskart er undersøkt. Analysen er både gjort isolert for hver av stasjonene, for å eliminere eventuelle romlige innvirkninger, og for alle stasjonene under ett. Forholdene ved hver enkelt stasjon er gitt i Bilag B. Analysene viser en tydelig tendens i at nedbørskartene underestimerer for økende akkumulerte verdier. Det er beregnet et stigningstall ved bruk av minste kvadraters metode for utviklingen i forholdet mellom nedbørskart og nedbørstasjon for økende verdier, samt R^2 -verdi. R^2 -verdi er ikke beregnet for de isolerte analysene på grunn av få punkter. For 5 minutters akkumulert nedbør er stigningstallet mellom 0,28 og 0,68 ved økende akkumulerte verdier. For 10 minutters akkumulert nedbør ligger stigningstallet mellom 0,43 og 0,74. 5 og 10 minutters akkumulert nedbør er analysert samlet for alle nedbørstasjonene i Figur 7. Stigningstallet til forholdet for 5 minutters akkumulert nedbør er 0,47 med R^2 -verdi på 0,73, mens stigningstallet til 10 minutters akkumulert nedbør er 0,50 med tilhørende R^2 -verdi på 0,93.



Figur 7: Plott av akkumulert nedbør fra nedbørstasjon mot ujusterte nedbørskart for 5 og 10 minutter.

For å vurdere nedbørens utvikling over feltet er den maksimale 10 minutter akkumulerte nedbørsverdiene hentet ut ved alle nedbørstasjonene og plottet i et snitt i nedbørsfrontens retning. Utviklingen er vist i Figur 8 og er tilnærmet lik utviklingen til justeringsfaktoren.

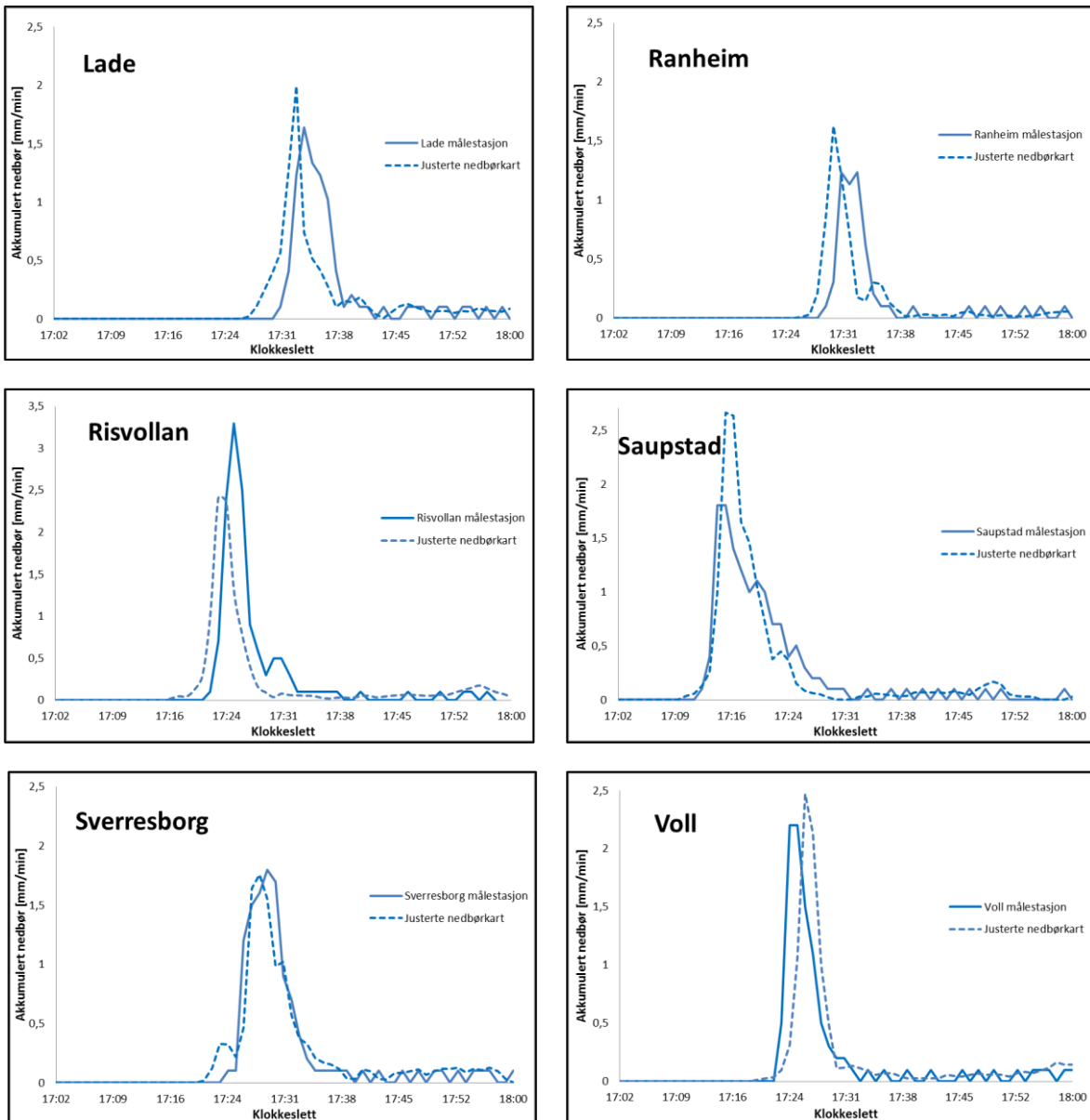


Figur 8: Maksimal 10 minutters akkumulert nedbørsutvikling fra stasjoner i nedbørsfrontens retning.

Justerte nedbørskart:

Ved bruk av første ordens regresjonskriging er det laget et justeringskart over feltet basert på justeringsfaktorene. Kartet er multiplisert med de genererte nedbørskartene i ArcGIS og danner en serie justerte nedbørskart. Figur 9 viser nedbørsutviklingen fra de justerte nedbørskartene plottet mot observerte verdier ved nedbørstasjonene.

Ved uthenting av verdier fra nedbørskart er det ved Risvolla og Voll brukt snittverdi av de 9 nærmeste cellene rundt nedbørstasjonen. Da justeringskartet kun dekker området mellom nedbørstasjonene er det ved Lade, Ranheim, Saupstad og Sverresborg ikke mulig å ta snittet av de 9 nærmeste cellene da disse stasjonene ligger helt i kanten av justeringskartet. Det er ved stasjonene benyttet snittet av de 6 nærmeste cellene.



Figur 9: Utviklingen til nedbøren ved stasjonene gitt fra nedbørstasjonene og justerte genererte nedbørskart.

Maksimalverdi for akkumulert nedbør per minutt og total akkumulert nedbør for hele tilfellet fra justerte nedbørskart og nedbørstasjoner er gitt i Tabell 3 og 4.

Tabell 3: Maksimal akkumulert nedbør per minutt gitt fra nedbørstasjon og justerte genererte nedbørskart.

Lokasjon	Stasjon [mm/min]	Nedbørskart [min/min]
Lade	1,6	2,0
Ranheim	1,2	1,6
Risvollan	3,3	2,4
Saupstad	1,8	2,7
Sverresborg	1,8	1,8
Voll	2,2	2,5

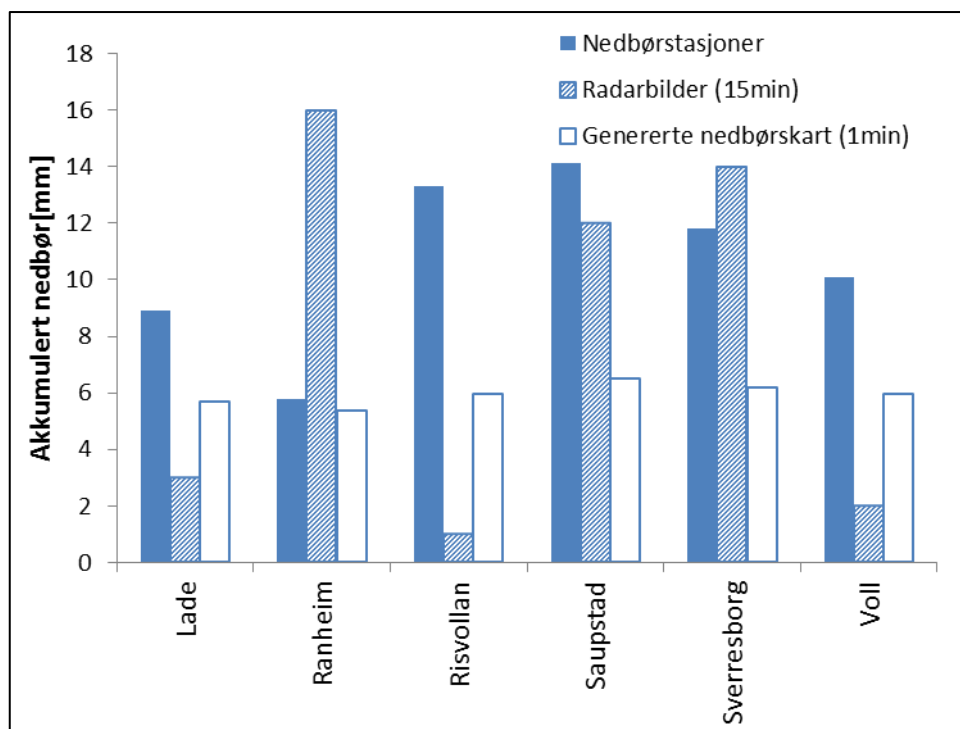
Tabell 4: Akkumulert nedbør for hele nedbørstilfellet (17:00 - 18:00) gitt av nedbørstasjonene og justerte genererte nedbørskart.

Lokasjon	Stasjon [mm]	Nedbørskart [mm]
Lade	8,9	8,6
Ranheim	5,8	6,6
Risvollan	13,3	11,1
Saupstad	14,1	14,7
Sverresborg	11,8	12,1
Voll	10,1	10,0

5.2 Resultater fra analysen

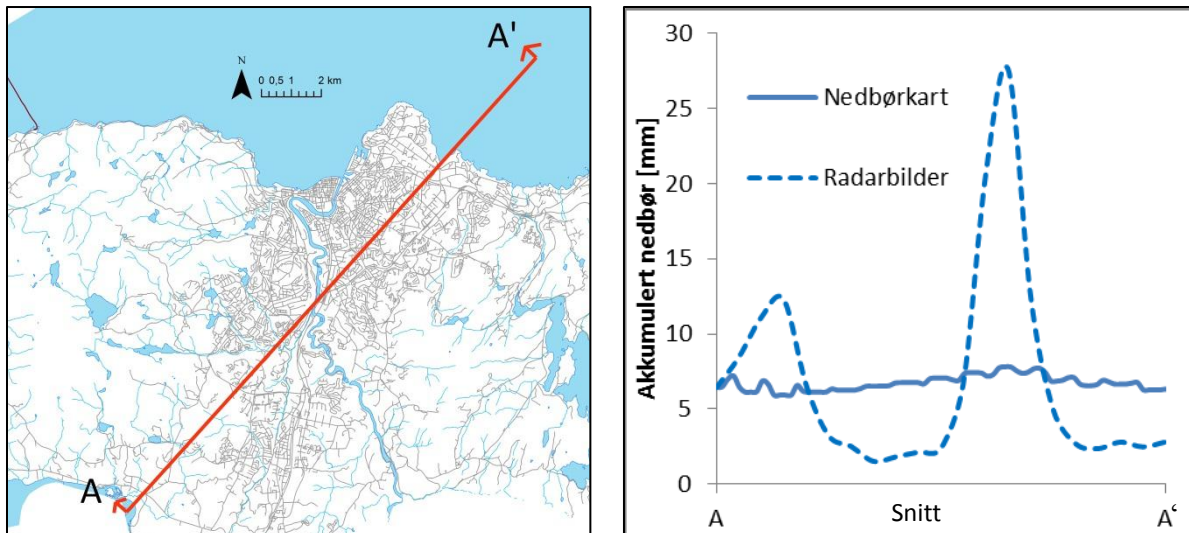
Vurdering av adveksjon:

Akkumulert nedbør for situasjonsstudiet gitt fra nedbørstasjonene, ujusterte genererte nedbørskart og radarbilder er sammenlignet. Ved bruk av radarbilder ble det registrerte øyeblikksbildet satt til å representere gjennomsnittsverdien for hele tidsintervallet mellom hver sveip. De akkumulerte verdiene er gitt i Figur 10. Radarbildene gir en stor variasjon i akkumulerte verdier sammenlignet med nedbørstasjonene. De genererte nedbørskartene, med ett minutt oppløsning, gir derimot en jevnere fordeling av akkumulert nedbør over nedbørstasjonene.



Figur 10: Akkumulert nedbør gitt fra nedbørstasjonene, radarbilder og genererte nedbørskart.

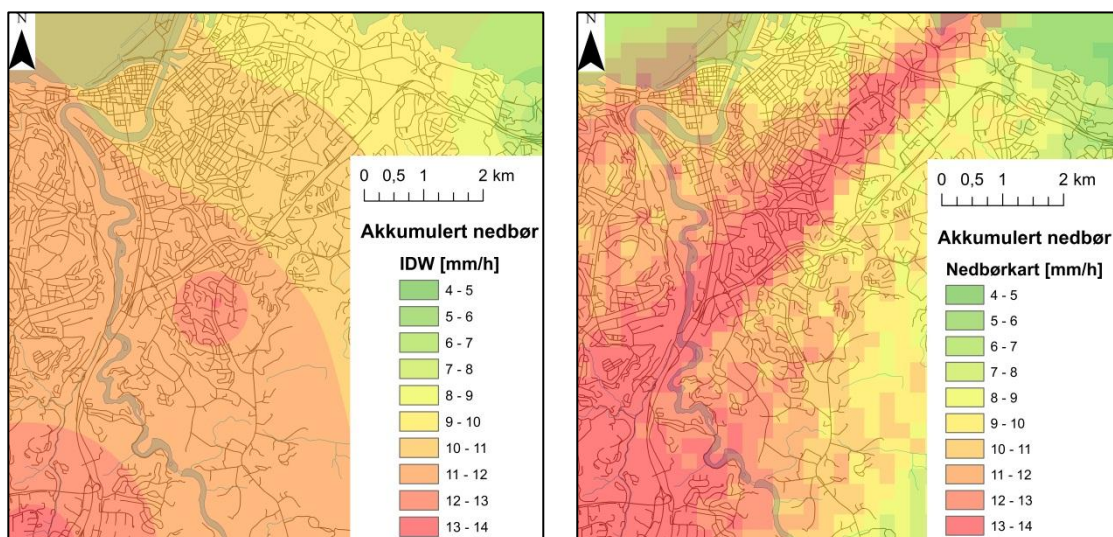
Akkumulerte nedbørsverdier er beregnet i et snitt i nedbørsfrontens retning og vist i Figur 11. Verdiene gitt fra radarbildene gir større variasjoner i snittet enn de genererte nedbørskartene. I områder der nedbøren befant seg i øyeblikket radaren sveipet er det en tydelig overestimering av akkumulert nedbør, mens det i områder der det ikke befant seg nedbør under noen av sveipene er en tydelig underestimering. De genererte nedbørskartene viser en jevnere fordeling av akkumulert nedbør i snittet.



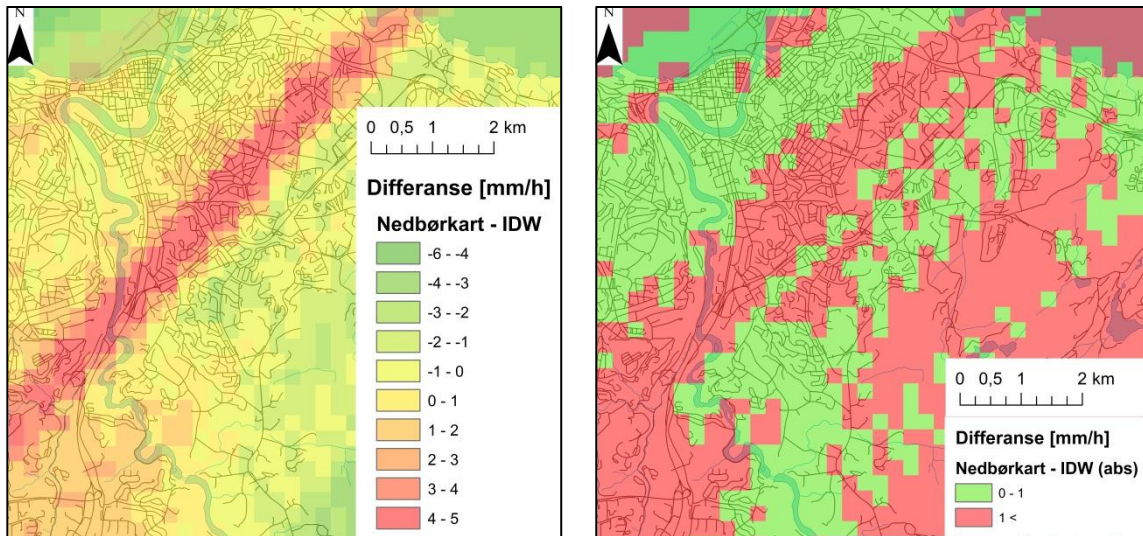
Figur 11: Fordeling av akkumulert nedbør gitt i et snitt i nedbørsfrontens retning gitt av genererte nedbørskart og radarbilder.

