

Sindre Aal Sellæg

# Modellering av flomveier på Lillehammer, en GIS studie av åpne og blokkerte dreneringsveger i skadepunkter fra flommen juli 2014.

Masteroppgave i geografi

Trondheim, mai 2016

Veileder: Ola Fredin

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



Fakultet for samfunnsvitenskap  
og teknologiledelse  
Geografisk institutt



## **Abstract**

Flooding related to surface water is a significant concern in Norway. Future climate prognoses predicts higher temperatures and more heavy precipitation. A consequence of this could be more frequent floods and of greater magnitude, which may cause a threat to infrastructure and human lives. Areas with smaller, steep streams and rivers, in addition to densely populated areas will be more vulnerable. In July 2014, a flood caused severe damage to infrastructure and buildings in Lillehammer. Due to heavy precipitation, smaller catchments failed to handle the large water amounts. To prevent damages related to flooding, it is necessary to obtain better knowledge about drainage.

This paper compares changes in accumulated drainage area at locations where the flood in Lillehammer, July 2014, caused damage. The main objective of this study is to investigate if water on devious ways was the major factor to the damages. The study compares changes in accumulated area in three different minor catchments Skurva, Åretta and Bæla. The change in accumulated area is based on modeled flood drainage in two different scenarios: Open drainage paths and closed drainage paths. Open drainage paths refer to functional culverts while closed drainage paths refer to blocked, or disfunctional culverts. Floodpaths are modeled from a digital elevation model with 1x1 meter resolution generated from LiDAR-data. The findings of this study indicate that Skurva catchment is most affected by water on devious ways, but there are also some identified cases of this in Bæla and Åretta catchments.

## **Sammendrag**

Flom knyttet til overflatevann, er allerede en stor utfordring i mange av Norges kommuner. Med fremtidige klimaprognoiser med høyere temperaturer og mer intens nedbør, er det ventet flere og kraftigere flommer, og med det trusler mot liv og infrastruktur. Særlig områder med små, bratte bekker og elver, og tettbebyggede strøk vil være utsatt. Flommen på Lillehammer i juli 2014 førte til store skader på infrastruktur og byggverk. Som følge av intens nedbør klarte ikke mindre side-nedbørfelt å håndtere de store vannmassene. For å forebygge skader er det nødvendig med større kunnskap om drenering ved flomhendelser.

Denne oppgaven sammenligner endringer i akkumulert areal i skadeområder knyttet til flommen, som rammet Lillehammer sjuende og åttende juli 2014. Hensikten er å undersøke om vann på avveie var en viktig årsak til skadene. Sammenligningen av akkumulert dreneringsareal er utført i tre ulike studieområder Skurva, Åretta og Bæla. Endringen i akkumulert areal tar utgangspunkt i modellerte flomveier for to ulike scenario: åpne og stengte dreneringsveger. Åpne dreneringsveger er i oppgaven relatert til åpne kulverter og stikkrenner, mens stengte dreneringsveger er relatert til blokkerte kulverter og stikkrenner. Flomveiene er modellert ut ifra en DEM med 1x1m oppløsning som er avledet fra LiDAR-data. Resultatene peker ut Skurva som mest utsatt for vann på avveie, men det er også registrert enkelte tilfeller i Bæla og Åretta.





## **Forord**

Denne oppgaven avslutter min 5 år lange studenttilværelse ved geografisk institutt, NTNU. I løpet av de 2 årene som masterstudent har jeg definitivt lært masse, og spesielt oppgaveskrivingen har gitt meg et stort utbytte. Ferden bærer nå videre til sørligere trakter, og nye utfordringer i Oslo kommune vann- og avløpsetaten.

Først og fremst vil jeg takke min kjære samboer Madeleine, som har gjort livet som masterstudent til en fornøyelse. En stor takk rettes også til min veileder Ola Fredin for å ha bidratt med gode råd som har veiledet meg gjennom prosessen. I tillegg vil jeg takke Anders Breili fra Lillehammer kommune og Harald Huse fra Norkart, for å være hjelpsomme med datamateriale.

Trondheim, 10. mai 2016

Sindre Aal Sellæg



# Innholdsfortegnelse

<i>Abstract</i> .....	<i>iii</i>
<i>Sammendrag</i> .....	<i>iii</i>
<i>Forord</i> .....	<i>v</i>
<i>Innholdsfortegnelse</i> .....	<i>vii</i>
<i>Figurliste</i> .....	<i>ix</i>
<i>Tabelliste</i> .....	<i>xi</i>
<i>Forkortelser</i> .....	<i>xiii</i>
<b>KAPITTEL 1 - INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1. 1 PROBLEMSTILLING .....	2
1. 2 BAKGRUNN FOR OPPGAVEN .....	3
1. 3 TIDLIGERE STUDIER .....	6
1. 4 BEGRENSNINGER OG FORUTSETNINGER .....	7
1. 5 OPPGAVENS OPPBYGGING .....	7
<b>KAPITTEL 2 - OMRÅDEBESKRIVELSE</b> .....	<b>9</b>
2. 1 BERGGRUNNSGEOLOGI .....	10
2. 2 KVARTÆRGEOLOGI .....	11
2. 3 KLIMA .....	12
2. 4 BÆLA .....	14
2. 5 ÅRETTA .....	17
2. 6 SKURVA .....	19
<b>KAPITTEL 3 - TEORI</b> .....	<b>23</b>
3. 1 GEOGRAFISKE INFORMASJONSSYSTEMER .....	23
3. 1. 1 Vektor og raster .....	23
3. 1. 2 Usikkerhet knyttet til geografisk informasjon .....	24
3. 2 HØYDEMODELLER .....	25
3. 3 LIDAR .....	26
3. 2. 1 LAS-datasett .....	28
3. 3 INTERPOLERING .....	29
3. 4 CELLESTØRRELSE .....	32
3. 5 HYDROLOGISK MODELLERING .....	34
3. 5. 1 Groper .....	34
3. 5. 2 Dreneringsretning .....	35
3. 5. 3 Akkumulering .....	36
3. 6 OVERFLATEAVRENNING .....	37
3. 7 STYRTFLOMMER .....	38
<b>KAPITTEL 4 - METODE/DATABEARBEIDING</b> .....	<b>39</b>
4. 1 DATA .....	39
4. 2 METODE .....	40
4. 3 BEARBEIDING AV LIDAR-DATA .....	41
4. 3. 1 Overflatebegrensinger .....	44

4.4	GENERERING AV DEM .....	46
4.4.1	Valg av cellestørrelse .....	47
4.4.2	Valg av interpolasjonsmetode .....	48
4.5	MODIFIKASJONER AV DEM .....	50
4.5.1	Bygninger .....	50
4.5.2	Oppheving av kunstige blokkeringer .....	52
4.5.3	Bruer .....	52
4.5.4	Stikkrenner og kulverter .....	53
4.6	HYDROLOGISK MODELLERING .....	57
4.6.1	Dreneringsretning .....	59
4.6.2	Akkumulering .....	60
4.6.3	Akkumulerings areal .....	61
4.6.4	Definere terskel for flomveier .....	61
4.7	SKADEPUNKT .....	62
4.8	OPPSUMMERING METODE .....	64
<b>KAPITTEL 5 - RESULTAT .....</b>		<b>67</b>
5.1	HYDROLOGISK MODELLERING .....	67
5.2	VISUALISERING AV FLOMVEIER .....	71
5.3	SAMMENLIGNING AV AKKUMULERT AREAL I SKADEPUNKT .....	78
5.3.1	Klassifisering av skadepunkter .....	83
5.3.2	Skurva .....	85
5.3.3	Åretta .....	88
5.3.4	Bæla .....	90
<b>KAPITTEL 6 - DISKUSJON .....</b>		<b>93</b>
6.1	EVALUERING AV METODE .....	93
6.1.1	Evaluering av høydemodeller avledet av LiDAR-data .....	93
6.1.2	Evaluering av modellering av flomveier .....	95
6.1.2.1	Modifisering av DEM .....	95
6.1.2.2	Hydrologisk modellering .....	97
6.1.2.3	Dreneringsretning .....	97
6.1.2.4	Akkumulering .....	98
6.1.2.5	Terskelverdier og visualisering av flomveier .....	98
6.1.3	Evaluering av sammenligning av akkumulert areal i skadepunkter .....	99
6.1.3.1	Konvertering .....	99
6.1.3.2	Klassifisering .....	100
6.2	VURDERING AV RESULTATENE FRA SAMMENLIGNING AV AKKUMULERT AREAL I SKADEPUNKTER .....	100
6.3	IMPLIKASJONER .....	103
<b>KAPITTEL 7 - KONKLUSJON .....</b>		<b>105</b>
7.1	VIDERE ARBEID .....	106
<b>KAPITTEL 8 - LITTERATURLISTE .....</b>		<b>109</b>

## Digitalt appendix Skadedata fra kommunen.

## Figurliste

Figur 1.1: Oversiktskart som viser nedbørfeltene og målestasjon Sæterengen .....	4
Figur 1.2: Nedbør og vannføring for Bæla og Åretta 7-8 juli 2014. (NVE 2014).....	5
Figur 2.1: Oversiktskart over studieområdene med utløpspunkt. ....	10
Figur 2.2: Berggrunnsfordeling Lillehammer kommune (Utarbeidet av data fra NGU.no).....	11
Figur 2.3: Kvartærgeologi Lillehammer kommune (utarbeidet av data fra NGU.no).....	12
Figur 2.4: Arealbruk i studieområdet Bæla. ....	14
Figur 2.5: Terrengprofil. ....	15
Figur 2.6: Digital høydemodell og inntegnet terrengprofil. ....	15
Figur 2.7: Oversiktskart over skadeområder fra flommen i 2014, Bæla nedbørfelt. ....	16
Figur 2.8: Kart med arealbruk i studieområdet Åretta .....	17
Figur 2.9: Terrengprofil .....	18
Figur 2.10: Digital høydemodell og inntegnet terrengprofil .....	18
Figur 2.11: Kart med oversikt over skadeområder fra flommen 2014, Åretta nedbørfelt. ....	19
Figur 2.12: Kart over arealbruk i studieområdet Skurva. ....	20
Figur 2.13: Digital høydemodell og inntegnet terrengprofil. ....	20
Figur 2.14: Terrengprofil .....	21
Figur 2.15: Oversikt over skadeområder fra flommen i 2014, Skurva nedbørfelt. ....	21
Figur 3.1: Metoder å representere terrengoverflater på i GIS (Childs 2004). ....	25
Figur 3.2: Laserpuls og reflekterte retursignaler (ESRI 2016b).....	27
Figur 3.3: Effekten av å inkludere knekklinjer i interpoleringen (ESRI 2009). ....	28
Figur 3.4: Prinsippet for interpolering med naturlig nabo (ESRI 2016c). ....	31
Figur 3.5: Effekten ulike cellestørrelser har på å representere en gitt terrengoverflate (Hengl & Evans 2009)....	33
Figur 3.6: Prinsippet for igjenfylling av groper i verktøyet fill (ESRI 2016e). ....	35
Figur 3.7: Prinsippet i D8-algoritmen for å kalkulere dreneringsretning ut ifra en høydemodell (ESRI 2012a). ..	36
Figur 3.8: Beregningen av akkumulering ut ifra dreneringsretninger. Tallverdiene i rutenettet til høyre beskriver antall celler som drenerer til hver enkelt celle (ESRI 2016f). ....	37
Figur 4.1: Generell oversikt over metoden (Pike et al. 2009). ....	41
Figur 4.2: LiDAR-data: Bakkepunkter er sortert ut og manglende data vises i områder knyttet til bygninger. ....	42
Figur 4.3: Diagram over fordelingen av punktavstand i de benyttede LAS-filene. ....	43
Figur 4.4: LAS-datasett med en beregnet DEM som bakgrunnskart. Hver sorte rute representerer en LAS-fil. ....	44
Figur 4.5: Skjermdump fra ArcMap som viser overflatebegrensinger inkludert i LAS-datasettet. Legg merke til at ulike inngangsdata blir brukt som ulike typer begrensinger. ....	45
Figur 4.6: Effekten av å inkludere knekklinjer. Til venstre er flomveier modellert uten knekklinjer og vann forlater vegen for tidlig. Til høyre er knekklinjer inkludert og den beregnede flomveien følger vegen lengre ned i bakken (Meiforth 2013). ....	49
Figur 4.7: Prinsippet for beregningen av åpne og stengte dreneringsveger (Meiforth 2013). ....	50

Figur 4.8: Hevede bygninger i høydemodellen. Til venstre er et skyggekart av høydemodellen før bygninger er hevet. Til høyre er et skyggekart etter bygninger er hevet. Omrisset av bygningen kan her tydelig observeres. .	51
Figur 4.9: Skjermdump fra ArcMap som viser arbeidsmodellen for senkning av bruer og heving av bygninger i høydemodellen.....	52
Figur 4.10: Stikkrenner fra NVDB digitalisert som vektorlinjer. ....	54
Figur 4.11: Kart med flomveger med (blå linje) og uten (lilla linje) digitaliserte kulverter (gult). ....	55
Figur 4.12: Skjermdump fra ArcMap som viser digitalisering av en kulvert ved hjelp av flyfoto og eksisterende vanndata fra FKB.....	56
Figur 4.13: Skjermdump fra ArcMap som viser modellert arbeidsflyt for senking av stikkrenner og kulverter i DEM_O. ....	57
Figur 4.14: DEM_S med hevede bygninger (15 m) og senkede bruer (25 m) tilpasset scenarioet for stengte dreneringsveger og DEM_O med hevede bygninger (15 m), senkede bruer (25 m) og senkede stikkrenner og kulverter (10 m) tilpasset scenarioet for åpne dreneringsveger. ....	58
Figur 4.15: Dreneringsretning .....	59
Figur 4.16: Kartet viser beregnet vannveg og eksisterende elveløp for Årettaelva. ....	60
Figur 4.17: Lokaliseringen av skadepunkt i lavbrekk representert i akkumuleringsrasteren i begge scenario. ....	63
Figur 4.18: Oppsummering av metoden i denne studien, steg for steg. ....	65
Figur 5.1: Beregnet akkumulering. Vannet samles i lavbrekk i terrenget. ....	67
Figur 5.2: Validering av beregnet flomvei ved å sammenligne med offisielt elveløp fra FKB. ....	68
Figur 5.3: Blokkert kulvert ved Askjellerudebekken, Åretta nedbørfelt, som vil kunne endre dreneringen (Lillehammer kommune 2014). ....	69
Figur 5.4: Hovedflomveier med åpne- og stengte dreneringsveger, Åretta nedbørfelt. ....	70
Figur 5.5: Hovedflomveier med åpne- og stengte dreneringsveger i Skurva og Bæla nedbørfelt. ....	70
Figur 5.6: Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Åretta. ....	72
Figur 5.7: Kart med flomveier ved åpne dreneringsveger i Åretta. ....	73
Figur 5.8: Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Bæla. ....	74
Figur 5.9: Kart med flomveier ved åpne dreneringsveger i Bæla. ....	75
Figur 5.10: Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Skurva.....	76
Figur 5.11: Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Skurva.....	77
Figur 5.12: Plasseringen til skadepunkter, kulverter og stikkrenner i studieområdene. A) viser Skurva og Bæla, mens B) viser Åretta. ....	78
Figur 5.13: Skadepunkter langs nedre del av Årettaelva klassifisert som andre som følge av at blokkerte dreneringsveger oppstrøms leder vannet bort fra den naturlige vannveien. ....	83
Figur 5.14: Oppsummering klassifisering av skadepunkter i Bæla, Skurva og Åretta. ....	84
Figur 5.15: Kart med hovedflomveier (> 5 000 000 m <sup>2</sup> akkumulert areal). Utsnittet B) viser hvordan dreneringen endrer som ved å blokkere kulverten (grønt punkt) i tilknytning til Nordsetervegen. ....	85
Figur 5.16: Som en konsekvens av en blokkert kulvert endrer arealet til nedbørfeltet Skurva seg. Arealet med åpen kulvert (gul) er 7km <sup>2</sup> , mens med blokkert kulvert er arealet til nedbørfeltet (grønn ramme) 17,5 km <sup>2</sup> . ....	86

Figur 5.17: Kart som viser et lite område av Skurva nedbørfelt, i tilknytning til Ersgaard. En blokkert kulvert tvinger vannet til drenere langs en veggrøft knyttet til Nordsetervegen. Legg merke til flere skadepunkter nedstrøms for kulverten, langs flomveiene med åpne dreneringsveger. ....	87
Figur 5.18: A) Kart over nedre del av Skurva med flomveier > 250 000 m <sup>2</sup> akkumulert areal. B) Blokker kulvert fører til at vannet drenerer gjennom boligområde. C) Blokkert kulvert fører til at vannet drenerer over en parkeringsplass og langs bilvegen. ....	88
Figur 5.19: Utvalgte problemområder som illustrerer ulike drenerings situasjoner. A) Oversiktskart. B) Skadepunkter og flomveier i tilknytning til Askjellerudbekken, Blomsterbakken og Messenlivegen. C) Skadepunkter og flomveier ved Røyslimoen butikksenter. D) Skadepunkter og flomveier langs Årettaelva. E) Skadepunkter og flomveier langs nedre del av Årettaelva. ....	89
Figur 5.20: Utvalgte problemområder med ulike drenerings situasjoner i Bæla nedbørfelt. A) Oversiktskart. B) Skadepunkter og flomveier i øvre del. C) Skadepunkter hvor vann på avveie knyttes til skadene. D) Skadepunkter klassifisert som "andre", nær utløpspunktet. E) Skadepunkteene til høyre for de beregnede flomveiene er utenfor studiens rekkevidde. ....	91

## Tabelliste

Tabell 2.1: Relativ forandring (%) i antall dager med mye nedbør, og relativ forandring (%) i nedbørmengden på dager med mye nedbør, fra perioden 1961-90 til perioden 2071-2100 (Fra Hanssen-Bauer et al. 2009 side 93)	13
Tabell 5.1: Endring i akkumulert areal og klassifisering av skadepunkt i Skurva. ....	80
Tabell 5.2: Endring i akkumulert areal og klassifisering av skadepunkt i Bæla. ....	81
Tabell 5.3: Endring i akkumulert areal og klassifisering av skadepunkt i Åretta. ....	82





## **Forkortelser**

DBS – Direktoratet for Sikkerhet og Beredskap

DEM – Digital elevation model (digital høydemodell)

FKB – Felles Kartdatabase

ESRI – Environmental Systems Research Institute

GIS – Geografiske informasjonssystemer

GPS – Global Positioning System

IMU – Inertial Movement Unit

LiDAR – Light Detection and Ranging

LAS – Log ASCII Standard File format

NGU – Norges geologiske undersøkelse

NVE – Norges Vassdrags- og Energidirektorat

NVDB – Nasjonal vegdatabank

IDW – Inverse Distance Weighting

UTM – Universal Transverse Mercator

WGS – World Geodatic System



## **Kapittel 1 - Innledning**

Betinget av topografien og klimaet i Norge er vi her til lands lite rammet av de mest voldsomme flomkatastrofene sammenlignet med land på sørligere breddegrader (DSB 2013). Allikevel er flomhendelser etter storm den mest ødeleggende naturfaren her til lands (Rød 2013). Med fremtidens klimaprogner med høyere temperaturer og mer nedbør er det ventet flere og kraftigere flommer og med det trusler mot liv og infrastruktur. Særlig områder med små, bratte bekker og elver og tettbebyggede strøk vil være utsatt (DSB 2013). Klimautvalget (NOU 2015) underbygger dette i sin utredning og forventer at utfordringene knyttet til overflatevann vil øke. Overflatevann blir definert som vann som drenerer på overflaten som følge av nedbør eller smeltevann. Klimautvalget påpeker viktigheten av å håndtere overflatevann på en trygg måte for å unngå skader på infrastruktur, helse og miljø. Årsakene til at overflatevann er problematisk er sammensatt. Mer overvann skyldes lokal menneskelig påvirkning som følge av fortetting og andre inngrep, i tillegg til å være en konsekvens av klimaendringene (NOU 2015). Forebygging og kartlegging av overflatevann har vært og er tema for flere prosjekter og studier de siste årene (Aall et al. 2015; Viréhn 2014; DSB 2013). Dette er både som følge av klimaendringer som fører til en økt fare for naturskader, samt samfunnsendringer som fører til en økt klimasårbarhet (NOU 2015).

På nasjonalt nivå er kostnaden som følge av skader på grunn av overflatevann estimert til å være på 1,6 til 3,6 milliarder kroner per år. På kommunalt nivå utgjør utfordringene knyttet til overflatevann en kostnads- og velferdstrussel i nesten halvparten av landets kommuner. Regjeringen har utarbeidet en strategi for å håndtere overflatevann med mål om å forebygge skader på byggverk, miljø og helse. For å nå målene er det behov for større kunnskap om nedbør, avrenning, tiltaksmuligheter og fare for skade. Kommunene har selv et ansvar for å skaffe oversikt over dreneringsveger for overflatevann og kartlegge potensielle skadeområder (NOU 2015).

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) er i Norge ansvarlig for å kartlegge flomutsatte områder. NVE har gjort en grundig kartlegging av utsatte områder klassifisert etter gjentakintervall. Gjentakintervall vil si hvor ofte en kan forvente at en hendelse av gitt

størrelse gjentar seg (NVE 2015). I følge Myrabø (2013) er ikke et gjentaksintervall gyldig for flommer i små nedbørfelt da flomhendelser kan bli utløst av blokkerte dreneringsveger. Blokkerte dreneringsveger oppstår som følge av intens nedbør som forårsaker store vannmengder og høy sedimenttransport (Aall et al. 2015). Trær, kvister, sedimenter og lignende blir fraktet av vannmassene og kan bli avsatt ved åpningen til stikkrenner og kulverter. Blokkerte dreneringsveger fører til at vann kommer på avveie og kan dermed utgjøre et stort skadepotensial over store områder. Flommen i Gudbrandsdalen våren 2013 og flommen i Lillehammer sommeren 2014 er eksempler hvor blokkerte kulverter og stikkrenner førte vann på avveie, med store materielle skader som konsekvens (Myrabø 2013; Aall et al. 2015; Lillehammer kommune 2014).

For å forhindre lignende situasjoner i fremtiden, er det som påpekt av klimautvalget, behov for mer kunnskap om avrenningsforhold i nedbørfeltene og skadepotensialet til overflatevann (NOU 2015). Bruken av geografiske informasjonssystemer (GIS) for å undersøke hydrologiske utfordringer har vist seg å være en nyttig og effektiv tilnærming for å skaffe slik kunnskap (Bratlie 2015; Viréhn 2014; Meiforth 2013; Gruber & Peckham 2009). Hydrologiske verktøy integrert i GIS baserer seg på en høydemodell og kvaliteten av analysene blir styrt av kvaliteten til høydemodellen. På grunn av at vannets bevegelser hovedsakelig blir styrt av gravitasjon vil lavbrekk i overflatemodellen indikere vannveger (Gruber & Peckham 2009). Ved å bruke GIS og høydemodeller avledet fra høyoppløselig Light Detection And Ranging-data (LiDAR) kan hydrologiske analyser effektiviseres og til dels automatiseres. Tradisjonelt har hydrologisk kartlegging blitt utført med manuell digitalisering ved hjelp av flyfoto. I nyere tid er det utført en rekke studier av overflatehydrologi basert på høydemodeller (Callow et al. 2007).

## **1. 1 Problemstilling**

Studiens overordnede mål er å modellere flomveier og beregne endringer i akkumulert areal ved å blokkere kulverter og stikkrenner for undersøke effekten av vann på avveie som en årsak til skadene som ble påført i nedbørfeltene Bæla, Skurva og Åretta under flommen i 2014. Som en del av dette, vil oppgaven beskrive og visualisere flomveier. Både under normale forhold med åpne dreneringsveger, og med stengte dreneringsveger som følge av blokkerte stikkrenner og kulverter. To modifiserte høyoppløselige høydemodeller avledet fra

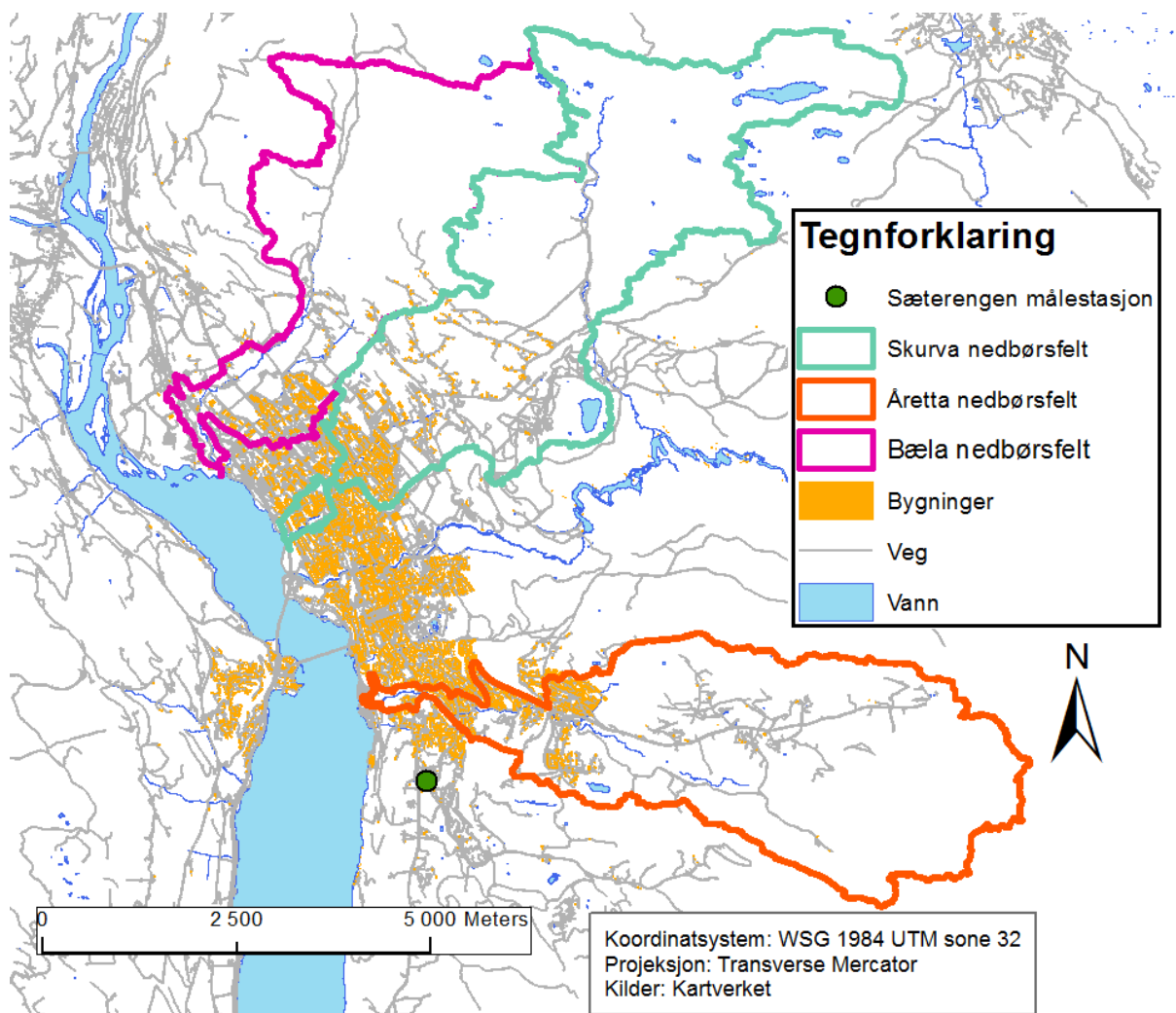
LiDAR-data er benyttet som grunnlag i de hydrologiske analysene. Beregninger og analyse ble utført i GIS for å kunne svare på problemstillingene i studien. Visualisering av flomveiene ble satt som et delmål. Oppgaven vil forsøke å besvare følgende to problemstillinger:

*-Ut i fra endringen i akkumulert areal i skadepunktene ved å blokkere kulverter og stikkrenner; er det noe som tyder på at vann på avveie var den største årsaken til skadene?*

*-Er det tydelig forskjeller i resultatene mellom de tre nedbørfeltene? Hvis dette er tilfellet, hva kan være årsaken til dette?*

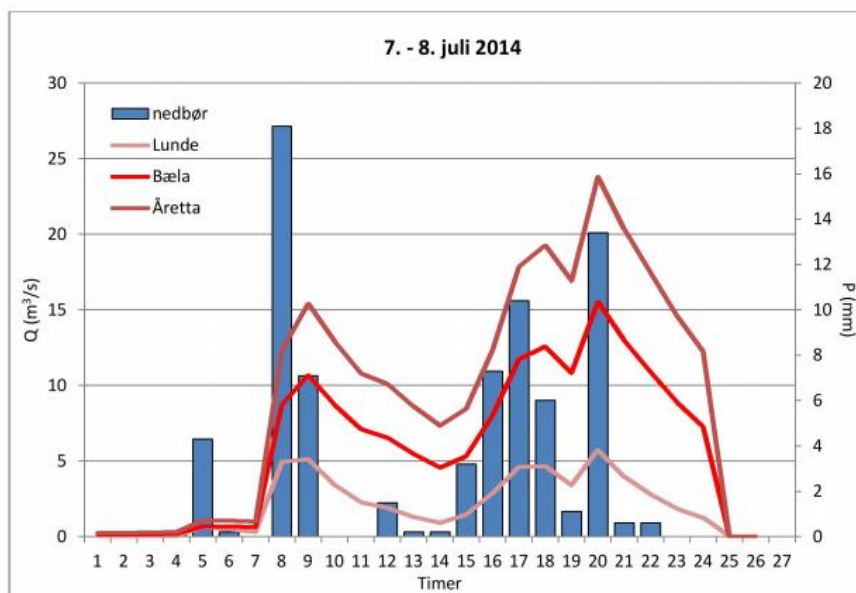
## **1. 2 Bakgrunn for oppgaven**

I juli 2014 ble tre mindre nedbørfelt i Lillehammer utsatt for flom som resulterte i stor materiell ødeleggelse. Store nedbørmengder sjuende og åttende juli (07.07.2014-08.07.2014) førte til at nedbørfeltene Bæla, Åretta og Skurva med sidebekker ikke klarte å ta unna vannet (Se figur 1.1). Ved Sæterengen nedbørstasjon på Lillehammer ble nedbøren målt til 61 mm på 24 timer, men ifølge en kommunal rapport antas nedbøren å ha vært så høy som 90-120 mm øst og nord for Sæterengen målestasjon. Som figur 1 viser er de aktuelle nedbørfeltene lokalisert nord og til en viss grad øst for Sæterengen målestasjon, så nedbøren i disse områdene er forventet høyere enn den registrerte nedbøren. Beregninger gjort av NVE estimerte flommen i 2014 som en 40-50 årsflom i nedbørfeltene Bæla og Åretta (Lillehammer kommune 2014).



Figur 1.1: Oversiktskart som viser nedbørfeltene og målestasjon Sæterengen

Figuren under viser nedbør og vannføring per time under flommen i 2014. Figuren er basert på nedbør fra Fåvang målestasjon da den registrerte nedbøren der ble antatt å være mer lik den faktiske nedbøren i de gjeldene områdene enn den registrerte ved Sæterengen målestasjon (NVE 2014). I oppgaven er nedbørfeltet Lunde slått sammen med Bæla, mens Skurva ikke er representert i figuren. Fra figuren ser man at vannføringen i Bæla og Åretta nådde toppunktet omtrent likt som det nest kraftigste regnfallet, og at responstiden i nedbørfeltene var svært liten. Responstiden vil si tiden fra nedbøren inntreffer til vannføringen i nedbørfeltet øker. En annen interessant observasjon er at nedbørfeltene Åretta og Bæla hadde nær identisk responstid til tross for ulik vannføring.



Figur 1.2: Nedbør og vannføring for Bæla og Åretta 7-8 juli 2014. (NVE 2014)

Den kraftige nedbøren sjuende-åttende juli førte til at vannmengdene ble for store til at stikkrenner, bruer og kulverter klarte å lede vannet i nedbørfeltene Bæla, Åretta og Skurva med sidebekker ned til hovedvassdraget i dalbunnen (Aall et al. 2015; Nordeidet & Sagen 2015). Vannet drenerte nye veger og førte til store skader på eiendommer, infrastruktur og bebyggelse innenfor alle vassdragene. Hovedsakelig ble vannet tvunget til å ta nye veger som en konsekvens av blokkerte stikkrenner og kulverter. Blokkeringen av stikkerenner og kulverter skyldes massetransport og erosjon, og er en stor utfordring i bynære nedbørfelt (Lillehammer kommune 2015). I følge Lillehammer kommunes rapport (2014) etter flommen i 2014 er flere av kulvertene og eksisterende bekkeløp ikke rustet for å takle mer enn en 10-årsflom. Beregninger gjort etter flommen i 2014 anslår at kommunens egne utgifter til opprydning/istandsetting i etterkant av flommen var så store som 10-11 millioner kroner. I tillegg har private aktører, Statens vegvesen og jernbaneverket med flere hatt store kostnader som ikke er med i beregningen (Lillehammer kommune 2014).

### 1.3 Tidligere studier

I flere norske kommuner er det iverksatt kartlegging av flomveger ved bruk av GIS. Bratlie (2013) utviklet et metodisk prinsipp for beregning av flomveier i kommunal forvaltning med eksempler fra Nedre Eiker kommune. I denne studien beskrives, trinn for trinn, hvordan kommuner kan kartlegge flomveger med utgangspunkt i en stor flomhendelse fra 2012. En høyoppløselig høydemodell ble brukt som grunnlag, med supplerende vektordata fra FKB (Felles kartdatabase, Statens kartverk). Meiforth (2013) har gjort en lignende studie og kartlegger flomveger ved to ulike scenario, i Trondheim kommune. I Meiforth (2013) sin studie blir både flomveger under normale forhold, det vil si med åpne dreneringsveger, og under forhold med blokkerte kulverter og stikkrenner undersøkt. For å tilpasse høydemodellen til hver av de to scenariene utfører Meiforth (2013) ulike modifiseringer av den opprinnelige høydemodellen. For høydemodellen for åpne dreneringsveger blir bygninger hevet og kulverter og bruer senket. For høydemodellen for stengte dreneringsveger blir derimot bygninger hevet og bruer senket. Det fører til at i den hydrologiske modelleringen for stengte dreneringsveger blir vannet tvunget til å strømme langs de blokkerte kulvertene og dermed ta nye veger, der vannet normalt hadde strømmet gjennom kulvertene. I likhet med studien til Bratlie (2013) bruker Meiforth (2013) høydemodeller avledet av høyoppløselig LiDAR-data som grunnlag. I følge Meiforth (2013) er det nødvendig å supplere med FKB-vektordata for å kompensere for varierende punkttetthet og mangelfull klassifisering i LiDAR-dataene, for å gjøre høydemodellen egnet til hydrologisk modellering.

I tillegg til økt fokus på kartlegging av flomveger i kommunene har det i løpet av de siste årene blitt skrevet flere masteroppgaver med lignende tema, blant annet ved geografisk institutt, NTNU. Flere av oppgavene har vært en del av NIFS-prosjektet som er et felles prosjekt mellom Jernbaneverket, NVE og Statens vegvesen. Med utgangspunkt i flomhendelsen i Gudbrandsdalen våren 2013 studerer Viréhn (2014) vann på avveie i tre ulike nedbørfelt, som et resultat av blokkerte stikkrenner og kulverter. I dette studie blir de hydrologiske analysene utført etter samme prinsipp, med åpne og stengte dreneringsveger, som i studien til Meiforth (2013). I tillegg blir GPS-registrerte skadepunkter fra feltundersøkelser brukt for å sammenligne akkumulert areal ved åpne dreneringsveger og stengte dreneringsveger der flommen i 2013 påførte skader. Ut i fra endringen i akkumulert areal ved å blokkere dreneringsvegene, indikerer studien om skadene som ble påført i punktene skyldes vann på avveie. En annen masteroppgave skrevet av Hole (2015) vurderer romlige mønstre ved bruk av skadedata fra forsikringsbransjen for å identifisere



problemområder, i tillegg til å sammenligne skadedataene med modellering av flomveier i Stavanger kommune. Denne studien viser at tilgangen på skadedata kan generere innsikt om nye problemområder knyttet til flom.

Også internasjonalt har GIS blitt brukt til å visualisere flomområder, som studien til Demir & Kizi (2015). Studien brukte ArcGIS og tilleggsverktøyet *HEC-RAS* (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) for den hydrologiske modelleringen, for å så utarbeide kart som beregner flomskader og flomutsatte områder. Studien viser at man ut ifra topografiske data kan avdekke faktiske flomområder, og slik gjøre byplanlegging bedre rustet til å takle flomhendelser.

#### **1. 4 Begrensninger og forutsetninger**

De hydrologiske analysene i oppgaven baserer seg på at overflatevann vil kontrolleres av gravitasjonen, og derfor samles i lavbrekk (konkave strukturer) i terrenget. Det vil si at flomveiene og akkumuleringsarealet som blir modellert kun baserer seg på en høyoppløselig høydemodell. Parametere som mengde vann, erosjon og infiltrering ned i bakken er ikke med i beregningene. Avrenningsfaktoren tilsvarende 1 for hele studieområdet, og det er ikke benyttet en nedbørraster som vektraster i modelleringen av akkumulering. Kun vann som drenerer på overflaten er tatt i betraktning.

Analysene blir gjort på bakgrunn av to ulike scenarier. Det første scenariet er med fungerende og åpne stikkrenner og kulverter. Stikkrennene og kulvertene er her senket 10 meter i høydemodellen og har en teoretisk uendelig kapasitet til å la vannet strømme fritt gjennom. Det andre scenariet er med blokkerte stikkrenner og kulverter og stengte dreneringsveger. Her er broer og kulverter ikke senket i høydemodellen og vanngjennomslippeligheten er dermed teoretisk null. Dette scenarioet kan i virkeligheten sammenlignes med en situasjon der sedimenter, kvister og lignende avsettes ved åpningen til kulvertene, som fører til at de tettes igjen så vannet blir tvunget til å finne nye veier (Vatne 2013).

#### **1. 5 Oppgavens oppbygging**

Oppgaven er delt inn i syv kapitler. Innledningsvis vil en beskrivelse av studieområdet presenteres i kapittel 2 områdebeskrivelse. Her vil først en generell beskrivelse av Lillehammer bli presentert, fulgt av en mer detaljert beskrivelse av hvert enkelt studieområde. I kapittel 3 beskrives teorien knyttet til oppgaven, mens kapittel 4 tar for seg databearbeiding

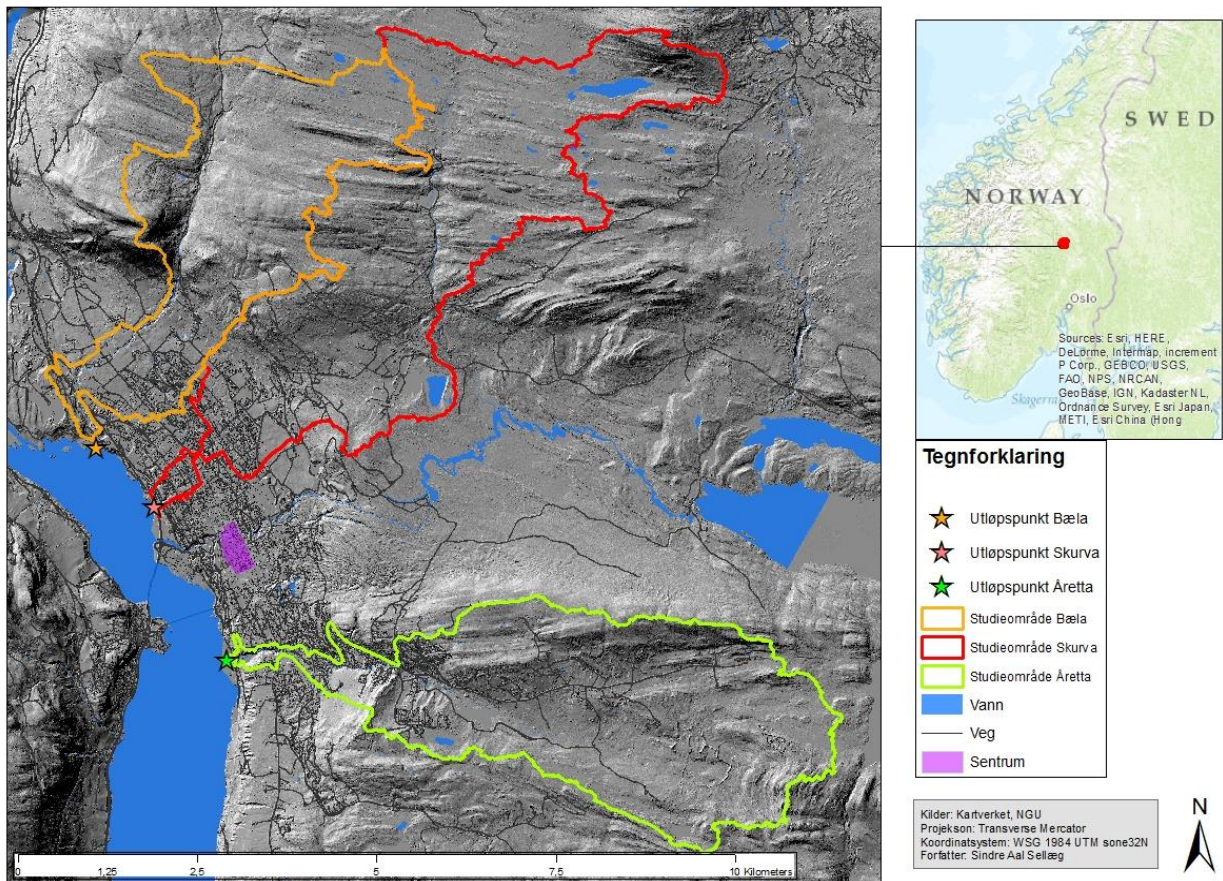
og metode. Resultatene presenteres i kapittel 5, disse vil bli diskutert i kapittel 6. På bakgrunn av dette vil det avslutningsvis presenteres en konklusjon, med et forsøk på å besvare problemstillingene

## Kapittel 2 - Områdebeskrivelse

De tre valgte studieområdene, nedbørfeltene Bæla, Skurva og Åretta, befinner seg hovedsakelig i Lillehammer kommune. Kun den øvre delen av studieområdet Åretta ligger i nabokommunen Ringsaker. Lillehammer kommune ligger 61,07 grader nord ved sørenden av Gudbrandsdalen og ved nordenden av Mjøsa i Oppland fylke. Lillehammer kommune har ca. 27.000 innbyggere og har et totalt areal på 477 km<sup>2</sup>, hvorav 452 km<sup>2</sup> er landareal (Lillehammer kommune 2012). Bykjernen og den største andelen av befolkningen er lokalisert øst for Mjøsa.

