



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Modellering av urbane pluviale flommer ved bruk av værradar

Urban pluvial flood modelling with precipitation input
from weather radar

Ingrid Vatne og Tora Marie Hveem Kjølseth
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne oppgaven er levert inn som det avsluttende arbeidet på sivilingeniørgraden Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgavens omfang er 30 studiepoeng og arbeidet har pågått våren 2017.

Målsetningen med oppgaven har vært å finne en metodikk for å anvende nedbørdata fra værradar i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell, og å studere værradardatas egnethet i en slik modell. Det er tatt utgangspunkt i et analyseområde i Drammen sentrum og en ekstrem nedbørhendelse sommeren 2015. Programvaren benyttet er MIKE 21 levert av DHI.

Vi ønsker å takke vår veileder Jon Arne Engan for godt samarbeid og konstruktive tilbakemeldinger underveis i prosessen. Takk til Halvor Hardang og de øvrige medarbeiderne ved DHI Oslo for hjelp til å bygge avrenningsmodellen og optimalisering av simuleringene. Takk til Christoffer A. Elo ved Meteorologisk Institutt for leverte værradardata og anvendelse av disse. Vi ønsker også å takke vår arbeidsgiver Norconsult AS for lån av datamaskiner.

Tilslutt ønsker vi å rekke en stor takk til SINTEF og KS for økonomiske midler til gjennomføringen av oppgaven.

Ås, 11. mai 2017

Ingrid Vatne

Tora Marie Hveem Kjølseth

Sammendrag

Ekstreme nedbørhendelser med påfølgende pluviale flommer forårsaker store skader på infrastruktur og bebyggelse. Skadene fører til betydelige samfunnskostnader, og problemet er økende. Avrenningsmodeller kan benyttes for å simulere flomforløpet til en nedbørhendelse, og er et mye brukt verktøy i planlegging, prosjektering, dimensjonering og drift av overvannsystemer. Som inngangsdata i avrenningsmodeller er det vanlig å bruke konstruert nedbør, der det tas utgangspunkt i målinger og statistikk fra nedbørstasjoner basert på lange tidsserier. I denne oppgaven er det undersøkt om inngangsdata fra værradar kan gi et mer realistisk bilde på hvordan pluviale flommer forløper.

Opgavens primære målsetning har vært å finne en metodikk for å benytte data fra værradar i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell. Det var ønskelig å finne en metode der rådata fra værradaren kunne anvendes direkte i avrenningsmodellen med den oppløsningen i rom og tid de var målt. Dette ble løst ved å bygge en terrengmodell i ustrukturerte trekanter. En slik modell tillater, i motsetning til en terrengmodell på rasterformat, at inngangsdata med ulik romlig oppløsning kan benyttes sammen. Programvare for bygging av terrengmodell og simulering av avrenning er MIKE 21 Flow Model FM levert av DHI.

For å kunne si noe om egnetheten til data fra værradar i en avrenningsmodell er nedbørdata fra værradar sammenlignet mot data fra nedbørstasjoner på bakkenivå. Studiet tar utgangspunkt i en nedbørhendelse i Drammen sentrum den 11. juli 2016 i tidsintervallet 12.30–15.40. Nedbørhendelsen var av konvektiv karakter, en nedbørtype som karakteriseres ved høy intensitet, kort varighet og store lokale variasjoner. Resultatene viser at værradaren underestimerer nedbøren for alle intensiteter, og at feilen er økende med økende intensitet. Feilen skyldes i all hovedsak konverteringen av målt radarreflektivitet til nedbørintensitet, samt signaldemping fra annen nedbør mellom radaren og studert nedbørhendelse. Det er benyttet to ulike metoder for å korrigere for feilen i nedbørdataene fra værradaren. Et datasett er korrigert mot syv nedbørstasjoner i Drammen sentrum, heretter kalt korrigert nedbør, og et datasett er basert på én nedbørstasjon som ligger innenfor nedbørfeltet til avrenningsmodellen, heretter kalt lokalkorrigert nedbør. Resultater fra simuleringene viser at valg av korreksjonsmetode har stor innvirkning på avrenningen. Det ble også benyttet en konstruert regnhendelse med tilsvarende intensitet som de korrigerede værradardataene i modellen. Resultatene fra denne sammenligningen viste ingen nevneverdige ulikheter.

Det er produsert gjentaksintervallkart med varighet på 10 og 40 minutter for korrigerte nedbør fra værradar. Kartene viser betydelige variasjoner i gjentaksintervall innad i analyseområdet, og belyser verdien av den romlige oppløsningen en værradar kan tilføre nedbørdata. Gjentaksintervallkartene er også sammenlignet mot interpolert gjentaksintervallkart basert på nedbørstasjonene. Sammenligningen viser at nedbørstasjonene ikke fanger opp hendelsens mest nedbørrike områder og videre underestimerer hendelsens omfang.

På bakgrunn av resultatene i oppgaven er det diskutert om værradar kan benyttes til varsling av pluviale flommer. For at dette skal bli en realitet må værradardataenes kvantitative kvalitet forbedres samtidig som modellenes simuleringstid må reduseres til en tidsramme som gjør det mulig å iverksette tiltak.

Abstract

Extreme rainfall events with subsequent pluvial floods cause great damage to infrastructure and buildings. Flood damage is a heavy cost to society, and the problem is increasing due to climate changes and urbanization. Pluvial flooding is often simulated using a runoff model, a helpful tool for designing, dimensioning and operating storm water systems. Traditionally, measurements from rain gauges are used to produce design storms for input in the runoff models. Heavy precipitation often occurs with a high spatial variation and over a short period of time. This thesis aims to see whether the input data from weather radars, with its high spatial and temporal variability, can provide a more realistic picture of how pluvial floods progress.

The thesis' primary purpose has been to find a methodology for applying weather radar data in a two-dimensional hydraulic runoff model, using the data's original spatial and temporal resolution. To achieve this, the model was set up with a digital terrain model built up of small, unstructured triangles in a flexible mesh. In contrast to the classic approach, a structured orthogonal mesh, the flexible mesh allows for an increase of the mesh resolution and allows layers with different resolutions to be used together. The modelling software used in the study was MIKE 21 Flow model FM, delivered by DHI.

To analyze radar data's suitability in runoff models, the radar data has been compared to precipitation data from seven rain gauges. The study is based on an event in the city of Drammen, July 11 2016. This was a convective rainfall, which is characterized by high intensity, short duration and high spatial variability. The results show that the weather radar underestimates the precipitation for all intensities, and that the bias increases with increased intensity. The error is due to the converting of radar reflectivity to precipitation intensity and attenuation of the radar signal from precipitation between the studied rainfall event and the radar station. To increase the quantitative quality, the radar data was adjusted towards the observed values at the gauging stations.

Two different adjusted radar datasets were used in the simulations. One dataset was corrected using measurements from all seven gauging stations, while the other was adjusted using data from only one station, located within the modeling area. The result shows that the choice of adjusting method is of great importance for the runoff, as the use of the latter method gives less runoff compared to the first method. The radar simulations were also compared to a simulation of a design storm with the same intensity as the radar dataset adjusted to the seven gauging stations. The comparison showed no significant differences.

Maps of the return periods for the most intense 10 and 40 minutes of the adjusted rainfall event were produced and compared to the return periods at the gauging stations. The maps show significant variations within the small area analyzed. The gauging stations fail to catch the most intense rainfall cells, and the maps clearly illustrates the uncertainties in using point measurements when characterizing convective rainfall events.

The weather radar data's spatial and temporal resolution is well suited for use in runoff models. For these models to become useful in forecasting of pluvial floods, the quantitative quality of the rainfall data must be improved, and the computation time of the simulations must be reduced.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag	III
Abstract.....	V
Figurliste	IX
Tabelliste.....	XI
1 Innledning.....	1
1.1 Problemstilling	2
1.2 Fremgangsmåte og struktur	3
2 Bakgrunn	4
2.1 Klimaendringer.....	4
2.2 Urbanisering	6
2.2.1 Konvensjonell overvannsdiskonering	8
2.2.2 Lokal overvannsdiskonering	9
2.3 Nedbør	10
2.3.1 Nedbørtyper.....	10
2.3.2 Nedbørdata fra bakkemålinger	11
2.3.3 Konstruert nedbør.....	12
2.3.4 Nedbørdata fra værradar.....	14
2.3.5 Bakkekorrigerig av værradardata	16
2.4 Avrenningsberegning og modellering	18
2.5 MIKE 21 Flow Model FM.....	19
2.5.1 Modellparametere	21
2.6 Tidligere arbeid	24
3 Metode.....	26
3.1 Sammenligning av nedbørdata fra værradar og nedbørstasjoner.....	26
3.1.1 Analyseområde.....	26
3.1.2 Nedbørhendelse.....	26
3.1.3 Data fra nedbørstasjoner.....	27
3.1.4 Data fra værradar.....	28
3.1.5 Korrigerig av værradardata	30
3.1.6 Gjentakintervallkart	31
3.2 Nedbørdata fra værradar i avrenningsmodell	33
3.2.1 Analyseområde.....	33

3.2.2	Nedbørhendelse og nedbørdata	34
3.2.3	Oppbygging av terrengmodell.....	36
3.2.4	Infiltrasjon	41
3.2.5	Ruhet	41
3.2.6	Eddy viskositet	41
3.2.7	Flood and dry	41
3.2.8	Simuleringstid	41
3.2.9	Modelloppsett.....	42
3.2.10	PC-spesifikasjoner.....	46
4	Resultater	47
4.1	Sammenligning av data fra værradar og nedbørstasjoner.....	47
4.2	Korreksjonsfaktor	49
4.3	Gjentaksintervallkart	53
4.3.1	Gjentaksintervall for 40 minutters varighet basert på nedbørstasjoner	53
4.3.2	Gjentaksintervall for 40 minutters varighet fra værradardata	54
4.3.3	Gjentaksintervall for 10 minutters varighet fra værradardata	55
4.4	Nedbørdata fra værradar i avrenningsmodell	56
4.4.1	Nedbøranalyse.....	56
4.4.2	Oversvømmelsesanalyse	58
4.4.3	Sammenligningsanalyse	62
5	Diskusjon.....	65
5.1	Sammenligning av nedbørdata fra værradar og nedbørstasjoner.....	65
5.2	Korreksjon av data fra værradar	66
5.3	Data fra værradar i avrenningsmodell	67
5.3.1	Modellresultater	68
5.3.2	Avrenningsmodellens usikkerhet	69
5.4	Gjentaksintervallkart	71
5.5	Bruk av værradar til varsling av pluviale flommer.....	71
5.6	Videre arbeid	73
6	Konklusjon.....	74
7	Referanser.....	75
	Vedlegg A: Konvertering av radardata fra NetCDF til dfs2	i
	Vedlegg B: Oppbygging av terrengmodell FM	v

Figurliste

Figur 2-1: Utvikling av årsnedbør for Fastlands-Norge i perioden 1900- 2014	5
Figur 2-2: Effekten av urbanisering på avrenning	7
Figur 2-3: Konvensjonell og lokal overvannsdiskonering	9
Figur 2-4: Treleddsstrategi for håndtering av nedbør	10
Figur 2-5: Konvektiv, orografisk, og stratiform nedbør	11
Figur 2-6: IVF-kurve for Blindern nedbørstasjon basert på perioden 1968-2015	13
Figur 2-7: Symmetrisk regnhyetogram for 100-års gjentakintervall.....	13
Figur 2-8: Skjematisk oversikt over feilkilder som påvirker værradarobservasjonenes kvalitet.....	15
Figur 2-9: X-båndradaren på Helsefyrt og sanntidsdata over Sørøst-Norge	16
Figur 2-10: Potensielle strømningsretninger for nedbør som faller på en rute eller et mesh	19
Figur 3-1: Nyhetsoppslag i Drammens Tidende 13.juli 2016.....	26
Figur 3-2: Oversvømmelser i Bragerstunnele 11 juli 2016	27
Figur 3-3: Nedbørstasjoner i analyseområdet i Drammen	27
Figur 3-4: X-båndradarens dekningsområde.....	28
Figur 3-5: Flytskjema av prosessering av radardata	29
Figur 3-6: IVF-kurve for Asker nedbørstasjon	32
Figur 3-7: Analyseområde for avrenningsmodellen	33
Figur 3-8: Konstruert 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon	35
Figur 3-9: Terrengmodellens utstrekning vist i MIKE Zero-verktøyet Mesh Generator	38
Figur 3-10: Terrengmodell med bygninger innsatt som polygoner vist i MIKE Zero	40
Figur 3-11: Terrengmodellens mesh vist i MIKE Zero	40
Figur 4-1: Nedbørintensiteter fra syv nedbørstasjoner og tilhørende radarrute.....	47
Figur 4-2: Spredningsplott av 10 minutter akkumulert nedbør.....	48
Figur 4-3: Nedbørintensiteter fra syv nedbørstasjoner og tilhørende radarrute (korrigert).. ..	50
Figur 4-4: Nedbørintensitet ved Danvik nedbørstasjon den 11. juli 2016	52
Figur 4-5: Totalt akkumulert nedbør ved Danvik nedbørstasjon den 11. juli 2016.....	52
Figur 4-6: Interpolert gjentakintervallkart for 40 minutters varighet.....	53
Figur 4-7: Gjentakintervallkart for 40 minutters varighet fra værradar	54
Figur 4-8: Gjentakintervallkart for 10 minutters varighet fra værradar	55
Figur 4-9: Korrigert nedbørintensitet fra værradar over analyseområdet	57
Figur 4-10: Oversvømmelseskart fra kjøring med korrigert nedbør fra værradar	59
Figur 4-11: Oversvømmelseskart fra kjøring med lokalkorrigert nedbør fra værradar	60
Figur 4-12: Oversvømmelseskart fra kjøring med 10-års regnhyetogram.....	61
Figur 4-13: Sammenligning av oversvømmelser fra kjøring med korrigert og lokalkorrigert nedbør fra værradar.	63

Figur 4-14: Sammenligning av oversvømmelser fra kjøring med korrigert nedbør fra værradar og 10-års regnhyetogram..... 64

Tabelliste

Tabell 3-1: Anvendte verktøy for produksjon av gjentaksintervallkart	32
Tabell 3-2: Oversikt over ulike nedbørdata benyttet i modellkjøringene	34
Tabell 3-3: Beregnet regnintensitet i tidsintervall på fire minutter	35
Tabell 3-4: Anvendte verktøy ved klargjøring av laserdata til bruk i terrengmodell.....	36
Tabell 3-5: Anvendte verktøy ved klargjøring av FKB-bygningsdata	37
Tabell 3-6: Kjøringsoppsett for kjøring 1 med korrigert radarnedbør	43
Tabell 3-7: Kjøringsoppsett for kjøring 2 med lokalkorrigert radarnedbør	44
Tabell 3-8: Kjøringsoppsett for kjøring 3 med 10-års regnhyetogram	45
Tabell 4-1: Tidspunkt for maksimal nedbørintensitet for nedbørstasjoner og tilhørende radarruter ...	48
Tabell 4-2: Summerte verdier fra pluviometer og tilhørende radarrute (lokalkorrigert)	49
Tabell 4-3: Summerte verdier fra pluviometer og tilhørende radarrute (korrigert)	51
Tabell 4-4: Gjentaksintervall i nedbørstasjonene med varighet på 40 minutter.....	53
Tabell 4-5: Gjentaksintervall i korrigert værradardata for 40 minutters varighet.....	54
Tabell 4-6: Gjentaksintervall i korrigerte værradardata med 10 minutters varighet.....	55

1 Innledning

Klimaendringer medfører endringer i nedbørsmønsteret i Norge. Det blir mer nedbør og mer intens nedbør. Styrregn, kraftig regn, regnflom og ekstremnedbør er ulike begrep som brukes til å beskrive fenomenet der store nedbørmengder kommer over kort tid. Denne typen hendelser er ofte forårsaket av konvektiv nedbør, der nedbøren er et resultat av hurtig oppvarming av lufta over bakken. Konvektiv nedbør er et typisk sommerfenomen og oppstår ofte svært lokalt, der nedbørmengde og intensitet på to lokasjoner med kort avstand kan avvike i stor grad.

Klimaendringer gir sammen med økt urbanisering store utfordringer med overvann. Overvann er en samlebetegnelse på nedbør, smeltevann og stormflo som renner av på tette overflater. Dersom kapasiteten på ledningssystem som skal lede overvannet til resipienter og naturlig infiltrasjon overskrides oppstår pluvial flom. Begrepet pluvial flom brukes om flom i urbane strøk, og skiller seg fra fluvial flom ved at hendelsene forårsakes av nedbør med varighet fra noen minutter opptil få timer. Fluvial flom, flom der et vassdrag går over sine bredder, skyldes ofte nedbørhendelser med varighet opptil flere døgn og faller gjerne sammen med snøsmelting. Tradisjonelt er flombegrepet i Norge knyttet til det sistnevnte fenomenet, men de senere årene har hendelser med ekstremnedbør i tettbebygde og urbane strøk økt fokuset på, og nødvendigheten for å forstå pluviale flommer. Eksempel på slike hendelser fant sted i København 2. juli 2011 og Oslo 6. august 2016.

Erstatningsutbetalinger for vannskader i forbindelse med pluvial flom har økt kraftig og er nå høyere enn beløpet som utbetales for hendelser forårsaket av fluvial flom (Finans Norge 2016). Det anslås at de totale skadekostnadene som oppstår som følge av overvann er i størrelsesorden 1,6 til 3,6 milliarder kroner per år (NOU 2015:16). Skadene rammer både innbyggere, kommuner, veieiere og forsikringsselskaper. Klimaframskrivninger tilsier at denne typen hendelser vil øke i omfang og hyppighet, og myndigheter og kommuners fokus på å tilpasse infrastruktur og fremtidig byplanlegging er økende.

Som et verktøy for å kunne predikere flomstørrelse og omfang er det utviklet databaserte modeller som simulerer overvannets bevegelser på overflaten. Slike modeller er i beste fall en tilnærming av virkeligheten, men de kan gi gode indikasjoner på hvor vannet vil akkumuleres og strømme under en flomepisode. Modellene kan dermed bidra til å redusere risiko og skadeomfang forårsaket av ekstremnedbør. Det tas ofte utgangspunkt i konstruerte regneepisoder basert på punktmålinger fra nedbørstasjoner og statistikk fra disse. De konstruerte episodene har god oppløsning i tid, men ingen romlig oppløsning, slik at det til enhver tid vil

regne like mye alle steder i modellområdet. Siden konvekktive byger er karakterisert ved store lokale variasjoner i nedbørintensitet vil et konstruert regn skille seg betydelig fra virkeligheten og utgjøre en signifikant usikkerhet i modellen.

En værradar kan registrere nedbør med et høyt detaljnivå i rom og tid. Værradaren måler reflektivitet i en høyde som avhenger av radarens avstand fra nedbøren. Reflektiviteten gjøres videre om til nedbør på bakkenivå, og det er i den forbindelse knyttet usikkerhet til den kvantitative kvaliteten på radardataene. Usikkerheten kan reduseres ved at radardataene korrigeres mot målinger fra nedbørstasjoner. Radardata benyttes i dag som inngangsdata i Meteorologisk institutts værvarslingsmodeller og til dels i hydrologiske modeller for beregning av avrenning fra nedbør og snøsmelting i vannkraftbransjen. Det er så vidt forfatterne bekjent ikke tidligere brukt nedbørdata fra værradar i todimensjonale hydrauliske avrenningsmodeller til beregning av pluviale flommer.

1.1 Problemstilling

Formålet med denne oppgaven å finne en metodikk for å benytte nedbørdata fra værradar i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell, og undersøke om dette kan gi et mer realistisk bilde på hvordan pluviale flommer forløper. For å kunne si noe om dette er det nødvendig å studere kvaliteten på nedbørdata fra værradar, og egnetheten til disse i denne type modeller. Oppsummert er problemstilling og spørsmål som ønskes besvart i denne oppgaven:

- Hvordan skiller nedbørdata fra værradar seg fra data fra nedbørstasjoner, og hvordan kan de kombineres for å gi en best mulig fremstilling av virkeligheten?
- Hvordan kan nedbørdata fra værradar benyttes i en avrenningsmodell?
- Hvordan egner værradardata seg som inngangsdata i en avrenningsmodell?
- Kan værradar benyttes til varsling av pluviale flommer?

1.2 Fremgangsmåte og struktur

Oppgaven består av syv hovedkapitler. Kapittel 2 *Bakgrunn* er resultatet av litteraturstudie på teori med relevans for oppgaven. I Kapittel 3 fremlegges metode for prosessering og anvendelse av nedbørdata i oppgaven. Kapitlet inneholder også en beskrivelse av avrenningsmodellens oppbygning og oppsett ved simulering, samt forutsetninger og antakelser som ble gjort for å komme frem til resultatene presentert i kapittel 4. I Kapittel 5 diskuteres oppgavens resultater, metode og usikkerheter og det legges frem et forslag til videre arbeid. Til slutt konkluderes oppgaven på bakgrunn av problemstilling og resultat.

2 Bakgrunn

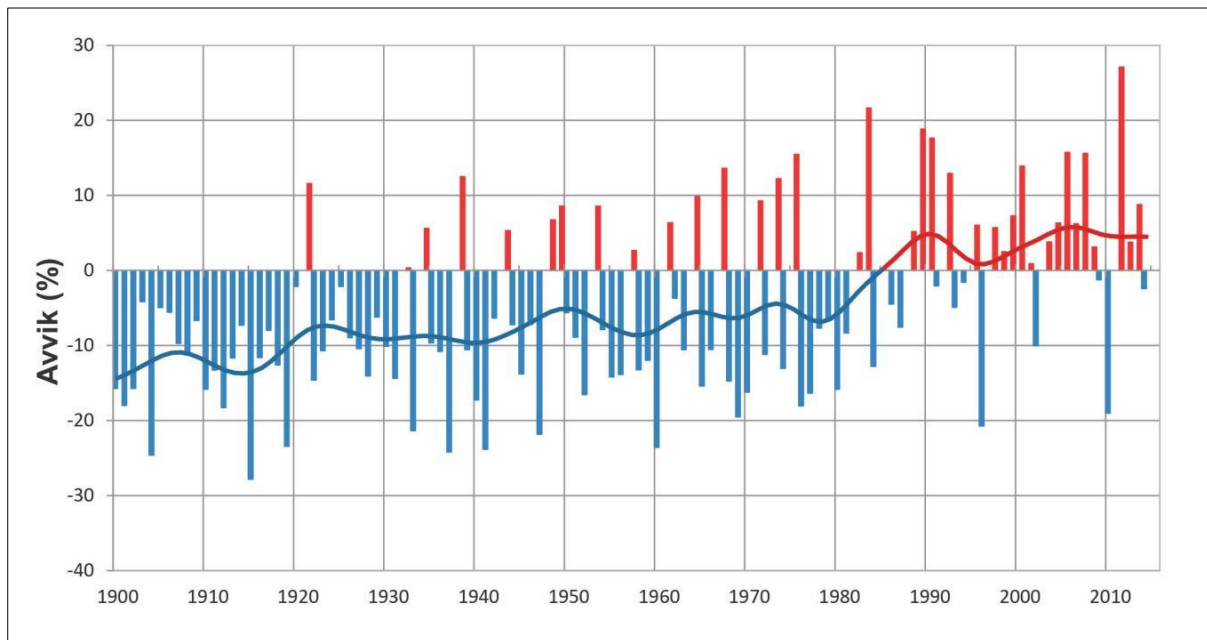
2.1 Klimaendringer

Klima er definert som vær over tid, og beskrives ofte ved bruk av maksimum-, minimum- og middelværdier (Dannevig & Harstveit 2017). Det som skiller vær og klima er tidsbegrepet; vær beskriver forholdene i atmosfæren over en kort tidsperiode mens klima beskriver hvordan forholdene endres over en lengre tidsperiode. For at observasjoner av vær og klima skal kunne sammenlignes opererer man med normalperioder for klima på 30 år. Gjeldende normalperiode er 1961-1990, men perioden 1971-2000 brukes også til sammenligning i en del nyere forskning.

I Norge er klimaet mildere enn breddegraden tilsier, noe som skyldes et samspill mellom den varme Golfstrømmen, sørlige lavtrykk og fuktig luft med nedbør. Klimaet innad i landet varierer i stor grad, avhengig av geografi og sesong. Høye fjellkjeder mellom øst og vest i sør bidrar til et værskilte der vestavinden gir mye nedbør på Vestlandet mens Østlandet har et kontinentalt og tørt klima. Nord-Norge preges også av et fuktig klima langs kysten og tørrere klima i innlandet. Generelt er det minst nedbør på senvinteren og våren og mest nedbør på høsten. I områdene rundt Oslofjorden er vintrene relativt milde og nedbørfattige, mens det er kjøligere i lavtliggende indre deler av området. Somrene er preget av relativt høye temperaturer og tidvis intense nedbørperioder. Disse områdene har landets høyeste dimensjonerende nedbørverdier for kortvarige, intense regnskyll (Norsk Klimaservicesenter 2017c). De siste hundre årene har man sett betydelige endringer i klimaet, både i Norge og globalt (NOU 2015:16). Klimaendringer anses som en av vår tids største utfordringer.

Med klimaendring menes en varig endring i klimaet og begrepet skilles fra klimavariasjon som omfatter endringer med kortere varighet (Fuglestad et al. 2017). Klimaet har alltid vært i endring, da innstrålingen fra solen, refleksjonen av solstråling til verdensrommet og utstråling fra jorden og atmosfæren varierer (Hanssen-Bauer et al. 2015). Klimaendringene de siste par hundre årene skiller seg fra tidligere ved at endringene har vært særlig kraftige og raske (Alfsen 2001). En akseptert teori forklarer endringene med den betydelige økte konsentrasjonen av klimagasser i atmosfæren. Endringene anses å være en kombinasjon av både naturlige og menneskeskapte årsaker (Butler & Davies 2010), men FNs klimapanel hevder i sin rapport (IPCC 2013) at det er svært sannsynlig at den observerte globale oppvarmingen hovedsakelig skyldes menneskelig aktivitet. Forbrenning av kull, olje og gass slipper ut klimagasser som samler seg opp i atmosfæren og fører til at netto innstråling øker og den naturlige drivhuseffekten forsterkes. Dette har videre gitt en økning i temperaturen på jordoverflaten.

Mellom 1880 og 2012 steg den globale temperaturen med 0,85°C (IPPC 2013). Temperaturøkningen har ført til at gjennomsnittlig årlig nedbør i Norge har økt med 18% siden 1900 (NOU 2015:16). Økningen har vært størst de siste 30 årene, som vist i Figur 2-1. De fremtidige endringene er ventet å være enda større enn de observerte.



Figur 2-1: Utvikling av årsnedbør for Fastlands-Norge i perioden 1900- 2014. Søylene viser avvik (%) fra middelverdien i normalperiode 1971-2000, og kurven viser årsverdiene glattet ut for å se langtidsvariasjonene. Hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2015).

Med utgangspunkt i forskjellige antakelser om utslipp av klimagasser har FN's klimapanel, ved hjelp av avanserte modeller og kunnskap om historisk klima, beskrevet forestående global klimautvikling. Fremtidig naturlig klimavariasjon, manglende kunnskap om klimasystemets følsomhet og begrensninger i modellen gjør at beregningene er beheftet med stor usikkerhet. Modellene gir likevel en god indikasjon på hvordan klimaendringene vil utarte seg. Usikkerheten knyttet til menneskeskapt utslipp kompenseres ved at en simulerer ulike utslippsscenarioer. De globale modellene har ofte for lav romlig oppløsning til å kunne brukes direkte til å vurdere regionale og lokale konsekvenser av endringene. Det er derfor nødvendig å nedskalere resultatene fra modellen. Et høyt utslippsscenario tilsvarer at de globale klimagassutslippene fortsetter å øke som i de siste tiårene. For dette scenarioet anslås det at årsmiddeltemperaturen i Norge vil øke med mellom 3,3 og 6,4 °C frem mot 2100, avhengig av region (Hanssen-Bauer et al. 2015). Beregningene viser videre at det blir mer nedbør i hele landet. Både årsnedbør, antall dager med kraftig nedbør og nedbørmengden på dager med kraftig nedbør ventes å øke. For et høyt utslippsscenario ventes middelnedbøren å øke mellom

5-20 prosent frem mot 2100, med størst økning i sørvest og nord. Videre ventes det en dobling av dager med kraftig nedbør og en økt nedbørmengde på dager med kraftig nedbør på 19 prosent (Hanssen-Bauer et al. 2015). Det antydes også en økning i intens nedbør med varighet på noen få timer. Hanssen-Bauer et al. (2015) anslår at et tretimersnedbør med fem års gjentaksintervall vil øke med 30 prosent i snitt gitt høyt utslippsscenario, og økningen kan bli enda større for høyere gjentaksintervall. For korttidsnedbør foreligger det i dag et begrenset datagrunnlag. Måleseriene er korte og nedbørstasjonstettheten er for lav til å fange opp de mest intense konvektive bygene. Følgelig vil framskrivningene knyttet til denne type nedbør være beheftet med en større grad av usikkerhet (Førland et al. 2015).

Klimaendringer i form av høye temperaturer, mer nedbør og mer intense nedbørepisoder får direkte virkning på avrenning og flommer. Det er ventet at klimaendringene vil endre flomregimet i Norge i fremtiden. Snøsmelteflommene vil komme tidligere på året og vil avta mot slutten av århundret samtidig som pluviale flommer vil øke i størrelse og omfang og etter hvert dominere helt (Norsk Klimaservicesenter 2017b). De største skadene oppstår gjerne i bynære strøk der tette flater som asfalterte veier og parkeringsplasser dominerer og gir raskere avrenning enn naturlige flater. Hvordan urbanisering påvirker et steds hydrologi har dermed stor betydning for dannelse og utvikling av pluviale flommer.

2.2 Urbanisering

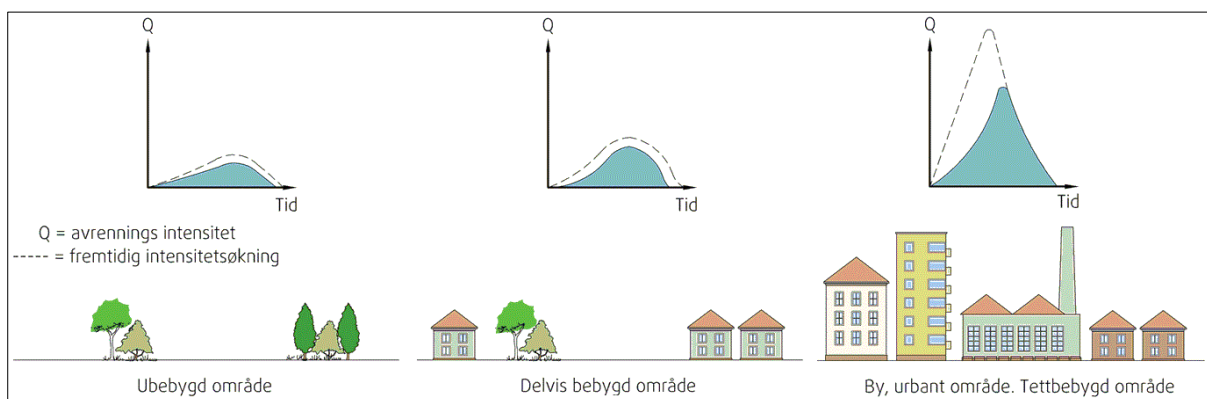
Hydrologi er vitenskapen om vannets forekomst, egenskaper, kretsløp og vekselvirkning med omgivelsene (Thorolfsson 2014). Vannets kretsløp representerer en konstant sirkulasjon mellom de ulike reservoarene på jorden og kan beskrives av vannbalanseligningen

$$P = R + E + \Delta S \quad (1)$$

der P er nedbør, R er avrenning både på overflate og i grunnen, E er evapotranspirasjon og ΔS er vann som er lagret i løpet av en tidsperiode. Den delen av det hydrologiske kretsløpet som omfatter bebygde områder defineres som urbanhydrologi (Thorolfsson 2014).

Byutvikling har en stor innvirkning på forholdet mellom de ulike prosessene i det hydrologiske kretsløpet i området. For å kunne si noe om problemene knyttet til overvann, er det viktig å forstå effekten av urbanisering. Når regn faller på uberørte områder vil noe av vannet infiltreres i bakken, noe vil returneres til atmosfæren gjennom evaporasjon og noe transpireres av planter. Bare en liten andel vil renne av på overflaten. Forholdet mellom disse vil avhenge av overflatens egenskaper og varierer med tid (Butler & Davies 2010). Utbygging av byer og

tettsteder innebærer at naturlige flater erstattes med kunstige flater. Disse flatene er i stor grad impermeable og har en stor effekt på prosessene i vannbalansen. Veier, parkeringsplasser og takbelegg øker mengden overflateavrenning i forhold til infiltrasjon slik at det totale vannvolumet som renner av på flatene øker. Likeledes vil konsentrasjonstiden, tiden en regndråpe bruker fra den faller i ytterkant av feltet til den når fram til utløpet, avta. Dette gjør at det tar kortere tid før hele feltet bidrar til avrenning. Overflatevannet vil dessuten renne hurtigere av på harde flater og i avløpsnettene enn på naturlige flater, slik at avrenningstoppen blir større og opptrer tidligere. Dette er illustrert i Figur 2-2. Når mindre vann infiltreres i bakken vil grunnvannsstanden senkes, noe som blant annet kan gi store setningsskader på bebyggelse og infrastruktur. En annen følge av urbanisering er økt forurensning av overflatevannet. Veier og andre tette flater samler opp tungmetaller og andre organiske miljøgifter i tørrværsperioder som vaskes ut sammen med overvannet ved nedbørhendelser. Store mengder av det forurensede vannet slippes ut i naturen, men mengdene kan begrenses ved bruk av rensedammer og andre åpne overvannsløsninger.



Figur 2-2: Effekten av urbanisering på avrenning. Tilpasset fra SINTEF Byggforsk (2012).

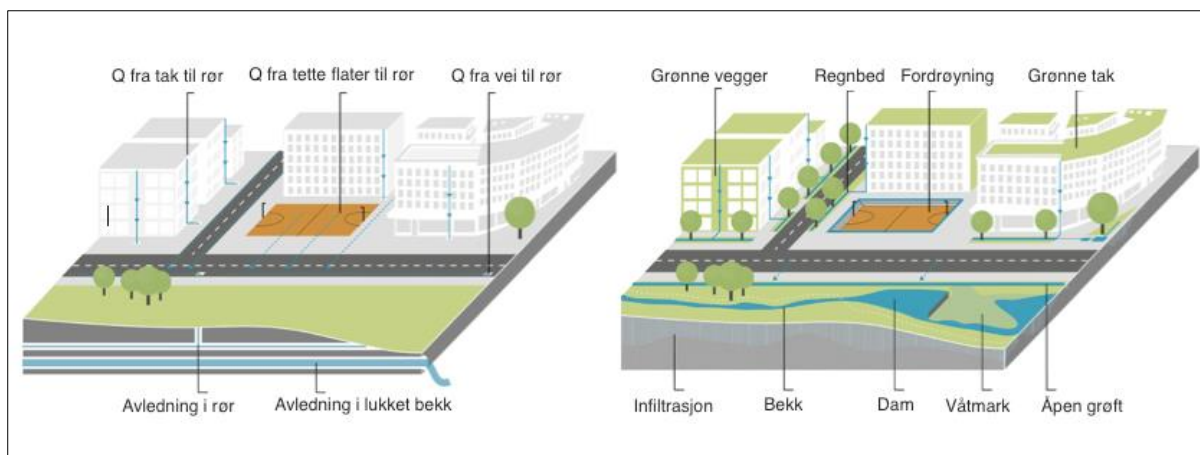
Befolkningsveksten i Norge har vært jevnt stigende de siste hundre årene. Endringer i næringsstruktur og sentralisering har ført til at stadig flere ønsker å bosette seg i tilknytning til de store byene. Befolkningsøkningen påvirker behovet for by- og tettstedsutvikling som ofte innebærer en fortetting med et stort press på de grønne arealene. I en undersøkelse utført av Vista Analyse (2015) kommer det frem at om lag 20 prosent av grønnstrukturen i norske byer og tettsteder er bygd ned i en tiårs periode fra 1999 (Vista Analyse 2015). Det er knyttet stor usikkerhet til hvordan folketallet i Norge vil utvikle seg fremover, men ifølge Statistisk Sentralbyrå vil veksten være større enn tidligere og veksten vil først og fremst komme i sentrale strøk, og spesielt i de store byene (Leknes 2016). Med økte vannmengder som renner av på

overflaten, øker også behovet for å håndtere vannet for å unngå at det akkumuleres på ugunstige steder og på den måten medfører problemer.