Romlig fordeling av nedbør:

Romlig fordeling av akkumulert nedbør over feltet er beregnet ved bruk av IDW og genererte nedbørskart. Resultatene er vist i Figur 12. Maksimalverdi for akkumulert nedbør ved bruk av IDW er 14,1 mm, mens nedbørskartene gir en maksverdi på 18,6 mm for hele tilfellet. De to metodene gir store romlige forskjeller der differansen (nedbørskart minus IDW) varierer fra -5,4 mm til 7,6 mm. Figur 13 viser differansen mellom de to metodene for akkumulert nedbør over feltet. Graden IDW og nedbørskart korrelerer er analysert. Korrelasjon mellom IDW og genererte nedbørskart for situasjonsstudiet er beskrevet i Figur 13 og Tabell 5.



Figur 12: Akkumulert nedbør over feltet for hele nedbørstilfellet gitt fra IDW og genererte nedbørskart.

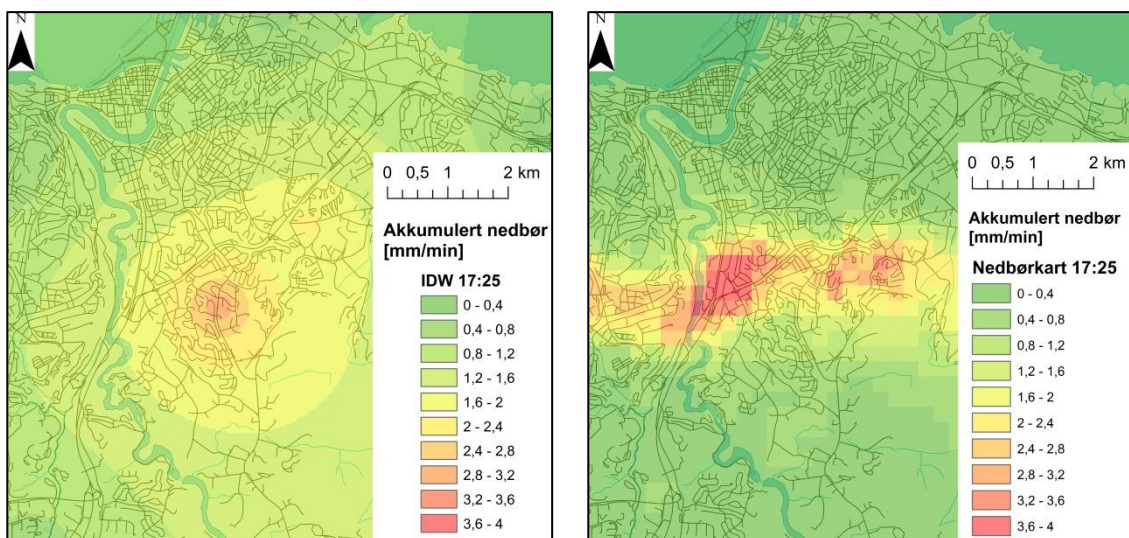


Figur 13: (a) Differanse i akkumulert nedbør mellom nedbørskart og IDW. (b) Områder der absolutt verdi av differansen mellom nedbørskart og IDW er < 1.

Tabell 5: Andel av betraktet felt der absolutt differanse er mindre enn en gitt akkumulert verdi for hele nedbørstilfellet.

Differanse [mm]	< 0,5	< 1	< 1,5	< 2	< 3	< 4	< 5
Andel av felt [%]	18,9	40,2	56,8	69,4	78,4	80,8	95,2

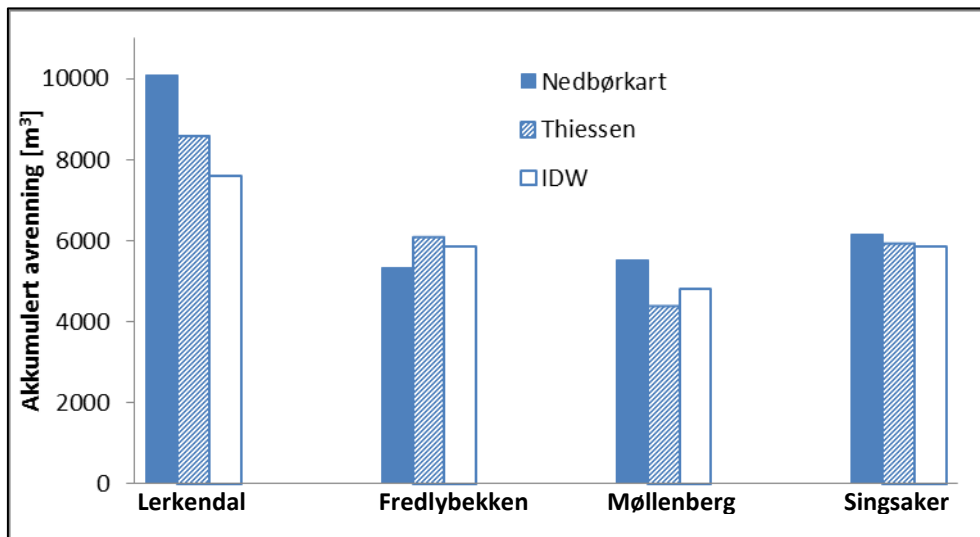
Romlig fordeling av ett minutt akkumulert nedbør over feltet beregnet ved IDW og nedbørskart er vist i Figur 14. Det er benyttet verdier fra tidsrommet 17:25 – 17:26. IDW gir en maksverdi på 3,3 mm/min, mens nedbørskartene gir en maksverdi på 5,0 mm/min. De to metodene gir variasjoner over feltet der differansen (nedbørskart minus IDW) varierer fra -1,7 til 3,3 mm/min.



Figur 14: Akkumulert nedbør for tidsrommet 17:25 til 17:26 gitt av IDW og justerte nedbørskart.

5.3 Resultater fra hydrologisk modulering av situasjonsstudiet

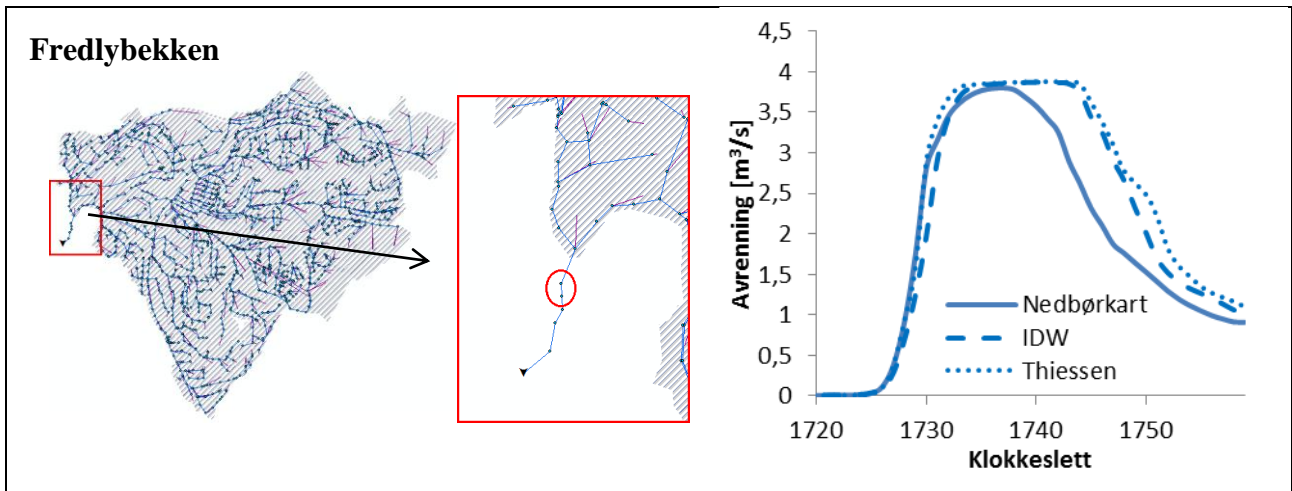
Som inngangsvardier til Mike Urban modellene er det benyttet nedbørsserier gitt fra Thiessen polygon, IDW og justerte nedbørskart. Akkumulert avrenning til ledningsnettene beregnet av hver metode i hver av modellene er vist i Figur 15. Den akkumulerte avrenningen har en individuell variasjon for hvert modellområde fra 5 til 25 prosent.



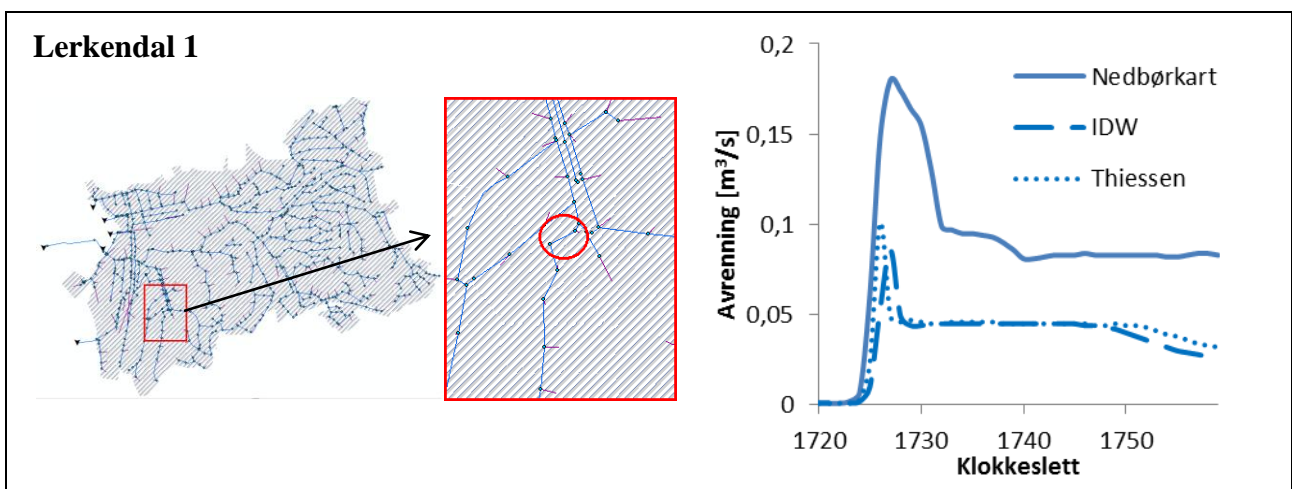
Figur 15: Akkumulert avrenning til ledningsnettene fra Mike Urban modellene med inngangsdata nedbørskart, Thiessen polygon og IDW.

Maksimal trykkehøyden (P_{maks}) som oppsto i simuleringen av situasjonsstudiet er beregnet i alle ledningstrekkene. P_{maks} i ledningstrekket som ligger nærmest et skadested er registrert. Detaljerte moduleringsresultater er gitt i Bilag E. Modellene basert på nedbørskart viste en kritisk trykkehøyde i nærmeste ledningstrekk til skadested i 23 av 26 områder. Modellene basert på IDW og Thiessen polygon ga i tilsvarende ledningstrekk en kritisk trykkehøyde i henholdsvis 17 og 18 av 26 områder. Det er ikke tatt hensyn til lokale forhold ved skadestedene slik at resultatene må anses som generelle.

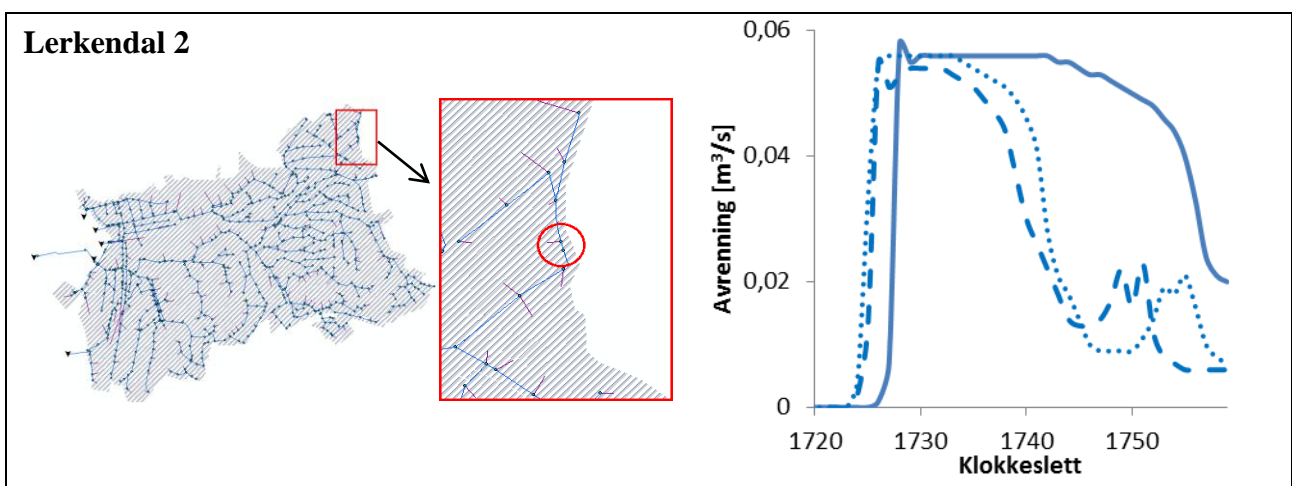
Hydrogrammer i utvalgte ledningstrekk er betraktet. Figur 16 viser hydrogram fra et ledningstrekk rett før et utløp ved Fredlybekken. Figur 17, 18, 19 og 20 viser hydrogrammer fra ledningstrekk der det er rapportert om skader fra henholdsvis Lerkendal, Møllenberg og Singsaker. Hydrogrammene viser at det er variasjoner i samsvaret mellom de ulike nedbørsmetodene med tanke på responstid, maksimal vannføring og varighet.



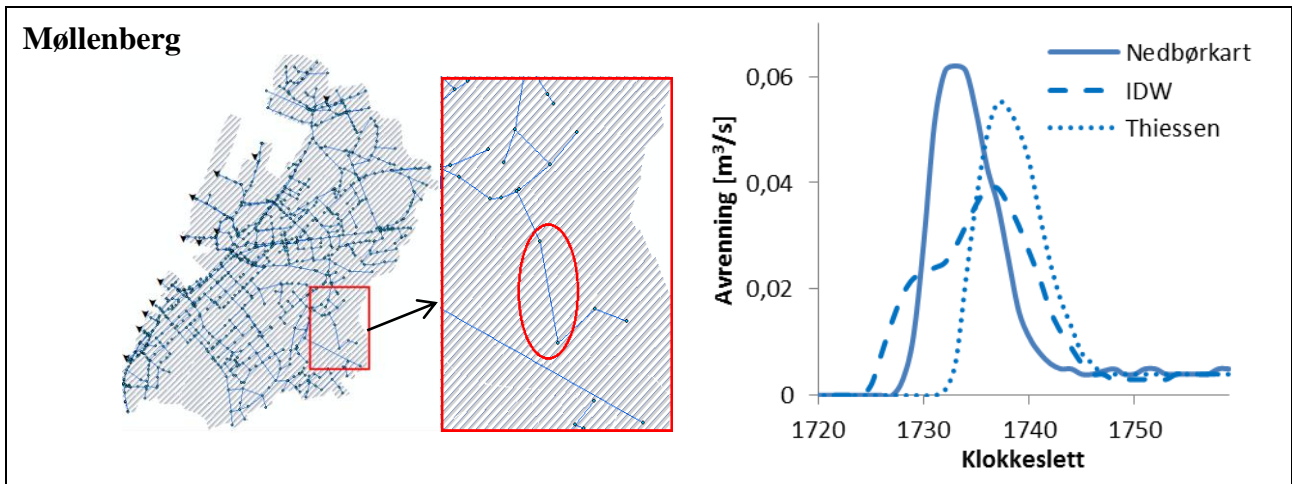
Figur 16: Hydrogram fra ledningsstreck mot et utløp, Fredlybekken.