Studieområdene er valgt på bakgrunn av konsekvensene flommen i juli 2014 medførte områdene. I følge NVE er det 41 nedbørfelt som helt eller delvis er innenfor kommunegrensen til Lillehammer. Denne studien bruker ikke NVE sin inndeling av nedbørfelt som utgangspunkt da den blant annet har Bæla og Skurva i samme nedbørfelt. Den geografiske avgrensningen til hvert enkelt studieområde er i denne studien bestemt av nedbørfeltets utstrekning. Studieområdene har blitt definert ut i fra en *watershed* analyse i ArcMap. For Åretta og Bæla ble det benyttet åpne dreneringsveier i *watershed* analysen, men for Skurva ble enkelte kulverter stengt for å få frem et større nedbørfelt som kan oppstå ved blokkerte vannveger. De definerte nedbørfeltene representerer ikke absolutte grenser for denne studien, da nedbørfelt er dynamiske i forhold til at arealet endrer seg ut i fra dreneringen.

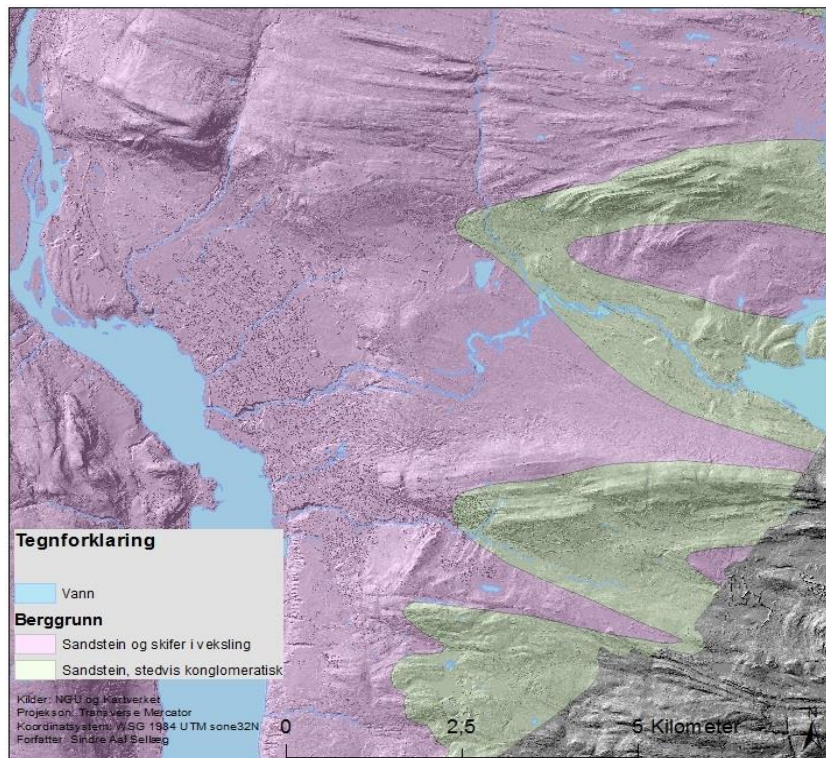
Felles for studieområdene er at det er relativt små bynære nedbørfelt og at de munner ut i Mjøsa/Lågen. Kartet til venstre i figur 2.1 viser de tre nedbørfeltene med utløpspunkter og viser hvor de er lokalisert i forhold til Lillehammer sentrum og Mjøsa/Lågen. En mer detaljert beskrivelse av hvert enkelt studieområde vil bli presentert etter de parameterne som betraktes felles for alle studieområdene.



Figur 2.1: Oversiktskart over studieområdene med utløpspunkt.

## 2. 1 Berggrunnsgeologi

Brøttumsformasjonen i Gudbrandsdalen består av grå sandstein og svarte skiferlag, og inneholder mellom 30-40 prosent leirskifer, som har gitt opphav til en finstoffrik morenejord. Berggrunnsgeologien på Lillehammer er dominert av denne formasjonen, som ble dannet for 750-650 millioner år siden ved metamorfosering av grus, sand og leiravsetninger. (Ramberg et al. 2006).



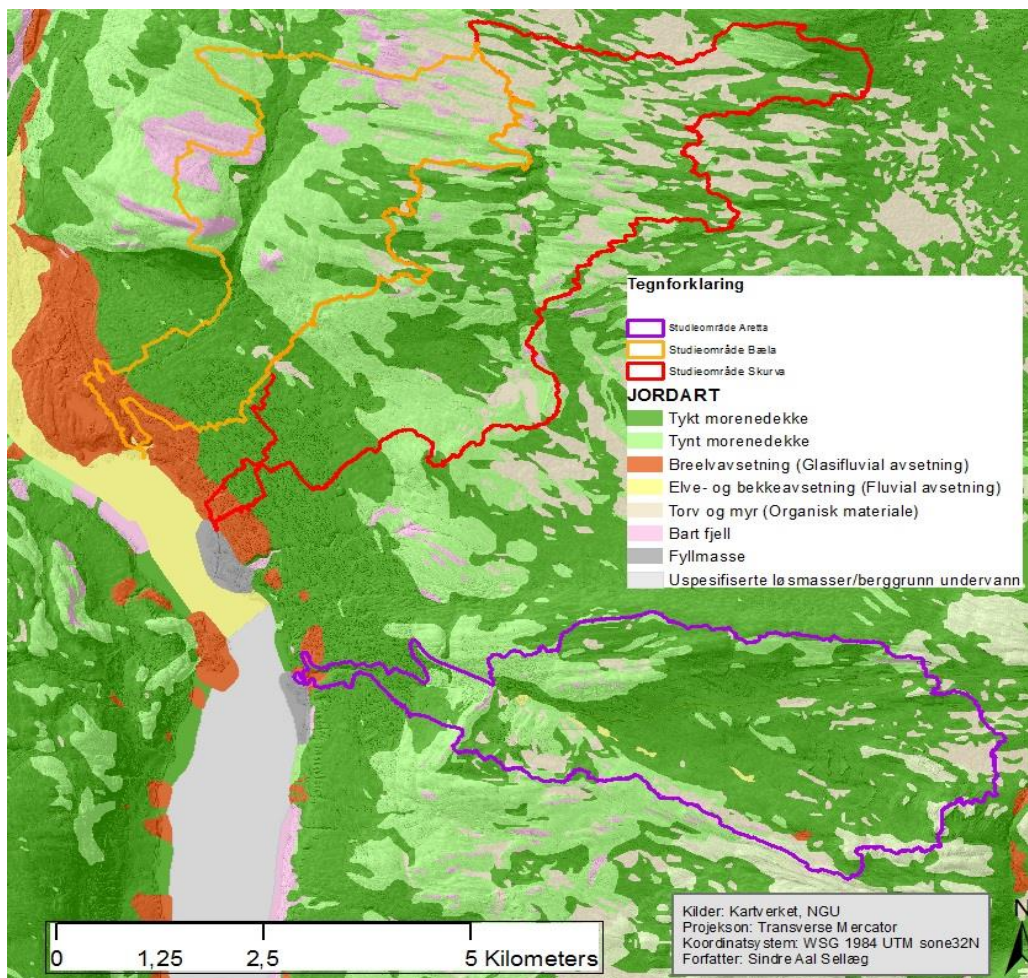
Figur 2.2: Berggrunnsfordeling Lillehammer kommune (Utarbeidet av data fra NGU.no)

Berggrunnsfordelingen i Lillehammer kommune er vist i figuren over, og er utarbeidet fra berggrunnsdata fra Norges geologiske undersøkelse (NGU). Sandstein og skifer i veksling er svært dominerende, men med innslag av stedvis konglomeratisk sandstein.

## 2. 2 Kwartærgeologi

Kwartærgeologien på Lillehammer er dominert av morenemateriale, det vil si løsmasser som er avsatt av isbreer. Som vist i løsmassekartet (figur 2.3) for de tre studieområdene under, er det hovedsakelig morenedekke (grønne farger i kartet) som er mest utbredt innenfor alle studieområdene. Når overflaten i de morenedekte områdene er det sandig og/eller grusig grovkornet materiale som dominerer, mens under 2-3 meter er det finkornet siltig og/eller leirig morenemateriale som er mest utbredt. En annen fellesnevner for kvartærgeologien til de tre studieområdene er at det ved utløpet av studieområdene er glasifluviale avsetninger bestående av sorterte lag med forskjellig kornstørrelse. I tillegg er det forekomster av torv- og myrområder høyere opp i studieområdene (Olsen 2008).





**Figur 2.3:** Kvartærgeologi Lillehammer kommune (utarbeidet av data fra NGU.no)

Løsmassene i Lillehammer kommune blir i en rapport fra NGU (Olsen 2008) vurdert som relativt stabile til byggegrunn og annen aktivitet. Samtidig påpeker rapporten at det ved store nedbørmengder vil kunne forekomme ras og utglidninger, særlig i bratte skråninger med finkornet materiale.

## 2.3 Klima

Klimaprognoser tilsier at det i fremtiden sannsynligvis vil bli et våtere, varmere og villere klima i Norge. Den kraftige nedbøren sjuende-åttende juli 2014 i Lillehammer kan sies å være i tråd med dette (Lillehammer kommune 2016.). Prognosene baserer seg på koblede globale klimamodeller som er ned-skalert, og de baserer seg på ulike utslippsscenarioer. Ut i fra gjennomsnittet fra alle prognosene vil hele Norge oppleve en temperaturøkning på 3,4 grader celsius, mens økningen i nedbør vil være 18%. For Østlandet er den forventede økningen i

nedbør 12%. Det er forventet større regnflommer, at vårflommene vil inntreffe tidligere, mindre sannsynlighet for smeltevannsflommer og en økning av flommer på vinteren og senhøsten (DSB 2013). Det er forventet at nedbør om sommeren vil avta, men at lokale hendelser med ekstrem nedbør vil øke, og føre til at små bratte vassdrag og urbane områder bli mer utsatt for flom, jordskred og flomskred (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Klima er en viktig faktor for ulike hydrologiske prosesser, som for eksempel avrenning, og man opplever variasjoner fra år til år og sesongvariasjoner. I Norge er avrenningen delvis styrt av solinnstråling og nedbør (NVE 2002). Klimaet på Lillehammer er et typisk innenlandsklima, med store årstidsvariasjoner som kalde vintre og varme somre. Lillehammer ligger i le for lavtrykkene som kommer inn over vestlandskysten. I perioden 1961-1990 var det i Lillehammer en årlig gjennomsnittnedbør på 660 mm og en gjennomsnittstemperatur på ca. 2,9 grader celsius (Eklima 2015). Tabellen under er et utdrag fra tabell 5.2.6 fra rapporten "Klima i Norge 2100" (Hanssen-Bauer et al. 2009, side 93). Tabellen viser endringer i antall dager med mye nedbør, og endring i nedbørmengde på dager med mye nedbør for Østlandet ved middels (gul), lav (grønn) og høy (rosa) klima framskriving. I tabellen ser man at det er forventet økning i både antall dager og nedbørmengde på dager med mye nedbør for samtlige framskrivninger.

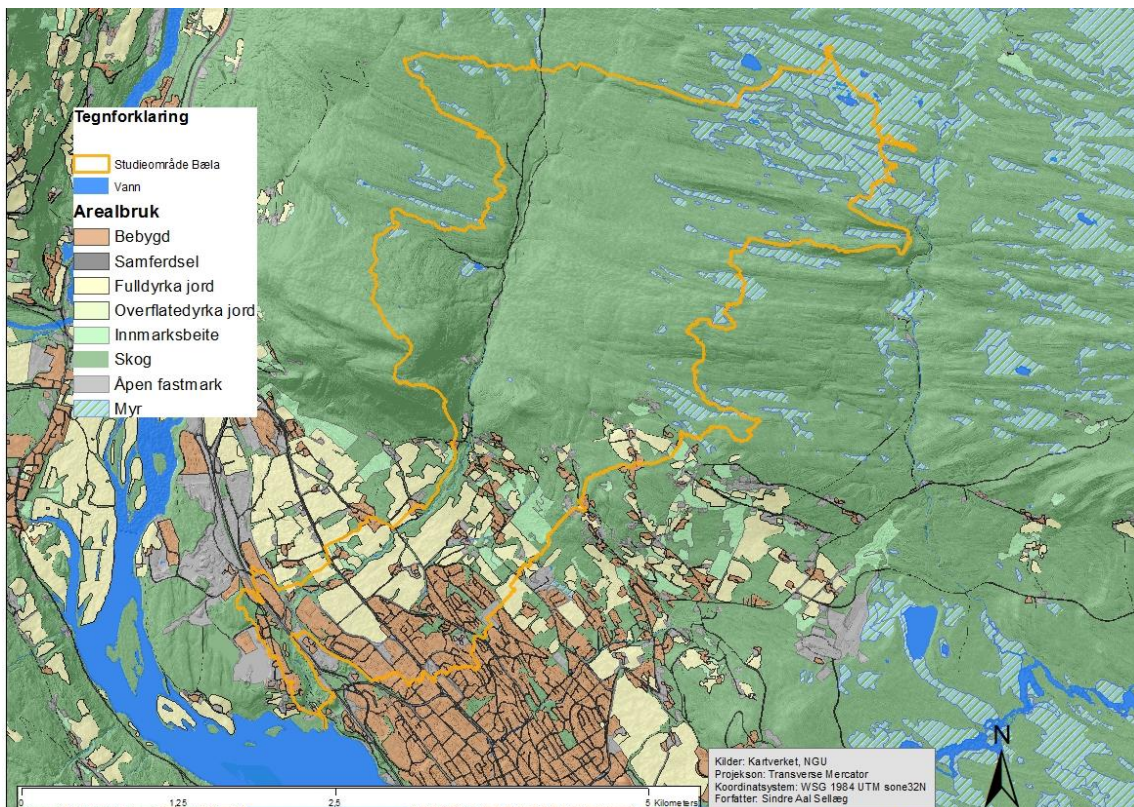
Region	Sesong	1961-90 til 2071-2100: Endring (%) i antall dager med mye nedbør			1961-90 til 2071-2100: Endring (%) i nedbørmengde på dager med mye nedbør		
		M	L	H	M	L	H
NR-2 Østlandet	År	65,4	34,8	94,8	14,4	8,0	19,0
	Vinter DJF	188,0	118,3	335,5	22,8	17,5	34,6
	Vår MAM	91,6	26,3	199,9	17,4	6,0	32,4
	Sommer JJA	44,9	6,1	81,0	10,8	0,2	20,4
	Høst SON	103,3	53,7	150,9	17	9,1	25,6

**Tabell 2.1:** "Relativ forandring (%) i antall dager med mye nedbør, og relativ forandring (%) i nedbørmengden på dager med mye nedbør, fra perioden 1961-90 til perioden 2071-2100 ifølge middels (M), høy (H) og lav (L) framskriving. "Dager med mye nedbør" er her definert som dager med nedbørmengder som i normalperioden 1961-90 ble overskredet i 0,5 % av dagene.» (Fra Hanssen-Bauer et al. 2009 side 93)



## 2.4 Bæla

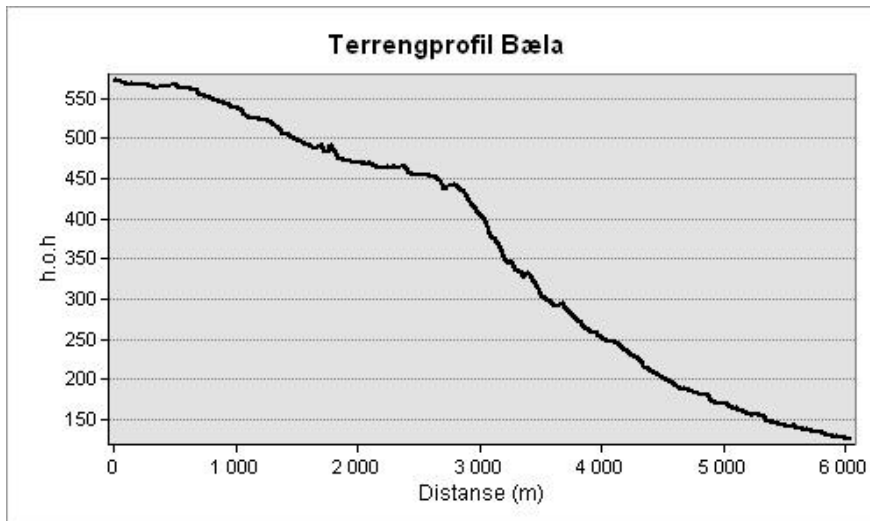
Studieområdet Bæla er lokalisert nord for Lillehammer sentrum, og omfatter nedbørfeltet til elven Bæla. Nedbørfeltet er avgrenset med egne analyser i ArcMap, ved hjelp av “watershed” verktøyet, med forbehold om at dreneringen fungerer som den skal. Figur 2.4 viser et kartutsnitt med grensen til studieområdet og arealbruk. Området har et areal på 12 km<sup>2</sup> og den største delen er dekket av skog, spesielt øvre del. Som man ser i figur 2.4 befinner det seg lengre ned i området en del dyrket jord, bebyggelse og infrastruktur.



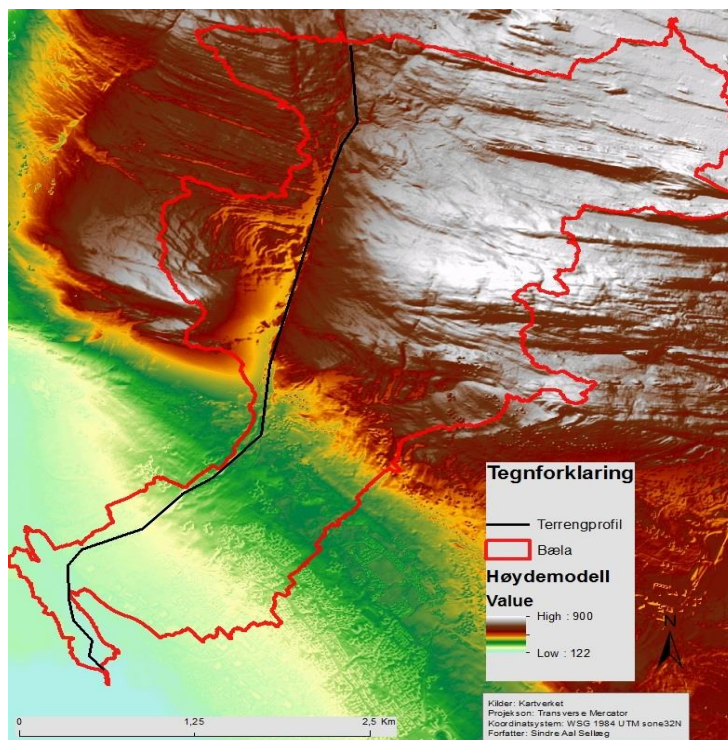
Figur 2.4: Arealbruk i studieområdet Bæla.

Figur 2.6 viser en høydemodell for studieområdet Bæla og hvor i terrenget terrengprofilen i figur 2.5 er hentet fra. Terrengprofilen er tegnet inn i dalføret som starter øverst i området før den går over i elveløpet til elven Bæla. Området heller mot sør-vest, med en gjennomsnittlig helning på ca. 10°. I den øverste skogdominerte delen av området er helningen minst, mens helningen er størst rundt midten av terrengprofilen, før den avtar mot bunnen av området.

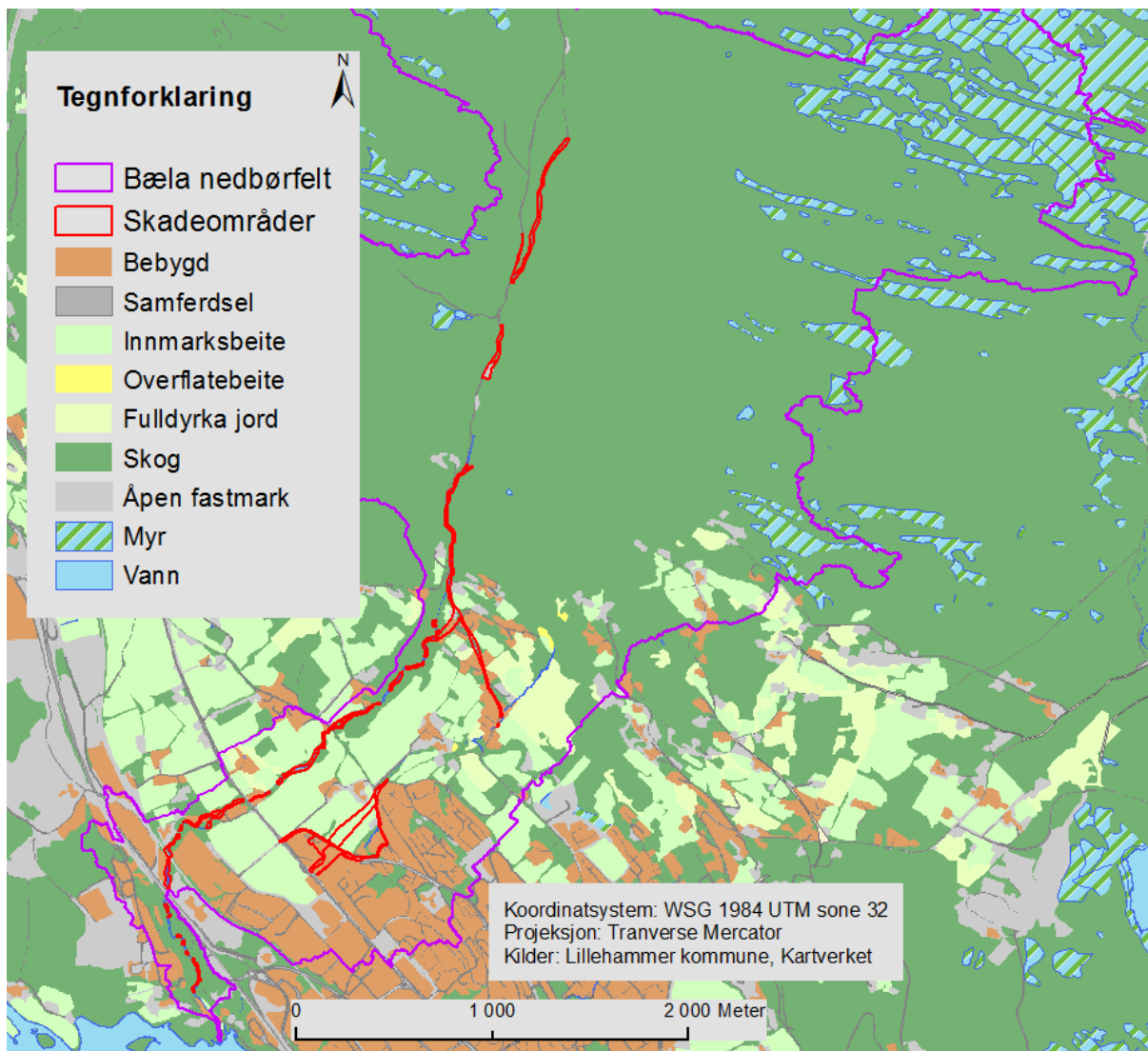




Figur 2.5: Terrengprofil.



Figur 2.6: Digital høydemodell og inntegnet terrengprofil

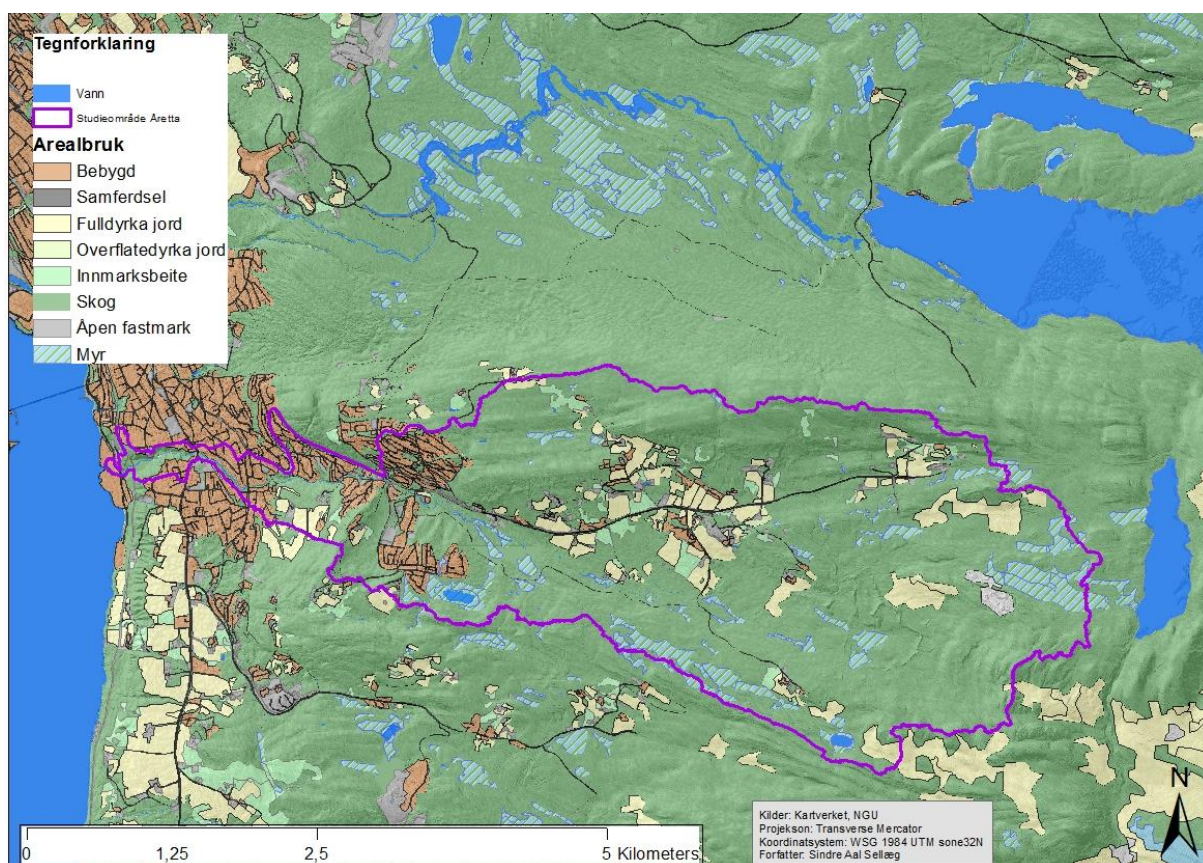


**Figur 2.7:** Oversiktskart over skadeområder fra flommen i 2014, Bæla nedbørfelt.

Ut i fra figur 2.7 kan man tolke at problemene under flommen i startet oppstrøms i Bælafaret. Stor vannføring førte til at elveløpet ble utvidet, og at sedimenter ble avsatt i front av kulverter som blokkerte de. Dette bidro til stor erosjon og massetransport, og elva tok nye veier. Dette førte til at kraften til elva økte nedstrøms, noe som resulterte i store skader. (Aall et al. 2015).

## 2.5 Åretta

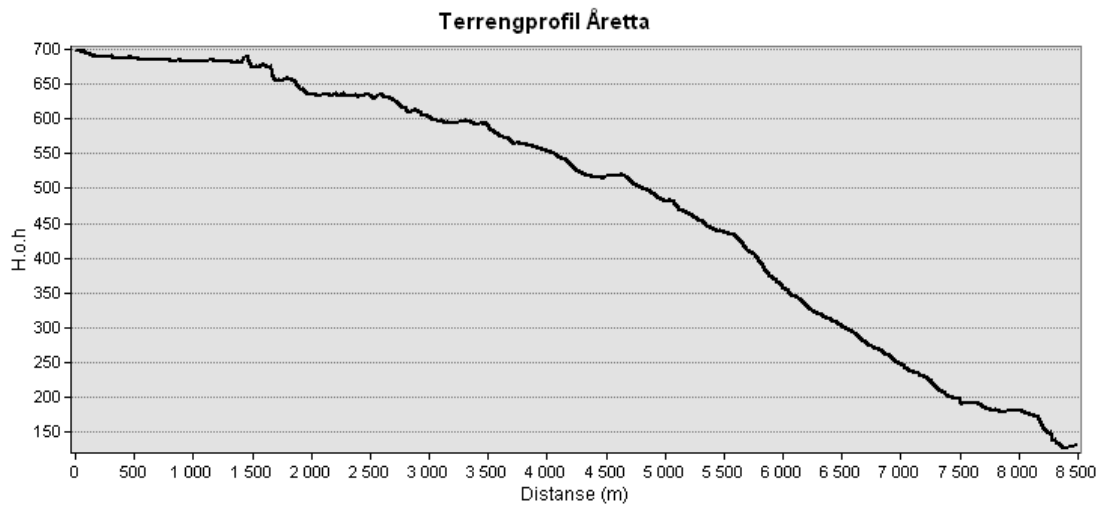
Studieområdet Åretta er lokalisert sør i Lillehammer, og strekker seg fra vestsiden av Ringsaker kommune rett vestover til Mjøsa. Studieområdet er på omlag 15 km<sup>2</sup>, og skog utgjør det største arealet. Den østlige delen av studieområdet er som figur 2.8 viser relativt tett bebygd med tilhørende infrastruktur. Det er i denne delen av området elven Åretta med tilknyttede sidebekker renner, og det er også hovedsakelig her skader knyttet til flomhendelser har oppstått.



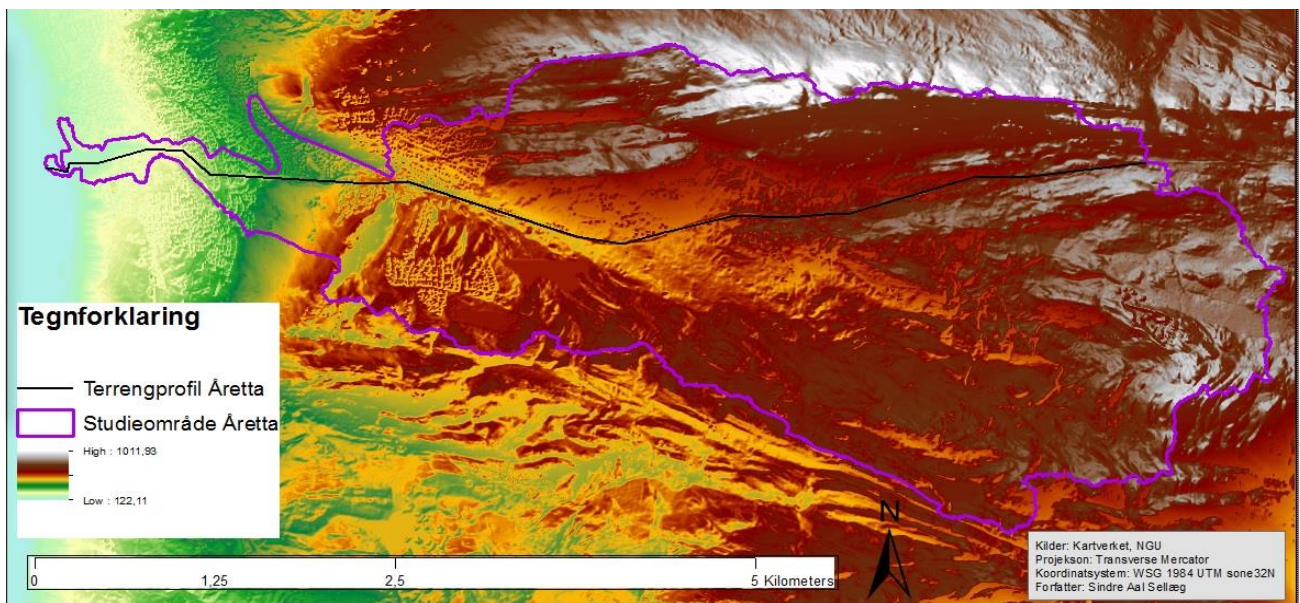
Figur 2.8: Kart med arealbruk i studieområdet Åretta

Området heller fra øst mot vest og den gjennomsnittlige helningen for hele studieområdet er på omlag 10°. Som terrengprofilen (figur 2.9) viser, er helningen relativt slak i den høyereliggende østlige delen av studieområdet, mens terrenget er brattere i den vestlige delen. Terrengprofilen er tegnet inn langs fylkesvei 216 fra øst, helt til studieområdet blir smalere og terrengprofilen mer eller mindre følger elveløpet til Årettaelva.

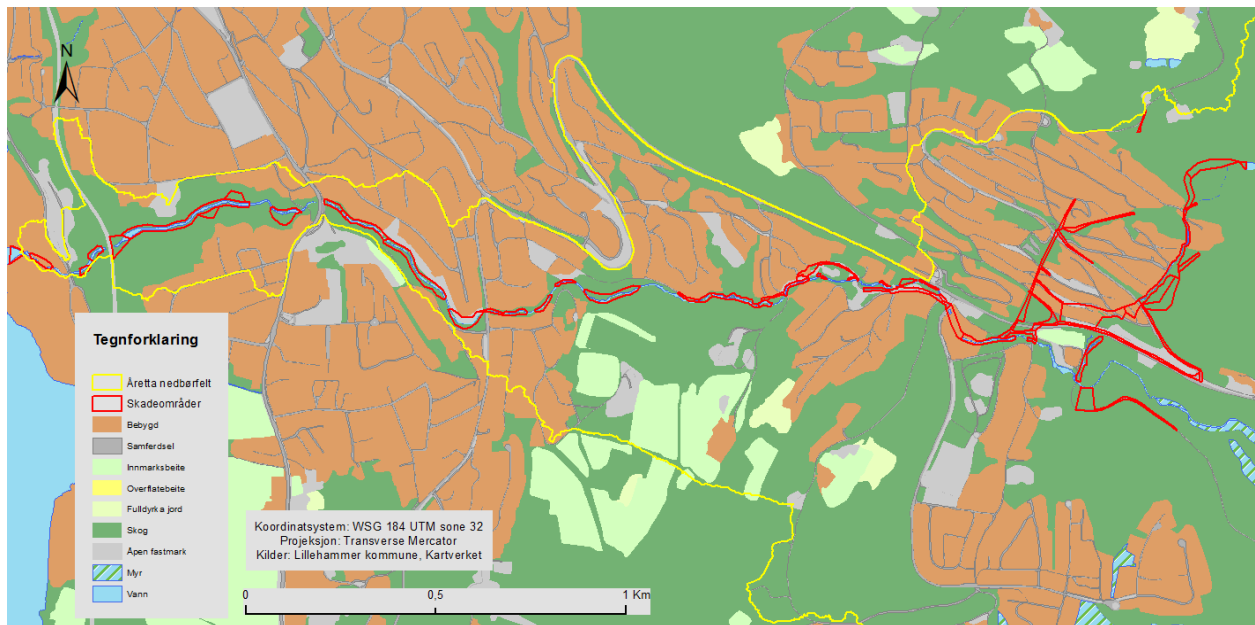




Figur 2.9: Terrengprofil



Figur 2.10: Digital høydemodell og inntegnet terrengprofil



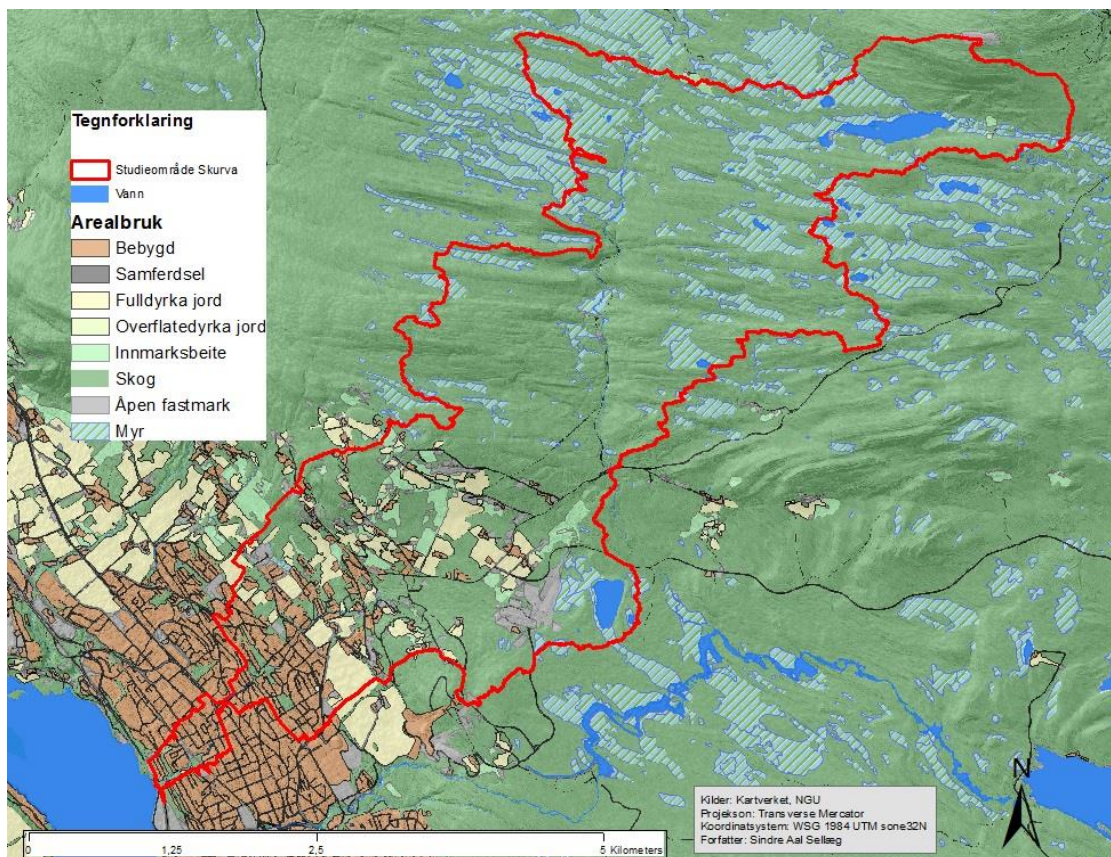
**Figur 2.11:** Kart med oversikt over skadeområder fra flommen 2014, Åretta nedbørfelt.

Figuren over viser skadeområder i Åretta nedbørfelt fra flommen i 2014. Problemene startet i Askjellerudbekken, en sidebekk til Årettaelva, som er lokalisert ved skadeområdene nord-øst i kartet. Kulverter ble blokkerte, og vannet tok nye veier. Bebyggelse, butikker og en bensinstasjon ble rammet av skader fra vannmassene. Problemene forplantet seg nedstrøms i nedbørfeltet og rammet til slutt jernbanelinjen i bunn av feltet (Aall et al. 2015).

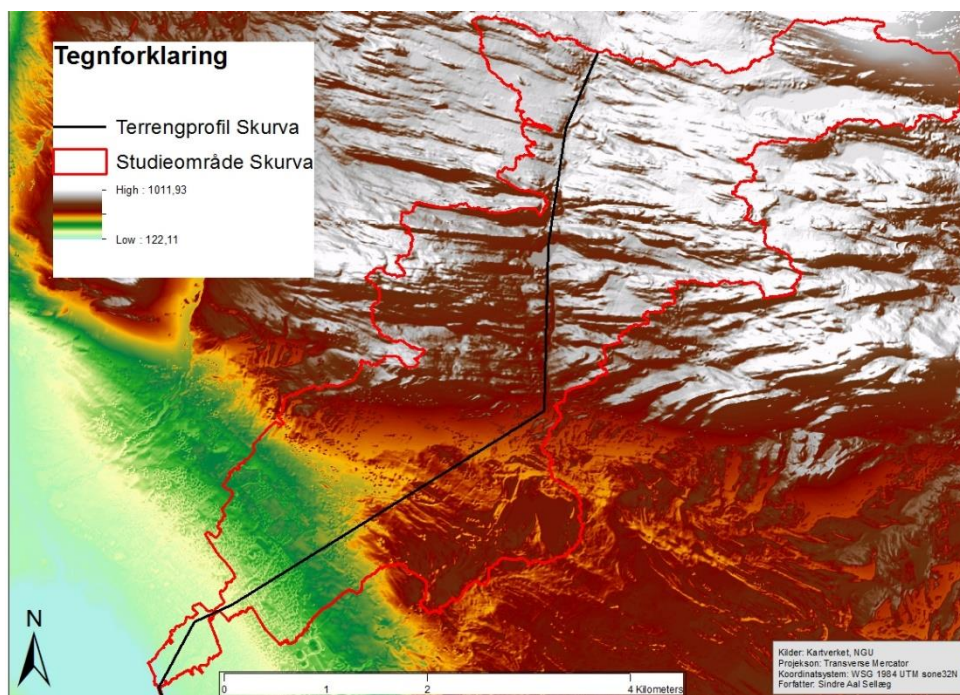
## 2. 6 Skurva

Studieområdet Skurva strekker seg fra skog- og myrdominerte områder nord-øst i Lillehammer kommune, mot bebyggelsen i sør-vest, til utløpspunktet ved Mjøsa/Lågen. Studieområdet er oppgavens største i areal med sine 17,5 km<sup>2</sup>, og som vist i figur 2.12 utgjør skog den største andelen av arealet, mens bebyggelse dominerer den lavereliggende delen av området.

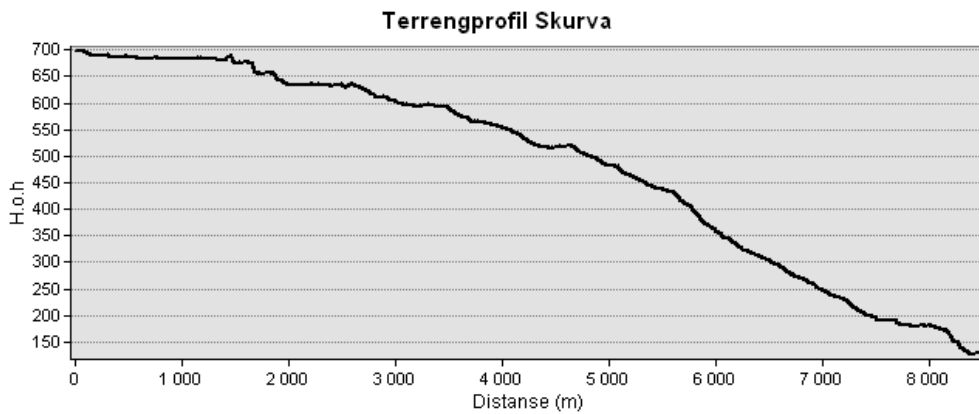




Figur 2.12: Kart over arealbruk i studieområdet Skurva.