2.2.1 Konvensjonell overvannsdiskonering

Dagens ledningsnett for håndtering av avløps- og overvann består av et nett av rørledninger der vannet ledes til resipient ved bruk av selvføll eller pumping. Avløpsvannet ledes fra bebyggelsen via et renseanlegg før det føres ut i en resipient. Alle komponentene i systemet må oppfylle visse funksjonelle krav, men generelt sett er det gjerne selve ledningsnettet som er den begrensende faktoren for systemets totale kapasitet. Avløpssystem kan enten håndtere spillvann og overvann samlet i et fellessystem, eller atskilt i separatsystem. Tradisjonelt har de fleste avløpssystem i Norge vært fellessystem men stadig flere erstattes av separatsystem.

Fellessystem gir tidvis stor belastning på ledningsnett og renseanlegg. Ved store nedbørepisoder overskrides kapasiteten når avrenningen tilfører mer vann til ledningsnettet enn det kan bortlede. En får da oppstuing, flom og blokkeringer i systemet. For å avlaste systemet settes det ofte inn overløp på strategiske punkter som trer i kraft når vannføringen overskrider ledningens maksimale kapasitetsnivå. Dette fører til at store mengder urensset avløpsvann renner ut i naturen. Det urensede vannet kan også strømme opp fra kummer når trykket blir for stort, og renne av sammen med regnvannet på overflatene. Separatsystem er derfor å foretrekke da overvannssystemet leder regnvannet direkte til resipient slik at belastningen på renseanlegget er mer stabil og spillvannet blir rensset tilstrekkelig. Ledningene er dimensjonert ut fra kunnskap om nedbørforhold og befolkningsvekst på etableringstidspunktet og tar er derfor ikke høyde for økte vannmengder som følge av klimaendringer og fortettinger (NOU 2015:16). En oppdimensjonering av de konvensjonelle avløpssystemene vil alene være lite hensiktsmessig og er et altfor kostbart alternativ for å møte de fremtidige problemene med pluviale flommer i urbane områder. For å møte de nåværende og kommende utfordringene, har det de senere årene vært et økt fokus på at overvannet bør følge det naturlige avrenningssystemet framfor å bli transportert i ledninger. Dette kalles lokal overvannsdiskonering (LOD).



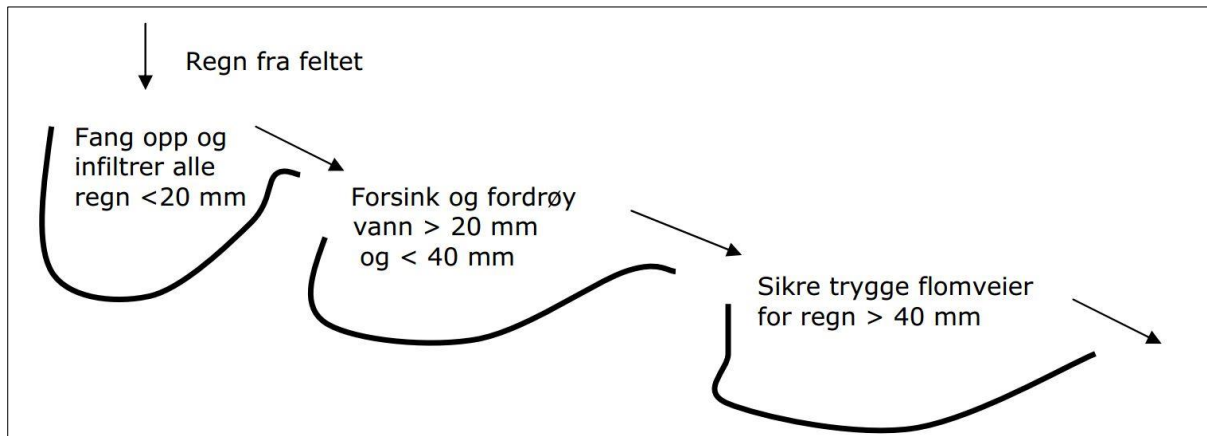
Figur 2-3: Konvensjonell og lokal overvannsdiskonering. Tilpasset fra NOU 2015:16.

2.2.2 Lokal overvannsdiskonering

Lokal overvannsdiskonering (LOD) innebærer at man utnytter lokalt naturgrunnlag i størst mulig grad som et alternativ til sentral oppsamling i avløpsnett. Overvannet infiltreres i grunnen, holdes tilbake i en fordrøyningsløsning eller en kombinasjon av disse. Ved infiltrasjon trenger vannet ned i underliggende grunn og infiltrasjonskapasiteten er avhengig av markoverflatens gjennomtrengelighet. Fordrøyning innebærer at vannet bremses på vei til utslipps- eller påslippspunkt. Dette kan gjøres ved at vannet mellomlagres før det infiltreres i bakken eller tilføres resipient eller avløpsnett. Når de store vannmengdene forsinkes vil det eksisterende avløpsnettet avlastes slik at flomtappen forsinkes og reduseres. LOD bidrar også til at den naturlige vannbalansen i området opprettholdes, selvrensingsevnen utnyttes, samtidig som tiltakene tilfører kvaliteter til omgivelsene i form av økt trivsel i byrommet. Håndteringen av overvannet må tilpasses lokale forhold og behov, og må dimensjoneres til å fungere både ved flom og tørrværsavrenning (Lindholm 2014a).

Hovedmålene som legges til grunn for overvannshåndtering innebærer skadeforebygging, utnyttelse av vannet som en ressurs og å styrke det biologiske mangfoldet (Lindholm et al. 2008). For å oppnå dette anbefales det å følge en «treleddsstrategi» som gir veiledning i hvordan nedbørmengder av ulik størrelse skal håndteres. I det første leddet er nedbørmengdene så små at vannet kan fanges opp og infiltreres. Dette kan være ved hjelp av grønne tak, regnbed, porøse veidekker og andre tiltak lokalt. Ved større regnvolum vil det overskytende overvannet renne videre til åpne eller lukkede fordrøyningsanlegg der avrenningen forsinkes. Ved ekstremnedbør er nedbørmengdene så store at de normale systemene ikke kan håndtere avrenningen alene. I slike tilfeller anlegges sikre og trygge flomveier slik at vannet kan ledes kontrollert ut av området. Strategien er illustrert i Figur 2-4. For å minimere den hydrauliske

belastningen på overvannssystemet må det settes inn tiltak i alle de tre leddene. I øvre deler av systemet bør infiltrasjons- og fordrøynings tiltak kombineres, mens det kan være behov for fordrøyningsanlegg lenger ned i systemet. Istedenfor å vurdere tiltakene separat må hele avrenningssystemet vurderes samlet (Lindholm et al. 2008).



Figur 2-4: Treleddsstrategi for håndtering av nedbør. Nedbørmengder må tilpasses lokalt. Tilpasset fra Lindholm et al. (2008).

2.3 Nedbør

Årlig faller det i gjennomsnitt 1450 millimeter nedbør i Norge. Variasjonene innad i landet er store, fra over 4000 millimeter i kystnære strøk på Vestlandet til under 400 millimeter i indre strøk på Østlandet (Thorolfsson 2014). Den mest intensive nedbøren med varighet på under tre timer, forekommer typisk i juli og august på Østlandet (DSB 2016).

De skilles hovedsakelig mellom tre ulike nedbørstyper; konvektiv, orografisk og stratiform frontnedbør. De tre ulike typene gir opphav til ulik intensitet, varighet og romlig fordeling, og hvilken type nedbør som oppstår i et område har stor betydning for avrenningen.

2.3.1 Nedbørstyper

Orografisk nedbør er typisk for kystnære strøk med fjellformasjoner, og kjennetegnes ved lang varighet og lav intensitet over et stort areal. Orografisk nedbør oppstår når luftmasser tvinges oppover grunnet endringer i terrenget. Dersom løftehøyden av luftmassene er stor nok, vil lufta oppnå metning. Ved videre heving og avkjøling dannes skyer og en vil få nedbør. Stratiform nedbør, også kjent som storskala nedbør og frontnedbør, skyldes kollisjon mellom varm og kald luft. Nedbørstypen dannes i en varm- eller kaldfront, eller ved okklusjon. I en frontsoner vil den varme luften presses over den kalde, og luften avkjøles. Ved tilstrekkelig avkjøling vil luften oppnå metning, og videre dannes det vandrdåper eller iskrystaller som kan vokse til nedbør. En varmfront oppstår når varm luft fortrenger kald luft, og en kaldfront oppstår når

kald luft fortrenger varm luft. Ved okklusjon tar en kaldfront igjen en varmfront og skyver varmluft opp i høyere luftlag. Stratiform nedbør kjennetegnes, i likhet med orografisk nedbør, ved lang varighet og lav intensitet over et stort areal. Stratiform og orografisk nedbør opptrer ofte samtidig. Konvektiv nedbør, også kjent som bygenedbør, betegnes som intens nedbør med kort varighet over et lite areal. Nedbøren er et resultat av oppvarming av luften nær bakken. Ved oppvarming vil luften stige opp, og videre avkjøles. Dersom luften inneholder tilstrekkelig mengder vanndamp og temperaturfallet er stort nok, vil en få sky- og dråpedannelse. Konvektiv nedbør er et typisk sommerfenomen, og det er området rundt Oslofjorden, samt deler av Sørlandskysten som har den mest intense bygenedbøren i Norge (Hanssen-Bauer et al. 2015). Nedbør kan måles som punktmålinger på bakkenivå eller som volumsegmenter fra værradar eller satellitt.



Figur 2-5: Konvektiv, orografisk, og stratiform nedbør. Figuren viser hvordan de tre hovedtypene av nedbør oppstår. Tilpasset fra Nirman (2014).

2.3.2 Nedbørdata fra bakkemålinger

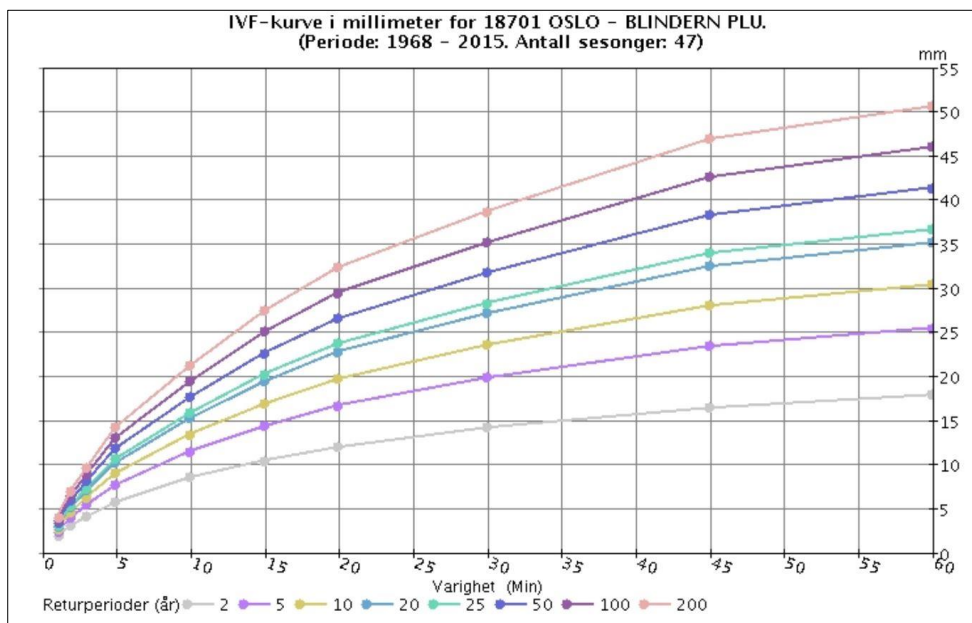
Nedbør kan måles i punkter på bakkenivå fra manuelle eller automatiske målestasjoner. Korttidsnedbør med varighet under 24 timer registreres på automatiske målestasjoner ved bruk av nedbørmålere kalt pluviometer. Det skilles mellom vippepluviometer og vektpluviometer. Vippepluviometer er basert på fylling av små vippeskåler der tidspunktet for hvert vipp registreres. Vippeskålene rommer 0,2 eller 0,1 millimeter og intensiteten på nedbøren kan beregnes ned til ett minutt. Vektpluviometer består av en bønne hvor akkumulert nedbør veies fortløpende, med 10 minutters målinger (Førland et al. 2015). Målerne plasseres vanligvis i en høyde på to meter over bakken og plasseringen kan ha mye å si for måleusikkerheten, avhengig av bygninger og vekster i området rundt måleren. Måleusikkerheten til vippepluviometer er generelt lav, særlig ved høye nedbørintensiteter, og usikkerheten kan hovedsakelig knyttes til oppfangingsvikt på grunn av turbulens rundt måleren. I tillegg vil det være en viss usikkerhet knyttet til selve tidsangivelsen på dataene (Abdella & Engeland 2013).

For å få et inntrykk av den romlige fordelingen av nedbøren med utgangspunkt i punktmålinger er det utviklet ulike interpoleringsmetoder som Thiessenpolygon, invers avstandsvektning, kriging (Dingman 2002) og optimal interpolering (Lussana et al. 2016). En studerer da frekvensen av samtidig høy nedbørintensitet på nabostasjoner og tilegner områdene mellom en verdi. For at interpoleringen skal gi et representativt bilde av den romlige fordelingen kreves et tett nettverk av nedbørmålere. Ekstreme nedbørhendelser av konvektiv karakter oppstår ofte svært lokalt, og sannsynligheten for at nettverket av punktmålinger ikke fanger opp den mest intense nedbøren er stor. Interpolering vil dermed ikke gi et representativt bilde av en nedbørhendelse. Både punktmålinger fra nedbørstasjoner og verdier fra interpolerte punktmålinger benyttes til å lage konstruerte nedbørhendelser.

2.3.3 Konstruert nedbør

En konstruert nedbørhendelse har som formål å etterligne en reel nedbørhendelse, og benyttes som inngangsdata i avrenningsberegninger- og modeller. Ved konstruksjon av slike hendelser benyttes nedbørstatistikk som er representativ for området. Ofte tar en utgangspunkt i en intensitets-, varighets-, og frekvenskurve (IVF-kurve) fra nærmeste nedbørstasjon. Verdiene i en IVF-kurve er nedbørverdier som er utviklet for å kunne si noe om intensiteten, varigheten og frekvensen på nedbøren. Intensiteten er et mål på nedbørmengden som har falt per tidsenhet, varigheten definerer hvor lenge det faller nedbør med en bestemt intensitet, og frekvensen definerer hvor ofte nedbørhendelser ved en gitt intensitet og varighet forekommer. Frekvensen for en IVF-verdi kalles også returperioden eller gjentaksintervallet for hendelsen. En hendelse med gjentaksintervall på 100 år, også kalt 100-årsregn, kan ventes å opptre én gang hvert 100. år. Figur 2-6 viser IVF-kurven for Blindern nedbørstasjon i Oslo, basert på perioden 1968 – 2015 for opptil 60 minutters varighet. For å opprette en IVF-kurve kreves det at nedbørstasjon har minst ti år med kvalitetskontrollerte data. IVF-verdier beregnes for nedbør med varighet ned til ett minutt (Norsk Klimaservicesenter 2017a).

Den enkleste metoden å konstruere en nedbørhendelse er ved bruk av et kasseregnet. Et kasseregnet har konstant intensitet som bestemmes fra en gitt varighet på IVF-kurven. Ved bruk av kasseregnet mister en for- og etterregnet, og metoden fører til en undervurdering av det totale nedbørvolumet. For å ta hensyn til at en nedbørhendelse har varierende intensitet, og for å inkludere for- og etterregnet benyttes et regnhyetogram. Det antas at hyetogrammet er symmetrisk om sin midtakse og en tar utgangspunkt i at de mest intensive minuttene i hyetogrammet skal tilsvare regnvolumet i et kasseregnet av samme varighet (Bøyum et al. 1997).

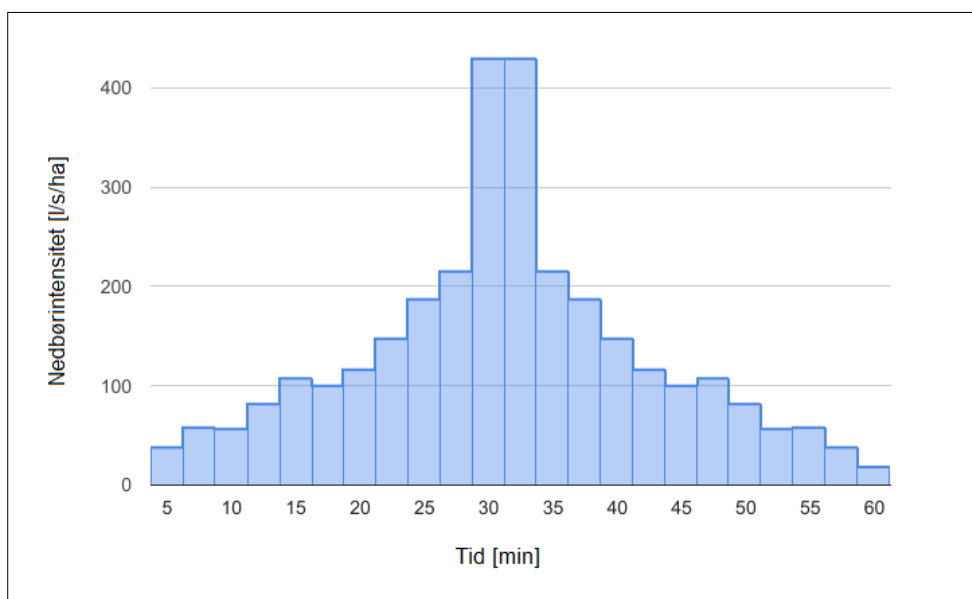


Figur 2-6: IVF-kurve for Blindern nedbørstasjon basert på perioden 1968-2015. Hentet fra [eklima.no/Meteorologisk institutt](http://eklima.no/Meteorologisk_institutt).

Regnintensiteten i tidsintervallet $I_x - I_y$ er gitt som

$$I_x - I_y = \frac{I_x x - I_y y}{t_s} \quad (2)$$

der I_x og I_y er intensiteten for varighet x og y og t_s er valgt beregningssteg i hyetogrammet. Generelt er x større enn y og differansen mellom disse er det dobbelte av t_s . De resulterende tidsintervallene speiles om aksene på hyetogrammet som vist i Figur 2-7.



Figur 2-7: Symmetrisk regnhyetogram for 100-års gjentakintervall. Regnhyetogrammet er laget med utgangspunkt i IVF-kurven presentert i Figur 2-6.

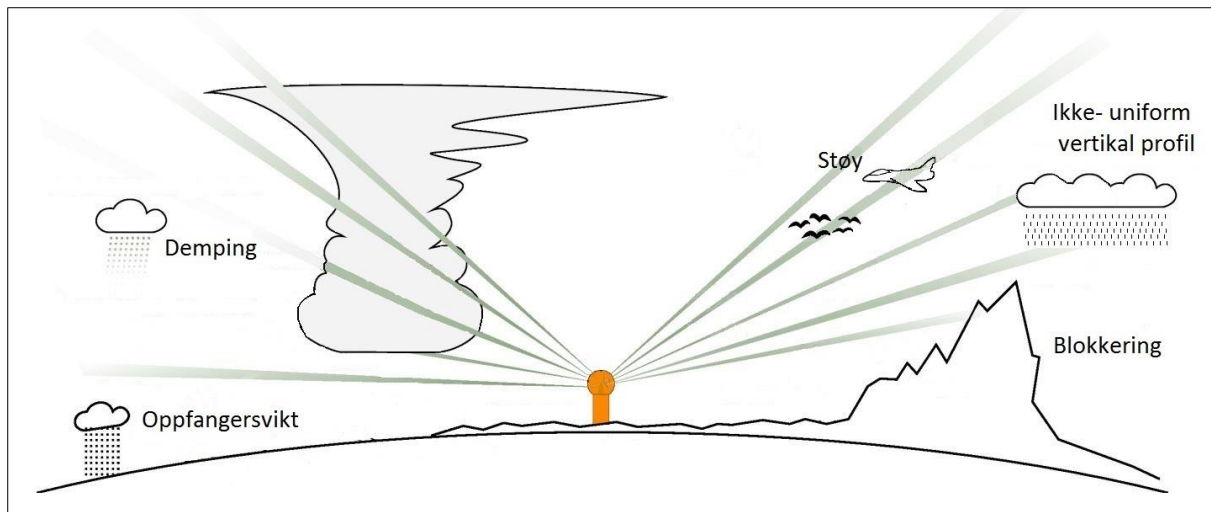
Regnhyetogrammet tar hensyn til variasjonen i intensitet over tid, men tar ikke høyde for variasjonene i rommet. Siden IVF-kurven strengt tatt bare gjelder for arealet til pluviometerets oppsamlingsskål, vil bruken av konstruerte regn medføre en større eller mindre feil ved bruk over større områder (Lindholm 1983). Dette er likevel den mest brukte metoden for nedbørdata ved beregning av overvannsmengder.

2.3.4 Nedbørdata fra værradar

En værradar er et måleinstrument som bruker radiobølger til å måle avstand og retning til nedbør. Ved at værradaren skanner omliggende atmosfære måles radarreflektivitet, som videre konverteres til nedbørintensitet. Radarreflektiviteten måles som et volumsegment, og er målt i en høyde som avhenger av avstanden fra radar til målt volum, radarens høyde over havnivå og radarens elevasjonsvinkel. Høyden på målt volumsegment er gitt ved

$$H = \sqrt{r^2 + R_E^2 + 2\sin(t_h R_E r)} - R_E + h_0 \quad (3)$$

der r er avstanden fra radar til målt segment, R_E er jordradiusen, t_h er strålingsvinkelen, og h_0 er høyden på radarens plassering over havnivå (Rinehart 1997). Høyden på målt volumsegment kan ha stor betydning, da reflektiviteten varierer og er ikke-uniform i det vertikale sjiktet. Reflektiviteten avhenger av nedbørens fase som kan være hagl, snø, sludd eller regn. Ved ekstrapolering av reflektiviteten til bakkenivå benyttes VPR-korrigerings. VPR står for «vertikal profile of reflectivity», og definerer reflektivitetens profil fra målt høyde til bakkenivå. Varierende reflektivitet i det vertikale sjiktet gjelder spesielt for stratiforme systemer når avstanden fra radaren er stor. Dette fører til usikkerhet i estimert radarreflektivitet på bakkenivå. For konvektive byger er feilen mindre, da nedbørskyene forplanter seg høyt oppover i atmosfæren, og variasjonene i reflektivitet er lavere (Abdella & Engeland 2013). Ved stor avstand fra radar til nedbørssystem av interesse vil en også ha demping som en usikkerhetsfaktor. Signalene fra radaren dempes av nedbør som ligger mellom radaren og nedbørssystemet. Dette fører til en underestimert radarreflektivitet. Fugler, insekter og andre bevegelige objekter representerer støy og kan gi mindre feil i den reflekterte radarstrålen. I tillegg kan nærliggende objekter som vegetasjon, bygninger og terreng blokkere radarstrålen og gi systematiske feil. Feilkildene som påvirker kvaliteten på værradarobservasjoner er illustrert i Figur 2-8.



Figur 2-8: Skjematisk oversikt over feilkilder som påvirker værradarobservasjonenes kvalitet. Tilpasset fra Holleman (2006).

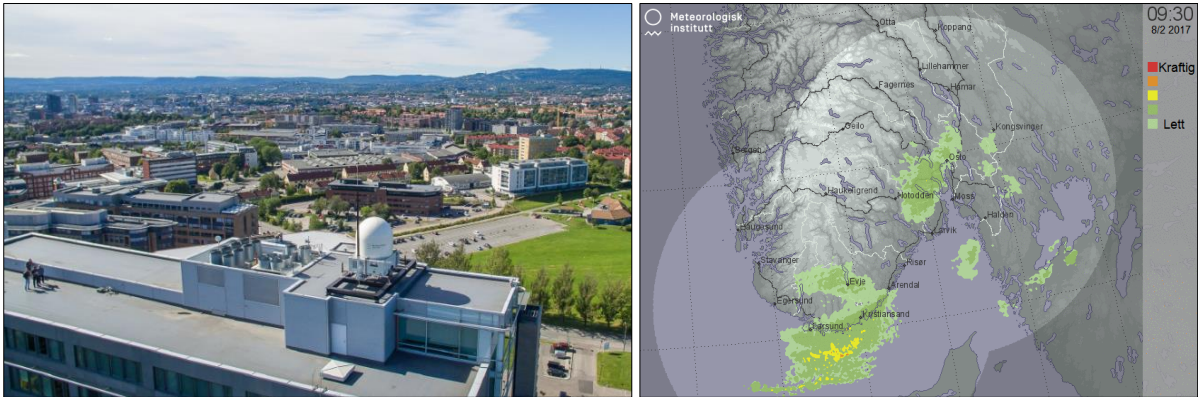
Akkumulert nedbør kan estimeres ved bruk av Marshall-Palmer relasjonen (Marshall & Palmer 1948), gitt ved

$$Z = aR^b \quad (4)$$

der Z er radarreflektiviteten, R er nedbørintensiteten, og a og b er variabler som avhenger av nedbørtype (Rinehart 1997). Verdier for a og b publisert med Z-R relasjonen i Marshall og Palmer (1948) var $a = 220$ og $b = 1,6$. Det finnes nå en rekke ulike verdier for parameterne. Battan (1973) listet opp over 60 ulike verdier, og det er i senere tid publisert lagt flere. Verdiene treffer godt i snitt, men blir mer usikre for høye nedbørintensiteter. Det er dermed knyttet stor usikkerhet til konverteringen av radarreflektivitet til nedbørintensitet i ekstreme nedbørhendelser. For radarnettverket i Norge brukes $a = 200$ og $b = 1.6$ for konvektive sommerbyger (Ødemark et al. 2012).

For værvarsling i Norge er det bygd ut ett nettverk av elleve c-båndradarer. En c-båndradar har en rekkevidde på 240 km og mottar signal hvert 7,5 minutt i en oppløsning på 1x1 kilometer. I tillegg til de elleve c-båndradarene, har også meteorologisk institutt en mobil x-båndradar. En x-båndradar har en rekkevidde på 50 km og mottar signal hvert minutt, i en oppløsning på 250x250 meter. Ved sammenligning av de to radarene har x-båndradaren 16 ganger så høy oppløsning på rutenettet og 7,5 ganger så høy oppløsning i tid sammenlignet med c-båndradarene. En x-båndradar egner seg dermed bedre til å måle ekstreme nedbørhendelser, da de lokale forskjellene er store og nedbøren endrer seg mye over kort tid. Figur 2-9 viser bilde av den mobile x-båndradaren på taket av Helsefyr Panorama sommeren 2015, samt en

illustrasjon av sanntidsdata den 8. februar 2017 fra c-båndradarene på Hurum i Buskerud og Lista i Vestfold (Meteorologisk institutt 2017b).



Figur 2-9: X-båndradaren på Helsefyrt og sanntidsdata over Sørøst-Norge. Figuren til venstre viser bilde av x-båndradaren plassert på taket til Helsefyrt Panorama. Figuren til høyre viser radarbilder fra c-båndradarene plassert på Hurum i Buskerud og Lista i Vestfold. Figurene er hentet fra Lauvås et al. (2016) og Meteorologisk institutt (2017b).

2.3.5 Bakkekorrigerering av værradardata

Parameterne a og b i Z-R-relasjonen beskrevet i ligning 4 er som nevnt avhengig av nedbørstype, og baserer seg på empiriske målinger med lange tidsserier. Relasjonen treffer godt i snitt, men verdiene for a og b er usikre for større nedbørhendelser av konvektiv karakter. Dette kan føre til at værradaren underestimerer nedbøren og verdiene kan avvike mye fra observerte verdier på nedbørstasjoner. Det finnes flere måter å forbedre nøyaktigheten til radardataene. Bakkekorrigerering fremstår i litteraturen som den mest brukte metoden (Germann et al. 2009; Gjertsen et al. 2004; Lepioufle 2015; Smith & Krajewski 1991; Steiner et al. 1999). Ved å korrigere radardata mot bakkemålinger kombinerer en de individuelle styrkene ved de to målemetodene. Radardata inneholder informasjon om den romlige fordelingen av nedbøren mens nedbørstasjonene gir punktmålinger med relativ stor kvantitativ nøyaktighet. Ved å anta at bakkemålinger er den sanne verdi, kan sammenhengen mellom nedbør fra nedbørstasjonen R_{TRUE} og nedbør fra værradaren R skrives som

$$R_{TRUE} = R + \varepsilon \quad (5)$$

der ε er feilen til nedbørdata i radaren. I følge Germann et. al (2009) er feilen hovedsakelig multiplikativ, slik at ligning 5 kan uttrykkes logaritmisk

$$\varepsilon_{dB} = 10 \log\left(\frac{R_{TRUE}}{R}\right) \quad (6)$$

ε_{dB} kan antas å være normalfordelt når den er uttrykt i desibel (dB) og korrelerer i tid og rom (Germann et al. 2009). Dette kan uttrykkes som

$$\varepsilon_{dB} = N(\mu, \sigma, L, T) \quad (7)$$

der N beskriver Gaussfeltet representert av gjennomsnittet μ , standardavviket σ , romlig oppløsning L og tidsoppløsningen T . Antagelsen om at bakkemålingene tilsvarer den faktiske nedbøren i punktet krever at målingene fra nedbørstasjonene er kvalitetkontrollerte og målt med en høy grad av nøyaktighet. Videre må en anta at nedbørdata fra nedbørstasjonene og værradaren er gyldig for de samme stedene i tid og rom. Antakelsen er grov da værradaren måler volumsegmenter høyt over jordens overflate i motsetning til nedbørstasjonene som måler nedbøren på bakkenivå. Usikkerheten er lavere når avstanden mellom nedbørstasjonene og værradaren er liten, og høyere for større avstander. En forutsetter også at forholdet mellom nedbørstasjonene og værradaren er gjeldende også for andre punkter i rom og/eller tid (Koistinen & Puhakka 1981). Ved å anta at feilen i radardataene ikke varierer i rommet, kan en løsning av ligning 7 være midlere feil (MF) gitt som

$$MF = \frac{\sum G_i}{\sum R_i} \quad (8)$$

der G_i og R_i er akkumulert nedbør fra henholdsvis nedbørmåler og radarobservasjoner for nedbørmåler i i et gitt tidsintervall. Tidsintervallet bør velges slik at tilfeldige feil ikke får for stor betydning samtidig som det bør ta høyde for de store endringene i nedbøren som oppstår over kort tid. MF-korrigerer gir den samme korreksjonsfaktoren over hele området og beholder den romlige nedbørdistribusjonen slik den måles av radaren (Abdella & Engeland 2013; Gjertsen et al. 2004; Smith & Krajewski 1991; Steiner et al. 1999). Det er også utviklet ulike metoder som tar høyde for korreksjonsfaktorens variasjon over feltet. I litteraturen brukes interpoleringsmetoder som kriging (Haberlandt 2007; Krajewski 1987; Sinclair & Pegram 2005), invers avstandsvektning (Haberlandt 2007) og optimal interpolering (Lussana et al. 2016; Mahfouf et al. 2007) for å bedre den romlige oppløsningen til sluttproduktet.

Ved å la korreksjonsfaktoren variere i rommet kan en få bedre prediksjoner på korrigerede værradardata. Samtidig er metoden mindre robust og det kreves et stort antall målepunkter for å kunne si noe om den romlige korrelasjonen til korreksjonsfaktorene.

2.4 Avrenningsberegning og modellering

For beregning av overvann benyttes både manuelle metoder og mer avanserte databaserte modeller. Den mest anvendte manuelle metoden for å beregne avrenning fra et nedbørfelt er den rasjonelle formelen, gitt ved

$$Q = \phi IA \quad (9)$$

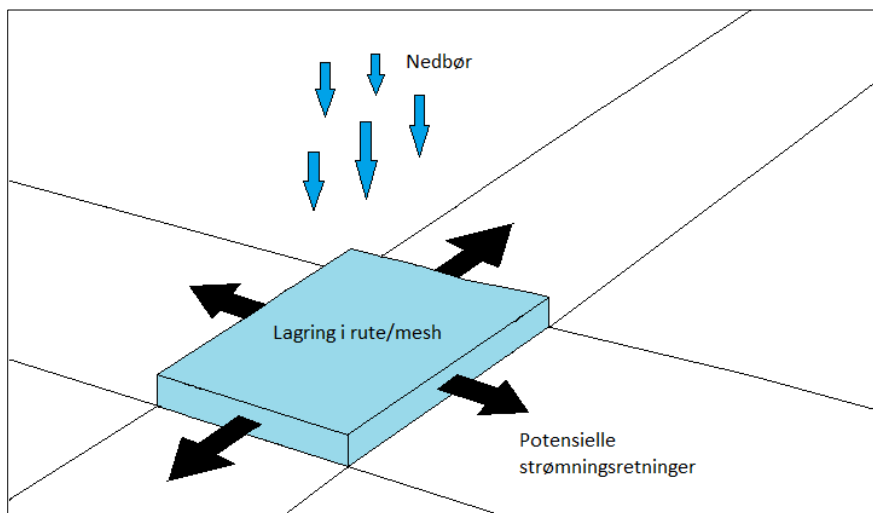
der ϕ er avrenningskoeffisienten, I er nedbørintensitet per arealenhet og A er nedbørfeltets areal. Avrenningskoeffisienten ϕ representerer forholdet mellom avrenningen og nedbøren i et område. Koeffisienten avhenger av overflatens permeabilitet, ruhet og fallforhold, samt nedbørens intensitet og varighet. Nedbørintensiteten ved en gitt varighet hentes fra en IVF-kurve. Den rasjonelle formelen er begrenset til en konstant regnintensitet (kasseregn), samt en konstant gjennomsnittlig avrenningskoeffisient for hele området. Dette gir gode overslagsverdier, men er en sterk forenkling av virkeligheten. For beregning av overvannsmengder fra flere delfelt benyttes summasjonskurvemetoden. Metoden tar hensyn til forsinkelsene som finner sted fra hvert delfelt samt delfeltenes innvirkning på den samlede avrenningen. De manuelle metodene er begrenset til bruk på nedbørfelt opptil 50 hektar (Lindholm 2014a). For overvannsberegninger i større og mer komplekse områder benyttes databasert matematisk modellering.

En matematisk modell er en matematisk formulering av fysiske prosesser. Ideen med en matematisk modell er å la likninger uttrykke fysiske hendelser i den virkelige verden. Slike modeller beregner, analyserer, simulerer og predikerer hendelsesforløp mange ganger raskere enn ved bruk av manuelle metoder og er derfor effektive verktøy i planlegging, prosjektering, dimensjonering og drift av overvannssystemer. Varsler og prognoser basert på slike modeller vil alltid ha en iboende usikkerhet, og er i beste fall en tilnærming av virkeligheten. Både diskretisering og observerte inngangsdata gir opphav til usikkerhet i modellen. I tillegg kan innhenting av data og brukerens forståelse av de fysiske prosessene være en kilde til usikkerhet. Usikkerheten gjøres mindre ved verifisering, kalibrering og validering. Ved modellverifisering kontrolleres det at modellen løser de matematiske ligningene riktig, ved kalibrering kontrolleres modellens følsomhet ved endring i inngangsparametere og ved validering etterprøves modellens resultat mot observerte målinger (Adam 2003).