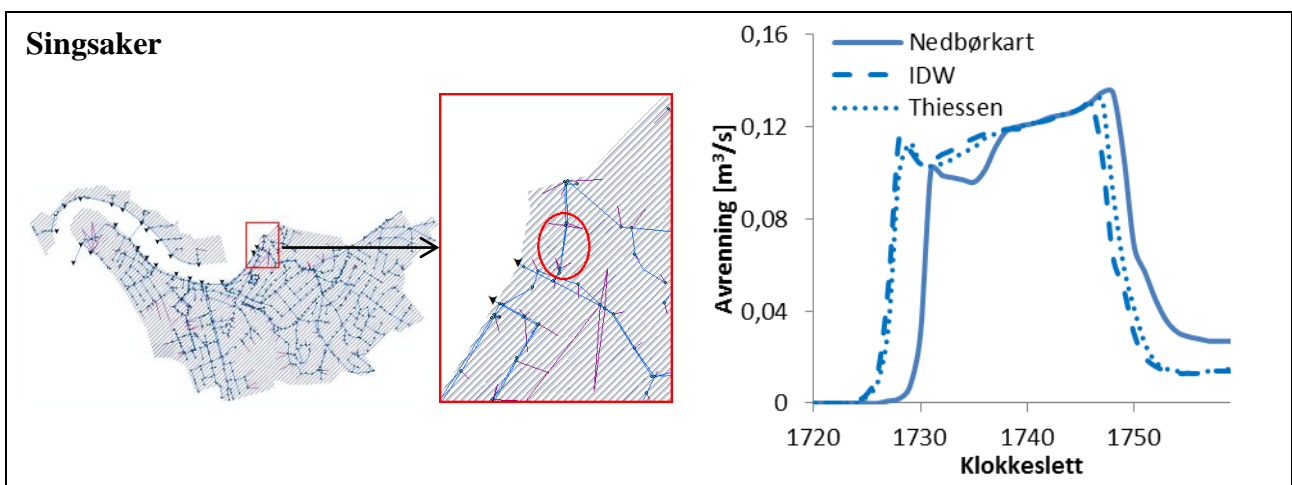
Figur 17: Hydrogram fra ledningsstreck, Lerkendal.



Figur 18: Hydrogram fra ledningsstreck, Lerkendal.



Figur 19: Hydrogram fra ledningsstreck, Møllenberg.



Figur 20: Hydrogram fra ledningsstreck, Singsaker.

6 Diskusjon

Data fra radar Rissa er benyttet i analysen av situasjonsstudiet for å gi en romlig beskrivelse av nedbøren utover det nedbørstasjonene er i stand til. Tradisjonelle vippepluviografer klarer ofte ikke å beskrive den romlige variasjonen av nedbøren over et felt tilstrekkelig (Krajewski et al., 2003), noe også dette studiet indikerer.

En rekke studier er tidligere gjort for å kvantifisere effekten en romlig varierende nedbør har på simulert avrenning sammenlignet med en uniform nedbør. Goormans og Willems (2012) beskriver at resultatene fra tidligere studier er noe sprikende, der forskjell i avrenningstopp mellom romlig varierende nedbør og uniform nedbør ligger fra 2 til 76 prosent for enkelthendelser.

For situasjonsstudiet indikerer radarbilder og data fra korttidsnedbørstasjonene at nedbøren opptrådte med stor romlig variasjon over feltet. For å få akseptable resultater fra analyse og hydrologisk modulering er det viktig å kunne beskrive de romlige variasjonene.

Produksjon og krav til hydrologiske data:

Urbane felt betegnes ofte som mindre felt med en stor andel tette flater, noe som gir en rask avrenningskarakteristikk. Det stilles derfor spesielle krav til romlig og tidsmessig oppløsning til hydrologiske inngangsparameter. Schilling (1991) gir anbefalinger til tidsmessig og romlig oppløsning av nedbørsdata for ulike oppgaver innenfor urbanhydrologien. Ved analyse av tidligere hendelser anbefales en tidsmessig oppløsning større eller lik 5 minutter og en romlig oppløsning større eller lik 1 km². Ved evaluering av avløpssystemer anbefales en tidsmessig oppløsning på ett minutt. For situasjonsstudiet viser hyetogramkurvene fra nedbørstasjonene at den mest intensive delen av nedbøren forekom innenfor et tidsrom på ett til fire minutter, mens maksimalverdiene inntraff innenfor et tidsrom på ett minutt. En tidsmessig oppløsning på ett minutt anses derfor som akseptabelt for analyse av situasjonsstudiet. Radarbildene produsert for å analysere situasjonsstudiet har en romlig oppløsning på 250meter × 250meter, noe som på bakgrunn av Schilling (1991) er en akseptabel oppløsning.

Radar Rissa sveiper nedbøren med en frekvens på 15minutter, som ikke tilfredsstillt kravet til tidsmessig oppløsning satt for situasjonsstudiet. Et annet aspekt ved bruk av radardata er at radaren gir et øyeblikksbilde av nedbøren, i motsetning til en nedbørstasjon som observerer nedbøren over et tidsrom. Ved praktisk bruk er ofte øyeblikksbildet satt til å representere gjennomsnittsverdien for tidsintervallet mellom hvert sveip. Betragtningen kan ofte føre til feil ettersom man neglisjerer det faktum at nedbøren er i bevegelse og har en utvikling i intensitet over tid (Fabry et al., 1994). Harrold et al. (1974) bemerket at slike feil vil øke i takt med økende romlig oppløsning og radarens sveipefrekvens.

Adveksjon mellom påfølgende radarbildene er tatt i betraktning for å øke den tidsmessige oppløsningen og beskrive adveksjonen for å redusere feil i beregning av akkumulert nedbør. En lignende studie ble gjort av Fabry et al. (1994) der fordelene ved å ta hensyn til adveksjonen mellom radarbilder er undersøkt. Det ble konkludert med at feilen i beregnet

akkumulert nedbør kan reduseres vesentlig dersom nedbørens bevegelse og utvikling ble tatt i betraktning.

Et Python script er benyttet til interpoleringen av øyeblikksbilder med ett minutts oppløsning mellom påfølgende radarbilder. Interpoleringen er gjort basert på antagelse om at nedbørintensiteten har en lineær vekst og beveger seg på en rett linje mellom to radarbilder med konstant hastighet. Det er dermed ikke tatt hensyn til eventuelle lokale påvirkninger på adveksjonen. Ulike påvirkningene kan blant annet være fordampning, lokale vindforhold, ulike forhold for solstråling og topografiske effekter (Tucker og Reiter, 1988).

Vurderingen av de gitte antagelsene om nedbørens utvikling er akseptable er gjort før de genererte nedbørskartene justeres. Tidspunktet da maksimal nedbørintensitet inntreffer gitt av nedbørstasjon og nedbørskart varierer innenfor ± 2 minutter ved nedbørstasjonene. Avvikene ses på som akseptable da flere faktorer kan ha innvirket på de fastsatte tidspunktene. Nedbørskartene er basert på arealvekting for å passe radarbildenes cellestruktur, noe som kan føre til at verdier får en forskyvning i posisjon. En nedbørstasjon representerer et punkt og trenger nødvendigvis ikke være representativt for et areal på 250 meter \times 250 meter. Nedbøren kan ha en forskyvning i posisjon fra den sveipes 1000 moh. til den når bakken som kan påvirke tidspunkt. I tillegg kan vippepluviografer gi små tidsmessige avvik ved fastsettelse av tidspunkt for maksimal intensitet (Fankhauser, 1998).

Ved å sammenligne hyetogrammene fra nedbørskart og nedbørstasjonene ses en sammenheng i nedbørens utvikling ved hver stasjon. Sammenhengen ses både i forhold til varighet og utviklingsforløp.

På bakgrunn av vurderingene anses antagelsene gjort for å beskrive adveksjonen mellom radarbildene som akseptable.

Figur 10 og 11 illustrer hvor viktig det er å ta hensyn til adveksjonen mellom påfølgende radarbilder for situasjonsstudiet. Da nedbøren opptrådte over et kort tidsrom og nedbørsfronten beveger seg raskt (12 m/s) klarte ikke radarbildene å beskrive nedbøren over et samlet felt. Ved å la øyeblikksbildet representere gjennomsnittsverdien mellom hvert sveip for radarbildene oppsto en kraftig overestimering av akkumulert nedbør i områder der nedbøren befant seg da sveipet ble foretatt, samt en kraftig underestimering i områder der nedbør ikke har befunnet seg under en sveip. De genererte nedbørskartene ga derimot en jevn fordeling av akkumulert nedbør over feltet. Den jevne fordelingen tolkes som at den valgte tidsmessige oppløsningen ved generering av nedbørskart er akseptabelt for situasjonen. Analysene gir den samme indikasjonen for situasjonsstudiet som Fabry et al. (1994) konkluderer med: At det er avgjørende å ta hensyn til adveksjonen mellom påfølgende radarbilder for å redusere feilen i beregnet akkumulert nedbør.

Usikkerhet ved målinger:

Det er usikkerhet knyttet til den kvantitative kvaliteten til radardata gitt fra radar Rissa, og dermed også til de produserte nedbørskartene. Ulike feilkilder er belyst av Abdella & Alfredsen (2010b), som også gjør en spesifikk analyse av radardata gitt fra radar Rissa.

Nedbørskartene er justert opp mot observerte verdier fra nedbørstasjonene for å øke den kvantitative kvaliteten. Det er derfor viktig å kjenne usikkerhet knyttet til nedbørstasjonene. Verdiene gitt fra stasjonene er ikke korrigert for lokale vindforhold da nødvendig vinddata fra situasjonsstudiet ikke foreligger. Det finnes standardiserte korreksjonsfaktorer, tilpasset nordiske forhold, som settes på bakgrunn av nedbørstasjonens antatte eksponeringsklasse (Førland et al., 1996). En slik vindkorreksjonsfaktor ble ikke benyttet i studiet da usikkerheten rundt de anses som høy. Bruk av nedbørsdata som ikke er vindjustert kan ofte føre til en underestimering av nedbørsverdier. Luyckx og Berlamont (2001) og Fankhauser (1998) beskriver andre faktorer som kan påvirke kvaliteten til data fra vippepluviografer. Faktorene innebærer unøyaktighet i oppløsning til måleinstrumentet (kalibrering), befuktning og fordampning, underestimering grunnet vippebevegelsen til skålen og oppsamlingsmetode. Det er forventet en økende underestimering av nedbøren ved økende nedbørintensiteter (Luyckx og Berlamont, 2001). Til tross for nevnte usikkerheter anses vippepluviografer som et av de mest nøyaktige instrumentene for måling av nedbør på bakkenivå (Goormans og Willems, 2012).

Justeringsfaktor og justering av nedbørskart:

Justeringsfaktorene beregnet ved hver nedbørstasjon gir grunnlag for justering av nedbørskartene. Faktoren viser seg å ha en stor romlig variasjon, fra 1,07 på Ranheim til 2,16 på Saupstad. Det er derfor ikke tilfredsstillende å benytte en felles justeringsfaktor for hele feltet. Ved beregning av akkumulert nedbør fra nedbørskartene er det tatt snittet av de 9 nærmeste cellene til nedbørstasjonen av de arealvektede kartene. En bedre tilnærming kan være å benytte nedbørskart som ikke er arealvektet til radarcellestrukturen ved beregning av justeringsfaktor.

For å beskrive justeringsfaktoren i områder der det ikke er nedbørstasjoner er trender over feltet analysert. Trendene gir grunnlag for valg av metode for å beskrive justeringsfaktorens utbredelse over feltet. Analysen viser at justeringsfaktoren er jevnt synkende i nedbørsfrontens retning over feltet. Ved å benytte minste kvadraters metode for å angi en første ordens lineær tilnærming til justeringsfaktorens utvikling over feltet ga det en R^2 -verdi på 0,76. Justeringsfaktoren ved Risvolla avviker mest fra denne tilnærmingen.

Sammenligning av akkumulerte verdier for 5 og 10 minutters nedbør samlet for alle stasjoner viser en tydelig tendens i at nedbørskartene systematisk underestimerer ved økende verdier. Sammenhengen er tydeligst for 10 minutters verdiene. Noe av avviket ved 5 minutters akkumulert nedbør kan skyldes at usikkerhet ved bruk av vippepluviografer anses som større for 5 minutters akkumulert enn for 10 minutter akkumulert (Luyckx og Berlamont, 2001). Ved bruk av minste kvadraters metode gir forholdet mellom nedbørskart og nedbørstasjoner for 5 minutters akkumulert nedbør en første ordens lineær utvikling med et stigningstall på 0,47 med en R^2 -verdi på 0,73. For 10 minutters akkumulert nedbør er tilsvarende stigningstall 0,50 med en R^2 -verdi på 0,93. Smith et al. (2007) beskriver en tilsvarende tendens med underestimering av radardata ved økt nedbørintensitet. Her konkluderes det med at underestimeringen skyldes stor variasjon i dråpestørrelse. Variasjonen fører til at refleksjonsverdiene ikke klarer å gjengi den romlige variasjonen i tilstrekkelig grad. Årsaken til underestimeringen i situasjonsstudiet er ikke undersøkt.

Eventuell romlige innvirkninger er studert ved å se isolert på utviklingen ved hver stasjon. Det er derimot for få punkter med høye verdier til å kunne se en tendens i eventuell romlig innvirkning.

Utviklingen til maksimal 10 minutters akkumulert nedbør følger tendensen til justeringsfaktoren ved at den er jevnt synkende over feltet. Dette er forventet på bakgrunn av forholdet funnet mellom akkumulerte verdier fra nedbørstasjon og nedbørskart.

Romlig justeringsmetode:

På bakgrunn av analyse av nedbørsutvikling og justeringsfaktor er to ulike metoder vurdert for å justere nedbørskartene. Det er vurdert å justere hver enkel nedbørscelle i nedbørskartene utfra akkumulert 10 minutters nedbør i cellen. Justeringen vil basere seg på forholdet funnet mellom nedbørskart og nedbørstasjon for ulike 10 minutters akkumulerte nedbørsverdier. På bakgrunn av analysene vil en slik justering gi en god tilnærming. Metoden viste seg å være for tidkrevende til at den lot seg gjennomføre i studiet. Da årsaken til underestimeringen ikke er kjent er det også knyttet usikkerhet til en slik justering.

Den andre metoden som er vurdert er å ta utgangspunkt i justeringsfaktorene og dens tendens over feltet for så angi romlig utbredelse ved interpolering. Da trenden til justeringsfaktoren og maksimal 10 minutter akkumulert nedbør har en tydelig avtagende utvikling over feltet er det grunn til å tro at interpolering av justeringsfaktoren kan være en god tilnærming dersom trenden er tatt i betraktning.

En rekke ulike interpolasjonsmetoder er utviklet for å beskrive utbredelsen til verdier over et felt basert på punktverdier. Tidligere studier gir sprikende konklusjoner angående hvilke metoder som egner seg best til ulike formål (Zimmerman et al., 1999). Ved valg av interpolasjonsmetode for situasjonsstudiet er det ønske om at trenden til justeringsfaktoren som er funnet over feltet i stor grad blir tatt hensyn til. Trenden kan forenklet ses på som et lineært plan med gradvis synkende verdier i nedbørsfrontens retning. Zimmerman et al. (1999) evaluerer ulike interpolasjonsmetoder på bakgrunn av punktmålinger for ulike type flater. For interpolering av et plan er det konkludert med at regresjonskriging er best egnet. Regresjonskriging er en interpolasjonsmetode som egner seg godt dersom uregelmessige romlige punktverdier viser en trend over et felt (Warnes, 1986). Metoden er også anbefalt av Engeland (Personlig kommunikasjon, 8. februar 2012) til bruk i situasjonsstudiet. Den er blant annet beskrevet av Warnes (1986), og er implementert i ArcGIS. Bruk av førsteordens regresjonskriging er ansett som en enklere og raskere metode enn den skisserte metoden der hver enkelt nedbørscelle blir justert spesifikt.

De genererte nedbørskartene er multiplisert med det interpolerte justeringskartet i ArcGIS slik at det er generert justerte nedbørskart. Nedbørserier hentet fra de justerte nedbørskartene korrelerer bra med de observerte verdiene ved nedbørstasjonene. Største avvik i maksimal ett minutt akkumulert nedbør er på Saupstad. Avviket kan i stor grad skyldes interpolasjonsmetoden da flertallet av punktverdiene ligger i motsatt ende av feltet. Området rundt Saupstad har derfor en mindre vektning ved regresjon.