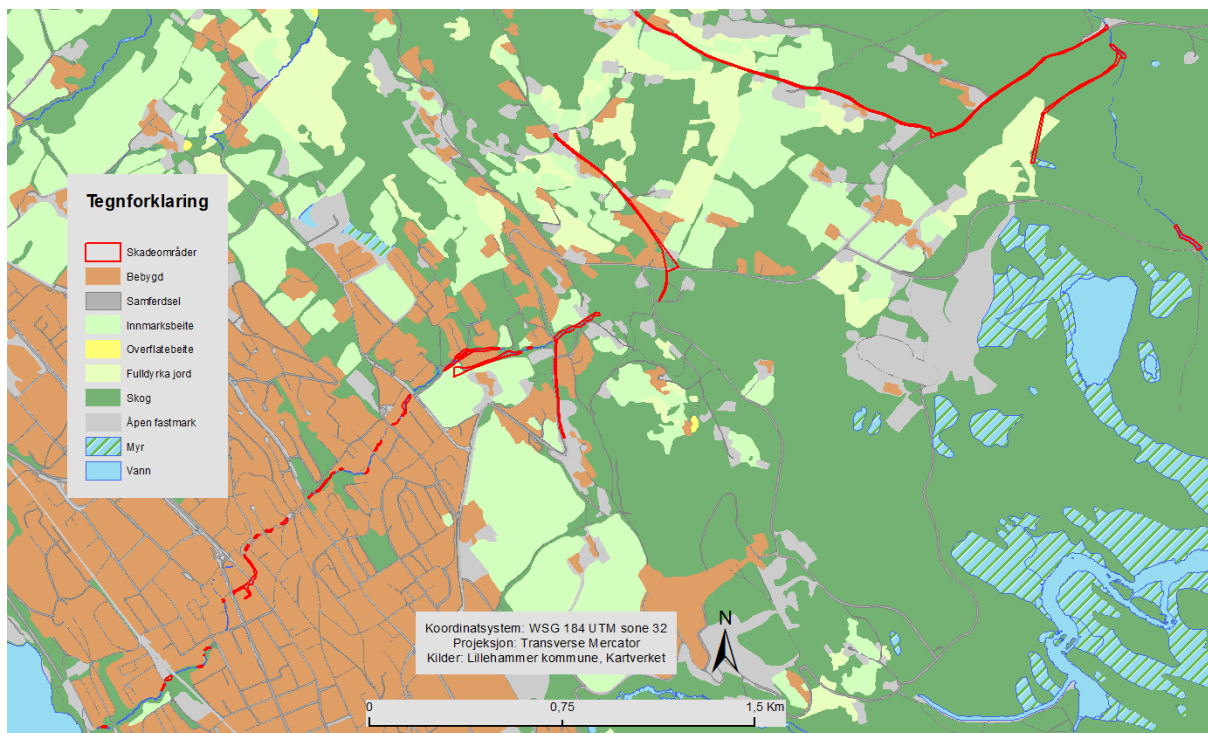


Figur 2.13: Digital høydemodell og inntegnet terrengprofil.



**Figur 2.14: Terrengprofil**

Området heller fra nord-øst mot sør-vest, og har i likhet med de andre studieområdene lavest helning i høyereliggende områder, med brattere helning fra midten av området ned mot utløpspunktet. Den gjennomsnittlige helningen for hele området er på omlag  $9^\circ$ .



**Figur 2.15: Oversikt over skadeområder fra flommen i 2014, Skurva nedbørfelt.**

I likhet med de to andre nedbørfeltene startet problemene i høyereliggende deler av området. Skadeområdene er illustrert i figur 2.15. og skadeområdene øverst til høyre i figuren er knyttet til startpunktet for problemene. Her ble løpet til en bekk som vanligvis tilhører nedbørfeltet Mesna blokkert, og vannet drenerte ned (skrått ned til venstre i kartet) til Skurva. Store skader ble påført veier, bruer og eiendommer på grunn av den store massetransporten (Aall et al. 2015).



## **Kapittel 3 - Teori**

### **3. 1 Geografiske informasjonssystemer**

Geografiske informasjonssystemer (GIS) har siden oppstarten på 1960-tallet fått en stor utbredelse innenfor ulike fagområder, særlig i løpet av de siste tiårene. GIS blir stadig benyttet innenfor nye fagområder og til å løse nye problemer (Rød 2015). En kort og konsis definisjon av GIS er vanskelig å lage, på grunn av de mange bruksområdene, ulike typer brukere og de utallige mulighetene innenfor GIS. GIS blir blant annet beskrevet som databaserte systemer hvor man kan lagre og bearbeide geografiske data. (Longley et al. 2011). Bearbeide i denne sammenhengen inkluderer muligheten til å analysere, visualisere og manipulere data. Med en slik beskrivelse av GIS er det nødvendig å presisere hva som menes med geografiske data. Geografiske data består av romlige data og egenskapsdata. Romlige data har en stadfesting bestemt av koordinater X, Y og Z og en geometrisk form; enten punkt, linje eller polygon. Egenskapsdata er beskrivende data som enten er kvantitative eller kvalitative (Rød 2015).

I takt med den økende utbredelsen av GIS har flere programvarer blitt utviklet. I denne oppgaven er det blitt benyttet programvarepakken ArcMap, som er utviklet av Environmental Service Research Institute (ESRI).

#### **3. 1. 1 Vektor og raster**

GIS er et verktøy som gir mulighet til å skaffe ny kunnskap om virkeligheten ved å representere fenomener fra virkeligheten gjennom kart. I GIS er det hovedsakelig to representasjonsstrategier: kontinuerlig feltanskuelse og diskret objektanskuelse. Det betyr at man som GIS-bruker enten må representere fenomener i virkeligheten som diskrete objekter, eller som et kontinuerlig felt (Rød 2015). I følge Schuurman (2004) definerer dermed objektanskuelsen og feltanskuelsen de ontologiske mulighetene til GIS.

Koblingen mellom datastrukturen vektor og objektanskuelse er sterk. Det samme gjelder datastrukturen raster og feltanskuelse. I praksis kan begge datastrukturene brukes for å representere diskrete objekter og kontinuerlig felt. Fordeler og ulemper avhengig av bruksområde eksisterer for både vektor og raster (Longley et al. 2011).

I den diskrete objektanskuelsen blir virkeligheten representert av diskrete objekter som punkter, linjer og polygoner. Det er også disse som er de geometriske objekttypene til vektordata, og forklarer dermed den sterke tilknytningen mellom vektor og diskret objektanskuelse. Diskrete objekter har klare grenser og hvert enkelt objekt har en egen rad i attributtabelen som beskriver objektets egenskaper (Rød 2015). Eksempler på diskrete objekter kan være en lyktestolpe representert som et punkt, en elv som en linje og bygninger som flater (polygoner).

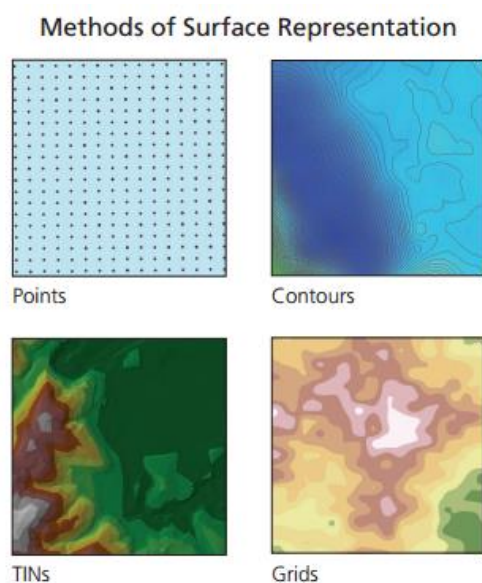
I den kontinuerlige feltanskuelse blir virkeligheten representert gjennom et sett variabler, der hver variabel har en verdi uansett posisjon, og er kontinuerlig utbredt over feltet. Vanlige variabler er for eksempel høyde over havet og temperatur. Rasterdata er bygget opp av et rutenett av piksler med like stor størrelse, og hver enkelt piksel har en verdi (DeMers 2005).

### **3. 1. 2 Usikkerhet knyttet til geografisk informasjon**

All forskning som analyserer fenomener fra virkeligheten er basert på representasjoner av virkeligheten, som ikke vil være like sammensatt og kompleks som virkeligheten er. Representasjoner vil alltid være en forenkling av virkeligheten som utelater elementer som blir betraktet som uviktige. Kvaliteten på resultatene er avhengig av hvor tett på virkeligheten representasjonene er (Rød 2015). Som et resultat av at representasjonen vi studerer ikke er fullverdig, vil usikkerhet oppstå og feilkilder må vurderes. I følge Zhang & Goodchild (2003) er begrepet usikkerhet i geografisk informasjon et paraplybegrep for feil, tilfeldigheter og vaghet. Geografiske data og bruken av geografiske informasjonssystemer er knyttet til usikkerhet som oppstår gjennom hele prosessen. Fra å definere geografiske fenomener, datainnsamling, prosessering og behandling av data til bruken og tolkning av data. Ved å definere og generalisere geografiske variasjoner i virkeligheten, for å kunne uttrykke de i datamodeller er det unngåelig å ikke påføre en viss usikkerhet. Modellering og bruken av GIS representerer et avansert samspill mellom menneskelige og instrumentale faktorer. Usikkerheten er kontrollert av ferdighetene til personen som utfører analysene og nøyaktigheten til instrumentene. Som følge av utviklingen av GPS-systemer de senere årene har usikkerheten tilknyttet datainnsamling blitt kraftig redusert. Når det gjelder prosessering og behandling av data kan usikkerhet oppstå som følge av å kombinere ulike datasett med varierende detaljnivå og ved å konvertere data mellom ulike formater. I tillegg er det ofte knyttet stor usikkerhet til analyser og kommunisering av geografiske data, som kan lede til feiltolkninger (Zhang & Goodchild 2003).

### 3. 2 Høydemodeller

Terrengoverflater representeres vanligvis i GIS (se figur 3.1) ved hjelp av isolinjer (Contours), trekantmodeller (TIN-modeller) eller digitale høydemodeller (heretter DEM). En DEM er en rasterrepresentasjon, mens en TIN-modell er en vektorrepresentasjon. Felles for begge er at de tar utgangspunkt i innsamlede punkter med kjente X, Y og Z-koordinater, og at de gir en 2.5-D representasjon av overflaten (Longley et al. 2011). En ekte 3-D overflate vil



Figur 3.1: Metoder å representere terrengoverflater på i GIS (Childs 2004).

inneholde flere Z-verdier for hver enkelt X, Y posisjon, mens TIN-modeller og DEM bare kan lagre en Z-verdi. TIN-modeller blir laget ved at de kjente punktene blir triangulert til en overflate av ikke-overlappende trekanter (Rød 2015).

I denne oppgaven vil høydemodeller refereres til som DEM, og ikke TIN-modeller og isolinjer da disse ikke ble benyttet i oppgaven. En DEM lagrer høydeverdiene i en grid som består av kvadratiske celler hvor hver enkelt celle kan inneholde kun en Z-verdi (Gallant & Wilson 2000). Hver celle har dermed en høydeverdi, som er plassert midt i cellen (Hengl & Evans 2009). Høydeverdiene til cellene blir som oftest generert ved interpolasjon mellom de kjente målepunktene (Liu 2008). Kvaliteten og nøyaktigheten til en høydemodell blir i all hovedsak bestemt av avstanden mellom målepunktene. I tillegg vil datatypen, for eksempel om dataene lagres som heltall eller desimaltall, og cellestørrelsen påvirke nøyaktigheten til høydemodellen (ESRI 2012). Cellestørrelsen vil si den romlige oppløsningen, og er et mål på

hvor stort område hver enkelt celle dekker. Denne blir vanligvis oppgitt i meter, og en celle med 1x1 meter oppløsning tilsvarer at cellen dekker en kvadratmeter. Den romlige oppløsningen vil også påvirke hvor små objekter som lar seg identifisere, noe som gjelder for rasterformatet generelt (Rød 2015).

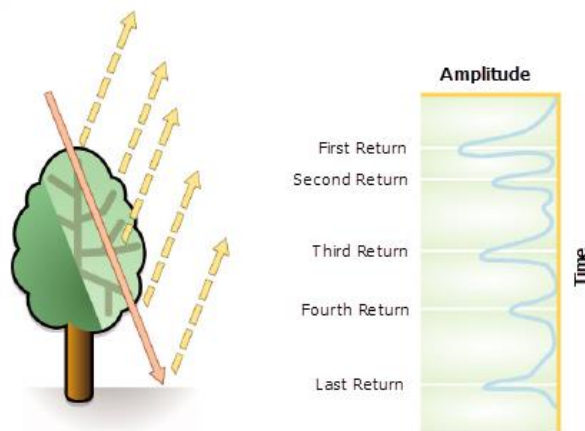
Det er fordeler og ulemper knyttet til alle de nevnte alternativene som kan representere en terrengoverflate i GIS. DEM ble ansett som mest hensiktsmessig for denne oppgaven. For det første fordi en DEM er standard inngangsdata i de fleste terrengoverflateanalyser man kan gjennomføre i GIS, som for eksempel hydrologisk modellering. For det andre er en DEM den mest nyttige representasjonen av en terrengoverflate fordi man fra en DEM enkelt kan avlede terrengparametere som helningsgrad, kurvatur og helningsretning (Pike et al. 2009; Rød 2015). En svakhet ved å representere en terrengoverflate med en gridbasert DEM er at avstanden mellom midten av cellen, der høydeverdien blir lagret, og de omkringliggende cellene er ulik. Cellene rett ved siden av, over og under vil ligge nærmere enn cellene diagonalt over og under. I følge Hengl & Evans (2009) kan dette medføre negative innvirkninger på resultatene ved for eksempel hydrologiske analyser.

### **3.3 Lidar**

I oppgaven er det benyttet to høydemodeller avledet fra LiDAR, med en oppløsning på 1x1 meter som grunnlag for de hydrologiske analysene. LiDAR er en forkortelse for Light Detection And Ranging, men blir også omtalt som luftbåren laserskanning. LiDAR er en aktiv fjernanalytisk metode og er ifølge Liu (2008) den mest effektive metoden for innsamling av terrengdata og DEM-beregning. LiDAR systemet består vanligvis av tre komponenter: Laserskanner, GPS-mottaker og en IMU (Inertial Measurement Unit).

Laserskanneren består av en pulsgenerator som aktivt sender ut laserpulser mot objekter på jordoverflaten og en sensor som registrerer de reflekterte retursignalene (Liu 2008). Som figur 3.2 viser, kan moderne LiDAR systemer registrere flere retursignaler for en enkelt laserpuls, som gjør det mulig å registrere høydeverdier på flere overflater (Gallay et al. 2013). Dette er

en stor fordel for eksempel i områder med mye vegetasjon. Avstanden mellom laserskanneren og objektet blir bestemt ut ifra tiden laserpuls bruker, fra den blir sendt ut mot objektet til



Figur 3.2: Laserpuls og reflekterte retursignaler (ESRI 2016b)

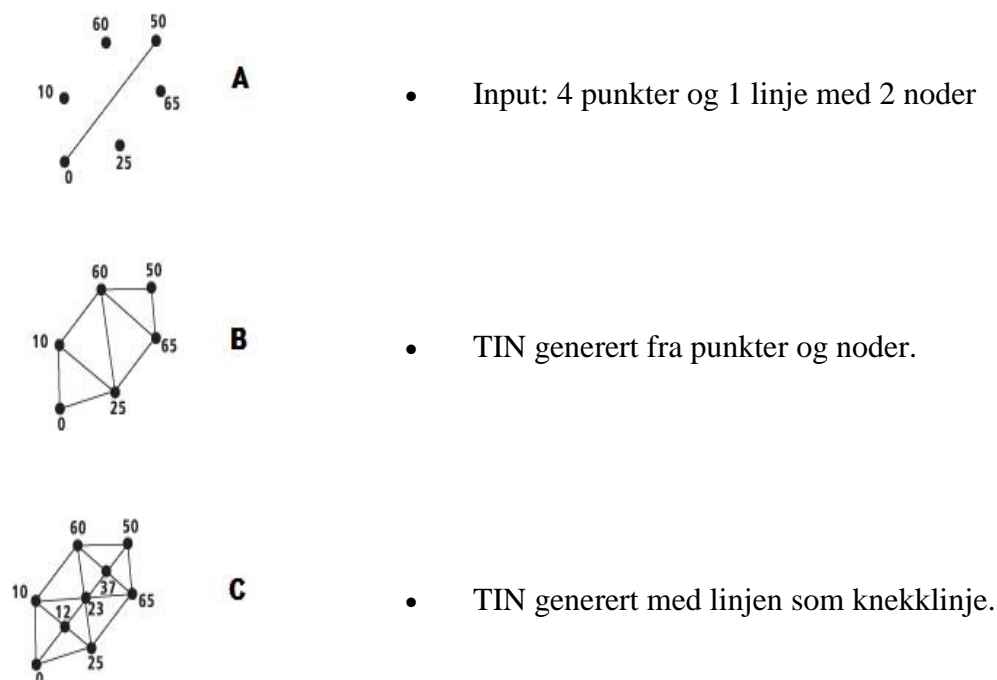
den returnerer til sensoren. Ved hjelp av GPS mottakeren som registrerer flyets posisjon i tre dimensjoner (X, Y og Z) og IMU som måler flyets rotasjon i rommet, er det mulig å beregne laserpulsens posisjon og retning. Denne informasjonen kan deretter brukes for å kalkulere objektets 3D-posisjon som lagres som punkter i tre dimensjoner. Nøyaktigheten til LiDAR data er tilknyttet nøyaktigheten til GPS og IMU. Presisjonen varierer fra skanningsøkt til skanningsøkt, men er generelt på centimeter nivå. Minste estimerte målefeil er på 15 cm i vertikalplanet og 20 cm i horisontalplanet for noen år siden (Liu 2008), men de mest moderne systemer operer gjerne med noen få cm presisjon i høyde og bredde. LiDAR er en gunstig metode for innsamling av terrengdata av flere grunner (NGI 2016). For det første på grunn av nøyaktigheten og evnen til å registrere høydeverdier for flere overflater, hvilket betyr at forskjellige objekter kan automatisk klassifiseres, f.eks. bakkeoverflate, vegetasjon og infrastruktur. For det andre er produktiviteten svært høy ved at hundretusenvis av punkter per sekund blir målt, og store områder kan måles på kort tid med høy presisjon. For det tredje lager LiDAR sin egen lyskilde og presisjonen er da mindre avhengig av atmosfæriske forhold (Haugerud et al. 2003).

LiDAR-deriverte høydemodeller kan være svært detaljerte på bakgrunn av høy punktetthet, som gir muligheten til å generere høydemodeller med svært god oppløsning. LiDAR-deriverte høydemodeller baserer seg på registrerte bakkepunkter, noe som fører til at rådataene fra LiDAR skanninger må filtreres for å fjerne støy og uønskede overflater og objekter. I denne

sammenhengen betyr støy retursignaler fra objekter som ikke er bakkepunkter, for eksempel biler, vegetasjon og skyer. Det eksisterer flere filtreringsmetoder for å automatisk skille ut bakkepunkter fra LiDAR data (Liu 2008).

### 3. 2. 1 LAS-datasett

LAS filer er standard formatet for LiDAR data (ESRI 2016a) og inneholder prosesserte LiDAR data som består av en punktsky. En punktsky referer til organiserte LiDAR-punkter med X, Y og Z koordinater, attributter og klassifisering. LAS filer lagres i et binært system, hvor klassifikasjonen til hvert enkelt punkt sier noe om hvilket objekt laserpulsene har blitt reflektert fra (ESRI 2016b). For eksempel lagres bakkepunkter med koden 2. I ArcGIS lagrer et LAS-datasett referanser til LAS filer, med muligheten til å legge til objekter på vektorformat som overflatebegrensninger (Engelsk: surface constraints). Dette kan for eksempel være vannpolygoner, knekklinjer og områdeavgrensning. Disse blir da brukt i LAS-datasettet, for å styre interpoleringen til en høydemodell. Knekklinjer blir brukt i høydemodeller for å legge til lineære objekter som ikke er tilstrekkelig representert i LiDAR-dataene, og for å skape en hydrologisk korrekt høydemodell. I en hydrologisk korrekt høydemodell blir vannet tvunget til å følge faktiske kanaler og løp (Meiforth 2013).



Figur 3.3: Effekten av å inkludere knekklinjer i interpoleringen (ESRI 2009).

Figur 3.3 demonstrerer hvordan knekklinjer påvirker en beregnet overflate ved bruk av triangulering. En fortauskant vil for eksempel kunne lede vannet, men være for liten i forhold til oppløsningen på høydemodellen, til at LiDAR-dataene alene tilstrekkelig representerer den. Ved å legge til fortauskanter som knekklinjer, som ved C på figur 3.3 vil interpoleringen sørge for at de blir tilstrekkelig representert.

Statistisk informasjon om LAS filene og LiDAR punktene er tilgjengelig i LAS datasettet, og gjør det enkelt å hente ut informasjon om for eksempel punktavstand (ESRI 2016a). I ArcGIS gjør verktøyet *LAS dataset To Raster* det enkelt å generere en høydemodell fra LiDAR data. Før man bruker dette verktøyet er det viktig å gjøre kun bakkepunktene i LAS-datasettet “tellende”, og utelukke andre punkter som for eksempel representerer vegetasjon og bygninger. Når man skal generere en høydemodell vil valg av interpolasjonsmetode og cellestørrelse påvirke resultatet. Valget av interpolasjonsmetode og cellestørrelse må blant annet vurderes opp mot punkttettheten på LiDAR punktskyen, topografien i studieområdet, formålet til høydemodellen og om studieområdet inneholder mye vegetasjon eller bygninger (Meiforth 2013; Hengl 2006; Liu et al. 2007).

### 3.3 Interpolering

Et LAS-datasett består som nevnt av en punktsky, og er dermed ikke representert kontinuerlig. Derfor brukes romlig interpolering når man beregner en DEM fra et LAS-datasett for å skape en høydeverdi for hver enkelt rastercelle. Interpolasjon kan beskrives som å estimere ukjente punkter basert på kjente punkter (Rød 2015). Det eksisterer to kategorier interpolasjonsmetoder: Geostatistiske og deterministiske. Geostatistiske metoder interpolerer basert på statistikken fra de kjente punktene og romlig autokorrelasjon. I tillegg til å produsere interpolerte overflater, produserer geostatistiske metoder også informasjon om sikkerhet og nøyaktighet knyttet til interpoleringen. Deterministiske metoder interpolerer overflater basert på målte punkt og matematiske formler (Childs 2004). Mye forskning er gjort for å forsøke å finne ut hvilken interpolasjonsmetode som gir det beste resultatet til ethvert formål, men ifølge Liu (2008) finnes det ikke en enkelt interpolasjonsmetode som generelt er mer nøyaktig eller hensiktsmessig. Videre begrunner Liu (2008) dette med at alle studier er ulike på grunn av forskjellig topografi, inngangsdata og formål. I likhet presiserer Childs (2004) at valget av interpolasjonsmetode må ta høyde for fordelingen av kjente

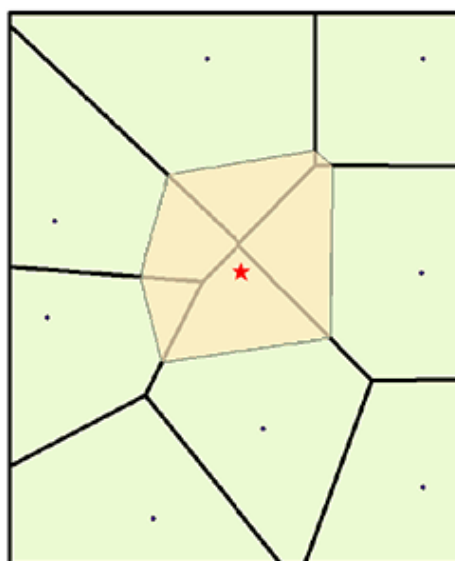
punkter og fenomenet som studeres. Noen av interpolasjonsmetodene som ble vurdert brukt i oppgaven og som er tilgjengelig i ArcGIS vil nå forklares.

Den enkleste formen for interpolasjon er lineær interpolasjon. Ved lineær interpolasjon blir ukjente verdier bestemt, basert på omliggende kjente verdier som følger en lineær trend (Rød 2015). Lineær interpolasjon er en effektiv, men relativt unøyaktig interpolasjonsmetode som tar relativt kort tid å prosessere. Den fungerer best når de kjente punktene er uniformt plassert (Dempsey 2013).

Inverse distance weighted (IDW) er en deterministisk metode som bestemmer verdier ut ifra at kjente punkt har ulik grad av innflytelse på den beregnede verdien, basert på hvor nære de ligger cellen som skal beregnes. Kjente punkter som ligger nær cellen som skal predikeres, har større innflytelse enn punkter som ligger lengre unna (Liu 2008). I følge Childs (2004) fungerer IDW bra for punktskyer med jevnt distribuerte punkter og med høy punkttetthet. For punktskyer med ujevn distribusjon og lavere punkttetthet kan resultatet bli unøyaktig. IDW bruker en vektet gjennomsnittsmetode og predikerte verdier kan ikke være utenfor verdiene til de kjente punktet. Dette fører til at enkelte topografiske objekter, som for eksempel daler ikke blir generert med mindre de inneholder tilstrekkelig kjente punkter (Liu 2008).

Naturlig nabo (engelsk: Natural neighbour) er et annet eksempel på en deterministisk metode. Naturlig nabo er en form for lineær romlig interpolering som går ut på trekke grenser mellom kjente punkter, slik at det genereres polygoner rundt hvert enkelt punkt. Dette kalles et Voronoi diagram (Oliven grønt på figur 3.4). Deretter lages det et Voronoi polygon (beige på figur 3.4) ut ifra det ukjente punktet (rød stjerne på figur 3.4). Arealet hvor Voronoi polygonet overlapper med de opprinnelige polygonene bestemmer vekten til de kjente punktene. I likhet med IDW kan ikke de interpolerte verdiene overstige verdiene til de kjente punktene (ESRI 2016c). En annen likhet mellom naturlig nabo og IDW er at de tar utgangspunkt i den samme ligningen. I følge Childs (2004) er det flere fordeler med naturlig nabo. For det første takler den effektivt et høyt antall kjente punkter og store datasett. For det andre interpolerer naturlig nabo generelt sett bra på klynger med kjente punkter.





Figur 3.4: Prinsippet for interpolering med naturlig nabo (ESRI 2016c).

Kriging er en geostatistisk interpolasjonsmetode som finnes i mange varianter og tilpasninger. Kriging er sammenlignet med andre romlige interpolasjonsmetoder mer sofistikert, ved at den utnytter de unike egenskapene til et datasett (Rød 2015). Kriging ble opprinnelig laget for å avdekke mineralforekomster, men er i dag mye brukt innenfor romlig interpolering i GIS. Kriging tar utgangspunkt i at avstanden mellom kjente punkter reflekterer den romlige autokorrelasjonen, som igjen blir brukt for å forklare variasjoner i overflaten. Metoden tar høyde for både avstanden mellom kjente punkter og graden av variasjon mellom punktene (Liu 2008). Kriging beregner også et semivariogram, som er nyttig for å utforske romlig autokorrelasjon i datasettet. I tillegg blir vektene i interpoleringen bestemt ut ifra et eksperimentelt semivariogram (Rød 2015). En studie utført av Lloyd & Atkinson (2002) sammenlignet LiDAR-deriverte høydemodeller med ulike interpolasjonsmetoder: Ordinær kriging, IDW og trend kriging. Studien konkluderer at de kriginginterpolerte høydemodellene var mer nøyaktige enn ved bruk av IDW, særlig i områder med lavere punkttetthet.

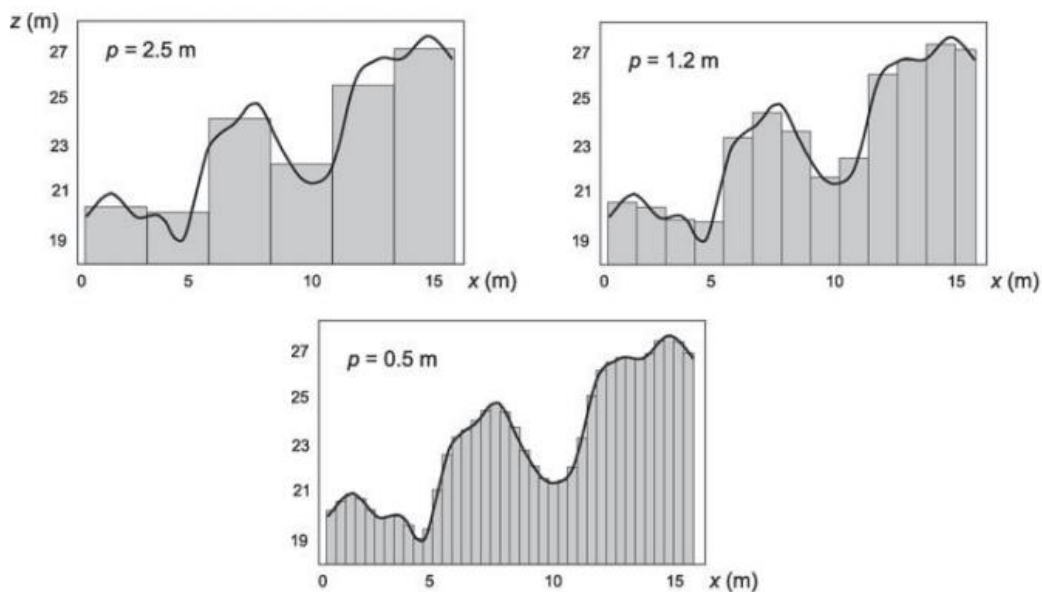
ArcGIS tilbyr to ulike tilnærminger, og som nevnt tidligere, flere interpolasjonsmetoder når man skal generere en DEM fra et LAS-datasett. Den enkleste tilnærmingen er *binning* algoritmen og den egner seg for datasett med høy tetthet. Dersom en celle inneholder flere kjente punkter kan man med *binning* tilnærmingen bestemme verdien til cellen ut ifra gjennomsnittsverdi, laveste verdi, høyeste verdi, IDW eller naturlig nabo. I celler som ikke inneholder noen kjente punkter brukes interpolering for å bestemme verdien. Her kan man velge mellom gjennomsnittsverdien fra nabo celler, naturlig nabo eller lineær interpolasjon.

Når man generer en DEM fra et LAS-datasett kan man, som nevnt tidligere, inkludere ulike overflatebegrensninger. Med *binning* tilnærmingen kan kun overflatebegrensninger av typen *clip*, *replace polygon* og *erase polygon* bli tatt høyde for (ESRI 2016).

Med triangulering, som er den andre tilgjengelige tilnærmingen, blir derimot alle typer overflatebegrensninger tatt høyde for. Dette innebærer for eksempel vegger og elver som knekklinjer. Trianguleringstilnærmingen tar lengre tid å gjennomføre, og baserer seg på en TIN-struktur. Celleverdier blir med denne tilnærmingen interpolert med enten naturlig nabo eller lineær interpolasjon. For å redusere prosesseringstiden kan man velge å tynne ut målepunktene ved hjelp av såkalt *window size selection*. Det vil si at et rutenett med brukerdefinert størrelse blir lagt over målepunktene og en høydeverdi velges for hvert enkelt vindu. Det kan være den minste verdien, den største verdien eller verdien nærmest gjennomsnittsverdien (ESRI 2016a).

### **3. 4 Cellestørrelse**

Valg av cellestørrelse for en DEM som skal brukes i overflateanalyser er et sammensatt og meget viktig valg. En liten cellestørrelse gir en fin oppløsning, mens en større cellestørrelse gir en grovere oppløsning. Figur 3.5 illustrerer cellestørrelsens betydning når det kommer til å representere en gitt terrengoverflate. En oppløsning på 0,5 meter vil i dette eksemplet representere terrenget best, mens den groveste oppløsningen på 2.5 meter vil gi en misvisende representasjon av terrenget. Oppløsningen på 2.5 meter gjør at det oppstår betydelige forskjeller mellom den interpolerte overflaten og den faktiske terrengoverflaten, noe som tydelig kommer frem i lavbrekkene og toppunktene på figur 3.5.



**Figur 3.5:** Effekten ulike cellestørrelser har på å representere en gitt terrengoverflate (Hengl & Evans 2009).

Punkttheteten til LiDAR-data er som tidligere nevnt en faktor for valg av cellestørrelse. LiDAR-data med høy punktthet gir generelt bedre grunnlag for høydemodeller med høyere oppløsning enn LiDAR-data med lavere punktthet. Punktthetens innvirkning på valg av cellestørrelse kan enkelt forklares med at en høyoppløselig DEM beregnet fra LiDAR-data med lav punktthet vil være av dårlig kvalitet. I likhet vil det også være lite hensiktsmessig å beregne en DEM med stor cellestørrelse (lav oppløsning) av LiDAR-data med høy punktthet (Liu et al. 2007). Generelt vil en DEM med finere oppløsning kunne gi mer nøyaktige overflateparametere og mer informasjon, men dette avhenger av hvor variert topografien til landskapet er (Hengl 2006). En høyoppløselig DEM vil også øke datamengden og føre til mer tidkrevende prosessering (Liu et al. 2007). I likhet med valget av interpolasjonsmetode eksisterer det ingen universell fasit for hvilken cellestørrelse man bør bruke (Hengl & Evans 2009). Generelt er målet med cellestørrelsen å kunne beskrive terrengoverflaten med minst mulig data eller med størst mulig oppløsning, og fortsatt tilfredsstillende nøyaktigheten studien krever. Med andre ord er valget av cellestørrelse et kompromiss mellom punkttheteten til inngangsdata, kompleksiteten til terrenget og formålet med studien (Liu 2008).

### 3. 5 Hydrologisk modellering

Hydrologi defineres som studien av bevegelsen, fordelingen og kvaliteten til vann på jordkloden. Gravitasjon er hoveddrivkraften bak vannets bevegelser, men bevegelsen blir til en viss grad også påvirket av materialet vannet renner over eller gjennom. Effekten av gravitasjon lar seg relativt enkelt modelleres i GIS med utgangspunkt i en DEM. Effektene av egenskapene og forholdene ved og under overflaten er på den annen side mer utfordrende. Dette skyldes både at innsamlingen av data er mer komplisert og at dataene er mer komplisert å integrere i analysene (Gruber & Peckham 2009).

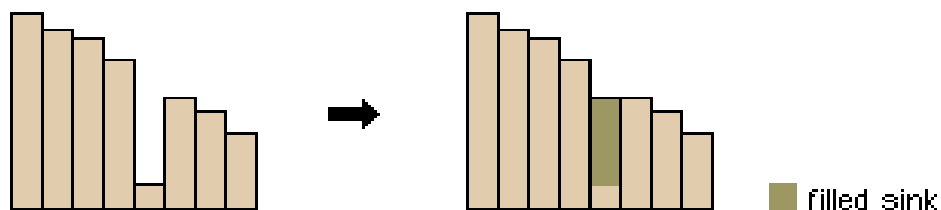
Ved å bruke GIS i hydrologiske analyser kan en bruke ulike tilnærminger og vektlegge ulike parametere. I denne oppgaven er det topografien representert av høydeverdien i DEM som er utgangspunkt for de hydrologiske analysene. Det er ikke blitt tatt høyde for parametere som nedbørmengde, evaporasjon og infiltrering. Avgrensning av nedbørfelt, dreneringsretning og akkumulering er modellert da disse analysene baserer seg på at gravitasjonen tvinger vannet til å følge den bratteste gradienten nedstrøms (Gruber & Peckham 2009). Disse er alle hydrologiske verktøy i ArcGIS som er brukervennlige, med muligheten til å egendefinere innstillinger og parametere om ønsket. Muligheten for å inkludere de nevnte verktøyene i *Model builder* gjør det også enklere å repetere prosesser dersom endringer må gjøres, i tillegg til at en kan dokumentere prosessene på en oversiktlig måte (Meiforth 2013). *Model builder* er et visuelt programmeringsspråk for å automatisere arbeidsflyten i ArcMap (ESRI 2016g).

Nedbørfelt defineres som det arealet oppstrøms som drenerer til en definert lokasjon (ESRI 2016d). I en DEM blir dette representert av en samling celler som drenerer til utløpscellen. Utløpscellen er den cellen som hele nedbørfeltet drenerer til. I hydrologiske analyser er nedbørfelt en viktig enhet som avgrenser analyseområdene (Rød 2015). I denne oppgaven ble nedbørfelt beregnet for tre interesseområder og brukt til å avgrense studieområdene. Nedbørfeltens utbredelse kan endre seg under spesielle forhold, ved at dreneringen endrer seg, som for eksempel under ekstreme nedbørhendelser (Aall et al. 2015).

#### 3. 5. 1 Groper

Før en høydemodell kan bli benyttet til å definere dreneringsretning og akkumulering, må groper i høydemodellen fylles. Groper er celler med udefinert dreneringsretning, som kan

skyldes feil i datagrunnlaget, eller som kan oppstå ved genereringen av en høydemodell og ved avrundingen til heltall (ESRI 2011).

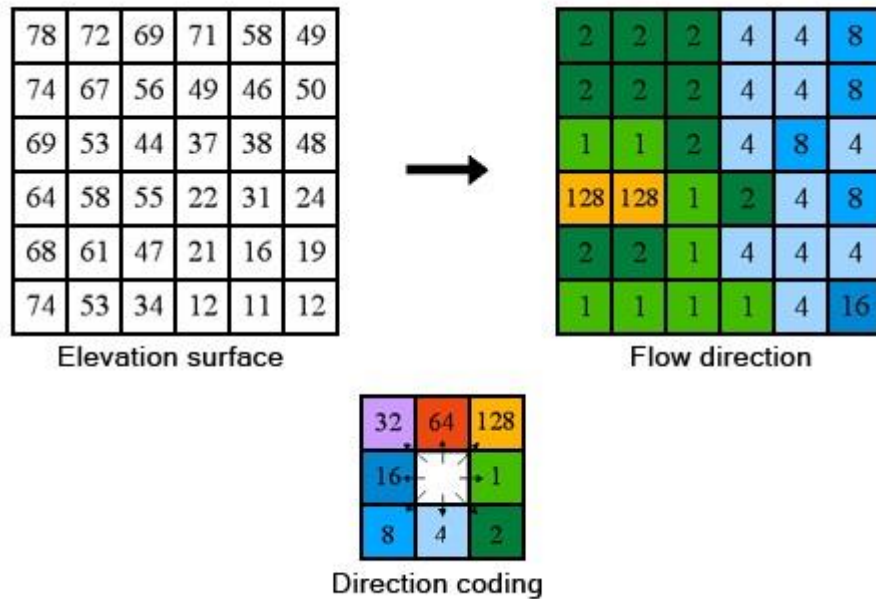


Figur 3.6: Prinsippet for igjenfylling av groper i verktøyet fill (ESRI 2016e).

Figur 3.6 illustrerer prinsippet for *Fill* verktøyet som er den vanligste metoden for å fylle groper i ArcMap. Her blir de identifiserte gropene tildelt samme verdi som cellen nedstrøms. Dermed vil dreneringsnettverket bli kontinuerlig (ESRI 2016e).

### 3. 5. 2 Dreneringsretning

Dreneringsretningen er det mest grunnleggende parameteren relatert til hydrologi, og utgjør inngangsdata for å beregne andre hydrologiske parameter som akkumulering og nedbørfelt (Gruber & Peckham 2009). Fritt rennende vann vil alltid følge korteste veien nedover og lavbrekkene i terrenget, og det er utviklet flere algoritmer for å modellere dreneringsretningen. De fleste baserer seg på at vann drenerer enten fra en celle til samtlige celler med lavere høydeverdi (multiple flow direction, MFD) eller til den cellen med den laveste høydeverdien (single flow direction, SFD) (Bratlie 2015). I følge Jones (2002) er den SFD baserte D8-algoritmen den mest populære metoden for beregning av dreneringsretning. Figur 3.7 illustrerer hvordan D8-algoritmen bruker et bevegelig vindu på 3x3 celler for å avgjøre hvilken celle vannet vil drenere til (ESRI 2012a; O'Callaghan & Mark 1984). På grunn av at vannet har åtte mulige retninger å drenere til, omtales den som D8 (Rød 2015; Gruber & Peckham 2009). Ut ifra D8-algoritmen kan en celle ha flere celler som drenerer til seg, såkalt konvergerende strøm, men en celle kan ikke drenere til flere celler, så kalt divergerende strøm. Dette medfører at de beste resultatene fås i nedre del av nedbørfeltet der vannet har samlet seg i tydelige kanaler, mens resultatet i øvre del av nedbørfeltet kan være noe dårligere der vannet vil kunne strømme divergerende (Gruber & Peckham 2009).

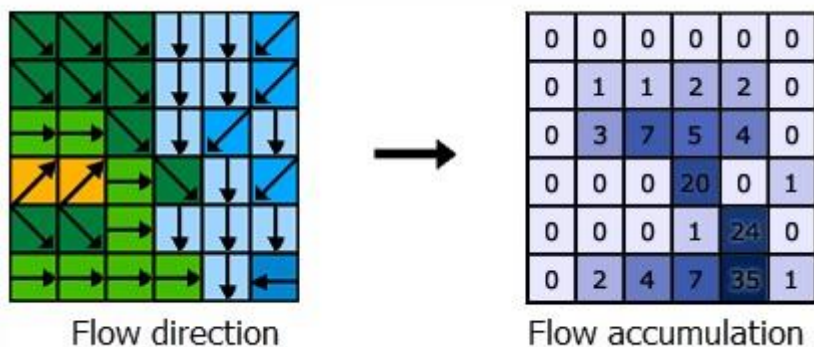


Figur 3.7: Prinsippet i D8-algoritmen for å kalkulere dreneringsretning ut ifra en høydemodell (ESRI 2012a).

I virkeligheten kan vannet drenere fra et bestemt punkt til utallige retninger, og D8 har derfor blitt sett på som en begrenset metode for å modellere overflatestrømminger. Som et resultat av dette utviklet Tarboton (1997) en algoritme som kan modellere divergerende strøm, omtalt som D-uendelig. D-uendelig bruker også en blokk med 9 celler, men den deles opp i åtte trekantflater fra hver piksel sitt midtpunkt. Alle trekantflater dekker en 45 grader sektor og blir gitt en helningsretning. Dreneringsretningen blir tildelt den trekantflaten som har størst helningsretning, og dette er en vinkel som kan ha en hvilken som helst verdi innenfor intervallgrensene på 45 (Rød 2015).

### 3. 5. 3 Akkumulering

Et meget sentralt hydrologisk parameter i denne oppgaven er akkumulering av overflatestrømming, som blir modellert ut ifra dreneringsretningen med verktøyet *Flow Accumulation* i ArcMap. Antallet celler som vil drenere til hver enkelt celle blir kalkulert som vist i figur 3.8 (ESRI 2016f). Resultatet i en akkumuleringsraster kan også brukes til å beskrive akkumulert areal i hver enkelt celle. Om cellestørrelsen for eksempel er satt til 1 m og 35 celler drenerer inn i en gitt celle, vil det akkumulerte arealet for denne cellen være 35 m<sup>2</sup>.



**Figur 3.8:** Beregningen av akkumulering ut ifra dreneringsretninger. Tallverdiene i rutenettet til høyre beskriver antall celler som drenerer til hver enkelt celle (ESRI 2016f).

Hver celle blir tildelt verdien 1 før akkumuleringen kalkuleres, med mindre det blir lagt til et vektraster som definerer inngangsverdien for hver enkelt celle. Et vektraster kan for eksempel være et nedbørraster som representerer målt nedbør per celle. En vektraster fører til at celler i områder hvor det faller mye regn vil få større vekt enn celler i områder med lite regn. Ved å kalkulere akkumuleringen uten å bruke et vektraster vil resultatet kunne skille områder hvor det er forventet mye overflatevann, fra områder hvor det er forventet lite overflatevann. For å beregne volum av overflatevann som drenerer over hver piksel er det nødvendig med et vektraster (Rød 2015).

### 3. 6 Overflateavrenning

Overflateavrenning oppstår når nedbøren overstiger infiltrasjonskapasiteten til jorda. I tillegg til nedbørintensiteten og nedbørmengden blir overflateavrenningen i et gitt område bestemt av vegetasjon, arealbruk, løsmassetype og topografi (Sulebak 2007). Når infiltrasjonskapasiteten overstiges vil vannet akkumulere i gropmagasiner og på overflaten. Gropmagasiner er sprekker og groper i overflaten hvor vann fanges. Fra gropmagasinene vil vannet enten evaporere opp i atmosfæren, infiltrere ned i bakken eller bidra til overflateavrenningen (NVE 1997). Infiltrasjonskapasiteten er styrt av overflatens permeabilitet, og urbane områder med mye bebyggelse har størst andel av tette flater. Det fører til hurtigere og økt avrenning ved intens nedbør (NOU 2015).