For modellering av overvannsavrenning benyttes enten enkle GIS-analyser eller todimensjonale hydrauliske modeller. En GIS-analyse identifiserer lavbrekk i terrenget og kan samtidig beregne lavbrekkes tilsigsområde og flomveier. Nedbøren som faller i en rute vil

alltid strømme til den av de åtte omliggende rutene som har lavest verdi. Analysen gjør ingen hydrauliske beregninger og innehar derfor ingen informasjon om mengde nedbør som skal til for å fylle forsenkningene (Mårtensson & Gustafsson 2014).

Todimensjonale modeller gjør hydrauliske beregninger i hver rute og gir dermed mer nøyaktige modeller. De kan i tillegg gi informasjon om oversvømmelsens tidsforløp, hastighet og volumstrøm. Nedbøren som faller i en rute har fire potensielle veier videre, avhengig av helningen på terreng og vannivået i de omkringliggende rutene. Vannet kan i tillegg lagres i den gjeldende ruten som illustrert i Figur 2-10 (Engineers Australia 2012). Det finnes også hydrauliske endimensjonale modeller som beregner vannets oppstuvning i ledningsnett. Ved å kombinere en todimensjonal avrenningsmodell med en ledningsnettsmodell får man en modell som beskriver dynamikken mellom avløpssystemet og overflateavrenningen ved en nedbørepisode.



Figur 2-10: Potensielle strømningsretninger for nedbør som faller på en rute eller et mesh i todimensjonale hydrauliske modeller. Tilpasset fra Engineers Australia (2012).

2.5 MIKE 21 Flow Model FM

MIKE 21 Flow Model er en programvare utviklet av det Danske Hydrauliske Institutt (DHI). Programvaren er et hydraulisk modelleringssystem for todimensjonal strømning med fritt vannspeil og brukes hovedsakelig til kyst- og havmodellering. Programvaren kan benyttes i alle vannmiljøer der lagdeling kan neglisjeres og er derfor anvendelig til modellering av pluvial flom (DHI 2016b).

Modellen finnes i to versjoner som presenterer den topografiske informasjonen ulikt, raster og flexible mesh (FM). Et raster er en terrengmodell som består av et rutenett av rektangler med

en gitt størrelse og et FM er bygd opp av små ikke-ortogonale trekkanter av ulike størrelse. Videre beskrivelse av MIKE 21 Flow Model er basert på FM.

MIKE 21 Flow Model FM består av en hydrodynamisk modul som simulerer variasjoner i vannstand og strømminger. Modulen tar utgangspunkt i Navier-Stokesligningene som beskriver strømmingen til et fluid i tre dimensjoner under påvirkning av gravitasjon og uttrykkes ved bevaring av masse og bevegelsesmengde. Integrasjon av massebevaring- og bevegelsesmengdeligningene over vanndybden gir opphav til gruntvannsligningene som den hydrodynamiske modulen baseres på. Massebevaring integrert over vanndybden er gitt som

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (10)$$

der h er total vanndybde, \bar{u} og \bar{v} er hastighetskomponenter i x- og y- retning, t er tid og S er utslipp fra punktkilder (DHI 2016a). Bevegelsesmengde integrert over vanndybden i x- og y- retning er gitt i henholdsvis ligning 11 og 12

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \quad (11)$$

$$\frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_sS$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \quad (12)$$

$$\frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS$$

der h er total vanndybde, \bar{u} og \bar{v} er hastighetskomponenter i x- og y- retning, t er tid, f er coriolisparameter, g er tyngdens akselerasjon, η er overflatehøyde, ρ er vannets tetthet, p_a er atmosfærisk trykk, τ_s og τ_b er skjærspenning for henholdsvis vind og overflate, s er strålingskomponent og S er utslipp fra punktkilder. T representerer vertikal belastning i form av friksjon og adveksjon estimert ved bruk av eddy-viskositet (DHI 2016a).

Integreringen begrenses til situasjoner der hastighetsendringen som funksjon av vanndybden er så liten i forhold til endringene i horisontal retning at den kan neglisjeres. Ligning 10, 11 og 12 er derfor begrenset til tilfeller der vannet har relativt lav dybde. Dette inkluderer blant annet tidevannshydraulikk, vind- og bølgestrømmer, stormflo og strømming i elver. Siden vann som

renner av på overflaten ved nedbørepisoder ofte har en relativt lav høyde, kan modeller basert på gruntvannsligningene også brukes til overvannsformål.

Den romlige diskretiseringen av ligningene løses sammen med initial- og grensebetingelser ved bruk av en cellecentrert endelig volum metode (FVM). En approksimativ Riemannløser benyttes for å beregne de konvektive fluksene mellom cellene slik at diskontinuerlige løsninger kan håndteres. Vanddybden og hastighetskomponentene evalueres i midten av cellene mens fluksen beregnes vinkelrett på de tre celleveggene (DHI 2016a). For tidsintegrasjonen benyttes den eksplisitte differensialmetoden «upwind» som begrenser tidssteget i simuleringen til å tilfredsstillende et spesifikt Courant-Friedrich-Lewy (CFL) tall mindre enn 1 for å unngå ustabile og unøyaktige resultater (Engineers Australia 2012). For gruntvannsligningene er CFL-tallet definert som

$$CFL = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (13)$$

der h er total vanddybde, u og v er hastighetskomponenter i x- og y- retning, Δt er tidsstegintervall og g er tyngdens akselerasjon (DHI 2016b). Lengdeskalaene Δx og Δy tilnærmes av den minste lengden på hver celle. Cellestørrelsen og vinkelen mellom cellekantene har dermed innvirkning på CFL-tallet som igjen påvirker beregningstiden. For å holde simuleringstiden nede bør derfor tidsstegintervall og celler velges slik at CFL-tallet blir så lavt som mulig.

2.5.1 Modellparametere

MIKE 21 Flow Model FM simulerer de hydrodynamiske forholdene med hensyn til ulike ytre tvingende parametere og grensebetingelser (DHI 2016b). Formålet med analysen bestemmer hvilke parametere som inngår i modellen og hvilke som kan neglisjeres. Parametere med viktighet for simulering av overflateavrenning er presentert i det følgende.

Terrengmodell og grensebetingelser

Terrengmodellen gir en beskrivelse av et områdes topografi og har følgelig stor innvirkning for hvordan flommer utvikler seg. Den topografiske informasjonen er lagret i små fleksible trekantene i et flexible mesh (FM). De ustrukturerte trekantene gjør det mulig å tilegne områder av spesiell interesse større oppløsning og dermed en mer nøyaktig terrengbeskrivelse. Dette kan være områder med høy urban faktor eller områder med komplekse høydeforhold. Områder som anses som mindre viktige for flomforløpet kan på samme måte ha redusert oppløsning. Den ustrukturerte oppløsningen gjør det også mulig å kombinere forskjellige lag med ulik

oppløsning til bruk i modeller, i motsetning til rasterlag som krever at lagene har ruter med samme størrelse. FM-modellenes kompleksitet gjør at simuleringstiden er mellom fire og åtte ganger så lang som i raster-modellene (Engineers Australia 2012). For å håndtere de lange beregningstidene har DHI gjort det mulig for FM å benytte maskinakselererende grafikk slik at bruk av maskiner med bra grafikkprosessor (GPU) vil gi en stor økning i simuleringshastigheten (DHI 2016c).

Terrengmodellen bygges opp i MIKE Zero verktøyet *Mesh Generator* og modellens utstrekning defineres av åpne og lukkede grenser. Langs de lukkede grensene er strømmingen null for alle variabler mens de åpne grensene lar vannet strømme igjennom.

Vannivået i trekantene vil stadig variere gjennom simuleringen. Nivået overvåkes og trekantene klassifiseres som tørre, delvis tørre og våte. Dette betraktes som bevegelige grenser og benevnes «Flood and dry». De bevegelige grensene gjør det mulig for beregningene å inkludere og ekskludere trekantene dynamisk under simulering. I trekantene som defineres som våte benyttes alle de tre gruntvannsligningene ved beregning. De delvis tørre trekantene beregnes kun ved bruk av massebevaringsligningene mens de tørre trekantene kobles helt ut av beregningene. Lave verdier gir større nøyaktighet, men kan også føre til ustabiliteter i modellen. Generelt gjelder

$$h_{dry} < h_{flood} < h_{wet} \quad (14)$$

der h representerer vannivået for henholdsvis tørre, delvis tørre og våte celler.

Nedbør

Nedbør er sammen med terrengmodellen den viktigste inngangsparameteren i en avrenningsmodell. Nedbør kan inkluderes i modellen som en konstant verdi i alle rutene, varierende i tid, eller varierende i tid og rom. Normalt brukes tidsvarierende historiske hendelser fra nedbørstasjoner eller konstruerte regnepisoder basert på IVF-kurver. Evaporasjon kan legges inn sammen med nedbøren som konstant, tidsvarierende eller varierende i tid og rom.

Ruhet

For å kunne gi en pålitelig beskrivelse av overflatestrømmingen, må en ta hensyn til overflatens ruhet. Ruheten beskriver hvordan strømmende vann påvirkes av underlaget det strømmer på og avhenger av underlagets friksjon. Friksjonstap som følge av ruhet beskrives av Mannings formel

$$v = MR^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

der v er vannhastighet i tverrsnittet, M er Mannings ruhetstall, R er hydraulisk radius og I er helningen på underlaget. Den hydrauliske radiusen defineres av forholdet mellom strømningsarealet og våtet perimeter. Den representerer et mål på den gjennomsnittlige avstanden fra vannet til bunnen der friksjonen oppstår. Jo lavere verdi, dess større innvirkning på ruheten. I modellen benyttes «bred kanal-tilnærming», det vil si at når bredden er mye større enn vanndybden settes den hydrauliske radiusen lik vanndybden. Ruhetstallet varierer med underlaget og er typisk høyest for harde og glatte underlag som asfalt og betong og lavere for vegetasjonsdekkede flater (Lindholm 2014b). I følge ligning 15 vil dermed asfalterte dekker gi høyest vannhastighet.

I MIKE 21 Flow model kan ruhet legges inn med samme verdi for hele feltet eller med ulike verdi for hver celle. Overflateskjærspenningen beskrives i modellen med en kvadratisk friksjonslov

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_0} = \frac{g\bar{u}_b|\bar{u}_b|}{(Mh\bar{v})^2} \quad (16)$$

der \bar{u}_b er overflatehastigheten, h er total vanndybde, M er Mannings tall, ρ_0 er vannets tetthet og g er tyngdens akselerasjon (DHI 2016a).

Infiltrasjon

Effekten av infiltrasjon kan være stor ved overflateavrenning. Infiltrasjonsraten avhenger av avrenningsflaten og jordens fysiske egenskaper som kornstørrelse, porøsitet og fuktighetsinnhold. Videre har jorddybde og lagdeling innvirkning på hvor mye vann jorden kan lagre. Ved nedbørshendelser mettes jorden med vann slik at infiltrasjonen avtar med tiden.

I MIKE 21 Flow Model kan man velge mellom å legge inn netto infiltrasjon, ingen infiltrasjon og konstant infiltrasjon med kapasitet (DHI 2016b). I den førstnevnte metoden kan infiltrasjonen være konstant eller variere i tid og/eller rom. Vanndybden i cellene beregnes for hvert tidssteg ved bruk av den endimensjonale vertikale kontinuitetsligningen

$$H(j) = H(j)_i - \frac{V_{inf}(j)}{A(j)} \quad (17)$$

der V_{inf} er det infiltrerte volumet i elementet j og $A(j)$ er arealet av elementet. Den umettede sonen er ikke definert og har derfor ingen kapasitetsbegrensninger. Infiltrasjon vil skje så lenge cellen er oversvømmet.

Ved konstant infiltrasjon med kapasitet beskrives infiltrasjonen fra den frie overflaten til umettet sone, og ved perkolasjon videre fra umettet sone til mettet sone i en forenklet modell. Modellen krever i tillegg informasjon om porøsitet og dybde på infiltrasjonslaget, infiltrasjonsrate til mettet sone, og vanninnhold i infiltrasjonslaget (DHI 2016a). Ved store nedbørhendelser kan man anta at nedbørhendelsen er av en slik størrelse at infiltrasjonen kan neglisjeres.

Eddy-viskositet

MIKE 21 integrerer skjærspenning assosiert med turbulens ved parameteren eddy-viskositet som er integrert i ligningene for bevegelsesmengde, ligning 11 og 12. Eddy-viskositet kan innlemmes i modellen som en konstant verdi, eller beregnes dynamisk ved bruk av Smagorinskys formel. I tilfeller der rutestørrelsen i modellen er større enn vanndybden brukes konstant eller ingen eddy-viskositet. Når rutestørrelsen er mindre eller lik vanndybden bør Smagorinskys formel benyttes (Engineers Australia 2012).

2.6 Tidligere arbeid

Nedbørens romlige oppløsning og metoder for å fange opp denne ble studert allerede på 70- og 80-tallet til vann- og avløpsformål. (Lindholm 1983; Niemczynowicz 1982). I studiene ble ulike interpoleringsmetoder benyttet for å ta høyde for nedbørens romlige variasjon. Værradar ble nevnt som et mulig verktøy for å fange opp nedbørens romlige oppløsning, men ble vurdert som for usikker med datidens teknologi. Radarteknologiutviklingen har siden vært stor og det foreligger mye forskning på værradardataenes kvalitet både i Norge (Abdella & Alfredsen 2010; Gjertsen et al. 2004; Lepioufle 2015) og internasjonalt (Einfalt et al. 2005; Steiner et al. 1999). Forskningen omhandler hovedsakelig ulike metoder for å korrigere radardataene mot de målte verdiene på bakkenivå samt ulike kombinasjoner av ZR-relasjonen for konvertering av radarreflektivitet til bakkenedbør.

Værradardata benyttes daglig i Meteorologisk institutts værvarslingsmodeller og det foreligger noe forskning på bruk i hydrologiske modeller i vannkraftbransjen (Abdella et al. 2012). I Danmark er det sett på muligheten for å bruke data fra en x-båndradar i ledningsnettmodellen MIKE Urban (Pedersen et al. 2009). Konklusjonen fra dette studiet er at MIKE Urban henter

nedbørinformasjon fra radarruten nærmest delnedbørfeltene senter, slik at bruk av værradar ikke tilfører modellen forbedret romlig oppløsning sammenlignet med bruk av konstruerte nedbørepisoder. For å utnytte værradarens romlige oppløsning må analyseområdet i ledningsnettmodellen deles inn i delnedbørfelt med samme oppløsning som radaren.

Ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet er det tidligere skrevet fire oppgaver om utprøving av metodikk for avrenningsmodellering i Drammen kommune. Myrvoll (2015) og Murtnes (2015) tok for seg metodikk for produksjon av aktsomhetskart i ArcGIS, Johansen og Moldekleiv (2016) sammenlignet avrenning i ArcGIS med avrenning fra de hydrauliske avrenningsmodellene MIKE 21 og MIKE Flood, og Abry (2016) videreutviklet modellene med avansert inngangsdata for infiltrasjon og ruhet.

3 Metode

3.1 Sammenligning av nedbørdata fra værradar og nedbørstasjoner

3.1.1 Analyseområde

Analyseområdet for det sammenlignende studiet av data fra værradar og nedbørstasjoner omfatter sentrumsområdene i Drammen kommune. Drammen ligger i et dalføre ved Drammenselvans utløp i fjorden og sentrumsområdet ligger om lag to meter over havet, med tett bebyggelse både langs elva og oppover åssidene på begge sider. Området er valgt på bakgrunn av det tette nettverket av nedbørstasjoner med vippepluviometre og dekningsgraden til x-båndradaren på Helsefyr. Drammen sentrum har flere ganger vært utsatt for ekstreme nedbørhendelser med påfølgende oversvømmelser de siste årene (Drammens Tidende 2007; 2009; 2012; 2016), noe som gjør området aktuelt for studiet.

3.1.2 Nedbørhendelse

Nedbørhendelsen benyttet i studiet fant sted den 11. juli 2016 mellom klokken 12.30 og 15.40. Hendelsen er valgt etter en sammenligning av ekstreme nedbørhendelser som har truffet analyseområdet etter at x-båndradaren ble satt opp på Helsefyr sommeren 2015. Nedbørhendelsen har konvektiv karakter og bygeretning sydøst i retning Oslofjorden, som er typisk for denne type hendelser (Lindholm & Aune 1984). I forkant av hendelsen kom det en mindre nedbørhendelse, men denne er utelatt fra studiet da oppholdstiden mellom de to hendelsene var flere timer.

Hendelsen 11. juli førte til oversvømmelser i Drammen sentrum. Både Bragernestunnelen på nordsiden av Drammenselven og Strømsåstunnelen på sørsiden ble stengt. Figur 3-1 og Figur 3-2 viser utklipp og bilder fra Drammens Tidende etter hendelsen.

DRAMMENS TIDENDE	Onsdag 13. juli 2016	NYHETER	5
<h2>Regn for en hel måned – i løpet av en ettermiddag</h2>			
Drammen fikk nesten like mye regn mandag ettermiddag som det vanligvis kommer i hele juli.	nedbør på bare noen få timer. Normalt pleier Drammen å få rett i overkant av 50 millimeter regn i løpet av hele juli. Elvebyen ble med det våtest i landet mandag, etterfulgt av Nelaug i Agder (32,2 mm) og Rena i Hedmark (27,7 mm). Det er imidlertid langt ifra noen ny rekord. 20. juli i 1982 kom det 155,6 millimeter regn på Lurøy i Nordland.	Nedbøren mandag skapte delvis kaotiske tilstander i Drammen. To biler ble tatt av vannet i Bragernestunnelen, hvor veibanen ble oversvømt mellom «Egget» og Hamborgstrøm. Tunnelen var stengt i fem timer, etter at vannet på det verste sto 40 centimeter høyt. Tar vi med at også Strømsåstunnelen var stengt en periode og at et tett sluk i Pølsesvingen	oversvømte Nedre Eiker vei, er det lett å forstå at det ble store kødannelse i rushtrafikken. Flere underganger måtte også stenge, og førsteetasjen i eldreboligene på Hamborgstrøm tok inn vann. Sammen med regnværet kom også noen reale tordenbyger. Lynet slo ned i hopetall i distriktet, uten at det er meldt om alvorlige skader som en følge av dette.
TORUN HAVNAAS torun.havnaas@dt.no			
ROLF-MARTIN HANSEN rolf-martin.hansen@dt.no			VÅTT: Sjøføren av denne bilen måtte bare forlate den da vannet steg. FOTO: BORGVALD MOEN
Ifølge Meteorologisk institutt kom det hele 47,4 millimeter			

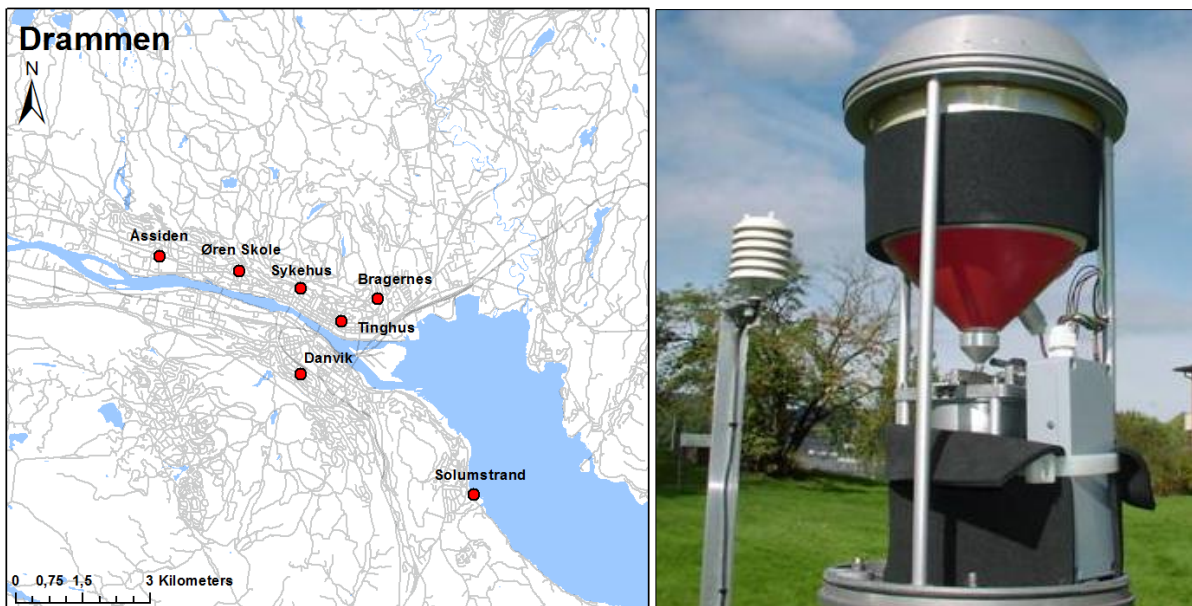
Figur 3-1: Nyhetsoppslag i Drammens Tidende 13.juli 2016.



Figur 3-2: Oversvømmelser i Bragernestunnelen. Publisert i *Drammens Tidende* den 11. juli 2016. Foto: Rune Folkedal og Borgvald Moen.

3.1.3 Data fra nedbørstasjoner

I Drammen sentrum er det syv nedbørstasjoner innenfor en radius på 4,5 kilometer som registrerte nedbørhendelsen den 11. juli 2016. Samtlige av disse er satt opp for å måle ekstreme nedbørhendelser og har vært i drift siden januar 2015. Stasjonene har nedbørmålere av typen Lambrecht vippepluviometer, har en oppløsning på 0,1 mm og måler akkumulert nedbør hvert minutt. Stasjonene eies av Drammen kommune og driftes av Rosim AS.



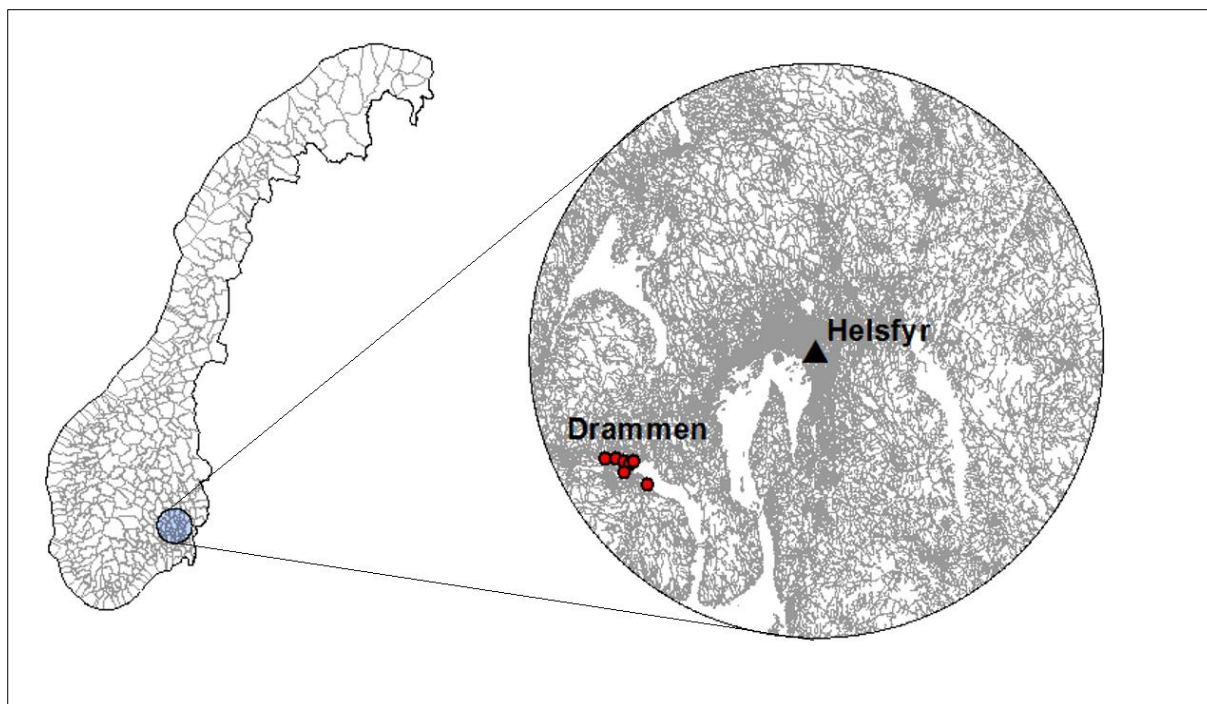
Figur 3-3: Nedbørstasjoner i analyseområdet i Drammen. Bildet til venstre viser plasseringen av de syv nedbørstasjonene i Drammen sentrum (Kjølseth og Vatne). Bildet til høyre viser vippepluviometer av typen Lambrecht som står på de syv stasjonene. Fotograf: met.no.

Nedbørseriene fra nedbørstasjonene er tilgjengelige på meteorologisk institutts klimadatabase, Eklima (Meteorologisk institutt 2017a). Det er i denne oppgaven hentet ut kvalitetskontrollerte nedbørserier fra hver av nedbørstasjonene på minuttoppløsning.

3.1.4 Data fra værradar

I Meteorologisk institutts nettverk av værradarer er det to radarer som har dekningsgrad over analyseområdet og som målte hendelsen den 11. juli. Radaren på Hurum er en c-båndradar med en rekkevidde på 240 kilometer. C-båndradaren sveiper omliggende atmosfære hvert 7,5 minutt og måler i en ruteoppløsning på 1x1 kilometer. Avstanden fra Hurum til analyseområdet er om lag 23 kilometer. Radaren på Helsefyr er en x-båndradar med en rekkevidde på 50 kilometer. X-båndradaren sveiper omliggende atmosfære for hvert minutt og måler i en oppløsning på 250x250 meter. Avstanden mellom Helsefyr og analyseområdet er om lag 38 kilometer.

Avstanden, og dermed høyde for målt refleksivitet, argumenter for at radaren på Hurum kunne vært det beste alternativet. Samtidig fører den lave strålen til at hindringer som bygninger og andre objekter skaper mer støy i radarbildet, spesielt for de urbane områdene. Studert hendelse er av konvektiv karakter med svært hyppige endringer i tid og rom. X-bånd radaren har 16 ganger større oppløsning i rom enn c-båndradaren, og 7,5 ganger så stor oppløsning i tid, noe som tilfører datasettet et langt større detaljnivå. Med bakgrunn i overnevnte argument ble det besluttet å benytte data fra radaren på Helsefyr.

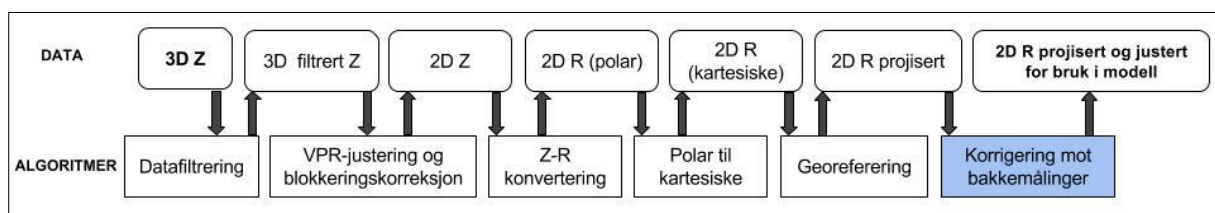


Figur 3-4: X-båndradarens dekningsområde på 50 kilometer. Værradaren på Helsefyr er illustrert i svart og nedbørstasjonene i Drammen i rødt. Illustrasjon laget av Kjølsest og Vatne.

Figur 3-4 viser et oversiktskart med et utsnitt av Helsefyr radarens dekningsområde. Med en avstand på anslagsvis 38 kilometer mellom radaren og Drammen sentrum, og laveste

strålingsvinkel på 2 grader, gir likning 3 i kapittel 2.3.4 at radarreflektiviteten er målt i en høyde lik 1600 meter over analyseområdet.

Figur 3-5 viser flytskjema for prosessen fra målt radarreflektivitet til nedbørintensitet som inngangsdata i en avrenningsmodell. Målt radarreflektivitet Z blir først justert for bakgrunnsstøy og demping. Videre er målt reflektivitet i 1600 meters høyde VPR-korrigert til reflektivitet på bakkenivå, og radarreflektiviteten er omgjort til nedbørintensitet R ved bruk av Marshall-Palmer relasjonen gitt i likning 4, kapittel 2.3.4. Benyttede verdier for a og b er henholdsvis 200 og 1,6. Datasettet er tilegnet koordinatsystem og projeksjon WGS1984 UTM32.



Figur 3-5: Flytskjema av prosessering av radardata. Flytskjemaet viser prosessen fra målt reflektivitet i et volumsegment, til akkumulert nedbør. Korrigering mot bakkemålinger er ikke gjort i datasettet fra meteorologisk institutt. Tilpasset fra Abdella (2016).

Radardataene benyttet i denne oppgaven er levert og bearbeidet av Christoffer A. Elo ved Meteorologisk institutt, og er hentet ut fra Meteorologisk institutts database Thredds (Meteorologisk institutt 2017c). Dataene ble hentet ut på filformatet netCDF på minutt oppløsning, med varighet på et døgn. Dette tilsvarer 1400 tidssteg. Dataene er ikke korrigert mot bakkemålinger ved meteorologisk institutt slik det fremgår i flytskjema. Dette er utført etter mottatt datasett, før værradardataene er avendt i avrenningsmodellen.

NetCDF er et filformat velegnet for etablering, lagring og deling av store matriseorienterte datasett som klimadata. Programvarer som behandler denne type filer er foreløpig begrenset og bearbeiding av slike datasett bør ideelt sett gjøres i objektorienterte programmeringsspråk som C++ og Python. I lys av oppgavens omfang ble det besluttet å teste ut ferdige programvarer med enkelt brukergrensesnitt for bearbeiding av radardataene. ArcMap ble testet ut som et alternativ, med ArcToolbox-verktøyet *Make NetCDF Raster Layer (Multidimension)*. Dette viste seg å være mindre egnet og tungt å jobbe med. Siden det var ønskelig å få radardataene inn som inngangsdata for nedbør i en avrenningsmodell fra MIKE 21 var det hensiktsmessig å ha datasettet i et filformat anvendbart i MIKE programvare (dfs2). Ulike metoder og verktøy ble testet ut, men datasettet ble enten fratatt tidsvariabelen eller det geografiske

koordinatsystemet. Det ble omsider tilpasset et verktøy til vårt bruk av DHI Singapore, *NetCDF/Grib2 To DFS Format Conversion*. Verktøyet er ikke utviklet for radardata direkte, men var anvendbart med noe etterarbeid med koordinatsystem og enhetsskalering. NetCDF-filen fra meteorologisk institutt har nedbørrate med enhet mm/min og siden dette ikke er en standardenhet i DHIs enhetssystem måtte nedbørraten skaleres opp til mm/h. Konverteringsverktøyet fra DHI Singapore har ikke en innebygd funksjon for dette, og skaleringen ble gjort i MIKE Zero med verktøyet *Calculator*. Datasettets projeksjon blir heller ikke bevart i konverteringen, og må tilegnes på nytt. Dette ble også utført i MIKE Zero. Konverteringsverktøyet var dessuten følsomt for inngangsdataenes tidsvariabel. Radaren opererer med en offsetverdi der det går med noen sekunder til å sette radaren i posisjon før et radarsveip. For 11. juli var konfigurasjonen på radaren slik at offset-verdien var varierende for hvert sveip. For å kunne benytte verktøyet måtte alle tidene avrundes til nærmeste minutt. For en mer detaljert oversikt over fremgangsmåte henvises det til vedlegg A. Etter bruk av konverteringsverktøyet ble nedbørverdiene i dfs2-filen validert mot rasteret generert i ArcMap. Fra dfs2-filen i MIKE Zero ble det hentet ut verdier på minutt oppløsning for rutene som dekker de syv nedbørstasjonene i tidsperioden 12.30-15.40. Verdiene ble plottet i Excel mot verdiene fra nedbørstasjonene for å kunne studere forskjeller i oppbygning, intensitet, varighet og mengde.

3.1.5 Korrigerings av værradardata

Hovedideen ved å korrigere radardata mot bakkemålinger er å kombinere de individuelle styrkene i de to målesystemene. Bakkemålinger er punktmålinger som gir relativt høy kvantitativ nøyaktighet, og radarmålinger tilfører den manglende romlige fordelingen til punktmålingene. Ved å korrigere radardataene mot bakkemålinger kompenserer en for feilen og usikkerheten i Z-R relasjonen beskrevet i kapittel 2.3.4. Det finnes flere ulike framgangsmåter for å korrigere radardata mot bakkemålinger. Valg av metode avhenger av radarnettverket i området, hvordan radardataene er bearbeidet, topografien i analyseområdet samt hvor tett nettverket av nedbørmålere er og deres loggertid. Det er tatt utgangspunkt i rapporten «*Gauge adjustment of radar-based precipitation estimates in Europe*» (Gjertsen et. al 2004), der det er gitt en oversikt over metodene benyttet ved 21 ulike meteorologiske og hydrologiske institutt i Europa. I tillegg er valg av metode diskutert med seniorforsker i NVE, Kolbjørn Engeland, som har gjort et tilsvarende studie på et nettverk av nedbørmålere og c-båndradaren som står på Rissa i Sør-Trøndelag (Abdella & Engeland 2013).

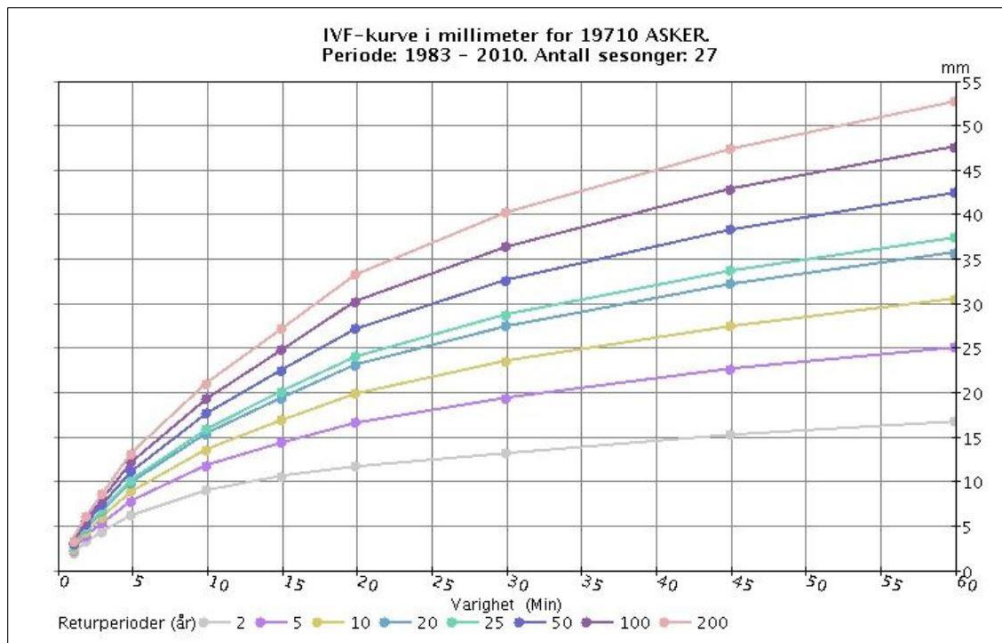
Studiets analyseområde har et av de tetteste nettverkene av nedbørmålere i Norge, med om lag én nedbørmåler for hver tredje kvadratkilometer, og er satt opp med den hensikt å måle ekstreme nedbørhendelser. Korrigeringsfaktoren blir mer stabil jo flere målere det er i området. Både tidsoppløsningen på pluviometrene og radaren er ett minutt, og radaren har en romlig oppløsning på 250x250 meter. Da avstanden mellom radar og analyseområdet er 38 kilometer er det antatt at forskyvingen i tid ikke vil være avgjørende. Samtidig er antall målepunkter på bakkenivå totalt sett få, og det er derfor knyttet usikkerhet til det å kunne si noe om den romlige korrelerasjonen mellom punktene (Webster & Oliver 1993). For å korrigere dataene er derfor MF-korrigering, gitt i ligning 8 i kapittel 2.3.5, benyttet. Metoden gir én korreksjonsfaktor for hvert tidsintervall, men er den samme for hele området.