Avviket i maksimal ett minutt akkumulert nedbør mellom nedbørstasjon og nedbørskart varierer fra -0,89 mm til 0,85 mm. For den totale akkumulerte nedbøren for hele

tilfellet er tilsvarende variasjon fra -0,33 mm til 2,16 mm. En helt nøyaktig sammenheng er ikke å forvente på grunn av tidligere nevnte faktorer.

På bakgrunn av sammenhengen mellom justerte nedbørskart og nedbørstasjoner samt trendene over feltet anses første ordens regresjonskring som en akseptabel interpolasjonsmetode til bruk i situasjonsstudiet.

Romlig nedbørsfordeling:

Det er gjort en betraktning av beregnet fordelt nedbør over feltet basert på justerte nedbørskart og IDW. Differansen i den akkumulerte timesnedbøren ved bruk av de to metodene over feltet er varierende. Differansene er små i områder rundt nedbørstasjonene. Det er forventet da stasjonene er utgangspunktet for interpoleringen med IDW samt for produksjon av justeringskartet. I området mellom nedbørstasjonene er det større avvik i differansen. Det er tydelig at IDW ikke klarer å fange opp de romlige variasjonene til nedbøren. Det er blant annet et drag med kraftig nedbør som går over Lerkendalsområdet i retning Lade. Den treffer ingen av nedbørstasjonene som fører til at draget ikke blir tatt hensyn til ved interpolering mellom stasjonene. På det meste er avviket mellom nedbørskart og interpolert nedbør 7,6 mm/h, som på det gitte punktet utgjør en differanse i akkumulert nedbør på 42 prosent. Maksimal akkumulert timesnedbør i et punkt gitt fra nedbørskartene er 18,6 mm, mens maksimalverdien for interpolert nedbør er 14,1 mm.

Det er områder der nedbørskart og interpolert nedbør korrelerte bra. Tabell 5 beskriver korrelasjonen mellom IDW og justerte nedbørskart for totalt akkumulert nedbør. Tabellen indikerer at IDW klarer å beskrive en større del av det betraktende område. For eksempel er det et samsvar i akkumulert nedbør innenfor en faktor på ± 2 mm/h i 69,4 prosent av feltet.

Nedbørsfordelingen for et tidsskritt på ett minutt er analysert. Tidsintervallet 17:25 - 17:26 er valgt da nedbørsfronten her befinner seg omtrent midt i det betraktede feltet. Usikkerhetene rundt nedbørstasjonene må tas i betraktningene ved analysen. Nedbørskartene ga en maksimalverdi på 5,0 mm/min, mens interpoleringen med IDW ga en maksimalverdi på 3,3 mm/min over feltet. Det er tydelig at IDW overestimerer nedbøren i områder utover nedbørsfrontens posisjon. Overestimeringen kommer av at IDW ikke klarer å ta høyde for nedbørsfrontens begrensede utstrekning. På den andre siden er det områder der IDW underestimerer i forhold til nedbørskartene. Underestimeringen er størst der nedbørskartene gir de høyeste verdiene. Det er et resultat av at nedbørstasjonene ikke står tett nok til å klare å fange opp de romlige variasjonene til nedbøren.

Resultatene indikerer at bruk av IDW i begrenset grad klarer å beskrive den romlige fordelingen av nedbøren for situasjonsstudiet, sammenlignet med de justerte nedbørskartene.

Modulering av situasjonsstudiet:

Nedbørsverdier gitt av Thiessen polynom, IDW og nedbørskart er benyttet som inngangsdata til kalibrerte Mike Uran-modeller for simulering av situasjonsstudiet. Beregning av total akkumulert avrenning til ledningsnett fra hver av modellene gir en god korrelasjon mellom de to interpoleringsmetodene og nedbørskartene for Fredlybekken, Singsaker og Møllenberg. For Lerkendal er derimot verdien av akkumulert avrenning fra nedbørskartene en del høyere.

Differansen er et resultat av nedbørsdraget som går over Lerkendalsområdet som ingen av nedbørstasjonene er stand til å fange opp.

Sammenligning av resultater fra kjøring av Mike Urban modellene opp mot innrapporterte skader viser at modellene basert på nedbørskart gir kritisk trykkehøyde i flere ledningsstrekker med tilhørende skadesteder enn modellene kjørt med interpolert nedbør (23/26 mot 17/26 og 18/26). I Lerkendal-modellen gir modellen basert på nedbørskart kun kritisk trykk ved ett av skadestedene der interpolert nedbør ikke gir det. Det til tross for en markant høyere akkumulert avrenning fra modellene basert på nedbørskart. Ved de andre skadestedene, der nedbørskartene i motsetning til interpolert nedbør ga kritisk trykk i ledning, er det mindre avvik i den akkumulerte avrenningen til ledningsnett.

Årsaken til at nedbørskartene gir kritisk trykkehøyde ved flere av skadestedene enn interpolert nedbør kan ligge i den romlige beskrivelsen av nedbøren. Analysen av nedbørens variasjon over feltet indikerer at nedbørskartene i større grad beskriver både utbredelse og maksimalverdier enn interpoleringsmetodene. Data fra nedbørskartene er dermed mer representativt ved analyse av situasjonsstudiet enn interpolert nedbør.

Ved bruk av resultatene fra Mike Urban modellene må usikkerhet i forbindelse med modellene og kalibrering av dem tas i betraktning.

Hydrografene hentet fra utvalgte ledningsstrekker i Mike Urban modellene gjenspeiler variasjonene i inngangsverdiene godt. Det er en god korrelasjon i hydrografene fra områdene der inngangsverdiene til de ulike metodene er forholdsvis lik (Figur 16 og 20). Figur 17 og 18 er hentet fra ledningsstrekker ved skadesteder i Lerkendal-modellen der draget med kraftig nedbør passerer. Avrenningsforløpet er her forholdsvis likt, men nedbørskartene gir en markant høyere avrenningstopp eller lengre avrenningstid. Der kapasiteten til ledningen er overskredet er avrenningstiden lengre. Figur 19 gir et skadested ved Møllenberg. Her er responsen i avrenning markant forskjellig for de ulike metodene. Til tross for at den totale akkumulerte avrenningen er forholdsvis lik responderer hydrografene ulikt. Det skyldes den romlige fordelingen til nedbøren.

For alle de analyserte ledningsstrekkeene gjelder det generelt at tidspunktet for når avrenning starter er ulikt for de ulike metodene. Det er et resultat av at den interpolerte nedbøren er basert på tidsserier fra nedbørstasjoner som ligger et stykke unna det betraktede området. Det gir grunn til å tro at nedbørskartene angir det mest korrekte tidspunktet for når avrenningen starter, spesielt i områder som ikke ligger i nærheten av en nedbørstasjon.

Moduleringen av situasjonsstudiet i Mike Urban viser at den romlige nedbøren beskrevet av nedbørskartene gir en annen belastning på ledningsnett enn interpolert nedbør. Flere tidligere studier har indikert at det kan være store forskjeller i modulert avrenning ved bruk av romlig varierende og uniformt nedbør (Faurès et al., 1995, Morena et al., 2002, Goormans og Willems, 2012). Simulering av situasjonsstudiet gir den samme indikasjonen om at kvaliteten på moduleringen kan økes ved å ta hensyn til de romlige variasjonene til nedbøren. Det gjelder spesielt for tilfeller med lokalt kraftig nedbør.

7. Konklusjon

Ekstremnedbørstilfellet som forårsaket store skader i Trondheim by 13. august 2007 er analysert. For å oppnå en god romlig beskrivelse av nedbøren er det tatt utgangspunkt i data fra en C-band værradar. Det er generert opp nedbørskart mellom påfølgende radarbilder med en oppløsning på ett minutt for å beskrive adveksjonen. Å beskrive adveksjon mellom radarbilder viser seg å være avgjørende for å beskrive akkumulert nedbør over feltet. Nedbørskartene er justert på bakgrunn av analyser av utbredelse og kvalitet over feltet. Første ordens regresjonskriging er bruk for å lage et justeringskart over feltet basert på justeringsfaktorene beregnet ved nedbørstasjonene.

Det er vurdert hvor godt de genererte nedbørskartene beskriver den romlige fordelingen til nedbøren sammenlignet med IDW mellom stasjonene. Analysen er gjort gjennom en romlig betraktning av nedbøren samt ved simulering av situasjonsstudiet med Mike Urban modeller. Nedbørskartene klarer i større grad enn IDW å beskrive den romlige fordelingen og utviklingen til nedbøren for situasjonsstudiet. Det innebefatter både beregning av akkumulert nedbør over feltet og fordeling av nedbør for kortere tidsskritt. Mike Urban modellene som tar utgangspunkt i data fra nedbørskartene gir kritisk trykkehøyde i flere ledningsstrek i områder med skadesteder enn modellene basert på interpolert nedbør.

Det er funnet en klar tendens i at værradaren systematisk underestimerer for økte 5 og 10 minutter akkumulerte nedbørsverdier.

Studiet konkluderer med at det ved bruk av data fra en C-band værradar for analyse av et ekstremnedbørstilfelle er mulig å beskrive den romlige utbredelsen til nedbøren i større grad enn ved interpolering av nedbør mellom nedbørstasjoner. Det forutsetter at adveksjon mellom radarbildene er tatt i betraktning. Metodikken benyttet i studiet kan være godt egnet for analyse av lignende tilfeller med lokalt kraftig nedbør.

8. Videre arbeid

I et videre arbeid, utover det masteroppgaven dekker, anbefales det å sammenligne simulert avrenning mot målt avrenning i felt. På grunn av manglende data var det ikke mulig å gjøre i masteroppgaven. Ved en slik sammenligning kan man i større grad kvantifisere innvirkning nedbørskart har på simulert avrenning i ledningsnettet sammenlignet med interpolert nedbør.

Bakgrunnen til den systematiske underestimering av nedbørskartene ved økende 5 og 10 minutter akkumulerte nedbørsverdier bør undersøkes. En slik kartlegging kan gi et nytt grunnlag for justering av nedbørskartene, slik at kvaliteten til kartene kan økes. Analyser av tilsvarende nedbørshendelser kan gjennomføres for å undersøke om underestimeringen er en systematisk feil som opptrer ved høye akkumulerte nedbørsverdier.

Det ligger også potensiale i bruk av radardata fra C-band radarene på andre områder enn det masteroppgaven tar for seg. Ved å ta hensyn til adveksjonen mellom bildene og eventuelt framskriving av data kan radardata for eksempel innlemmes i ulike varslingsystemer og til "Real-time Control Systems". Til bruk i "Real-time Control Systems" kan radarbilder/nedbørskart for eksempel bidra til å optimalisere kjøring av pumpestasjoner og avløpsrensaneanlegg.

9. Referanseliste

- ABDELLA, Y. & ALFREDSSEN, K. 2010a. A GIS toolset for automated processing and analysis of radar precipitation data. *Computers & Geosciences*, 36, 422-429.
- ABDELLA, Y. & ALFREDSSEN, K. 2010b. Long-term evaluation of gauge-adjusted precipitation estimates from a radar in Norway. *Hydrology research*, 41, 171-192.
- DHI 2011a. MIKE URBAN MODEL MANAGER User Guide.
- DHI 2011b. MOUSE PIPE FLOW. Reference Manual.
- DHI 2011c. MOUSE RUNOFF. Reference Manual.
- DHI. 2012. *Local Area Weather Radar* [Online]. Available: <http://radar.dhigroup.com/> [Accessed 21. mai 2012].
- DINGMAN, S. L. 2002. *Physical Hydrology (2th Edition)* New Jersey: Prentice Hall.
- EINFALT, T., JESSEN, M., MEHLIG, B. 2005. Comparison of radar and raingauge measurements during heavy rainfall. *Water Science and Technology*, 51, 195-201.
- EINFALT, T., JOHANN, G. & PFISTER, A. 1998. On the spatial validity of heavy point rainfall measurements. *Water Science and Technology*, 37, 21-28.
- ENGELAND, K. Personlig kommunikasjon, 8. februar 2012.
- FABRY, F., BELLON, A., DUNCAN, M. R. & AUSTIN, G. L. 1994. High resolution rainfall measurements by radar for very small basins: the sampling problem reexamined. *Journal of Hydrology*, 161, 415-428.
- FANKHAUSER, R. 1998. Influence of systematic errors from tipping bucket rain gauges on recorded rainfall data. *Water Science and Technology*, 37, 121-129.
- FAURÈS, J.-M., GOODRICH, D. C., WOOLHISER, D. A. & SOROOSHIAN, S. 1995. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 173, 309-326.
- FØRLAND, E. J., ALLERUP, P., DAHLSTRÖM, B., ELOMAA, E., JØNSSON, T., MADSEN, H., PERÄLÄ, J., RISSAMEN, P., VEDIN, H. & VEJEN, F. 1996. Manual for operational correction of nordic precipitation data. Det norske meteorologiske institutt.
- GJERTSEN, U. 2002. Gauge Adjustment of Precipitation Estimates from the Norwegian Weather Radar Network. *COST 717 Working Document no. WDF_02_200203_3*. Available at: <http://www.smhi.se/cost717/>.
- GOORMANS, T. & WILLEMS, P. 2012. Using local weather radar data for sewer system modelling: a case study in Flanders, Belgium. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- HANSSEN-BAUER, I., FØRLAND, E. J., ROALD, L., HISDAL, H., LAWRENCE, D., DRANGE, H., N., A., VASSKOG, K., SANDVEN, S., ÅDLANDSVIK, B. & SUNDBY, S. 2009. Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning. Foreløpig utgave juni 2009. Oslo: Norsk klimasenter.
- HARROLD, T. W., ENGLISH, E. J. & NICHOLASS, C. A. 1974. The accuracy of radar derived rainfall measurements in hilly terrain. *Q. J.R. Meteorol. Soc.*, 100, 331-350.
- KOMMUNEFORLAGET 2008. Standard abonnementsvilkår for vann og avløp - Tekniske bestemmelser.
- KRAJEWSKI, W. F., CIACH, G. J. & HABIB, E. 2003. An analysis of small-scale rainfall variability in different climate regimes. *Hydrological Sciences*, 48 (2), 151-162.
- KREYSZIG, E. 2006. *Advanced Engineering Mathematics (9th Edition)*, New York: Wiley.
- LUYCKX, G. & BERLAMONT, J. 2001. Simplified Method to Correct Rainfall Measurements from Tipping Bucket Rain Gauges. *Urban Drainage Modeling, Proceedings of the Specialty Symposium Held in Conjunction with the World Water and Environmental Resources Congress, American Society of Civil Engineers, Orlando, FL (2001)*.

- MARSHALL, J. S. & PALMER, W. M. K. 1948. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5, 165-166.
- MORENA, F., ANDRIEU, H., RODRIGUEZ, F. & CREUTIN, J.-D. 2002. Effect of rainfall variability on the hydrological behavior of urban basins: A simulation study based on weather radar data *Proceedings of 9th International Conference on Urban Drainage*. Portland, Oregon, USA.
- NAGELKERKE, N. J. D. 1991. A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*, 78 691–692.
- PEDERSEN, L., JENSEN, E. J. & MADSEN, H. 2006. Application of Local Area Weather Radar (LAWR) in relation to hydrological modeling – Identification of the pitfalls in using high resolution radar rainfall data. *Proceedings of Fourth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD06), 18-22 september 2006, Barcelona, Spain*.
- RISHOLT, L. P., NILSSEN, O., KRISTIANSEN, V., KARLSEN, E., HAGEN, Ø. & ELLINGSSON, A. 2009. Prosjekt Kjelleroversvømmelser sommeren 2007. Trondheim: Trondheim kommune.
- SCHILLING, W. 1991. Rainfall data for urban hydrology: what do we need? *Atmospheric Research*, 27, 5-21.
- SMITH, J. A., BAECK, M. L., MEIERDIERCKS, K. L., MILLER, A. J. & KRAJEWSKI, W. F. 2007. Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. *Advances in Water Resources*, 30, 2087-2097.
- THOROLFSSON, S. T., RISHOLT, L. P., NILSSEN, O., ELLINGSSON, A., KRISTIANSEN, V., HAGEN, Ø. & KARLSEN, E. 2008. Extreme rainfall and damages on August 13 2007 in the city of Trondheim, Norway. *XXV Nordic Hydrological Conference Nordic Association for hydrology 11-13. august 2008*. Reykjavik, Island.
- TUCKER, D. F. & REITER, E. R. 1988. Modeling heavy precipitation in complex terrain. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 39, 119-131.
- WARNES, J. J. 1986. A sensitivity analysis for universal kriging. *Mathematical Geology*, 18, 653-676.
- WILSON, J. W. & BRANDES, E. A. 1979. Radar measurement of rainfall: a summary *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60, 1048-1060.
- WOLLAMO, H. O. & LIEN, M. 2007. Heftig regnskyll skapte kaos. *Adresseavisen*, 14. august 2007.
- ZIMMERMAN, D., PAVLIK, C., RUGGLES, A. & ARMSTRONG, M. 1999. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology*, 31 375–390.