Det er ventet at som følge av et endret klima med mer intens og total nedbør, vil utfordringene med å håndtere overflatevann øke. Dersom avrenningen ikke håndteres vil skadepotensialet til overflatevann være stort for byggverk, miljø og helse. Hvor store skader overflatevann kan påføre, blir påvirket av hvordan overflatevannet håndteres og sårbarheten til infrastruktur og bebyggelse. I følge NOUs (2015) utredning er kostnadene som oppstår på grunn av overflatevann på 1,6 til 3 milliarder kroner per år. I fremtiden er det forventet mer skader relatert til overflatevann, som en konsekvens av sosioøkonomisk utvikling som legger press på arealutnyttelse i flomutsatte områder (Vatne 2013).

### **3. 7 Styrflommer**

I perioder med intens konvektiv nedbør vil vannet i små (< 400 km<sup>2</sup>) kupert nedbørfelt raskt samle seg i bekker. Det kan føre til en rask økning av vannstanden i bekkene, som kan utvikle seg til en flom i løpet av meget kort tid. En slik flom blir betegnet som en styrflom og forekommer ofte i små, bratte sidedbørfelt i kort tid etter intenst regnvær (Vatne 2013). Med en styrflom følger også ofte andre naturfare som jordskred og flomskred (Collier 2007), som tilfører ytterlige sedimenter til elver og bekker som kan forsterke skadeeffekten (Vatne 2013). En styrflom transporterer derfor ofte mye mer sedimenter enn andre typer flommer. Massetransporten kan forårsake store skader, både direkte og indirekte. Dersom sedimenter avsettes i forkant av kulverter og stikkrenner blir de naturlige vannvegene stengt og vannet blir tvunget til å ta nye veier (Vatne 2013). Tidsrommet fra skybruddet til styrflommen oppstår kan være svært kort, og slike flommer er derfor vanskelig å forutse og varsle (Collier 2007). Styrflommer i Norge har ikke medført tap av mange menneskeliv, men har ført til store materielle kostnader. På internasjonalt nivå er styrflommer en av de klimarelaterte naturfarene som tar flest liv (Vatne 2013).



## Kapittel 4 - Metode/databearbeiding

### 4.1 Data

Datamaterialet i denne studien er hentet fra LiDAR-skanninger, Felles kartdatabase (FKB), Nasjonal vegdatabank (NVDB) og Lillehammer kommune (ved Anders Breili). I tillegg har noe data blitt digitalisert, en prosess som vil bli beskrevet senere. På grunn av at studieområdet Åretta strekker seg ut av Lillehammer kommune og inn i Ringsaker kommune, ble det nødvendig å hente inn LiDAR-data fra to ulike skanninger. LiDAR-skanningene som dekker Lillehammer ble utført i 2014 med hensikten om gjennomsnitt 5 punkter/m<sup>2</sup>, og ferdigstilt hos Statens Kartverk i 2015. LiDAR-skanningen som dekker Ringsaker kommune ble scannet i 2016, og er forventet ferdig i produksjon 2017. LiDAR-dataene har jeg hatt adgang til gjennom NorgeDigitalt-samarbeidet.

FKB består av flere datasett på vektorformat med ulikt detaljnivå og forvaltes av Geovekst, gjennom kartverket (Kartverket 2013). FKB-datasettene som ble brukt til analyser i oppgaven omfatter veg, vann, bygninger, traktorveg og sti, bru og stikkrenner.

Fra Lillehammer kommune har jeg fått problempunkter og skadedata, samt kart med oversikt over kulverter innenfor de tre studieområdene. Dataene baserer seg på registreringer utført av kommunen høsten 2014. Problempunktene består av et punkttema for hvert av de tre studieområdene, som viser problempunkter i forhold til dreneringen. Punktene er skjønnsmessig plassert, uten bruk av GPS, og er derfor i liten grad benyttet i denne studien. Skadedataene består av polygontemaer digitalisert med utgangspunkt i punktregistrering med håndholdt GPS og avmerkinger på kart fra partier med erosjon, massetransport og vannveger. Skadepolygonene og problempunktene inneholder informasjon i form av en attributtabel, som forteller noe om hvilken skadetype hvert enkelt objekt representerer. Her skilles det mellom erosjon, masseavlagring, vannveg og massetransport. I tillegg er det lagt inn en kort kommentar som beskriver skaden/problemet, for eksempel "vannveg langs veggroft" (se digitalt appendix).

NVDB er en database forvaltet av Statens vegvesen som inneholder informasjon om statlige-, fylkes-, kommunale-, private- og skogsbilveger (Statens vegvesen 2015). Fra NVDB ble det

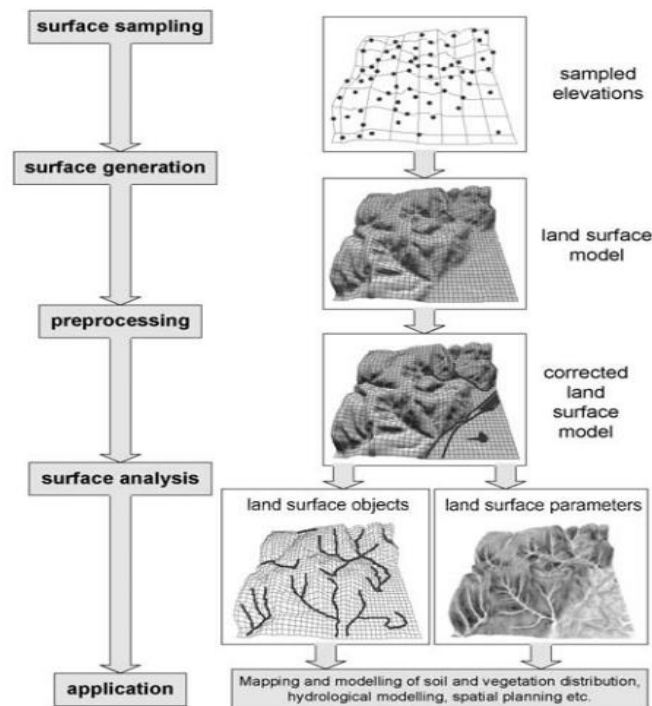
hentet ut tilgjengelige stikkrenner. I NVDB er stikkrenner lagret som punkter og 126 punkter ble hentet ut for de aktuelle studieområdene. Stikkrennene og kulvertene hentet ut fra FKB og stikkrennene fra NVDB viste seg å ikke være tilstrekkelige, og det ble derfor nødvendig å digitalisere både kulverter og stikkrenner for å kunne generere en tilfredsstillende DEM. Digitaliseringen ble utført ut ifra tydelige bekkeløp fra FKB datasettet, studier av flyfoto, kart og rapporter fra Lillehammer kommune.

## 4. 2 Metode

En generell beskrivelse av metoden brukt i denne oppgaven er vist i Figur 4.1. Fra LiDAR-data og supplerende FKB-data er det generert en DEM. Denne blir så modifisert slik at den skal gjengi terrenget hydrologisk korrekt. Den opprinnelige DEM er i oppgaven modifisert til to ulike DEM, basert på to ulike scenario. Et scenario med åpne dreneringsveger, med fungerende kulverter og stikkrenner og et scenario med blokkerte kulverter og stikkrenner, referert til som stengte dreneringsveger. Høydemodellen for stengte dreneringsveger blir omtalt som DEM\_S, men høydemodellen for åpne dreneringsveger blir omtalt som DEM\_O. DEM\_S er modifisert slik at bygninger er hevet, bruer er senket og groper er fylt. Dette fører til at dreneringsveger gjennom stikkrenner og kulverter blir blokkert, mens dreneringen ellers skal være ivarettatt. DEM\_O på sin side er en videreutvikling av DEM\_S. I tillegg til de nevnte modifikasjonene har også kulverter og stikkrenner blitt senket i denne høydemodellen. DEM\_O vil dermed kunne gi et bilde på hvordan dreneringen er når den fungerer slik den skal, mens DEM\_S vil gi et bilde på dreneringsveger når kulverter og stikkrenner er blokkert. Det sistnevnte er et scenario basert på mulige konsekvenser av styrtflom som er blokkerte kulverter og stikkrenner og har blitt benyttet i tidligere studier (Meiforth 2013; Viréhn 2014). Erfaringer fra flommen som rammet studieområdet i juli 2014 underbygger dette som et scenario (Aall et al. 2015; Nordeidet & Sagen 2015). Blokkeringer av vannveger som ikke er koblet opp mot stikkrenner og kulverter er ikke tatt høyde for.

Videre er det utført hydrologiske analyser for begge scenarioene, og resultatene er så brukt til å sammenligne akkumulert areal for stengte- og åpne dreneringsveger i utvalgte skadepunkt i Bæla, Åretta og Skurva. Oppgaven vil i de følgende avsnittene beskrive de ulike trinnene i metoden mer detaljert. Illustrasjoner fra de ulike trinnene vil bli presentert med figurer og kart, mens resultatene vil bli presentert i kapittel 5. Databearbeiding, modellering og analyser

er utført i ArcCatalog og ArcMap. Koordinatsystemet denne studien har brukt er WGS 1984 UTM sone 32, og LAS-datasettet ble i tillegg projisert i vertikaldatumet NN2000.



Figur 4.1: Generell oversikt over metoden (Pike et al. 2009).

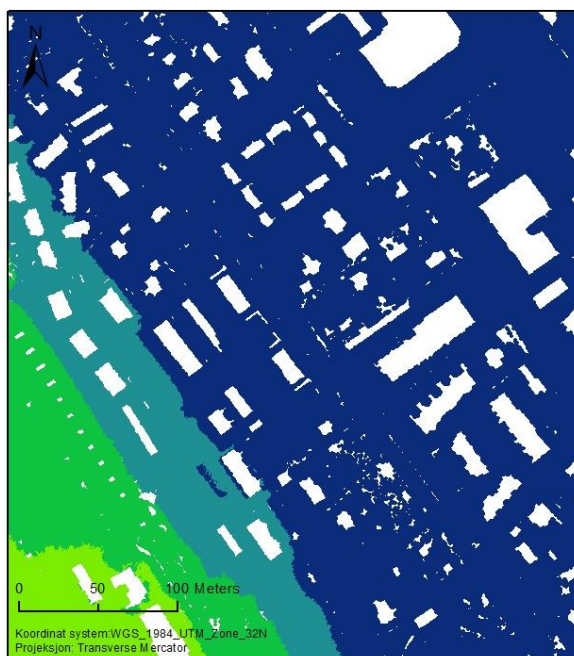
### 4.3 Bearbeiding av LiDAR-data

LiDAR-dataene for begge kommunene ble hentet inn som LAS-filer. For å redusere datamengden, da LiDAR-dataene dekket hele Ringsaker og Lillehammer kommune, ble det kun benyttet LAS-filer som dekket studieområdet. For å velge ut de nødvendige LAS-filene ble det benyttet et polygontema som dekker studieområdene. Som beskrevet i områdebeskrivelsen har de tre studieområdene relativt lik karakteristik, og de ble derfor behandlet under ett i denne sammenhengen. Vanligvis leveres data fra LiDAR-skanninger med metadata som blant annet beskriver punkttetthet og prosjektavgrensinger (Kartverket 2013a). Dessverre manglet dette, men *Point File Information* verktøyet i ArcGIS gjorde det mulig å hente ut informasjon om statistikk fra LAS-filene. Statistikken man kan hente ut er avstand mellom punkter, antall punkter, areal på området og minimum- og maksimum Z-verdi.

Resultatet av statistikk analysen viste at det eksisterer 85 466 5027 punkter fordelt på 754 LAS-filer. Dette representerer kun punkter på jordoverflaten ettersom kun bakkepunkter har blitt valgt. Den gjennomsnittlige punktavstanden er på 51 cm, og må ikke forveksles med punkttettheten. Definisjonen av punktavstand er antall punkter per lineære enhet, mens punkttetthet defineres som antall punkter per kvadratisk enhet. Punktavstanden og punkttettheten er koblet sammen og en lav punktavstand vil gi høy punkttetthet og motsatt. Følgende formel beregner punkttettheten fra punktavstanden (ESRI 2014)

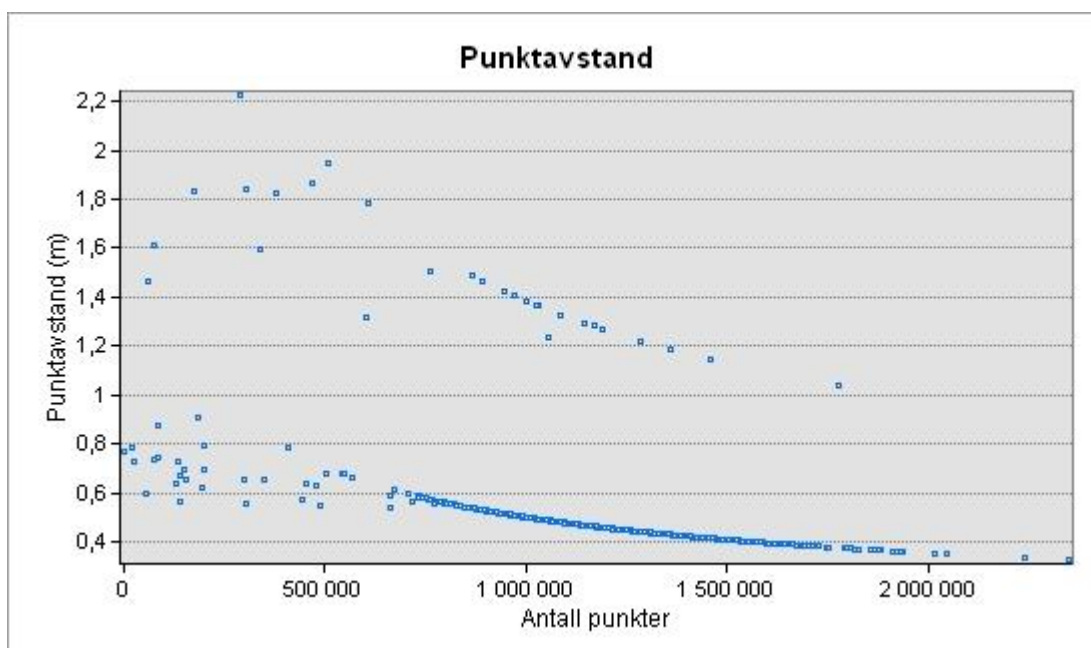
$$\text{Punkttetthet} = 1/(\text{Punktavstand})^2$$

Punkttettheten for LAS-filene benyttet i oppgaven blir da  $1/(0,51)^2 = 3,85$  punkt per m<sup>2</sup>. ESRI (ESRI 2013) presiserer at den estimerte punktavstanden er noe grov, og kan ikke sees på som en fasit, og det samme gjelder da for punkttettheten. Dette skyldes at områder med punkter som ikke er klassifisert som bakkepunkter er blanke, noe figur 4.2 fremstiller. Her ser man tydelig at bygninger representerer blanke områder, som naturligvis vil ha lavere punkttetthet enn de resterende områdene.



**Figur 4.2:** LiDAR-data: Bakkepunkter er sortert ut og manglende data vises i områder knyttet til bygninger.

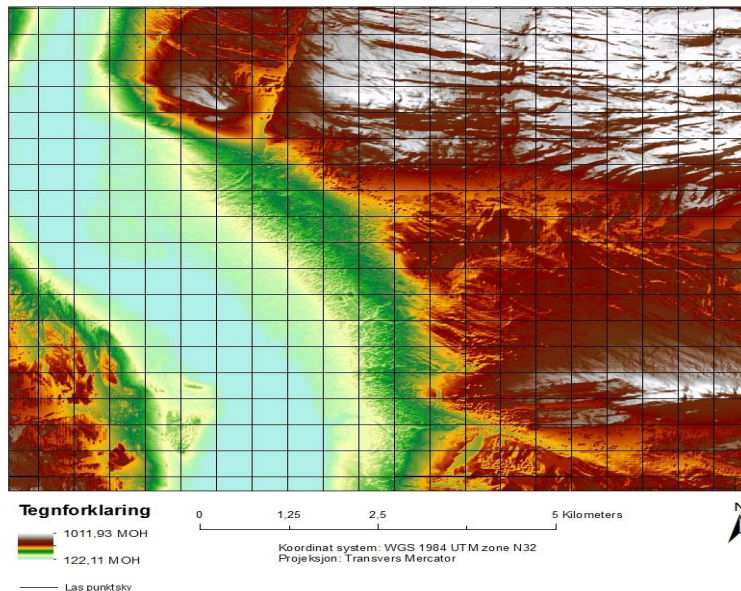
Figur 4.3 viser fordelingen av antall punkter i forhold til punktavstand. Det kommer tydelig frem at det er størst andel punkter med mindre punktavstand enn 80 cm. Ved å studere LAS-datasettet kom det frem at LAS-filene fra Ringsaker kommune hadde punktavstander fra 1 m til 2,2 m, mens LAS-filene fra Lillehammer kommune hadde en punktavstand fra 0,3 m til 0,9 m. Dette forklarer fordelingen vist i figur 4.3 da studieområdene stort sett er innenfor Lillehammer kommune og den største andelen av punktene er lokalisert mellom 0,6 m til 0,3 m punktavstand. Punktene med større enn 1 m punktavstand er utelukkende fra dataene som dekker Ringsaker kommune.



**Figur 4.3:** Diagram over fordelingen av punktavstand i de benyttede LAS-filene.

Dersom LiDAR-dataene fra Lillehammer kommune hadde dekket hele studieområdet, ville det gitt en lavere gjennomsnittlig punktavstand og dermed en høyere gjennomsnittlig punkttetthet. Den gjennomsnittlige punktavstanden og punkttettheten er en viktig faktor når man skal generere høydemodeller fra LiDAR-data. Det skyldes at valget av cellestørrelse burde tas i betraktning av punkttettheten og punktavstanden til inngangsdataene. Generelt vil inngangsdata med høy punkttetthet være bedre egnet til å generere høydemodeller med fin oppløsning enn inngangsdata med lav punkttetthet (Hengl 2006).

Før videre prosessering ble de utvalgte LAS-filene lagt til i et LAS-datasett. Figur 4.4 viser et utsnitt av LAS-datasettet og rutenettet som representerer LAS-filer.



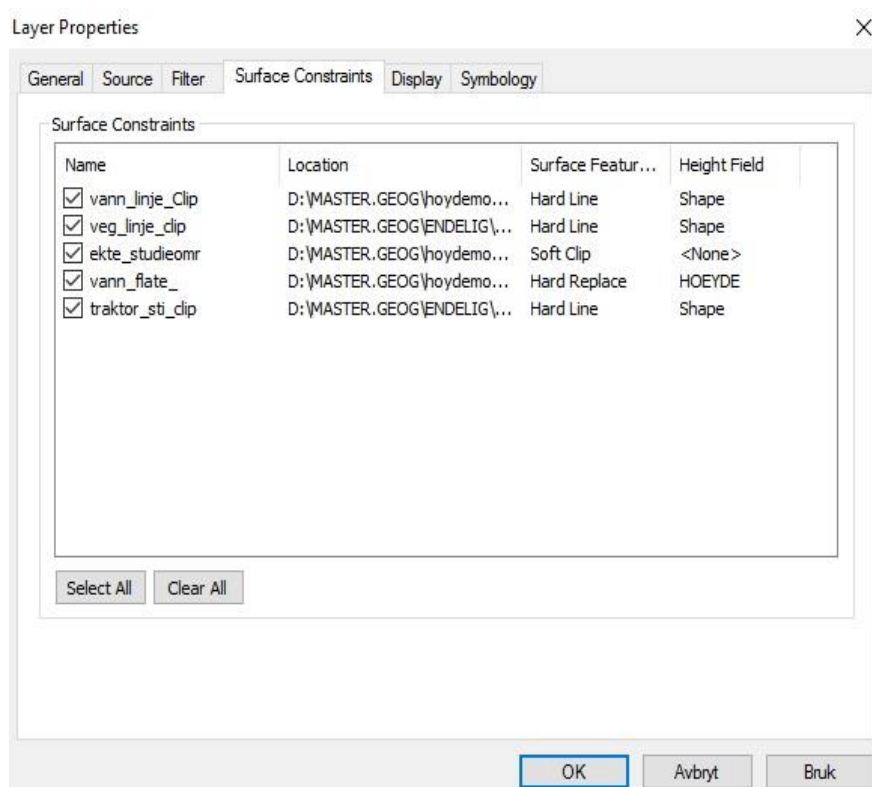
**Figur 4.4:** LAS-datasett med en beregnet DEM som bakgrunnskart. Hver sorte rute representerer en LAS-fil.

Fra LAS-datasettet har man også tilgang til noe statistisk informasjon om LiDAR-dataene som for eksempel klassifikasjon og attributter, og om retur signaler. LiDAR-dataene ble levert med følgende klassifisering: uklassifisert, bakkepunkter og støy. Andelen uklassifiserte punkter er 75,5 % mens bakkepunktene utgjør 24,5 % av alle punktene. At bakkepunktene kun utgjør  $\frac{1}{4}$  av alle punktene kan skyldes flere årsaker. For det første kan det skyldes naturlige årsaker som at de fleste punktene representerer vegetasjon, bygninger, biler og lignende støy. For det andre kan det skyldes at dataene ble levert før de var ferdig bearbeidet av leverandøren.

### 4. 3. 1 Overflatebegrensinger

Som følge av erfaringer fra studien til Meiforth (2013) og testing ble det valgt å inkludere overflatebegrensinger i LAS-datasettet før det ble generert høydemodeller. I likhet med studien til Meiforth (2013) er denne studien basert på hydrologiske analyser i urbane

omgivelser. Det er derfor kritisk å sørge for at de modellerte flomveiene følger faktiske lavbrekk i terrenget. I tillegg til å lede vannet i riktig retning, vil overflatebegrensningene bidra til å redusere feil i høydemodellen (Meiforth 2013). Overflatebegrensningene ble lagt til for å skape en mest mulig hydrologisk korrekt høydemodell, da punkttettheten til LiDAR-dataene er noe lavere enn ønsket og at andelen bakkepunkter er kun er på 25,5%.



**Figur 4.5:** Skjermdump fra ArcMap som viser overflatebegrensinger inkludert i LAS-datasettet. Legg merke til at ulike inngangsdata blir brukt som ulike typer begrensinger.

Figur 4.5 viser at i tillegg til et egendefinert studieområde ble vektordataene for veg, vann, traktorveg og sti fra FKB-datasettet lagt til. FKB-dataene ble modifisert og klippet til før de ble lagt inn i LAS-datasettet. Det egendefinerte studieområdet ble brukt som en områdeavgrensing (engelsk: clip polygon), og ble laget slik at det dekket nedbørfeltene til alle studieområdene.



Tre datasett fra FKB ble lagt inn som knekklinjer, og fra disse ble følgende objekttyper valgt og klippet til studieområdet:

- Vann linje: ElvBekk, ElvBekkKant, ElveElvSperre, Innsjøkant, KanalGrøft, KanalGrøftKant
- Veg linje: AnnetVegarealAvgrensning, Fortauskant, FortauskantYtre, GangSykkelvegkant, GangfeltAvgrensning, Gangvegkant, ParkeringsområdeAvgrensning, Sti, Trafikkøykant, Traktorvegkant, Vegdekkekant, VeggrøftÅpen, VegkantAnnetVegareal
- Traktorveg og sti linje: Sti, Traktorveg og gangveg

En visuell kontroll av høydeinformasjonen som er lagret i geometrien til de valgte linjene ble gjennomført i ArcCatalog. Som figur 4.5 viser, ble *shape* oppgitt som høydereferanse for de valgte linjene. Det vil si at høydeinformasjonen som er lagret i geometrien til linjene, vil sørge for at høyden til linjene blir ivaretatt ved interpolering til en høydemodell. Innsjøer og mindre flate vannområder ble lagt til som erstatt polygon (engelsk *replace polygon*) for å sørge for at flate vannområder blir gitt samme høydeverdi når det genereres en DEM. Erstatt polygoner kan kun brukes for områder som har en konstant høyde, som for eksempel innsjøer eller andre vanntyper og menneskeskapt flater (ESRI 2008).

#### 4. 4 Generering av DEM

Med verktøyet *LAS-dataset To Raster* ble det interpolert en DEM direkte fra LAS-datasettet. Denne prosessen kan enkelt utføres med standard innstillingene foreslått i ArcMap, men i denne studien ble det valgt å egendefinere noen innstillinger. Valg av interpoleringsmetode og celledørrelse kan påvirke resultatet ved interpolering til en DEM (Hengl 2006; Liu 2008). Av den grunn vil oppgaven nå gå nærmere inn på valgene som ble tatt.

#### 4. 4. 1 Valg av cellestørrelse

Hvordan ulike cellestørrelser kan påvirke en høydemodell for et gitt terreng er demonstrert i figur 3.5. I dette eksempelet ga den fineste oppløsningen det beste resultatet, da den representerte det faktiske terrenget med størst nøyaktighet. Av den grunn kan man forestille seg at mindre cellestørrelser vil gi høydemodeller av høyere kvalitet, enn hva større cellestørrelser kan gi. På tross av at dette til en viss grad er sant, er valget av cellestørrelse delvis avhengig av flere faktorer som for eksempel punkttetthet, kompleksitet i terrenget og formålet med studien. Det eksisterer en rekke ulike formler for å beregne cellestørrelsen (Hengl 2006). Hvilke formel som gir den mest hensiktsmessige cellestørrelsen finnes det ikke noe entydig svar på. En formel utviklet av McCullagh (1988) beregner cellestørrelsen (S) med følgende formel:

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}}$$

Her er (A) arealet til området, mens (n) er antall bakkepunkter. I følge Liu (2008) sørger denne formelen for at oppløsningen til DEM har sammenheng med punkttettheten til inngangsdataene. Kompleksiteten til terrenget blir derimot ikke tatt med i betraktning. Med verdier fra denne studien blir formelen:

$$S = \sqrt{\frac{196\,271\,078\text{ m}^2}{85\,466\,5027\text{ punkt}}} \approx 0,48$$

Beregnet cellestørrelse for denne studien blir da  $\approx 0,5$  m. Dette er en meget fin oppløsning som vil kunne gi en veldig detaljert DEM spesielt i områdene med høy punkttetthet.

Ulempene med en så fin oppløsning er at det krever mye lagringsplass, er svært tidkrevende å prosessere og eventuelle målefeil fra LiDAR dataene vil få større innvirkning (Vihren 2014).

En annen måte å beregne cellestørrelsen (S) på er ifølge ESRI(2013):

$$S=Pa*4$$

Her er ( $P_a$ ) punktavstanden mens tallet 4 er en konstant. Denne metoden beregner cellestørrelse kun ut ifra punktavstanden, og er dermed noe enklere enn McCullagh(1988) sin formel. Med punktavstanden fra LiDAR-dataene i denne studien gir ESRI (2013) sin metode en cellestørrelse  $\approx 2$  m.

Ingen av de ovennevnte beregningen av cellestørrelse tar terrengets kompleksitet eller studiens formål i betraktning. Et kompromiss mellom de to beregningene ble valgt for denne studien. En cellestørrelse på 1 m ble valgt av flere årsaker. For det første blir oppløsningen på 1 m vurdert som tilstrekkelig til å gi detaljert informasjon om terrenget i tidligere studier. I sin studie med tilsvarende formål benyttet Meiforth (2013) en cellestørrelse på 1 m med inngangsdata med en punktavstand på 0,96 m. Punktavstanden er her nesten dobbelt så stor som i denne studien, men i studiene til Hole (2015) og Viréhn (2014) er punktavstanden tilnærmet lik som i denne studien og cellestørrelsen ble også her satt til 1 m. For det andre ville en finere oppløsning på 0,5 m, som foreslått av formelen til McCullagh (1988) ført til veldig store mengder data, og enda mer tid- og prosessorkrevende prosessering. For det tredje blir oppløsningen på 1 m vurdert som innenfor gjeldende teoritiske rammer for inngangsdataene, da verdien er et kompromiss mellom formelen til McCullagh (1988) og ESRI (2013) sin metode.

#### **4. 4. 2 Valg av interpolasjonsmetode**

Med verktøyet *LAS-dataset To Raster* må man velge mellom to ulike tilnærminger til interpolasjonen, *binning* og triangulering. I denne studien ble det valgt å bruke trianguleringstilnærmingen. Valget ble for det første tatt på bakgrunn av at trianguleringen egner seg bedre enn *binning*, dersom det er en del områder med lav punkttetthet (Viréhn 2014). I denne studien gjelder dette særlig områder med mye vegetasjon og bebyggelse. For det andre ble inkluderingen av knekklinjer i interpolasjonen vurdert som nødvendig, og triangulering er da eneste mulighet. Figur 4.6 er hentet fra Meiforth (2013) sin flomstudie fra Trondheim og viser hvorfor knekklinjer ble vurdert som nødvendig. På bildet til venstre (A) er flomveiene modellert uten knekklinjer og vannet forlater dermed vegen veldig tidlig. Bildet til høyre (B) viser flomveier i det samme området, men med knekklinjer i interpoleringen. Her forlater vannet vegen lengre ned i bakken, og dette samsvarer med observasjoner gjort på stedet (Meiforth 2013).



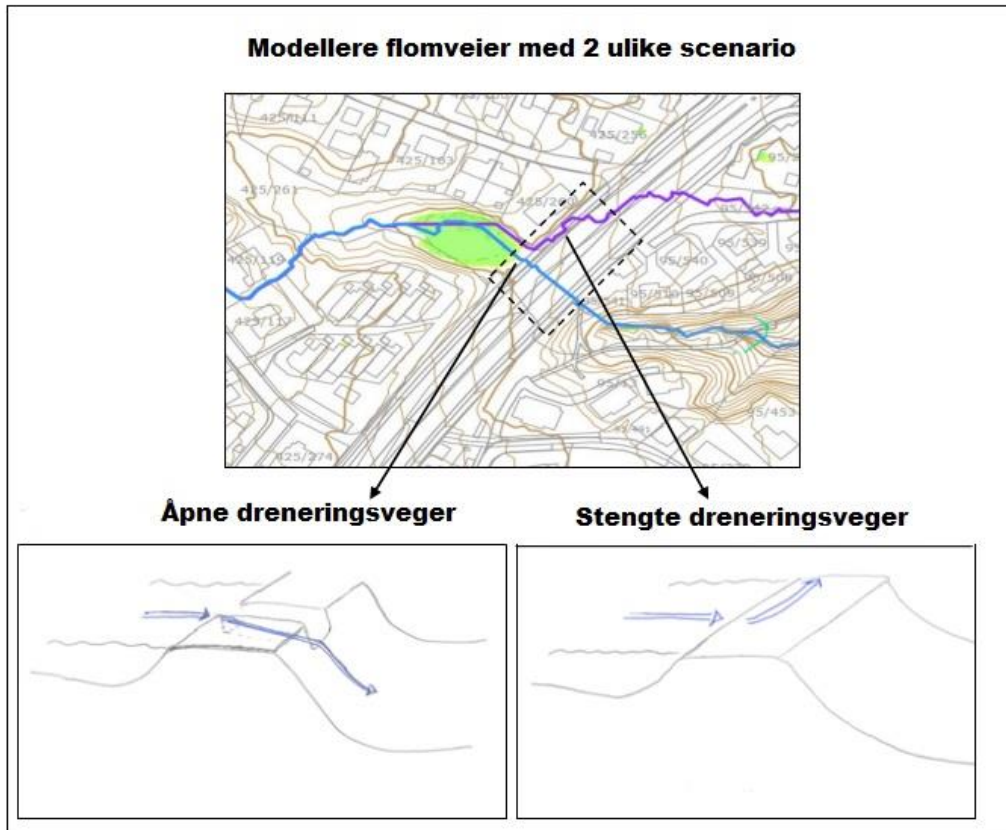
**Figur 4.6:** Effekten av å inkludere knekklinjer. Til venstre er flomveier modellert uten knekklinjer og vanner forlater vegen for tidlig. Til høyre er knekklinjer inkludert og den beregnede flomveien følger vegen lengre ned i bakken (Meiforth 2013).

Videre ble det valgt å bruke naturlig nabo som interpolasjonsmetode fremfor lineær interpolasjon. Naturlig nabo ble for det første foretrukket fordi den vektlegger nærliggende verdier, terreng med stor grad autokorrelasjon og egner seg bra til store datasett (Childs 2004). For det andre lager naturlig nabo overflater som gir en riktigere representasjon av morfologiske objekter, som kanaler (Pirotti & Tarolli 2010). For det tredje kan ikke de interpolerte verdiene overgå minimum- eller maksimumverdien til datasettet, og dermed kan ikke falske kanaler og topper oppstå (Esri 2016c).

Høydemodellen som er grunnlaget for denne studien ble laget ved hjelp av “LAS dataset To Raster”. Den ble interpolert med trianguleringstilnærmingen, med naturlig nabo som interpolasjonsmetode. Det ble valgt å ikke redusere prosesseringstiden ved å tynne ut målepunktene med *window size selection*, i fare for å redusere kvaliteten til høydemodellen. Cellestørrelsen ble som nevnt valgt til 1 m. Før denne høydemodellen kunne brukes til hydrologiske analyser måtte den bearbeides ytterligere.

## 4. 5 Modifisering av DEM

Ulike modifiseringer av den opprinnelige høydemodellen måtte til for å skape en høydemodell tilpasset hvert av de to scenariene med åpne og stengte dreneringsveger. Figur 4.7 viser prinsippet som skiller modelleringen av de to scenarioene.



Figur 4.7: Prinsippet for beregningen av åpne og stengte dreneringsveger (Meiforth 2013).

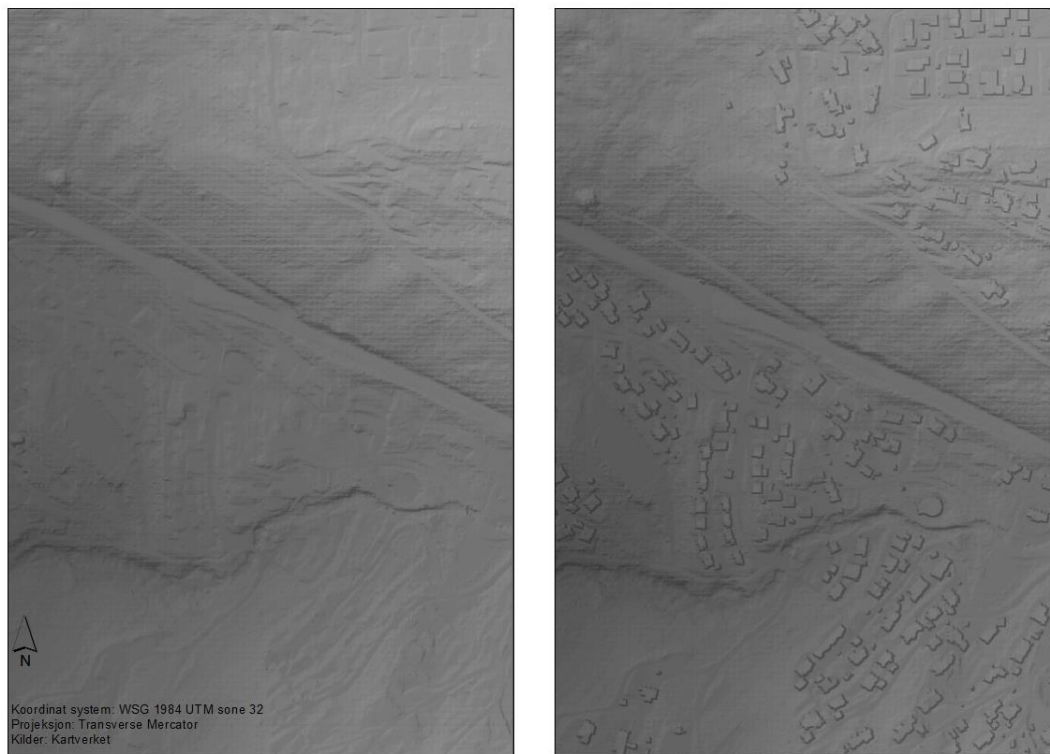
Det første steget i modifiseringen var å heve alle bygninger, og deretter senke bruer i høydemodellen. Resultatet fra dette steget er DEM\_S. For å skape DEM\_O ble så stikkrenner og kulverter senket med utgangspunkt i DEM\_S. Til slutt ble groper fylt for begge høydemodellene.

### 4. 5. 1 Bygninger

For å heve bygninger i høydemodellen ble vektorpolygoner fra FKB-datasettet brukt. Bygningsdatasettet ble først klippet mot studieområdet. Deretter ble funksjonen *Add field* brukt for å legge til en ny kolonne i attributt Tabellen. Den nye kolonnen ble gitt navnet *value* og kalkulert til 4000 for alle bygningsobjekter. Funksjonen *polygon to raster* ble så brukt for å konvertere bygningspolygonene til raster format. Her ble attributten *value* brukt som *value*

field for å tildele cellene verdi, som førte til at alle celler som representerer bygninger ble gitt verdien “4000”, mens de resterende cellene ble gitt verdien “No data”.

Verktøyet *Reclassify* ble så brukt for å tildele bygningsrasteret ønsket høydeverdi. Cellene som representerer bygninger med verdi “4000” ble tildelt verdien “15”, for å heve alle bygningsflatene med 15 meter. De resterende områdene, *no data* verdiene, ble tildelt verdien “0”. Den optimale løsningen her hadde vært å bruke ekte høyder for bygningene, men en slik prosess er komplisert på grunn av varierende høyde på hustakene (Meiforth 2013). Rasteren med bygninger (15m) ble deretter lagt til høydemodellen med verktøyet *Plus*. Det vil si at alle celler som representerer bygninger blir lagt til den originale høydemodellen, ved addisjon av celleverdiene. Derfor er det nødvendig å tildele *no data* cellene verdien “0”. Figur 4.8 viser høydemodellene visualisert som skyggekart før og etter bygninger har blitt hevet med 15 m. På kartet til høyre ser man tydelig omrisset av bygninger.



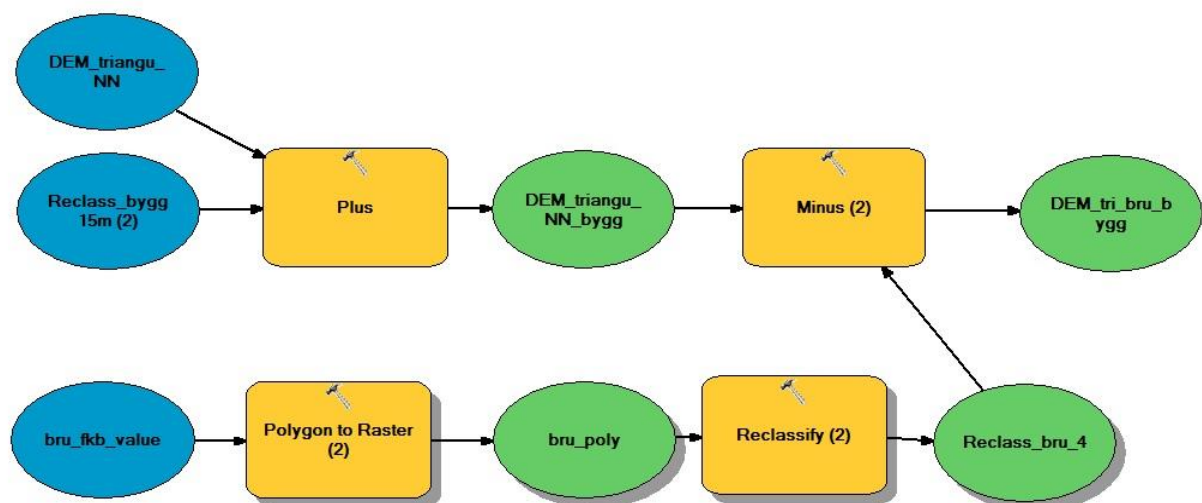
**Figur 4.8:** Hevede bygninger i høydemodellen. Til venstre er et skyggekart av høydemodellen før bygninger er hevet. Til høyre er et skyggekart etter bygninger er hevet. Omrisset av bygningen kan her tydelig observeres.

#### 4. 5. 2 Oppheving av kunstige blokkeringer

For å kunne identifisere vannvegene både ved stengte og åpne dreneringsveger, er det nødvendig å oppheve kunstige blokkeringer i høydemodellen. LiDAR-skanningen ble utført fra luften, og vil derfor ikke registrere høydeverdier under bruer eller annen overdekket infrastruktur som f.eks. stikkrenner og kulverter. For å sørge for at det modellerte vannet vil strømme gjennom disse konstruksjonene og ikke langs disse, må høydemodellen modifieres. For høydemodellen med stengte dreneringsveger gjelder dette kun der det er bruer. Det ble valgt å senke bruer til tross for betingelsen om stengte dreneringsveger, da det er igjentetting av stikkrenner og kulverter som blir definert som stengte dreneringsveger. For å oppheve de kunstige blokkeringene må cellene som representerer kulverter, stikkrenner og bruer tildeles lavere høydeverdier enn områdene rundt. Først vil oppgaven beskrive fremgangsmåten for å senke bruer. Deretter følger beskrivelsen av senkning av stikkrenner og kulverter i høydemodell DEM\_O.

#### 4. 5. 3 Bruer

For å senke bruer ble det i prinsippet benyttet samme metode som for å heve bygninger. Deler av arbeidsflyten for heving av bygninger og senkning av bruer er vist i figur 4.9. Før bruene ble hentet inn i modellen i figur 4.9 ble de hentet fra FKB-datasettet og klippet til studieområdet. I tillegg ble *Add field* brukt for legge til *value* som en ny kolonne i attributt Tabellen og denne ble kalkulert til 4000 for alle objektene.



Figur 4.9: Skjermdump fra ArcMap som viser arbeidsmodellen for senkning av bruer og heving av bygninger i høydemodellen.



Brupolygonene ble konvertert til raster og deretter reklassifisert slik at cellene som representerer bruer ble tildelt verdien 25, mens de resterende områdene ble tildelt verdien 0. Med verktøyet *minus* ble brurasteret subtrahert med høydemodellen med hevede bygninger, slik at resultatet ble en høydemodell med alle bygninger hevet 15 m og bruer senket 25 m.

#### 4. 5. 4 Stikkrenner og kulverter

På bakgrunn av at eksisterende veger og annen infrastruktur går på tvers av vannveger, vil disse i en umodifisert høydemodell fungere som blokkeringer for vannet. Senkningen av stikkrenner og kulverter var en tidkrevende og inndelt prosess. Det viste seg at det ikke eksisterte et optimalt datasett som dekket “alle” stikkrenner og kulverter, da forvaltningen av de aktuelle datasettene er spredt mellom blant annet Geovekst og Statens vegvesen. Prosessen kan inndeles i tre etter kilden til dataene: NVDB, FKB og digitaliserte kulverter. Prinsippet bak prosessene er det samme, men på bakgrunn av ulikt dataformat og behovet for å digitalisere kulverter på egenhånd blir de beskrevet hver for seg.