Korreksjonsfaktoren for de ulike tidsstegene er beregnet for akkumulert nedbør per 10 minutter i Excel. Kortere tidsintervall øker usikkerheten i beregningen, mens høyere intervall fører til at en mister de hyppige endringene i nedbørhendelsen. Korreksjonsfaktoren er videre multiplisert med radardatasettet i MIKE Zero med verktøyet «*Calculator*» mellom klokken 12.30 og 15.40. Dette tilsvarer tidsstegene 750-960 i dfs2-filen. For en mer detaljert oversikt over fremgangsmåte for korreksjon av radardata i dfs2-filen henvises det til vedlegg A.

Det er også beregnet en lokal korreksjonsfaktor for Danvik nedbørstasjon fordi denne er beliggende i modellområdet. MF-korrigering er da kun benyttet på datasettet fra pluviometeret på Danvik nedbørstasjon. Dette er gjort for å sammenligne mot akkumulert nedbør og avrenning fra korreksjonsfaktoren basert på alle stasjonene.

3.1.6 Gjentaksintervallkart

Det er produsert gjentaksintervallkart for varigheter på 10 og 40 minutter ved bruk av målte verdier på nedbørstasjonene og korrigerte værradardata. For generering av kartene er IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon benyttet. Tidligere nedbørstasjon innenfor analyseområdet, Marienlyst nedbørstasjon, har ikke vært i drift siden 1995 og IVF-verdiene for denne stasjonen er beregnet for perioden 1963–1995. Siden flere større nedbørhendelser har funnet sted i perioden etter målestasjonens opphør er det tatt utgangspunkt i verdiene fra Asker. Dette er nærmeste målestasjon med tilfredsstillende måleperiode, og ligger om lag 18,5 kilometer fra analyseområdet. Som vist i Figur 3-6 tar IVF-kurven fra Asker utgangspunkt i perioden 1983-2010. Kurven er hentet fra meteorologisk institutts klimadatabase, Eklima (Meteorologisk institutt 2017a).



Figur 3-6: IVF-kurve for Asker nedbørstasjon. Verdiene tar utgangspunkt i perioden 1983-2010. Hentet fra Norsk Klimaservicesenter (2017a)

Det er produsert et gjentaksintervallkart basert på målte verdier på nedbørstasjonene for hendelsens mest intense 40 minutter mellom klokken 13.40 og 14.20. De målte verdiene er interpolert over analyseområdet ved bruk av invers avstandsvektet interpolering (Haberlandt 2007), der verdiene mellom nedbørstasjonene er beregnet med et avstandsvektet gjennomsnitt av de målte verdiene. Interpoleringen er utført med verktøyet *IDW (Spatial Analyst)* i ArcMap, der rutestørrelsen i rasterlaget er satt til 250x250 meter, lik rutestørrelsen i værradardataene. Gjentaksintervallkartet fra nedbørstasjonene er videre sammenlignet mot gjentaksintervallkart fra korrigert værradardata for de samme 40 minuttene. Det er i tillegg produsert et gjentaksintervallkart med varighet på 10 minutter for hendelsens mest intense 10 minutter for mellom klokken 14.00 og 14.10.

Akkumulert nedbør i de korrigerte værradardataene er hentet ut ved bruk av verktøyet *Calculate Statistics* i MIKE Zero. Statistikkfilen er videre bearbeidet i ArcMap som et rasterlag og er tilegnet gjentaksintervall fra IVF-kurven. Verktøy benyttet for å lage gjentaksintervallkart for korrigerte værradardataene er samlet i Tabell 3-1.

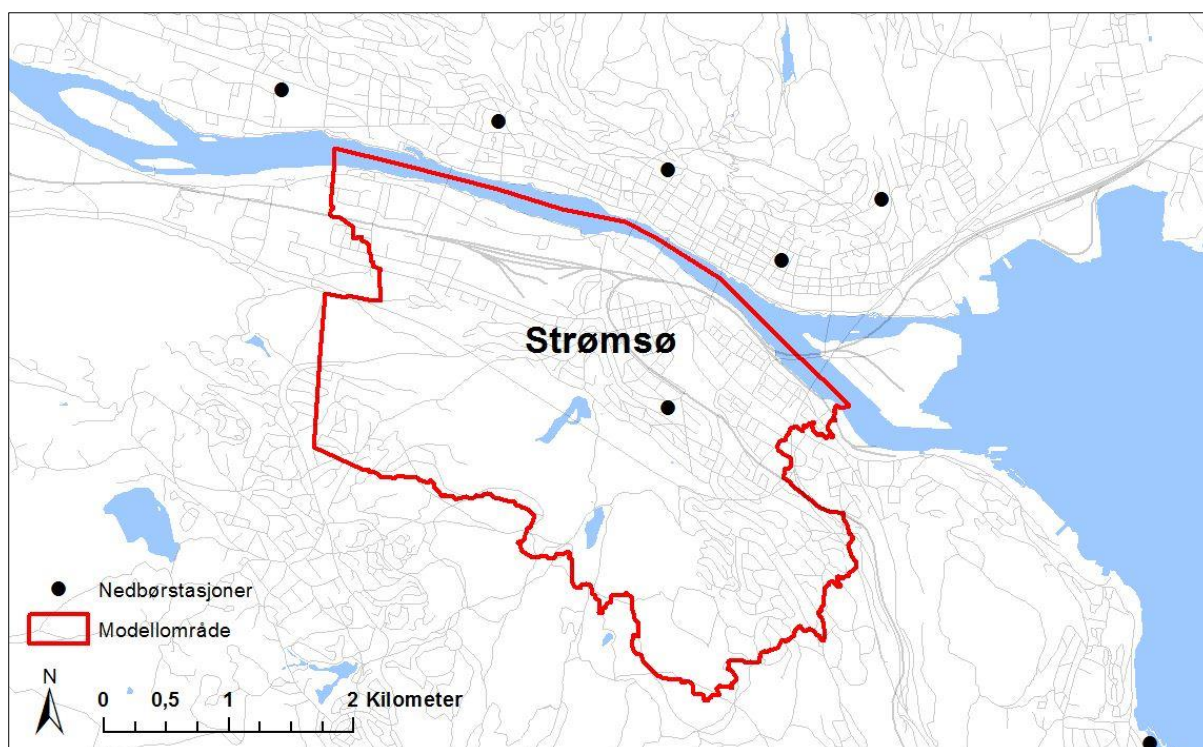
Tabell 3-1: Anvendte verktøy for produksjon av gjentaksintervallkart. Høyre kolonne beskriver verktøyets funksjon.

Programvare	Verktøy	Funksjon
MIKE Zero	Calculate Statistics	Henter ut akkumulert nedbør for gitt varighet
MIKE Zero Toolbox	MIKE2GRD	Konverterer statistikkfilen (dfs2) til ASCII
ArcMap	ASCII to Raster	Konverterer ASCII til et rasterlag

3.2 Nedbørdata fra værradar i avrenningsmodell

3.2.1 Analyseområde

For avrenningsmodellen er det valgt et mindre nedbørfelt på 10 km² i Drammen sentrum. Nedbørfeltet drenerer fra Konnerud og Haukås i sørvest ned mot Strømsø bydel. Drammenselva er nedbørfeltets utløp. Øvre del av nedbørfeltet er definert som bymark med skog og ubebygde terreng mens nedre del av feltet i stor grad er dekket av utbygde flater med urban karakter. Feltkarateristika beregnet i Nevina (NVE 2017) gir en urbanprosent på 46% og en skogprosent på 39%. Resterende flater er dekket av dyrket mark, mindre bekker og vann. Nedbørfeltet for avrenningsmodellen er tidligere benyttet av Johansen og Moldekleiv (2016) og Abry (2016). Figur 3-7 viser kart over hele analyseområdet med nedbørfeltet for avrenningsmodellen markert. Av nedbørstasjonene beskrevet i kapittel 3.1.3 er det bare Danvik nedbørstasjon som er innenfor analyseområdet for avrenningsmodellen.



Figur 3-7: Analyseområde for avrenningsmodellen. Nedbørstasjoner er markert som svarte punkter. Illustrasjon laget av Kjølsesteth og Vatne.

3.2.2 Nedbørhendelse og nedbørdata

Det er tatt utgangspunkt i den samme nedbørepisoden som i kapittel 3.1, men kun hendelsens mest intense periode mellom klokken 13.40 og 14.20. Det er antatt at evaporasjonen er så liten at den kan neglisjeres. I avrenningsmodellen er det kjørt simuleringer med ulik nedbør som inngangsdata. Tabell 3-2 gir en oversikt over nedbørdata som er benyttet i simuleringene. Førstnevnte nedbørdata i tabellen er oppgavens hovedsimulering, og de resterende er simuleringer for sammenligning og diskusjon.

Tabell 3-2: Oversikt over ulike nedbørdata benyttet i modellkjøringene.

Nedbørdata	Spesifikasjoner
Radardata med korreksjonsfaktor	Korreksjonsfaktor basert på alle nedbørstasjonene
Radardata med lokal korreksjonsfaktor	Korreksjonsfaktor basert på Danvik nedbørstasjon
10-års regnhyetogram	Basert på IVF-verdier fra Asker nedbørstasjon

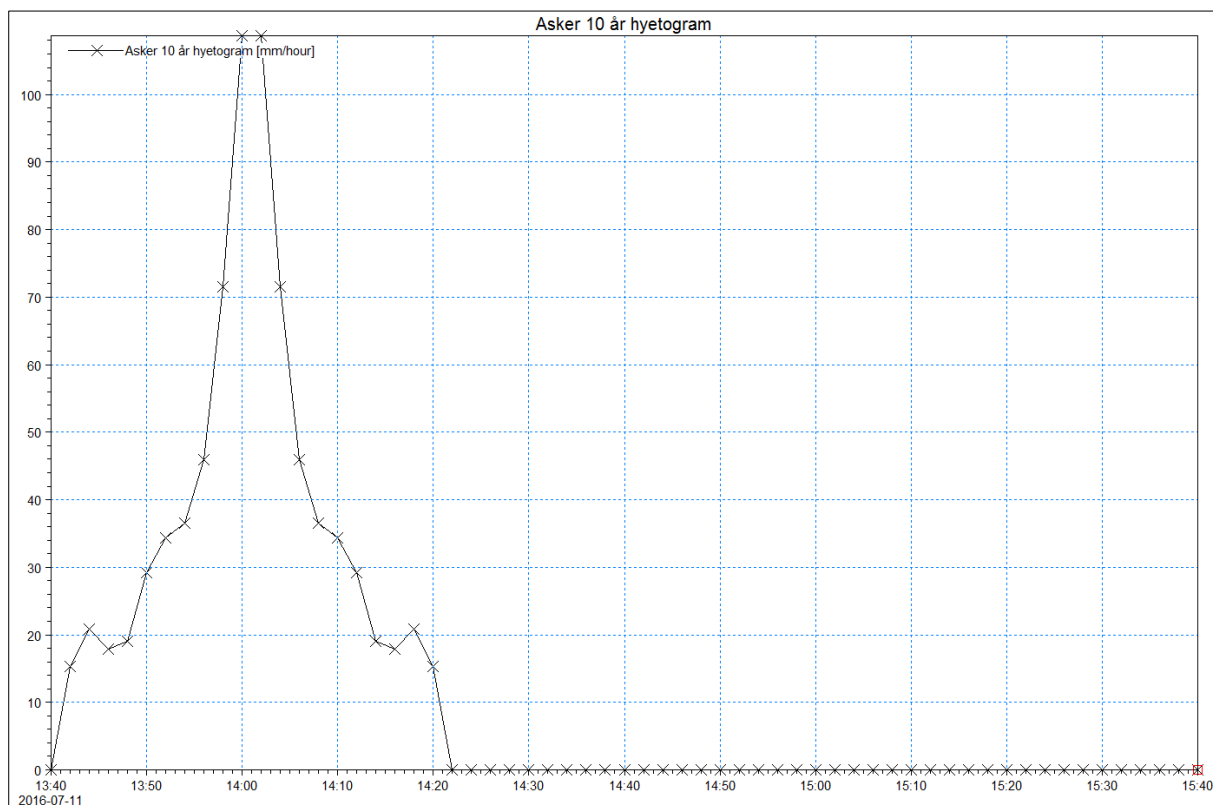
Radardata med lokal korreksjonsfaktor og korreksjonsfaktor fra alle nedbørstasjonene er klarlagt for bruk i MIKE 21 Flow Model FM som beskrevet i kapittel 3.1.4, 3.1.5 og vedlegg A.

Et regnhyetogram med 10-års gjentaksintervall er produsert ved bruk av IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon gitt i Figur 3-6. Varigheten på regnet tilsvarer nedbørhendelsens mest intense 40 minutter, og er den samme brukt ved produksjon av gjentaksintervallkart. Valg av gjentaksintervall for regnhyetogrammet er basert på majoriteten av rutene i gjentaksintervallkartet. Det er valgt et beregningssteg på to minutter som gir 20 intervaller i det symmetriske hyetogrammet. Grunnlaget for beregningene er hentet ut direkte fra IVF- kurven i Figur 3-6 og ved lineær interpolering mellom punktene. Verdiene er videre regnet om til intensitet i mm/h. Ved bruk av formel 2 fra kapittel 2.3.3 er intensiteten i de ulike tidsintervallene beregnet. Resultatet er presentert i Tabell 3-3.

Tabell 3-3: Beregnet regnintensitet i tidsintervall på fire minutter. Intensiteten er gitt i mm/h.

Regnintensitetsintervall	Intensitet [mm/h]
I4	108,7
I8-I4	71,5
I12-I8	45,9
I16-I12	36,5
I20-I16	34,4
I24-I20	29,2
I28-I24	19,1
I32-I28	17,9
I36-I32	20,8
I40-I36	15,3

Regnhyetogrammet ble laget som en tidsserie i en dfs0-fil ved bruk av DHIs brukergrensesnitt for pre- og postprosessering, MIKE Zero, med verktøyet *Time Series Editor*. Hyetogrammet ble manuelt lagt inn med samme dato og varighet som den virkelige nedbørepisoden. Hyetogrammet ble lagt inn med en hale av 0-verdier som vist i Figur 3-8, for å få med avrenningen etter at regnet har opphørt.



Figur 3-8: Konstruert 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon som dfs0-fil.

3.2.3 Oppbygging av terrengmodell

Terrengmodellen er sammen med nedbørdata de viktigste komponentene i avrenningsmodellen. En terrengmodell kan være enten på rasterformat eller triangulert i et mesh som forklart i kapittel 2.5.1. I denne oppgaven er sistnevnte metode valgt på bakgrunn av muligheten til å benytte lag med ulik romlig oppløsning sammen og at områder med spesiell interesse kan tilegnes høyere oppløsning. At lag med ulik romlig oppløsning kan benyttes sammen var avgjørende for å kunne bruke data fra værradaren direkte i avrenningsmodellen. Klargjøring av data for terrengmodellen er gjort i ArcMap 10.3.1 og oppbygningen er gjort i MIKE Zero med verktøyet *Mesh Generator*. I det følgende er det gitt en beskrivelse av ulike verktøy benyttet og en framgangsmåte for oppbygning av terrengmodellen. For en mer detaljert oversikt henvises det til vedlegg B.

Klargjøring av data i ArcMap

Terrengmodellen tar utgangspunkt i et datasett med terrengpunkter fra laserskanning. Datasettet er benyttet i tidligere arbeid og er mottatt av Johansen og Moldekleiv (2016). Laserskanningen fant sted den 26. juni 2010 av Terratec på oppdrag for Drammen kommune. Datasettet er i LAS-format i koordinatsystemet ETRF1989 med projeksjon UTM32 og høydedatum NN1954. LAS-filene ble først konvertert til et LAS-datasett før det ble konvertert videre til et raster. Det ble testet med ulike størrelser på rasterrutene. Ruter med størrelse 2x2 meter ble til slutt valgt som den beste løsningen da lavere oppløsning gav unøyaktig resultat og høyere oppløsning gav et tungt og tidkrevende datasett å jobbe med. Rasteret ble klippet til nedbørfeltet før det ble konvertert til punkter. Punkter for jernbane- og veibruer som kan oppfattes som terreng ble fjernet for ikke å hindre vannstrømmen. I tillegg ble punkter i Drammenselva senket til 2 meter under havnivå for å få bedre resultater rent visuelt. Anvendte verktøy er samlet i Tabell 3-4.

Tabell 3-4: Anvendte verktøy ved klargjøring av laserdata til bruk i terrengmodell. Høyre kolonne beskriver verktøyets funksjon.

Programvare	Verktøy	Funksjon
ArcMap	Create LAS Dataset (Data Management)	Samler LAS-filer i et datasett
ArcMap	LAS Dataset to Raster (Conversion)	Konverterer LAS-datasett til raster
ArcMap	Clip (Data Management)	Klipper raster
ArcMap	Raster to point (Conversion)	Konverterer raster til punkter
MIKE Zero Toolbox	Shp2Xyz	Konverterer shapefil til griddet tekstformat (xyz-format)

Bygninger spiller en viktig rolle i vannets strømningsmønster ved flom og må derfor tas hensyn til i terrengmodellen. I terrengmodellen er det benyttet et datasett fra felles kartdatabase (FKB) med bygninger som inneholder en detaljert beskrivelse av bygningene med tilhørende bygningslinjer- og vedheng. FKB-data er på vektorformat og definerer derfor objektene som linjer og polygoner. Datasettet er mottatt av Johansen og Moldekleiv (2016) og er i koordinatsystemet ETRF89 med projeksjon UTM32 og høydedatum NN2000. Bygningslaget kan benyttes sammen med data fra laserskanning uten konvertering av høydedatum da bygningslaget senere i prosessen legges inn som polygoner og på den måten ikke tilegnes en høyde. Før bygningene ble lagt inn i terrengmodellen, måtte de bearbeides og forenkles. Bygningene ble klippet til analyseområdet og bygg som lå på grensen av analyseområdet ble klippet bort da disse skapte konflikt senere i prosessen. Alle bygninger med avstand mindre enn to meter ble slått sammen. Videre ble bygningsomrissene forenklet. Datasettet hadde i tillegg noen geometrifeil som for eksempel at bygninger bestående av flere deler ikke var implementert i datasettet i riktig rekkefølge eller at enkelte punkter og polygoner var duplisert. Disse feilene ble rettet opp i før datasettet ble klargjort til bruk i MIKE Zero *Mesh Generator*. Bygningslaget ble til slutt klippet i mindre områder innenfor analyseområdet for at det skulle være lettest mulig å jobbe med videre i MIKE.

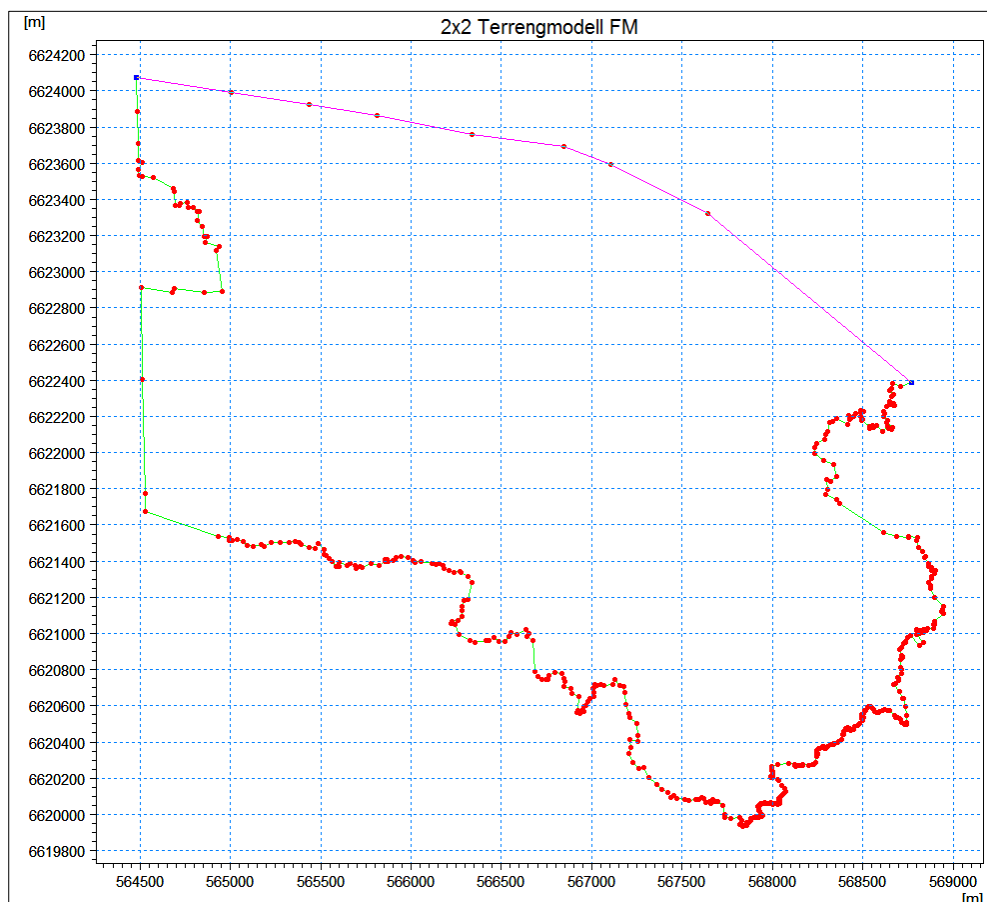
For å kunne bruke terrengpunktene og bygningene videre i MIKE-programvare ble de konvertert til et griddet tekstformat (xyz-fil). Anvendte verktøy for klargjøring av bygningslaget er gitt i Tabell 3-5.

Tabell 3-5: Anvendte verktøy ved klargjøring av FKB-bygningsdata til bruk i terrengmodell. Kolonnen helt til høyre beskriver verktøyets funksjon.

Programvare	Verktøy	Funksjon
ArcMap	Clip (Analysis)	Klipper shapefil
ArcMap	Aggregate Polygons (Spatial Analyst)	Slår sammen polygoner innenfor gitt avstand
ArcMap	Simplify buildings (Cartography)	Forenkler bygninger men beholder fasong og størrelse
ArcMap	Integrate (Data Management)	Sletter sammenfallende punkter og polygoner
Mike Zero Toolbox	Shp2Xyz	Konverterer shapefil til griddet tekstformat (xyz-format)

Oppbygging av terrengmodell i MIKE Zero Mesh Generator

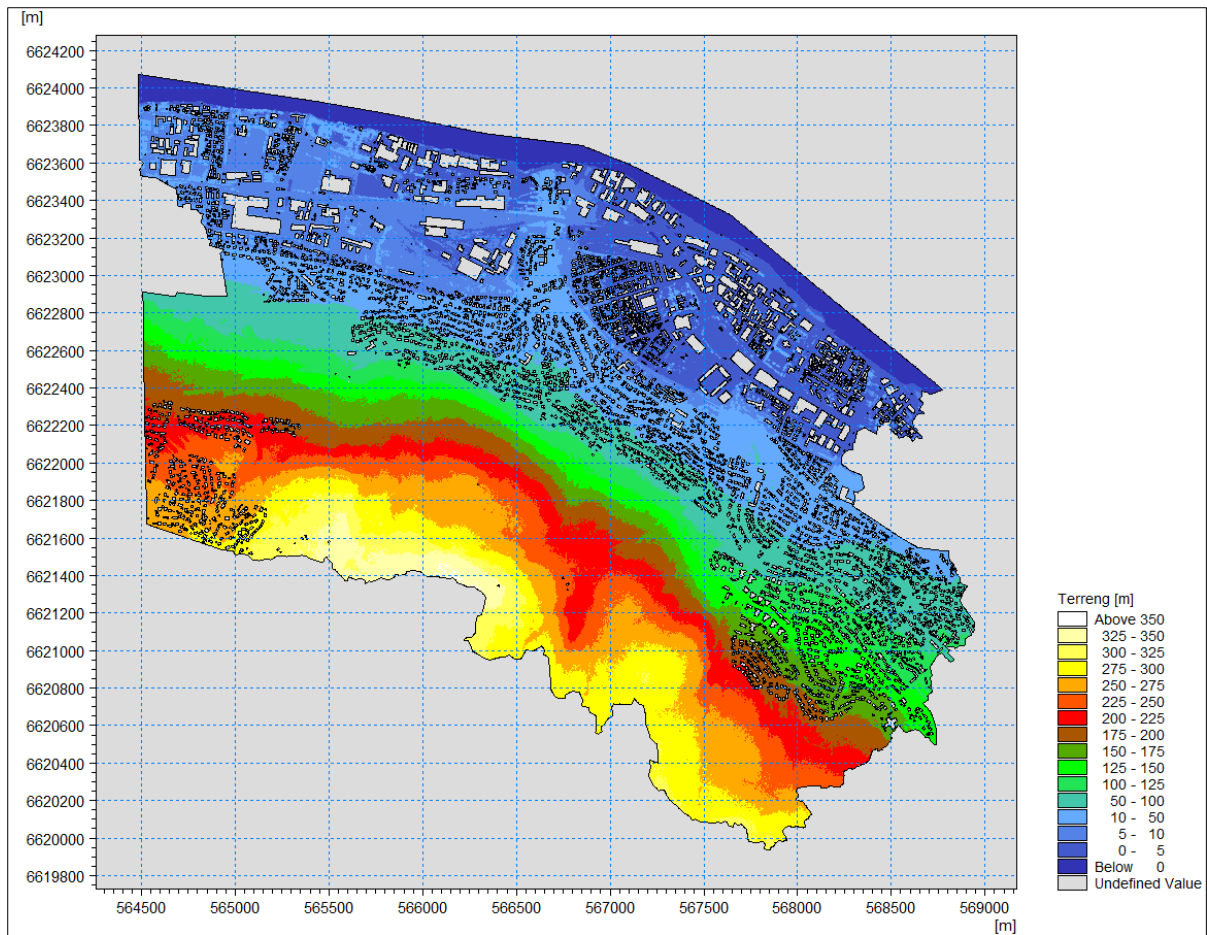
En terrengmodell i form av et flexible mesh består av et nett av små trekanter av valgt størrelse som inneholder en verdi interpolert fra relevante inngangsdata. Selve oppbygningen gjøres i MIKE Zeros verktøy *Mesh Generator*. Terrengmodellens utstrekning defineres av åpne og lukkede grenser. Formålet med de lukkede grensene er å holde vannet inne i analyseområdet mens den åpne grensen lar vannet strømme igjennom. Grensene ble importert som en xyz-fil av analyseområdets omriss. Det ble definert en åpen grense langs Drammenselva der det er naturlig at regnvannet renner ut, og en lukket grense rundt resten av området som vist i Figur 3-9. Grensene ble skilt fra hverandre ved at de fikk tildelt ulike attributtverdier. Grenser med attributtverdi 1 er lukket mens attributtverdier større enn 1 tilsvarer åpne grenser. Bygninger ble lagt inn i terrengmodellen som polygoner med lukkede grenser og er derfor ekskludert fra meshet slik at vannet tvinges til å strømme rundt. Polygonene importeres med nøyaktig samme størrelse som de har i den opprinnelige filen. Dersom bygningene overlapper, står svært tett eller har komplisert form vil ikke meshet kunne genereres. Preprosesseringen som beskrevet tidligere er derfor en svært viktig del av oppbygningen.



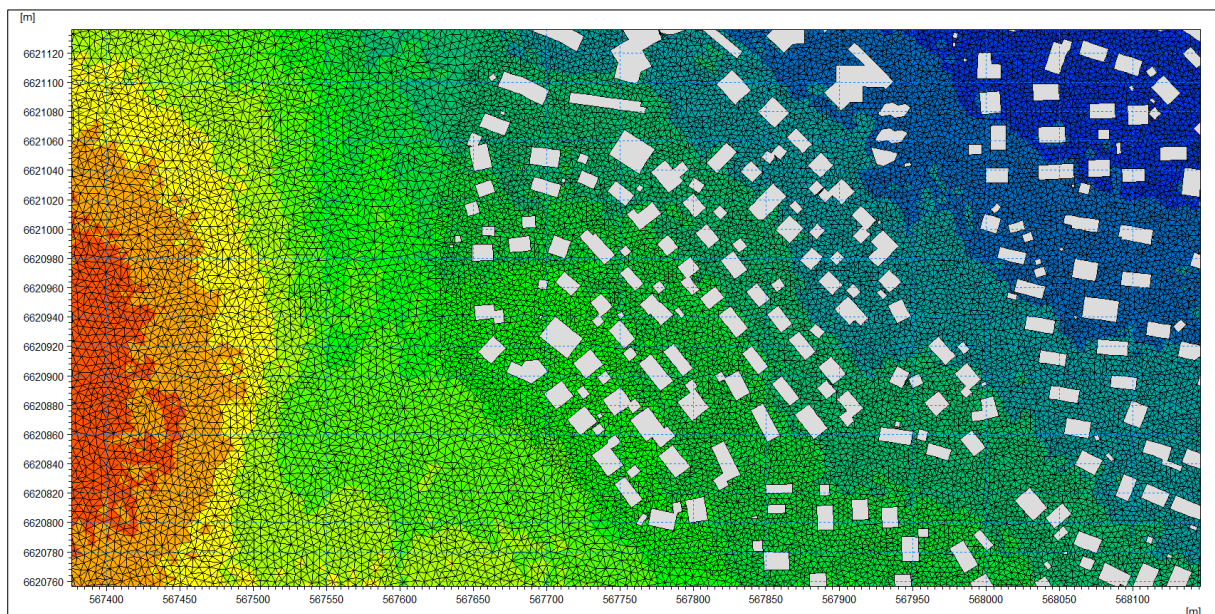
Figur 3-9: Terrengmodellens utstrekning vist i MIKE Zero-verktøyet *Mesh Generator*. Åpen grense mot Drammenselva er illustrert i rosa og øvrige grenser er lukkede.

Meshets oppløsning har en vesentlig betydning for modellens stabilitet og nøyaktighet. *Mesh Generator* gir brukeren mulighet til å spesifisere et maksimalt elementareal for trekantene. Små trekkanter gir stor nøyaktighet men gir tunge filer med økt beregningstid ved simulering. Store trekkanter gir unøyaktig resultat men rask beregningstid. Flere verdier ble testet ut og maksimal størrelse ble tilslutt satt til 20 m² på bakgrunn av størrelsen på det totale arealet og ønsket om forholdsvis høy nøyaktighet. Verdien faller dessuten innenfor anbefalinger gitt av Engineers Australia (2012). For områdene med stor tetthet av bygninger ble det dannet åpne polygoner som fikk tilegnet et maksimalt elementareal på 10 m² på bakgrunn av urbane områders innvirkning på avrenning.

Det ble også angitt en nedre grense for akseptabel størrelse på vinklene i trekantene i meshet. Som beskrevet i kapittel 2.5 kan små vinkler gi stabilitetsproblemer ved kjøring. Også her ble flere verdier testet med best resultat når minste vinkel ble valgt til 26°. Ved generering må en også angi maksimalt antall knutepunkt. Ved prøving og feiling ble til slutt 700 000 knutepunkt valgt i meshet. Dette gav et mesh med 1 154 378 elementer og 613 201 knutepunkt. Meshet kan i etterkant redigeres manuelt og programmet har en innebygd analysefunksjon som angir trekkanter som kan skape problemer under simulering enten på grunn av sin størrelse eller vinkel. Disse trekantene ble flyttet, slått sammen eller fjernet. Til slutt ble det importert terrengpunkter klargjort i ArcMap. Punktene ble sammen med meshet interpolert ved bruk av interpoleringsmetoden «naturlig nabo», en avstandsvektingsmetode som gir mer nøyaktige resultat enn alternativet «lineær interpolering». Terrengmodellen ble så eksportert som en mesh-fil. Figur 3-10 viser ferdig terrengmodell og Figur 3-11 et nærbilde av meshet.



Figur 3-10: Terrengmodell med bygninger innsatt som polygoner vist i MIKE Zero.



Figur 3-11: Terrengmodellens mesh vist i MIKE Zero. I området med bygninger har trekantene høyere oppløsning enn i området rundt.

3.2.4 Infiltrasjon

Infiltrasjon er neglisjert i alle modellkjøringene. Dette er gjort for å begrense usikkerhetene knyttet til overflateavrenningen i modellen. Antakelsen kan også sies å være akseptabel da store deler av de flate områdene ned mot Drammenselva er svært leirholdige. Grunnvannsstanden står dessuten høyt i deler av området, slik at muligheten for å kunne infiltrere større mengder overvann er begrenset (Drammen kommune 2015). Den 11. juli 2016 var det også en mindre nedbørepisode noen timer før den studerte hendelsen slik at en kan anta at markoverflaten var mettet.

3.2.5 Ruhet

I alle modellkjøringene er det valgt konstant ruhet med et Manningstall på 14 over hele modellområdet. Konstant ruhet ble valgt fremfor romlig varierende ruhet for ikke å tilføre modellen større usikkerhet. Valg av Manningstall er basert på erfaringer fra lignende studier (Filipova 2012; Johansen & Moldekleiv 2016). Ruhetstallet karakteriseres av modellområdets kombinasjon av store skogområder og urbane flater.

3.2.6 Eddy viskositet

Siden vanddybden i avrenningsmodeller er forventet å være lavere enn rutestørrelsen i terrengmodellen er det valgt konstant Eddy-viskositet basert på resonnementet gitt i kapittel 2.5.1. Parameteren er valgt til $0.08 \text{ m}^2/\text{s}$ i alle modellkjøringene. Verdien er den samme brukt i et liknende studie gjennomført i Sverige (Salmonsson 2015).

3.2.7 Flood and dry

Flere verdier ble testet for de bevegelige grensene «flood and dry». For lave verdier gav ustabilitetsproblemer under simulering og for høye verdier gav unøyaktige resultat. Det ble tatt utgangspunkt i erfaringer fra Salmonsson (2015) der $h_{dry} = 0,002$, $h_{flood} = 0,003$ og $h_{wet} = 0,015$. Sistnevnte verdi ble justert til 0,01 for å inkludere flere ruter i beregningene tidlig i nedbørepisoden for å få større avrenning.

3.2.8 Simuleringstid

Simuleringstiden til modellen defineres av starttid, et tidsstegsintervall og antall tidssteg. Tidsstegsintervall er en kritisk parameter i forhold til CFL-tallet og dermed stabiliteten og nøyaktigheten til modellen. Høyeste tidsstegsintervall som ikke gav stabilitetsproblemer var 0.2 sekund. Simuleringstiden ble valgt til å være fra klokken 13.40 til 15.40 den 11. juli 2016.

Simuleringstiden er lenger enn den mest intense delen av nedbørhendelsen for å få med all avrenning etter nedbørhendelsen.

3.2.9 Modelloppsett

Modelloppsett refererer til hvordan MIKE 21 Flow Model FM er konfigurert i programmets brukergrensesnitt. Komplette oppsett for de tre kjøringene er presentert i de etterfølgende tre tabellene. Parametere som ikke er relevant for kjøringene er ikke inkludert.

Tabell 3-6: Kjøringsoppsett for kjøring 1 med korrigert nedbør fra alle nedbørstasjoner.