Bilag A: Python script

Python scriptene, cross-corr.py og advection.py, for beregning av adveksjon mellom påfølgende radarbilder er gitt under. Scriptene er skrevet av Yisak Sultan Abdella ved SINTEF Energi AS. Parameterne er tilpasset en radarcellestørrelse på 250meter × 250meter. Python versjon 2.6.5 er benyttet. Scriptene er tilpasset mappestrukturen som er benyttet i masteroppgaven og må justeres ved videre bruk. Navnet på de to påfølgende radarbildene som ligger inne i scriptet er 1700_R.asc og 1715_R.asc, og må også justeres ved senere bruk. Bildene er i asc-format.

cross-corr.py

```
from numpy import *

def calc_max_corr(field2,field1,nx,ny,max_disp,miss_valueT):
    max_correl=-2.
    correl = zeros([2*max_disp+1,2*max_disp+1], float)
    for di in range(-max_disp,max_disp+1,1):
        for dj in range(-max_disp,max_disp+1,1):
            print di,dj
            nn=0
            sx=0.
            sy=0.
            sxx=0.
            syy=0.
            sxy=0.
            varx=0.
            vary=0.
            covxy=0.
            for j in range(1+max_disp,ny-max_disp):
                jj=j+dj
                for i in range(1+max_disp,nx-max_disp):
                    ii=i+di
                    if(field1[j,i]<>miss_valueT and field2[jj,ii]<> miss_valueT):
                        if(field1[j,i]>0. and field2[jj,ii]> 0.):
                            nn=nn+1
                            sx=sx+field1[j,i]
                            sy=sy+field2[jj,ii]
                            sxx=sxx+field1[j,i]**2
                            syy=syy+field2[jj,ii]**2
                            sxy=sxy+field1[j,i]*field2[jj,ii]

            if(nn>0):
## means :
                xm=sx/float(nn)
                ym=sy/float(nn)
## variances/covariances :
                xxm=sxx/float(nn)
                yym=syy/float(n
```

```

    xym=sxy/float(nn)
    varx=max(0.,xxm-xm*xm)
    vary=max(0.,yym-ym*ym)
    covxy=xym-xm*ym

## correlation coefficient :

    if(varx>0. and vary>0.):
        ro=covxy/sqrt(varx*vary)
        #correl[dj+max_disp+1,di+max_disp+1]=ro
        correl[dj+max_disp,di+max_disp]=ro

        if(ro>max_correl):
            max_correl=ro
            disp_x=di
            disp_y=dj

    if(max_correl== -2):
        max_correl=0.
        disp_x=0.
        disp_y=0.
    return (disp_x,disp_y,max_correl)

if __name__ == "__main__":

    grids_folder = "C:/NTNU/Master/Adveksjon_skript/Advection-CrossCorr/grids"

    grid_now = open(grids_folder + "\\ " + "1700_R.asc", 'r')
    GRID_NOW = loadtxt(grid_now, skiprows=6)
    #print GRID_NOW
    grid_now.close()

    grid_next = open(grids_folder + "\\ " + "1715_R.asc ", 'r')
    GRID_NEXT = loadtxt(grid_next, skiprows=6)
    #print GRID_NEXT
    grid_next.close()

    nx = 480
    ny = 480
    max_disp = 20
    miss_valueT = -999.

    print calc_max_corr(GRID_NEXT,GRID_NOW,nx,ny,max_disp,miss_valueT)

```

advection.py

```
# Import system modules
#import sys
from numpy import *
import cross_corr
#import matplotlib.pyplot as plt
#import matplotlib.image as mpimg

##### Inputs #####

grids_folder = "C:/NTNU/Master/Adveksjon_skript/Advection-CrossCorr/grids"

grid_now = open(grids_folder + "\\ " + "1700_R.asc", 'r')

grid_next = open(grids_folder + "\\ " + "1715_R.asc", 'r')

#####

Headerline1 = "ncols      1920\n"
Headerline2 = "nrows      1920\n"
Headerline3 = "xllcorner  -240000.0\n"
Headerline4 = "yllcorner  -240000.0\n"
Headerline5 = "cellsize   250\n"
Headerline6 = "NODATA_value -999\n"

GRID_NOW = loadtxt(grid_now, skiprows=6)
#print GRID_NOW
grid_now.close()

GRID_NEXT = loadtxt(grid_next, skiprows=6)
#print GRID_NEXT
grid_next.close()

nrows = 1920
#nrows = 30
ncols = 1920
#ncols = 30
grid_size = 1.

max_disp = 40
miss_value = -999.

nstep = 15
#nstep = 7

disp_corr =
cross_corr.calc_max_corr(GRID_NEXT,GRID_NOW,ncols,nrows,max_disp,miss_value)
```

```

disp_x = disp_corr[0]
disp_y = disp_corr[1]
correl = disp_corr[2]

# This was the result from the test
#disp_x = 7
#disp_y = -8
#correl = 0.7127043972600001

print "disp_x -> ",disp_x
print "disp_y -> ",disp_y
print "Max correl -> ",correl

# Upper left corner coords for the main (reference) radar grid
X_ref = 0.
Y_ref = 0.

# Upper left corner coords for a translated grid
X_move = X_ref
Y_move = Y_ref

dxadv = disp_x / float(nstep)
dyadv = disp_y / float(nstep)

R_grid = zeros([nrows,ncols], float)
#R_GRIDS = [zeros([nrows,ncols], float) for j in range(nstep-1)]
R_grid_1 = zeros([nrows,ncols], float)

for i in range(1,nstep):
    print "Iteration ",i
    xadv = dxadv * i
    yadv = dyadv * i
    print "yadv ", "xadv"
    print yadv,xadv
    if(disp_x<>0):
        disp = disp_x
        adv = xadv
    if(disp_y<>0):
        disp = disp_y
        adv = yadv
    X_move = X_ref + xadv
    Y_move = Y_ref + yadv
    for row in range(nrows):
        for col in range(ncols):
            #print "row ", "col"
            #print row,col
            R_now = GRID_NOW[row,col]
            row_ = row+disp_y
            col_ = col+disp_x
            if(row_ >= 0 and col_ >= 0 and row_ < nrows and col_ < ncols

```

```

    R_next = GRID_NEXT[row_,col_]
else:
    #R_next = -9999.
    R_next = 0.

if(R_now==miss_value or R_next==miss_value):
    R_interp = 0.
else:
    R_interp = R_now * (disp - adv)/disp + R_next * adv/disp
R_grid[row,col] = R_interp

for row in range(nrows):
    for col in range(ncols):

        # Coords. of the center of the pixel in the reference space (grid)

        center_y = Y_ref+row*grid_size + grid_size/2.
        center_x = X_ref+col*grid_size + grid_size/2.

        # Coords. of the boundaries/corners of the pixel in the reference space (grid)

        Uy = center_y-grid_size/2.
        Rx = center_x+grid_size/2.
        Ly = center_y+grid_size/2.
        Lx = center_x-grid_size/2.

        # Coords. of the boundaries/corners of the pixel in translated space (grid)

        Uy_1 = Uy-Y_move
        Rx_1 = Rx-X_move
        Ly_1 = Ly-Y_move
        Lx_1 = Lx-X_move

        # Row and Col ID of the boundaries/corners of the pixel in translated space (grid)

        Uy_2 = floor(Uy_1/grid_size)
        Rx_2 = floor(Rx_1/grid_size)
        Ly_2 = floor(Ly_1/grid_size)
        Lx_2 = floor(Lx_1/grid_size)

        # Coords. (in the reference coord system) of the center of the translated pixels
        # which contain the corners of the pixel in the reference grid

        Uy_center = Y_move+Uy_2*grid_size+grid_size/2.
        Rx_center = X_move+Rx_2*grid_size+grid_size/2.
        Ly_center = Y_move+Ly_2*grid_size+grid_size/2.
        Lx_center = X_move+Lx_2*grid_size+grid_size/2.

```

```

x1 = Lx_center
x2 = Rx_center
y1 = Ly_center
y2 = Uy_center

x = center_x
y = center_y

denom = (x2-x1)*(y2-y1)

# Upper right - Q22
if(Uy_2>=0 and Rx_2>=0 and Uy_2<nrows and Rx_2<ncols):
    R_grid_1[row,col] += R_grid[Uy_2,Rx_2]*(x-x1)*(y-y1)/denom

# Lower right - Q21
if(Ly_2>=0 and Rx_2>=0 and Ly_2<nrows and Rx_2<ncols):
    R_grid_1[row,col] += R_grid[Ly_2,Rx_2]*(x-x1)*(y2-y)/denom

# Upper left - Q12
if(Uy_2>=0 and Lx_2>=0 and Uy_2<nrows and Lx_2<ncols):
    R_grid_1[row,col] += R_grid[Uy_2,Lx_2]*(x2-x)*(y-y1)/denom

# Lower left - Q11
if(Ly_2>=0 and Lx_2>=0 and Ly_2<nrows and Lx_2<ncols):
    R_grid_1[row,col] += R_grid[Ly_2,Lx_2]*(x2-x)*(y2-y)/denom

R_file = open(grid_folder + "\\ " + "grid_inter_" + str(i) + ".asc", 'w')
row = 0
R_file.write(Headerline1)
R_file.write(Headerline2)
R_file.write(Headerline3)
R_file.write(Headerline4)
R_file.write(Headerline5)
R_file.write(Headerline6)
while (row < nrows):
    rowline = []
    for rowelement in R_grid_1[row]:
        rowline.append(str(rowelement))
    R_file.write(str(" ".join(rowline)))
    R_file.write("\n")
    row = row + 1

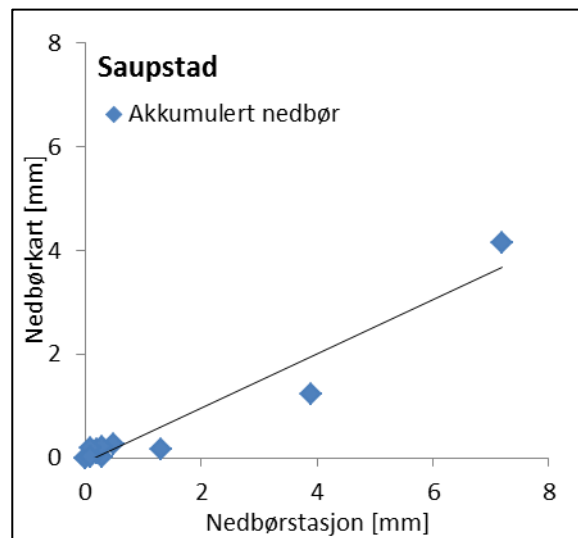
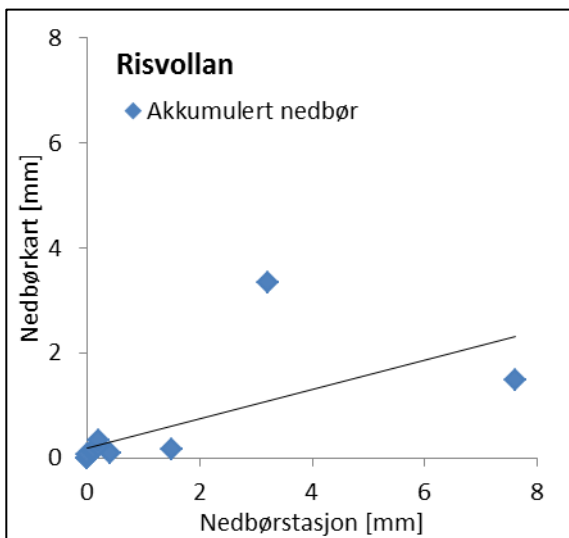
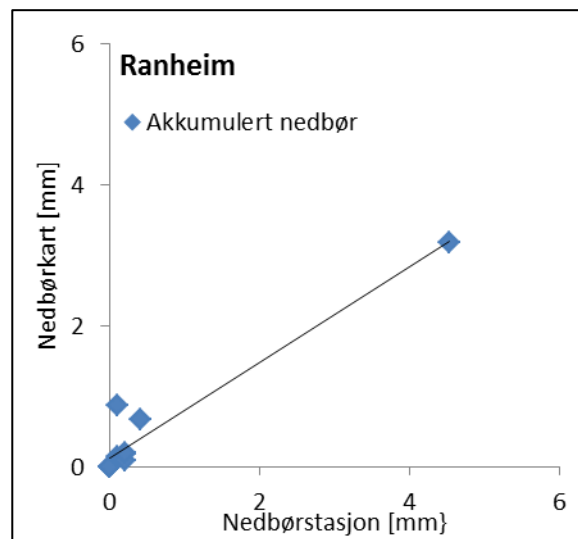
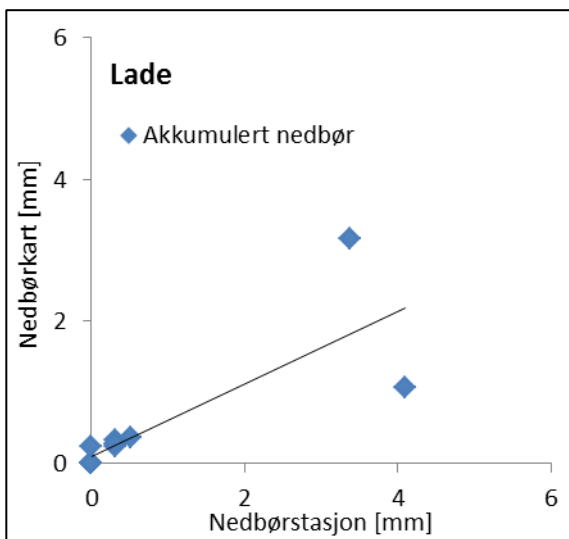
R_grid[:] = 0.
R_grid_1[:] = 0.
R_file.close()

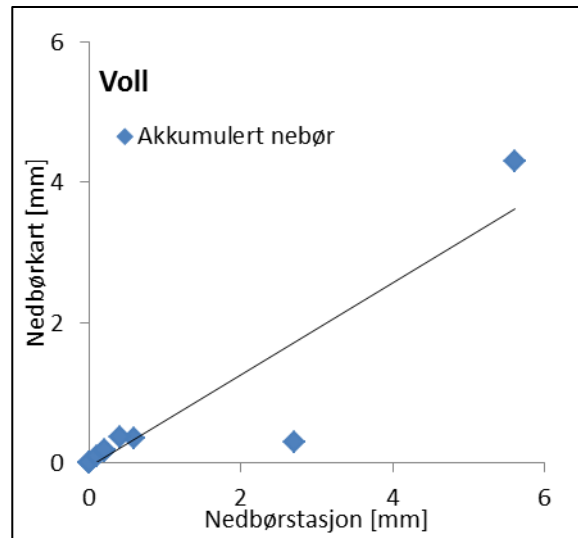
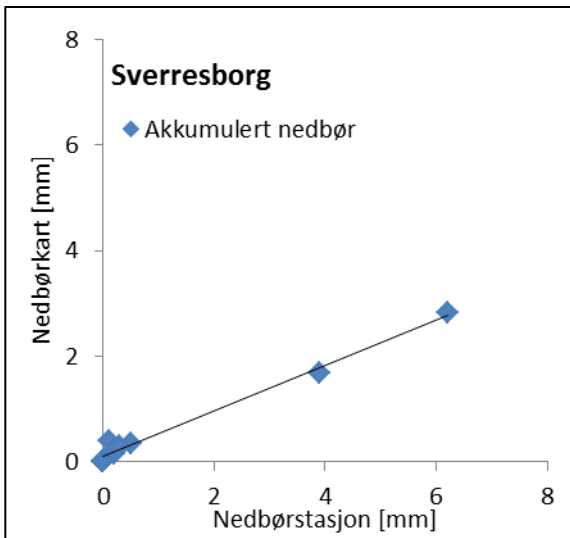
```

Bilag B: Forhold i akkumulerte verdier fra nedbørstasjon og nedbørskart.

Det er sett på forholdet i akkumulerte nedbørsverdier mellom nedbørstasjoner og ujusterte nedbørskart. For å analysere eventuelle romlige innvirkninger er hver nedbørstasjon sett på isolert både for 5 og 10 minutters akkumulert nedbør. Resultatene er gitt i Figur B1 og B2. Det er ikke trukket en konklusjon angående eventuell romlig variasjon på grunn av få verdier.