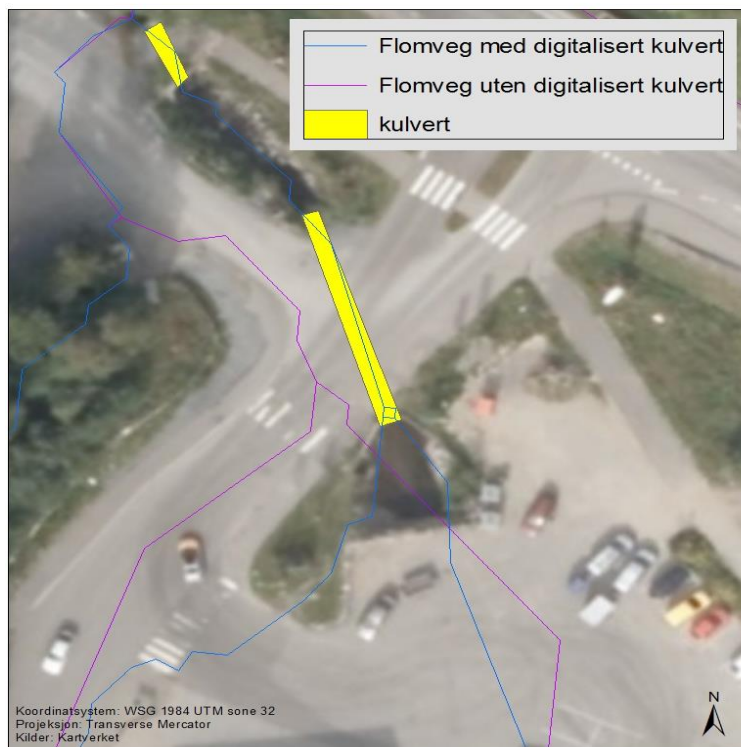
Fra NVDB ble tilgjengelige stikkrenner for studieområdet direkte importert til ArcMap via *NVDBAddIn*. *NVDBAddIn* er et lite programtillegg utviklet av Geodata for å hente data fra NVDB direkte inn i ArcMap (Statens vegvesen 2014). I NVDB blir stikkrenner lagret som punkter, og 126 punkter ble importert. Det ble valgt å digitalisere vektorlinjer av punktene, som vist i figur 4.10 med verktøyet *Editor*. Første steg i prosessen var å lage en ny *feature class* med vektorlinjer i ArcCatalog. Deretter ble denne importert til ArcMap og ut i fra punktene ble vektorlinjer digitalisert. Det ble brukt flyfoto og en høydemodell, både representert som skyggekart og med høydeverdier, for å veilede prosessen. Ved å bruke flyfoto og en høydemodell som hjelpemiddel under digitaliseringen, ble det vurdert at eventuelle feil ville reduseres. Feil i denne sammenhengen kan for det første være at de digitaliserte stikkrennene ikke “skjærer” gjennom hele bilvegen, og dermed ikke blir i stand til å lede vannet som drenerer langs veggrøften over bilvegen. For det andre kan det oppstå feil med orientering av stikkrennene da disse kun er lagret som et punkt per stikkrenne i NVDB og ikke har attributt som viser retning til stikkrennen.



**Figur 4.10:** Stikkrenner fra NVDB digitalisert som vektorlinjer.

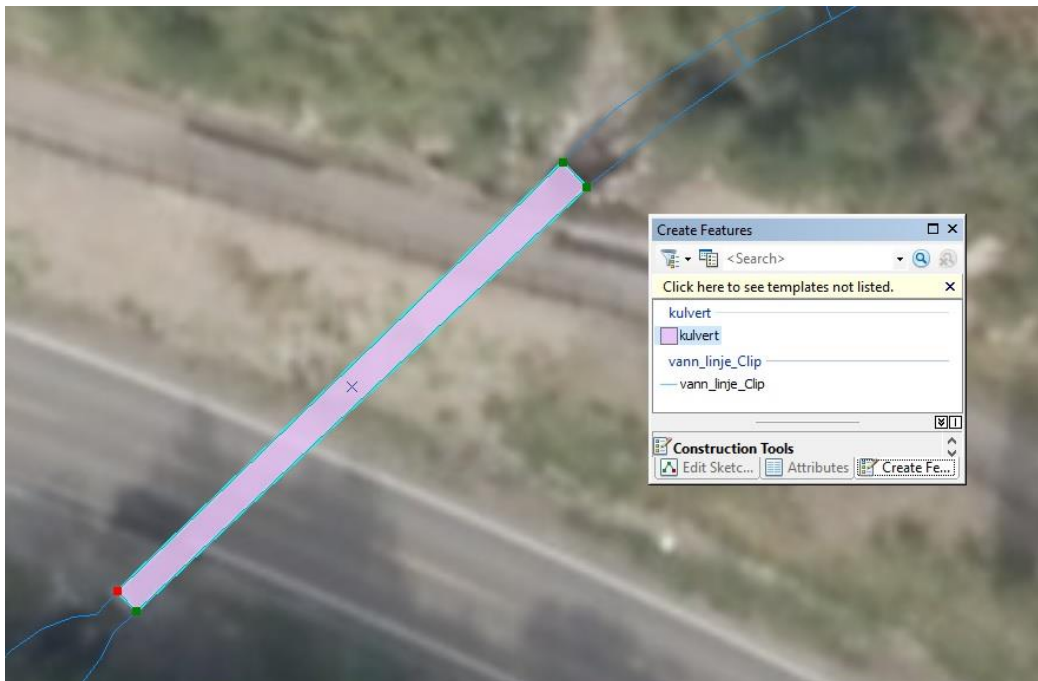
De digitaliserte vektorlinjene ble så konvertert til raster med verktøyet *Feature To Raster* og rasteret ble reklassifisert slik at områdene som representerer stikkrenner fikk verdien 10, og de resterende områdene verdien 0. Verdien 10 tilsvarer 10 m. I FKB var stikkrennene allerede representert som vektorlinjer. På samme måte som de digitaliserte stikkrennene fra NVDB, ble 43 stikkrenner fra FKB-bygnanlegg konvertert til raster og reklassifisert.

Med senkede stikkrenner fra FKB og NVDB i høydemodellen ble det gjennomført en test med hydrologisk modellering. Ut ifra kart og tabeller fra Lillehammer kommune med informasjon om eksisterende kulverter og visuelle studier av resultatene fra akkumuleringsrasteren ble det konkludert med at det var noen kritiske mangler vedrørende stikkrenner og kulverter, som ikke var inkludert. For å ivareta hensikten med studien ble det derfor nødvendig å digitalisere manglende kulverter og stikkrenner, som vist i figur 4.11.



**Figur 4.11:** Kart med flomveger med (blå linje) og uten (lilla linje) digitaliserte kulverter (gult).

En ny *feature class* med polygoner på vektorformat ble opprettet i ArcCatalog, før 48 kulverter ble digitalisert som polygoner med *Editor* i ArcMap. Digitaliseringen ble utført med flere ulike hjelpemidler, som eksisterende bekke- og elveløp fra FKB-data, flyfoto og kart og rapporter fra Lillehammer kommune. Til en viss grad ble også egen lokalkunnskap brukt, da undertegnede er godt kjent i deler av studieområdet. Det måtte til flere runder med digitalisering, da gjennomkjøringer av flomveimodelleringen stadig avdekket kulverter som ikke var inkludert. Skjermdumpen i figur 4.12 viser et eksempel på hvordan kulvertene ble digitalisert ved hjelp av vanndata fra FKB og flyfoto. Kulverten som eksemplet viser ble digitalisert ut i fra ytterpunktene på vannlinjen som krysser bilvegen, og denne metoden ble brukt for de fleste digitaliserte kulvertene. Enkelte kulverter måtte digitaliseres i områder uten eksisterende vannlinjer fra FKB. I disse tilfellene ble flyfoto og hvis tilgjengelig informasjon fra kart og tabeller fra Lillehammer kommune, benyttet som hjelpemidler.



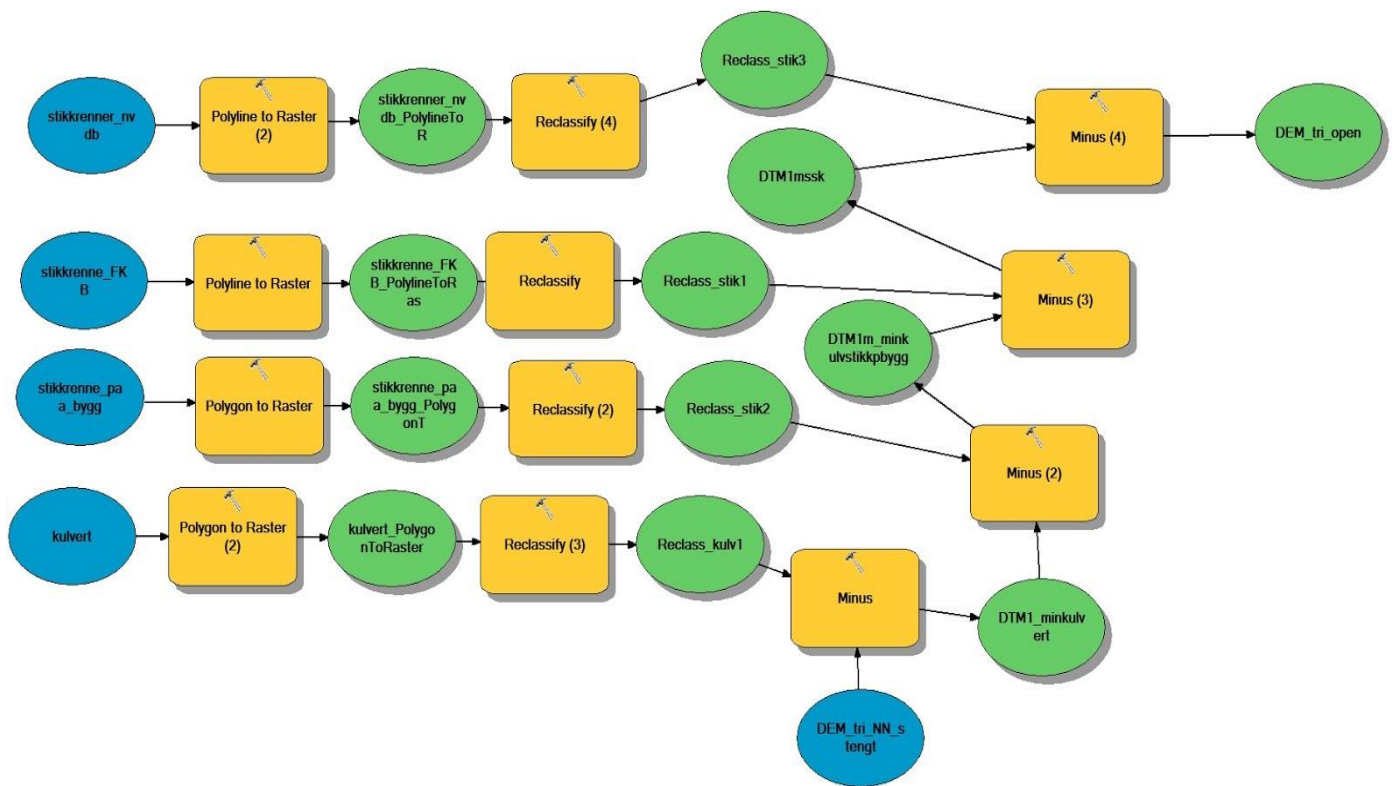
**Figur 4.12:** Skjermdump fra ArcMap som viser digitalisering av en kulvert ved hjelp av flyfoto og eksisterende vanndata fra FKB.

Kulvertene ble så behandlet med samme metode som bruer med unntak av områder som representerer kulverter ble reklassifisert til verdien 10.

I noen få tilfeller viste det seg at de digitaliserte kulvertene overlappet bygninger, ved at de går under bygg. De aktuelle kulvertene der dette var tilfellet, ble lagt til i et eget datasett og reklassifisert til verdien 25. Disse kulvertene ble senket med 25 m for å kompensere for at bygningene allerede er hevet i høydemodellen og for å tillate vannet å strømme gjennom kulvertene til tross for at de går under bygninger.

For å effektivisere prosessen med å senke stikkrenner og kulverter ble det utviklet en modell i ArcMap som vist i figur 4.13. Inngangsdataene er de ulike datasettene for stikkrenner og kulverter, i tillegg til høydemodellen med hevede bygninger og senkede bruer. Verktøyet *minus* er benyttet for å kombinere de ulike rasterene, ved å subtrahere verdiene for stikkrenner og kulverter fra høydemodellen med hevede bygninger og kulverter. Resultatet av modellen i figur 4.13 er en høydemodell der bygninger er hevet 15 m, bruer senket 25 m, stikkrenner og kulverter senket 10 m og stikkrenner som overlapper med bygninger er senket 25 m. De valgte verdiene gjenspeiler ikke virkeligheten nøyaktig, men hensikten blir oppnådd ved at

vannet kan strømme gjennom stikkrennene og kulvertene, under bruer og blir tvunget til å strømme rundt bygninger (Meiforth 2013).



Figur 4.13: Skjermdump fra ArcMap som viser modellert arbeidsflyt for senking av stikkrenner og kulverter i DEM\_O.

Til tross for at data for stikkrenner og kulverter ble hentet inn fra NVDB og FKB og delvis digitalisert på egenhånd vil det være et ukjent antall stikkrenner og kulverter som ikke blir tatt med i modellen. Spesielt private og jordbruksrelaterte stikkrenner er dårlig stedfestet, og kan være vanskelige å oppdage i digitaliseringsprosessen.

#### 4. 6 Hydrologisk modellering

Med fremgangsmåten beskrevet i figur 4.9 ble høydemodellen for stengte dreneringsveger generert, mens figur 4.13 beskriver fremgangsmåten for høydemodellen for åpne dreneringsveger. Det siste steget for å gjøre de to høydemodellene så hydrologisk korrekte som mulig var å fjerne alle groper. Feil i datagrunnlaget, beregningen av høydemodellene og avrunding til heltall er de primære kildene til groper. Prosessen med å senke bruer, stikkrenner og kulverter kan også har forårsaket groper. Derfor ble gropene i høydemodellene ble fylt igjen med verktøyet *Fill* etter at den øvrige modifiseringen var gjort. Figur 4.14

illustrerer forskjellen mellom de modifiserte høydemodellene DEM\_S og DEM\_O, visualisert som skyggekart. I kartet som viser DEM\_S kan man se at bygninger er hevet og en bro er senket. I kartet som viser DEM\_O kan man i tillegg se at det langs vegen er senket tre stikkrenner, samt senkede stikkrenner over den jevne flaten (parkeringsplass i tilknytning til butikk). DEM\_S og DEM\_O utgjør grunnlaget for de videre analysene i oppgaven, og er inngangsdata i neste steg, som er å kalkulere dreneringsretninger.



**Figur 4.14:** DEM\_S med hevede bygninger (15 m) og senkede bruer (25 m) tilpasset scenarioet for stengte dreneringsveger og DEM\_O med hevede bygninger (15 m), senkede bruer (25 m) og senkede stikkrenner og kulverter (10 m) tilpasset scenarioet for åpne dreneringsveger.

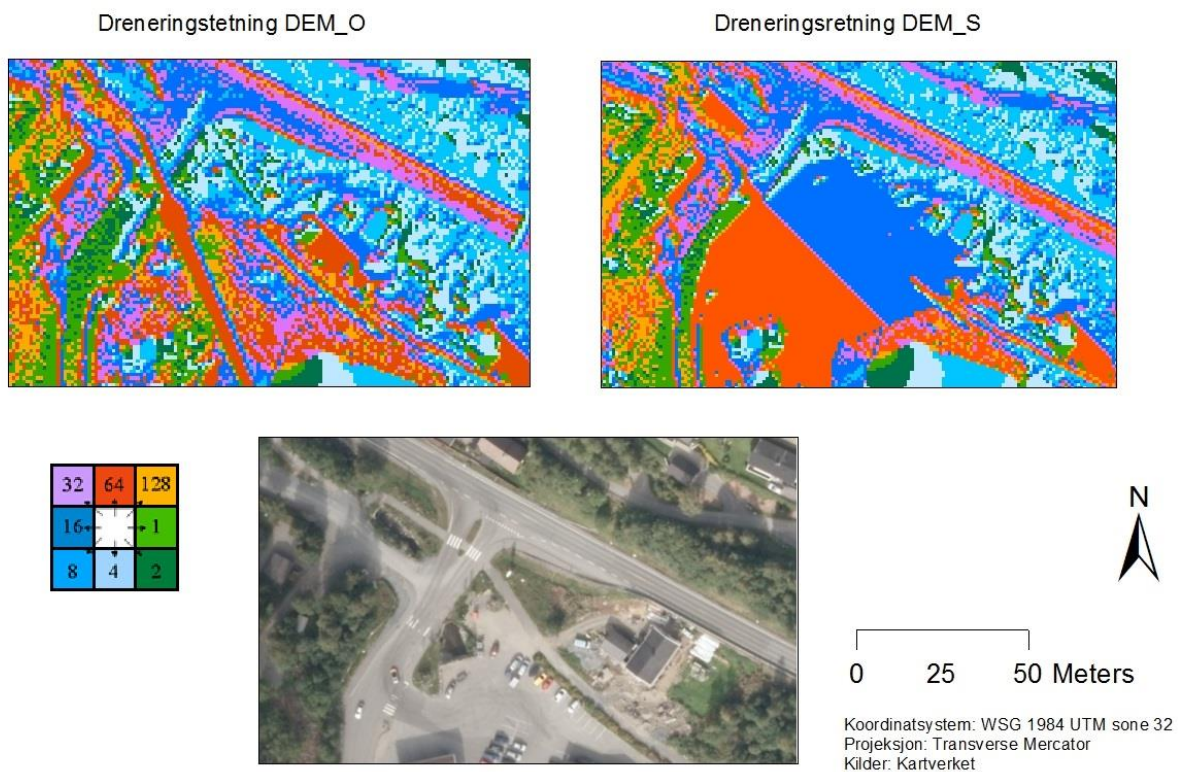
Scenariet med åpne dreneringsveger tilsvarer at vann kan strømme uavbrutt gjennom kulverter og stikkrenner. På grunn av at det er lavbrekkene i terrenget og ikke egenskaper ved vannet som blir studert, vil de senkede stikkrennene og kulvertene ha uendelig kapasitet i modelleringen. I scenariet med stengte dreneringsveger vil blokkerte kulverter og stikkrenner derimot ikke tillate noe vann å strømme igjennom.



#### 4. 6. 1 Dreneringsretning

For å kalkulere dreneringsretningen ble det innledningsvis eksperimentert med to ulike metoder, *D8* og *D-uendelig*, til tross for at tidligere studier (Meiforth 2013; Viréhn 2014; Hole 2015) benyttet *D8*. Formålet med å eksperimentere med begge metodene var for å se om det var store forskjeller mellom de, og for å avgjøre hvilken metode som er best egnet i studien. Det er viktig å understreke at studien ikke har som formål å sammenligne og vurdere metodene opp mot hverandre i detalj.

Dreneringsretningen ble beregnet med *D8*-metoden, som er implementert i verktøyet *flow direction* i ArcMap. Resultatet er en raster hvor hver enkelt celle er kodet med en verdi som forteller hvilke av de åtte mulige dreneringsretningene cellen drenerer til. Figur 4.15 viser en sammenligning av dreneringsretningene for *DEM\_O* og *DEM\_S*. Effekten av å senke stikkrenner kommer tydelig frem da dreneringsretningen til *DEM\_O* følger et tydelig løp (oransje sammenhengende linje) der stikkrenner har blitt senket.

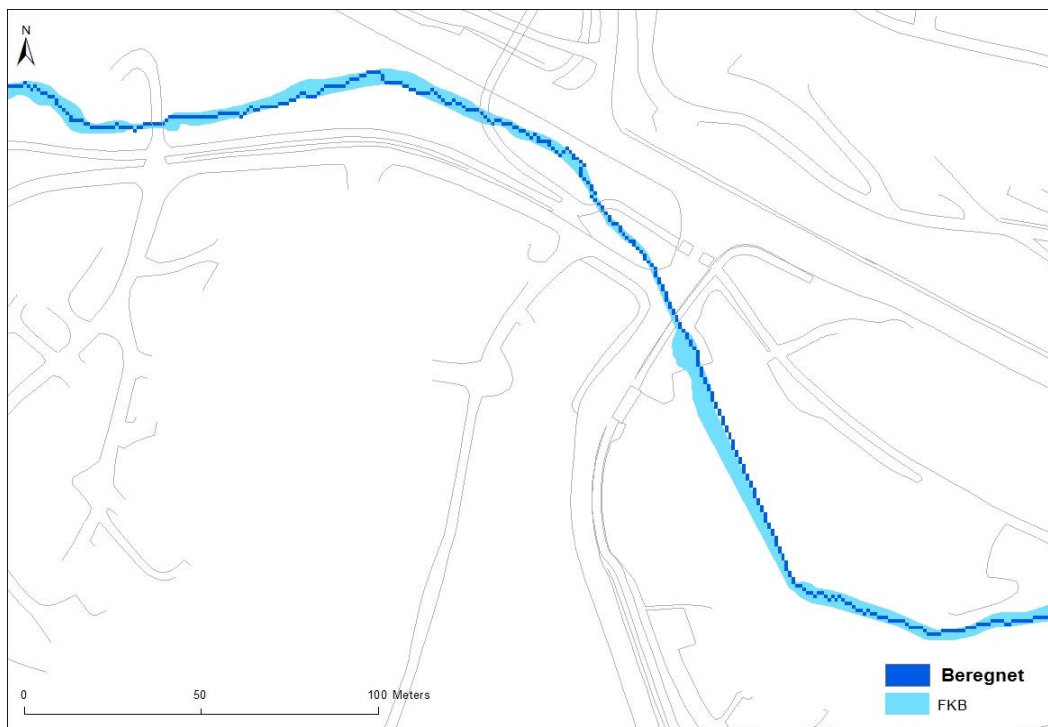


Figur 4.15: Dreneringsretning



#### 4. 6. 2 Akkumulering

Rasterene med dreneringsretninger har isolert sett ikke noen stor nytteverdi, og gir et visuelt kaotisk inntrykk av dreneringen. Nytteverdien til rasterene med dreneringsretninger er som inngangsdata, for å beregne akkumuleringen av overflatevann med verktøyet *Flow accumulation*. Prinsippet for hvordan et akkumuleringsraster dannes fra et raster med dreneringsretninger er vist i figur 4.15. Akkumuleringen ble beregnet uten et vektraster, og resultatene beskriver derfor ikke det akkumulerte volumet vann. Resultatene vil beskrive hvilke veier vannet vil kunne ta i terrenget og hvor stort akkumulert areal hver enkelt celle har (Rød 2015). I figur 4.16 vises en sammenligning av modellert akkumulering i et lavbrekk fra høydemodellen med åpne dreneringsveger og et vannløp hentet fra FKB-datasettet. Som figuren viser, samsvarer den beregnede vannvegen relativt godt med vannløpet fra FKB. Den beregnede vannvegen fremstår som mer hakkete og inndelt, noe som kan skyldes at den er på rasterformat og ble beregnet ut ifra en oppløsningen på 1 m. De modellerte vannvegene med størst akkumulasjon befinner seg i lavbrekk i terrenget og samsvarer generelt godt med bekker og elveløp fra FKB-datasettet i hele studieområdet.



**Figur 4.16:** Kartet viser beregnet vannveg og eksisterende elveløp for Årettaelva.

### **4. 6. 3 Akkumulerings areal**

Arealet av det området som drenerer til en celle, får man ved å multiplisere antall celler som drenerer inn i cellen med cellestørrelsen (Rød 2015). Med en cellestørrelse på 1 m blir akkumuleringsarealet lik verdien for antall celler som drenerer inn hver enkelt celle, beregnet i m<sup>2</sup>. Dette prinsippet blir i oppgaven brukt til å sammenligne akkumulert areal i faktiske skadepunkter, mellom åpne dreneringsveger og dreneringen med blokkerte kulverter og stikkrenner. Idéen er at om akkumuleringsarealet i et skadepunkt har en stor økning i akkumulert areal som følge av blokkerte stikkrenner og kulverter, vil vann som har blitt tvunget til å ta nye veier forårsake skader ved det gitte punktet (Viréhn 2014).

### **4. 6. 4 Definere terskel for flomveier**

Ut i fra akkumuleringsrasterene er en flomvei en linje av celler som ligger ved siden av hverandre med høye akkumuleringsverdier. For å kunne identifisere og klassifisere flomveger etter hvor stor akkumulering de har, måtte en terskel for å definere en flomvei, og for å kunne skille de fra hverandre bestemmes. For å definere terskelverdien for flomveger fikk Meiforth (2013) bistand fra eksperter på hydrologi, som analyserte tidligere flomhendelser i Trondheim. De kom frem til at 50 000 m<sup>2</sup> akkumulert areal var den kritiske grensen for flomveger i urbane områder, mens det i andre områder som parker og skog ble definert en terskel på 25 000 m<sup>2</sup> (Meiforth 2013). Erfaringer fra flommen i 2012 i Nedre Eiker, antydte også at flomveier med større enn 50 000 m<sup>2</sup> akkumulert areal utgjør stort skadepotensiale (Bratlie 2015). Terskelen og klassegrensene for flomveier i denne studien er bestemt på bakgrunn av dette, med noen egendefinerte endringer. Terskelen ble satt til 25 000 m<sup>2</sup>, da store deler av studieområdene er skogsområder. Det fører til at flomveier med celler med mindre enn 25 000 m<sup>2</sup> i akkumulert areal er vurdert som uvesentlig og blir derfor ikke visualisert. På bakgrunn av at 50 000 m<sup>2</sup> definerer terskelen for urbane områder, ble 25 000 m<sup>2</sup> - 50 000 m<sup>2</sup> inndelt som en klasse som representerer mindre flomveier. Større flomveier ble klassifisert fra 50 000 m<sup>2</sup> - 250 000 m<sup>2</sup>, 250 000 m<sup>2</sup> - 1 000 000 m<sup>2</sup>, 1 000 000 m<sup>2</sup> - 5 000 000 m<sup>2</sup> og > 5 000 000 m<sup>2</sup>. Klasseinndelingens hensikt er å skille flomveiene fra hverandre, slik at man enkelt kan identifisere flomveier av ulik størrelse, i forhold til akkumulert areal. Skadepotensialet til en flomvei er forventet å ha en viss sammenheng med det akkumulerte arealet. For eksempel er det forventet at en flomvei med 5 000 000 m<sup>2</sup> akkumulert areal, vil ha et mye større skadepotensial enn en flomvei med 25 000 m<sup>2</sup> akkumulert areal.

For å visualisere flomvegene for studieområdene, ble akkumuleringsrasterene for begge scenariene konvertert til vektorlinjer med *Raster to Polyline* verktøyet. Ved konvertering til vektorlinjer, tillater ArcMap kun sekssifrede verdier som resultat. Verdiene i akkumuleringsrasterne overstiger denne verdien, og det ble derfor nødvendig å reklassifisere akkumuleringsrasterne før konverteringen. Dette ble gjort med *reclassify*, slik at cellene i akkumulerings rasterene ble gitt nye verdier jamfør de valgte klassegrensene. Etter konverteringen til vektorlinjer kunne flomvegene visualiseres i kart, med den respektive klasseinndelingen.

#### 4.7 Skadepunkt

For å kunne sammenligne akkumuleringsarealet for åpne og stengte dreneringsveger der flommen i 2014 påførte skader, ble det vurdert som hensiktsmessig å gjøre om skadepolygonene registrert av Lillehammer kommune til punkter. En sammenligning av verdier mellom to ulike datasett i et punkt, innebærer kun sammenligningen av de to verdiene fra datasettene for akkurat det punktet. En slik sammenligning mellom polygoner vil være mye mer kompleks, grunnet mengden verdier man må behandle. I tillegg må man velge om man vil sammenligne gjennomsnittsverdien, maksimumsverdien, minimumsverdien eller lignende i polygonet. I Viréhn (2014) sin studie av vann på avveie, ble GPS registrerte skadepunkter benyttet i sammenligningen, og underbygger valget av punkter.

Skadepolygonene ble levert som fire kartlag. Et som dekket Åretta, et for Skurva og to for Bæla, som ble kombinert til et kartlag med verktøyet *merge*. Prosessen med å digitalisere skadepunkter fra skadepolygonene består av flere steg. Først ble polygonene konvertert til punkter, ved hjelp av verktøyet *Feature to point*. Dette innebærer at hvert enkelt polygon ble omgjort til et punkt lokalisert i midten av polygonet. Konverteringen ivaretar informasjonen i attributt Tabellen (ESRI 2014a). Plasseringen til punktene etter konverteringen var som sagt i midten av polygonet punktet ble konvertert fra, noe som i de fleste tilfellene var lite hensiktsmessig. På bakgrunn av at det er lavbrekkene som blir studert og ikke vannets evne til gå utover sine bredder, ble punktene som figur 4.17 viser, flyttet til et lavbrekk innenfor det opprinnelige polygonets grense. Punktene ble manuelt flyttet med *editor* verktøyet til et lavbrekk representert i akkumuleringsrasteret for både åpne og stengte dreneringsveger.



**Figur 4.17:** Lokaliseringen av skadepunkt i lavbrekk representert i akkumuleringsrasteren i begge scenario.

Det å flytte punktene var til tider utfordrende, særlig for polygoner med lang utstrekning. For det første, var det tilfeller der det var mer enn et tydelig lavbrekk representert i begge rasterene innenfor samme polygon. For det andre, var det tilfeller der en flomvei fra en av scenariene koblet seg på eller av lavbrekket innenfor polygonets grense. Disse situasjonene ble behandlet ekstra forsiktig og det ble nøye vurdert hvor det var hensiktsmessig å plassere punktet. Det ble forsøkt å lokalisere alle punkter oppstrøms i polygonet, men enkelte punkter tilhørende polygoner med lang utstrekning, ble plassert nedstrøms i polygonet.

I attributt Tabellen til hver av de tre skadepunkttemaene, ble det lagt til to nye kolonner med *Add Field* verktøyet. En kolonne for akkumulert areal for hver av de to scenariene. Verdier for akkumulert areal for alle skadepunktene ble deretter manuelt plottet inn i attributt Tabellen ved å bruke *identify* for hvert enkelt skadepunkt i akkumuleringsrasterne. For videre bearbeiding ble skadepunkttemaene hentet inn i *excel*. I *excel* ble endringer i akkumulert areal fra åpne til stengte dreneringsveger utregnet i prosent.

Skadepunktene ble klassifisert i fire klasser ut i fra endringen i akkumulert areal veiledet av Viréhn (2014): 1) Naturlig flomvei: Skadepunkter med lav eller ingen økning i akkumulert areal etter å ha blokkert stikkrenner og kulverter. 2) Vann på avveie: Skadepunkter med stor økning (50 % eller mer) i akkumulert areal. 3) Utenfor rekkevidde: Skadepunkter som er

utenfor studiens rekkevidde. Dette er hovedsakelig skadepunkter som er lokalisert utenfor lavbrekk og som skyldes erosjon, utrasing og massetransport, som på grunn av studiens forutsetninger og begrensinger ikke er relevante. 4) Andre: Skadepunkter som ikke er direkte knyttet til de ovennevnte. Et eksempel er skadepunkter med mye større akkumulert areal ved åpne dreneringsveger enn ved stengte. Terskelen på 50 % økning i akkumulert areal for å definere et skadepunkt som et resultat av vann på avveie, er satt for å redusere feil og for at kun nevneverdige flomveger blir tatt med (Viréhn 2014). I resultatkapittelet vil en nærmere forklaring av klassifikasjonen bli presentert sammen med tabeller for de respektive studieområdene.

#### **4. 8 Oppsummering metode**

Flytdiagrammet i figur 4.18 oppsummerer metoden, trinn for trinn, i denne studien. Fra høyoppløselige LiDAR-data ble bakkepunktene sortert og supplert med vektordata fra FKB som knekklinjer. Deretter ble det laget en høydemodell på rasterformat (DEM) for å være egnet til hydrologisk modellering. Før den hydrologiske modelleringen ble høydemodellen modifisert på to ulike måter for å tilpasse åpne- og stengte dreneringsveger, etterfulgt av at groper ble fylt igjen. Fra de to ulike høydemodellene ble det så beregnet dreneringsretning med forutsetning at vannet blir styrt av gravitasjonen og drenerer langs den bratteste gradienten. Ut i fra dreneringsretningene ble akkumuleringsrasteren for de to respektive scenariene ble beregnet. Akkumuleringsrasterne er grunnlaget for analysen i oppgaven, samt for den visuelle fremstillingen av flomveier i nedbørfeltene Bæla, Åretta og Skurva.

Skadeområdene registrert av Lillehammer kommune ble levert som polygoner. Polygonene ble omgjort til punkter og lokalisert i lavbrekk representert i akkumuleringsrasterne for begge scenarier. Skadepunktene ble så brukt til å analysere endringen i akkumulert areal fra åpne til stengte dreneringsveger for å undersøke om vann på avveie kan ha forårsaket skadene.



Figur 4.18: Oppsummering av metoden i denne studien, steg for steg.



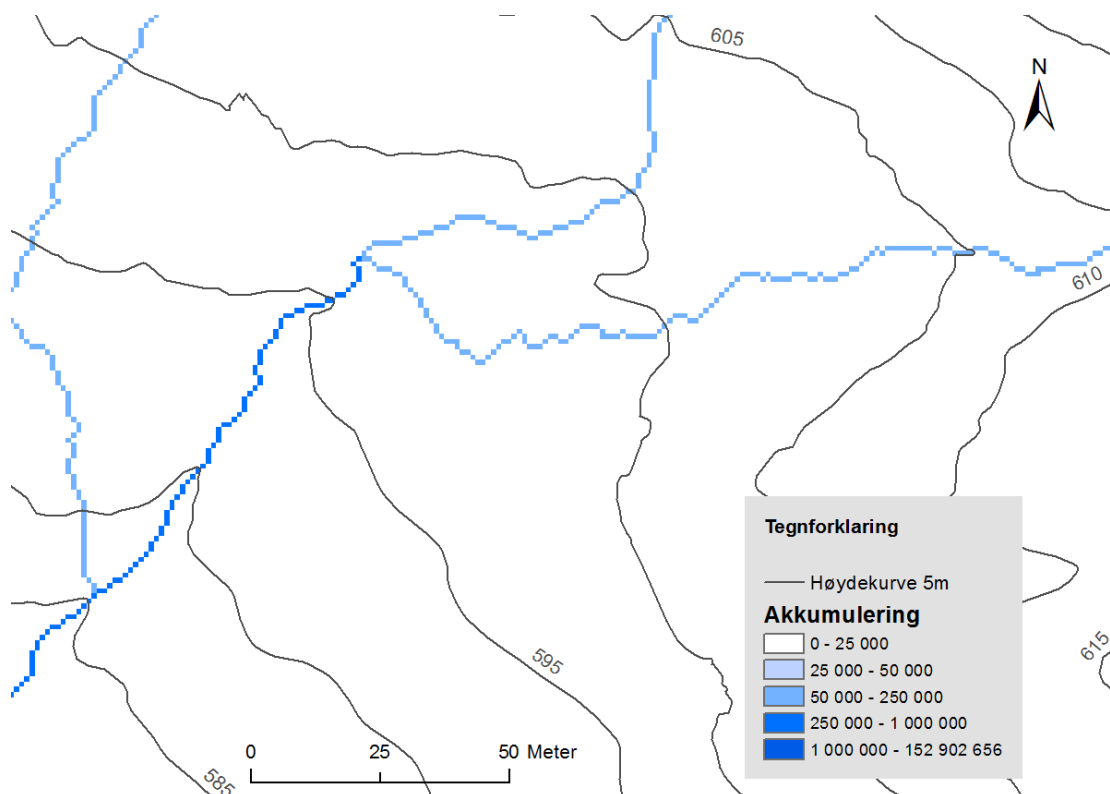


## Kapittel 5 - Resultat

Resultatkapittelet er delt opp i tre deler med ulikt detaljnivå. Først vil resultater fra den hydrologiske modelleringen bli presentert med figurer for å gi en grov oversikt, med vekt på generelle trekk. Deretter blir visualiseringen av flomveier presentert for hvert enkelt studieområde. Til slutt vil sammenligningen av akkumulert areal i skadepunktene mellom åpne og stengte dreneringsveger bli presentert med tabeller, diagram og mer detaljerte kart.

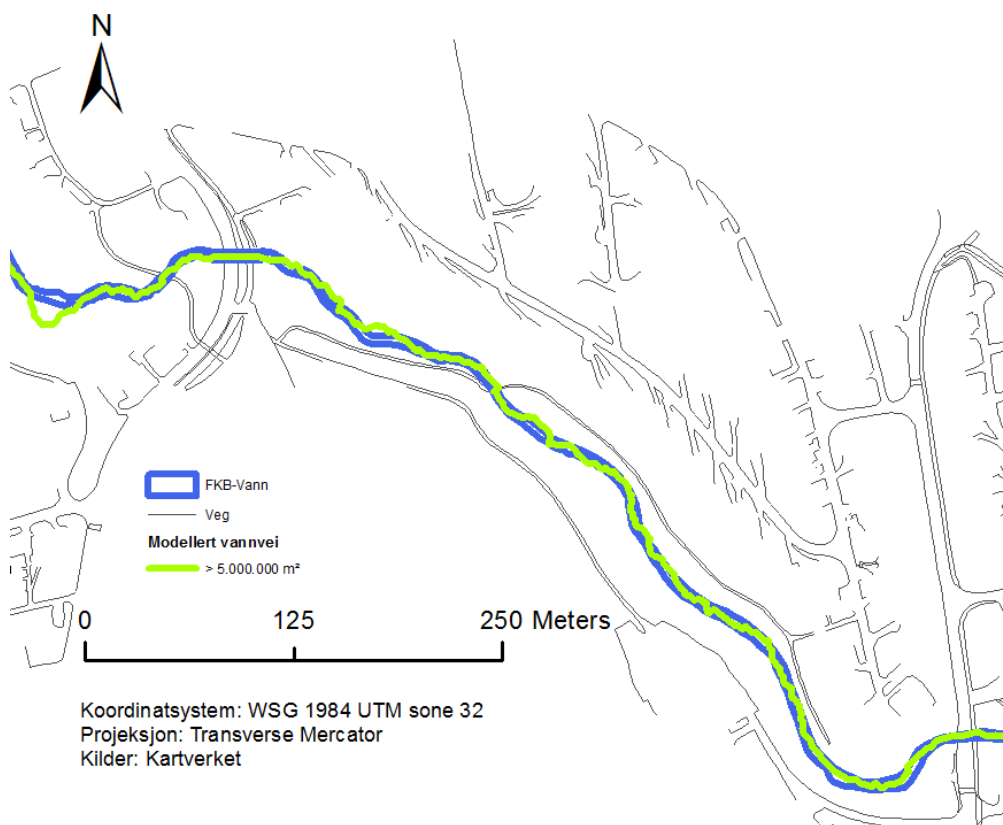
### 5. 1 Hydrologisk modellering

Ved å beregne akkumuleringen (antall celler som drenerer inn i hver enkelt celle) oppstår det, som figur 5.1 viser, tydelig dreneringslinjer som representerer lavbrekk i terrenget vannet vil drenerer til. Figuren viser akkumuleringen i en liten del av Åretta nedbørfelt med åpne dreneringsveger, og høydekurver er lagt til for å fremheve at vannet samles i lavbrekk i terrenget. Lavbrekk med lav akkumulering er representert med lyse farger, mens lavbrekk med større akkumulering er representert med mørke farger. I områder med høy akkumulering er det akkumulerte arealet (tilrenningsareal) stort, og forventet vannføring og skadepotensial er derfor større her enn i områder med lav akkumulering.



Figur 5.1: Beregnet akkumulering. Vannet samles i lavbrekk i terrenget.

På grunn av den fine oppløsningen (liten cellestørrelse) i høydemodellen modelleringen tar utgangspunkt i, samsvarer faktiske bekke- og elveløp godt med de modellerte lavbrekkene. Naturlig nok gjelder dette hovedsakelig for beregninger med åpne dreneringsveger, men er til en viss grad gyldig for stengte dreneringsveger (i områder uten kulverter og stikkrenner). Figur 5.2 illustrerer dette ved å sammenligne elveløpet til Årettaelva, hentet fra FKB, med en modellert vannvei på vektorformat med over 5.000.000 m<sup>2</sup> akkumulert areal. Med unntak av et lite område helt til venstre i figuren, følger den modellerte vannveien det offisielle elveløpet ganske bra. Dette er en gjennomgående trend i hele studieområdet, og underbygger til en viss grad kvaliteten til modelleringen for begge scenariene.



**Figur 5.2:** Validering av beregnet flomvei ved å sammenligne med offisielt elveløp fra FKB.

Studien modellerer flomveier for to ulike scenarier som baserer seg på forskjellige situasjoner. Figurene over viser flomveier med utgangspunkt i åpne dreneringsveger, hvor uendelig mengder vann uavbrutt kan strømme gjennom kulverter og stikkrenner. Under flommen sjuende-åttende juli 2014 ble svært mange stikkrenner og kulverter blokkert i studieområdet som følge av de store vannmassene og massetransporten. Dette førte til at de opprinnelige vannveiene ble blokkert, slik at vannet ble tvunget til å ta nye veier (Aall et al.

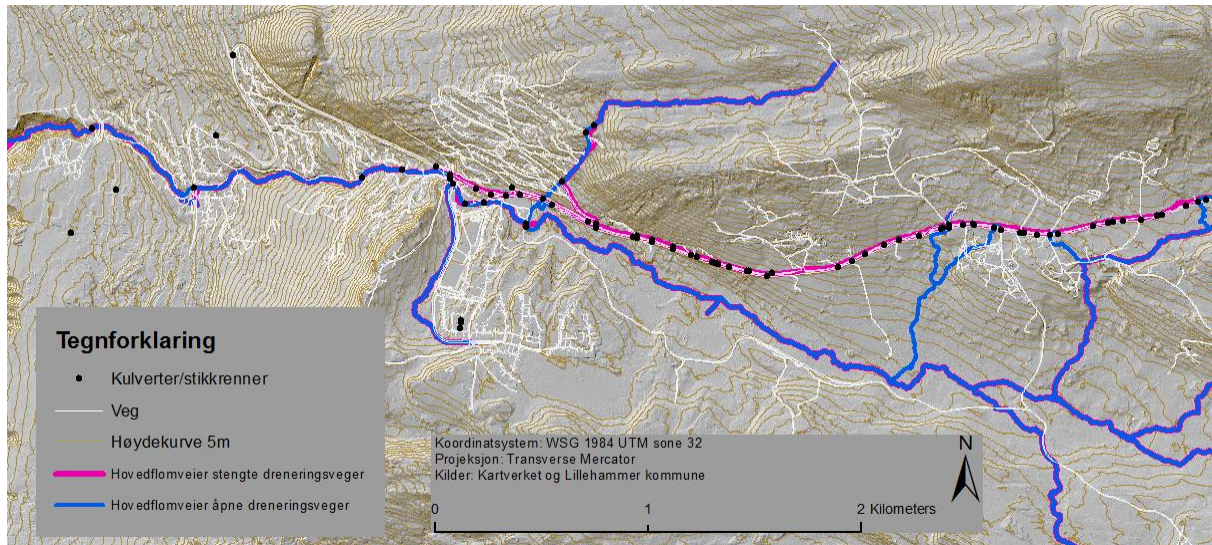
2015). Figur 5.3 er fra nedbørfeltet Åretta, og viser hvordan vannets opprinnelige dreneringsvei kan bli hindret av løsmasser som blokkerer en kulvert. I modelleringen med stengte dreneringsveger er alle kulverter og stikkrenner fullstendig blokkert, og vannet vil ikke strømme igjennom. I virkeligheten er det lite sannsynlig at alle kulverter og stikkrenner blir fullstendig blokkert samtidig, fordi problemene oppstår oppstrøms for og så sprer seg nedstrøms i nedbørfeltet. I følge en rapport fra flommen i 2014, var dette tilfellet i nedbørsfeltene Skurva, Åretta og Bæla (Aall et al. 2015). Til tross for dette ble det vurdert at å blokkere alle kulverter og stikkrenner var hensiktsmessig, for å kunne identifisere flomveier når de opprinnelige vannvegene er blokkert. Modelleringen med stengte dreneringsveger tar kun blokkerte stikkrenner og kulverter i betraktning. Faktorer som for eksempel erosjon og oversvømming (vannet går over sine bredder) kan i virkeligheten også føre vann på avveie, men er i denne studien utelatt.