Kjøring 1: Værradardata med korreksjonsfaktor basert på alle nedbørstasjoner		
	Parameter	Value
Hydrodynamic Module	Domain	Terrengmodell FM Maximum element area: 20 m ² (10 m ²) Smallest allowable angle: 26 Maximum number of nodes: 700 000
	Time	No. of time steps: 36 000 Time step: 0,2 2016-07-11 13.40-2016-07-11 15.40
	Solution Technique	Inland flooding Time/space: Higher order Minimum time step: 0,01 Maximum time step: 0,2 Critical CFL number: 0,8
	Flood and dry	Advanced flood and dry (floodplain) Drying depth: 0,002 Flooding depth: 0,003 Wetting depth: 0,01
	Eddy viscosity	Constant eddy formulation: 0.08 m ² /s
	Bed resistance	Manning number, Constant: 14 m ^{1/3} /s
	Precipitation	Net precipitation Varying in time and space «Værradardata med korreksjonsfaktor basert på alle nedbørstasjoner»
	Infiltration	No infiltration
	Boundary conditions	Land boundary: Land (zero no velocity) Code 2 boundary: Specified level, Constant: 0
	Outputs	Output 1: 2D (horizontal)-Area series Time step: 0-36 000 Frequency: 300 - Total water depth, U velocity, V velocity, P flux, Q flux, Precipitation Output 2: Inundation Time step: 0-36 000 - Maximum water depth, Time of maximum water depth, Maximum current speed, Time of maximum current speed
	Simulation time	CPU: 89 hours (4 prosessorer) Elapsed: 47,2 hours

Tabell 3-7: Kjøringsoppsett for kjøring 2 med lokalkorrigert nedbør fra Danvik nedbørstasjon.

Kjøring 2: Værradardata med lokal korreksjonsfaktor fra Danvik nedbørstasjon		
Hydrodynamic Module	Parameter	Value
	Domain	Terrengmodell FM Maximum element area: 20 m ² (10 m ²) Smallest allowable angle: 26 Maximum number of nodes: 700000
	Time	No. of time steps: 36 000 Time step: 0,2 2016-07-11 13.40-2016-07-11 15.40
	Solution Technique	Inland flooding Time/space: Higher order Minimum time step: 0,01 Maximum time step: 0,2 Critical CFL number: 0,8
	Flood and dry	Advanced flood and dry (floodplain) Drying depth: 0,002 Flooding depth: 0,003 Wetting depth: 0,01
	Eddy viscosity	Constant eddy formulation: 0.08 m ² /s
	Bed resistance	Manning number, Constant: 14 m ^{1/3} /s
	Precipitation	Net precipitation Varying in time and space «Værradardata med lokal korreksjonsfaktor fra Danvik nedbørstasjon»
	Infiltration	No infiltration
	Boundary conditions	Land boundary: Land (zero no velocity) Code 2 boundary: Specified level, Constant: 0
	Outputs	Output 1: 2D (horizontal)-Area series Time step: 0-36 000 Frequency: 300 - Total water depth, U velocity, V velocity, P flux, Q flux, Precipitation Output 2: Inundation Time step: 0-36 000 - Maximum water depth, Time of maximum water depth, Maximum current speed, Time of maximum current speed
	Simulation time	CPU: 76,4 hours (4 prosessorer) Elapsed: 40,1 hours

Tabell 3-8: Kjøringsoppsett for kjøring 3 med 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon.

Kjøring 3: 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon		
Hydrodynamic Module	Parameter	Value
	Domain	Terrengmodell FM Maximum element area: 20 m ² (10 m ²) Smallest allowable angle: 26 Maximum number of nodes: 700000
	Time	No. of time steps: 36 000 Time step: 0,2 2016-07-11 13.40-2016-07-11 15.40
	Solution Technique	Inland flooding Time/space: Higher order Minimum time step: 0,01 Maximum time step: 0,2 Critical CFL number: 0,8
	Flood and dry	Advanced flood and dry (floodplain) Drying depth: 0,002 Flooding depth: 0,003 Wetting depth: 0,01
	Eddy viscosity	Constant eddy formulation: 0.08 m ² /s
	Bed resistance	Manning number, Constant: 14 m ^{1/3} /s
	Precipitation	Net precipitation Varying in time and space «10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon»
	Infiltration	No infiltration
	Boundary conditions	Land boundary: Land (zero no velocity) Code 2 boundary: Specified level, Constant: 0
	Outputs	Output 1: 2D (horizontal)-Area series Time step: 0-36 000 Frequency: 300 - Total water depth, U velocity, V velocity, P flux, Q flux, Precipitation Output 2: Inundation Time step: 0-36 000 - Maximum water depth, Time of maximum water depth, Maximum current speed, Time of maximum current speed
	Simulation time	CPU: 89,6 hours (4 prosessorer) Elapsed: 51,4 hours

3.2.10 PC-spesifikasjoner

Det ble benyttet tre PC-er til simuleringene. To PC-er er lånt av Norconsult AS og en er lånt av DHI AS.

PC 1

Operativsystem: Windows 7 64-bit Operating System

Prossessor: Intel R Core (TM) i7-4800MQ CPU @ 2.70 GHz

Installert minne: 32 GB

Harddisk: 936 GB

GPU: NVIDIA Quadro K2100M 667MHz/3000MHz

PC 2

Operativsystem: Windows 7 64-bit Operating System

Prossessor: Intel R Core (TM) i7-4910MQ CPU @ 2.90 GHz

Installert minne: 32 GB

Harddisk: 476 GB

GPU: NVIDIA Quadro K3100M 706 MHz/3200 MHz

PC 3

Operativsystem: Windows 7 64-bit Operating System

Prossessor: Intel R Core (TM) i7-3630QM CPU @ 2.40 GHz

Installert mine: 8 GB

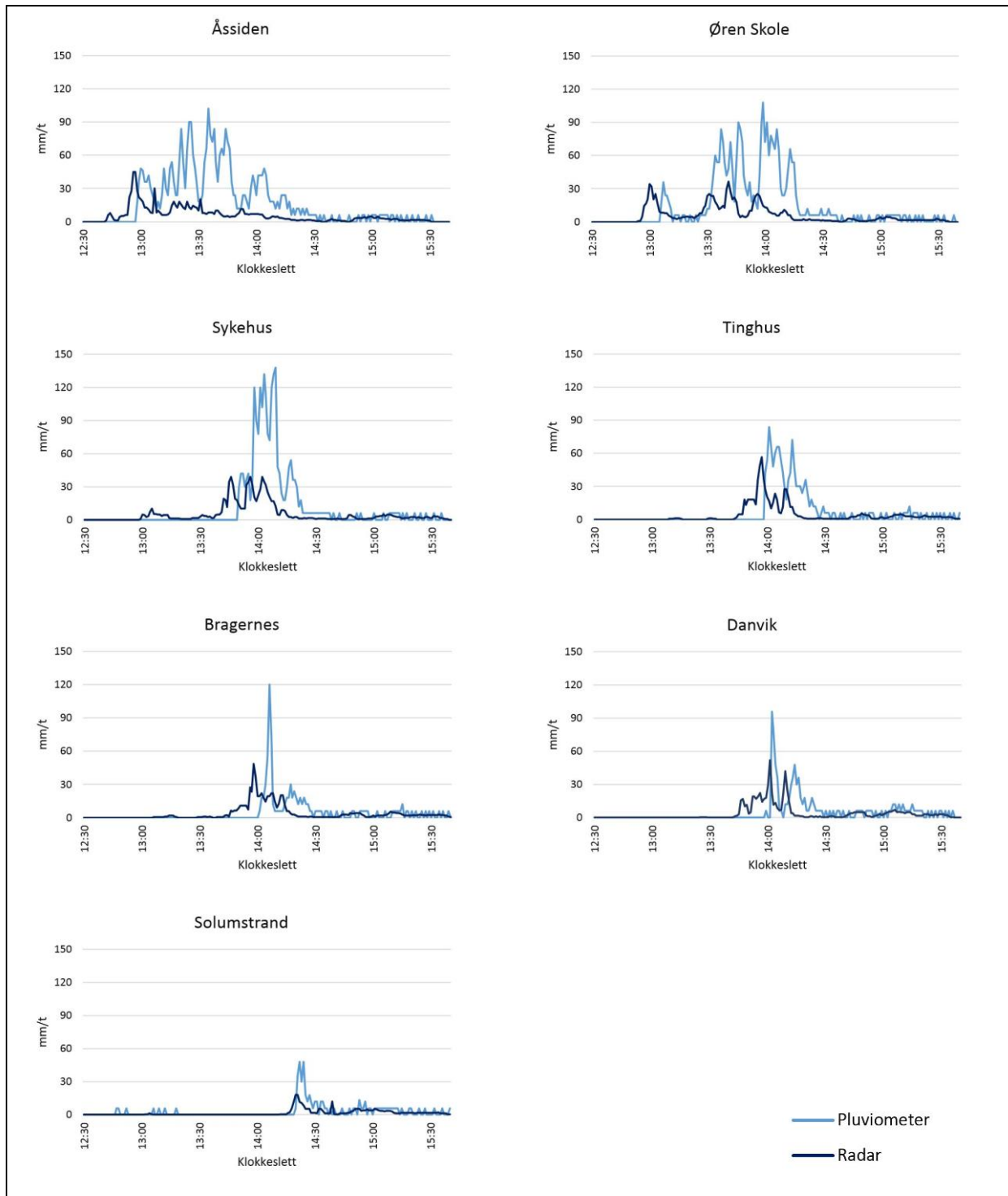
Harddisk: 465 GB

GPU: Intel(R) HD Graphics 4000 350-1350 MHz

4 Resultater

4.1 Sammenligning av data fra værradar og nedbørstasjoner

Det er hentet ut minuttverdier for nedbør fra syv nedbørstasjoner. Verdiene er sammenlignet med verdier fra radarruten som dekker nedbørstasjonen. Resultatet er vist i Figur 4-1.



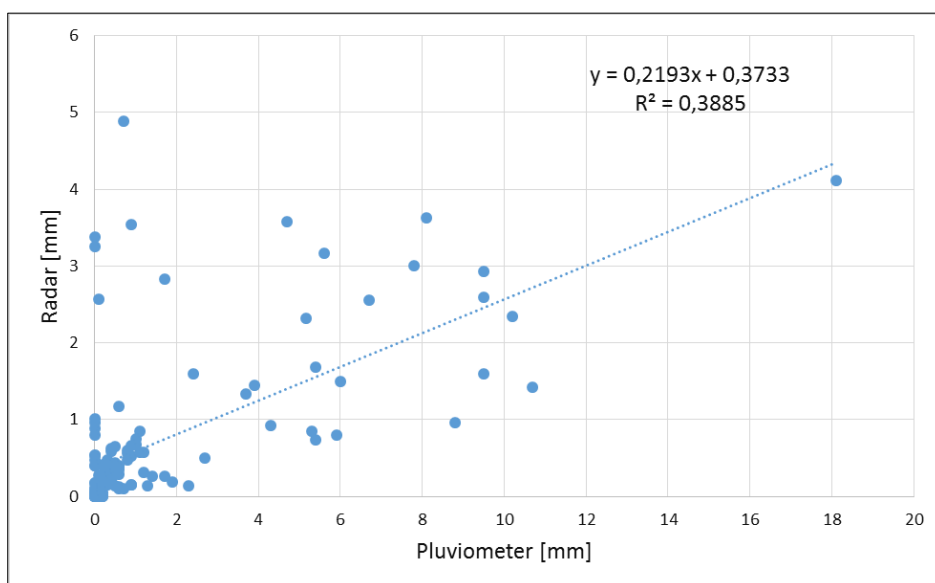
Figur 4-1: Sammenligning av nedbørintensiteter fra syv nedbørstasjoner og tilhørende radarrute for hendelsen i Drammen den 11. juli 2016. Lys blå linje viser målt intensitet ved målerne og mørk blå linje viser intensitet fra radarrutene.

Tabell 4-1 viser tidspunkt for maksimal intensitet ved stasjonene og avvik fra maksimal intensitet i de tilhørende radarrutene.

Tabell 4-1: Tidspunkt for maksimal nedbørintensitet for syv nedbørstasjoner og tilhørende radarruter for nedbørepisoden den 11. juli 2016 i tidsperioden 12.30-15.40 i Drammen.

	Klokkeslett pluviometer	Klokkeslett radar	Avvik [min]
Åssiden	13.35	12.57	-38
Øren Skole	13.58	13.41	-17
Sykehus	14.09	14.02	-7
Tinghus	14.01	13.57	-4
Bragernes	14.06	13.58	-8
Danvik	14.02	14.01	-1
Solumstrand	14.22	14.21	-1

10 minutter akkumulert nedbør fra nedbørstasjonene og tilhørende radarruter er plottet i et spredningsplott vist i Figur 4-2. For å finne en sammenheng mellom nedbørdataene fra nedbørstasjonene og radaren er det beregnet stigningstall ved bruk av minste kvadraters metode, korrelasjonskoeffisient r og determinantkoeffisient r^2 . Stigningstallet er 0,22, korrelasjonskoeffisienten er 0,62 og determinantkoeffisienten er 0,39. Trendlinjen forklarer nesten 40 prosent av variansen og kan tolkes som at radarnedbør generelt utgjør om lag 22 prosent av målt nedbør. Plottet antyder store variasjoner i målingene og en lineær trend er ikke representativ på grunn av den store spredningen rundt trendlinjen, særlig for de lave verdiene.



Figur 4-2: Spredningsplott av 10 minutter akkumulert nedbør fra syv nedbørstasjoner og tilhørende radarruter i Drammen den 11. juli mellom klokken 12.30 og 15.40.

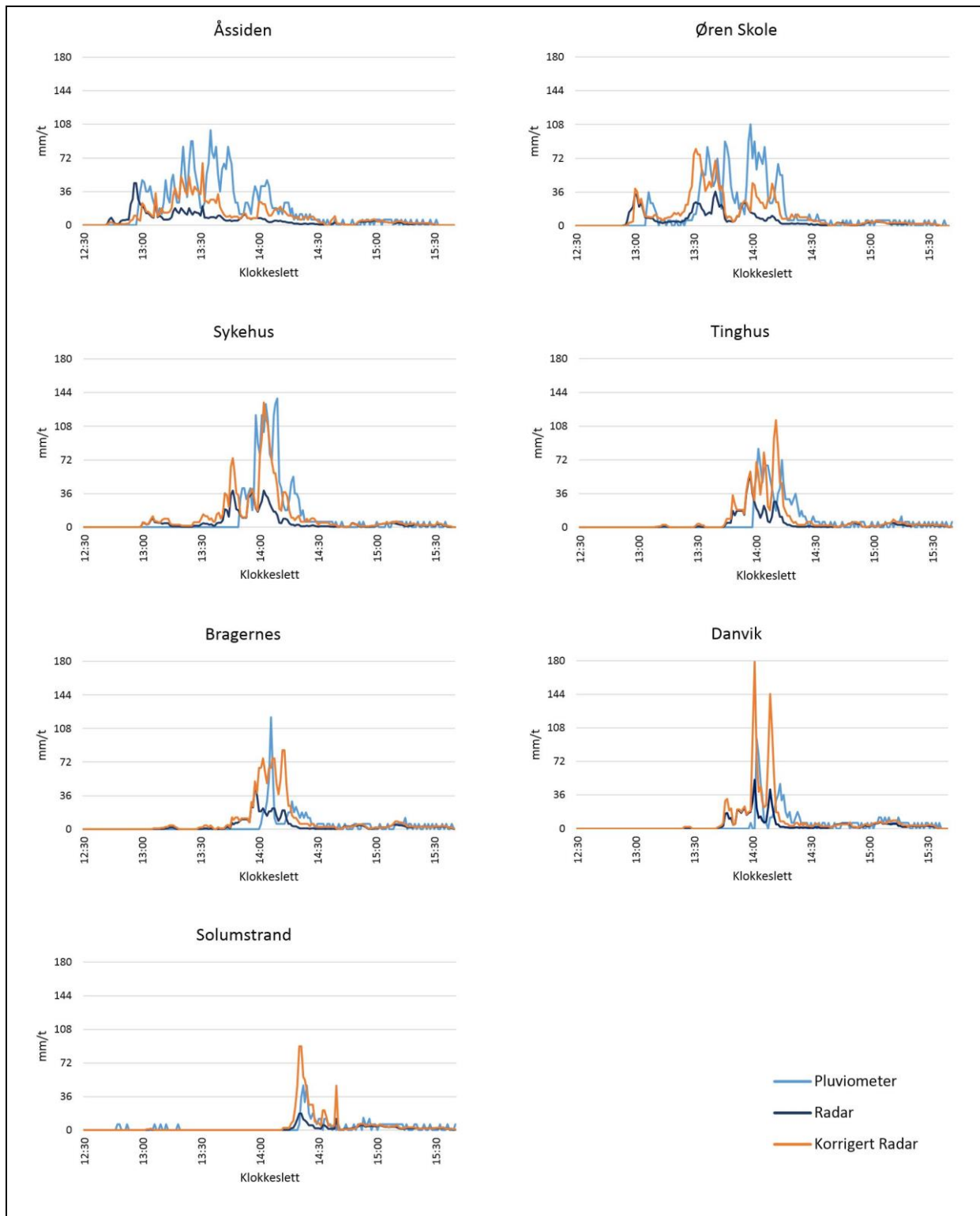
4.2 Korreksjonsfaktor

For hvert 10 minutters intervall i perioden 12.30-15.40 er det beregnet en korreksjonsfaktor basert på alle nedbørstasjoner. En korreksjonsfaktor på under 1 antyder at radaren overestimerer nedbøren mens en korreksjonsfaktor på over 1 antyder en underestimering. Intervallverdier for pluviometer og radar samt korreksjonsfaktor er presentert i Tabell 4-2.

Tabell 4-2: Summerte verdier fra pluviometer og tilhørende radarrute samt korreksjonsfaktor for 10 minutters intervaller i perioden 12.30-15.40 den 11. juli 2016 for syv nedbørstasjoner i Drammen.

Tidsintervall	Σ Pluviometer [mm]	Σ Radar [mm]	Korreksjonsfaktor
12.30-12.39	0	0	-
12.40-12.49	0,2	0,47	0,43
12.50-12.59	1	4,51	0,22
13.00-13.09	7,07	6,13	1,15
13.10-13.19	6,6	3,02	2,19
13.20-13.29	10,8	3,75	2,88
13.30-13.39	17,3	5,31	3,26
13.40-13.49	18,3	9,62	1,90
13.50-13.59	19,3	18,22	1,06
14.00-14.09	53,9	15,72	3,43
14.10-14.19	26,7	6,43	4,15
14.20-14.29	13,7	2,74	5,00
14.30-14.39	5,3	1,34	3,96
14.40-14.49	2	2,33	0,86
14.50-14.59	3,72	2,86	1,30
15.00-15.09	4,5	4,18	1,08
15.10-15.19	5,1	2,83	1,80
15.20-15.29	2,6	2,49	1,04
15.30-15.39	2	1,58	1,27

Korreksjonsfaktoren er multiplisert med minuttverdier fra det ukorrigerede radardatasettet. Resultatet er fremstilt i Figur 4-3.



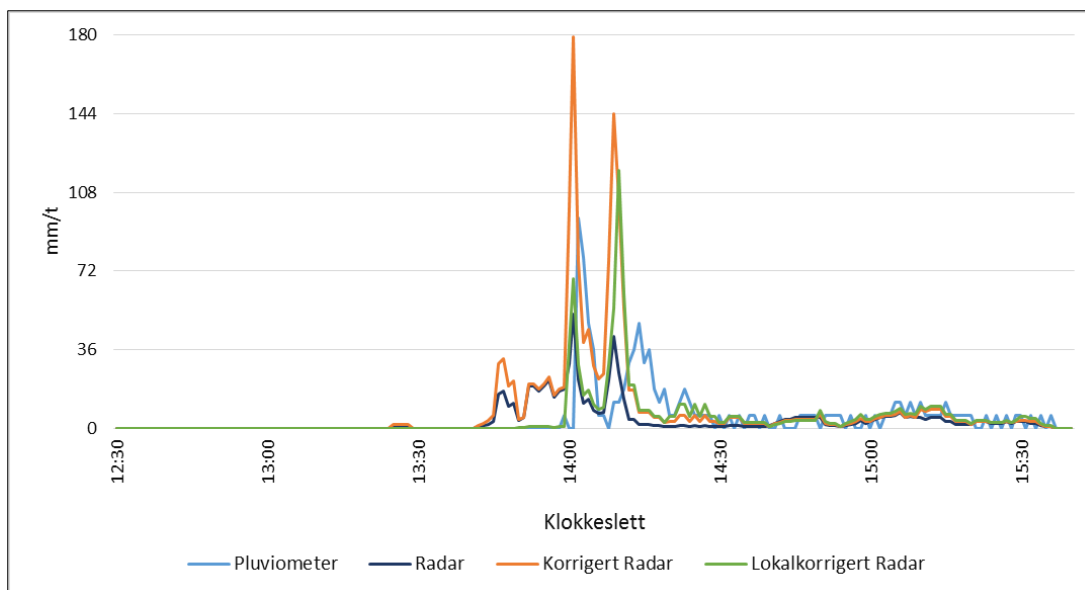
Figur 4-3: Sammenligning av nedbørintensiteter fra syv nedbørstasjoner i Drammen den 11. juli 2016. Lys blå linje viser målte verdier fra pluviometer, mørk blå linje viser verdier fra tilhørende radarrute og oransje linje representerer korrigerte radarverdier.

For de samme 10 minutters intervallene er det beregnet en lokal korreksjonsfaktor for Danvik nedbørstasjon. Summerte verdier fra pluviometer og radar samt de lokale korreksjonsfaktorene er presentert i Tabell 4-3.

Tabell 4-3: Summerte verdier fra pluviometer og tilhørende radarrute samt lokale korreksjonsfaktorer for 10 minutters intervaller i perioden 12.30-15.40 den 11. juli 2016 for Danvik nedbørstasjon.

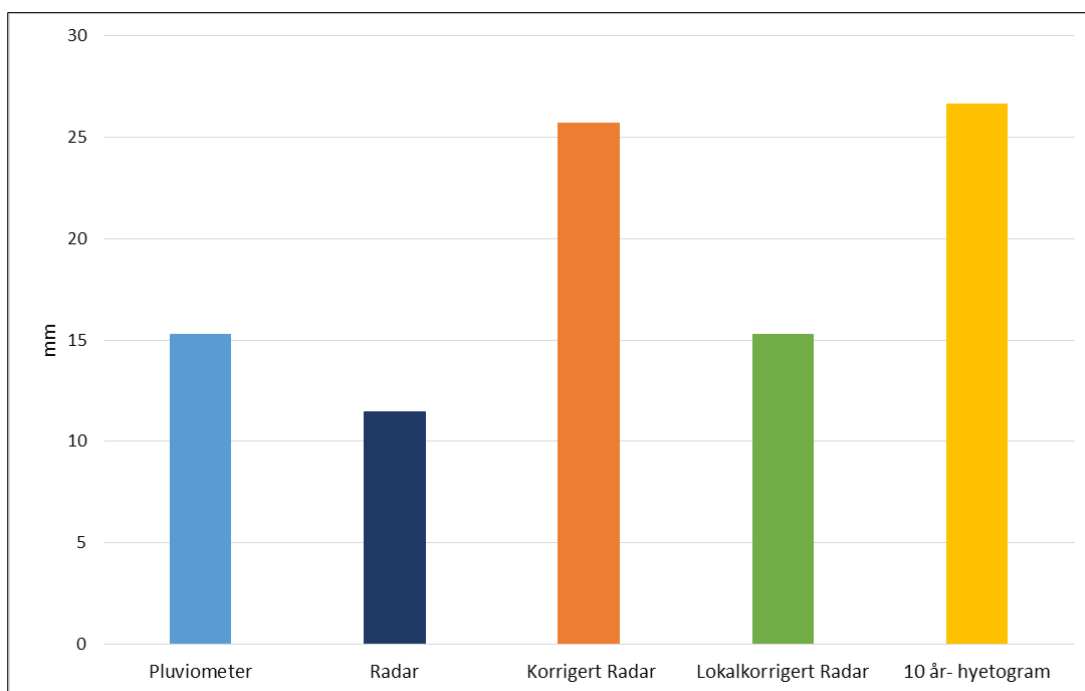
Tidsintervall	Σ Pluviometer [mm]	Σ Radar [mm]	Lokal Korreksjonsfaktor
12.30-12.39	0	0	-
12.40-12.49	0	0	-
12.50-12.59	0	0	-
13.00-13.09	0	0	-
13.10-13.19	0	0	-
13.20-13.29	0	0,04	-
13.30-13.39	0	0	-
13.40-13.49	0	1,01	-
13.50-13.59	0,1	2,57	0,04
14.00-14.09	4,7	3,58	1,31
14.10-14.19	4,3	0,92	4,67
14.20-14.29	1,3	0,14	9,29
14.30-14.39	0,6	0,13	4,62
14.40-14.49	0,5	0,65	0,77
14.50-14.59	0,6	0,35	1,71
15.00-15.09	1,1	0,85	1,29
15.10-15.19	1,2	0,58	2,07
15.20-15.29	0,5	0,44	1,14
15.30-15.39	0,4	0,22	1,82

De lokale korreksjonsfaktorene for Danvik nedbørstasjon er multiplisert med minuttverdier fra det ukorrigerede radardatasettet. Resultatet er fremstilt i Figur 4-4 sammen med korreksjonsfaktoren basert på alle nedbørstasjoner, det ukorrigerede radardatasettet og verdiene fra pluviometeret.



Figur 4-4: Nedbørintensitet ved Danvik nedbørstasjon den 11. juli 2016.

Totalt akkumulert nedbør for nedbørepisodens mest intense periode er beregnet for Danvik nedbørstasjon. Figur 4-5 gir en oversikt over verdier fra pluviometer, ukorrigert, korrigert og lokalkorrigert radarverdi for tilhørende rute samt 10-års regnhyetogram basert på det korrigerte radardatasettet. Lys blå søyle er målt verdi på stasjonens pluviometer, mørk blå søyle er akkumulert verdi i tilhørende radarrute, oransje og grønn søyle er beregnede verdier for henholdsvis korrigert og lokalkorrigert radardatasett. Gul søyle viser akkumulert nedbør for et 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon.



Figur 4-5: Totalt akkumulert nedbør ved Danvik nedbørstasjon den 11. juli 2016 mellom klokken 13.40 og 14.20.

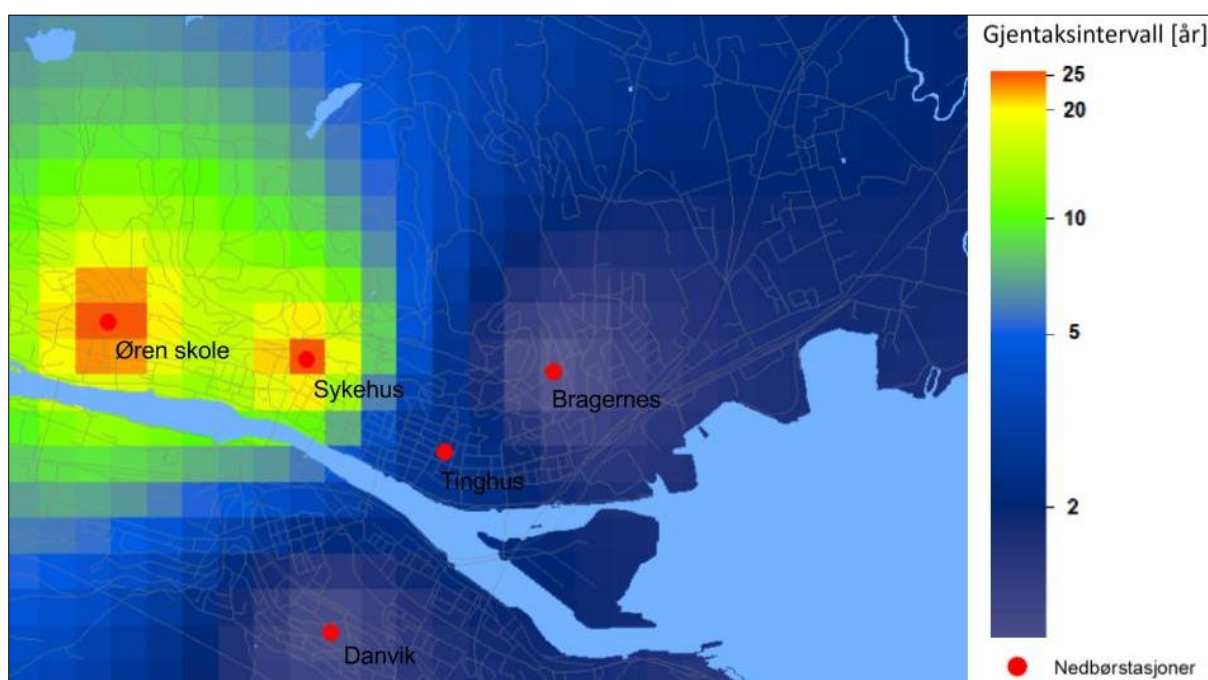
4.3 Gjentaksintervallkart

4.3.1 Gjentaksintervall for 40 minutters varighet basert på nedbørstasjoner

Tabell 4-4 viser akkumulert nedbør og tilhørende gjentaksintervall på de syv nedbørstasjonene i analyseområdet. Gjentaksintervallene er beregnet med utgangspunkt i IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon for hendelsens mest intense 40 minutter i tidsintervallet 13.40–14.20. Figur 4-6 viser tilhørende gjentaksintervallkart. Kartet er produsert ved bruk av invers avstandsvektet interpolering som forklart i kapittel 3.1.6.

Tabell 4-4: Gjentaksintervall i nedbørstasjonene med varighet på 40 minutter i tidsintervallet 13.40-14.20.

	Varighet [min]	Akkumulert nedbør [mm]	Gjentaksintervall [år]
Åssiden	40	20,5	2-5
Øren skole	40	32,3	25
Sykehus	40	32,1	25
Tinghus	40	16,2	2-5
Bragernes	40	8	< 2
Danvik	40	9.1	< 2
Solumstrand	40	0	0



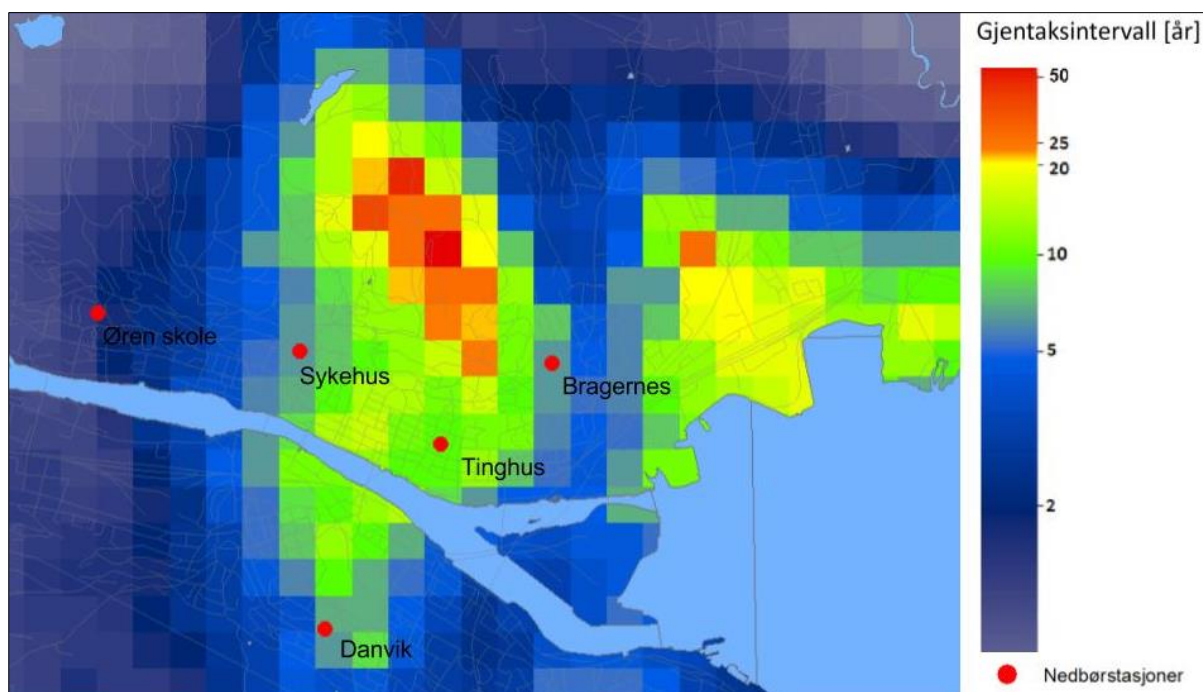
Figur 4-6: Gjentaksintervallkart for 40 minutters varighet. Kartet er produsert med utgangspunkt i nedbørstasjonene og ved bruk av invers avstandsvektet interpolering og gjentaksintervallene i IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon.

4.3.2 Gjentakintervall for 40 minutters varighet fra værradardata

Tabell 4-5 viser akkumulert nedbør og tilhørende gjentakintervall for de korrigerede værradardataene i rutene over nedbørstasjonene. Gjentakintervallene er beregnet med utgangspunkt i IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon for nedbørhendelsens mest intense 40 minutter i tidsintervallet 13.40-14.20. Nederste rad i tabellen viser maksimalt akkumulert nedbør på de 40 minuttene og tilhørende gjentakintervall. Området med høyest akkumulert nedbør ligger om lag tre kilometer nord for nedbørstasjonen «Tinghus» med et gjentakintervall på om lag 50 år. Området er markert med rødt i gjentakintervallkartet i Figur 4-7.

Tabell 4-5: Gjentakintervall i korrigeret værradardata for 40 minutters varighet. Nederste rad i tabellen viser maksimalt akkumulert nedbør og tilhørende gjentakintervall over analyseområdet.

	Varighet [min]	Akkumulert nedbør [mm]	Gjentaksintervall [år]
Åssiden	40	8	< 2
Øren skole	40	13,5	< 2
Sykehus	40	23,5	5- 10
Tinghus	40	26	10
Bragernes	40	23,5	5 -10
Danvik	40	24	5 -10
Solumstrand	40	0	0
Maksimalt verdi	40	36	50



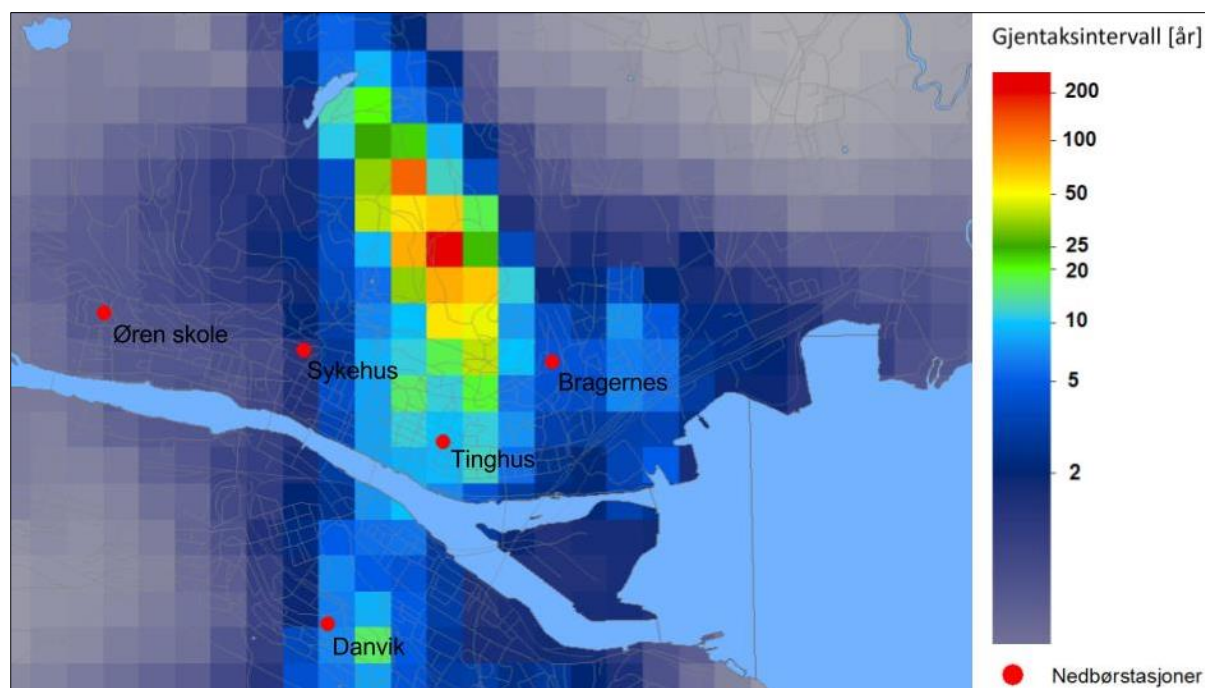
Figur 4-7: Gjentakintervallkart for 40 minutters varighet. Kartet er produsert med utgangspunkt i korrigerede værradardata og gjentakintervallene i IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon.