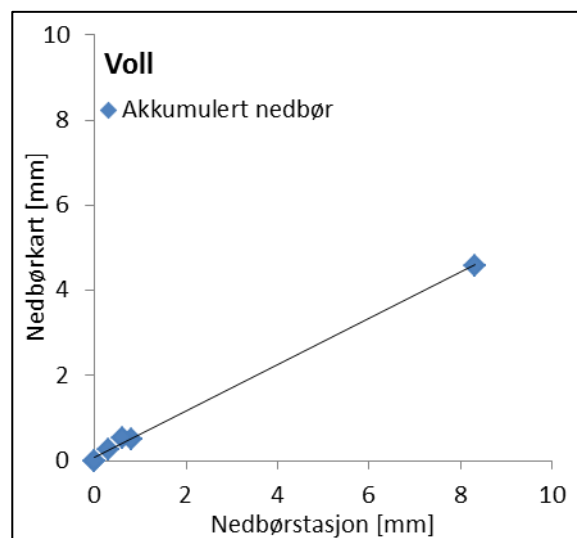
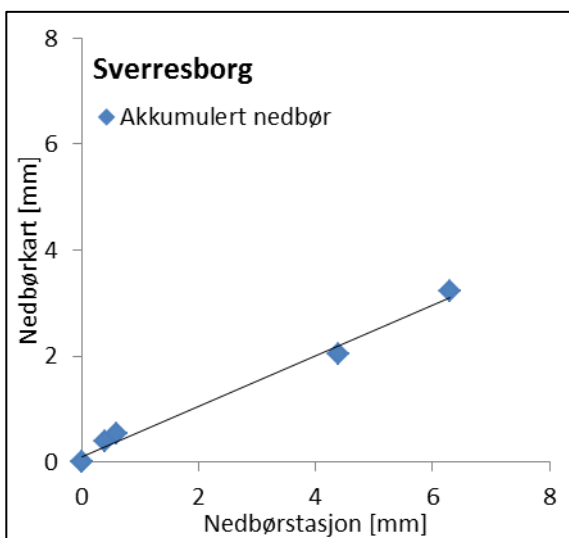
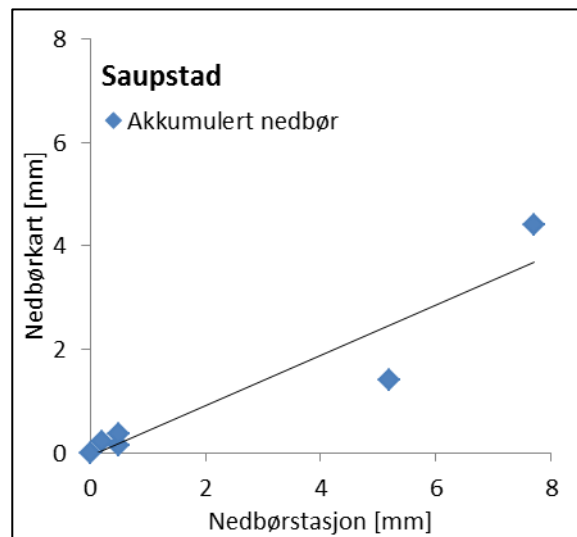
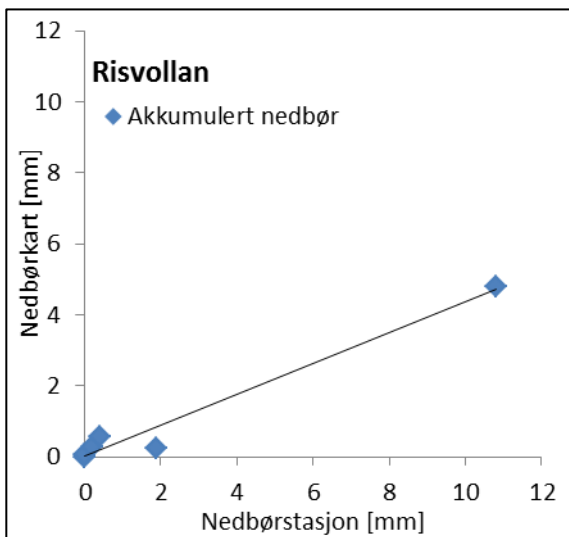
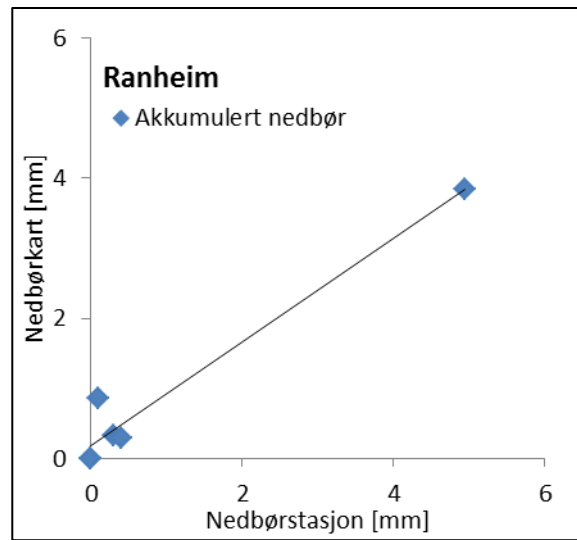
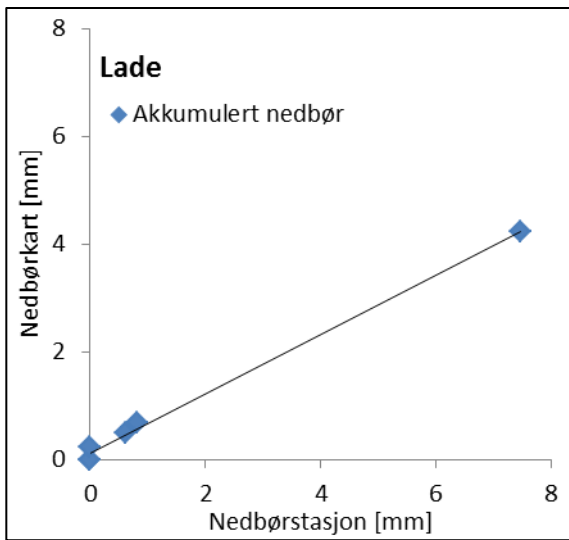
5 minutter akkumulerte verdier:





Figur B1: Akkumulert 5 minutter nedbør fra nedbørstasjon plottet mot nedbørskart ved hver stasjon.

10 minutter akkumulerte verdier:



Figur B2: Akkumulert 10 minutter nedbør fra nedbørstasjon plottet mot nedbørskart ved hver stasjon.

Bilag C: Produksjon av justeringskart

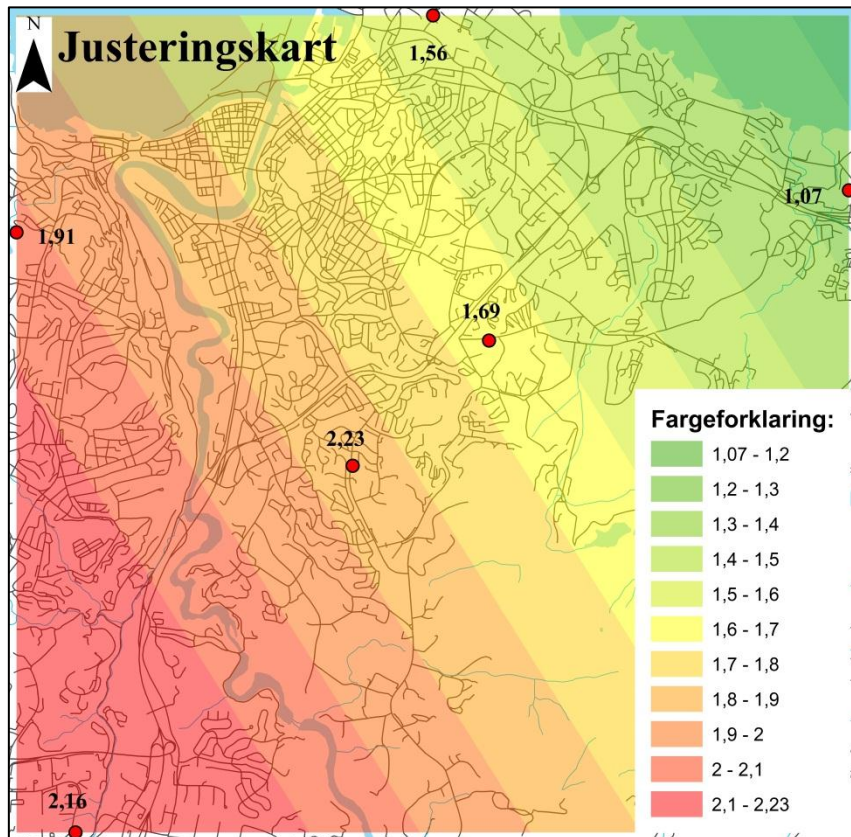
Produksjonen av justeringskartet er gjort i ArcGIS. Det er benyttet ArcGIS versjon 10.0. Basert på justeringsfaktorene, beregnet i seks punkter, er det laget et justeringskart ved bruk av første ordens regresjonskriging. Det er under gitt en punktvis beskrivelse av hvordan regresjonskriging er gjennomført i ArcGIS. Beskrivelsen innebefatter også benyttede innstillinger. Utgangspunktet for regresjonskriging er et lag med seks punktverdier (justeringsfaktorene ved nedbørstasjonene):

- 1) I verktøymenyen er det valgt "Geostatistical Wizard" fra "Geostatistical Analyst".
- 2) "Geostatistical methods: Kriging/CoKriging" er valgt. I neste skritt velges "Kriging Type: Universal", "Transformation type: None" og "Order of trend removal: First". Dette representerer første ordens regresjonskriging. "Output Type" er satt til "Prediction". Det er valgt en semivariogrammodell.
- 3) Metoderapporten fra produksjonen av justeringskartet er gitt under:

Input datasets:	Dataset_TrondheimKommune_gauges_UTM
Location:	C:\NTNU\Ulike_kart\Maalestasjoner
Type Feature:	Class
Data field:	Justeringsfaktorer
Records:	6
Method:	Kriging
Type:	Universal
Output type:	Prediction
Dataset:	1
Trend type:	First
Trend removal:	Local Polynomial Interpolation
Power:	1
Output type:	Prediction
Exploratory trend surface analysis:	0
Searching neighborhood:	Standard
Type:	Standard
Neighbors to include:	5
Include at least:	2
Sector type:	Four and 45 degree
Angle:	0
Major semiaxis:	30437,0461116055
Minor semiaxis:	30437,0461116055
Variogram:	Semivariogram
Number of lags:	12
Lag size:	2536,4205093004584
Nugget:	0,042440444115160014
Measurement error %:	100
ShiftON:	No
Model type:	Stable
Parameter:	0,2

Range: 30437,0461116055
Anisotropy: No
Partial: sill0

Det produserte justeringskartet er gitt i Figur C1. Justeringsfaktorene som regresjonskringingen er basert på er også vist i figuren.



Figur C1: Justeringskartet produsert ved bruk av første ordens regresjonskriging, med justeringsfaktorer.

Bilag D: Tilpassing av data fra nedbørskart til Mike Urban

Det er gitt en punktvis beskrivelse av hvordan nedbørskartene er tilpasset og lagt inn i Mike Urban modellene. Utgangspunktet er en serie med nedbørskart i rasterformat i UTM32 som har samme cellestruktur som radarbildene. Nedbørskartene er behandlet i ArcGIS.

Nedbørsverdiene har benevnning [mm/min]:

- 1) De justerte nedbørskartene er hentet inn i ArcGIS. For de nedbørscellene som dekker modellområdene er koordinatene til hver nedbørscelle registrert.
- 2) En nedbørsserie fra hver celle i nedbørskartene er hentet ut. Det er gjort ved å etablere et punkt (i en ny shape-fil) i hver nedbørscelle. Ettersom hele cellen er gitt en verdi kan denne verdien hentes ut i et punkt. Nedbørsserien gitt i cellen er hentet ut i punktet ved bruk av "Spatial Analyst Tools → Extraction → Extract Multi Values to Points". Hver nedbørscelle, med tilhørende koordinater, er nå gitt en nedbørsserie. Nedbørsseriene er konvertert til Excel.
- 3) Mike Urban krever at nedbørsseriene er i dfs0-format, slik at hver nedbørsserie må konverteres. Det er gjort i Mike Urban. Excel-filen åpnes her: "Edit → Time Series → Open → Excel Timeseries Bridge" og lagres som dfs0-fil. Det er valgt "Rainfall Depth, millimeter og Mean_Step_Accumulated". "Mean_Step_Accumulated" er valgt ettersom verdien i cellen skal representere gjennomsnittsverdien i tidsintervallet på ett minutt. Konverteringen gjøres for alle nedbørsseriene. Det er nå laget en nedbørsserie i dfs0-format for hver nedbørscelle.
- 4) Det må defineres hvilke delfelt hver enkelt nedbørscelle dekker. På bakgrunn av koordinatene registrert for hver nedbørscelle er de delfeltene som ligger innenfor koordinatene definert. Der et delfelt er dekket av flere nedbørsceller er nedbørsserien fra den cellen som dekker feltets senterkoordinater benyttet.

Delfeltene er definert ved å benytte: "Selection → Select by Attribute". Her velges laget "Catchments", og delfeltene defineres ved å sette grensebetingelser til senterkoordinatene ([X_C] og [Y_C]). Et sett delfelt er dermed valgt og lagres som en mus-fil. En mus-fil gir de delfeltene en nedbørscelle dekker. Det er nå laget en mus-fil til hver nedbørsserie (dfs0-fil).
- 5) Nedbørsseriene er lagt inn i Mike Urban-modellen. Det er gjort ved å velge "MOUSE → Boundary Conditions → Catchment Loads". Hver nedbørsserie er lagt inn som en randbetingelse. Det er gjort ved å velge "Storm Runoff", "Time Series", "DFS0" og så angi plasseringen til dfs0-filen. Dfs0-filen må settes til å gjelde for det området radarcellen dekker. Det er gjort ved å velge: "Connection type: List" for så å angi plassering til mus-filen.

Nedbørsseriene fra nedbørskartene er nå lagt inn i riktig posisjon i Mike Urban-modellen.

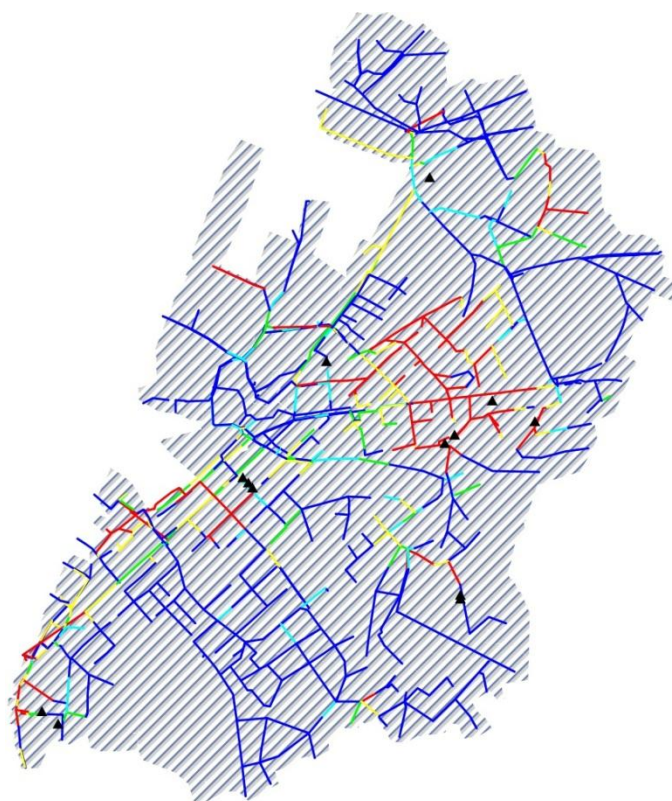
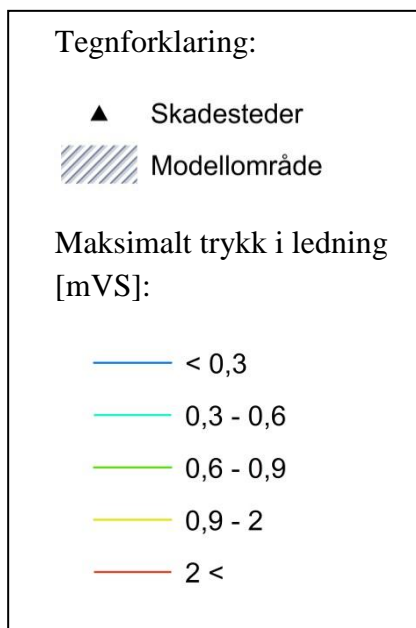
Bilag E: Resultater fra Mike Urban modulering

Resultatene fra modellkjøringene er gitt i Figur E1 til E12. Skadestedene er sammenlignet mot maksimal trykkehøyde i nærmeste avløpsledning. Antall skadeområder med modulert kritisk trykk i hver modell er gitt i Tabell E1. Kritisk trykk er satt til å være 0,9mVS over topp rør, der annen informasjon om lavere overdekning eller redusert kapasitet ikke foreligger. Analysen må anses som generell.