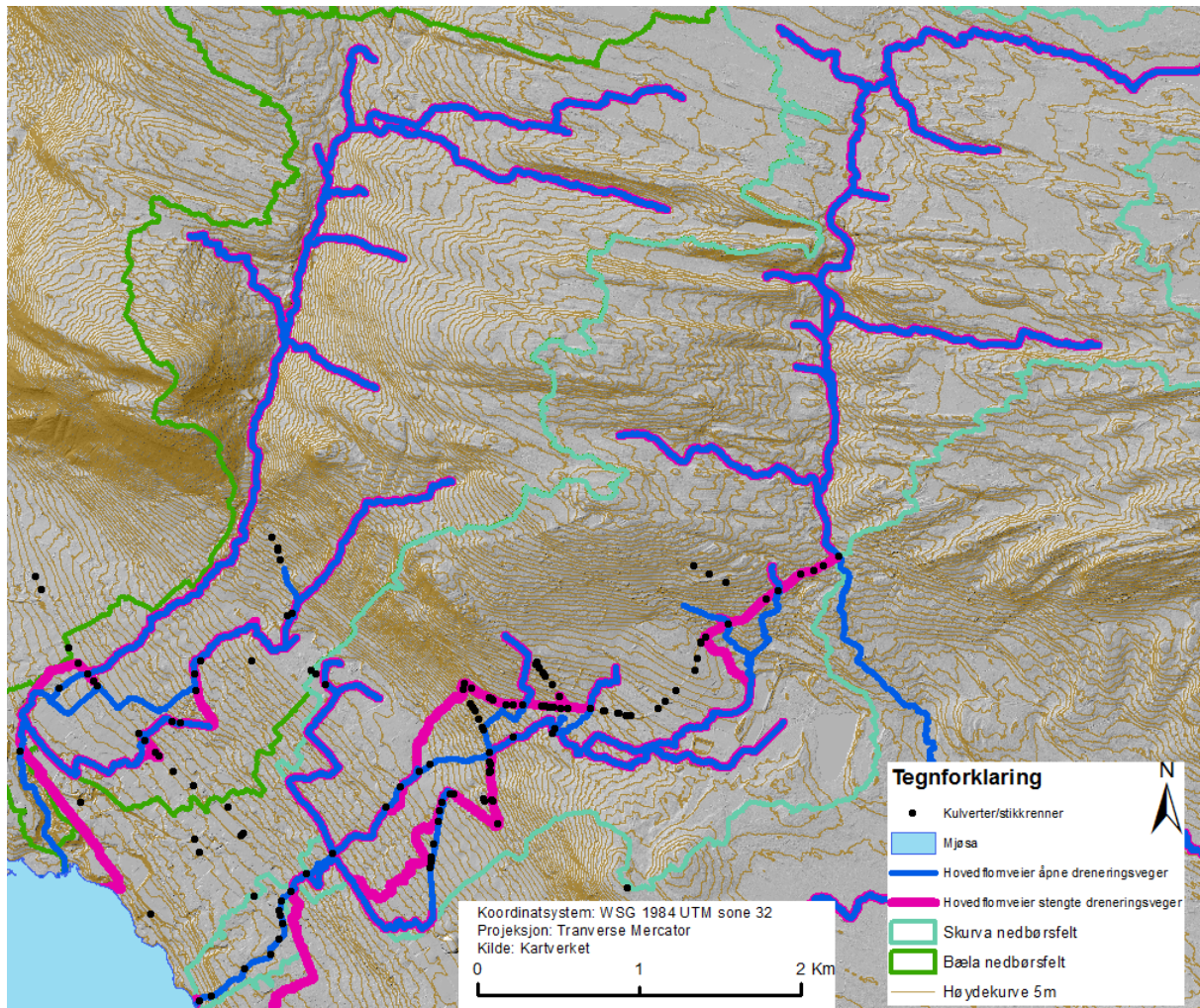
**Figur 5.3:** *Blokkert kulvert ved Askjellerudebekken, Åretta nedbørfelt, som vil kunne endre dreneringen (Lillehammer kommune 2014).*

For å illustrere hvordan flomveiene endres som en konsekvens av stengte dreneringsveger, viser figur 5.4 og 5.5 en grov oversikt over flomveier for begge scenariene i nedbørfeltene Åretta, Skurva og Bæla. Figurene viser også høydekurver med 5 m ekvidistanse for å illustrere topografien. I denne sammenligningen er det satt en terskel på 250 000 m<sup>2</sup> akkumulert areal for de visualiserte flomveiene, for å kun illustrere hovedflomveier. Blå linjer representerer hovedflomveier med åpne dreneringsveger, mens rosa linjer representerer hovedflomveier med stengte dreneringsveger. Der disse overlapper er linjen blå, med rosa kant.





Figur 5.4: Hovedflomveier med åpne- og stengte dreneringsveger, Åretta nedbørfelt.



Figur 5.5: Hovedflomveier med åpne- og stengte dreneringsveger i Skurva og Bæla nedbørfelt.

Som figur 5.4 fra nedbørfeltet Åretta illustrerer, er flomveiene som kun representerer stengte dreneringsveger ofte lokalisert langs bilveier. Ved åpne dreneringsveger vil vannet drenere gjennom kulvertene og stikkrenner i tilknytning til vegnettet. I figur 5.5 som viser nedbørfeltene Skurva og Bæla er veger utelatt, men det samme gjelder for disse områdene. Veger ble utelatt i figur 5.5 på grunn av at vegnettet i for stor grad hadde dominert figuren og ført til at det hadde blitt vanskeligere å tolke flomveiene.

Spesielt i nedbørfeltet Skurva endrer nedbørfeltets egenskaper seg ved blokkerte vannveger. I figur 5.5 (til høyre midt i kartet) ser man en flomvei med åpne dreneringsveger som skjærer ut av det definerte nedbørfeltet. Dette indikerer at det kun er ved blokkerte dreneringsveger området oppstrøms (der den blå linjen skjærer gjennom den turkise grensen) bidrar til nedbørfeltet. I tillegg ser man at i nedre deler av både Skurva og Bæla drenerer flomveier med stengte dreneringsveger ut av de definerte nedbørfeltene.

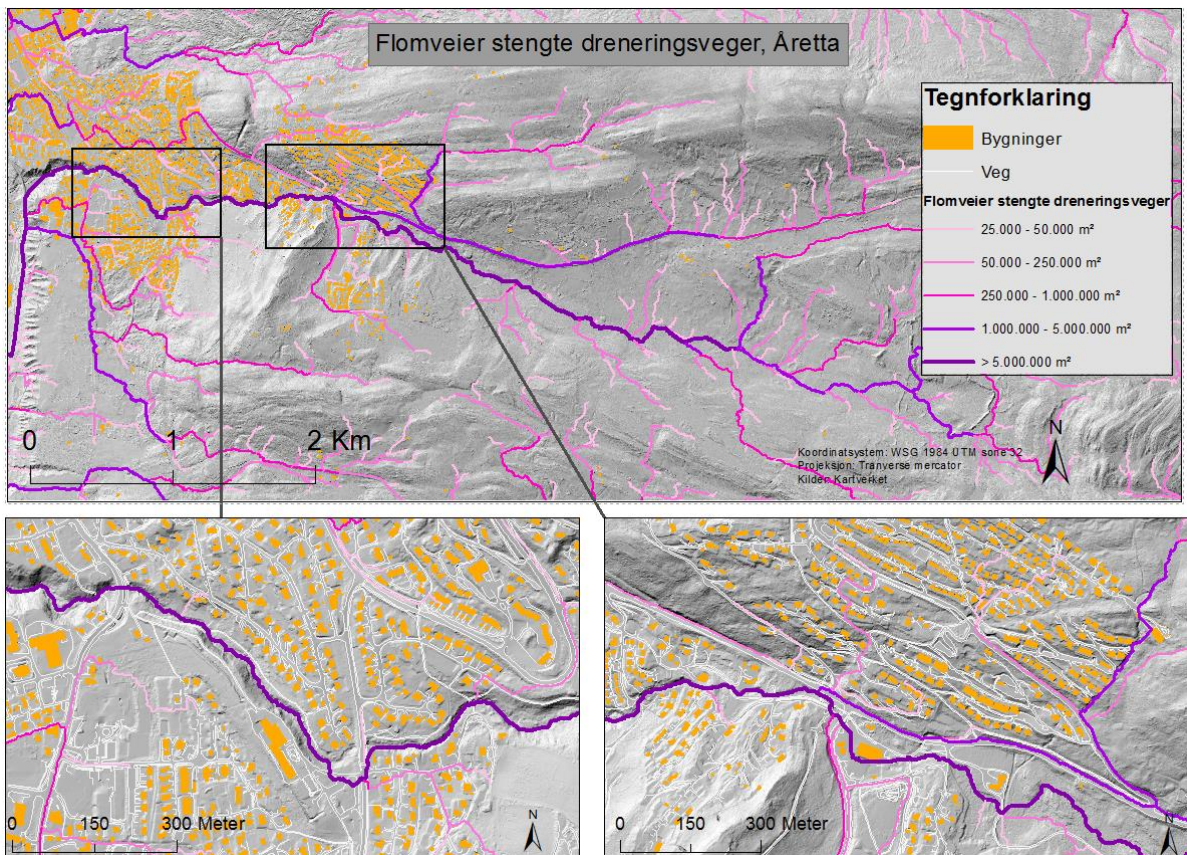
## 5.2 Visualisering av flomveier

For å forbedre visualiseringen av flomveiene ble akkumuleringsrasterne konvertert til vektorlinjer. En vektorrepresentasjon av flomveiene vil gi et mer oversiktlig bilde, på grunn av bedre symboliseringsmuligheter, og at linjer på vektorformat fremstår som mer glatte og jevne enn på rasterformat. Sistnevnte kan observeres ved å sammenligne figur 5.1 og 5.2. Terskelen for flomveier ble satt til minimum akkumulert areal på 25 000 m<sup>2</sup> for å sortere ut flomveier med et visst skadepotensial. Klasseinndelingen er egendefinert, men utarbeidet med inspirasjon fra Meiforth (2013) og Viréhn (2014); 25 000 m<sup>2</sup> - 50 000 m<sup>2</sup>, 50 000 m<sup>2</sup> - 250 000 m<sup>2</sup>, 250 000 m<sup>2</sup> - 1 000 000 m<sup>2</sup> - 5 000 000 m<sup>2</sup>, > 5 000 000 m<sup>2</sup>.

Flomveier for de to scenariene er i figur 5.6-5.11 presentert i separate kart, for hvert enkelt studieområde. Kartene for åpne og stengte dreneringsveger dekker det samme området fra hvert studieområde. Hovedkartene inneholder flomveier og bygninger. For flomveiene med stengte dreneringsveger, er klasseinndelingen visualisert med en lys rosa-lilla skala, mens for flomveier med åpne dreneringsveger er klasseinndelingen visualisert med en lys blå- mørk blå skala. Av intuitive årsaker er de større flomveiene gitt mørke farger, mens de mindre er gitt lyse farger. I tillegg er linjene som representerer større flomveier noe tykkere enn linjene for mindre flomveier. Utsnittskartene dekker problem- og skadeområder fra flommen sjuende-åttende juli 2014, og viser flomveier, bygninger og veger. Av hensyn til formateringen er kartene noe forminsket, og kan føre til at enkelte detaljer er vanskelig å observere.

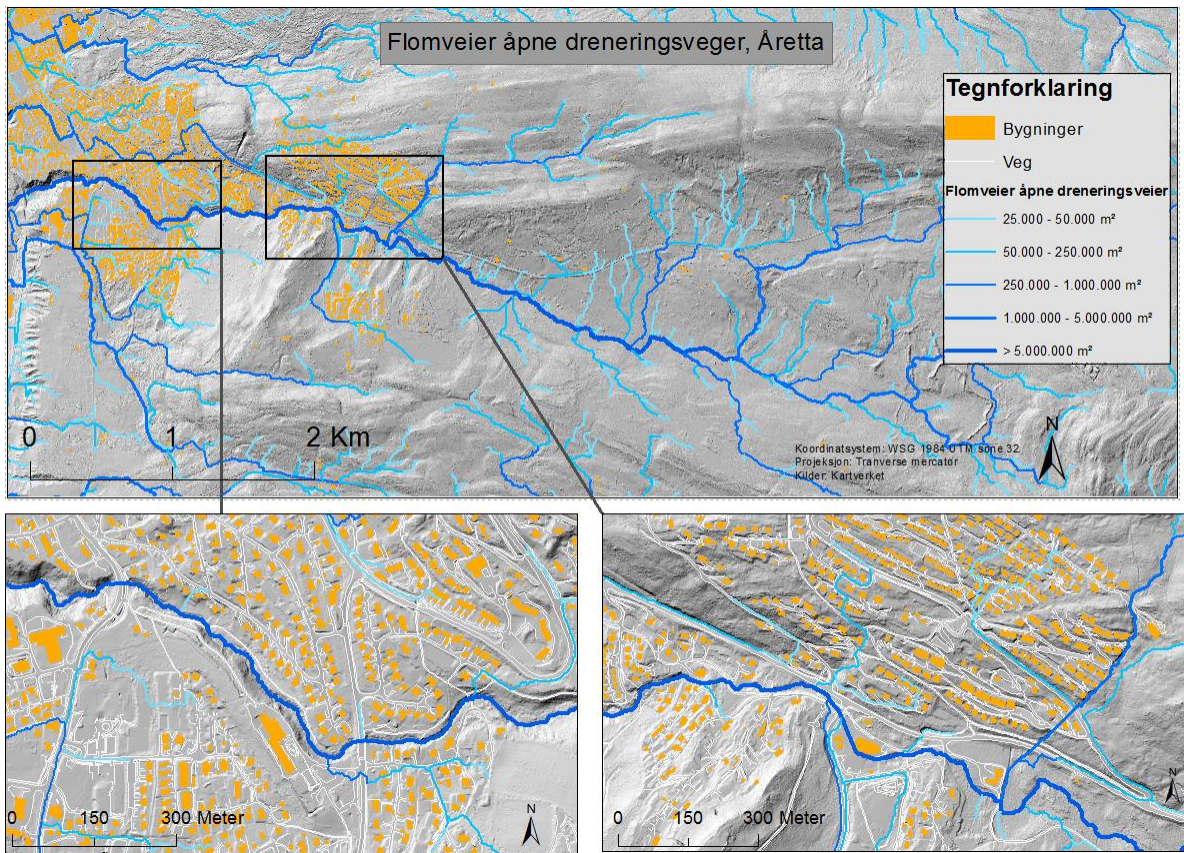


Visualisering presentert i figur 5.6-5.11 har som hensikt å gi et helhetlig og oversiktlig bilde av flomveier av ulik størrelse for hvert studieområde. Mer detaljerte kart med oversikt over kulverter, stikkrenner og skadepunkter blir presentert med sammenligningen av akkumulert areal i skadepunkter



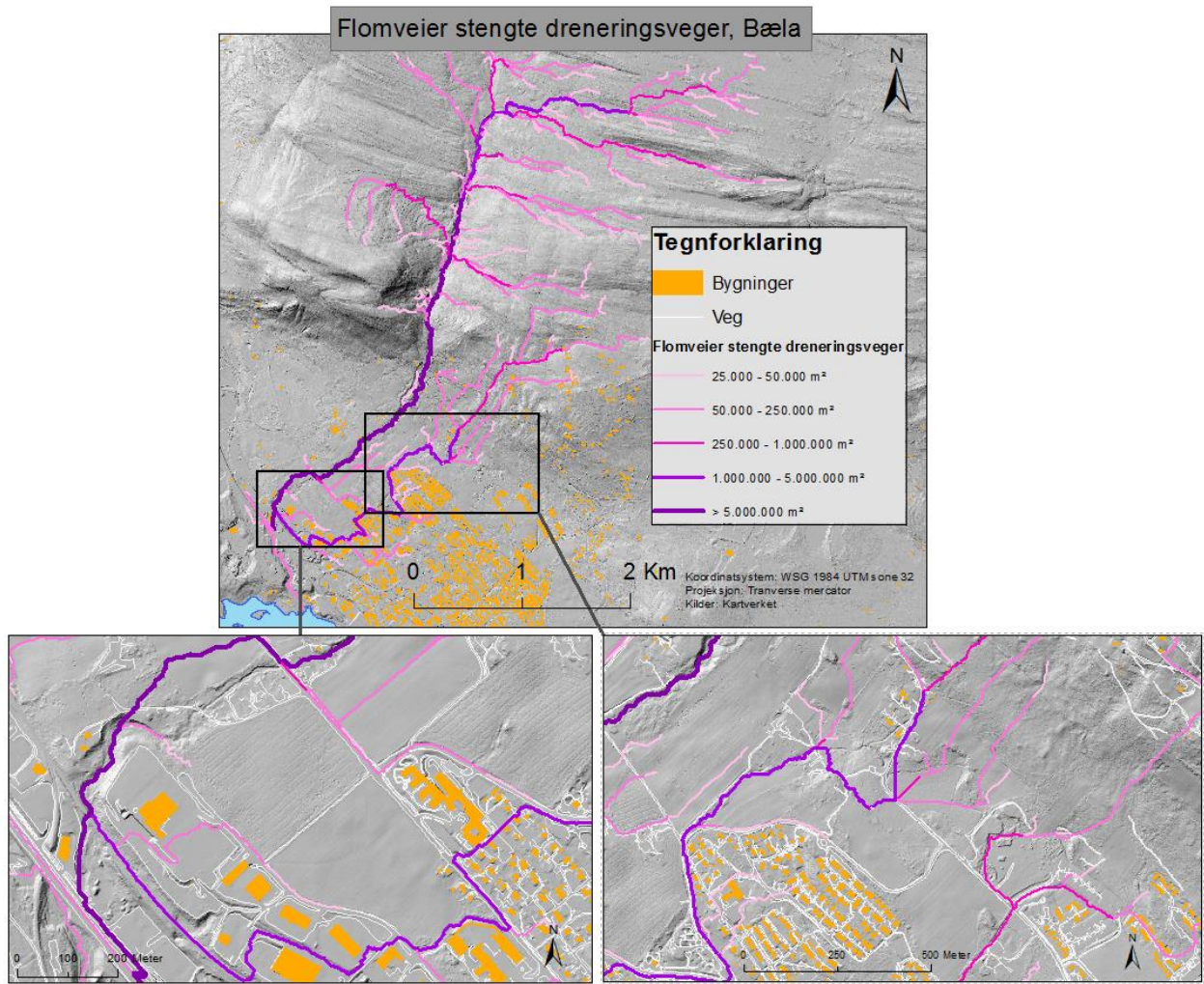
Figur 5.6: Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Åretta.



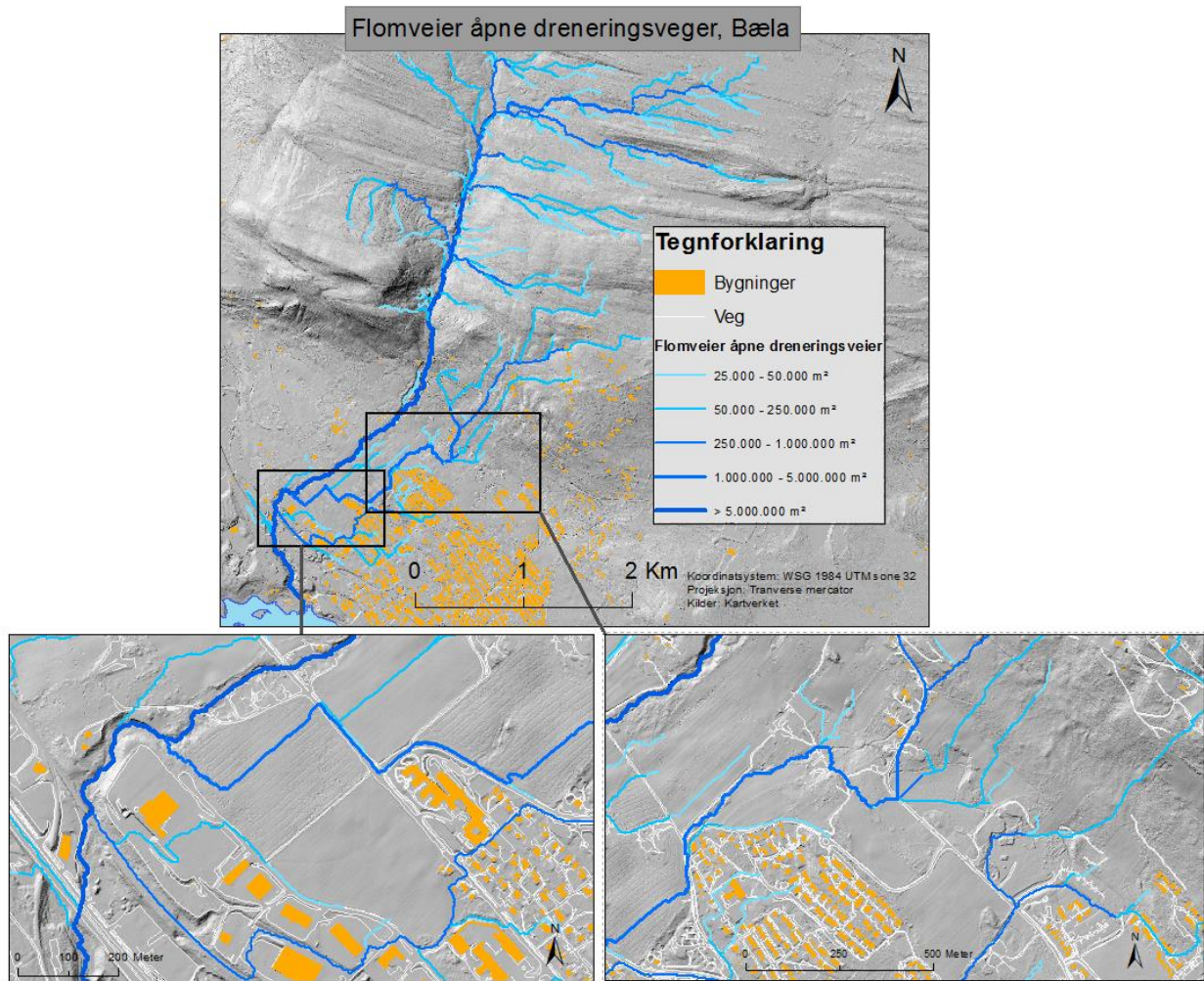


**Figur 5.7:** Kart med flomveier ved åpne dreneringsveger i Åretta.



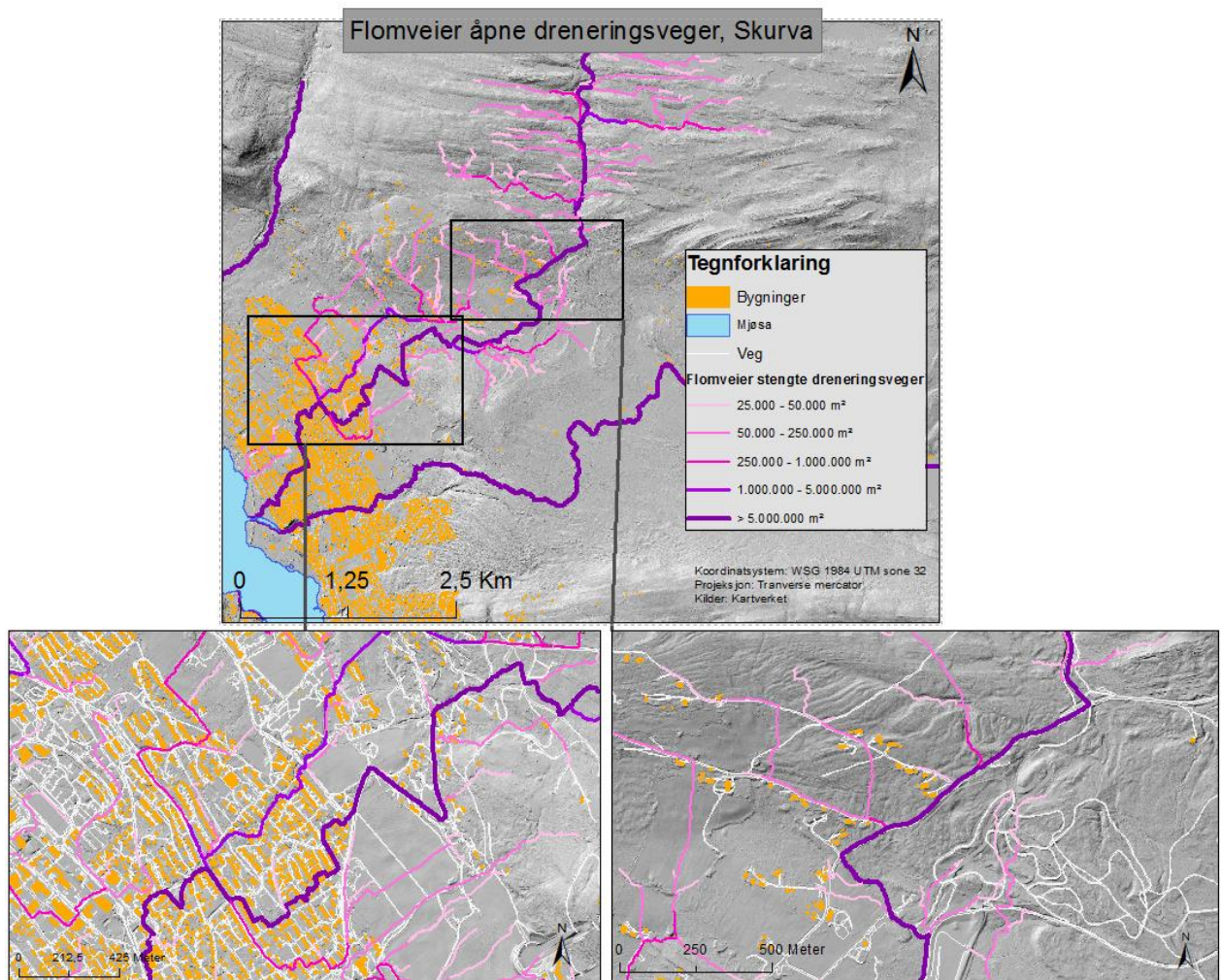


**Figur 5.8:** Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Bæla.

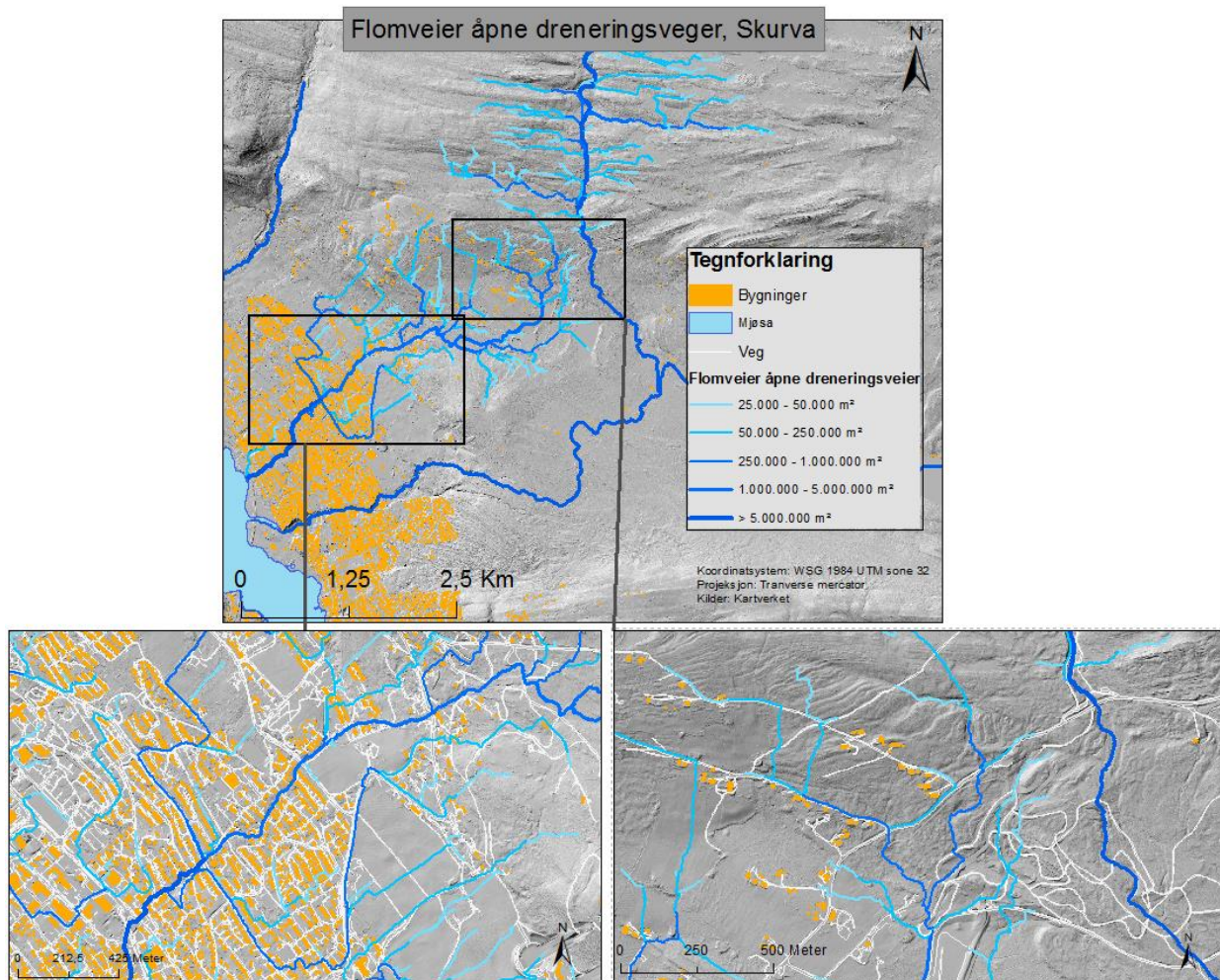


**Figur 5.9:** Kart med flomveier ved åpne dreneringsveger i Bæla.





**Figur 5.10:** Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Skurva.

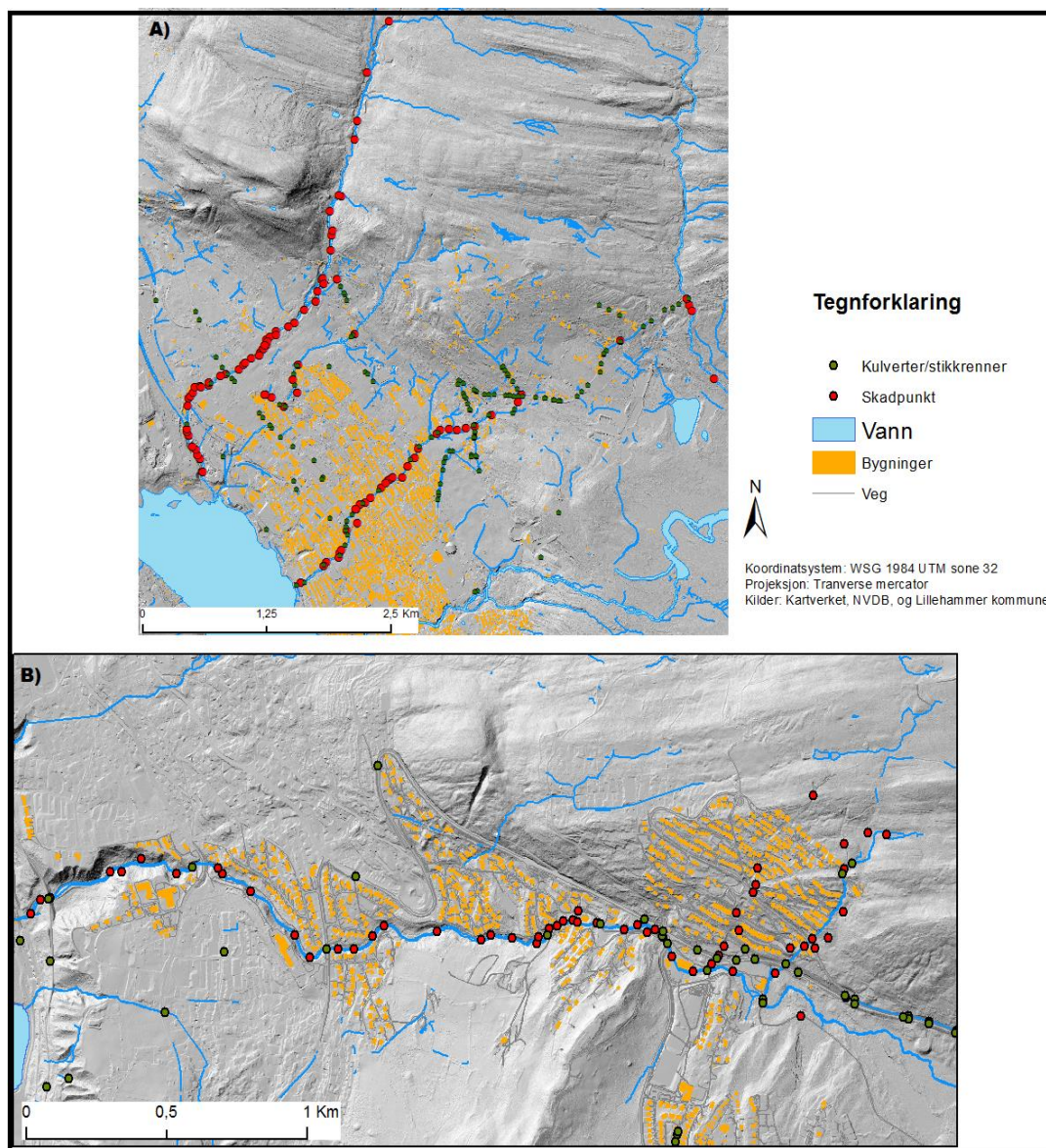


**Figur 5.11:** Kart med flomveier ved stengte dreneringsveger i Skurva.



### 5.3 Sammenligning av akkumulert areal i skadepunkt

For å kunne sammenligne akkumulert areal mellom stengte og åpne dreneringsveger, ble skadepolygoner fra Lillehammer kommune konvertert til punkter. Ut ifra figur 5.12 kan man se at den største andelen av skadepunktene er lokalisert etter hverandre. Dette representerer naturlige elve- og bekkeløp. Punkter lokalisert med distanse til naturlige elve- og bekkeløp eksisterer også, og kan observeres i kart B) blant bebyggelsen i høyereliggende områder. Felles for alle skadepunktene var at de ble lokalisert i lavbrekk, representert i akkumuleringsrasterene for begge scenariene.



**Figur 5.12:** Plasseringen til skadepunkter, kulverter og stikkrenner i studieområdene. A) viser Skurva og Bæla, mens B) viser Åretta.

Mange av skadepunktene er lokalisert langs naturlige vannveier i tilknytning til kulverter og stikkrenner. Det er viktig å understreke at skadepunktene representerer et større område enn kun punktet verdien akkumulert areal blir målt i. Verdien for akkumulert areal i skadepunktene, er kontrollert av forholdene oppstrøms punktet. Med andre ord er positiv tilbakekobling mekanismer involvert i sammenligningen av akkumulert areal, ved at en situasjon lengre opp i nedbørfeltet vil påvirke verdiene nedstrøms. Med en cellestørrelse på 1m, er det akkumulerte arealet til et gitt punkt den samme verdien som akkumuleringsrasteren har i det gitte punktet, oppgitt i kvadratmeter.

Hensikten med å sammenligne akkumulert areal i skadepunktene, er undersøke om vann på avveie var årsaken til skadene påført under flommen i 2014. Skadepunktene ble derfor klassifisert i fire klasser, ut i fra den prosentvise endringen i akkumulert areal som følge av stengte dreneringsveger. For det første er skadepunkter med svært liten, eller ingen endring i akkumulert areal klassifisert som naturlig flomvei, og årsaken til skader påført i disse punktene er mest sannsynlig relatert til naturlige vannveier. For det andre, er skadepunkter med en økning på 50% eller mer i akkumulert areal klassifisert som vann på avveie. Årsaken til skader påført i disse punktene kan være blokkerte dreneringsveger som har ledet vannet på avveie. Det vil si nye vannveier. For det tredje, er skadepunkter som er utenfor studiens rekkevidde på grunn av begrensinger og forutsetninger i modelleringen, klassifisert for seg. Punkter som ikke tilhører de ovennevnte klassene er klassifisert som *andre*.

Verdier for akkumulert areal for stengte og åpne dreneringsveger, beregnet endring i akkumulert areal ved stengte dreneringsveger og klassifiseringen av skadepunkter er presentert i tabell 5.1 for Skurva, tabell 5.2 for Bæla og tabell 5.3 for Åretta. De beregnede endringene i akkumulert areal representerer ikke absolutte verdier og må tolkes som relative verdier som blir påvirket av ulike drenerings situasjoner oppstrøms (Viréhn 2014).

Skadepunkt	Skadetype	Akkumulert areal, åpne dreneringsveier (m <sup>2</sup> )	Akkumulert areal stengte dreneringsveger (m <sup>2</sup> )	Endring (%)	Klassifikasjon
1	Vannveg, erosjon, massetransport	4151080	7208	-99,82	3
2	Vannveg	338701	337372	-0,39	1
3	Masseavlagring	294099	7436	-97,47	3
4	Vannveg	252662	705063	179,05	2
5	Erosjon, massetransport	3573002	13174402	268,72	2
6	Vannveg	204	13255663	6497774	2
7	Masseavlagring	6869645	72413	-98,95	3
8	Erosjon	6800470	10	-99,99	3
9	Erosjon	6780964	17185516	153,44	2
10	Erosjon, massetransport	6779703	17184284	153,47	2
11	Erosjon	6160049	20264	-99,67	3
12	Erosjon	6141477	1692	-99,97	3
13	Erosjon	5167533	15573574	201,37	2
14	Erosjon	5163390	15569431	201,53	2
15	Erosjon	5162529	15568570	201,57	2
16	Erosjon	5157262	15563303	201,77	2
17	Erosjon	5148190	15554231	202,13	2
18	Erosjon	5126983	15533024	202,96	2
19	Erosjon, vannveg	5082601	15488642	204,73	2
20	Masseavlagring	4194091	69165	-98,35	3
21	Erosjon, massetransport	4183911	58986	-98,59	3
22	Erosjon	4148426	4554	-99,89	3
23	Oppstuvning	6825620	28388	-99,58	3
24	Erosjon	6824325	27093	-99,60	3
25	Erosjon	5086454	15492495	204,58	2
26	Erosjon	6852745	55513	-99,18	3
27	Erosjon	6881140	83908	-98,78	3
28	Vannveg	7072	17206312	243201	2
29	Erosjon	17185528	6780981	-60,54	1
30	Massetransport	5165140	15571181	201,46	2
31	Massetransport	6909541	112309	-98,37	3
32	Massetransport	10411210	6221	-99,94	3
33	Massetransport	12592826	2187837	-82,62	3
34	Vannveg	382	382	0	1
35	Vannveg	36	10405025	28902747	2
36	Vannveg	2935	2935	0	1

Tabell 5.1: Endring i akkumulert areal og klassifikasjon av skadepunkt i Skurva.



Skadepunkt	Skadetype	Akkumulert areal åpne dreneringsveger	Akkumulert areal stengte dreneringsveger	Endring (%)	Klassifikasjon
1	Vannveg	6722	6722	0	1
2	Vannveg	246093	2161226	778	2
3	Vannveg	18175	1933308	10537	2
4	Vannveg, erosjon	1908236	1908352	0	1
5	Vannveg	1973454	58443	-97	3
6	Vannveg	1998108	83097	-96	3
7	Vannveg, erosjon	1915455	416	-100	3
8	Erosjon	1378	1378	0	1
9	Massetransport, erosjon	7863620	7863620	0	1
10	Erosjon	7850438	7850438	0	1
11	Vannveg				4
12	Utrasing				4
13	Massetransport	7865072	7865072	0	1
14	Vannveg	11566234	182322	-98	3
15	Erosjon	11541586	157674	-99	3
16	Masseavlagring, erosjon	11514154	130242	-99	3
17	Masseavlagring	11506405	122493	-99	3
18	Erosjon, utrasing	11500152	116240	-99	3
19	Masseavlagring	11476703	92791	-99	3
20	Erosjon	11472998	89086	-99	3
21	Masseavlagring	11471940	88028	-99	3
22	Masseavlagring	10401678	8519106	-18	1
23	Erosjon, massetransport	7583822	7583822	0	1
24	Massetransport, erosjon	10398040	8515468	-18	1
25	Vannveg	288051	288051	0	1
26	Masseavlagring	10387869	8505297	-18	1
27	Oppstuvning, masseavlagring, erosjon	7846088	7846088	0	1
28	Massetransport	10383928	8501356	-18	1
29	Vannveg, erosjon, massetransport	7673036	7673036	0	1
30	Erosjon	10366337	8483765	-18	1
31	Erosjon, massetransport, oppstuvning	11290895	11323456	0	1
32	Masseavlagring	10366128	8483556	-18	1
33	Masseavlagring	7985655	17868	-100	3
34	Erosjon	7964260	169	-100	3
35	Erosjon	7945074	7945074	0	1
36	Massetransport	7941801	7941801	0	1
37	Masseavlagring	7941393	7941393	0	1
38	Massetransport, masseavlagring, erosjon	7969864	5773	-100	3
39	Erosjon	7934697	7934697	0	1
40	Utrasing, innsnevring	7871686	7871686	0	1
41	Masseavlagring, massetransport	7868900	7868900	0	1
42	Masseavlagring	7921487	7921487	0	1
43	Utrasing				4
44	Erosjon	7868100	7868100	0	1
45	Vannveg	93819	8424272	8879	2
46	Erosjon	7834149	7834149	0	1
47	Massetransport, erosjon	7839077	7839077	0	1
48	Erosjon	7759600	7759600	0	1
49	Erosjon	7721154	7721154	0	1
50	Masseavlagring	7720849	7720849	0	1
51	Erosjon	7731013	7731013	0	1
52	Massetransport	7819562	7819562	0	1
53	Erosjon, massetransport, masseavlagring	7748454	7748454	0	1
54	Masseavlagring	5502021	5502021	0	1
55	Erosjon	46784	46784	0	1
56	Erosjon, massetransport	43818536	43818536	0	1
57	Erosjon, massetransport	7383165	7383165	0	1
58	Erosjon, massetransport	7563712	7563712	0	1
59	Erosjon, massetransport	5322775	5322775	0	1
60	Vannveg, erosjon	112404	112404	0	1
61	Massetransport	7158160	7158160	0	1

Tabell 5.2: Endring i akkumulert areal og klassifikasjon av skadepunkt i Bæla.

Skadepunkt	Skadetype	Akkumulert areal åpne dreneringsveger	Akkumulert areal stengte dreneringsveger	Endring (%)	Klassifikasjon
1	Erosjon, massetransport	1204618	1204618	0	1
2	Erosjon, massetransport	1179789	1179789	0	1
3	Erosjon	12744	12744	0	1
4	Vannveg	984294	984295	0	1
5	Masseavlagring	1602727	3018	-100	3
6	Vannveg	123191	1462826	1087	2
7	Vannveg				4
8	Oppstuvning, vannveg	13125682	9294350	-29	1
9	Oppstuvning, erosjon	13064234	9286043	-29	1
10	Oppstuvning, erosjon	13053045	9276157	-29	1
11	Vannveg, erosjon	52844	1296	-98	3
12	Erosjon	14966537	651	-100	3
13	Vannveg	245379	3762193	1433	2
14	Vannveg	1654	4295	160	2
15	Vannveg	1159090	1159090	0	1
16	Erosjon	13903900	10068470	-28	1
17	Vannveg	1648	1648	0	1
18	Erosjon, utrasing	14726262	17728496	20	1
19	Erosjon, massetransport	14443313	14444770	0	1
20	Erosjon, massetransport	14290577	14288348	0	1
21	Vannveg, erosjon	14216672	14214443	0	1
22	Erosjon, massetransport	14208192	14205963	0	1
23	Erosjon, massetransport,	14182682	14180453	0	1
24	Erosjon, massetransport	14151314	14149085	0	1
25	Erosjon, massetransport, oppstuvning	14128823	14126594	0	1
26	Vannveg, erosjon	8828	8828	0	1
27	Erosjon	14127656	14125427	0	1
28	Utrasing	14109805	14107576	0	1
29	Erosjon	14109491	14107262	0	1
30	Oppstuvning, erosjon	14046946	14044717	0	1
31	Vannveg	14038486	14036257	0	1
32	Vannveg				4
33	Erosjon, utrasing, massetransport	14795171	14797405	0	1
34	Massetransport, oppstuvning	14796505	14798739	0	1
35	Erosjon, massetransport	14754842	14757076	0	1
36	Erosjon, massetransport, utrasing	14732373	14734607	0	1
37	Erosjon	14323197	14320968	0	1
38	Oppstuvning	13343080	11	-100	3
39	Vannveg	4994	4994	0	1
40	Utrasing, erosjon				4
41	Utrasing				4
42	Masseavlagring	15002408	36522	-100	3
43	Erosjon	14999930	34044	-100	3
44	Erosjon	14987871	21985	-100	3
45	Massetransport	14867151	14869385	0	1
46	Erosjon, massetransport	14824601	14826835	0	1
47	Vannveg	16898	16898	0	1
48	Vannveg	98671	98671	0	1
49	Oppstuvning, masseavlagring	14965753	58	-100	3
50	Vannveg	2423	2423	0	1
51	Vannveg	48848	3824889	7730	2
52	Vannveg				4
53	Vannveg	41343	43943	6	1
54	Vannveg	13190	13190	0	1
55	Vannveg	3160	3160	0	1
56	Vannveg	97783	97783	0	1
57	Vannveg	13954	13954	0	1
58	Vannveg	37270	37270	0	1
59	Vannveg	102525	102525	0	1
60	Vannveg	120376	120376	0	1
61	Vannveg	14449068	14451634	0	1
62		14437460	14438917	0	1
63		1648	1648	0	1

Tabell 5.3: Endring i akkumulert areal og klassifikasjon av skadepunkt i Åretta.

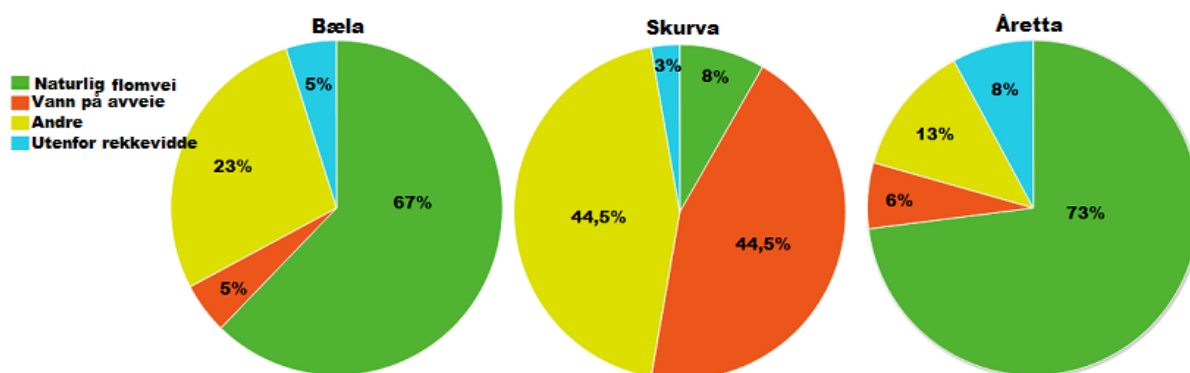
### 5. 3. 1 Klassifisering av skadepunkter

Figur 5.14 oppsummerer klassifiseringen på bakgrunn av endringen i akkumulert areal i skadepunktene for hver av de tre studieområdene. Ut i fra klassifiseringen er det kun i studieområdet Skurva funnene indikerer at vann på avveie har påført skader i store deler av punktene. I Skurva er 44,5 % av skadepunktene klassifisert som en konsekvens av vann på avveie. I tillegg har 44,5 % av skadepunktene i Skurva mye større akkumulert areal ved åpne dreneringsveger enn stengte dreneringsveger og er klassifisert som *andre*. I figur 5.12 kommer det frem at majoriteten av skadepunktene i Skurva er lokalisert langs naturlige flomveier, til tross for at klassifiseringen kun tilsier at det gjelder 8 % av skadepunktene.



**Figur 5.13:** Skadepunkter langs nedre del av Årettaelva klassifisert som andre som følge av at blokkerte dreneringsveger oppstrøms leder vannet bort fra den naturlige vannveien.

Dette skyldes at klassifiseringen kun tar høyde for endringer i akkumulert areal, for å kunne avdekke vann på avveie og blir kontrollert av forholdene oppstrøms for selve punktet. Som figur 5.13 illustrerer, kan derfor punkter som er lokalisert langs naturlige flomveier bli klassifisert som *andre*. Dette er en konsekvens av at stengte dreneringsveger oppstrøms vil føre til mye lavere akkumulert areal i skadepunktene ved stengte dreneringsveger, enn ved åpne dreneringsveger. Med andre ord forsøker ikke klassifikasjonen å lokalisere skadepunktene, men å avsløre årsaken til skaden i punktet.



Figur 5.14: Oppsummering klassifisering av skadepunkter i Bæla, Skurva og Åretta.

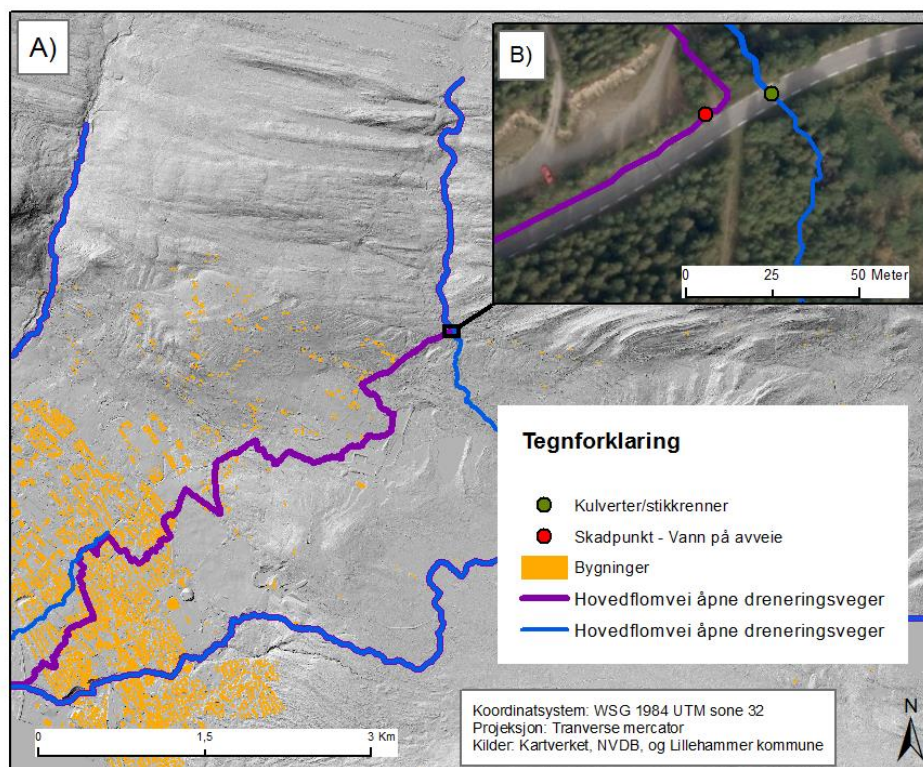
Studieområdene Åretta og Bæla viser tilnærmet likt resultat ifølge klassifiseringen. Henholdsvis 67% (Bæla) og 73% (Åretta) av skadepunktene er klassifisert som naturlige flomveier, og 5% (Bæla) og 6% (Åretta) av skadepunktene er klassifisert som vann på avveie. En annen likhet mellom disse studieområdene er at Åretta har 63 registrerte skadepunkter, mens Bæla har 61 registrerte skadepunkter. I tillegg til å ha klart størst andel av skadepunkter klassifisert som vann på avveie, er det i Skurva færrest registrerte skadepunkter med 36.

Til tross for dette er forutsetningene i disse studieområdene ganske forskjellige. For det første, som figur 5.4 og 5.5 illustrerer er antallet stikkrenner og kulverter mye større i Åretta enn i Bæla. For det andre er det mer bebyggelse og urbane omgivelser i studieområdet Åretta enn i Bæla. I studieområdet Skurva er forutsetningene i forhold til antall kulverter og stikkrenner, bebyggelse og urbane omgivelser ganske like de som er beskrevet for studieområdet Åretta. Skadepotensialet ved å blokkere en enkelt kulvert og stikkrenne, blir hovedsakelig bestemt av hvor mye vann som normalt drenerer gjennom de. Ved å blokkere enkelte kulverter og stikkrenner, vil konsekvensene kunne være store endringer i nedslagsfeltet og utvidelse av nedbørfeltet med påfølgende stort skadepotensiale. Ved å blokkere andre kulverter vil konsekvensene kunne være minimale.

Forutsetningene mellom- og innad i studieområdene er varierende, og lokale variasjoner og forhold er avgjørende for resultatene. For å illustrere problemområder og ulike situasjoner som beskriver resultatet fra klassifiseringen, vil utvalgte figurer fra hvert enkelt studieområde bli presentert med flyfoto og vektoriserte flomveier.

### 5. 3. 2 Skurva

Funnene i denne studien indikerer at vann på avveie var en av de største årsakene til skadene under flommen i 2014, i nedbørfeltet Skurva. Ut i fra funnene har det blitt identifisert flere kritiske kulverter og stikkrenner, som ved stengte dreneringsveger leder vannet på avveie og øker det akkumulerte arealet i skadepunkter. Den viktigste årsaken til at vann på avveie kan ha hatt så store konsekvenser i Skurva, i forhold til i Bæla og Åretta skyldes hovedsakelig situasjonen illustrert i figur 5.15. Normalt leder en kulvert vannet under Nordsetervegen, og vannet drenerer nedover mot nedbørfeltet Mesna. B) i figur 5.15 viser hvordan vannet vil følge Nordsetervegen nedover mot sentrum dersom denne kulverten blir blokkert og dermed utvider nedbørfeltet til Skurva seg, som vist i figur 5.16.

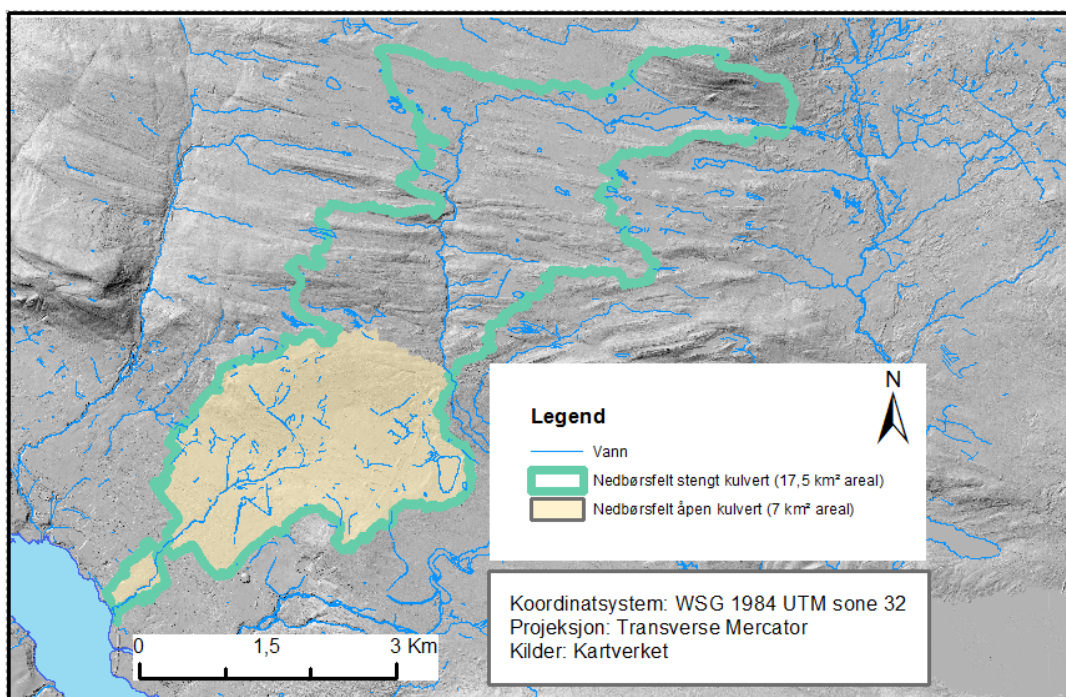


**Figur 5.15:** Kart med hovedflomveier ( $> 5\,000\,000\text{ m}^2$  akkumulert areal). Utsnittet B) viser hvordan dreneringen endrer som ved å blokkere kulverten (grønt punkt) i tilknytning til Nordsetervegen.

Arealet til nedbørfeltet vil øke fra  $7\text{ km}^2$  til  $17,5\text{ km}^2$ , og økningen vil forplante seg nedstrøms i nedbørfeltet og bidra til høyere akkumulert areal langs flomveien for stengte dreneringsveger. Dette fører til at en stor del av skadepunktene nedstrøms den blokkerte kulverten har et høyere akkumulert areal ved stengte dreneringsveger enn ved åpne dreneringsveger, og øker mengden vann inn i nedbørfeltet som igjen fører til økt

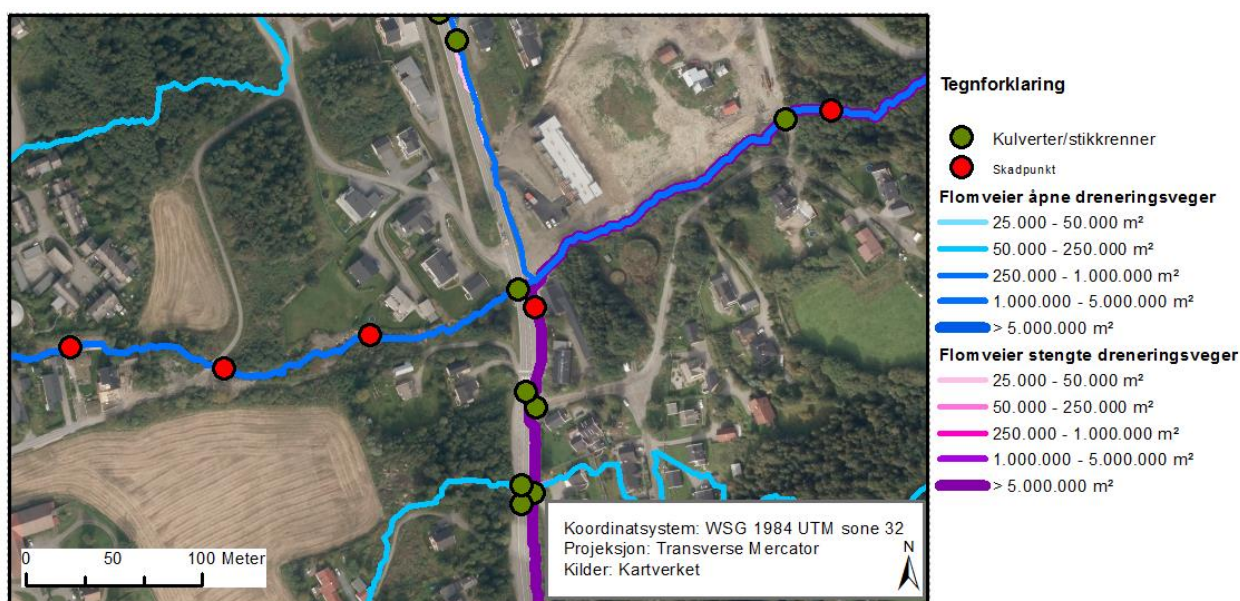


skadepotensiale. Denne kulverten er derfor ut i fra beregningen svært kritisk å holde åpen. Situasjonen illustrert med beregnede flomveier i figur 5.15 B), har klare likehetstrekk med den faktiske situasjonen under flommen i 2014. Under flommen i 2014 var dette startpunktet for flomhendelsen i Skurva. Kulverten ble blokkert som følge av oppstiving, og vannet drenerte langs Nordsetervegen nedover mot sentrum (Aall et al. 2015).



**Figur 5.16:** Som en konsekvens av en blokkert kulvert endrer arealet til nedbørfeltet Skurva seg. Arealet med åpen kulvert (gul) er 7km<sup>2</sup>, mens med blokkert kulvert er arealet til nedbørfeltet (grønn ramme) 17,5 km<sup>2</sup>.

Den store endringen i akkumulert areal er derimot ikke synlig i alle skadepunkter, da blokkeringen av enkelte kulverter og stikkrenner nedstrøms situasjonen i figur 5.15 B) skaper andre situasjoner. Figur 5.17 viser en annen kritisk kulvert, som fører til økt akkumulert areal i skadepunktet ved Nordsetervegen, ved at vannet blir tvunget bort fra den naturlige vannveien og finner en ny vannvei langs Nordsetervegen. I tillegg viser figuren en annen situasjon som har påvirket resultatene, hvor den blokkerte kulverten leder vannet bort fra skadepunkter nedstrøms den naturlige vannveien. Dette er illustrert i figur 5.17 og figur 5.18 B). Fra flommen i 2014 er det registrert skadeområder langs flomveien med både åpne og stengte dreneringsveger, noe som tilsier at det tok tid før kulverten ble blokkert eller at den kun ble delvis blokkert.

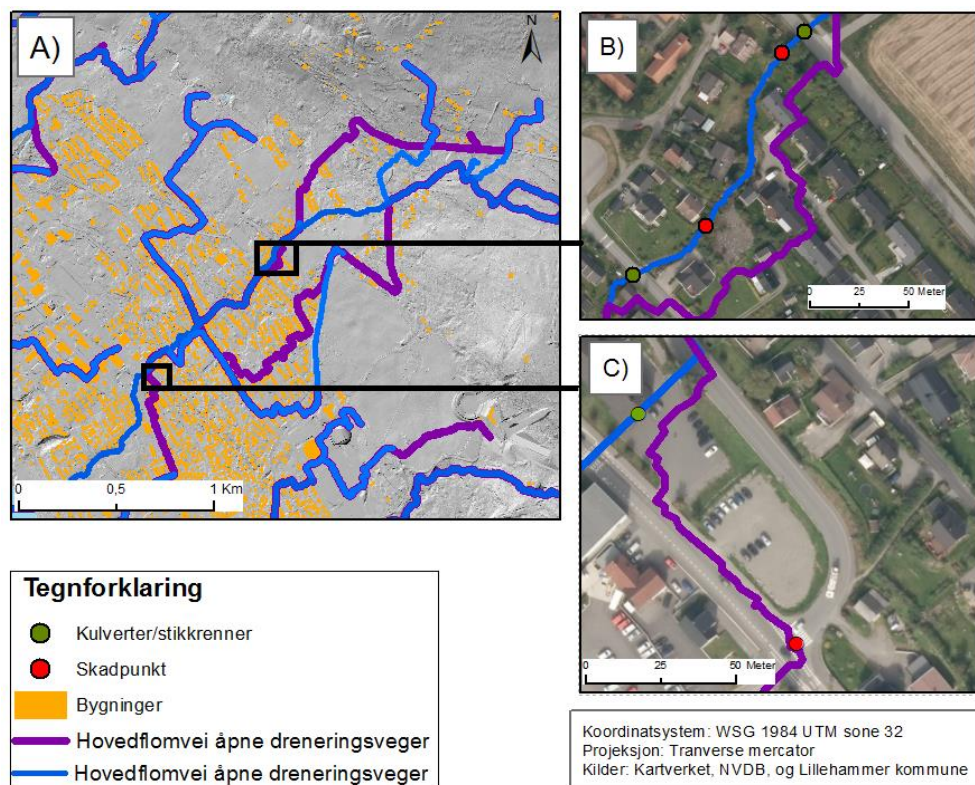


**Figur 5.17:** Kart som viser et lite område av Skurva nedbørfelt, i tilknytning til Ersgaard. En blokkert kulvert tvinger vannet til drenerer langs en veggøft knyttet til Nordsetervegen. Legg merke til flere skadepunkter nedstrøms for kulverten, langs flomveiene med åpne dreneringsveger.

Beregningen for flomveier med stengte dreneringsveger tar utgangspunkt i at alle kulverter og stikkrenner (som er inkludert i modellen) er helt blokkert samtidig. Dette fører til at det akkumulerte arealet i de tre skadepunktene til venstre i figuren over, har mye lavere akkumulert areal ved stengte dreneringsveger enn ved åpne dreneringsveger, og blir klassifisert som *andre*. De beregnede flomveiene med stengte dreneringsveger viser flere slike situasjoner, og forklarer hvorfor 44,5 % av skadepunktene er klassifisert som *andre*.

Figur 5.18 viser to ulike situasjoner i nedre del av Skurva nedbørfelt. I B) fører en blokkert kulvert til at flomveien drenerer gjennom et bebyggt område, til tross for at det ikke er registrert noen skadepunkter der. Dette indikerer at kulverten øverst i figur B) enten ikke var blokkert under flommen i 2014, eller at vannet ble ledet i en annen retning. Det er likevel verdt å merke seg denne situasjonen, da den modellerte flomveien går gjennom bebyggelse, og potensielt kan føre til store materielle skader. Situasjonen illustrert i figur 5.18 C) viser et annet eksempel der vann på avveie er vurdert som årsaken til skadene. Blokkeringen av kulverten ved bilvegen tvinger vannet på avveie, slik at vannet drenerer over parkeringsplassen og langs bilvegen.



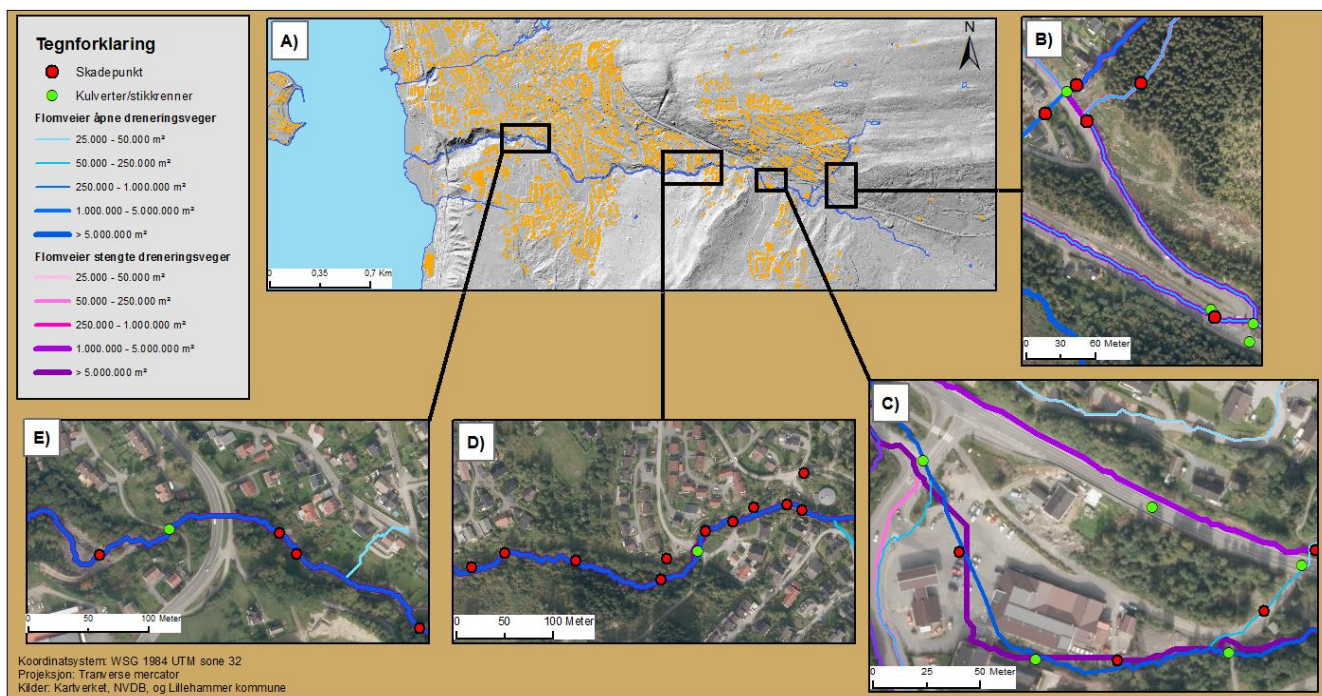


**Figur 5.18:** A) Kart over nedre del av Skurva med flomveier > 250 000 m<sup>2</sup> akkumulert areal. B) Blokkert kulvert fører til at vannet drenerer gjennom boligområde. C) Blokkert kulvert fører til at vannet drenerer over en parkeringsplass og langs bilvegen.

### 5.3.3 Åretta

I Åretta nedbørfelt er 73 % av skadepunktene klassifisert som naturlig flomvei, og kun 6 % som vann på avveie. Dette indikerer at den største årsaken til skadene i Åretta er knyttet til naturlige vannveier, og at vann på avveie er av mindre betydning. Den høye andelen av skadepunkter klassifisert som naturlig flomvei gjenspeiler seg i helhetsinntrykket i figur 5.19, som viser ulike drenerings situasjoner i utvalgte problemområder (B, C, D og E) fra Åretta nedbørfelt. Utsnitt B) viser et område i tilknytning til Askjellerudbekken, en sidebekk til Årettaelva som ifølge Aall et al. (2015) var startpunktet for flomhendelsen i Åretta nedbørfelt. Ved å blokkere den øverste kulverten i B) drenerer vannet nedover langs Blomsterbakken og ned mot Messenlivegen. De to skadepunktene langs denne flomveien er derfor klassifisert som et resultat av vann på avveie. I følge informasjonen som er tilknyttet punktene fra Lillehammer kommune, skyldes skadene ved begge punktene vannveger og samsvarer med beregningen og klassifiseringen av skadepunkter. Økningen i akkumulert areal i disse

punktene ved å blokkere kulverter og stikkrenner, er på over 1000 % og kulverten i Blomsterbakken kan derfor regnes som kritisk.



**Figur 5.19:** Utvalgte problemområder som illustrerer ulike drenerings situasjoner. A) Oversiktskart. B) Skadepunkter og flomveier i tilknytning til Askjellerudbekken, Blomsterbakken og Messenlivegen. C) Skadepunkter og flomveier ved Røyslimoen butikksenter. D) Skadepunkter og flomveier langs Årettaelva. E) Skadepunkter og flomveier langs nedre del av Årettaelva.

Utsnitt C) viser et problemområde i tilknytning til Røyslimoen butikksenter. Sør-øst i utsnittet kommer flomveiene inn og drenerer ned mot butikksenteret. Sør for butikksenteret er det en kulvert som leder vannet under parkeringsplassen, som skiller flomveiene for åpne og stengte dreneringsveier. Flomveien med åpne dreneringsveger følger kulverten og vises derfor som en tilnærmet rett linje over parkeringsplassen. Flomveien med stengte dreneringsveger derimot går mer “sikk-sakk” over parkeringsplassen, og på grunn av at parkeringsplassen er et relativt flatt område vil den beregnede dreneringen være noe tilfeldig. En annen utfordring med beregningen og klassifiseringen av skadepunkt her, er at flomveiene for begge scenariene går over cirka det samme området. I realiteten er det kun flomveien med stengte dreneringsveger som går over parkeringsplassen, mens flomveien med åpne dreneringsveger går under bakken. Beregningen tar ikke høyde for dette, og skadepunktet på parkeringsplassen får derfor ganske like verdier for akkumulert areal med åpne og stengte dreneringsveger.

Spesielt i utsnitt D) og E) er de fleste skadepunktene lokalisert i flomveier med høy akkumulering, med både åpne og stengte dreneringsveger. Disse skadepunktene er klassifisert som naturlig flomvei, og med tanke på at de er lokalisert langs løpet til Årettaelva underbygger dette modellen.

Skadepunkter som er utenfor studiens rekkevidde kan observeres i utsnitt D), hvor spesielt to skadepunkter er lokalisert et stykke unna de beregnede flomveiene. Felles for disse skadepunktene er at vannmassene under flommen i 2014 eroderte nye vannveger, som førte til skadene i punktene. Erosjon er som sagt et aspekt som ikke dekkes av analysen, og punktene har derfor et uvesentlig akkumulert areal.

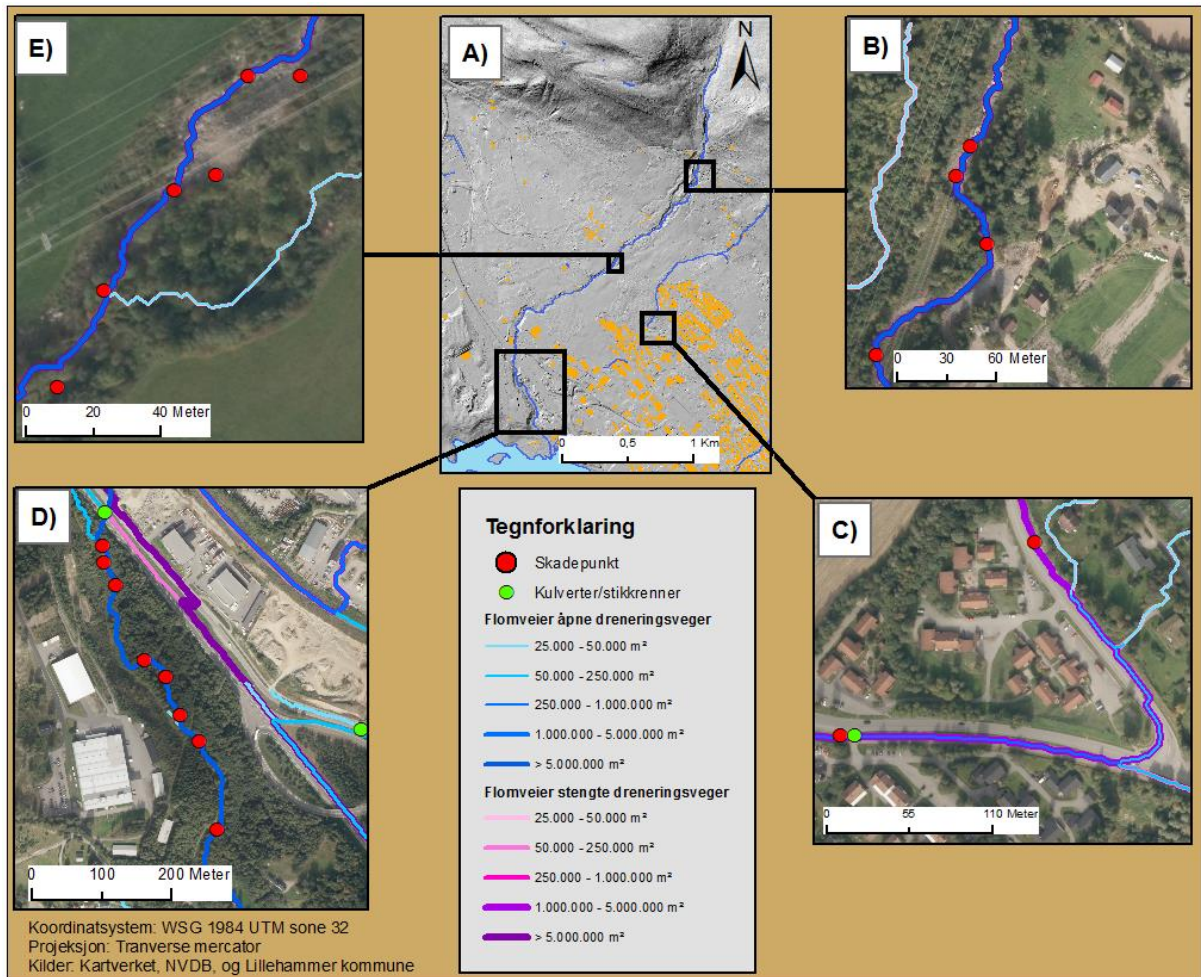
### **5. 3. 4 Bæla**

Klassifiseringen av skadepunktene i Bæla tilsier at 67 % av punktene har omtrent like stort akkumulert areal med stengte og åpne dreneringsveger (naturlige flomveier), og 23 % av punktene har mye større akkumulert areal med åpne dreneringsveger (andre). Kun 5 % av punktene har 50 % eller mer akkumulert areal ved blokkerte kulverter og stikkrenner (vann på avveie). Bæla er studieområdet med klart færrest registrerte kulverter og stikkrenner, og man kan derfor forvente seg mindre utslag av vann på avveie. Ut i fra klassifiseringen er den største årsaken til skadene i Bæla knyttet til naturlige flomveier, og ikke vann på avveie.

Figur 5.20 viser ulike problemområder fra Bæla nedbørfelt, og illustrerer utvalgte problemområder med ulike drenerings situasjoner (B, C, D og E). Utsnitt B) viser skadepunkter lokalisert langs en flomvei, med omtrent lik akkumulering etter at kulvert og stikkrenner er blokkert. B) er fra den øvre delen av nedbørfeltet, og her er det svært få registrerte kulverter og stikkrenner. Dette fører til at akkumuleringen med åpne og stengte dreneringsveger er omtrent like stor og følger det naturlige bekkeløpet.

En av de få identifiserte situasjonene hvor skadepunkter har høyere akkumulert areal med stengte dreneringsveger er illustrert i utsnitt C). Her tvinger en blokkert kulvert oppstrøms vannet til å drenere langs bilveien, og fører til en betydelig endring i akkumulert areal. Skadene fra flommen i 2014 ved begge skadepunktene i C) er av Lillehammer kommune klassifisert som vannveg.





**Figur 5.20:** Utvalgte problemområder med ulike drenerings situasjoner i Bæla nedbørfelt. A) Oversiktskart. B) Skadepunkter og flomveier i øvre del. C) Skadepunkter hvor vann på avveie knyttes til skadene. D) Skadepunkter klassifisert som "andre", nær utløpspunktet. E) Skadepunkteene til høyre for de beregnede flomveiene er utenfor studiens rekkevidde.

I den nedre delen av Bæla er det en del industri og infrastruktur med tilknyttede kulverter. Som utsnitt D) viser, fører blokkeringen av disse kulvertene til at vannet drenerer for eksempel langs E6, ut av nedbørfeltet. Dette fører til at det akkumulerte arealet for skadepunktene nedstrøms kulverten ved E6, har svært lavt akkumulert areal med stengte dreneringsveger og punktene er derfor klassifisert som "andre". I utsnitt E) er tre av skadepunktene lokalisert øst for de beregnede flomveiene som ligger i lavbrekket til bekkeløpet, og er utenfor studiens rekkevidde.



## Kapittel 6 - Diskusjon

Denne studien har beregnet flomveier i tre ulike nedbørfelt ut i fra to ulike scenarier: åpne og stengte dreneringsveger. Beregningene er gjennomført med utgangspunkt i to hydrologisk korrekte høydemodeller utledet fra LiDAR-data, som har blitt tilpasset hver sin dreneringsscenario. De beregnede flomveiene for hvert scenario har blitt visualisert for de ulike studieområdene. I tillegg har beregningen av flomveier og akkumulert areal blitt brukt for å undersøke om vann på avveie var den største årsaken til skadene i utvalgte skadepunkt, fra flommen sjuende-åttende juli 2014.

I denne studien blir en selektiv representasjon av virkeligheten analysert. Elementer som er vurdert som uviktige er utelatt, og representasjonen er en forenkling av virkeligheten beheftet med usikkerheter (Rød 2015). Mulige feilkilder og usikkerhet er knyttet til alle ledd i studien. Det gjelder alt fra datainnsamling, databearbeiding, modellering til presentasjon og tolkning av resultater. Kvaliteten på resultatene i denne studien må diskuteres i lys av flere faktorer. For det første, er kvaliteten på inngangsdataene brukt i analysen av betydning. For det andre bør faktorer knyttet til metoden diskuteres, dette gjelder også vurderinger og valg gjort underveis i databearbeidingen og analysen. I følge Longley et al. (2011) vil forskerens subjektive vurderinger alltid være av betydning i GIS representasjoner. Det er derfor viktig å reflektere over egne vurderinger, og gjøre disse synlige, slik at leseren selv kan vurdere de subjektive valgene som er gjort.

### 6. 1 Evaluering av metode

#### 6. 1. 1 Evaluering av høydemodeller avledet av LiDAR-data

Det naturlige valget for å representere terrengoverflater i denne studien, var en raster-representasjon (DEM). En DEM har generelt mange flere fordeler sammenlignet med en TIN i lys av studiens hensikt. Hovedsakelig fordi flere av verktøyene benyttet i studien, som for eksempel *flow direction* og *flow accumulation*, kun aksepterer inngangsdata i rasterformat.

På bakgrunn av at det definerte nedbørfeltet Åretta sin utstrekning gikk utenfor LiDAR-dataene som dekker Lillehammer kommune, ble det nødvendig å supplere med LiDAR-data fra Ringsaker kommune. Kvaliteten på LiDAR-dataene som dekker Lillehammer kommune er meget god, med en punktavstand fra 0,3 m til 0,9 m. LiDAR-dataene som ble benyttet for

Ringsaker kommune er av noe lavere kvalitet, med punktavstand fra 1 m til 2,2 m. Til tross for dette, er antallet punkter fra dataene som dekker Ringsaker kommune så lavt at de har begrenset påvirkning på kvaliteten til LiDAR-dataene benyttet i denne studien. Den gjennomsnittlige punktavstanden er på 0,51 m, som gir en høy punkttetthet på 3,85 punkt per m<sup>2</sup>. Kvaliteten til LiDAR-dataene ble vurdert som god, men noe ujevn på grunn av varierende punkttetthet. Dette skyldes støy, og manglende data i områder som representerer bygninger, biler etc. Deler av studieområdene er lokalisert i urbane omgivelser, med mye infrastruktur og bebyggelse. Det ble derfor vurdert som hensiktsmessig å supplere med data på vektorformat, for å redusere eventuelle feilkilder i høydemodellene knyttet til LiDAR-dataene, og for å sørge for at de beregnede flomveiene følger faktiske lavbrekk i terrenget (Meiforth 2013). Særlig overflatebegrensingene av typen knekklinjer blir vurdert som svært nyttige i prosessen med å skape høydemodellene. Dette gjelder blant annet fortauskanter, veggrøfter og veikanter som kan være for små til at LiDAR-dataene alene klarer å representere de i høydemodellen. For å kunne inkludere knekklinjene i interpoleringen i *LAS Dataset To Raster*, var trianguleringstilnærmingen eneste tilgjengelige alternativ. Naturlig nabo ble valgt fremfor lineær interpolasjon da naturlig nabo egner seg godt til store datasett (Childs 2004) og i morfologiske analyser (Pirotti & Tarolli 2010). Lineær interpolasjon er en effektiv interpolasjonsmetode, men den har også svakheter da den er vurdert som unøyaktig i tillegg til at den egner seg best for datasett med uniformt plasserte kjente punkter (Dempsey 2013).

Valget av oppløsning på 1 m rettferdiggjøres av flere faktorer. Både punkttettheten og punktavstanden til LiDAR-dataene, studiens formål og teoretiske formler for beregning av celledørrelse underbygger valget. Til tross for at formelen til McCullagh (1988) anbefalte en oppløsning på 0,48 m og formelen til ESRI (2013) anbefalte en oppløsning  $\approx 2$  m blir oppløsningen på 1 m vurdert som hensiktsmessig. En oppløsning på 1 m representerer egenskaper i terrenget ned til ønsket detaljnivå i denne studien. En finere oppløsning som 0,5 m ville kunne øke detaljeringsgraden i høydemodellen, slik at for eksempel fortauskanter blir representert uten bruk av knekklinjer. Det er uklart hvor stor effekt en finere oppløsning ville hatt på modelleringen av flomveier, men den er ikke antatt å være av særlig betydning. Det viktigste argumentet mot en finere oppløsning er økt prosesseringstid. På grunn av begrenset kapasitet på den tilgjengelige maskinvaren, ville en oppløsning på 0,5 m ført til svært tidkrevende prosessering, og gjort det vanskelig å gjennomføre analysen.



## 6. 1. 2 Evaluering av modellering av flomveier

### 6. 1. 2. 1 Modifisering av DEM

I denne studien ble det generert to ulike høydemodeller tilpasset hvert sitt drenerings-scenario. Felles for begge er at bygninger er hevet for å tvinge vannet til å drenerer rundt, og bruer er senket for tillate vannet å drenerer under i høydemodellen. Ved å sammenligne eksisterende bekke- og elveløp med flomveier med åpne dreneringsveger, vurderes kvaliteten på beregningene med åpne dreneringsveger som god. Ved å studere de beregnede flomveiene opp mot bygningsdatasett, kommer det også tydelig frem at den ønskede effekten av å heve bygninger er tilstede, da vannet drenerer rundt bygninger. Usikkerheten i høydemodellen før den er ytterligere modifisert, er i hovedsak tilknyttet kvaliteten på LiDAR-dataene, oppløsningen og interpoleringen og blir som diskutert tidligere ansett som lav. Prosessen med å senke bruer var utfordrende. Ved å senke alle bruer i høydemodellen vil det kunne lede vannet til å ta urealistiske veier. Dette gjelder der vannet i realiteten ville drenert langs en vei over brua istedenfor under. En visuell kontroll i programvaren av bruene ble derfor utført, for å redusere feilkilder knyttet til dette, etter anbefaling fra Meiforth (2013).

De største utfordringene og kildene til usikkerhet i denne studien er knyttet til stikkrenner og kulverter. Oppgavens hensikt er å beregne flomveier og sammenligne akkumulert areal i skadepunkter med både åpne og stengte dreneringsveger for å avdekke vann på avveie. Derfor vil usikkerheten knyttet til stikkrenner og kulverter gjelde både beregningen av flomveier, og sammenligningen av akkumulert areal. En feil i modellen knyttet til en stikkrenne eller kulvert vil kunne påvirke beregningen av akkumulert areal og flomveier, og vil derfor også kunne påvirke sammenligningen av akkumulert areal i skadepunktene. For eksempel vil en kulvert som ikke er tatt med i beregningen føre til at åpne og stengte dreneringsveger modelleres med samme utgangspunkt i dette området. Ved å inkludere kulverten i beregningen, vil derimot modelleringen og resultatene variere mellom de to scenariene. Oppgaven vil nå diskutere utfordringer rundt prosessen med å inkludere stikkrenner og kulverter i modelleringen av flomveier.

Det tilgjengelige datagrunnlaget på stikkrenner og kulverter fordelt mellom ulike distributører, som for eksempel kartverket og Statens vegvesen, og er lagret på forskjellig format. Stikkrennene blir i NVDB lagret som punkter og for å kunne senke disse i

høydemodellen måtte de konverteres til linjer på rasterformat. Dette er en prosess som kan være en feilkilde, da ett punkt representerer en stikkrenne, og det kan dermed være vanskelig å bedømme orienteringen og lengden til stikkrenna. For å redusere feilkilder i prosessen med å digitalisere linjer av punktene fra NVDB, ble det i oppgaven benyttet flyfoto og en høydemodell for å bedømme orienteringen og lengden til stikkrennene.

En annen utfordring, er at det tilgjengelige datagrunnlaget på stikkrenner og kulverter mangelfullt, noe sammenligning av flere test-gjennomkjøringer av de hydrologiske modelleringene med eksisterende FKB-data avslørte. Ved å kun benytte det eksisterende datagrunnlaget med manglende stikkrenner og kulverter, ville forskjellen mellom beregningene av flomveier med stengte- og åpne dreneringsveger blitt minimal. Dette ville også forplantet seg videre til sammenligningen av akkumulert areal i skadepunktene.

Som presentert i kapittel 3.1.2 er kvaliteten på resultatene avhengig av hvor tett på virkeligheten representasjonen er (Rød 2015). Å bruke datagrunnlaget med manglende stikkrenner og kulverter, ville gitt en feilaktig representasjon av virkeligheten. Det ble derfor ansett som nødvendig å digitalisere stikkrenner og kulverter på egenhånd. 48 kulverter og stikkrenner ble digitalisert og inkludert i høydemodellen for åpne dreneringsveger. Det er klart at det er subjektive vurderinger som ligger til grunn for denne prosessen, både med å identifisere objekter som skal digitaliseres og i selve digitaliseringen. Det er ingen garanti for at alle stikkrenner og kulverter av betydning ble digitalisert, og spesielt mindre stikkrenner kan være utelatt. For eksempel vil stikkrenner i forbindelse med jordbruk og private vegger kunne være vanskelige å identifisere. Eventuelle kulverter og stikkrenner som ikke er inkludert i modelleringen skaper en viss usikkerhet i beregningene. Det er vanskelig å anslå omfanget av disse. Det betyr at det også vil være vanskelig å avdekke en eventuell skjev fordeling av utelatte kulverter og stikkrenner mellom og innad de tre ulike nedbørfeltene. Usikkerheten i selve digitaliseringen er vedrørende bredde, lengde og orientering på objektene.

Det argumenteres likevel for at fordelene med denne prosessen er større enn ulempene, i tillegg til at det ut ifra studiens hensikt syntes å være en uunngåelig prosess. Det bør alltid veie tungt at virkeligheten skal presenteres på en så presis måte som mulig. For å forsikre om at ingen store kulverter og stikkrenner ble oversett ble det utført en grundig gjennomgang av flyfoto, tilgjengelige FKB-data for bekke- og elveløp, informasjon fra Lillehammer kommune

og flere test-gjennomkjøringer av de hydrologiske modelleringene. Feilkilder knyttet til manglende kulverter og stikkrenner burde med andre ord ha begrenset betydning for studien.

I de tre nedbørfeltene er det flere mindre gangbruer, som i FKB-datasettet er klassifisert som bruer, som dermed er senket i begge scenariene. Dette fører til at flomveiene for åpne og stengte dreneringsveger følger samme løp i disse områdene. I følge Aall et al. (2015) kollapset enkelte bruer under flommen i 2014. Spesielt gangbruer ble rammet. Dette argumenterer for at enkelte av bruene kunne blitt behandlet som kulverter i denne studien, og dermed ikke blitt senket i høydemodellen for åpne dreneringsveger. Det hadde ført til større forskjeller i beregningen av flomveier mellom åpne og stengte dreneringsveger. Det ble vurdert å reklassifisere enkelte bruer som kulverter for å skape forhold tilsvarende flommen i 2014, men for å unngå å manipulere grunndata ble det valgt å se bort i fra dette.

### **6. 1. 2. 2 Hydrologisk modellering**

Den hydrologiske modelleringen i denne studien baserer seg på at gravitasjon og topografi styrer vannets bevegelse. Dette medfører noen begrensinger og forenklinger, da parametere som infiltrasjon, evaporasjon og mengden tilgjengelig vann er utelatt. Den hydrologiske modelleringen blir allikevel vurdert som robust og hensiktsmessig for hva studien krever. Så lenge man er bevisst på at det eksisterer begrensinger og hva disse innebærer kan man unngå å tolke resultatene feil. Som et eksempel gir ikke de beregnede flomveiene i denne studien noe absolutt verdi på hvor store vannmengder som kan forventes i hver enkelt flomvei. Likevel kan de gi en indikasjon på forventet vannmengde ut ifra hvor stort akkumuleringsareal ulike celler har (Rød 2015).

### **6. 1. 2. 3 Dreneringsretning**

D8-algoritmen for beregning av dreneringsretninger er begrenset ved at den kun tillater vannet å drenere i åtte ulike retninger og konvergerende strøm, noe som er urealistisk (Rød 2015). På bakgrunn av ulempene dette medfører, ble det eksperimentert med Tarboton (1997) sin mer sofistikerte algoritme, D-uendelig algoritmen. Denne tillater divergerende strøm. Forskjellen mellom de to algoritmene var klarest i flate og jevne områder, da D-uendelig algoritmen her beregnet divergerende strømmen. I lavbrekkene var forskjellen generelt minimal, selv om D-uendelig til dels beregnet divergerende strømmen her også. Forskjellene var så små at det ble valgt å bruke D8-algoritmen. De sterkeste argumenter for at D8-algoritmen ble foretrukket er at den er standard metode i ArcGIS og at den er forholdsvis

enkel og beregningseffektiv. I tillegg har metoden blitt foretrukket i tidligere studier med modellering av flomveier (Viréhn 2014; Meiforth 2013; Hole 2015).

#### **6. 1. 2. 4 Akkumulering**

De beregnede akkumuleringsrasterne kan til en viss grad valideres ved å sammenligne disse med eksisterende bekke- og elveløp. Valideringen blir styrt av utstrekningen til eksisterende elve- og bekkeløp, og hvor tydelige disse er i FKB-datasettet. Det fører til at akkumuleringen i områder der det ikke er registrert bekke- og elveløp i FKB-datasettet, ikke kan valideres på denne måten, noe som er en utfordring. Ved å bruke en vektoraster med nedbørmengder i *flow accumulation* verktøyet, kunne volumberegninger blitt inkludert i studien. Dette ble blant annet gjort i studien til Demir & Kisi (2015), der HEC-RAS blir brukt for å simulere flommer av ulik størrelse. På grunn av oppgavens hensikt ble ikke dette vurdert som nødvendig.

#### **6. 1. 2. 5 Terskelverdier og visualisering av flomveier**

For å visualisere de beregnede flomveiene, ble det bestemt en terskelverdi for minste flomvei som potensielt kan påføre skade. På grunn av variasjoner innad i studieområdene var det utfordrende å bestemme denne. Både Meiforth (2013) og Bratlie (2013) benyttet 50 000 m<sup>2</sup> som terskel, men Meiforth (2013) påpeker også at flomveier så små som 25 000 m<sup>2</sup> kan påføre skade i rurale omgivelser. Derfor ble 25 000 m<sup>2</sup> satt som terskel før flomveiene ble konvertert til vektorlinjer. Flomveier på vektorformat egner seg bedre i visuelle presentasjoner enn rasterformat, da rasterformatet kan fremstille flomveier ujevne og hakkete. En individuell vurdering av terskelen ble allikevel gjennomført for hver enkelt kartografisk fremstilling av flomveiene, ut ifra formålet med hvert enkelt kart. Dette ble utført for å unngå unødvendig informasjon i figurene og gjøre de enkle å lese. For eksempel ble det i figur 5.4 og 5.5 kun presentert hovedflomveier for å gjøre kulvertene mer synlige.

Ved utformingen av klassegrensene til visualiseringen av flomveiene som er presentert i figur 5.6-5.11, ble også arbeidet til Meiforth (2013) brukt som veiledning, med noen små endringer. Visualiseringen av flomveiene i disse kartene har som hensikt å gi et oversiktlig inntrykk. Utsnittskart i mindre målestokk ble benyttet for å fremheve problemområder og øke detaljnivået i disse. Flomveiene som gikk ut i Mjøsa ble sett på som så forstyrrende i kartene, at det ble valgt å legge over vannpolygon for å gjøre kartet lettere å lese (Meiforth 2013). Bygninger ble inkludert i kartene for å gi et inntrykk av flomveienes nærhet til bebyggelse. I hovedkartene i figur 5.6-5.11 ble veger vurdert som forstyrrende i forhold til lesbarheten til

flomveiene, men ble vurdert som hensiktsmessig i utsnittskartene da disse er av mindre målestokk. Vegene er visualisert med hvit farge som fremstår nøytralt i utsnittskartene mot den gråaktige skyggebakgrunnen og fører til at flomveiene fortsatt er i fokus.

### **6. 1. 3 Evaluering av sammenligning av akkumulert areal i skadepunkter**

Skadeområder for hvert enkelt studieområde ble levert av Lillehammer kommune, uten noen form for informasjon vedrørende nøyaktighet til stedfestingen. Skadeområdene er stedfestet av Lillehammer kommune ved hjelp av håndholdt GPS, og til dels subjektive vurderinger i digitaliseringen. Feilkilder knyttet til disse dataene er derfor vanskelig å beregne. Ved å bruke data som er samlet inn av andre, er det også vanskelig å vite hvilke subjektive vurderinger som er gjort ved datafangsten. For eksempel kan enkelte områder være utelatt med overlegg. For å redusere eventuelle feilkilder knyttet til skadedataene, kunne hvert enkelt skadeområde inneholdt informasjon om nøyaktighet i attributt Tabellen, men dette var altså ikke tilfellet i denne studien.

#### **6. 1. 3. 1 Konvertering**

Ved å konvertere skadeområdene som originalt var representert med polygoner til punkter, kan det i tillegg til usikkerheten og feilkildene beskrevet over, oppstå nye feilkilder. Enkelte av skadeområdene har svært stor utstrekning, og inneholder flomveier med varierende akkumulert areal. For eksempel kan ulike flomveier drenere inn og/eller ut av polygonet, og ved å redusere dette til et punkt, blir man nødt til å utelate noen flomveier. For å redusere denne feilkilden kunne polygoner med stor utstrekning blitt representert med flere punkter. Det ble i denne studien allikevel vurdert som hensiktsmessig å representere et skadeområde med et punkt. Eventuelle feil knyttet til dette, ble redusert ved å vurdere punktenes lokalisering nøye, ut ifra kravet om at punktene måtte plasseres i lavbrekk representert i akkumuleringsrasterne for begge scenarier. Det ble forsøkt og systematisk plassere alle punkter oppstrøms i skadepolygonet. For enkelte punkter var ikke dette hensiktsmessig, da kravet om lavbrekk representert i begge scenariene ikke ble oppfylt her. I disse tilfellene ble det valgt å plassere punktene nedstrøms i skadepolygonet.

For å kunne gjennomføre sammenligning av akkumulert areal i skadepunktene, måtte subjektive beslutninger tas i forhold til plassering av punktene. Dette knytter som nevnt tidligere, en viss usikkerhet til prosessen. For å kunne svare på problemstillingen ble det vurdert som nødvendig, og innenfor akseptable rammer, å gjennomføre prosessen.

### **6. 1. 3. 2 Klassifisering**

Klassifiseringen av skadepunktene ut i fra endringen i akkumulert areal ved å blokkere dreneringsveger, ble gjort med lik tilnærming som Viréhn (2014) sitt arbeid, som har klare paralleller til denne studien. Ideen bak klassifiseringen, er å avdekke skadepunkter der skadene kan være påført av vann på avveie. I disse punktene må det akkumulerte arealet ha økt med 50 % eller mer, etter blokkeringen av kulverter og stikkrenner. Til tross for varierende resultater mellom studieområdene, som vil bli diskutert senere i oppgaven, ansees klassifiseringen som egnet for å besvare problemstillingen. Ved å bruke en terskel på 50 % økning for klassifisering skader påført av vann på avveie, vil kun nevneverdige flomveier, i forhold til størrelse, bli inkludert. Dette vil redusere usikkerhet og unøyaktigheter (Viréhn 2014).

Det er viktig å påpeke at klassifiseringen kun tar utgangspunkt i endringen i akkumulert areal, og ikke punktenes lokalisering. Skillet mellom det som er klassifisert som naturlige flomveier og *andre* flomveier kan virke uklart. Dette skyldes at de fleste skadepunktene klassifisert som *andre* er lokalisert langs naturlige bekke- og elveløp, noe som gjelder i alle studieområdene. I en stor andel av punktene klassifisert som *andre*, har blokkerte dreneringsveger ledet vannet bort fra naturlig vannveier, og dermed blir endring i akkumulert areal negativ. For å gjøre klassifiseringen mer tydelig kunne disse klassene blitt sett under ett. Dette hadde skjult store forskjeller i akkumulert areal, og ble derfor forkastet.

### **6. 2 Vurdering av resultatene fra sammenligning av akkumulert areal i skadepunkter**

Resultatene i denne studien er som det har blitt diskutert, påvirket av datainnsamlingen, metodikk og subjektive vurderinger og valg underveis. Med en viss usikkerhet i alle ledd må derfor resultatene tolkes noe forsiktig. Det er også viktig å påpeke at det akkumulerte arealet i et skadepunkt blir kontrollert av forholdene oppstrøms punktet, og at et scenario hvor alle kulverter og stikkrenner er blokkerte på samme tidspunkt er urealistisk. Resultatene vil allikevel kunne indikere hvor vann på avveie var en årsak til skader (Viréhn 2014).

Resultatene fra sammenligningen av akkumulert areal i skadepunkter, indikerer at vann på avveie er av ulik betydning i nedbørfeltene Åretta, Skurva og Bæla. Nedbørfeltene Bæla og Åretta har omtrent like resultater, med 5 % og 6 % av skadepunktene klassifisert som forårsaket av vann på avveie. Ut ifra resultatene, er det bare i Skurva vann på avveie kan



beskrives som den største årsaken til skadene, da dette gjelder for 44,5 % av skadepunktene. I Bæla og Åretta er den største årsaken til skadene knyttet til naturlige vannveier. For å diskutere resultatene, er det valgt å se resultatene i lys av ulike faktorer og situasjoner som har påvirket resultatene.

Skadepunktene representerer ulike skadetyper som erosjon, vannveger, utrasing og massetransport. Skadetyper til hvert enkelt punkt er registrert av Lillehammer kommune, og er oppgitt i attributt Tabellen (Tabell 5.1-5.3). Flomveier er beregnet ut ifra prinsippet om at vannet følger den bratteste gradienten nedstrøms (Gruber & Peckham 2009). Flere aspekter er utelatt, som vannmengde og egenskaper ved og under overflaten. Dette kan føre til at enkelte skadetyper er svært utfordrende å analysere ut ifra endringen i akkumulert areal. Spesielt skadepunkter relatert til erosjon og utrasing var i enkelte tilfeller utenfor studiens rekkevidde. Det vil si at punktene i disse tilfellene ikke var lokalisert i tilknytning til de modellerte lavbrekkene. Det ble derfor ikke registrert verdier for akkumulert areal i disse og det ble inkludert en egen klasse i klassifiseringen av skadepunkter der dette var tilfellet. Det ble observert flere slike tilfeller i Bæla og Åretta enn i Skurva.

Skadepunkter av typen vannveger viste seg å være godt egnet for å identifisere vann på avveie, med den anvendte metoden. Det ble i alle nedbørfelt observert økt akkumulert areal i skadepunkter av denne typen. Ut i fra skadepolygonenes utstrekning ved disse punktene, var det i tillegg mulig å sammenligne om det beregnede vannet på avveie fulgte samme løp, som vannvegen som hadde påført skadene. I mange tilfeller var det en klar sammenheng, og det underbygger metodens evne til å avdekke vann på avveie. Det er også viktig å merke seg at skadepunkter av typen vannveger ikke er lokalisert langs naturlige vannveier, som gjelder for de fleste andre skadepunktene. Det kan være en årsak til at disse skadepunktene skiller seg ut, med tanke på endringen i akkumulert areal ved å blokkere dreneringsvegene. Skadepunkter som er lokalisert langs naturlige vannveier, har naturlig høye verdier for akkumulert areal med åpne dreneringsveger, og kan være problematiske med tanke på å identifisere vann på avveie. Ved stengte dreneringsveger vil derimot blokkerte kulverter og stikkrenner kunne lede vannet bort fra naturlige vannveier. I enkelte situasjoner hvor blokkerte kulverter og stikkrenner leder vannet bort fra skadepunktene, kan det for det første indikere at disse kulvertene og stikkrennene ikke var blokkert under flommen i 2014. For det andre kan en slik situasjon indikere at dersom kulverten eller stikkrenner ble blokkert, tok vannet andre vegar

enn den beregnede vannvegen, som er kontrollert av gravitasjon. For eksempel kan vannet ha gått over sine bredder eller erodert en ny vannveg.

Beregningene i denne studien tar ikke høyde for at vannet kan gå over sine bredder, noe som er svært sannsynlig i flomsituasjon. En beregnet flomvei vil i denne studien for eksempel drenerer i en liten veggrøft, uavhengig av hvor stort akkumulert areal den har. I virkeligheten ville flomveien ved stor vanntilførsel kunne fylle opp grøften og dermed drenerer ut av den. Effekten dette har på resultatene er vanskelig å bedømme, men det er mulig at det kan være en del av årsaken til de varierte resultatene.

Forutsetningene i Bæla, Skurva og Åretta er så klart ulikt innad og mellom nedbørfeltene. Dette gjelder blant annet med tanke på topografi og ulik grad av menneskeskapte objekter som infrastruktur, bygninger og antall kulverter. I Bæla er det færrest registrerte kulverter og stikkrenner, og svært få av disse er lokalisert i øvre del av nedbørfeltet. Dette begrenser mulighetene for å påvise vann på avveie i Bæla ut ifra den anvendte metoden i denne studien. Den generelle topografien i områdene er relativt lik, med en gjennomsnittlig helning på rundt 10° i alle områder. Selv om den gjennomsnittlige helningen er relativt lik, vil lokale variasjoner i topografi kunne ha en naturlig effekt på beregningene og resultatene i denne studien. Nedbørfeltene Skurva og Åretta er i større grad preget av infrastruktur og bebyggelse enn Bæla. Med tanke på at kulverter, stikkrenner, bygninger, veger, fortauskanter og andre objekter relatert til dette er med i beregningene, vil dette påvirke resultatene. Til tross for at Skurva og Åretta har lignende forutsetninger i forhold til infrastruktur og bebyggelse, gjenspeiler ikke resultatene dette. De nevnte variasjonene i forutsetningene mellom studieområdene, må sees på som naturlige årsaker til at det er forskjeller i resultatene. I Viréhn (2014) sin studie, viste nedbørfeltet som i minst grad var påvirket av kulverter og infrastruktur det tydeligste resultatet, med tanke på å avdekke vann på avveie. Nedbørfeltet med størst utbredelse av kulverter og infrastruktur viste mindre signifikante resultater. I denne studien er det til en viss grad motsatt, da nedbørfeltet Skurva viser de tydeligste resultatene. Det er i Skurva inkludert mange flere kulverter og stikkrenner, og området er i større grad preget av infrastruktur og bebyggelse enn nedbørfeltet Bæla, som viser mindre distinkte resultater.

Til tross for at resultatene i Bæla og Åretta er mindre signifikante i forhold til vann på avveie, betyr ikke det at metoden ikke er robust. I følge Viréhn (2014) er de største usikkerhetene knyttet til kompleksiteten til studieområdene, og ikke til metoden. Dette kan sies å være

gjeldende for denne studien av flere grunner. Store deler av studieområdene i denne studien av urban karakter, og kan derfor antas å være mer komplekse enn de mer rurale områdene i Viréhn (2014) sin studie. Metoden er fortsatt relativt lik. Det er en rekke faktorer knyttet til kompleksiteten i studieområdene, som for eksempel antall kulverter og stikkrenner, grad av infrastruktur og bebyggelse og lokale variasjoner i topografi som kan være sannsynlige årsaker til de varierende resultatene i denne studien.

Studien har avdekket flere kritiske kulverter og stikkrenner, ut ifra at dersom disse er blokkert, vil det akkumulerte arealet øke i skadeområder nedstrøms. Ut ifra dette, kan det argumenteres for at anvendt metode gir en god indikasjon på at vann på avveie kan ha vært årsaken til skadene i disse områdene. Resultatene burde være troverdige, da det er vurdert at det er hovedsakelig naturlige grunner til variasjon i resultater. Med naturlige grunner menes kompleksiteten til nedbørfeltene, og de ulike dreneringssituasjonene som oppstår ved å blokkere kulverter.

### **6. 3 Implikasjoner**

For å forhindre lignende situasjoner som under flommen sjuende-åttende juli 2014, er det i tillegg til å kartlegge flomveiene, viktig å identifisere kritiske kulverter og stikkrenner. Spesielt med tanke på at mange av kulvertene i nedbørfeltene ikke er rustet for å takle mer enn en 10-årsflom (Lillehammer kommune 2014). Vann på avveie er identifisert som en viktig årsak til skadene i Skurva. Dette skyldes hovedsakelig den blokkerte kulverten i figur 5.15 B) som fører til at nedbørfeltet utvider seg fra 7 km<sup>2</sup> til 17,5 km<sup>2</sup>. Økningen i areal forplanter seg nedover i nedbørfeltet, og bidrar til økt akkumulert areal etter blokkering av dreneringsveger i flere skadepunkter nedstrøms, som en positiv tilbakekobling mekanisme. Kulverten ble identifisert som kritisk, på grunn av konsekvensene av å blokkere den. Dette viser at en blokkert kulvert kan forårsake store endringer i dreneringen, og med det et stort skadepotensiale. Den beregnede situasjonen har en klar sammenheng med den faktiske situasjonen under flommen i 2014. Det er dokumentert at kulverten faktisk ble blokkert og ledet vannet i samme retning (langs Nordsetervegen), som beregningen for stengte dreneringsveger viser (Aall et al. 2015). Behovet for å oppgradere kapasiteten til kulvertene og stikkrennene er derfor tydelig. Ut ifra denne studien burde spesielt de kulvertene og stikkrennene indentifisert som kritiske bli gitt ekstra oppmerksomhet.

Hverken i Åretta eller Bæla har blokkeringen av kulverter og stikkrenner en like stor effekt på arealet til nedbørfeltet. Skadene i de fleste skadepunktene i Åretta og Bæla er ut i fra sammenligningen av akkumulert areal knyttet til naturlige vannveier, og ikke en konsekvens av vann på avveie. Dette kan tyde på at blokkerte kulverter og stikkrenner ikke er hovedproblemet i disse nedbørfeltene. Funnene indikerer at problemet heller er at eksisterende bekke- og elveløp ikke klarer å håndtere store vannmengder som følge av kraftig nedbør. Til tross for at kun 8 % av skadepunktene i Skurva er klassifisert som naturlig flomvei, er en del av de 44,5 % klassifisert som *andre* også relatert til naturlige vannveier. Dette indikerer at eksisterende bekke- og elveløp også i Skurva er for dårlig rustet til å håndtere store nedbørmengder.

I Åretta og Bæla ble det også identifisert enkelte tilfeller der vann på avveie knyttes til skadene i skadepunktene. Figur 5.20 C) illustrerer vann på avveie i Bæla, mens figur 5.19 B) illustrerer en slik situasjon i Åretta. I begge disse situasjonene fører blokkeringen av kulverter til et mye større akkumulert areal i skadepunktene. Arealet til nedbørfeltene blir derimot ikke påvirket. Dette fører til at den positive tilbakekobling mekanismen beskrevet i sammenheng med Skurva, ikke har samme effekt i Åretta og Bæla. Funnene indikerer at vann på avveie er en mindre utfordring i Bæla og Åretta, sammenlignet med Skurva. Det er allikevel, som beskrevet ovenfor, enkelte situasjoner i Bæla og Åretta der vann på avveie knyttes til skadepunktene som ikke bør overses.

I enkelte tilfeller, avdekket de beregnede flomveiene problemområder som ikke er tilknyttet skadepunktene, som vist i 5.18 B). Med oppgavens fokus på områder i tilknytning til skadepunkter, er disse problemområdene lite omtalt i oppgaven. Det er verdt å merke seg at ved å bruke flyfoto og datasett som viser bebyggelse og infrastruktur, kan beregningen av flomveier avdekke mulige problemområder, uavhengig av skadepunktene. En sammenligning av flomveiene fra de to scenariene med data for kulverter og stikkrenner (som i figur 5.5) vil kunne identifisere kritiske kulverter og stikkrenner. Dette, i tillegg til funnene i denne studien, impliserer at man ved hjelp av GIS kan avdekke dreneringsituasjoner med stort skadepotensiale, både med og uten bruk av skadedata. I fremtiden er det forventet mer ekstrem nedbør, og økt klimasårbarhet som følge av samfunnsutvikling (NOU 2015). Dette vil føre til større utfordringer knyttet til overflatevann. For å redusere skadene knyttet til overflatevann er derfor GIS og anvendt metode et meget verdifullt verktøy.

## Kapittel 7 - Konklusjon

Studien har vist en metode for å kartlegge flomveier i tre nedbørfelt, med forutsetningen om at vannet vil følge lavbrekk i terrenget og den bratteste gradienten nedstrøms.

Dreneringsretninger ble beregnet ved hjelp av den forholdsvis enkle D8-algoritmen, ut ifra en høyoppløselig DEM avledet fra LiDAR-data. Videre ble flomveier med utgangspunkt i både blokkerte- og åpne kulverter og stikkrenner beregnet, ut ifra lavbrekk i terrenget hvor vannet samles. De beregnede flomveiene har til en viss grad blitt validert av eksisterende bekke- og elveløp fra FKB-datasett, men på detaljnivå vil flere flomveier kunne inneholde enkelte feilberegninger. Målet med å beregne flomveier med blokkerte og åpne kulverter og stikkrenner, var å undersøke om vann på avveie kan ha vært en viktig faktor til skadene påført i studieområdene under flommen i 2014. For å kunne undersøke dette ble endringer i akkumulert areal i skadepunkter analysert. Som nevnt i diskusjonen rundt feilkilder er det knyttet usikkerhet til alle ledd i studien, og de følgende svarene må derfor tolkes noe forsiktig:

*-Ut i fra endringen i akkumulert areal i skadepunktene ved å blokkere kulverter og stikkrenner; er det noe som tyder på at vann på avveie var den største årsaken til skadene?*

**Svar:** Om man ser alle nedbørfeltene under ett, er det ikke noe som tyder på at vann på avveie var den største årsaken til skadene. Det er kun i Skurva vann på avveie kan beskrives som en av de største årsakene til skadene, ut i fra endringen i akkumulert areal i skadepunktene. Ved 44,5 % av skadepunktene i Skurva er vann på avveie sannsynlig årsak til skadene. I Skurva har blokkeringen av en kulvert oppstrøms i nedbørfeltet store ringvirkninger, ved at det øker arealet til nedbørfeltet. Ringvirkningene kan beskrives som en positiv tilbakekobling mekanisme, da blokkeringen av denne kulverten fører til økt akkumulert areal i flere skadepunkter nedstrøms. I Bæla er vann på avveie vurdert som årsaken til skadene i 5 % av skadepunktene, mens vann på avveie i Åretta er vurdert som årsaken til skadene i 8 % av skadepunktene. Studien har identifisert flere kritiske kulverter og stikkrenner, hovedsakelig i Skurva, som ved blokkering vil føre til en stor økning i akkumulert areal i skadepunktene

nedstrøms. Funnene i denne studien impliserer at man ved hjelp av anvendt metode kan avdekke situasjoner med stort skadepotensial.

*-Er det tydelig forskjeller i resultatene fra sammenligningen av akkumulert areal i de tre nedbørfeltene? Hvis dette er tilfellet, hva kan være årsaken til dette?*

**Svar:** Det er en tydelig forskjell mellom resultatene fra sammenligningen av akkumulert areal i Skurva i forhold til Bæla og Åretta, der resultatene er mer samsvarende. I Skurva indikerer resultatene at vann på avveie var en av de største årsaken til skadene, mens i Åretta og Bæla er de fleste skadene i skadepunktene knyttet til naturlige vannveier. Noe av årsaken til de varierte resultatene kan være forårsaket av feilkilder og usikkerhet. For det første knyttet til høydemodellen (punkttetthet, interpolering og overflatebegrensinger). For det andre knyttet til modelleringen av flomveier, herunder modifisering av høydemodellene og begrensinger ved D-8 algoritmen. For det tredje knyttet til skadepunktene (Skadetype og plassering).

De viktigste årsakene til at det er forskjeller i resultatene i de respektive nedbørfeltene blir likevel vurdert å være av naturlig opprinnelse. Disse årsakene er knyttet til kompleksiteten til studieområdene, og de ulike drenerings situasjonene som oppstår ved å blokkere kulverter og stikkrenner. For det første knyttet til menneskeskapte objekter som infrastruktur, stikkrenner og kulverter, og for det andre lokale variasjoner i topografi.

## **7. 1 Videre arbeid**

En grundigere stedfesting av stikkrenner og kulverter er nødvendig for å redusere noe av usikkerheten knyttet til metoden. I tillegg vil informasjon om kapasiteten til hver enkelt kulvert og stikkrenne være av interesse, for å kunne vite noe om hvor store vannmengder nedbørfeltene kan håndtere. Ved å inkludere flere parametere i modellen som for eksempel nedbørmengde, vil det øke nytteverdien av metoden da det vil kunne gi informasjon om faktisk vannmengde inn i nedbørfeltet. Dette vil gi innsikt i vannvolum til flomveiene og man kan dermed avdekke faktiske flomområder. Bruk av høydemodeller med finere oppløsning og mer sofistikerte algoritmer i den hydrologiske modelleringen kan muligens gi en mer detaljrik representasjon av dreneringen. Dette krever inngangsdata av høy kvalitet for å unngå feil, og kraftig maskinvare for å unngå ekstremt tidkrevende prosessering.



For at brukere, både private og næringsliv, skal kunne bruke kartleggingen av flomveier aktivt kan man utvikle nettbaserte kartapplikasjoner i for eksempel ArcGIS Online eller lignende. Med dagens teknologi er det mulig å inkludere såkalt *crowd sourcing* i en slik løsning, som innebærer at bruker selv kan legge inn skadepunkter og ellers hjelpe til med å kvantifisere flomveier og flomskader.



## Kapittel 8 - Litteraturliste

- Aall, C. Baltruszewicz, M. Groven, K. Almås, A & Vagstad, F. 2015.  
*Føre-var, etter-snar eller på-stedet-hvil? Hvordan vurdere kostnader ved forebygging opp mot gjenoppbygging av fysisk infrastruktur ved naturskade og klimaendringer?*  
Vestlandsforskning rapport nummer 4
- Bratlie, R. 2015. *Beregning av flomveier med eksempler på bruk i kommunal forvaltning*  
*KART OG PLAN*, vol 75, s. 24-34
- Callow, J.N. Van niel, K & Boggs, G. 2007. *How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis?*  
*Journal of Hydrology Volume 332, Issues 1–2, 1 January 2007, s. 30–39*
- Childs, C. 2004. *Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst.*  
Hentet den 11.03.2016 fra <http://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf>
- Collier, C. G. 2007. *Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?*  
*Quarterly journal of the royal meteorological society. Q. J. R. Meteorol. Soc.* 133 s. 3–23
- DeMers, N.M. 2005. *Geographic Information Systems.* (3. utgave).  
New Mexico, USA: John Wiley & Sons, Inc
- Demir, V & Kisi, O. 2015. *Flood Hazard Mapping by Using Geographic Information System and Hydraulic Model: Mert River, Samsun, Turkey.*  
Hindawi Publishing Corporation. *Advances in Meteorology*, Volume 2016
- Dempsey, C. 2013. *Statistical surfaces in GIS.*  
Hentet den 11.02.2016 fra <https://www.gislounge.com/statistical-surfaces-in-gis/>
- DSB (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap). 2013.  
*Nasjonalt risikobilde 2013 - Katastrofer som kan ramme det norske samfunnet.*  
Hentet den 14.12.2015 fra  
[http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2013/Tema/NRB\\_2013.pdf](http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2013/Tema/NRB_2013.pdf)

Eklima. 2015. Meteorologisk institutt sin database.

Data lastet ned 20.10.2015

ESRI. 2016. *LAS Dataset to Raster*

Hentet den 07.04.2016 fra

<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/conversion/las-dataset-to-raster.htm>

ESRI. 2016a. *What is a LAS dataset?*

Hentet den 10.03.2016 fra

<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-a-las-dataset-.htm>

ESRI. 2016b. *What is Lidar data?*

Hentet den 10.03.2016 fra

[http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm#ESRI\\_SECTION1\\_DE9C4733D20A44F795EC43061106A3BE](http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm#ESRI_SECTION1_DE9C4733D20A44F795EC43061106A3BE)

ESRI. 2016c. *How natural neighbours work*

Hentet den 14.03.2016 fra

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Natural%20Neighbor%20works>

ESRI. 2016d. *Delineating watersheds*

Hentet den 17.03.2016 fra

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Delineating%20watersheds>

ESRI. 2016e. *How fill works*

Hentet den 04.04.2016 fra

<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm>

ESRI. 2016f. *How flow accumulation works*

Hentet den 04.04.2016 fra

<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>

ESRI. 2016g. *What is model builder?*

Hentet den 11.04.2016 fra

<http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>

ESRI. 2014. *Statistical analysis for LAS dataset*

Hentet den 29.03.2016 fra

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//015w00000049000000>

ESRI. 2014a. *Feature to point*

Hentet den 07.04.2016 fra

<http://help.arcgis.com/En/Arcgisdesktop/10.0/Help/index.html#//00170000003m000000>

ESRI. 2013. *Assessing lidar coverage and sample density*

Hentet den 29.03.2016 fra

<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w0000003t00000000>

ESRI. 2012. *Exploring Digital Elevation Models (DEM)*

Hentet 01.03.2016 fra

[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Exploring%20Digital%20Elevation%20Models%20\(DEM\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Exploring%20Digital%20Elevation%20Models%20(DEM))

ESRI. 2012a. *Determining flow direction.*

Hentet 10.01.2016 fra

[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Determining\\_flow\\_direction](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Determining_flow_direction)

ESRI. 2011. *How sinks work*

Hentet den 04.04.2016 fra

<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=How%20Sink%20works>

ESRI. 2008. *Terrain dataset concepts*

Hentet den 30.03.2016 fra

[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=2764&pid=2761&topicname=Terrain\\_dataset\\_concepts](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?id=2764&pid=2761&topicname=Terrain_dataset_concepts)

Gallant, C. J. & Wilson, P.J. 2000. *Digital terrain analysis*. I: Gallant, C.J., Wilson, P.J. (red.) *Terrain analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons Ltd, New York, s. 1-27

Gallay, M. Lloyd, C. McKinley, J & Barry, L. 2013. *Assessing modern ground survey methods and airborne laser scanning for digital terrain modelling: A case study from the Lake District, England*. *Computers & Geosciences* 51 (2013) s. 216–227

Gruber, S & Peckham, S. 2009. *Land-Surface Parameters and objects in Hydrology*. *Developments in Soil Science, Volume 33* s. 171-194

Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E., Roald, L., Børsheim, K., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., Sundby, S., Vasskog, K. & Adlandsvik, B. 2009. *Klima i Norge 2100*. Bakgrunnsmateriale til NOU Klima tilpassing. Norsk klimasenter, Oslo.

Haugerud, R. Harding, D. Johnson, S. Harless, J & Weaver, C. 2003. *High-Resolution Lidar Topography of the Puget Lowland, Washington - A bonanza for earth science*. *GSA today*

Hengl, T. 2006. *Finding the right pixel size*  
*Computer & geosciences* 32 s. 1283-1298

Hengl, T & Evans, I. 2009. *Mathematical and digital surface models of the land surface*. *Development in soil studies, Volume 33* s. 31-63



Hole, Ø. 2015. *Vurdering av romlige mønstre i Stavanger kommune ved bruk av skadedata og multivariat regresjon- En GIS studie*. Masteroppgave i geografi NTNU

Jones, R. 2002. *Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples*. Computers & Geosciences 28 s. 1051–1060

Kartverket. 2013. *FKB - Felles kartdatabase*

Hentet den 22.03.2016 fra

<http://www.kartverket.no/Kart/Kartdata/Vektorkart/FKB/>

Kartverket. 2013a. *Produktspesifikasjon FKB-Laser*

Hentet den 29.03.2016 fra [http://sosi.geonorge.no/Produktspesifikasjoner/tidligere/fkb-laser-v20\\_2013-02-01.pdf](http://sosi.geonorge.no/Produktspesifikasjoner/tidligere/fkb-laser-v20_2013-02-01.pdf)

Lillehammer kommune. 2016. *Klimatilpasning*

Hentet den 18.04.2016 fra

<http://www.lillehammer.kommune.no/klimatilpasning.5843234-373155.html>

Lillehammer kommune. 2015. *Tiltak mot flom og flomskader i mindre sidevassdrag*.

Hentet den 15.12.2015 fra <http://www.lillehammer.kommune.no/prosjekt-vassdrag.5678868-341979.html>

Lillehammer kommune. 2014. *Flom 2014 - Lillehammer. Status og erfaringer Lillehammer kommune*. Hentet 10.10.2015 fra

[http://www.dsb.no/Global/Regional%20og%20kommunal%20beredskap/Dokumenter/Erfaringsseminar%20Flom/Lillehammer\\_Rudi.pdf](http://www.dsb.no/Global/Regional%20og%20kommunal%20beredskap/Dokumenter/Erfaringsseminar%20Flom/Lillehammer_Rudi.pdf)

Lillehammer kommune. 2012. *Brosjyre om Lillehammer*

Hentet den 12.04.2016 fra

<http://www.lillehammer.kommune.no/brosjyre-om-lillehammer.275605.no.html>

Liu, X. 2008. *Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues*.

Progress in Physical Geography 32 s. 31-49

Liu, X. Zhang, Z. Peterson, J & Chandra, S. 2007. *The effect of LiDAR data density on DEM accuracy*. Proceedings of International Congress on Modelling and simulation. Christchurch, New Zealand, s. 1363-1369

Lloyd, C.D & Atkinson P.M. 2002. *Deriving DSMs from LiDAR data with kriging*. International Journal of Remote Sensing, 23:12, s. 2519-2524

Longley, Goodchild, Maguire, Rhind. 2011. *Geographic information systems and science* third edition. Wiley.

McCullagh, M. J. 1988. *Terrain and surface modelling systems: theory and practice*, *Photogrammetric Record*, 12(72), 747-779.

Meiforth, J. 2013. *Modelling flood streams for urban planning in Trondheim, Norway*. UniGIS professional project.

Myrabø, S. 2013. *Befaringsrapport etter flomskadene i Gudbrandsdalen i mai 2013*.

NGI. 2016. *LiDAR*.

Hentet den 02.05.2016 fra <http://www.ngi.no/no/Fagomrader/Geofysikk/Lidar-Imaging/>

NOU. 2015. *Overvann i byer og tettsteder*. Utredning fra et utvalg nedsatt ved kongelig resolusjon 11. april 2014.

Nordeidet, B & Sagen, S. 2015. *Hydraulisk Modell, Flomanalyser Røyslimoen*  
Rapport til Lillehammer kommune, utarbeidet av Rambøll

NVE. 2015. *Forklaring til sanntidsgrafene*

Hentet den 12.04.2016 fra <https://www.nve.no/hydrologi/hydrologiske-data/historiske-data/forklaring-til-sanntidsgrafene/>

NVE. 2014. *Internt notat*.

Motatt den 29.04.2015 fra Anders Breili, Lillehammer kommune.

NVE. 2002. *Avrenningskart for Norge. /Årsmiddelverdier for avrenning 1961-1990*. Hentet den 14.12.2015 fra

<http://gis3.nve.no/metadata/tema/pdf/avrenningskart6190.pdf>

NVE. 1997. *Anvendt urbanhydrologi*.

Hentet den 11.12.2015 fra

[http://webby.nve.no/publikasjoner/publikasjon/1997/publikasjon1997\\_10.pdf](http://webby.nve.no/publikasjoner/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf)

O'Callaghan, J. F. & Mark, D. M. 1984. *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer vision, graphics, and image processing, 28(3):323-344.

Olsen, L. 2008. *Kvartærgeologi i Lillehammer kommune - beskrivelse til løsmassekart i M 1:50 000*. NGU Rapport 2008.031

Pike, R. J. Evans, I. S & Hengl, T. 2009. *Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide*. Developments in Soil Science, Volume 33 s. 1-28

Pirotti, F. & P. Tarolli. 2010. *Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction*. Hydrological Processes 24(9): s. 1187-1197.

Ramberg, I. B., Nøttvedt, A., Bryhni, I., Solli, A., & Nordgulen, Ø. 2006. *Landet Blir til: Norges geologi*. Norsk geologisk forening.

Rød, J. K. 2015. *GIS verktøy for å forstå verden*. Fagbokforlaget.

Rød, J.K. 2013. *Naturskadeforsikring og utbetalinger etter 1980. Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge*.

Bye, L.M., Lein, H. & Rød, J.K. Trondheim, Akademika forlag

Schuurman, N. 2004. *GIS: A Short Introduction*. 1. Utgave. England: Blackwell Publishing

Statens vegvesen. 2015. *Nasjonalt vegdatabank*.

Hentet den 22.03.2016 fra

<http://www.vegvesen.no/fag/Teknologi/Nasjonalt+vegdatabank>

Statens vegvesen. 2014. *Rask tilgang til NVDB-data i ArcMap*

Hentet den 04.04.2016 fra

<http://www.vegdata.no/2014/07/28/rask-tilgang-til-nvdb-data-i-arcmap/>

Sulebak, J. R. 2007. *Landformer og prosesser*. Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS.

Tarboton, D, G. 1997. *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water resources research, 33(2) s. 309-319.

Vatne, G. 2013. *Styrtflommer og klimaendring. Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge*. Bye, L.M., Lein, H.& Rød, J.K. Trondheim, Akademika forlag

Virèhn, P. 2014. *Water on devious ways - A GIS analyzis* Masteroppgave i geografi, NTNU Trondheim

Zhang, J & Goodchild, M. 2003 *Uncertainty in geographical information*. London, Taylor & Francic