4.3.3 Gjentakintervall for 10 minutters varighet fra værradardata

Tabell 4-6 viser akkumulert nedbør og tilhørende gjentakintervall for de korrigerede værradardataene i rutene over nedbørstasjonene. Gjentakintervallene er beregnet med utgangspunkt i IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon for nedbørhendelsens mest intense 10 minutter i tidsintervallet 14.00-14.10. Nederste rad i tabellen viser maksimal akkumulert nedbør på gitt varighet og tilhørende gjentakintervall. Høyeste akkumulerte nedbør tilsvarer mer enn et 200-års regn, og er i det samme området som i Figur 4-7. Området er markert med rødt i gjentakintervallkartet i Figur 4-8.

Tabell 4-6: Gjentakintervall i korrigerede værradardata med 10 minutters varighet. Siste rad viser maksimalt akkumulert nedbør og tilhørende gjentakintervall over analyseområdet.

	Varighet [min]	Akkumulert nedbør [mm]	Gjentaksintervall [år]
Åssiden	10	3	< 2
Øren skole	10	5	< 2
Sykehus	10	7,5	< 2
Tinghus	10	13,5	10
Bragernes	10	11	5
Danvik	10	12	5-10
Solumstrand	10	0,4	0
Maksimal verdi	10	22	> 200

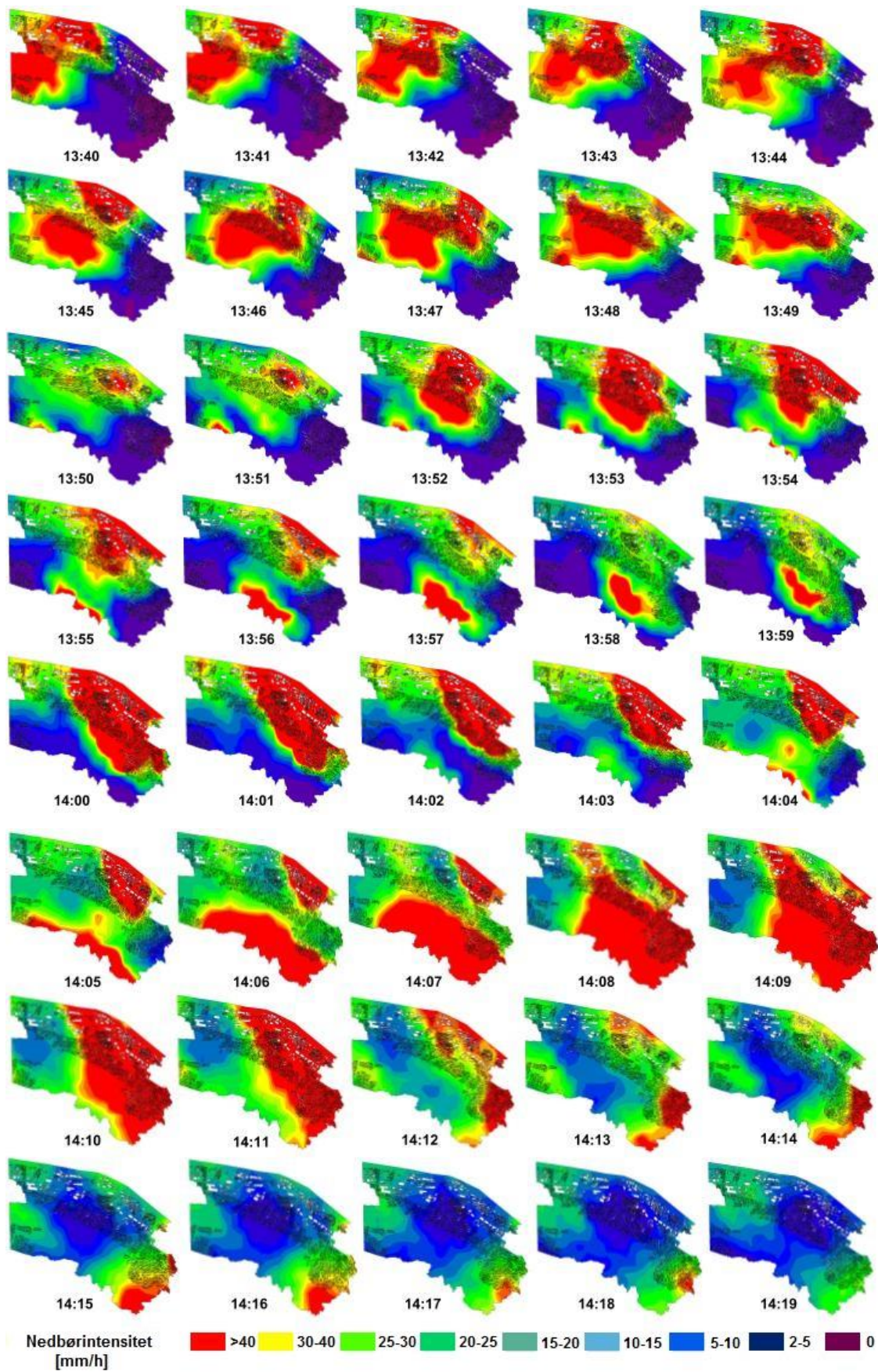


Figur 4-8: Gjentakintervallkart for 10 minutters varighet. Kartet er produsert med utgangspunkt i korrigerede værradardata og gjentakintervallene i IVF-kurven fra Asker nedbørstasjon.

4.4 Nedbørdata fra værradar i avrenningsmodell

4.4.1 Nedbøranalyse

Fra simuleringsresultatene er det hentet ut en tidsserie av nedbøren over modellområdet fra kjøringen med korrigert nedbør fra værradar. Figur 4-9 viser tidsserien over nedbørintensiteten for hvert minutt mellom klokken 13.40 og 14.20 over analyseområdet. Nedbøren forflytter seg i retning sydøst mot Oslofjorden og består av konvektive celler som bygges opp, fusjoneres og separeres med stor variasjon i løpet av de 40 minuttene.



Figur 4-9: Korrigert nedbørintensitet fra værradar over analyseområdet. Figuren viser intensiteten for hvert minutt, i tidsperioden 13.40 – 14.20.

4.4.2 Oversvømmelsesanalyse

Oversvømmelsesanalysene viser oversvømmelsenes utstrekning og dybde. Analysen inkluderer alle oversvømmelser som overstiger 0,05 meter. Vanndybden er visualisert med en dybdeklassifisering i ulike blåtoner inndelt i syv klasser fra 0 til 0,6 meter. Mørkere blåfarge indikerer dypere oversvømmelse. Alle resultatene som er vist i de etterfølgende figurene er hentet ut fra et mindre område rundt Marienlyst idrettspark i Strømsø bydel i Drammen. Det er markert seks områder innenfor dette området som er av spesiell interesse. Dette er:

- 1) Jernbaneundergangene langs Kreftings gate og Grønland.
- 2) Jernbaneovergang i Konnerudgata.
- 3) Parkeringskjeller under Marienlyst Stadion.
- 4) Parkeringsplass i Doktor Hansteins gate.
- 5) Parkeringsplass foran Expert i C. O. Lunds gate
- 6) Boligområde i Roseveien

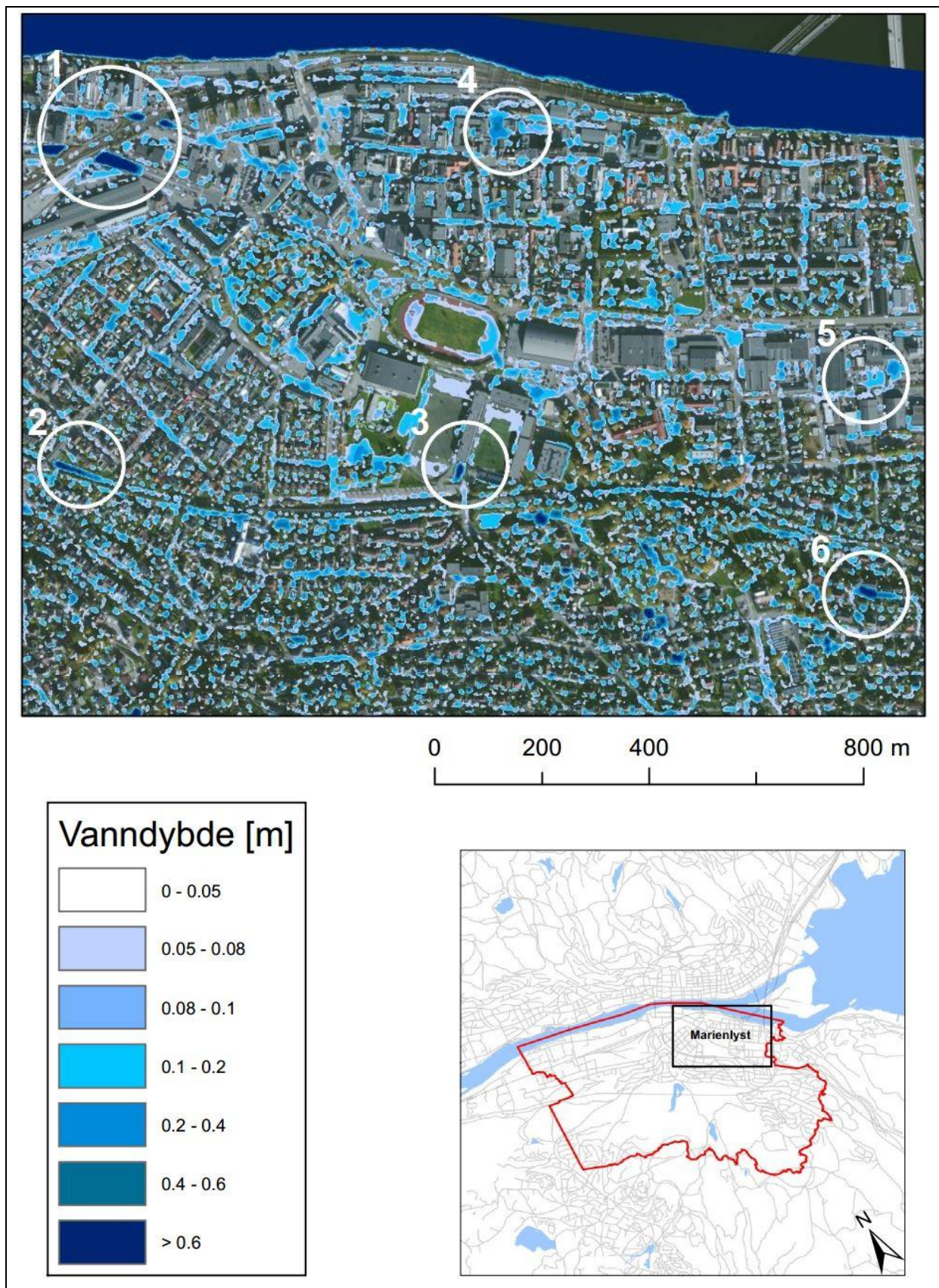
I presentasjonen av resultatene er det benyttet maksimalverdier av vanndybde. Illustrasjonene viser dermed den maksimale vanndybden i hver meshtrekant i løpet av simuleringens varighet.

Figur 4-10 viser oversvømmelsene fra modellkjøringen med korrigert nedbør fra værradar. En ser at undergangene og overgangen knyttet til jernbanen (sirkel 1 og 2) er utsatt for oversvømmelse som overstiger 0,6 meter. Det samme gjelder for nedgangen til parkeringskjelleren under Marienlyst stadion (sirkel 3). Vanndybder av denne størrelsen gjør fremkommelighet umulig og infrastruktur påføres store skader. På parkeringsplassene (sirkel 4 og 5) er oversvømmelsene større i utbredelse men har lavere dybde. Boligområdet i sirkel 6 samt et boligområde 400 meter lenger vest er også utsatt for omfattende oversvømmelser.

Figur 4-11 viser oversvømmelsene fra modellkjøringen med lokalkorrigert nedbør fra Danvik nedbørstasjon. Oversvømmelsene i jernbaneundergangene (sirkel 1) er store og overstiger 0,6 meter. Mindre oversvømmelser oppstår i jernbaneovergangen (sirkel 2) og i parkeringskjelleren (sirkel 3). Oversvømmelsene for øvrig består hovedsakelig av små dammer i forsenkninger med ubetydelige vanndybder.

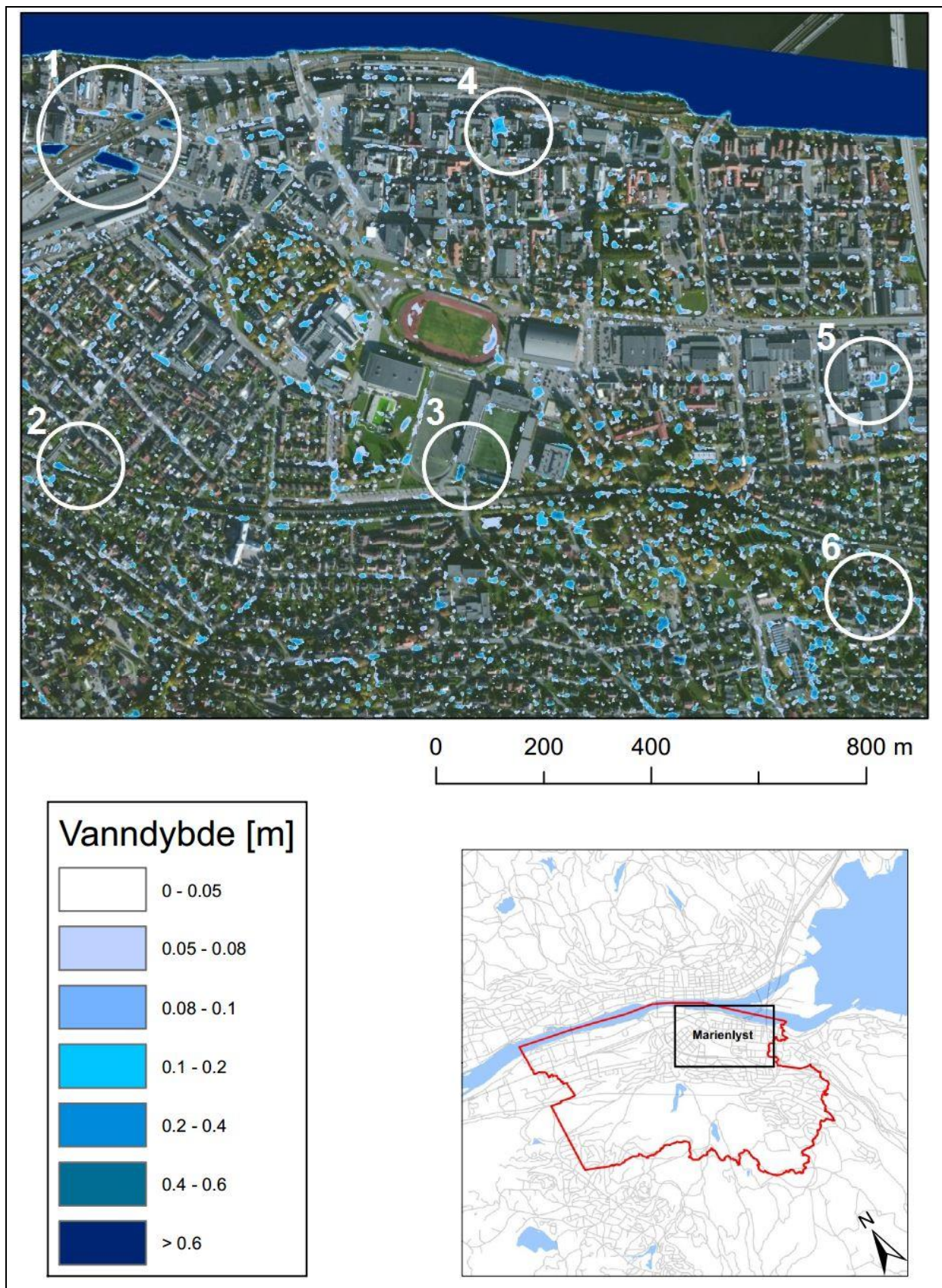
Figur 4-12 viser oversvømmelsene fra modellkjøringen med 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon. Oversvømmelsenes utbredelse er som i Figur 4-10 men en ser at vanndybden er forskjellig enkelte plasser, som på parkeringsplassen i sirkel 4 der den er større, og for overgangen i sirkel 2 og boligområdet i sirkel 6, der den er mindre.

Oversvømmelse- Korrigert nedbør fra værradar



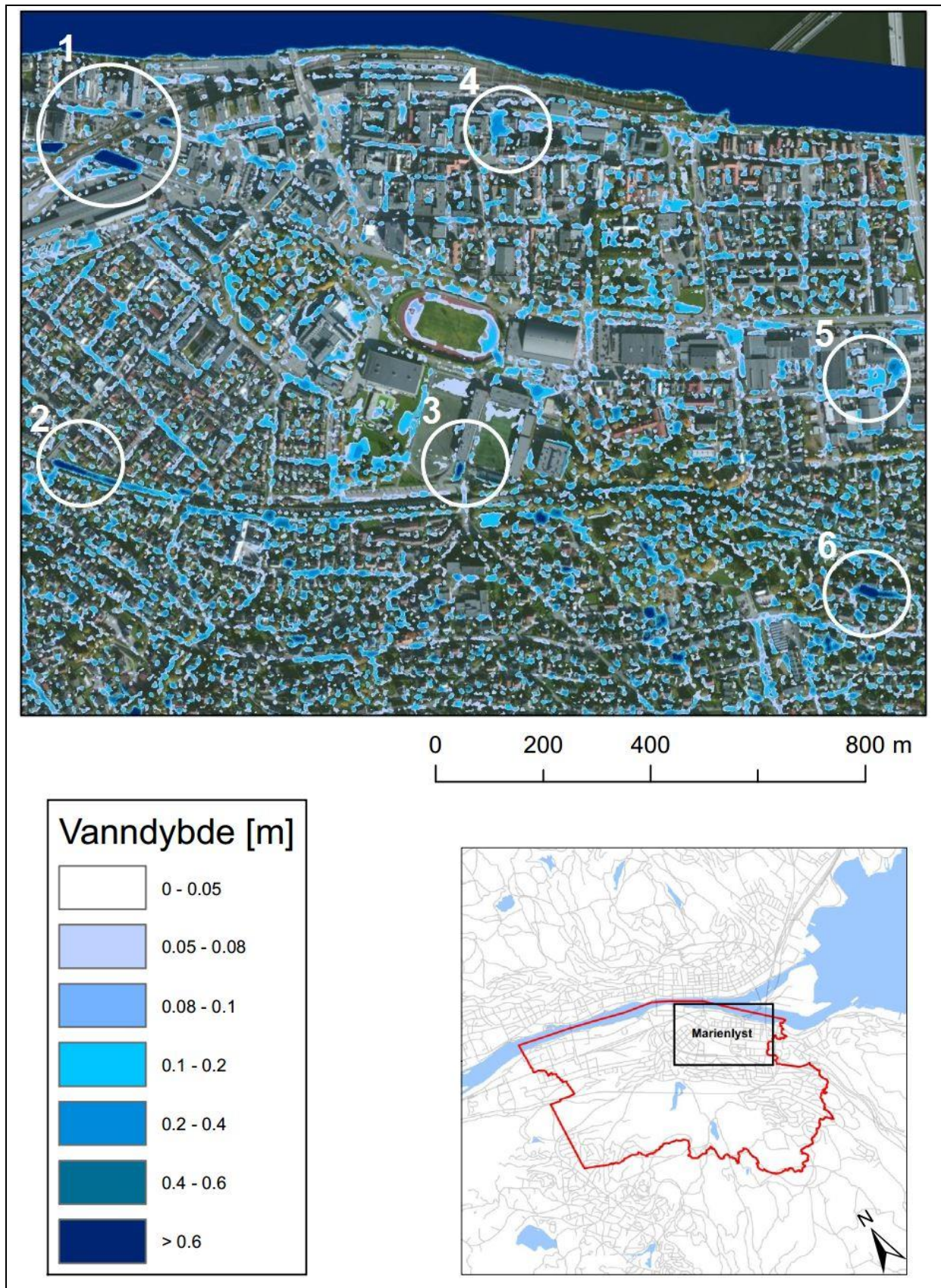
Figur 4-10: Oversvømmelseskart fra kjøring med korrigert nedbør fra værradar over et mindre område i Strømsø bydel i Drammen. Sirkler er markert rundt områder av spesiell interesse (se tekst for beskrivelse).

Oversvømmelse- Lokalkorrigert nedbør fra værradar



Figur 4-11: Oversvømmelseskart fra kjøring med lokalkorrigert nedbør fra Danvik nedbørstasjon over et mindre område i Strømsø bydel i Drammen. Sirkler er markert rundt områder av spesiell interesse (se tekst for beskrivelse).

Oversvømmelsesanalyse 10-års regnhyetogram



Figur 4-12: Oversvømmelseskart fra kjøring med 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon over et mindre område i Strømsø bydel i Drammen. Sirkler er markert rundt områder av spesiell interesse (se tekst for beskrivelse).

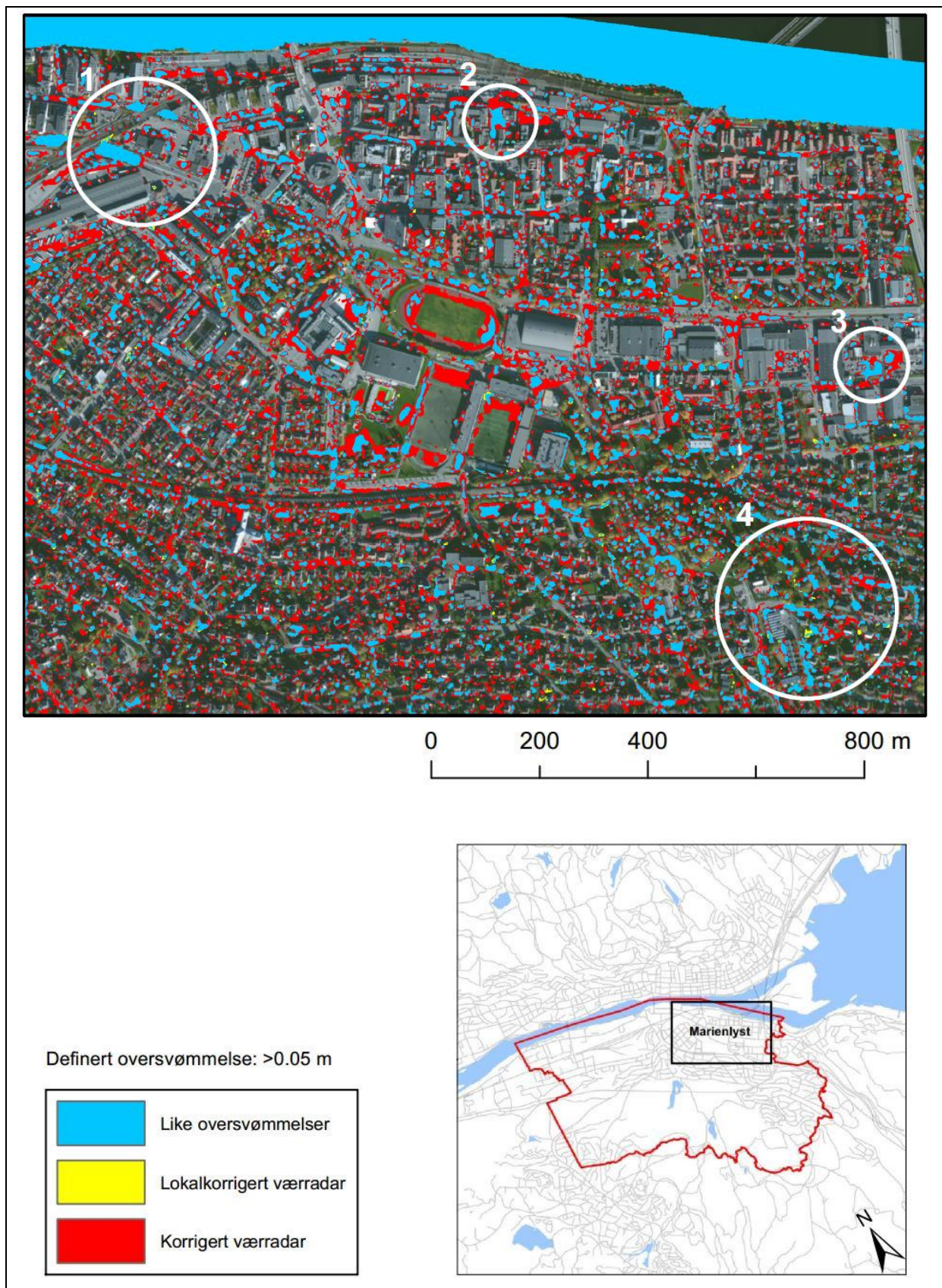
4.4.3 Sammenligningsanalyse

I sammenligningsanalysen er oversvømmelsene ved en kjøring gitt i en helhetlig farge og inkluderer alle vanddybder over 0,05 meter. Sammenligningen viser bare oversvømmelsenes utstrekning og sier ingenting om oversvømmelsens dybde. Referansekjøringen med korrigert nedbør fra værradar er vist i rødt og kjøringene med lokalkorrigert nedbør og 10-års regnhyetogram er vist i gult. Overlappende områder er illustrert i blått.

Figur 4-13 viser sammenligningen av oversvømmelsene fra kjøringene med korrigert nedbør og lokalkorrigert nedbør fra værradar. En ser at oversvømmelsene ved kjøring av lokalkorrigert nedbør er små sammenlignet med referansekjøringen. Kjøringene har de samme oversvømmelsene ved over- og undergangene i tilknytning til jernbanen (sirkel 1) på parkeringsplassen i Doktor Hansteins gate (sirkel 2), samt i større deler av boligområdet i Roseveien (sirkel 4).

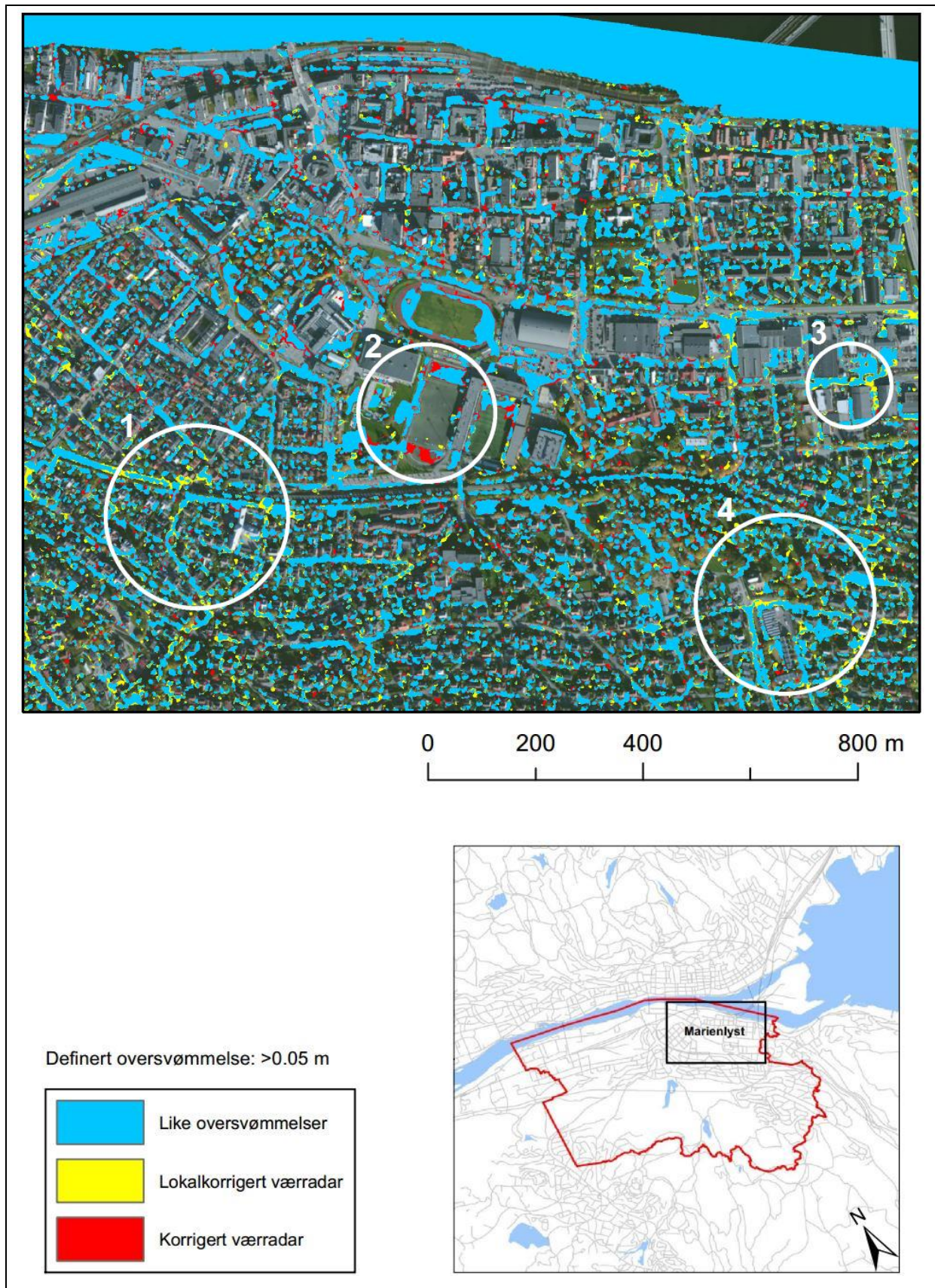
Figur 4-14 viser sammenligningen av oversvømmelsene fra kjøringene med nedbør fra korrigert værradar og 10-års regnhyetogram fra Asker nedbørstasjon. Oversvømmelsenes utbredelse sammenfaller i stor grad over det meste av analyseområdet. Oversvømmelsene i området rundt kunstgressbanen er størst for kjøringen med korrigert værradarnedbør, mens oversvømmelsene i boligområdene (sirkel 3 og 4), samt parkeringsplassen i C.O Lunds gate (sirkel 2) er størst for kjøringen med nedbør fra 10-års regnhyetogram.

Sammenligningsanalyse- Korrigert og lokalkorrigert nedbør fra værradar



Figur 4-13: Sammenligning av oversvømmelser fra kjøring med korrigert og lokalkorrigert nedbør fra værradar i et mindre område i Strømsø bydel i Drammen. Sirkler er markert rundt områder av spesiell interesse (se tekst for beskrivelse).

Sammenligningsanalyse- Korrigert nedbør fra værradar og 10-års regnhyetogram



Figur 4-14: Sammenligning av oversvømmelser fra kjøring med korrigert nedbør fra værradar og 10-års regnhyetogram fra et mindre område i Strømsø bydel i Drammen. Sirkler er markert rundt områder av spesiell interesse (se tekst for beskrivelse).

5 Diskusjon

5.1 Sammenligning av nedbørdata fra værradar og nedbørstasjoner

I oppgavens første del sammenlignes data fra nedbørstasjoner og værradar. Det er knyttet usikkerhet til både nedbørmålingene fra vippepluviometrene og fra værradaren, men det er vurdert at måleusikkerheten til vippepluviometrene for denne hendelsen er neglisjerbar. Dette både på grunn av instrumentets oppløsning i tid, med loggertid hvert minutt, og at nedbørhendelsen er av konvektiv karakter. For høye nedbørintensiteter anses oppfangersvikt og usikkerheten for et vippepluviometer som marginal, og det er derfor tatt utgangspunkt i at nedbørdataene fra nedbørstasjonene er den sanne verdi. Ved å studere grafene i Figur 4-1 og spredningsplottet i Figur 4-2 i kapittel 4 ser en at radaren underestimerer intensiteten for nesten hele perioden når vi sammenligner pikselverdier med tilhørende verdier fra nedbørstasjoner. Bare i en liten periode i starten på nedbørepisoden overstiges intensiteten fra værradaren nedbørstasjonene. Det er flere grunner til at radaren underestimerer, og det er knyttet størst usikkerhet til Z-R relasjonen beskrevet i kapittel 2.3.4. Verdiene for a og b i Z-R relasjonen er hentet fra empiriske målinger basert på lange tidsserier. Verdiene treffer godt i snitt, men er mer usikre for høye nedbørintensiteter. Det er dermed knyttet usikkerhet til konverteringen av radarreflektivitet til nedbørintensitet ved ekstreme nedbørhendelser. I tillegg er det også knyttet usikkerhet til signaldemping. I radarbildet fra 11. juli kan en observere nedbør i luftlinjen mellom radarens plassering på Helsefyr og analyseområdet i deler av perioden mellom klokken 12.30 og 15.40. Dette fører til demping av signalet til radaren, og videre til underestimering av nedbøren over analyseområdet.

Ikke-uniform vertikal profil av reflektiviteten er vanligvis en viktig feilkilde ved omgjøring av radarreflektivitet til nedbør på bakkenivå. Dette gjelder spesielt for stratiforme systemer som består av langstrakte skyer med stor vertikal variasjon. Konvekktive nedbørskyer er, i motsetning til stratiforme-, svært lokale og forplanter seg hovedsakelig i vertikal retning slik at variasjonen i reflektivitet er liten. Da hendelsen i studiet er av konvektiv karakter, samt at reflektiviteten er målt 1600 meter over bakkenivå antas det at usikkerheten knyttet til VPR-korrigeringen er lav.

Ved å studere grafene i Figur 4-1 og verdiene i Tabell 4-1 i kapittel 4 kan en se at nedbøren registreres først i radaren og så i nedbørstasjonene, og at det er en tidsforskyving mellom de to grafene. Før sammenligning er det gjort en antagelse om at nedbørdataene fra værradaren og nedbørstasjonene er målt i samme tid og rom. I virkeligheten er nedbøren først registrert i

radaren før den faller ned på bakkenivå. Dette fører til en tidsforskyving i sammenligningen mellom verdiene fra værradaren og nedbørstasjonene. I enkelte studier i litteraturen er dette tatt høyde for ved å bruke de omliggende åtte ruteverdiene i tillegg til ruten over nedbørstasjonene, enten ved å bruke gjennomsnittet av de ni rutene (Abdella & Engeland 2013; Kusiak et al. 2013), eller ved å bruke den ruten som gjør korreksjonsfaktoren minst (Silvestro et al. 2008). Ved å gjøre dette antar en at tidsforskyvningen er konstant for alle punkter i området. Fra Tabell 4-1, som presenterer avvik mellom pluviometeret og den tilhørende radarrutens maksimale verdi, kommer det frem at tidsforskyvningen ikke er konstant. Avviket mellom pluviometeret og radarens maksimale verdi varierer fra ett til 38 minutter. Den mest banale fremgangsmåten med én ruteverdi er derfor benyttet, dette for å ikke tilføre sammenligningen flere usikkerheter og gjøre resultatet mindre robust.