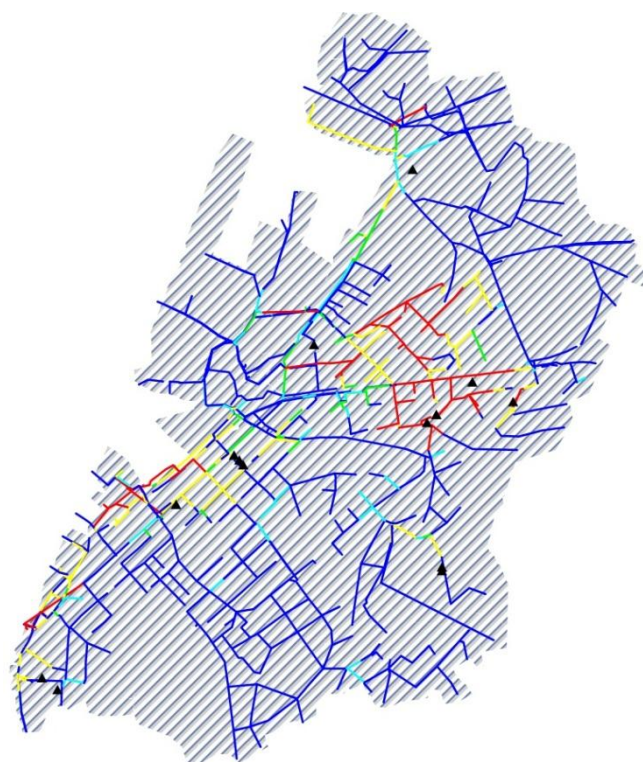
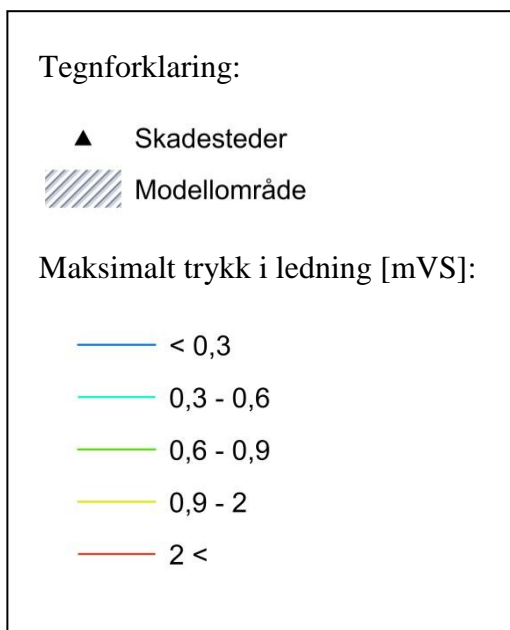
Tabell E1: Områder der det er registrert skader og hvor modellene gir kritisk trykkehøyde i tilhørende ledning.

Modellområde:	Antall registrerte områder med skader:	Nedbørskart: Antall skadeområder med kritisk trykk:	IDW: Antall skadeområder med kritisk trykk:	Thiessen: Antall skadeområder med kritisk trykk:
Møllenberg	9	8	4	5
Singsaker	2	2	1	1
Lerkendal	7	7	6	6
Fredlybekken	8	6	6	6
Alle	26	23	17	18

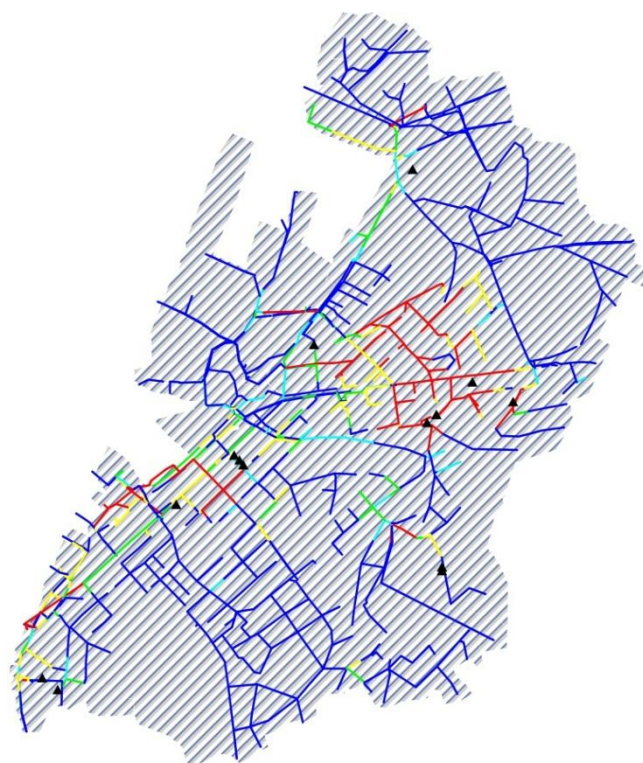
Møllenberg:



Figur E1: Modulert trykk med nedbørskart for Møllenberg.

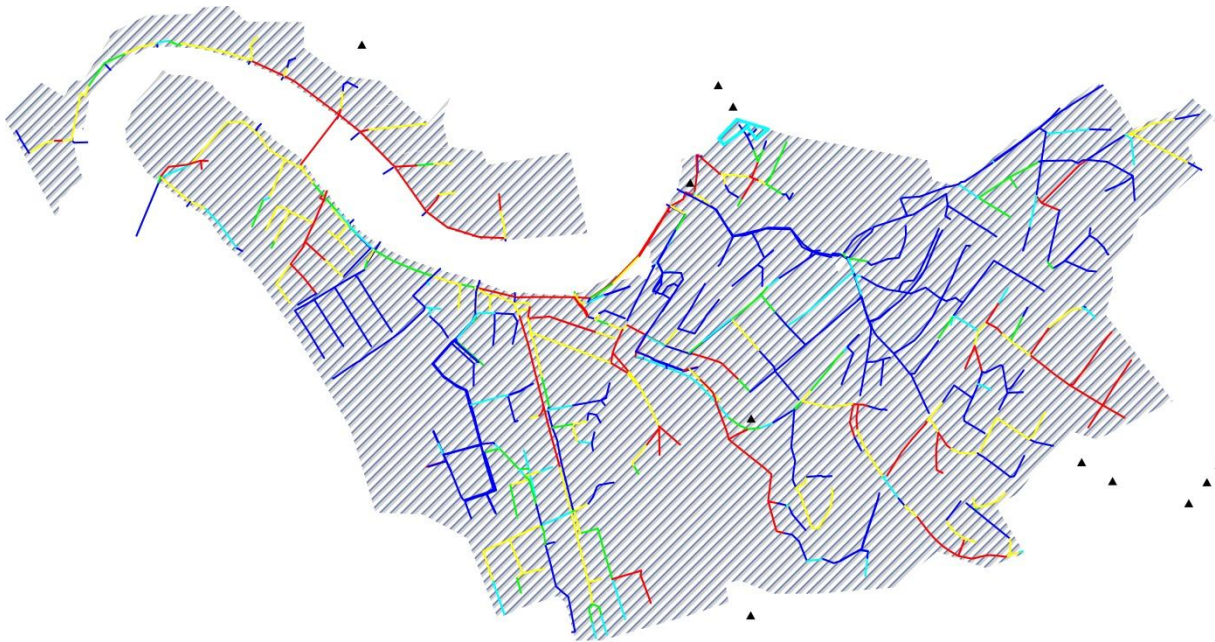


Figur E2: Modulert trykk med IDW for Møllenberg.



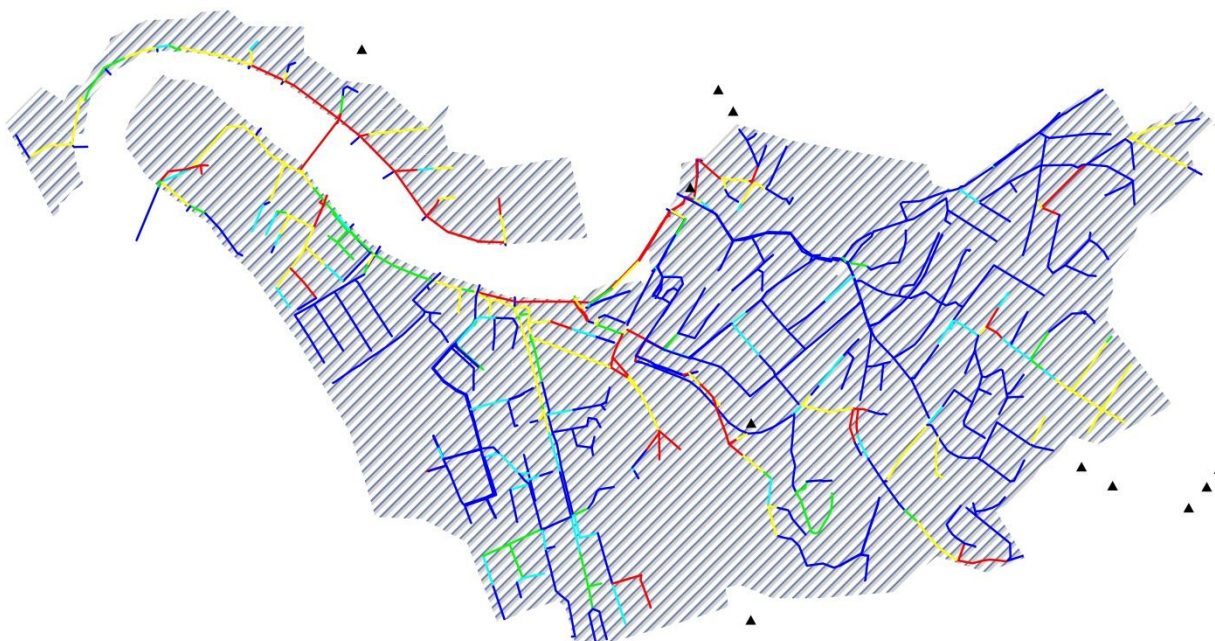
Figur E3: Modulert trykk med Thiessen for Møllenberg.

Singsaker:

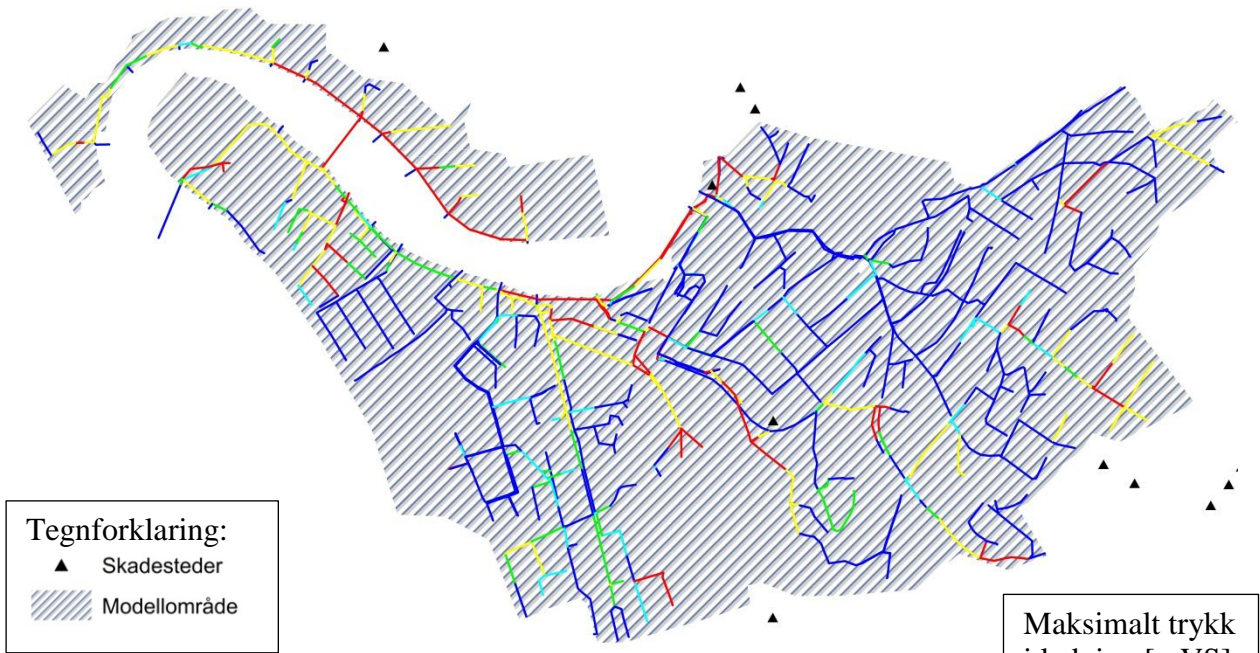


Figur E4: Modulert trykk med nedbørskart for Singsaker.

Tegnforklaring:	Maksimalt trykk i ledning [mVS]:
▲ Skadesteder	— < 0,3
▨ Modellområde	— 0,3 - 0,6
	— 0,6 - 0,9
	— 0,9 - 2
	— 2 <

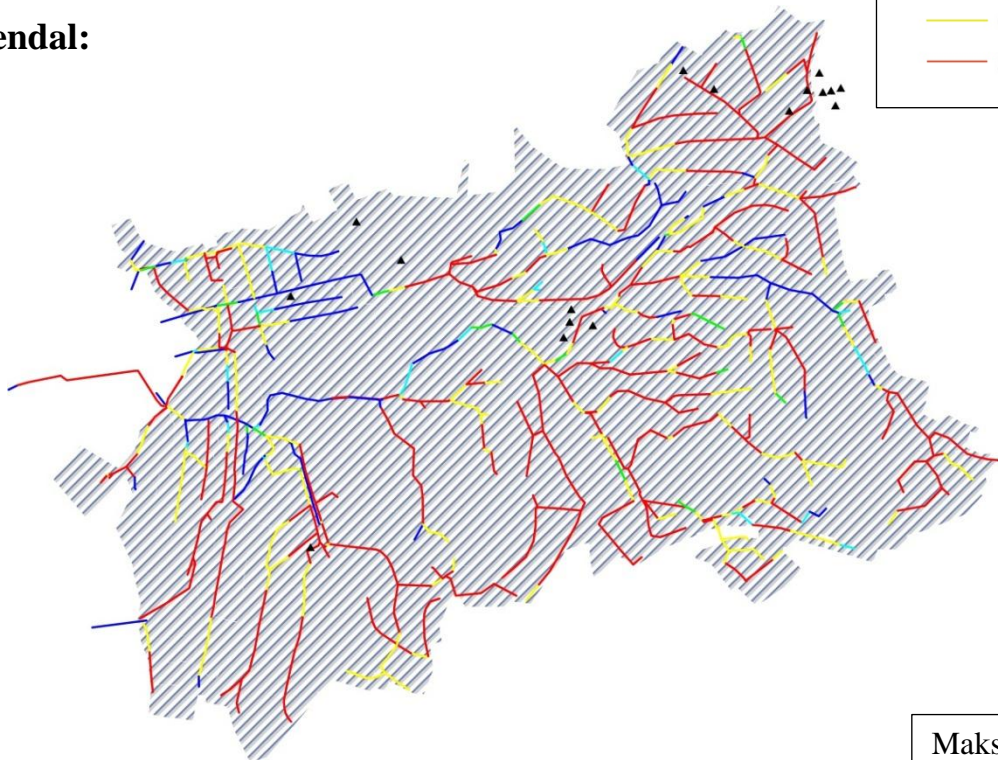


Figur E5: Modulert trykk med IDW for Singsaker.