5.2 Korreksjon av data fra værradar

På grunn av værradarens tendens til å underestimere nedbør er datasettet korrigert mot nedbørmålingene fra nedbørstasjonene. Det ble beregnet en korreksjonsfaktor for et tidsintervall på 10 minutter for hele området basert på MF-metoden gitt av formel 8 i kapittel 2.3.5. Tidsintervallet ble valgt til å være kort nok til å få med de store variasjonene i konvektive nedbørhendelser og lang nok til å være stabil. Siden forskjellen mellom data fra værradar og nedbørstasjon er størst ved høye intensiteter er også korreksjonsfaktoren størst ved disse intensitetene. Korreksjonsfaktorene er listet i Tabell 4-2 og varierer fra 0,33 i et tidsintervall tidlig i nedbørepisoden der værradaren overestimerer, til 5,31 om lag midtveis der radaren underestimerer mest. Korreksjonsfaktoren ble multiplisert med minuttverdier fra det ukorrigerede radardatasettet og resultatet er gitt i Figur 4-3. Generelt kan en se at MF-korreksjonen fjerner en signifikant del av underestimeringen. For alle stasjonene med unntak av Åssiden kommer intensitetstoppene til samme tid og har samme varighet som for det ukorrigerede datasettet. Intensitetstoppene er dog svært høye for enkelte stasjoner, som Danvik og Solumstrand som ligger i utkanten av stasjonsnettverket. Dette er en følge av at intensitetstoppene ved disse stasjonene sammenfaller med et tidspunkt der korreksjonsfaktoren er høy. For disse stasjonene var differansen mellom data fra radar og nedbørstasjon i utgangspunktet liten slik at bruk av korreksjonsfaktor utgjør en større overestimering av radardataene enn hva de underestimerte i utgangspunktet. For de øvrige stasjonene er intensitetstoppene i det korrigerede datasettet bredere og gir mer nedbør på stasjonene. Dette forklares med at MF-korrigerer gir én felles faktor for hele feltet slik at faktoren er høy over en lengre periode som en følge av at intensitetstoppene forskyves i feltet med tid. Det er tydelig

at MF-metodens manglende romlige oppløsning gir utslag i datasettet og dette er også metodens svakhet.

For å ta høyde for den romlige variasjonen mellom punktmålingene er det i litteraturen benyttet ulike interpoleringsmetoder mellom korreksjonsfaktorene på nedbørstasjonene (Haberlandt 2007; Krajewski 1987; Lussana et al. 2016; Sinclair & Pegram 2005). Slike metoder kan gi bedre prediksjoner men gir samtidig mindre robuste modeller. For at en slik metode skal kunne brukes må det foreligge et tilstrekkelig stort tallmateriale til at det kan vises en romlig korrelasjon mellom korreksjonsfaktorene. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i syv nedbørstasjoner over en forholdsvis kort tidsperiode og dette utgjør et for spinkelt tallmateriale til å kunne trekke generelle konklusjoner (Webster & Oliver 1993). For ikke å tilføre datasettet en ekstra usikkerhet som ikke kan gjøres rede for ble derfor den enkleste metoden benyttet.

Danvik nedbørstasjon ligger innenfor analyseområdet til avrenningsmodellen. På grunn av korreksjonsfaktorens store utslag i intensitetstoppene for denne stasjonen ble en lokal korreksjonsfaktor også beregnet og testet i avrenningsmodellen. Denne metoden gir mer nøyaktige resultater for den aktuelle ruten over nedbørstasjonen, samtidig som usikkerheten øker med avstanden fra nedbørstasjonen. Fra Figur 4-4 ser en at de to korrigerede datasettene gir store forskjeller i nedbørintensitet. Den høyeste intensitetstoppen fra det korrigerede datasettet reduseres betraktelig i det lokalkorrigerede datasettet samtidig som store deler av forregnet kuttes da pluviometeret ikke registrerte noe nedbør før 15 minutter etter radaren. Det må understrekes at korreksjonsfaktorene benyttet i denne oppgaven er svært usikre og kun er ment som en indikasjon for å teste om radardataene er egnet som inngangsdata i avrenningsmodellen.

5.3 Data fra værradar i avrenningsmodell

Oppgavens primære målsetning har vært å finne en metodikk for å bruke data fra værradar i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell. Det var ønskelig å finne en metode der rådata fra værradaren kunne anvendes direkte med den oppløsningen de var målt. Fra en tidligere metodikkoppgave ved NMBU (Johansen & Moldekleiv 2016) er det produsert en avrenningsmodell basert på et terrengraster med oppløsning på 4x4 meter. Siden Helsfyrradaren produserte nedbørdata med oppløsning på 250x250 meter, kunne ikke disse lagene benyttes sammen i avrenningsmodellen. Problemet ble løst ved at en ny terrenngmodell ble bygd i ustrukturerte trekanten i MIKE Zero-verktøyet *Mesh Generator*. Den store fleksibiliteten til modellen gir mulighet til å kombinere lag med ulik oppløsning. Salmonsson (2015) har

sammenlignet modeller basert på flexible mesh og raster og finner ingen signifikante forskjeller i simuleringsresultat.

Det er kjørt over 40 simuleringer for å komme frem til de tre resultatene presentert i kapittel 4. Fra en kjøring til den neste er det testet ulike valg for parametere i kjøringssoppsettet. Dette er gjort for å se hvordan valgene påvirker beregningstiden, samt hvor detaljert beregningsnivå simuleringene kan ha før programmet får stabilitetsproblemer og terminerer. Ved oppbygging av modellen kom det frem at terrengmodellens mesh-oppløsning kan gjøre store utslag, både hva gjelder nøyaktighet og simuleringstid. Det ble testet med ulike størrelser på trekantene før vi kom frem til en størrelse som gav en tilstrekkelig detaljert terrengbeskrivelse og overkommelig beregningstid.

Ved bruk av nedbør fra værradar er det tidvis svært lite nedbør i analyseområdet. MIKE 21 er opprinnelig utviklet for kyst- og havsimuleringer der det er vann i modellområdet til enhver tid og de fleste ruter i terrengmodellen er med i beregningene under hele simuleringen. Til simulering av urbane flommer med værradardata må en derfor sette de bevegelige grensene «flood and dry» tilstrekkelig lavt for å inkludere ruter med lite vann i beregningene. Resultatene fra de ulike testsimuleringene viste at små endringer i de bevegelige grensene gav store utslag på avrenning i modellen. Valgte verdier for parametere i modelloppsettene i kapittel 3.2.9 var de laveste verdiene programmet aksepterte uten å terminere. De bevegelige grensene var også parameterne som gav størst utslag på beregningstiden ved simulering. Ved større nedbørhendelser antas det at en kan bruke større verdier for de bevegelige grensene og at beregningstiden følgelig blir mindre. Tidssteg var en annen parameter med innvirkning på modellens beregningstid. En dobling i tidssteg halverte simuleringstiden, men parameteren er begrenset til å oppfylle kravet knyttet til CFL-tallet (kapittel 2.5). Parameteren har for øvrig ingen innvirkning på detaljnivået i modellresultatene.

5.3.1 Modellresultater

Ved bruk av nedbør i en avrenningsmodell er det hovedsakelig mengden nedbør over ett gitt tidsrom som gir utslag i avrenning og ikke nødvendigvis størrelsen på øyeblikkintensiteten. Figur 4-5 gir en oversikt over totalt akkumulert nedbør fra pluviometeret på Danvik nedbørstasjon, radardata i tilhørende radarrute, samt korrigert og lokalkorrigert nedbør og 10-års regnhyetogram. En ser at fra Danvik nedbørstasjon er totalt akkumulert nedbør fra det korrigerede radardatasettet betydelig større enn fra både det ukorrigerede radardatasettet og pluviometeret. Dette skyldes at datasettet er påvirket av intensitetstoppene på alle de syv

nedbørstasjonene slik at toppene er bredere og større og gir mer nedbør enn det opprinnelige datasettet. Det lokalkorrigerede datasettet viser derimot, som forventet, samme mengde nedbør som målt i vippepluviometeret og nedbørutviklingen er den samme som for det ukorrigerede radardatasettet. Det må understrekes at verdiene gitt i Figur 4-5 i teorien kun er gyldige for et areal tilsvarende vippepluviometerets oppsamlingsskål, men siden modellområdet bare er på 10 km², argumenterer resultatet for at nedbørdataene i det lokalkorrigerede radardatasettet gir mer riktige resultat i modellkjøringene sammenlignet med datasettet basert på alle nedbørstasjonene. For større modellområder ville muligens det korrigerede datasettet representert et bedre estimat. Dersom tallmaterialet hadde vært tilstrekkelig til å påvise romlig korrelasjon mellom korreksjonsfaktorene på nedbørstasjonene, ville en metode basert på interpolering mellom stasjonene gitt best resultat.

Resultatet fra Danvik nedbørstasjon gjenspeiles i utbredelsen av oversvømmelser i de ulike simuleringene. Modellkjøringen med lokalkorrigert nedbør fra værradaren gir minst oversvømmelser, mens kjøringene basert på det korrigerede radardatasettet gav flere og større oversvømmelser. Spesielt områdene rundt jernbaneundergangen langs Kreftings gate, jernbaneovergangen i Konnerudgata og parkeringskjelleren ved Marienlyst stadion peker seg ut som svært utsatt i alle modellkjøringene. Disse områdene var også flomutsatte i studiene til Johansen og Moldekleiv (2016) og Abry (2016).

5.3.2 Avrenningsmodellens usikkerhet

I samtlige modellkjøringene er det sett bort i fra infiltrasjon. Det vil si at all nedbør vil renne av og/eller samles i forsenkninger. Forenklingen er grov, da permeable områder vil kunne infiltrere en god del vann avhengig av type løsmasser og løsmassenes tykkelse. Dette kommer også frem av et tidligere studie på samme analyseområde (Abry 2016). De lavtliggende områdene i området rundt Drammenselva er marine avsetninger og består hovedsakelig av leire overdekket av sand og grus. Overdekket forventes å ha god infiltrasjonsevne men overdekkets dybde gjør at infiltrasjonskapasiteten fylles etter kort tid. I forkant av den valgte nedbørhendelsen den 11. juli 2016 var det en mindre nedbørepisode. Ved å anta at denne episoden har tatt opp infiltrasjonskapasiteten til løsmassene framstår forenklingen som plausibel. Det er også antatt at evaporasjon utgjør en så liten del av nedbøren at den kan neglisjeres. Prosessen er også for treg til å gi signifikant effekt.

Det er også knyttet en usikkerhet til forenklingen av overflatens ruhet. Det ble valgt en konstant ruhet over hele området noe som betyr at nedbøren vil strømme med samme hastighet på

overflaten uavhengig av underlag. I den virkelige verden forventes det at vannet har høyere hastighet på asfalt og andre glatte underlag sammenlignet med gress- og andre vegetasjonsdekte arealer. Når vannet bremses forsinkes vannet slik at flomtoppen, og dermed oversvømmelsen blir mindre. Abry (2016) kom i sitt studie frem til at overflatens ruhet har liten innvirkning på oversvømmelsenes størrelse og omfang. Det antas derfor at denne usikkerheten ikke er betydelig.

Også terrengmodellen er beheftet med usikkerhet. Siden terrenget er helt avgjørende for hvordan vannet renner av på overflaten etter en nedbørhendelse, kan feil i terrengmodellen gi store utslag i avrenningsmodellen. Laserdatasettet som ble benyttet som grunnlag for terrengmodellen har høy måletetthet og en måleusikkerhet på +/- 10 centimeter. Det ble produsert et punktdatasett fra disse dataene med oppløsning 0,5x0,5 meter slik at en kan forvente at måleusikkerheten ikke utgjør store feil. Laserdataene ble målt inn i 2010 og med dagens byutvikling kan det tenkes at en ny innmåling ville gi noen forskjeller i resultat. Fra punktdatasettet ble det laget trekanter med størrelse på 10 og 20 m². Mindre trekanter ville gi en mer nøyaktig beskrivelse av terrenget samtidig som terrengmodellen ville blitt svært datakrevende og ført til lange simuleringer og ustabiliteter. På bakgrunn av tidligere analyser (Abry 2016; Johansen & Moldekleiv 2016; Salmonsson 2015) og anbefalinger fra Engineers Australia (2012) antas det at gjeldende oppløsning er tilstrekkelig.

Ved bruk av radardata har det ikke vært mulig å ta høyde for ledningsnettets kapasitet. Dette tilfører simuleringsresultatene en usikkerhet, spesielt for nedbørepisoder med størrelse tilsvarende gjentaksintervallet benyttet i denne oppgaven. Ved bruk av konstruerte regn er vanlig prosedyre å trekke fra et gjentaksintervall fra nedbøren som ledningsnettets er dimensjonert for. Gammel dimensjoneringsnorm for ledningsnett i Norge var 10 år (TA-550 1979), slik at all nedbøren som kom den 11. juli 2016 potensielt kunne blitt transportert i ledningsnettets. Resultater fra studiet til Johansen og Moldekleiv (2016) tyder på at kapasiteten til ledningsnettets i Drammen sentrum har mindre kapasitet enn dimensjoneringsnormen tilsier, noe også oversvømmelsen hendelsen medførte tyder på. Ved større nedbørepisoder er det akseptabelt å anta at ledningsnettets kapasitet utgjør lite sammenlignet med hendelsens omfang. Modellens manglende evne til å inkludere ledningsnettets kapasitet framstår likevel som en stor ulempe, men kan løses ved at avrenningsmodellen kobles sammen med en hydraulisk ledningsnettmodell i MIKE Flood. Dette vil igjen medføre et betydelig merarbeid i etablering av modellen og lengre simuleringstid.

Modeller av typen benyttet i denne oppgaven kan i beste fall representere en tilnærming av virkeligheten og som det fremgår er avrenningsmodellen i denne oppgaven beheftet med stor usikkerhet. Det må understrekes at det ikke er modellresultatene i seg selv som er målet for oppgaven, men metodikken bak resultatene.

5.4 Gjentakintervallkart

Vanlig modelleringspraksis i dag er å benytte konstruerte nedbørepisoder fra nedbørstasjoner som inngangsdata i modeller. Statistikk basert på nedbørstasjonens tidsserie er bestemmende for hendelsens gjentakintervall og gjentakintervallet er gjeldende for hele modellområdet.

Ved sammenligning av gjentakintervallkartene fra nedbørstasjonene og værradaren (Figur 4-6 og Figur 4-7) ser en at nedbørstasjonene ikke klarer å fange opp områdene med den mest intense nedbøren, og at de dermed underestimerer hendelsens omfang. Tilsvarende funn er også gjort i lignende studier (Abdella & Engeland 2013; Lepioufle 2015; Pedersen et al. 2009). Nettverket av nedbørmålere i analyseområdet er et av de tetteste i Norge, og det er rimelig å tro at underestimeringen er større der nettverket er mer spredt. Gjentakintervallkartene fra værradaren (Figur 4-7 og Figur 4-8) viser også hvor store lokale variasjoner det er i akkumulert nedbør og dermed gjentakintervall innad i analyseområdet. Dette understreker hvor usikkert det er å benytte nedbør med det samme gjentakintervallet over et større modellområde. Kartene er produsert med utgangspunkt i IVF-kurven fra Asker nedbør stasjon. Dette gir en viss usikkerhet, men formålet med kartene har hovedsakelig vært å diskutere ulikhet i romlig oppløsning mellom værradar og interpolerte verdier fra nedbørstasjoner, samt å belyse variasjonene i gjentakintervall innad i analyseområdet.

Øren skole og Sykehus var de to nedbørstasjonene som registrerte mest nedbør i løpet av hendelsen (Figur 4-6). I det tilsvarende kartet fra værradaren (Figur 4-7) ser en at de samme nedbørstasjonene er av stasjonene som fikk minst nedbør. Dette gir grunn til å diskutere tidsforskyvningen fra nedbøren måles som refleksivitet 1600 meter over bakkenivå til den måles på nedbørstasjonene. Det er mulig at en ved å sammenligne radardataene med et forskjøvet datasett fra nedbørstasjonene kunne fått et mer samsvarende resultat. Dette er ikke studert videre i denne oppgaven.

5.5 Bruk av værradar til varsling av pluviale flommer

En værradars hovedfunksjon er å varsle kommende nedbør, til forskjell fra bakkemålinger som alltid vil være et verktøy for analyser og statistikk. Ved å benytte sanntidsobservert data fra

værradar i en avrenningsmodell vil en kunne predikere oversvømmelser og pluviale flommer. Drift av ledningsnett, renseanlegg og fordrøyningsvolum kan optimaliseres og tilpasses til å ha mottaksevne for varslet nedbørmengde. Det kan iverksettes stenging av veier og tunneler, styring av flommen høyere oppe i nedbørfeltet, og settes ut flomdempende tiltak for utsatte områder. På den måten kan en redusere skadeomfang og kostnader ved ekstreme nedbørhendelser og påfølgende pluviale flommer.

Underestimering av nedbør i værradaren har vist seg å være signifikant og dataene bør korrigeres for før de anvendes i en avrenningsmodell. Korreksjonen mot bakkemålinger kan først skje etter at nedbøren har falt på bakken. Kombinasjonen av urbane nedbørsfelts raske responstid og konvektiv nedbørs korte varighet kan føre til at flommen allerede har forløpt før korrigeringen er gjennomført. Meteorologisk institutt opererer i dag sanntidsvarsling fra værradar der mengden nedbør klassifiseres i fem intervaller mellom «lett» og «kraftig». En tilsvarende klassifisering for flomvarsling vil kunne være aktuelt da det først og fremst er viktig med et varsel på om et område er flomutsatt framfor hvor stor flommen blir. For at et slik system skal fungere, må det stilles spørsmål til varslingsnivå. For lav terskel vil føre til varslinger uten at flommer oppstår, og for høy terskel vil kunne føre til at store flommer ikke varsles. Begge deler vil skape mistillit til systemets pålitelighet.

For at varsling av pluviale flommer skal kunne bli en realitet kreves et større dekningsnett av x-båndradarer. Per i dag eksisterer det kun én mobil x-bånd radar i Norge. Meteorologisk institutt drifter et stort nettverket av c-båndradarer, men c-båndradarenes lave oppløsning tilfører ytterligere usikkerhet til nedbørdataene i modellen. Dette er tilfellet også utenfor Norge og fremstår som en av årsakene til at det eksisterer få operasjonelle pluviale flomvarslings-systemer (René et al. 2014).

Når det gjelder avrenningsmodellenes egnethet til varsling av flom er det hovedsakelig modellenes beregningstid som er begrensende. Simulering av pluviale flommer er svært datakrevende og modellenes kompleksitet er økende. Modellen benyttet i denne oppgaven hadde en beregningstid på mellom 47 og 51 timer, noe som ikke er tilstrekkelig til å kunne varsle pluviale flommer innenfor en tidsramme som gjør det mulig å iverksette flomdempende tiltak. Dersom ledningsnettet inkluderes vil beregningstiden øke. I lys av teknologiutviklingen ventes det at dette ikke vil være en begrensende faktor i fremtiden.

5.6 Videre arbeid

Metoden for å korrigere værradardataene i denne oppgaven er enkel og resultatene viser at metoden gir opphav til usikkerhet. I videre arbeid anbefales det å benytte data fra flere nedbørstasjoner enn det er benyttet i denne oppgaven for å kunne si noe om den romlige korrelasjonen i korreksjonsfaktorene. Dersom en romlig korrelasjon kan påvises, kan korreksjonsfaktorene interpoleres slik at den romlige variasjonen opprettholdes. Dette kan gi mer representative værradardata.

I denne oppgaven er det ikke tatt hensyn til ledningsnettets kapasitet i simuleringene. Det ville derfor vært interessant å se effekten av å koble avrenningsmodellen sammen med en hydraulisk ledningsnettmodell over det samme analyseområdet.

Utviklingen innenfor radarteologi, modellering og datakapasitet er stor. Det anbefales derfor at det jobbes videre med problemstillingen slik at værradar kan benyttes til varsling av pluviale flommer i fremtiden.

6 Konklusjon

Det er utarbeidet en metodikk for å anvende nedbørdata fra værradar i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell. Ved å benytte en terrengmodell basert på ustrukturerte trekanter kunne dataene fra værradaren anvendes direkte på den oppløsningen i tid og rom de var målt.

For å studere værradardatas egnethet i en avrenningsmodell er nedbørdata fra værradar og nedbørstasjoner sammenlignet for en nedbørhendelse av konvektiv karakter. Resultatene viser at værradaren underestimerer nedbøren for alle intensiteter, og at feilen er økende med økt intensitet. Underestimeringen skyldes feil ved konvertering av målt radarreflektivitet til nedbør, og gjør nedbørdata fra værradar på sin opprinnelige form mindre egnet som inngangsdata i avrenningsmodeller.

For å bedre den kvantitative kvaliteten til værradaren er nedbørdataene korrigert mot nedbørstasjonene på bakkenivå. I simuleringene er det testet ut to ulike korrigerede datasett, der ett er korrigert mot syv nedbørstasjoner som alle er innenfor tre kilometer fra modellområdet, og ett er korrigert mot én nedbørstasjon innenfor modellområdet. Resultater fra simuleringene viser at valg av korreksjonsmetode har stor innvirkning på avrenningen. Det lokalkorrigerede datasettet får betydelig mindre avrenning som en følge av at datasettet beholder nedbørens opprinnelige utvikling på nedbørstasjonen. Det ble også kjørt en simulering ved bruk av et regnhyetogram med samme intensitet som det korrigerede datasettet. Resultatene fra denne sammenligningen viste ingen nevneverdige ulikheter.

Det er produsert gjentaksintervallkart basert på målte verdier på nedbørstasjonene og korrigerede værradardata. Sammenligning av kartene viser at det interpolerte kartet fra nedbørstasjonene ikke fanger opp de mest intensive og nedbørrike områdene for hendelsen og dermed underestimerer det høyeste gjentaksintervallet i analyseområdet. Kartene viser også verdien av den romlige oppløsningen en værradar kan tilføre avrenningsmodellen.

For at værradardata skal benyttes i avrenningsmodeller som et verktøy for å varsle pluviale flommer må den kvantitative kvaliteten til nedbørdataene forbedres. I tillegg må simuleringstiden reduseres til en tid som gjør det mulig å iverksette flomdempende tiltak.

7 Referanser

- Abdella, Y. S. & Alfredsen, K. (2010). Long-term evaluation of gauge-adjusted precipitation estimates from a radar in Norway *Hydrology Research*, 41 (3-4): 171-192.
- Abdella, Y. S., Engeland, K. & Lepioufle, J. M. (2012). Evaluation of radar-derived precipitation estimates using runoff simulation: SINTEF Energi AS. 20 s.
- Abdella, Y. S. & Engeland, K. (2013). Bruk av værradardata for beregning av gjentakintervallkart for ekstreme nedbørshendelser. *VANN*, 48 (2): 162-174.
- Abdella, Y. S. (2016). *Quantitative estimation of precipitation from radar measurements-analysis and tool development*. Ph.D. Thesis Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Department of Hydraulic and Environmental Engineering. 142 s.
- Abry, K. (2016). *Modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS og MIKE 21 med fokus på overflateruhet og infiltrasjon*. Master thesis. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi.
- Adam, J. A. (2003). The Confluence of Nature and Mathematical Modeling. I: *Mathematics in Nature: Modelling patterns in the Natural World*, s. 1-16: Princeton University Press.
- Alfsen, K. H. (2001). Klimaet er i endring. *CICERO Policy note*, 2001:02. Oslo: Center for International Climate and Environmental Research (CICERO).
- Battan, L. J. (1973). *Radar Observations of the Atmosphere* The University of the Chicago Press.
- Butler, D. & Davies, J. W. (2010). *Urban Drainage*. 3. utg.: Taylor and Francis.
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R. & Markhus, E. (1997). *Anvendt Urbanhydrologi, 1997:10*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. 194 s.
- Dannevig, P. & Harstveit, K. E. (2017). *Klima*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/klima> (lest 25.01.2016).
- DHI. (2016a). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM-Hydrodynamic and Transport module, Scientific Documentation. Hørsholm, Denmark.
- DHI. (2016b). Mike 21 Flow Model FM-Hydrodynamic Module, User Guide. Hørsholm, Denmark.
- DHI. (2016c). MIKE Software Catalogue 2016. Hørsholm, Denmark.
- Dingman, S. L. (2002). *Physical hydrology*. 2. utg. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall.
- Drammen kommune. (2015). *Kommuneplanens arealdel 2014-2036 Veileder for overvannshåndtering i Drammen*. 32 s.
- Drammens Tidende. (2007). *Venter oversvømmelser* Tilgjengelig fra: <https://www.dt.no/nyheter/venter-oversvømmelser-i/s/2-2.1748-1.3346846> (lest 30.03.17).
- Drammens Tidende. (2009). *Vannet skapte fullt kaos i Drammensområdet*. Tilgjengelig fra: <https://www.dt.no/nyheter/vannet-skapte-fullt-kaos-i-drammensområdet/s/2-2.1748-1.3052982> (lest 30.04.17).
- Drammens Tidende. (2012). *Venter flom og oversvømmelser*. Tilgjengelig fra: <https://www.dt.no/nyheter/venter-flom-og-oversvømmelser/s/2-2.1748-1.7422136> (lest 30.03.17).
- Drammens Tidende. (2016). *To biler tatt av vannet*. Tilgjengelig fra: <https://www.dt.no/nyhet/drammen/var/to-biler-tatt-av-vannet/s/5-57-396307> (lest 30.03.17).
- DSB. (2016). Risikoanalyse av regnflom i by: Krisescenarioer 2016-Analyser av alvorlige hendelser som kan ramme Norge Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap (DSB). 68 s.
- Einfalt, T., Jessen, M. & Mehlig, B. (2005). Comparison of radar and raingauge measurements during heavy rainfall. *Water Science and Technology*, 51 (2): 195-201.
- Engineers Australia. (2012). Project 15: Two-dimensional modelling in urban and rural floodflains. I: Babister, M. & Barton, C. (red.).

- Filipova, V. (2012). *Urban Flooding in Gothenburg-A MIKE 21 Study*. Master thesis. Lund, Sweden: Lund University, Department of Water Resources Engineering.
- Finans Norge. (2016). Statistikk og nøkkeltall for skadeforsikring 2016. I: Mørk, K., Moseby, H. & Haakonsen, S. (red.).
- Fuglestedt, J. S., Harstveit, K. E., Mamen, J. & Benestad, R. (2017). *Klimaendringer*. Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/klimaendringer> (lest 9. mars).
- Førland, E., Mamen, J., Dyrddal, A. V., Grinde, L. & Myrabø, S. (2015). Dimensjonerende korttidsnedbør. *METreport*, 2015:24: Meteorologisk institutt.
- Germann, U., Berenguer, M., Sempere-Torres, D. & Zappa, M. (2009). REAL-Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 135 (639): 445-456.
- Gjertsen, U., Salek, M. & Michelson, D. B. (2004). *Gauge adjustment of radar-based precipitation estimates in Europe*. European Conference of Radar in Meteorology and Hydrology, Visby, Sweden, s. 7-11: Copernicus Publications.
- Haberlandt, U. (2007). Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology*, 332 (1): 144-157.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., et al. (2015). Klima i Norge 2100- Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015. *NCCS report*, 2015:2. 204 s.
- Holleman, I. (2006). Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations. *Technical Report*, 2006:290. De Bilt, Nederland: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. 56 s.
- IPPC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Summary for policymakers*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 32 s.
- Johansen, J. A. & Moldekleiv, H. J. S. (2016). *Utprøving av metodikker for modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS, MIKE21 og MIKE FLOOD*. Master thesis. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi.
- Koistinen, J. & Puhakka, T. (1981). An improved spatial gauge-radar adjustment technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 62 (6): 926.
- Krajewski, W. F. (1987). Cokriging radar-rainfall and rain gage data. *Journal of Geophysical Research* 92 (D8): 9571-9580.
- Kusiak, A., Wei, X., Verma, A. & Roz, E. (2013). Modeling and Prediction of Rainfall Using Radar Reflectivity Data: A Data-Mining Approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51 (4): 2337-2342.
- Lauvås, D., Dimovski, O. & H., R. (2016, Oktober 25-26). *Regnbygge 3M-Nedbørmåling, sensorer og modeller for overvåking og styring*. Fagtreff Norsk Vann-Høsten 2016.
- Leknes, S. (2016). Regionale befolkningsframskrivninger 2016-2040: Flytteforutsetninger og resultater. *Økonomiske analyser*, 35 (3).
- Lepiouflé, J.-M. (2015). Towards a better use of the precipitation radar data: a feasibility study. *METreport*, 2015:19: Norwegian Meteorological Institute
- Lindholm, O. (1983). Arealfordeling av korttidsnedbør, 1983/05. Oslo: Norsk institutt for vannforskning,.
- Lindholm, O. & Aune, B. (1984). Regns hastighet og retning. *VANN*, 19 (3): 424-431.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S. T., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering, 2008:162. Hamar: Norsk Vann. 79 s.
- Lindholm, O. (2014a). Håndtering av overvann. I: Ødegaard, H. (red.) *Vann- og avløpsteknikk*, s. 344-373: Norsk Vann.

- Lindholm, O. (2014b). VA-hydraulikk. I: Ødegaard, H. (red.) *Vann- og avløpsteknikk*, s. 64-83: Norsk Vann.
- Lussana, C., Elo, C. A. & Rønning, S. S. (2016). KliNoGrid RR1-Rad and RR-Rad: Combination of radar-derived precipitation fields and raingauge observations. *METreport*, 2016:19: Norwegian Meteorological Institute.
- Mahfouf, J.-F., Brasnett, B. & Gagnon, S. (2007). A canadian precipitation analysis (CaPa) project: Description and preliminary results. *Atmosphere-Ocean* 45 (1): 1-17.
- Marshall, J. S. & Palmer, W. K. (1948). The distribution of raindrop with size. *Journal of Atmospheric Sciences*, 5 (4): 165-166.
- Meteorologisk institutt. (2017a). *Eklima*. Tilgjengelig fra: <http://eklima.met.no/> (lest 14.04.17).
- Meteorologisk institutt. (2017b). *Radar*. Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/radar/søraust-noreg.html> (lest 08.02.2017).
- Meteorologisk institutt. (2017c). *Thredds*. Tilgjengelig fra: <http://thredds.met.no> (lest 27.03.2017).
- Murtnes, D. (2015). *Urbane flomveier. Generering av drenslinjer for området Solumstrand i Drammen ved bruk av ArcGIS*. Master thesis. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 109 s.
- Myrvoll, A. N. (2015). *Utprøving av metodikk for produksjon av aktsomhetskart for flomfare i urbane områder*. Master thesis. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 88 s.
- Mårtensson, E. & Gustafsson, L. G. (2014). Kartlaggning av skyfalls påverkan på samhällsviktig verksamhet-Framtagande metodik för utredning på kommunal nivå. Malmö, Sweden: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- Niemczynowicz, J. (1982). Areal intensity- duration- frequency curves and statistical areal reduction factors for short term rainfall events in Lund., 3065: Lunds Technical University.
- Nirman. (2014). *Precipitation*. Tilgjengelig fra: http://www.nirmancare.com/blog/index.php?controller=post&action=view&id_post=110 (lest 20.01.2017).
- Norsk Klimaservicesenter. (2017a). IVF-verdier fra målestasjoner. Tilgjengelig fra: https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/dimensjon_erende-nedbor/ivf-verdier-fra-et-utvalg-malestasjoner (lest 20.02.2017).
- Norsk Klimaservicesenter. (2017b). Klimaprofil Buskerud-Et kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning. 8 s.
- Norsk Klimaservicesenter. (2017c). Klimaprofil Oslo og Akershus-Et kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning. 8 s.
- NOU 2015:16. *Overvann i byer og tettsteder-Som problem og ressurs*. Klima- og miljødepartementet. Oslo. 272 s.
- NVE. (2017). Nevina. Tilgjengelig fra: <http://nevina.nve.no/> (lest 30.03.2017).
- Pedersen, L., Madsen, H. & Jensen, N. E. (2009). *Identification and Quantification of Uncertainties Related to Using Distributed X-band Radar Estimated Precipitation as input in Urban Drainage Models*. Ph.D. Thesis. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, Department of Informatics and Mathematical Modelling. 187 s.
- René, J. R., Djordjevic, S., Butler, D., Madsen, H. & Mark, O. (2014). Assessing the potential for real-time urban flood forecasting based on a worldwide survey on data availability. *Urban Water Journal*, 11 (7): 573-583.
- Rinehart, R. E. (1997). *RADAR for Meteorologists* Columbia, United States of America Rinehart Publications.

- Salmonsson, A. (2015). *MIKE 21 FM in Urban Flood Risk Analysis-A comparative study relating to the MIKE 21 Classic model*. Master thesis. Stockholm, Sweden: Royal institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering. 97 s.
- Silvestro, F., Rebora, N. & Ferraris, L. (2008). An Algorithm for Real-Time Rainfall Rate Estimation by Using Polarimetric Radar: RIME. *Journal of Hydrometeorology* 10 (1): 227-240.
- Sinclair, S. & Pegram, G. (2005). Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric Science Letters*, 6 (1): 19-22.
- SINTEF Byggeforsk. (2012). Vann i by-Håndtering av overvann i bebygde områder. *Byggeforskserien 311.015*.
- Smith, J. A. & Krajewski, W. F. (1991). Estimation of the Mean Field Bias of Radar Rainfall Estimates *Journal of Applied Meteorology*, 30: 397-412.
- Steiner, M., Smith, J., Burges, S. J., Alonso, C. V. & Darden, R. W. (1999). Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation. *Water Resources Research*, 35 (8): 2487-2503.
- TA-550. (1979). *Veiledning ved dimensjonering av avløpsledninger*. forurensningstilsyn, S. Oslo.
- Thorolfsson, S. T. (2014). VA-hydrologi. I: Ødegaard, H. (red.) *Vann- og avløpsteknikk*, s. 40-63: Norsk Vann.
- Vista Analyse. (2015). Økosystemtjenester fra grønnstruktur i norske byer og tettsteder. I: Magnussen, K., Reinvang, R. & Løset, F. (red.), 2015:10.
- Webster, R. & Oliver, M. A. (1993). How large a sample is needed to estimate the regional variogram adequately? I: Soares, A. (red.) *Geostatics Tróia '92*, s. 155-166: Springer Netherlands.
- Ødemark, K., Førland, E., Mamen, J., Elo, C. A., Dyrddal, A. V. & Myrabø, S. (2012). Ekstrem korttidsnedbør på Østlandet fra pluviometer og radar data. *Naturfareprosjektet Dp 5 Flom og vann på avveie*, 2012:78. Oslo. 60 s.

Vedlegg A: Konvertering av radardata fra NetCDF til dfs2

Radardataene lastes ned fra Meteorologisk institutts database Thredds (<http://thredds.met.no>) på filformatet NetCDF. Dataene dekker en sirkel med radius på 50 km, med radarens plassering på Helsefyrtår som sirkelens sentrum. Dette datasettet har projeksjonen WGS84 UTM 32, tidsoppløsning på ett minutt og varighet på et døgn.

For å anvende radardataene som input i MIKE må de konverteres til dfs2-filer. Konverteringen gjøres i et verktøy utviklet av DHI Singapore. Verktøyet er ikke utviklet for konvertering av radardata på gitt format, men kan anvendes med noe etterarbeid. Verktøyet krever lisens fra DHI.

A-1 Åpne konverteringsverktøy

Åpne verktøyet *NetCDF/Grib2 To DFS Format Conversion* og legg inn informasjonen som vist i figur under. Velg «extract».

Verktøyet lager en dfs2-fil som lagres i samme mappe som input-filen ligger i.