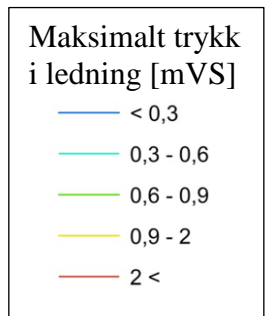


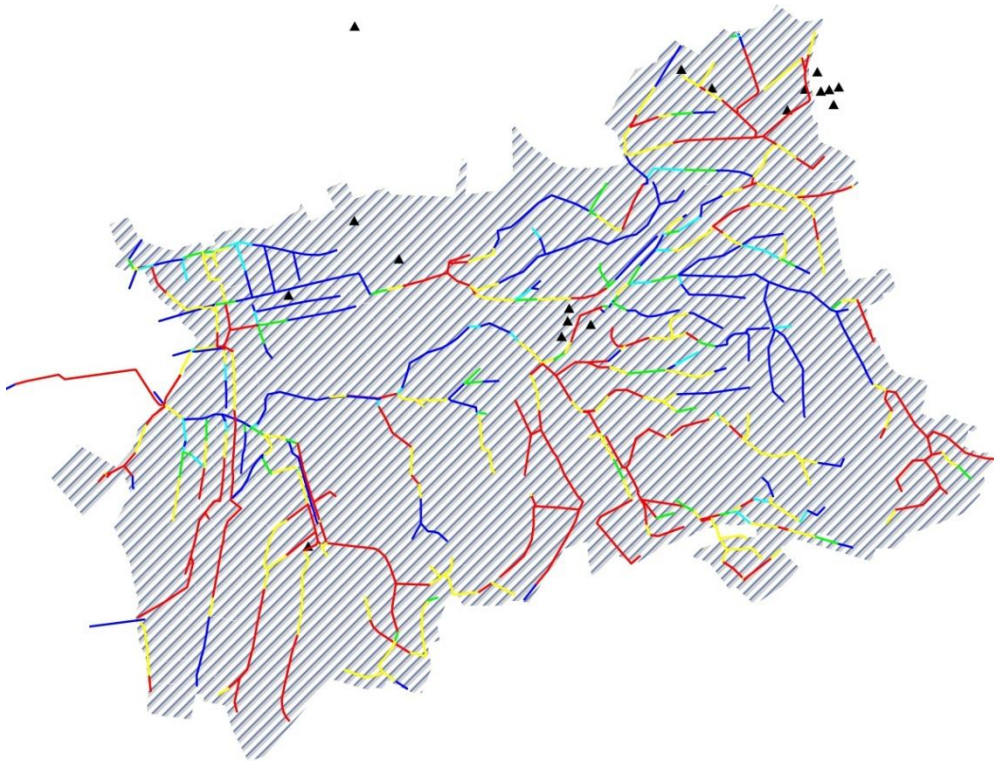
Figur E6: Modulert trykk med Thiessen for Singaker.

Lerkendal:

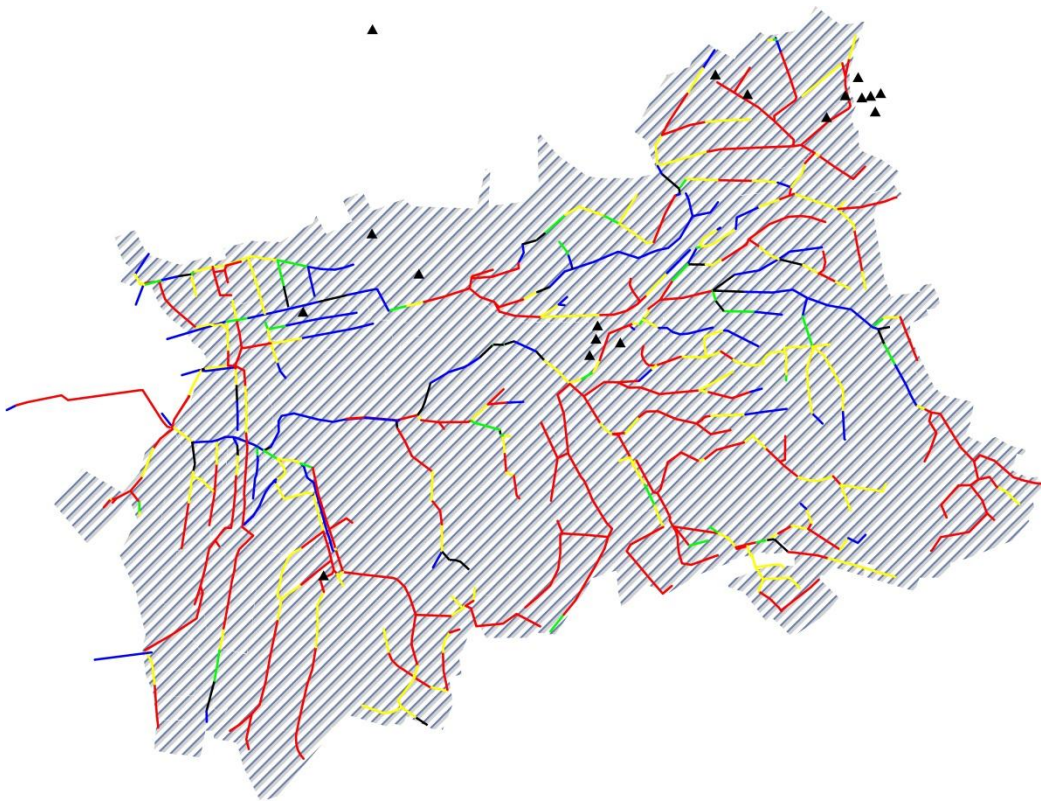


Figur E7: Modulert trykk med nedbørskart for Lerkendal.



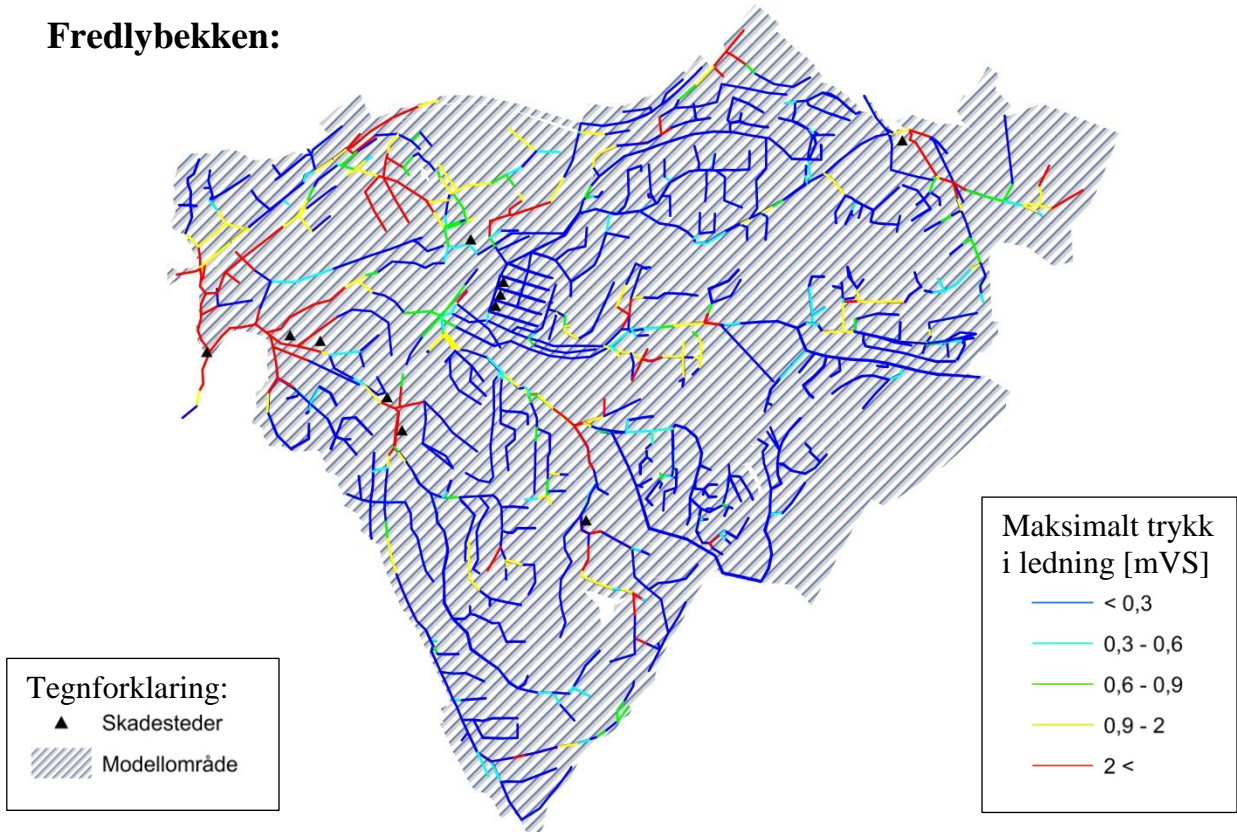


Figur E8: Modulert trykk med IDW for Lerkendal.

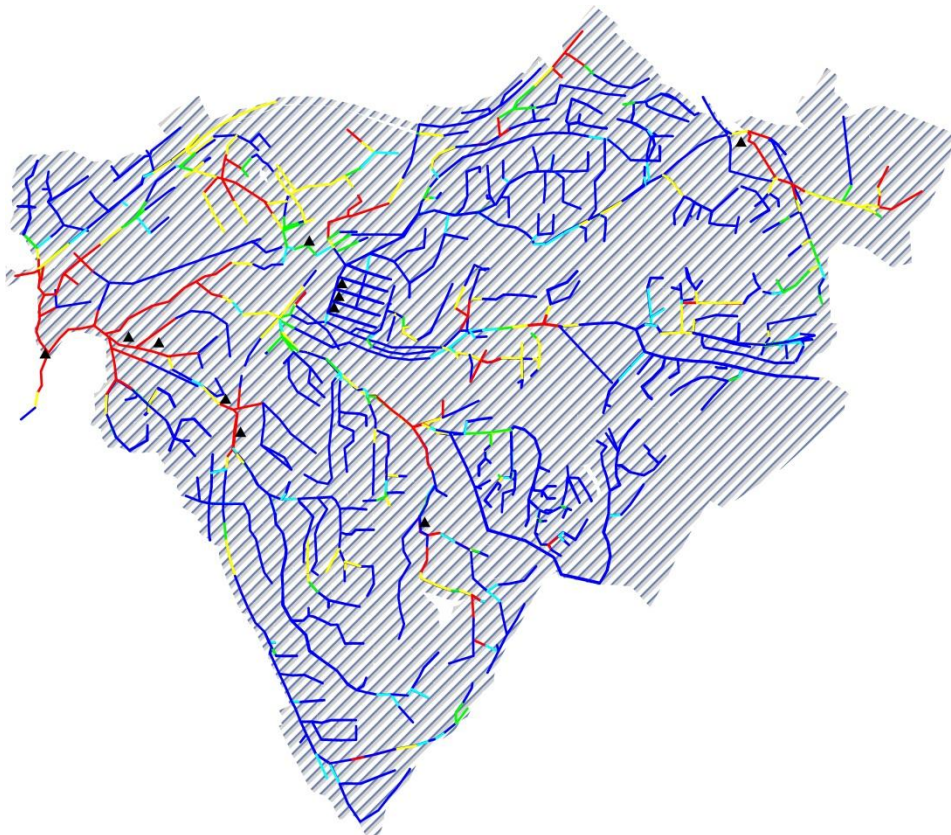


Figur E9: Modulert trykk med Thiessen for Lerkendal.

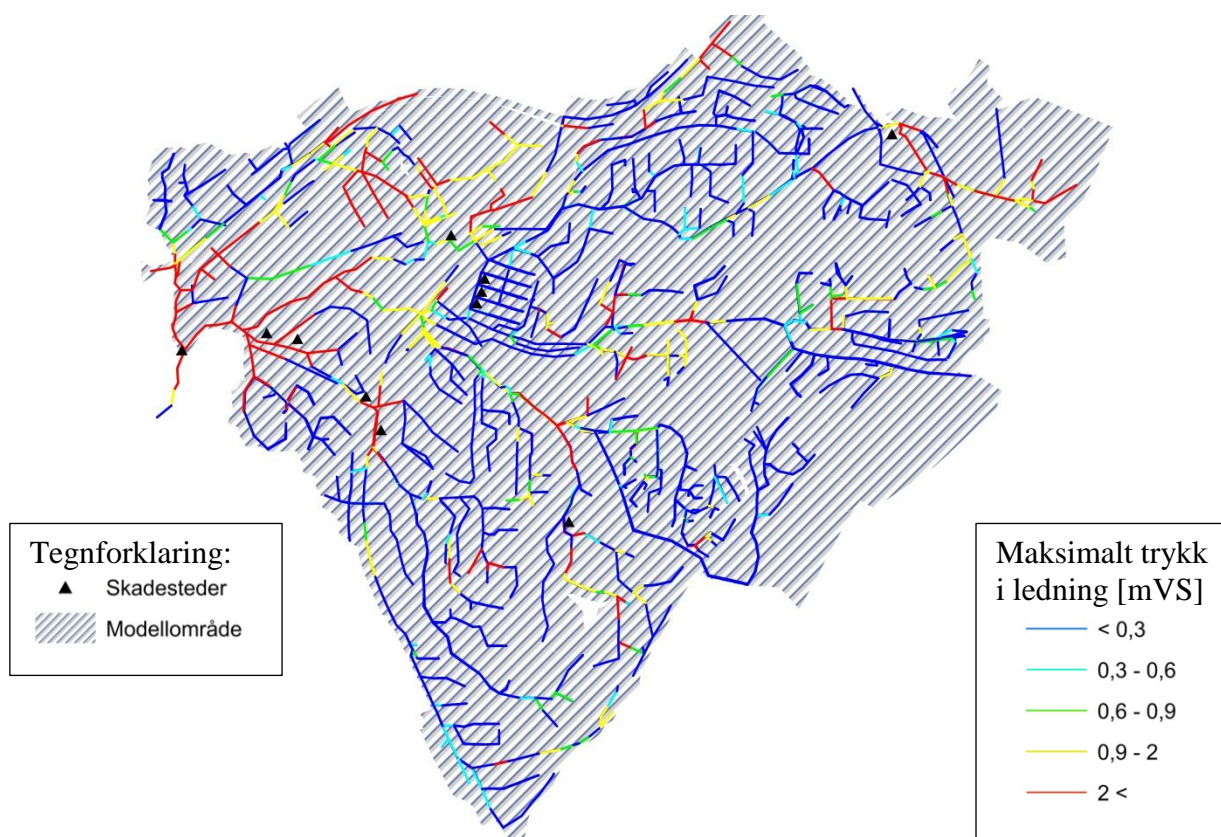
Fredlybekken:



Figur E10: Modulert trykk med nedbørskart for Fredlybekken.



Figur E11: Modulert trykk med IDW for Fredlybekken.



Figur E12: Modulert trykk med Thiessen for Fredlybekken.

Bilag F: Digitalt bilag.

Det digitale bilaget til oppgaven har følgende innhold og mappestruktur:

1. A3 Poster, presentasjon av masteroppgaven.
2. Rådata (13.8.2007)
 - 2.1 Data fra korttidsnedbørstasjonene.
 - 2.2 Radarbilder fra radar Rissa (Z-verdier, AEQD)
3. Nedbørskart
 - 3.1 Genererte nedbørskart (R_u, AEQD)
 - 3.2 Justeringskart
 - 3.3 Justerte nedbørskart (R, UTM32)
4. Romlige verdier
 - 4.1 Akkumulerte verdier for hele tilfellet (IDW og nedbørskart)
 - 4.2 Akkumulerte verdier for ett minutt (1725 - 1726, IDW og nedbørskart)
5. Mike Urban filer
 - 5.1 Inngangsfiler til modellene:
 - 5.1.1 Møllenberg
 - 5.1.1.1 Fra Nedbørskart
 - 5.1.1.2 Fra IDW
 - 5.1.1.3 Fra Thiessen
 - 5.1.2 Singsaker
 - 5.1.2.1 Fra Nedbørskart
 - 5.1.2.2 Fra IDW
 - 5.1.2.3 Fra Thiessen
 - 5.1.3 Lerkendal
 - 5.1.3.1 Fra Nedbørskart
 - 5.1.3.2 Fra IDW
 - 5.1.3.3 Fra Thiessen
 - 5.1.4 Fredlybekken
 - 5.1.4.1 Fra Nedbørskart
 - 5.1.4.2 Fra IDW
 - 5.1.4.3 Fra Thiessen
 - 5.2 Resultatfiler:
 - 5.2.1 Møllenberg
 - 5.2.1.1 Fra Nedbørskart
 - 5.2.1.2 Fra IDW
 - 5.2.1.3 Fra Thiessen
 - 5.2.2 Singsaker
 - 5.2.2.1 Fra Nedbørskart
 - 5.2.2.2 Fra IDW
 - 5.2.2.3 Fra Thiessen
 - 5.2.3 Lerkendal
 - 5.2.3.1 Fra Nedbørskart
 - 5.2.3.2 Fra IDW
 - 5.2.3.3 Fra Thiessen

5.2.4 Fredlybekken

5.2.4.1 Fra Nedbørskart

5.2.4.2 Fra IDW

5.2.4.3 Fra Thiessen