The screenshot shows the 'NetCDF/Grib2 To DFS Format Conversion' dialog box. The 'NetCDF File' is 'F:\Masteroppgave\Terengmodell\MIKE\Nedbar\Originale nedbarfiler\NetCDF fra Thredds\helsefyrt-20160711.nc'. The 'Specify Output Settings' section shows 'File type' as 'Dfs2', 'Delete value' as '1E-030', and 'Map projection' as 'LONG/LAT'. The 'Output folder' is 'F:\Masteroppgave\Terengmodell\MIKE\Nedbar\Originale nedbarfiler\NetCDF fra Thredds'. The 'Specify Dimensions' section shows X extent: 400 (0 to 399), X range: 551000 to 650750; Y extent: 401 (0 to 400), Y range: 6593500 to 6693500; Z extent: (empty), Z range: (empty); Time: time, Time extent: 1440, Time range: 2016-07-11 00:00:00 to 2016-07-11 23:59:00. The 'Specify Boundary Information' table has one row with '1' selected and coordinates X1=551000, Y1=6593500, X2=650750, Y2=6693500. The 'Specify Items' table lists items to be converted:

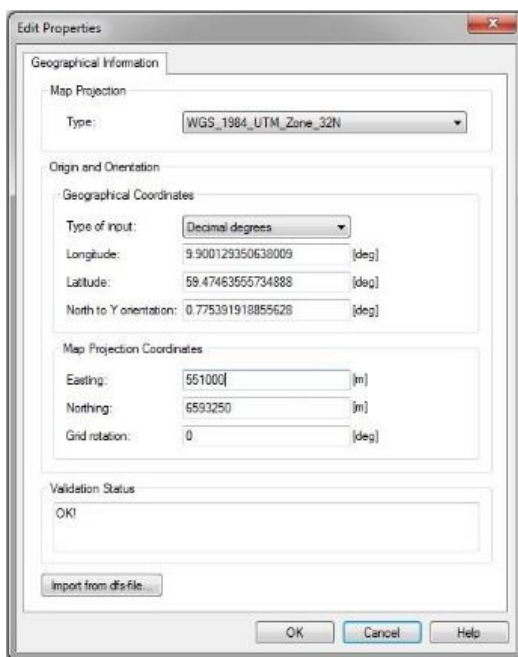
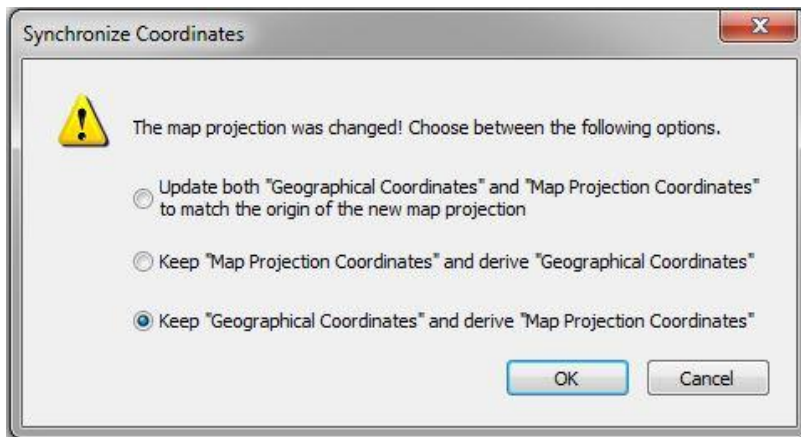
Select	Item Name	Item Type	Item Unit	Dfs Item Name	Dfs Item Type	Dfs Item Unit
<input checked="" type="checkbox"/>	lwe_precipitation_rate	double	mm/min	lwe_precipitation_rate	Precipitation Rate	mm/hour
<input type="checkbox"/>	forecast_reference_time	int	seconds since 1970-01-01 00:00:00...	forecast_reference_time		
<input type="checkbox"/>	projection_utm	int		projection_utm		
<input type="checkbox"/>	equivalent_reflectivity_factor	float	dBZ	equivalent_reflectivity_factor		

A-2 Definere projeksjon

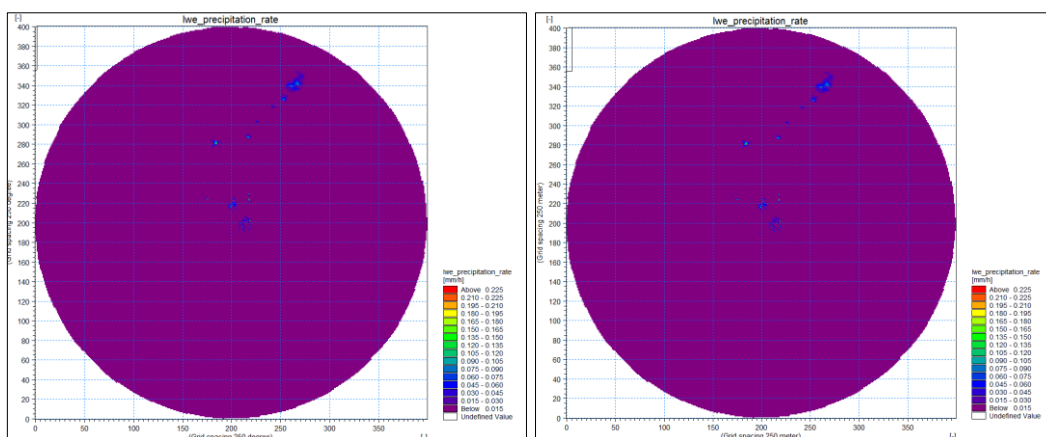
Radardataene i NetCDF-filen er på et rasterformat med 250x250 meters oppløsning i koordinatsystemet WGS 84 UTM 32. Datasettets projeksjon blir ikke bevart i konverteringen og må tilegnes på nytt.

Edit> Geographical Information> Type> Browse> WGS 84 UTM 32.

I «Synchronize Coordinates», velg alternativet «Keep geographical Coordinates and derive Map Projection Coordinates». Sett inn verdier for «Easting» og «Nothing» fra metadata i NetCDF-filen som vist i figur under.



Etter projeksjonen er lagt til skal «grid spacing» ha endret seg fra 250 degree til 250 meter som vist i figurene under.

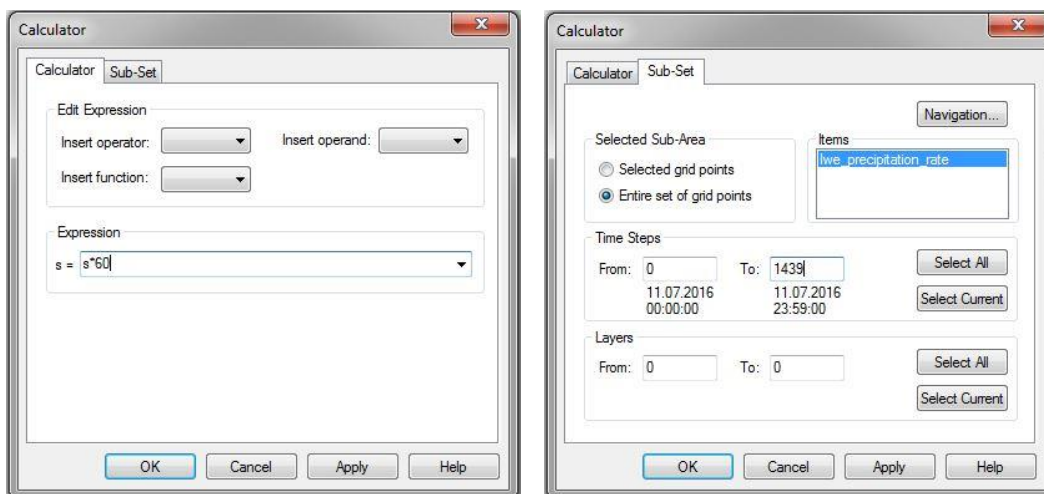


A-3 Skalering av datasett; Enhet

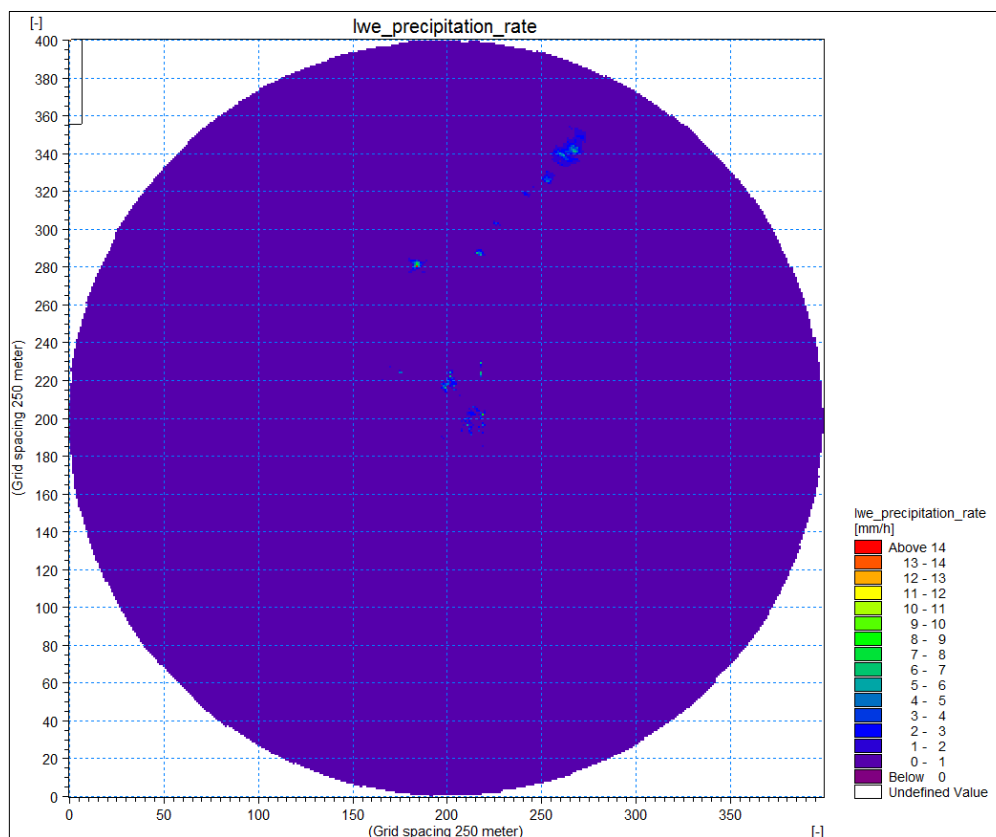
Verdiene i NetCDF-filen har nedbørstrate med enhet mm/min. MIKE ønsker nedbørinput med enhet mm/h og verdiene må derfor skaleres. Konverteringsverktøyet benyttet i punkt 1 endrer ikke verdiene og fremstillingen med skalaen i figurene over er feil. Skaleringen fra mm/min til mm/h gjøres i «Tools» i dfs2-filen.

Tools> Calculator> Expression «s=s*60», som vist i figuren under.

I fanen «Sub-Set» velges hele rutenettet og alle tidsstegene.



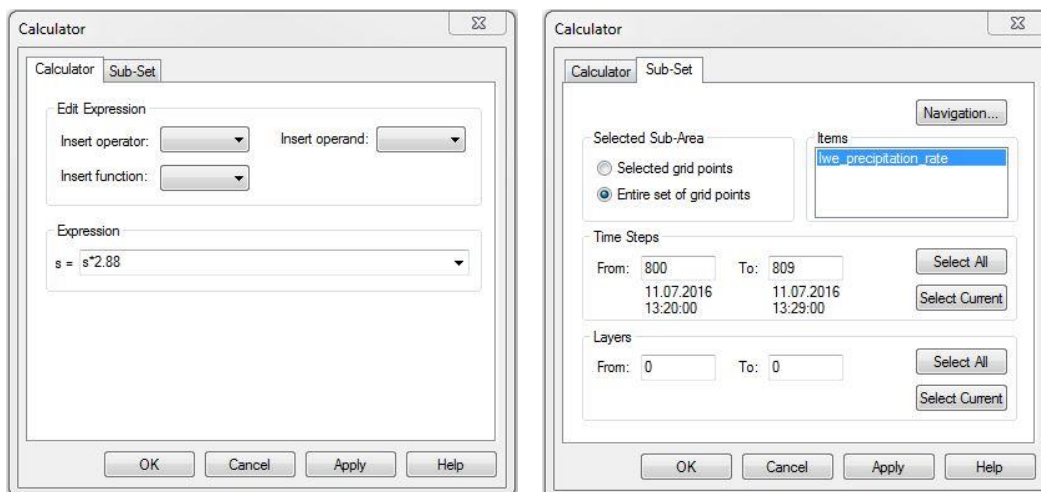
Som vist i figuren under er nå minuttverdiene skalert opp til enheten mm/h.



A-4 Skalering av datasett; Korreksjonsfaktor

For å skalere værradardataene i dfs2-filen mot nedbørstasjonene brukes også kalkulatoren i MIKE Zero. Korreksjonsfaktoren for dette datasettet er beregnet for akkumulert nedbør per. 10. minutter fra kl. 12:30 til 15:40, som tilsvarer tidsstegene i intervallet 750 – 940.

Tools> Calculator> Expression « $s=s*x$ », der x er korreksjonsfaktoren for gjeldene tidssteg. Som vist i figuren under, velg alle ruter og velg intervallet for tidssteg.



Vedlegg B: Oppbygging av terrengmodell FM

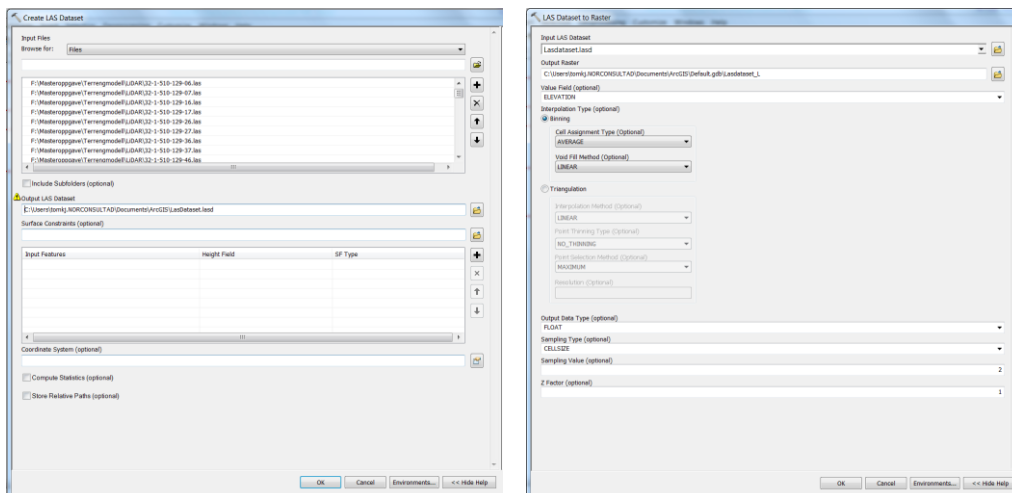
Terrengmodell bygges opp i MIKE Zero Mesh Generator. Relevante datasett må klargjøres i ArcMap eller annen programvare for stedfestet data. Nødvendig data til oppbygging av terrengmodell brukt i denne oppgaven er

- Terrengpunkter: LiDAR-data 21.06.2010
- Bygningsinformasjon: FKB-data
- Veiinformasjon: FKB-data
- Omriss av analyseområdet: Shapefil

B-1 Klargjøring av terrengdata

B-1.1 Legge inn laserskannet data

Åpne ArcMap og søk opp ArcToolbox: *Create LAS Dataset (Data Management)*. Velg ønskede LAS-filer som vist i figur under og velg «ok». Søk opp ArcToolbox: *LAS Dataset to Raster (Conversion)*. Under «Sampling type» velges rutestørrelse med ønsket verdi og «ok».



B-1.2 Klippe analyseområde

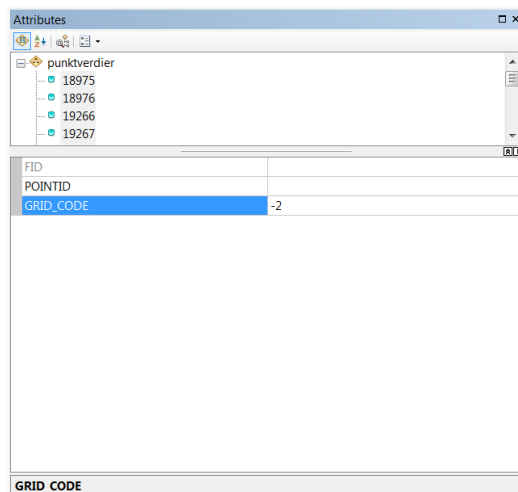
For å klippe ut ønsket område velges ArcToolbox: *Clip (Data Management)*. Under «Output extent» legges shapefil av analyseområdet inn. Huk også av «Use Input Features for Clipping Geometry».

Punktene som nå er valgt er terrengpunkter for bruer. På grunn av usikkerhet i laserdatasettet ble det valgt punkter innenfor en distanse på 2,5 meter fra brulaget. De valgte punktene slettes fra datasettet(Editor> Start editing> Delete selected). For bruene som er bredere enn 2,5 meter må punktene mellom ytterkantene manuelt fjernes ved bruk av «Select Features by Polygon». Det anbefales å gjøre en kontroll rundt bruene. Hvis ikke alle de høye verdiene er fjernet må prosedyren gjentas med en større verdi eller endres manuelt.

B-1.5 Senke vannivå i elv

Terrengpunkter i elven senkes til 2 meter under havoverflaten. Dette fordi enkelte punkter i elva har høye verdier i forhold til punktene rundt selv etter at bruene var fjernet. Senkningen har ingen virkning for avrenningen men gir et penere resultat visuelt. Det ble lastet inn en shapefil av elva og punktene ble valgt manuelt ved bruk av «Select Features by Polygon».

Editor> Start Editing> Høyreklikk på valgte punkter> Attributes> Marker alle punkter og endre «Grid_Code» til -2.



B-1.6 Konvertering til xyz-format

For å kunne åpne punktverdiene i MIKE-programvare må dataene være på xyz-format. Denne konverteringen gjøres i MIKE Zero Toolbox.

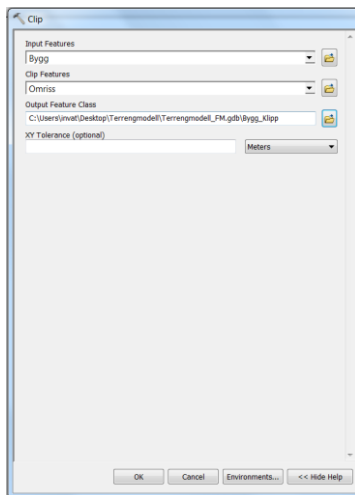
Åpne MIKE Zero> File> New file> MIKE Zero Toolbox> GIS> Shp2Xyz> Under «z-value» skrives kolonneverdien som inneholder z-verdien inn.

B-2 Klargjøring av bygningsdata

B-2.1 Klippe bygningslag

Åpne shapefil av bygninger fra FKB og polygon av analyseområdet i ArcMap. Velg ArcToolbox: *Clip (Analysis)* for å klippe bygningene til det angitte analyseområdet.

I dette tilfellet er det hensiktsmessig å dele bygningene inn i seks mindre områder før innlasting i MIKE for å lettere identifisere eventuelle feil. Inndelingen utføres ved opptegning av polygoner som brukes som «Clip feature» som vist i figur under. Bygninger som ligger på grensen til analyseområdet klippes bort.



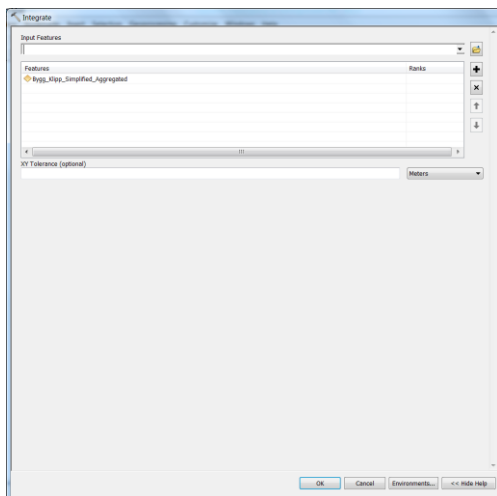
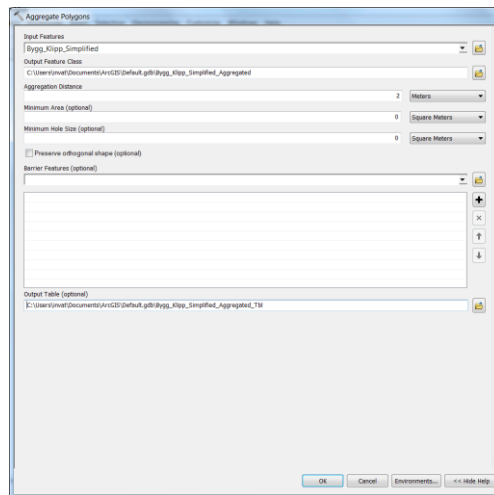
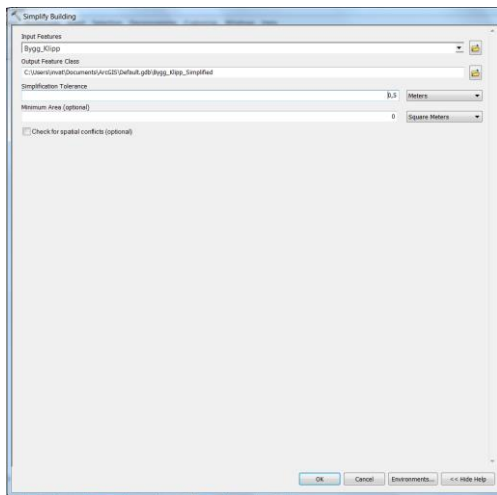
B-2.2 Forenkling av bygningslag

Bygningene må forenkles og slås sammen før de kan brukes i Mesh Generator.

ArcToolbox-verktøyet *Simplify Buildings (Cartography)* forenkler polygonenes grenser men beholder deres hovedfasong og størrelse. Det er valgt en toleransegrense 0,5 for denne forenklingen som vist i figur under.

Verktøyet *Aggregate Polygons (Cartography)* slår sammen bygninger med avstand mindre enn en gitt verdi. Denne avstanden ble valgt til 2 meter som vist i figur under.

Verktøyet *Integrate (Data Management)* fjerner dupliserte punkter og polygoner.



B-2.3 Konvertering til xyz-format

Bygningene må gjøres om til xyz-format for å kunne åpnes i MIKE-programvare. Dette gjøres som i punkt B-1.6, men «polygon» velges fremfor «points». Det samme gjøres med shapefilen av omrisset.

B-3 Oppbygging av terrengmodell i MIKE Zero Mesh Generator

B-3.1 Åpne program

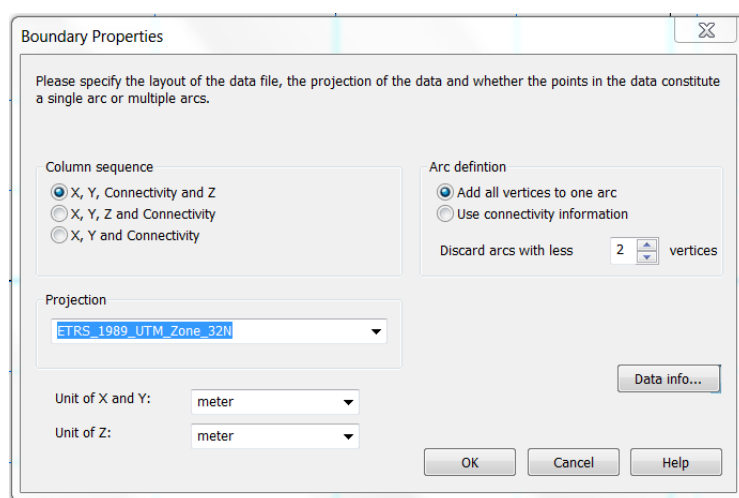
Åpne MIKE Zero> File> New File> Mesh Generator.mdf.

Velg geografisk projeksjon «ETRS_1989_UTN_Zone_32N».

B-3.2 Legge inn grenser

For å angi utstrekningen til analyseområdet hentes det inn omriss av analyseområdet på xyz-format.

Data> Import boundary> Åpne xyz-filen og velg å legge til hele området som en «arc» som vist i figuren under.

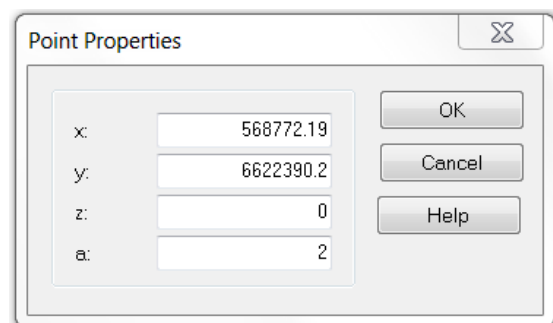


B-3.3 Definere grenser

Omrisset rundt analyseområdet er nå en polylinje med mange knekkpunkter som representerer en lukket grense. For at vannet skal kunne renne ut i elven må linjen som ligger langs elven defineres som en åpen grense.

Dette gjøres ved at en endrer knekkpunktene på hver side av linjen som knutepunkter. Knutepunkter og mellomliggende linjer defineres med et heltall som brukes i modellsystemet til å skille mellom åpne og lukkede grenser. Heltall større enn 1 tilsvarer åpne grenser og 1 tilsvarer lukkede grenser. Det ytterste knekkpunktet i linja en ønsker som åpen grense velges.

Høyreklikk på knekkpunktet> Vertices to nodes> Høyreklikk på knekkpunktet> Properties> Velg a>1. Det samme gjøres for det andre ytterpunktet og linja imellom.



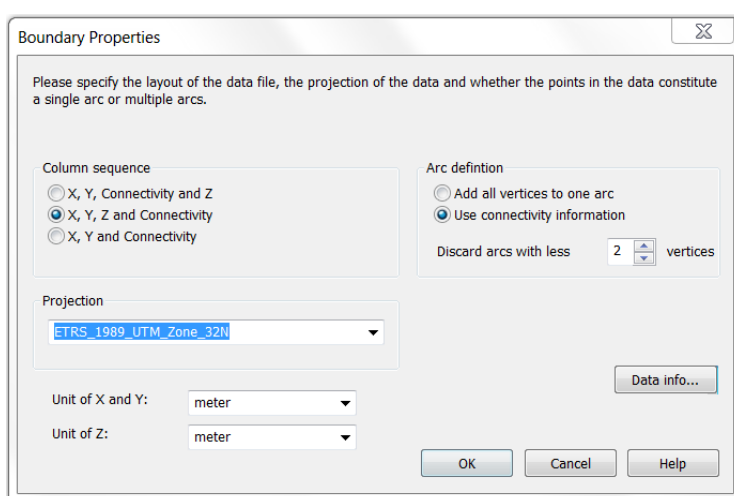
B-3.4 Forenkle grenser

Enkelte linjer er lagt inn med mange knekkpunkter og unødvendig høy nøyaktighet. Dette vil føre til at meshet som senere skal genereres får små vinkler slik at terrenngmodellen blir tung å kjøre i simulering. Knekkpunktene kan fjernes manuelt ved bruk av «delete points» på verktøylinjen. Bare punkter som ikke endrer formen på omrisset kan fjernes (150-200 punkter).

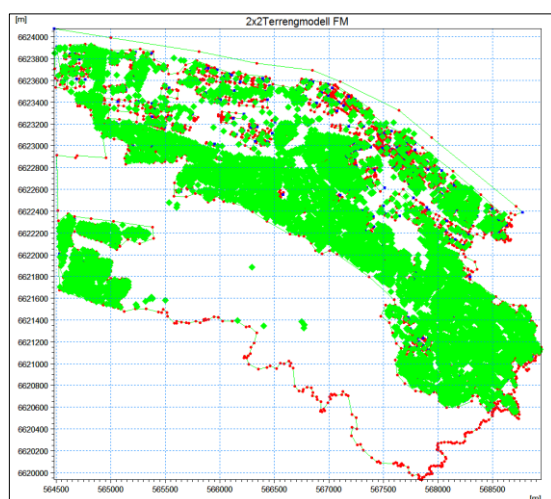
B-3.5 Legge inn bygninger

Bygninger legges også inn som grenser. Ved å la disse være lukkede, er bygningene polygoner som vannet tvinges til å strømme rundt. Fra punkt x er det klargjort seks mindre utklipp av bygningslaget i ArcMap. Disse hentes inn hver for seg da det er lettere å se hvor eventuelle feil ligger.

Data> Import boundary> Velg innstillinger som vist under.



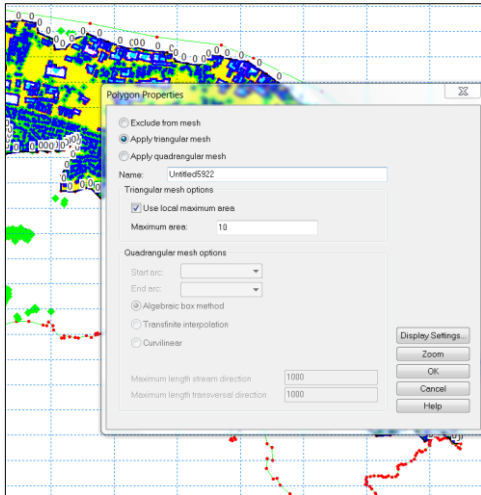
Med bygningslaget skal vinduet se slik ut:



B-3.6 Definere polygoner

Områder med stor betydning for avrenningen defineres ved at det tegnes en lukket linje rundt (draw arc) med et polygonpunkt innsatt i midten (insert polygons).

Høyretrykk på polygonet> Properties> Huk av følgende innstillinger.

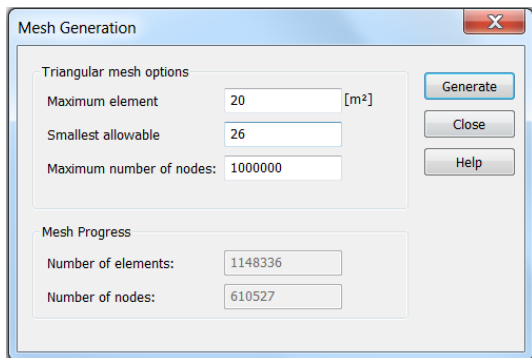


Maksimal trekantstørrelse er i dette polygonet valgt til 10 m². Dette punkt gjentas for alle områder en ønsker høyere oppløsning.

B-3.7 Generere Mesh

Mesh generatoren lar brukeren velge maksimalt elementareal for analyseområdet utenom de egendefinerte polygonene, minste vinkel på trekantene og antall knutepunkt i meshet.

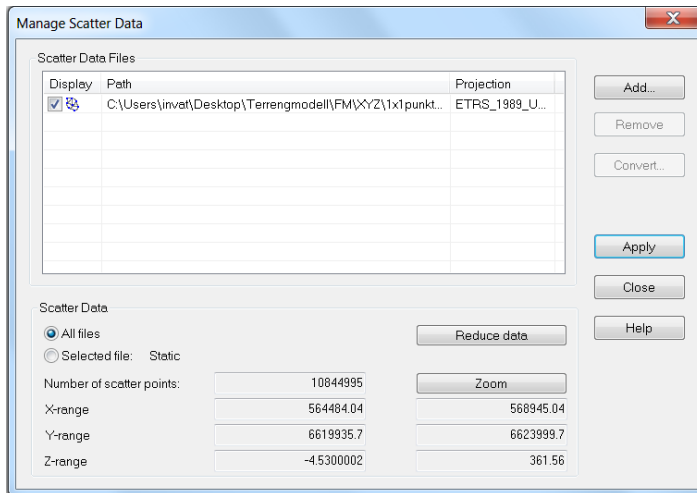
Mesh> Generate mesh> Velg innstillinger som vist under.



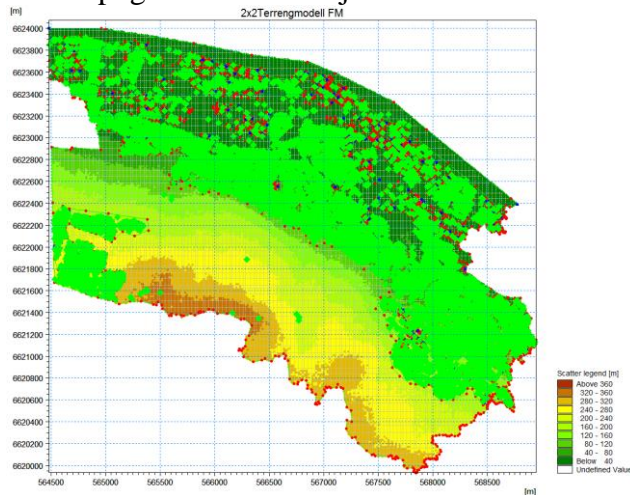
Det kan være lurt å opprette og slette mesh under hele prosessen for å teste at alt er som det skal da programmet ikke gir spesifikke feilmeldinger. Selve meshgenereringen kan være et problem hvis en ikke lagrer jevnlig underveis. En løsning som ofte fungerer er å avslutte programmet, åpne på nytt og prøve på det samme.

B-3.8 Innhenting av topografisk data

Data > Manage scatter data > Add xyz file > Velg punktverdier på xyz- format > Apply



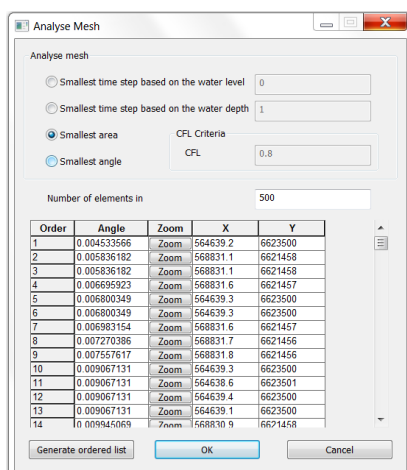
Med topografisk informasjon skal vinduet se slik ut:



B-3.9 Manuell justering av mesh

Små trekanter og vinkler gjør terrengmodellen tung å kjøre i simuleringer. En ønsker derfor å forbedre det så mye som mulig. Dette kan gjøres manuelt i Mesh Generator.

Mesh > Mesh editing > Mesh > Analyse mesh

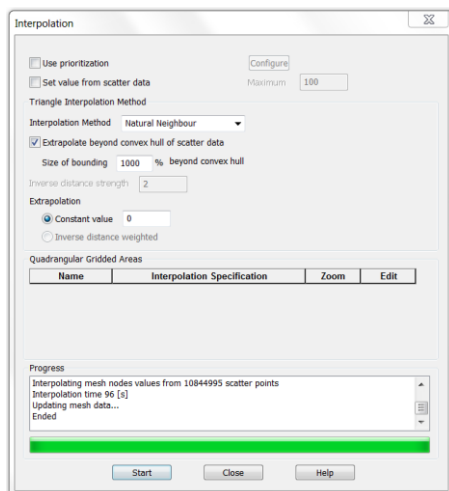


Analysen gir en oversikt over de minste elementarealene og vinklene i meshet. Det er også mulig å zoome direkte til disse områdene hvor en kan velge å endre størrelse og form på vinklene (move mesh node) eller slette trekantene (collapse element). Endringene gjelder kun for det genererte meshet og hvis det genereres et nytt mesh må endringene gjøres på nytt.

B-3.10 Interpolering

Når topografiske data er hentet inn må verdiene interpoleres for at trekantene skal få en verdi.

Mesh> Interpolate> Velg instillinger som vist under.



B-3.11 Eksportering av mesh

Terrengmodellen eksporteres som en mesh-fil og er klar til bruk i avrenningsmodell.

Mesh> Export mesh.



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway