

Eirik Larsen

# Hydrologisk korrekte høydemodeller, avrenning og responstid i Soknedal

## - En GIS-studie

Masteroppgave i Geografi

Trondheim, mai 2015

Veileder: Jan Ketil Rød

Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet  
Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse  
Geografisk institutt

Forsidefoto: Magnus Brandset, NRK



## **Abstract:**

In recent years, damage caused by flooding in smaller watersheds has been increasing and the use of digital elevation models for floodway modelling has become more common. High resolution geographic data has become more available and commonly used to derive digital elevation models. In this thesis Lidar and topographic data is used to derive DEM's for floodway modelling to find which method provides the hydrological most correct elevation model in ArcGIS. The research is done in two smaller watersheds in Soknedal in Midtre Gauldal, where a landslide went in 2012. The landslide caused damaged on the rail road leading to tracks hanging in thin air. The analysis has been made in ArcGIS and partly Excel, the result has runoff from three different elevation models both with and without culverts. The DEM runoff models accuracy, and deviation from the measured points RMSE has decided which method that has constructed the hydrological most correct elevation model. The hydrological most correct model proves to be the one that is derived directly from high resolution geographic data.

## **Sammendrag:**

De siste årene har flom og skader i mindre nedbørsfelt vært økende og bruk av høydemodeller for en flomveismodell har blitt vanlig. Høyoppløste geografiske data har blitt mer tilgjengelig og har blitt vanlig og bruke til generering av høydemodeller. Denne oppgaven undersøker ved hjelp av Lidar og topografisk deriverte høydemodeller hvilke metode som gir den hydrologisk mest korrekte høydemodellen i programpakken ArcGIS. Forskningen blir gjort i to små nedbørsfelt i Soknedal i Midtre Gauldal hvor det i 2012 gikk et skred i et av dem. Skredet dro med seg jernbanefylling så sporet ble hengende i løse lufta samt sperret deler av E6. Analysen har blitt gjort i ArcGIS og delvis Excel, resultatet har avrenning fra tre forskjellige høydemodeller både med og uten stikkrenner. Det som har avgjort hvilke metode som har konstruert den hydrologisk mest korrekte høydemodellen er avrenningsmodellens nøyaktighet/naturlige form, og avvik fra de målte punktene ved KMV. Den hydrologisk mest korrekte modellen viser seg å være den som er derivert direkte fra høyoppløste geografiske data.



## **Forord:**

Denne oppgaven markerer slutten på fem år som geografistudent ved NTNU. I løpet av disse årene har jeg opparbeidet meg en genuin interesse for geografifaget, og spesielt fagfeltet GIS. Året med denne masteren har vært svært krevende og lærerikt, hvor jeg tar med meg mye kompetanse ut i arbeidslivet. Erfaringer er gjort i arbeidet med oppgaven noe som også gjenspeiles i teksten.

Jeg vil først og fremst takke Jan Ketil Rød som har vært min veileder gjennom arbeidet med masteroppgaven. I tillegg vil jeg takke jernbaneverket for muligheten til å skrive oppgave for dem. Deretter rettes en takk til min samboer Silje B. Hovi for støtte samt mamma og pappa for korrekturlesning. Gjengen på lesesal 6483 har også vært en inspirasjon med mye faglige og ikke faglige samtaler gjennom året.



## **Forkortelser:**

GIS Geografiske informasjons systemer

Lidar Light detection and Ranging

GPS global positioning system

INS Internt navigasjonssystem

FKB Felles kartdatabase

NVE Norges vassdrag og energi direktorat

JBV Jernbanelinjen

DHM (digital terreng modell)

DHM (digital høydemodell)

TIN (triangular irregular network)

KMV: kvadratisk middelværdi





## Innholdsfortegnelse

Abstract: .....	III
Sammendrag: .....	III
Forord:.....	V
Forkortelser: .....	VII
Figurliste: .....	XII
Tabelliste:.....	XIII
1 Innledning: .....	1
1.1 Problemstilling/forskningsspørsmål: .....	1
1.2 Begrensninger .....	2
2 Introduksjon: .....	3
2.1 Bakgrunn:.....	3
2.1.1 Områdebeskrivelse:.....	4
3 Metode/teori: .....	7
3.1 Teori styrtflom/avrenning .....	7
3.1.1 Styrtflom: .....	7
3.1.2 Styrtflom og klimaendring:.....	7
3.1.3 Overflateavrenning: .....	8
3.2 GIS .....	9
3.2.1 Grunnleggende terminologi: .....	9
3.2.1.1 Raster.....	9
3.2.1.2 Vektor:.....	9
3.2.1.3 Hvorfor rasterdata? .....	9
3.3 Lidar:.....	11
3.4 Interpolering:.....	14
3.4.1 Naturlig nabo (Engelsk: natural neighbour): .....	15
3.4.2 Glattet overflate (Engelsk: Spline): .....	16
3.4.3 Invers vektet avstand IVA (engelsk: IDW, Inverse distance weighted):....	16
3.4.4 Kriging .....	17
3.4.5 Valg av interpolasjonsmetode:.....	17
3.5 Terreng representasjoner:.....	18
3.5.2 Høydekurver (engelsk: contour lines):.....	19
3.5.3 TIN (trekant modell) .....	19
3.5.4 DHM (digital høydemodell) .....	19
3.5.5 Cellestørrelse: .....	21
3.5.6 Valg av cellestørrelse .....	23

3.6 Hydrologisk modellering: .....	24
3.6.1 Las dataset:.....	24
3.6.2 Terreng datasett (engelsk: terrain dataset): .....	25
3.6.3 Topo to raster: .....	25
3.6.4 Dreneringsretning (engelsk: Flow dirrection):.....	25
3.6.5 Akumulert drenering (engelsk:Flow accumulation): .....	26
3.6.6 Forsenkning (engelsk: Sink): .....	26
3.6.7 Fylling av forsenkning (engelsk: Fill): .....	27
3.6.8 Nedbørsfelt (Engelsk: Watershed):.....	28
4 Datagrunnlag, analyser og resultater: .....	29
4.1 Lidar data: .....	31
4.2 Valg og konstruksjon av digitale høydemodeller: .....	32
4.2.1 DHM1 (Las datasett til raster): .....	32
4.2.2 DHM2 (Topo til raster):.....	34
4.2.3 DHM3 (Terrein til raster): .....	35
4.3 Resultat fra konstruksjon av høydemodeller: .....	36
4.3.1 DHM1: .....	36
4.3.2 DHM2 .....	37
4.3.3 DHM3 .....	37
4.4 Forsenkninger: .....	38
4.5 Redigering av høydemodellene: .....	39
4.5.1 Manuell forbedring av høydemodell med FKB-data .....	39
4.5.2 Manuell generering av stikkrenner: .....	40
4.6 Avrenningsmodellering: .....	41
4.7 Vurdering av nøyaktighet for høydemodeller:.....	42
4.7.1 Kvadratisk middelvei (Engelsk: Root mean square error, RSME): .....	42
4.8 Bestemmelse av nedslagsfelt: .....	43
4.9 Erfaringer fra høydemodellene: .....	45
4.9.1 Før manipulering av høydemodeller:.....	45
4.9.2. Etter manipulasjon av høydemodeller: .....	50
4.9.3 Felt 1: .....	50
4.9.4 Bekker og avrenning fra modellene:.....	52
4.9.3 Felt: 2 .....	54
4.10 Tilføring av fysisk vannmengde. ....	55
4.10.1 Beregning av vannmengde og responstid: .....	56
5 Diskusjon: .....	61
5.1 Evaluering av analysen og datagrunnlaget: .....	61

5.1.1 Feilkilder knyttet til høydemodellene: .....	61
5.1.2 Feilkilder knyttet til interpolasjon av høydemodellene .....	63
5.2 Hydrologisk mest korrekt høydemodell: .....	65
5.2.1 Behov for supplerende FKB data i rurale områder? .....	67
5.3 Nedbørs data, avrenning og responstid: .....	68
5.3.1 Responstid og avrenning: .....	68
5.4 Bruk av verktøy i ArcGIS, fordeler og ulemper? .....	70
5.5 Relevans for Jernbaneverket og Nifs-prosjektet: .....	71
6 Konklusjon: .....	73
6.1 Bemerkninger og videre forskning .....	74
Referanseliste: .....	75

## Figurliste:

Figur 1: Studieområdet hvor de to nedbørsfeltene ligger (Kartverket 2015). .....	5
Figur 2: De to nedbørsfeltene som har blitt brukt i oppgaven.....	5
Figur 3: Standard firkantet raster med 8 naboer og en hexagonal raster med bare 6 naboer (Hengl& Evans 2009, Hengl& Reuter 2009). .....	10
Figur 4: Flybasert Lidar system hvor skanneren er festet på flyet (MSEH 2010). .....	11
Figur 5: Lidar signal som sendes ned og bølgene på siden er styrken på signalet som returneres til sensoren, størrelsen på bølgene gjør at en kan skille mellom bakke og vegetasjons punkter. Prinsipp for illustrasjon hentet fra (Lohani 2015) .....	12
Figur 6: Profil av et utsnitt av Lidar punktsky, hvor A: ikke er filtrert for vegetasjon B: er filtrert og har kun bakke punkter.....	13
Figur 7: Forskjell mellom tre interpolasjonsmetoder (Childs 2004) .....	15
Figur 8: Interpolerings prinsippet ved naturlig nabo .....	Feil! Bokmerke er ikke definert.
Figur 9: Tre forskjellige typer høydemodeller.....	19
Figur 10: Prinsippet av Delaunays trekant (Esri 2015g) .....	19
Figur 11: Påvirkningen raster oppløsningen har på terrenget representasjon (Hengl& Evans 2009). .....	21
Figur 12: Vendepunktet er der terrenget går fra konveks til konkav kurvatur (Olaya 2009) .....	22
Figur 13: Oversikt over vendepunkter (Hengl 2006). .....	22
Figur 14: Fordeling av punkttettheten over de to nedslagsfeltene, Hvor det som er under den grønne linjen har en punkttetthet på 0,5 m og det over har en punkttetthet på 0,8 m. ....	23
Figur 15: En ferdig interpolert høydemodell fra et las datasett. Hver av de røde firkantene representerer en las fil .....	24
Figur 16: Dreneringsretnings raster og akkumulert drenering og D8 metoden (Engenslk: direction coding) (Esri 2012b).....	26
Figur 17: Hvordan fill fungerer (Esri 2011a). .....	27
Figur 18: Nedbørsfeltet hvor det gikk ras i 2012 .....	28
Figur 19: Flytdiagram for generering av høydemodellene og manipulasjonen.....	30
Figur 20: Egenskaper og verdier som er i Lidarpunktene .....	31
Figur 21: Er et utsnitt av den filtrerte punktsky over studieområdet .....	32
Figur 22: Valg/filtrering av bakkepunkter fra Lidardataen .....	33
Figur 23: Topo to Raster interface .....	34
Figur 24: Las to multipoint interface .....	35
Figur 25: Egenskapene til de forskjellige elementene som skal være med å bygge Terrainet .....	35
Figur 26: Terreng til raster egenskaper og Interface .....	36
Figur 27: Et utsnitt fra de tre høydemodellene A: DHM1, B: DHM2 og C: DHM3 .....	36
Figur 28: Et utsnitt av et område med mange forsenninger i DHM1, særlig høy ansamling er det i elva.....	38
Figur 29: Samme utsnitt av DHM1 hvor A ene er hevet med z-verien fra vei dataen, mens B er veien hevet manuelt med 1m .....	40
Figur 30: Linjer som representerer stikkrenner .....	40
Figur 31: viser stikkrennene som er generert manuelt ved linjetema, de rosa linjene viser rasteret en genererte fra. ....	41
Figur 32: Flytdiagrammet benyttet til flomveismodelleringen i de tre høydemodellene ...	41
Figur 33: Forskjellen på nedslagsfeltet hvor stikkrenner er lukket eller åpne. Hvor det skraverte område vil drenere inn i andre felt om stikkrennene er tette. ....	44
Figur 34: Gir et bilde av feltet det skraverte området drenerer inn i. ....	44
Figur 35: Profil av (A) DHM 1 som ikke er manipulert og (B)DHM 3 hvor det er brukt knekklinjer for å generere modellen. ....	45
Figur 36: Forskjellen på avrenning i DHM1 og 3. Øverst dem en vil bli omtalt som Figur 36A og dem 3 under vil bli omtalt som Figur 36B. ....	47
Figur 37: Avrenning i DHM1 som ikke er manipulert og DHM3 som er konstruert ved bruk av FKB data. ....	48
Figur 38: Avrenning fra DHM1 og DHM3, Lidar data virker og være tilstrekkelig ved lite vegetasjon som vist ved den røde linja i figuren. ....	49
Figur 39: Avrenningen fra de tre høydemodellene etter manipulasjon, hvor alle høydemodellene er manipulert med vei og stikkrenner, slik at til venstre er avrenning med lukkede stikkrenner og til høyere er med åpne. ....	52

Figur 40: Avrenningen fra de tre høydemodellene sammenliknet med bekker .....	52
Figur 41: Andel av dreneringslinjene som treffer bekkene fra FKB-dataen .....	53
Figur 42: Avrenning i felt 2 med lukkede stikkrenner til venstre og åpne stikkrenner til høyere. De to utsnittene øverst fører avrenning med lukkede stikkrenner vann over veien, med åpne føres det gjennom stikkrenna. ....	54
Figur 43: IVF kurven for målestasjon på Risvollan ved en returperiode på 200år hentet fra (Metrologisk-institutt 2015).....	58
Figur 44: Responstiden for de to feltene, hvor det mørkeste er avrenning som skjer på under 3,5 min hakket under er avrenning mellom 3,5 min og 7,5 min osv. Felt 1 til høyere og felt 2 til venstre.....	59
Figur 45: Bilde av grøft langs fylkesveien i soknedalen privat foto: Åsmund Ertshus Mathisen .62	

## Tabelliste:

Tabell 1: klasifisering av lidar.....	14
Tabell 2: Antallet forsenkinger i de tre høydemodellene.....	38
Tabell 3: KMV avvikene fra de tre høydemodellene .....	43
Tabell 4: Avrenningsfaktorer som er gitt fra (Vegdirektoratet 2014) .....	57
Tabell 5: Tabellen for IVF-kurven fra (Metrologisk-institutt 2015) kurven er fra Risvollan i Trondheim. ....	58
Tabell 6: Resultatene fra likning 5 og 6. ....	59



## 1 Innledning:

Det har de siste årene vært flere flomhendelser i Norge som har ført til at infrastruktur og hus har blitt rammet av vann på avveie. Dette gjør at Jernbanelverket, vegvesenet og NVE har startet et samarbeidsprosjekt for å skape en mer robust infrastruktur. Dette prosjektet har fått navnet Naturfare, infrastruktur, flom og skred, forkortet NIFS. Under dette prosjektet er det flere underprosjektet hvor et av dem går på flom og dimensjoneringsberegninger. Et av målene til dette prosjektet er å lage en veileder for flom og dimensjoneringsberegninger (NIFS 2014). Det vil derfor i denne oppgaven komme et bidrag til denne veilederen. Oppgaven omhandler Hydrologisk korrekte høydemodeller til bruk i flomveismodeller. Utgangspunktet for oppgaven er utarbeidet sammen med Steinar Myrabøe og Per Lars Erik Vhirén i Jernbanelverket. Problemstillingen og selve oppgaven har jeg utarbeidet sammen med veileder Jan Ketil Rød.

### 1.1 Problemstilling/forskningsspørsmål:

Som et verktøy til å prøve å finne ut hvor problemer oppstår når vann er på avveie ønsker jeg å produsere en flomveismodell ved hjelp av geografiske informasjonssystemer (GIS). Dette gjøres ved og derivere en hydrologisk korrekt høydemodell. Vann på avveie kan forklares ved at vann tar nye veier på grunn av en flomsituasjon. Når vann tar nye veier eroderer den fort nye små elvekanaler. Styrteflommer og vann på avveie er et økende problem i Norge med store materielle skader (Vatne 2013). For tiltak som søker å redusere skadeomfanget er det derfor viktig å få svar på følgende spørsmål:

1. Hvordan produseres en hydrologisk korrekt digital høydemodell? Hvilke av tre metoder gir den hydrologisk mest korrekte høydemodellen i ArcGIS?
  - a. Las datasett til raser
  - b. Topo til raster
  - c. Terrengdatasett til raster

I dette ligger også spørsmålet om hvordan (interpolasjons)metode og referansedata påvirker høydemodellen?

Med hydrologisk korrekt menes en høydemodell hvor avrenningen av vann modelleres slik overflatevann vil strømme i virkeligheten.

2. Vil det være mulig å tilføre regnvann i høydemodellen? Og hva vil responstiden og avrenning til nedbørsfeltet være ved en 200års flom hendelse?
3. Hvordan vil mitt arbeid komme til nytte for NIFS-prosjektet og Jernbanelinjen?

## 1.2 Begrensninger

I oppgaven blir det tatt utgangspunkt i at ved ekstremnedbørssituasjoner vil alt vannet renne på overflaten, altså at jorda er mettet med vann. Dette skaper en svakhet i modellen ettersom infiltrasjonsevne i jord samt drenering fra vegetasjon og jordbruk vil ha en innvirkning på mengden overflatevann og dermed hvor overflatevannet vil renne. Skulle en tatt hensyn til alle faktorer som påvirker avrenning i modellen ville modellen blitt ekstremt kompleks og oppgaven ville blitt alt for omfattende for en mastergrad. Kapasiteten på stikkrennene er også en faktor som kan påvirke modellen og gi andre flomveier. Nøyaktigheten på Lidar dataen utdelt fra jernbanelinjen er litt lavere enn ønsket da det er ca. 1 punkt per kvadratmeter. Dette kan gi litt problemer og i områder med mye vegetasjon vil muligens høydemodellen ikke vært fullt så god som ønsket. Ønsket punktetthet ville vært 2-5punkter per kvadratmeter slik som Meiforth (2013) har anbefalt. Annen data som eksisterende bekker, veier og jernbane linjer har blitt benyttet for å lage en mer hydrologisk korrekt høydemodell i områder hvor dette var naturlig.



## 2 Introduksjon:

### 2.1 Bakgrunn:

Oppgaven omhandler modellering av flomveier eller «vann på avveie med hydrologisk korrekte høydemodeller». Dette er valgt ettersom styrtflom er et fenomen som forventes å oppstå hyppigere i fremtiden (Lawrence & Hisdal 2011). Styrtflom har i flere tilfeller ført til store skader på infrastruktur og bebyggelse i dalstrøk slik som hendelsen i Gudbrandsdalen 2013. Oppgaven skrives som en del av NIFS-prosjektet (naturfare, infrastruktur, flom og skred). Under dette prosjektet er det flere delprosjekt (Dp), og denne oppgaven ligger under delprosjekt 5: håndtering av flom og vann på avveie (NIFS 2014). Under Dp.5 er det også tre underprosjekter 5.1 Flom- og dimensjoneringsberegninger i små felt, 5.2 samarbeid om tiltak ved utbygging og drift av vannveiene og 5.3 hendelser og kostnader. Oppgaven min relateres mest til Dp.5.1: flom og dimensjoneringsberegninger i små felt hvor hovedmålet er å skape en veileder for flomberegninger i små nedbørsfelt (NIFS 2014).

På grunn av økt erosjon er skredtyper i bratt terreng, og da spesielt jordskred (løsmasseskred), et forventet resultat av intens nedbør. I følge NVE vil hyppigheten til den intense nedbøren øke med 20 % i løpet av de neste 50-100 årene (NVE 2012). Ved store vannmasser er bruer og kulverter punkter som kan være kritiske, ettersom disse kan tettes slik at flomvannet tar nye veier på overflaten (vann på avveie). Når flomvannet kanaliseres bort fra det naturlige bekkeløpet risikerer en å få store skader på bebyggelse/infrastruktur nedstrøms i nedbørsfeltene (NVE 2012). Det vil derfor være viktig å få kartlagt flomveier nedstrøms for kritiske kulverter, og bruke dette som utgangspunkt ved bygging av nye byggverk. I en flomveismodell vil det være viktig å benytte seg av kulverter/stikkrenner da dette er en del av den naturlige vannveien. Hvis en stikkrenne går tett vil vannet kunne komme på avveie, det vil derfor være viktig å ha en mulighet til å modellere dette. Vann på avveie er en faktor som påvirker skred, og en flomveismodell vil kunne fungere som et verktøy som kan forhindre dette, ved å finne ut hvor problemer oppstår og hvor vannet finner nye veier. Det vil i modellen bli tatt utgangspunkt i at alt vann i området vil renne på overflaten som overvann/overflateavrenning ettersom det vil bli mer komplisert å ta hensyn til faktorer som infiltrasjonsevne, vegetasjon osv. Det vil bli tatt utgangspunkt i at vannet bare

renner på overflaten i lavbrekkene i terrenget og avdekke potensielle flomveier ved ekstremnedbør (Bratlie 2013). For å avdekke flomveier ved ekstremnedbør vil det og ha en hydrologisk korrekt høydemodell være viktig.

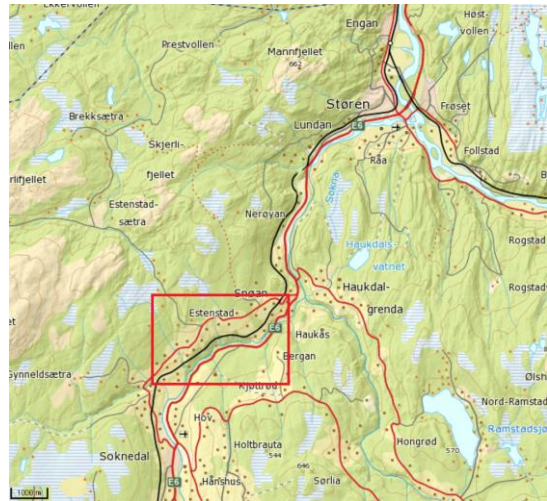
### **2.1.1 Områdebeskrivelse:**

Soknedalen ligger rett sør for Støren i Midtre Gauldal kommune. Nederst i dalen renner elva Sokna. Terrenget er preget av høye og bratte dalsider, hvor elva har erodert seg nedover. Dalskråningene er ofte høyere enn 100 m og har en hellingsgrad som varierer mellom 20-45 grader. Høyere opp i dalføret, mot fylkesveien, avtar gradienten og varierer mellom 0-20 grader helling.

Områdets vegetasjon preges av skog med bjørk og or, hvor det er store forekomster av bregner, gress og busker. På over- og undersiden av jernbanesporet er det stort sett et belte med naturlig vegetasjon som binder jorda, men det er også innslag av jordbruk eller beitemark som strekker seg helt ned til jernbanesporet. Dette utgjør en viss fare for skred da vegetasjon er med å binde jorda (Sjøvold et al. 2013).

De to nedslagsfeltene benyttet i oppgaven ligger innenfor den røde firkanten på nordvestlig side av elva Sokna vist i Figur 1. Begge feltene er ganske like når det kommer til hellingsgrad og at de strekker seg fra jernbanen og opp over fylkesveien. Felt 1 er feltet hvor det gikk et skred i 2012, som først tettet en stikkrenne hos jernbanen som førte til at vann drenerte rett gjennom fyllinga. Dette endte med at jernbanefyllinga raste ut, demte opp elva og stengte E6. Skredsåret synes ikke i høydemodellene da data som er brukt til å generere disse er fra 2008 og 2010. Felt 2 er ned mot jernbanen preget av mer vegetasjon men hellingsgrad og terrengformasjoner er tilsvarende felt 1. Begge feltene vises i Figur 2.

Store deler av Soknedalen har morenemasser, avsatt som bunnmorene ved siste istid. Den er meget tettpakket og står derfor naturlig bratt i dalsidene. Den øverste meteren i morenen er preget av tele, vanntransport og en del vegetasjon, og kan i de fleste tilfeller sees som det de kaller siltmorene. Disse morenemassene er i et geologisk perspektiv ganske unge og av naturlige årsaker vil det derfor fortsatt forekomme rasaktivitet i området (Sjøvold et al. 2013).



**Figur 1: Studieområdet hvor de to nedbørsfeltene ligger (Kartverket 2015).**



**Figur 2: De to nedbørsfeltene som har blitt brukt i oppgaven.**



## **3 Metode/teori:**

### **3.1 Teori styrtflom/avrenning**

#### **3.1.1 Styrtflom:**

Når en snakker om styrtflommer, må en skille disse fra en flom med andre årsaksforhold. I USA defineres styrtflommer som flommer som inntreffer mindre enn seks timer etter nedbørshendelsen (Georgakakos 1986). Definisjonen som brukes i USA stemmer også godt i Europa (Marchi et al. 2010). Styrtflommer kommer med andre ord plutselig, og ifølge Collier (2007) kan det i vassdrag som er mindre enn 10 km<sup>2</sup> være helt nede i tre timer fra nedbørshendelsen inntreffer til flommen oppstår. En slik hendelse forbindes ofte med korte konvektive nedbørshendelser, hvor nedbøren er svært intens og er over et begrenset område (Borga et al. 2011). Styrtflom er et lokalt fenomen som ofte oppstår i små bratte sidevassdrag. I områder med store terrengforandringer som Soknedal forsterkes også ofte nedbøren ettersom luften presses opp, avkjøles og deretter tvinges til å avgi mer nedbør. De store terrengforandringene kan også virke som et anker som konsentrerer nedbøren over et lite område, som igjen medfører at bare deler av de større vassdragene blir påvirket (Vatne 2013). Ved vann på avveie i slike områder vil det kunne forekomme hyppigere skader ved overvanns avrenning (NVE 2012).

Varsling av styrtflommer er vanskelig. Et eksempel er flommen i Ålen sentrum 15. august 2015. Her gikk folk å la seg på kvelden, og ble senere samme kveld hentet ut med helikopter (Vatne 2013). En styrtflom forårsakes av styrtregn slik at varslinger må baseres på værvarslingsprognoser, og ikke nedbør og modelleringer (Borga et al. 2011). Grunnet lav romlig og temporal skala, er beregningen av mengden nedbør vanskelig å forutsi (Siccardi et al. 2005).

#### **3.1.2 Styrtflom og klimaendring:**

For nedbørsfelt som er mindre enn 100 km<sup>2</sup> blir det nevnt at de neste 50-100 årene er det regnet med en økning på 20 % i flomvannføringen som følge av klimaendringer (Lawrence & Hisdal 2011). NVE ser allerede forandringer i flomvannføringer og økte flomskader langs mange små vassdrag. En hyppighet i ekstremnedbør har og vil føre til en økning av skader som følge av overvannsflommer (NVE 2012). Skader oppstår

ofte når vannet er tvunget til å finne nye veier. Dette er ofte en utløsende faktor for løsmasseskred, som tilfører sediment direkte ned til elvekanalen. Noe som gjør at slike flommer ofte transporterer store mengder sedimenter (Vatne 2013).

### **3.1.3 Overflateavrenning:**

Når mengden nedbør overskrider infiltrasjonskapasiteten til jordarten, blir det ikke lenger mulig for vann å infiltrere ned i jorda og overflateavrenning oppstår. Jorda er mett slik at all nedbør blir vann som renner på overflaten, og styrtflommer vil oppstå fortere. I områder hvor terrenget er preget av kraftig kupering, typiske konvekse og konkave terrengformasjoner, vil vann renne fort til bekker og føre til en vannføring som stiger hurtig (Vatne 2013). Det har vist seg at responsen til slike hendelser har vært tregere i nedbørsfelt hvor grunnvannspeilet har vært lavt, kontra i nedbørsfelt hvor jorda alt er mett med vann (Marchi et al. 2010).

Overflateavrenning er en veldig kompleks form for avrenning av vann fordi den påvirkes av tre andre faktorer i avrenningssyklusen. Disse tre faktorene er nedbør, grunnvann og vannmetning. Det er komplisert å se på avrenningen i terreng som er preget av stor helningsvariasjon. Dette er et område hvor GIS har en fordel ettersom det gir muligheten til å beskrive veldig detaljerte høydemodeller hvor overflateavrenningen kan modelleres (Maidment 1996).

## 3.2 GIS

### 3.2.1 Grunnleggende terminologi:

Geografiske informasjonssystemer er verktøy som lar oss visualisere, finne feil, analysere og bruke data til å forstå mønstre og trender i bestemte områder. GIS programvare er utrustet med funksjoner for å samle inn, redigere og analysere alle former av stedfestet informasjon. Denne typen programvare lar deg besvare spørsmål og løse problemer (Esri 2015b). Av geografiske data som brukes i GIS finnes det to grupper: raster og vektor.

#### 3.2.1.1 Raster

I denne oppgaven vil det i hovedsak brukes rasterdata for å finne flomveiene. Geografiske data lagret som raster vil si at romlig informasjon er samlet i en matrise med jevnstore celler for eksempel 1 x 1 meter. Hver enkelt celle har en verdi og en posisjon. Alle cellene innen et raster inneholder samme geografiske tema, for eksempel høydetema (Esri 2014c).

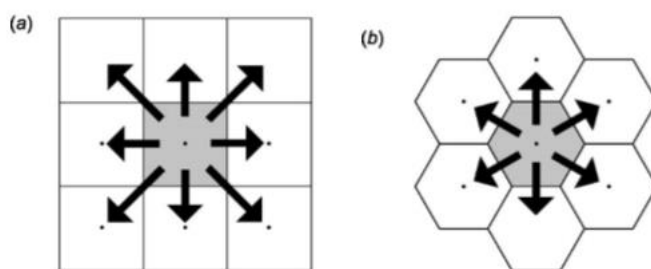
#### 3.2.1.2 Vektor:

Vektordata er en koordinat-basert modell som representerer geografiske fenomener ved hjelp av punkter, linjer og polygoner, samt egenskaper til disse geometrityper lagret i tilhørende egenskapstabeller. Hvert punkt er representert som et enkelt koordinatpar, mens linjer og polygoner er ordnet i et sett med koordinater som danner enten en linje eller en lukket polygon (Esri 2014d).

#### 3.2.1.3 Hvorfor rasterdata?

De fleste geomorfometriske applikasjoner bruker rasterbaserte høydemodeller. For eksempel er verktøyene akkumulert drenering (engelsk: *flow accumulation*) og dreneringsretning (engelsk: *flow direction*) rasterbaserte teknikker og er en viktig grunn til å bruke rasterrepresentasjoner. Rasterformatet har også fordelen med at det er enkelt å lagre store datamengder grunnet enkel lagringsstruktur. Data er også styrt av en enkelt måleenhet: en romlig størrelse (cellestørrelse). Denne enheten blir oftest oppgitt i meter og bestemmer nøyaktigheten til rasteret (Hengl & Reuter 2009). Den faste strukturen gjør det enklere å lage analytiske algoritmer, samt mer brukervennlig da en rasterbasert digital høydemodell (DHM) har en enkelt karakteristikk (Hengl

2006). Ulemper med raster er at det kan være vanskelig å representere kompleks terreng da en celle kun kan ha en bestemt verdi. Dermed er terrenget ofte underrepresentert i bratte komplekse områder mens det er overrepresentert i flate områder. Underrepresentasjon vises i Figur 11 hvor lav cellestørrelse gir bedre uttrykk for terrengets forandring slik at ved for store celler vil terrenget bli underrepresentert i bratte terrengformasjoner. Tilfellet for flate formasjoner blir da motsatt, store celler gir like god representasjon av terrenget som små celler slik at terrenget fort kan bli overrepresentert. Det er dessuten en ulempe ved rasterrepresentasjonen at det er forskjellig avstand fra senter til senter av cellene for henholdsvis diagonal- og kardinalretninger (se Figur 3). Dette skaper negative egenskaper for hydrologiske modelleringer (Hengl& Reuter 2009). Til tross for ulempene med bruk av raster veier fordelene opp. Rasterdata er et enkel og effektiv lagringsformat samt enkelheten til algoritmene gjør at bruk av raster til hydrologisk modellering er mer effektivt.



**Figur 3: Standard firkantet raster med 8 naboer og en hexagonal raster med bare 6 naboer (Hengl& Evans 2009, Hengl& Reuter 2009).**

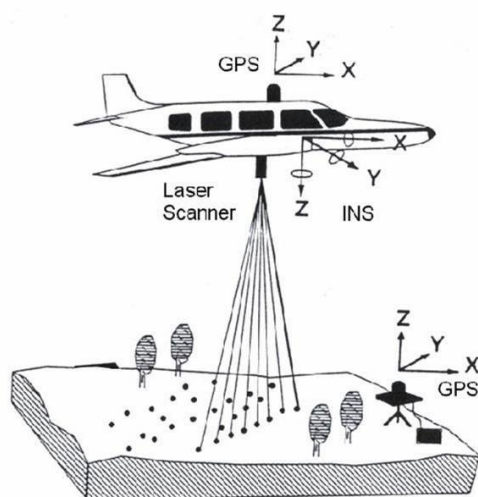
I Figur 3 vises den nevnte ulempen med avstand fra senter til senter av cellene i en firkantet raster. Det har vært noen forsøk med bruk av heksagonale rastere som har høyere kapasitet til å gi original flytretning for hydrologiske modelleringer. Det gir også en mer detaljert representasjon, men firkantede rastere vil nok fortsatt være standard for høydemodeller grunnet dens enkle og bredt aksepterte format (Hengl& Reuter 2009).



### 3.3 Lidar:

Lidar er en topografisk kartleggende skanner. Lidar data er blitt et viktig grunnlag for digital høyde informasjon, og har blitt brukt i et bredt perspektiv fra urban 3D modellering, hydrologisk modellering m.m. Men terreng modellering har vært hovedfokuset ved bruk av Lidardata (Liu 2008). Lidar er en aktiv sensor som sender ut nær-infrarøde signaler som returnerer til skanneren etter at pulsen treffer bakke, vegetasjon eller annet objekt mellom bakke og sensor. Prinsippet vises i Figur 4 og 5. Figur 4 viser et flybasert Lidar system hvor laserskanneren er festet under flyet. Det er typisk at systemet som benyttes består av tre hovedelementer, laserskanner, GPS (globalt posisjoneringssystem) og INS (internt navigeringssystem). Disse hovedelementene gir god nøyaktighet ettersom posisjonen til flyet alltid blir registrert sammen med laserdataen (Hengl& Reuter 2009).

Figur 5 viser hvordan en kan skille mellom forskjellige returnerende signaler, det er fire retursignaler fra treet, mens det femte er fra bakken. Bakke punktet er også det kraftigste signalet da det returnerende signalet varierer av sammensetning av overflaten som treffes. Slik at bakken vil gi returen en annen bølgelengde enn retur fra grener eller blader på et tre. Avstanden fra sensoren til bakken regnes ut fra tidsforskjellen mellom utsendt og returnert signal ettersom lyset beveger seg med en konstant hastighet.



Figur 4: Flybasert Lidar system hvor skanneren er festet på flyet (MSEH 2010).

Likning 1 viser hvordan avstanden til flyet blir regnet ut.

$$S = V * T$$

Likning 1

S er avstand, V er hastighet og T er tiden signalet bruker frem og tilbake (Hengl& Reuter 2009). Fra et

laserskann får en flere returnerende signaler, ofte er de første returnerende

signalene fra vegetasjon og lignende mens det siste er

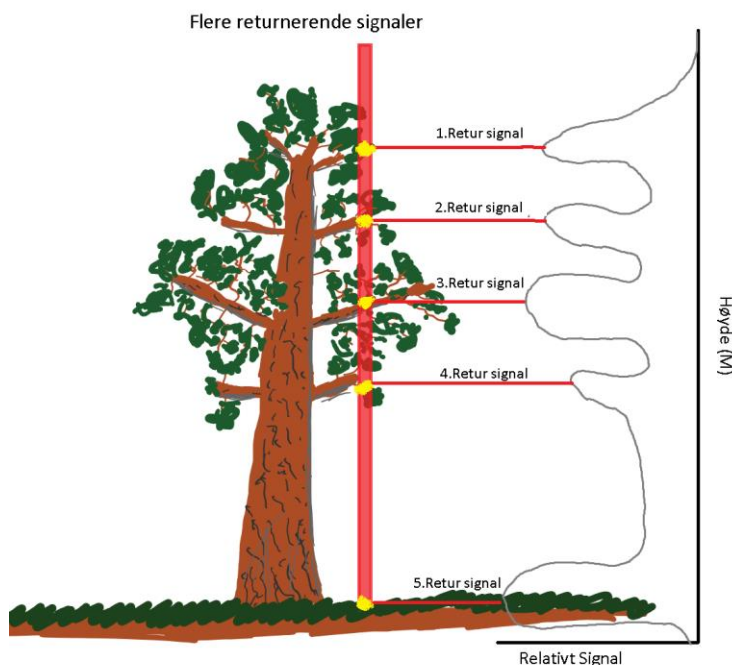
fra bakkepunkter. Dette avhenger selvfølgelig av

området som skannes. I noen tilfeller vil laser

pulsene treffe bakken direkte. For å produsere en

terrengrepresentasjon vil en filtrere ut Lidar signalene

for bakkepunkter som altså



**Figur 5: Lidar signal som sendes ned og bølgene på siden er styrken på signalet som returneres til sensoren, størrelsen på bølgene gjør at en kan skille mellom bakke og vegetasjons punkter. Prinsipp for illustrasjon hentet fra (Lohani 2015)**

vil være de sist innkommende signalene (Hengl& Reuter 2009). I Figur 6 vises to profiler av Lidar dataen benyttet i oppgaven. Profil A viser deler av punktskyen med

vegetasjon hvor dette kommer tydelig frem, og profil B viser et utsnitt av den filtrerte punktskyen. Dette viser at det er viktig å filtrere ut bakkepunktene for å konstruere en

digital høydemodell. For å kunne konstruere en digital høydemodell fra Lidar data må kun bakkepunkter filtreres ut. Det er utviklet en rekke filtreringsmetoder for dette, men

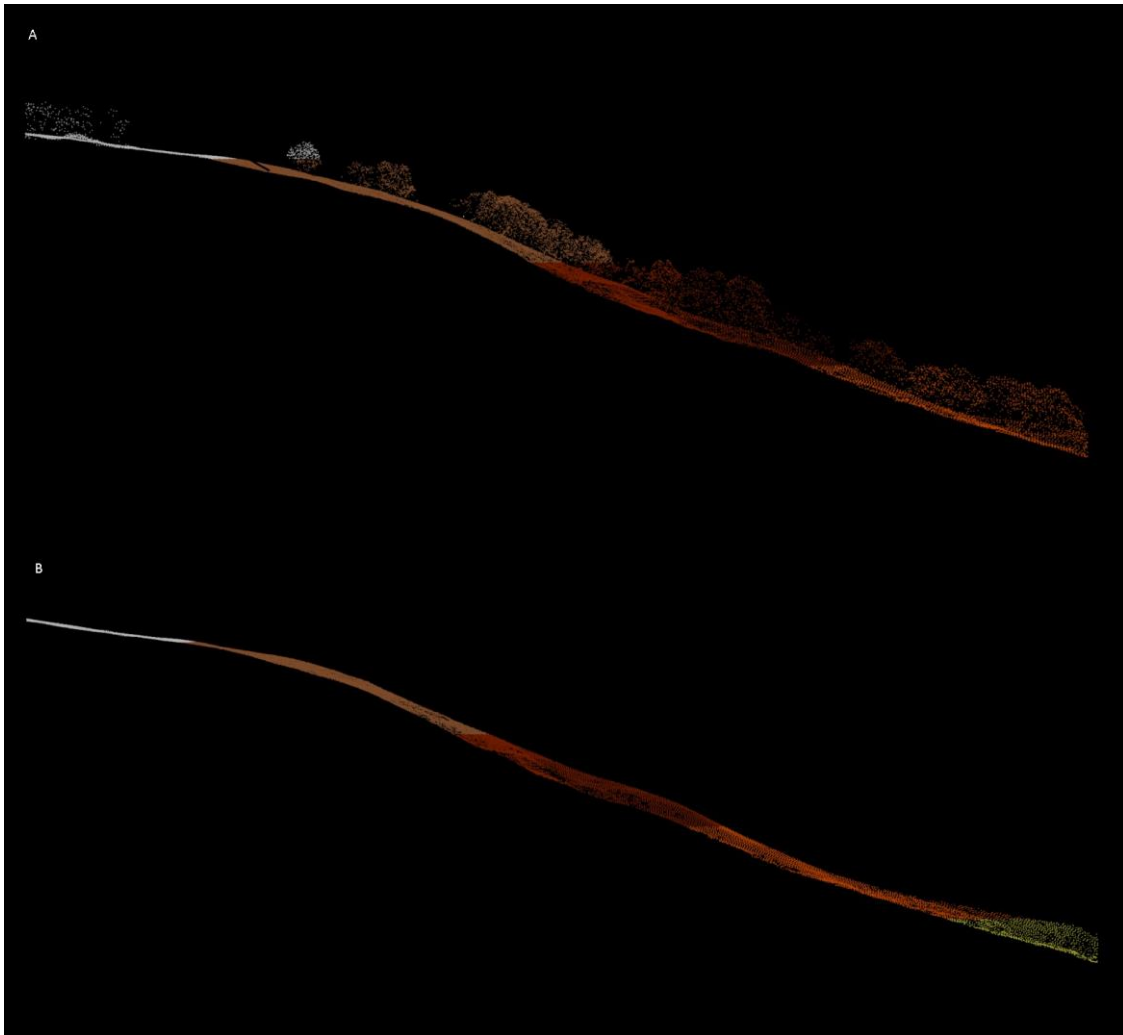
ingen automatiserte filtreringsmetoder er 100 % korrekt (Romano 2004). Ved bruk av Lidar vil spørsmålet også komme om det vil være nødvendig med supplerende

knekklinjer. Dette vil avhenge av nøyaktigheten som trengs for å kjøre den ønskede modellen (Romano 2004). Lidar er en effektiv metode som over tid har gjort det enklere

og mer nøyaktig å produsere høydemodeller og andre typer kart. Det er en fremtidsrettet metode for innsamling av data som er mye brukt til topografisk kartlegging. Den største

fordelen med bruk av denne typen data er effektiviteten og oppløsningen på de innsamlede punktene, som kan konstruere en rekke forskjellige høydemodeller

(Hengl& Reuter 2009).



**Figur 6: Profil av et utsnitt av Lidar punktsky, hvor A: ikke er filtrert for vegetasjon B: er filtrert og har kun bakke punkter**

Det finnes en rekke fordeler og ulemper ved bruk av denne typen data, som gjør det viktig å ta hensyn til noen faktorer når en høydemodell skal genereres. Svakheter ved bruk av Lidar kan være at den produserer en detaljert, men samtidig ujevn overflatemodell, noe som kan påvirke produksjonsprosessen i den form at en må filtrere ut de punktene en ønsker å bruke. Terrengets form og helning påvirker punktettheten: det vil være flere punkter per kvadratmeter i flate områder mens det vil være færre i brattere terreng. Tilsvarende som i et raster vil Lidar-data ha overrepresentasjon av terrengpunkter i flate partier og underrepresentasjon i komplekse terrengformasjoner (Hengl & Reuter 2009). Ifølge Murphy et al. (2008) vil også høyere nøyaktighet på Lidar gjøre at det blir mindre behov for interpolasjon av dataen og celleverdiene vil bli riktigere. Det vil si at jo flere punkter en har per kvadratmeter jo mindre behov vil det egentlig være for interpolasjon av terrenget.

**Tabell 1: klassifisering av lidar**

Klassifiserings verdi	Klassifiserings type
0	Aldri klassifisert
1	Uklassifisert
2	Bakke
3	Lav vegetasjon
4	Medium vegetasjon
5	Høy vegetasjon
6	Bygninger
7	Støy
8	Model Key
9	Vann
10	Reservert for ASPRS <sup>1</sup>
11	Reservert for ASPRS
12	Overlapp
13–31	Reservert for ASPRS

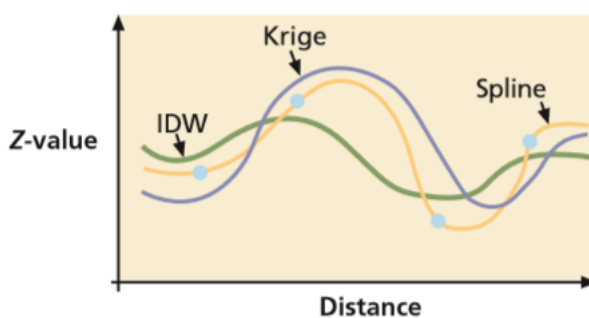
<sup>1</sup>. American society for photogrammetry and remote sensing

### **3.4 Interpolering:**

Selv om Lidar data har høy oppløsning og det er en generell punktetthet på minst ett punkt per meter, må likevel interpolasjon benyttes for å lage en mest mulig korrekt terrengrepresentasjon. Grunnen til dette er for å beregne celleverdier i områder hvor det eventuelt ikke er tilstrekkelig med datapunkter. Datagrunnlaget i oppgaven er Lidarpunkter hvor det ca. er et punkt per kvadratmeter, til tider også lavere, slik at interpolasjon var nødvendig da det er usikkert om det er et punkt for hver kvadratmeter. Interpolasjonsmetoden bruker inngangsdata (Lidarpunktsky) og beregner verdi til hver enkelt rastercelle. Hver interpolasjonsmetode som benyttes i ArcGIS har forskjellig tilnærming til bestemmelse av cellenes verdi. Valget av metode bør bestemmes av distribusjonen av innsamlede punkter og fenomenet som skal bestemmes (Childs 2004). Naturlig nabo (natural neighbour) ble benyttet, metoden er ikke nødvendigvis basert på romlig autokorrelasjon, men den tar utgangspunkt i at dataen er romlig autokorrelert. Det vil si at en tar utgangspunkt i at like datapunkter er samlet i klynger, noe som gjør at naturlig nabo interpolasjon kan ta utgangspunkt i de nære punktene å se bort fra fjerntliggende punkter (Esri 2015e). I Figur 13 ser man den ferdig interpolerte

høydemodellen fra et Las datasett (se 3.6.1). Denne modellen har kun tatt utgangspunkt i Lidarpunkter.

Forskjellen mellom interpolasjon og ekstrapolasjon er at ekstrapolasjon bruker gitte verdier til å estimere verdier utenfor det målte område. Det er en typisk måte å gjøre estimerer, men er ikke nødvendigvis nøyaktig. Interpolasjon estimerer verdier innenfor de gitte verdiene og gir en verdi til punkter hvor det ikke er referansepunkter (Esri 2015c, Esri 2015d). Forskjellige interpolasjonsmetoder kan også kalles eksakte eller ikke-eksakte. Interpolasjonsmetoder kan kalles eksakt når den estimerer verdier identisk med de målte verdiene, slik som glatte overflater (engelsk: spline) i Figur 7. Mens derimot alle andre metoder kan kalles ikke-eksakte (Hartkamp et al. 1999). Det vil da si at metodene Invers vektet avstand (IVA) og Kriging ikke nødvendigvis er eksakte men de kan være (Esri 2015h).

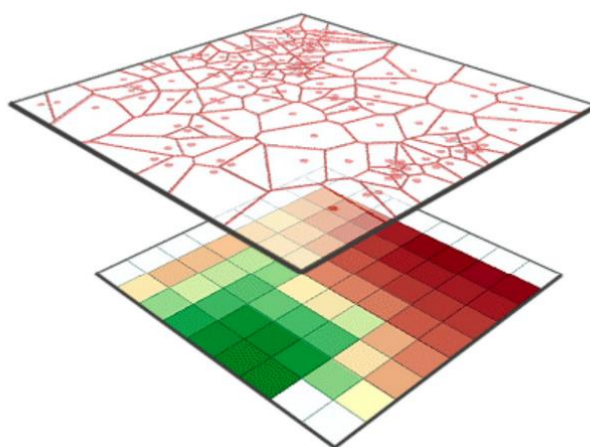


Figur 7: Forskjell mellom tre interpolasjonsmetoder (Childs 2004)

#### 3.4.1 Naturlig nabo (Engelsk: natural neighbour):

Dette er en interpolasjonsmetode som har mange positive egenskaper og kan blant annet benyttes til både interpolasjon og ekstrapolasjon, og fungerer ofte bra med en samling tilfeldige punkter. Metoden er effektiv med store punktskyer, fordi metoden tar utgangspunkt i nært liggende punkter ut fra Voronoi polygoner (se Figur 8). Metoden konstruerer et Voronoi polygon for alle inputpunktene. Bestemmelsen av verdiene i cellen bestemmes av et vektet gjennomsnitt fra cellens naturlige nabo. Vektingen er proporsjonalt til området ved estimeringen av stedets Voronoi polygon som bidro til hver naturlige nabo. Da resultatet er en raster, estimeres plasseringen ved en hyppig

avstands matrise som er lik antallet rasterceller (se Figur 8) (Childs 2004, Esri 2011e, Esri 2015h).



Figur 8: Interpolerings prinsippet ved naturlig nabo

### 3.4.2 Glattet overflate (Engelsk: Spline):

Glattet overflate er en metode som bruker en matematisk funksjon som minimaliserer jevnt over overflatens kurvatur. Bruk av denne funksjonen resulterer i en jevn overflate som går gjennom hvert punkt i punktskyen (eksakt interpolasjon). Det kan sammenliknes med en gummiplate som går gjennom hvert punkt mens den minimaliserer den totale kurvaturen til overflaten. Dette vises i Figur 7 hvor den glattede overflate trekkes gjennom alle punktene (Liu 2008). Til forskjell fra IVA tillater glattet overflate interpolerte verdier som både er over og under minimums eller maksimumsverdiene i datasettet. Dette gjør glattet overflate til en egnet interpolasjonsmetode for å finne rygger og daler, fordi den trekker seg gjennom alle punktene samtidig som den interpolerer verdier over og under maksimumsverdien (Childs 2004). Hvis en ser på Figur 7 viser spline linjen tydelige rygger og daler fordi den trekker seg gjennom alle punktene, for da å treffe neste punkt og kunne bøye linjen videre må den over/under maksimums eller minimumsverdiene.

### 3.4.3 Invers vektet avstand IVA (engelsk: IDW, Inverse distance weighted):

IVA tar utgangspunktet i at hvert punkt har en lokal innflytelse som forandres ved distanse. Slik at det benyttes en lineær vektet kombinasjon hvor bestemmelsen kun påvirkes av distanse fra området som skal beregnes. Ved at avstanden fra det bestemte punktet påvirker innvirkningen på verdibestemmelsen, nære punkter vil derfor ha høyere innflytelse enn fjernere punkter. IVA er en metode som interpolerer ut fra de

gitte verdiene, og kan derfor ikke beregne verdier over og under maksimumsverdien (Liu 2008).

#### **3.4.4 Kriging**

Sees som en gjennomsnittlig vektende teknikk slik som IVA, bare at kriging bruker mer avansert matematikk. Metoden måler avstanden mellom alle par av referansepunkter, og bruker denne informasjonen til å modellere den romlige autokorrelasjonen for overflaten som skal interpoleres. Kriging skreddersyr med andre ord beregningene til den gitte data ved å finne ut autokorelasjonen til punktene, og bruker det som faktorer i et veid gjennomsnitts estimat. Et eksempel av en overflate interpolert ved kriging vises i Figur 7 (Esri 2015h).

#### **3.4.5 Valg av interpolasjonsmetode:**

For interpolasjon av høydemodellene har naturlig nabo blitt tatt utgangspunkt i da den vektlegger nært liggende datapunkter og gir raster cellene verdi ut fra dette. Naturlig nabo er en egnet metode for grupperte, eller tilfeldige punkter, som ikke gir noe form for myke overflater slik som Spline og kriging. Dette skaper en litt grovere overflate som gir riktigere representasjon ved morfologiske egenskaper som for eksempel avrenning (Pirotti& Tarolli 2010). Metoden vil heller ikke konstruere daler, rygger eller topper som ikke eksisterer i input dataen siden de interpolerte verdien ligger innenfor verdibredden til inngangsdatasettet (Esri 2011d). I følge (Childs 2004) er metoden også effektiv og kan behandle store datamengder. Naturlig nabo er en lik algoritme som IVA som ikke nødvendigvis er eksakt slik som glattet overflate i Figur 7. Den vil ikke interpoler verdier over eller under maksimums verdiene og utelater kanskje noe. Med utgangspunkt i Lidar data vil det muligens bli for komplekst og bruke glattet overflate da den skal trekke seg gjennom absolutt alle punktene. Slik at prosesserings tiden vil bli lang og jo flere punkter jo glattere vil overflaten bli da den påvirkes mer av fjerne punkter (Esri 2012h). Siden også punkt tettheten som er vist i Figur 14 er såpass lav vil det at den henter ut et utsnitt fra referansepunktene være gunstig for å få en riktig anslått verdi.

Metodene som er benyttet for å lage høydemodellene har vært en innvirkende faktor for bestemmelse av interpolasjons metode. Ved bruk av terrengdatasett til raster var naturlig nabo og lineær interpolasjon de eneste valgene. Valget falt på naturlig nabo,

denne metoden ble derfor også benyttet ved LAS datasett til raster for å kunne ha et enklere sammenlikningsgrunnlag. Ved topo til raster bruker den en iterativ endelig differanse interpolasjons teknikk (engelsk: iterative finite difference) slik at det ikke kunne brukes lik metode på denne som de to andre modellene. Valget som ble gjort var for og lettere kunne sammenlikne resultatene, samt gjøre slik at det ikke var interpolasjonsmetoden som førte til forskjellen i høydemodellene.

### 3.5 Terreng representasjoner:

En digital høydemodell (DHM) er i GIS terminologien et raster eller vektor kart som viser høydene i terrenget for landoverflaten. For å kunne gjøre analyser som er påvirket av terrenget er en korrekt representasjon av terrenget viktig (Hengl& Reuter 2009). To representasjonsformer for DHM dominerer: regulære rasterbaserte eller irregulære vektorbaserte. I produksjon av en digital høydemodel er det generelt tre datagrunnlag som kan benyttes.

- Landmålings teknikker:
  - o Dette vil si nøyaktige punkter med X, Y, Z data som brukes til å produsere en DHM
- Eksisterende topografiske kart:
  - o En generalisering av høydelinjer, vannlinjer og liknende, med høydedata som sammen kan produsere en DHM
- Fjernmålingsdata:
  - o Hvor data punkter fra laserdata brukes til å produsere en DHM, mest brukt er laser fra fly

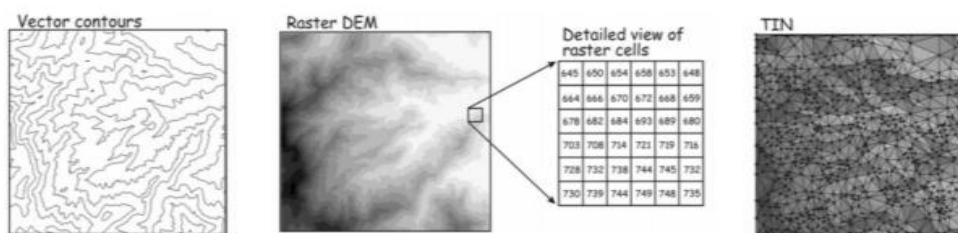
(Hengl& Reuter 2009, Nelson et al. 2009).

Det ble benyttet to av disse, eksisterende topografiske data i form av felles kartdatabase (FKB-data) og fjernmålings data i form av en Lidar punkttsky.

Det er tre dominerende representasjoner av terrengoverflater høydekurver, TIN og DHM, i oppgaven vil sistnevnte beskrives mer utdypende ettersom det er denne som vil benyttes. DHM i dette tilfelle vil være en raster basert høydemodell som bruker matrisestrukturer som registrerer topologiske relasjoner mellom datapunkter. Hver enkelt raster celle har en konstant høydeverdi, hvor verdien er hentet fra en interpolasjon av innsamlede punkter. Av de tre digitale høydemodellene er det DHM



som er den mest effektive forhold til lagring og manipulasjon av data, da den er lik lagringsstrukturene til datamaskiner (Liu 2008).



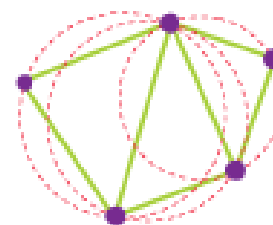
Figur 9: Tre forskjellige typer høydemodeller.

### 3.5.2 Høydekurver (engelsk: contour lines):

Dette er vektorbaserte linjer som representerer en bestemt høydeverdi langs hele linjen (Liu 2008), og er ofte benyttet i tradisjonelle topografiske kart. Disse kan også kalles isolinjer, en linje som strekker seg gjennom punkter med samme verdi. Eksempel på slik høyderepresentasjon vises til venstre i Figur 9.

### 3.5.3 TIN (trekant modell)

En trekantmodell (TIN) er en vektorbasert datastruktur som bygges opp av ikke-overlappende trekanter som brukes til å lagre og vise overflaten. Sammenhengen til trekantene er punktdata med X, Y og Z data. Disse punktene henger sammen via linjer som former Delaunay trekanter som vist til høyre i Figur 9 (Esri 2014b). Delaunays trekanter er en teknikk for å lage en flate med ikke overlappende sammenhengende trekanter fra et punkt datasett. Hver trekant har en om sirkulerende sirkel hvor det ikke er noen punkter innenfor sirkelen se figur 10 (Esri 2015g).



Figur 10: Prinsippet av Delaunays trekanter (Esri 2015g)

### 3.5.4 DHM (digital høydemodell)

Ved bruk av topografiske kart i konstruksjonen av en DHM, er det flere tematiske lag, med høydedata som kan benyttes til å interpolere en DHM (Hengl & Reuter 2009). En DHM (engelsk: DEM) er en representasjon av overflaten som betraktes som kontinuerlig, men som egentlig er en diskret representasjon. Med en gang en celle har fått en verdi, vet vi nemlig ingenting om variasjoner innad i cellen, hele cellen har en

konstant verdi. Nøyaktigheten på dataen er ofte bestemt av oppløsningen på modellen (pikselstørrelse), andre innvirkninger på DHM'en er den faktiske oppløsningen på dataen når en produserer DHM'en (Esri 2013). Ved bruk av slike modeller er størrelse på raster cellene påvirkende, jo større celler desto mer generell blir representasjonen av overflaten. Lidar data har ofte høy ansamling av punkter slik at en lett får konstruert en nøyaktig høydemodell med høy oppløsning. Lidar data blir også innsamlet i et så stort volum at en er avhengig av effektiv lagring og databehandling. Dermed er nesten alle Lidar genererte høydemodeller i raster format (Liu 2008).

Kvaliteten til en DHM påvirker analysene som skal gjøres i GIS. Til og med de mest sofistikerte algoritmene vil ikke kunne overse feil/mangler i høydemodellen. Kvaliteten på høydemodellen påvirkes av flere faktorer som:

- Terrengforandringer
- Punkttettheten av rådata (metode for innsamling)
- Raster oppløsning
- Interpolasjonsmetode
- Den vertikale oppløsningen
- Hvilken type geomorfometrisk analyse som skal utføres

Terrengets form kan ikke i noen grad forandres, og vil alltid være en innspillende faktor. Men alle de andre faktorene kan finjusteres, eller statistisk optimaliseres. Det er viktig og ikke glemme bort de fem første punktene da disse påvirker analysen i ganske stor grad (Reuter et al. 2009).

Verdiene i cellene bestemmes som oftest av en interpolasjon av kjente terrengpunkter (Liu 2008). Studier er gjort på hvilke interpolasjonsmetode som gir best mulig bilde av terrenget, men det er ikke konkludert med noe entydig svar. Slik at valget falt på naturlig nabo da det ikke så ut til å være noe entydig svar på hva som er mest korrekt. Men med en punkttetthet på ca. 0,8 m ble det tatt utgangspunkt i at det å benytte seg av en lokal interpolasjonsmetode ville fungere bra. For å skape knekklinjer i en Lidar basert høydemodell må en ha en kombinasjon av Lidar- og FKB data (Esri 2012a). En knekklinje er en distinkt forstyrrelse av helningen i terrenget som for eksempel en bekk, vei, jernbane eller liknende. Z verdien for en knekklinje kan enten være konstant eller variabel (Esri 2015b).

### 3.5.5 Cellestørrelse:

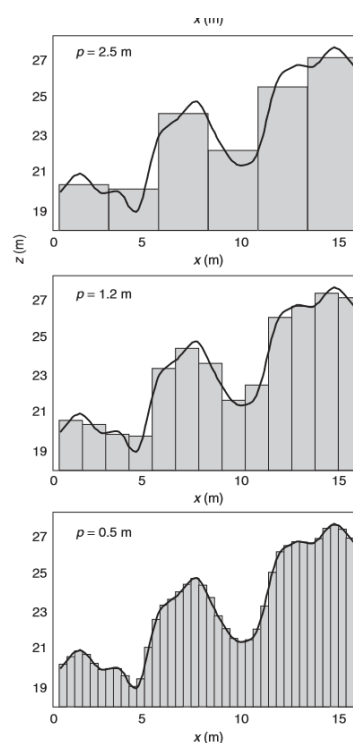
Et problem ved bestemmelse av oppløsning av raster til terreng analyser er at det kan være betraktelig forskjell mellom det faktiske terrengets forandring og topografien i en raster. Det vil si at visse topper og/eller kanaler kan forsvinne i en raster DHM, dette vises i Figur 11 (Hengl 2006). Dette vil si at terrenget er med på å bestemme oppløsningen på rasteret. Er det et flatt område vil en kanskje ikke være avhengig av en høyoppløsningsraster for å få en fin representasjon av området (Hengl 2006). Forskning har blitt gjort på hva som er den hensiktsmessige pikselstørrelse ut fra mengden Lidar-punkter. McCullagh (1988) foreslo at antallet celler skulle være ekvivalent til antallet Lidarpunkter i det bestemte område. Pikselstørrelsen bestemmes ut fra likning 2:

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad \text{Likning 2}$$

Hvor S er oppløsningen på cellene, n er antallet terreng punkter mens A = arealet for høydemodellen (Hu 2004). Dette betyr at oppløsningen på høydemodellen bør henger sammen med oppløsningen på de innsamlede terrengpunktene.

Den optimale cellestørrelsen for en DHM er den som reflekterer variasjonen til terrengets overflate og klarer å representere mesteparten av terrengets elementer (Kienzle 2004, Hengl 2006).

Cellestørrelsen kan også bestemmes avhengig av tettheten til vendepunkter. Et vendepunkt er punktet hvor kurvaturen i terrenget går fra konveks til konkav kurvatur eller omvendt (se Figur 12), dette er vist med punktene i Figur 13. Hengl (2006) ga en ide til å bestemme pikselstørrelsen ut fra terrengets kompleksitet, at størrelsen på pikselen bør være halvparten av den gjennomsnittlige avstanden mellom vendepunkter.

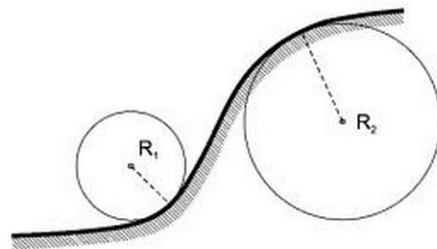


Figur 11: Påvirkningen raster oppløsningen har på terrenget representasjon (Hengl& Evans 2009).

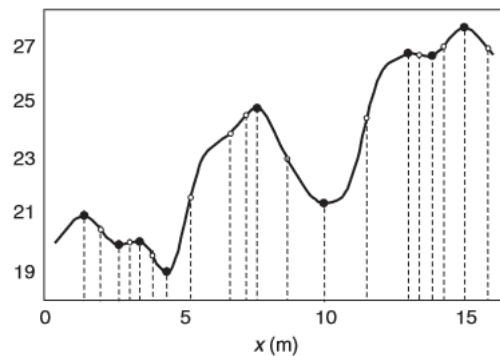
$$S = \frac{L}{2 * Np}$$

Likning 3

I likning 3 er L er lengden på området en ønsker å undersøke og Np er antallet vendepunkter som er observert. For eksempel ut fra Figur 13 hvor det er 20 vendepunkter over en avstand på ca. 16 m pikselstørrelsen vil da maksimalt være 0,4 m (lui 2008). Det vil altså så vidt være finere oppløsning enn neders i Figur 11. Men bestemmelsen av oppløsning av en DHM er også kraftig påvirket av hvilke applikasjoner som skal benyttes i modellen. Tanken bak er egentlig og bruke den oppløsningen som gir best mulig egenskaper til det en ønsker å finne ut (lui 2008). Dette kommer frem i kapittel 3.5.6.



Figur 12: Vendepunktet er der terrenget går fra konveks til konkav kurvatur (Olaya 2009)

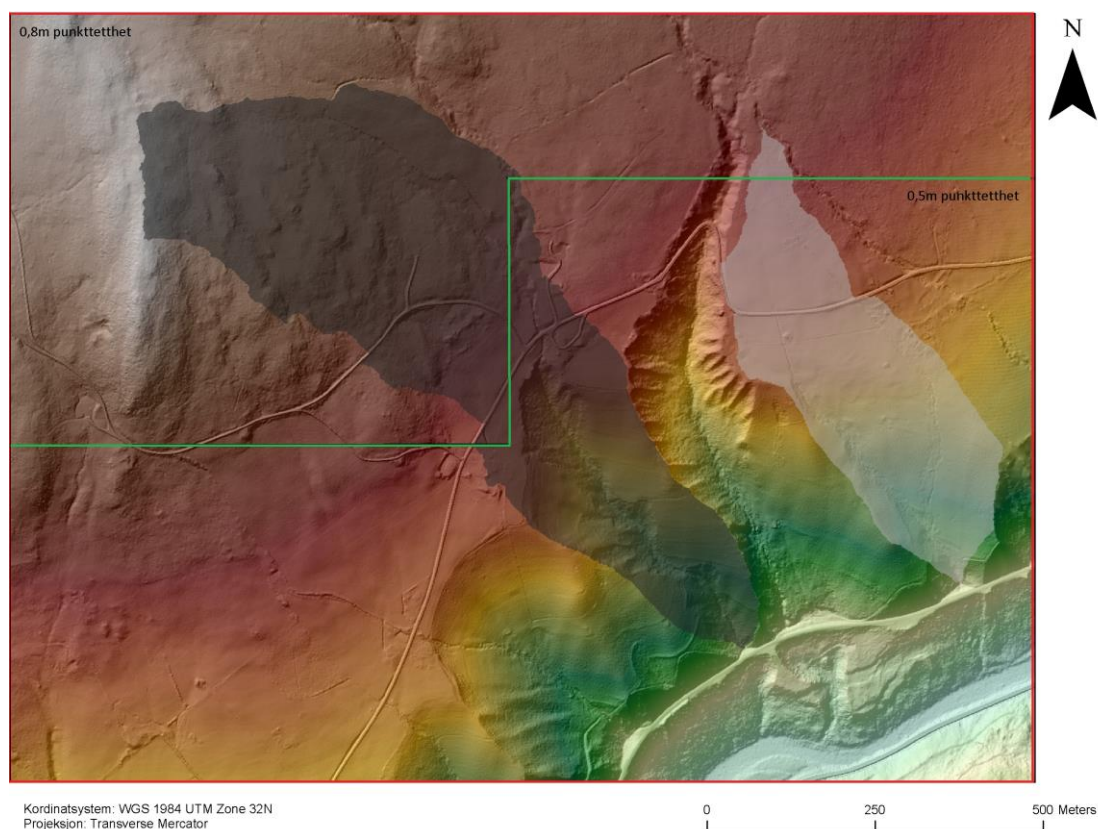


Figur 13: Oversikt over vendepunkter (Hengl 2006).

Studier er også gjort på nøyaktigheten til høydemodeller ut fra oppløsningen til rasteret. Istedenfor direkte analyser av terrenget, er ande egenskaper som påvirkes av terrenget brukt, blant annet hydrologisk modellering. Det er brukt forskjellige typer oppløsning og dette har blitt sammenliknet for å finne den optimale oppløsningen i forhold til kildedataen (Liu 2008). I en studie som er gjort hvor det er testet avrenning i et nedbørsfelt ved oppløsning fra 1m til 60 m oppløsning. Det kommer frem at nøyaktigheten for hydrologisk modellering er mer nøyaktig i høyoppløslige høydemodeller både ved lengden på avrenningen og hvor det renner (Yang et al. 2014).

### 3.5.6 Valg av cellestørrelse

Ut fra likning 2 og erfaringene fra studien som er nevnt, har valgt falt på et høyoppløselig raster. Studieområdet har stort sett data med punkttetthet på 0,5-0,9 m de ble derfor laget et kombinert datasett da det er data med forskjellig nøyaktighet. Dette kommer frem av Figur 14 hvor det er en punkttetthet på 0,5 m og 0,9 m. i det kombinerte datasettet. Ut fra likning 2 vil da den optimale cellestørrelsen for studieområdet mitt være 1,02 m da det må bli tatt utgangspunkt i den laveste oppløsningen på Lidar dataen. Det ble valgt å gjøre den til 1x1 m da bedre oppløsning gir mer korrekt hydrologisk modellering (Yang et al. 2014). En finere oppløsning vil også muligens kunne føre til et større antall forsenkninger. Stort sett er begge nedbørsfeltene dekt av den samme oppløsningen, noe mer nøyaktig rundt jernbanen hvor det stort sett ca. er 50-60 cm mellom punktene. Dette er punkttettheten etter å ha filtrert ut pakkepunkter.



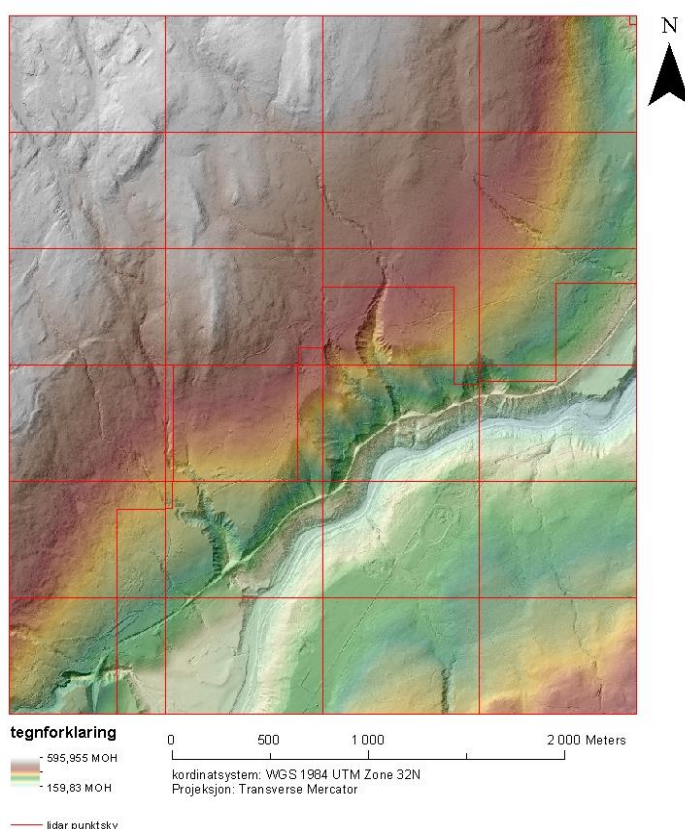
**Figur 14: Fordeling av punkttettheten over de to nedslagsfeltene, Hvor det som er under den grønne linjen har en punkttetthet på 0,5 m og det over har en punkttetthet på 0,8 m.**

### 3.6 Hydrologisk modellering:

For å kunne lage en hydrologisk modell vil en være avhengig av en hydrologisk korrekt terrengrepresentasjon. Det er flere metoder for å produsere terrengrepresentasjoner, både ved hjelp av Lidar- og FKB-data. Programpakken ArcGIS har flere forskjellige metoder en kan benytte for å prosessere Lidardata til en høydemodell. Disse kan alle benyttes, men de har fordeler og ulemper avhengig av hva en skal benytte høydemodellen til. ArcGIS har også verktøy som kan konstruere digitale høydemodeller ut fra topografiske data.

#### 3.6.1 Las datasett:

Dette gir muligheten til å produsere raster representasjoner direkte fra Lidardata, samt muligheten til å benytte seg av knekklinjer i prosessen. Et las-datasett bør benyttes hvis en har knekklinjer, i tillegg til Lidar data samt om en ikke har behovet for avanserte verktøy som kun kan brukes ved filer i en Geodatabase (GDB). I Figur 15 er det en ferdig interpolert høydemodell fra et las-datasett. De røde firkantene er las filer og sammen utgjør disse et las-datasett, et datasett som samler flere las filer.



**Figur 15:** En ferdig interpolert høydemodell fra et las datasett. Hver av de røde firkantene representerer en las fil

### **3.6.2 Terreng datasett (engelsk: terrain dataset):**

Et terreng datasett er en trekantbasert overflate (TIN) i flere målestokker som bygges opp fra data lagret i en geodatabase. Data i et terrengdatasett er ofte basert på Lidardata eller ortofoto. Et terrengdatasett er veldig godt egnet til å håndtere store datamengder og legge til og å definere egne knekklinjer i høydemodellen (Esri 2014e).

### **3.6.3 Topo to raster:**

Dette er også en metode som kan brukes til å produsere en terrengrepresentasjon. Forskjellen her er at de to nevnte metodene over bruker Lidar data mens denne metoden benytter seg av andre topografiske data, for eksempel høydekurver. Høydekurver er en av de mest ordinære måtene å lagre topografiske data på. Men bruk av høydekurver til interpolering av raster kan være problematisk ved at det er lite informasjon mellom linjene, da spesielt i flate områder (Esri 2012c). Grunnen til dette er at høydekurver benytter seg av en bestemt ekvidistanse (vertikalavstanden mellom to høydekurver)(Kartverket 2013) som fører til at det i flate områder kan det være store avstander mellom to linjer. Igjen når denne metoden brukes vil for stor tetthet med høydekurver være overflødig da flere av disse kan krysse samme utgangs celle. Da den tar utgangspunkt i alle høydekurvene, velger ut maksimalt 50 datapunkter og tar tilslutt kun og benytter seg av et kritisk punkt, til interpolasjon av overflaten. Dette vil kunne føre til problemer, slik at den ikke klarer å gi en bestemt verdi til en celle (Esri 2012c).

Dataen som er brukt i til å interpolere høydemodellen ved topo to raster:

- Høydekurver med 1m ekvidistanse
- Veilinjer
- Jernbanelinjer

Vei og jernbane linjene er brukt som knekklinjer slik at vannet vil renne de naturlige flomveiene i overvannsgrøfter.

### **3.6.4 Dreneringsretning (engelsk: Flow direction):**

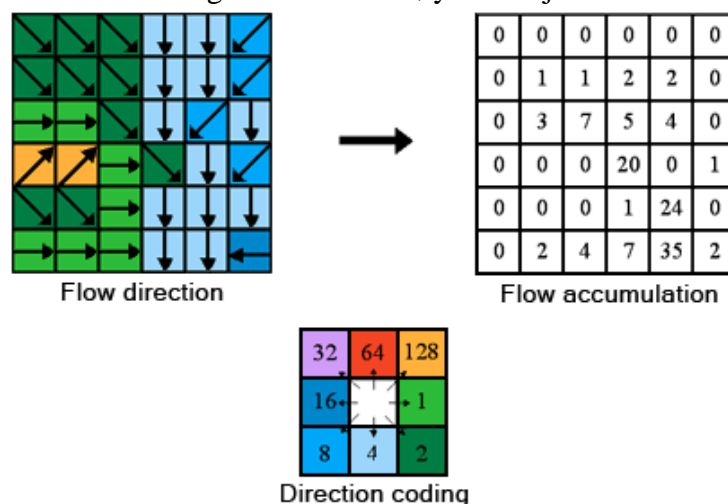
En viktig del av hydrologiske modelleringer er å bestemme hvilken retning vannet vil renne fra hver celle. Dette bestemmes med GIS-verktøyet dreneringsretning. Verktøyet tar overflaten som utgangspunkt og resultatet blir et raster hvor hver celle er kodet med



en verdi som angir retningen vannet vil renne ut fra cellen. I konvensjonelle GIS angis det åtte mulige retninger og kalles ofte for (D8) modellen (se Figur 16). Retningen kalkuleres av høyeste fall fra hver celle. Dette er den enkleste dreneringsretningsmodellen og kan også kalles metoden for mest fall (O'Callaghan& Mark 1984, Esri 2012b). Dette er en metode som tar utgangspunkt i en DHM til å vise dreneringsmønstre (Jones 2002). Metoden lar flere celler drenere inn i en celle men ikke at en celle drenerer inn i flere celler som D-infinity (Gruber& Peckham 2009). D-infinity baserer seg på den bratteste helningen ved et triangulært fasett til en blokk sentrert grid. Avrenningsretningen har blitt kodet som en vinkel i radianen mot klokkes retning som et kontinuerlig flytpunkt verdi mellom 0 og 2 pi. Avrenningen bestemmes deretter som retning for den bratteste helningen av de åtte triangulære fasettene dannet i en 3x3 grid (Tarboton 1997, Tarboton 2013). D8 er metoden som er benyttet i oppgaven.

### 3.6.5 Akkumulert drenering (engelsk:Flow accumulation):

Akkumulert drenering tar utgangspunkt i et raster med høydeverdier, det er en fokal kartalgebrafunksjon som lar vannet renne til lavbrekkene i terrenget (lavest liggende cellen rundt). Konseptet med denne analysen er og finne hvor vannet drenerer fra (Gruber& Peckham 2009). I Figur 16 ved siden av er det først en dreneringsretning raster hvor retning er kodet som vist nederst i Figur 16. En akkumulert drenerings raster er tall over antall celler som renner inn i den gitte cellen. Jo høyere tall jo mer vann vil renne inn til det gitte punktet. Celler med høy akkumulert flyt kan brukes til å finne flom veier mens de med lav akkumulert drenering kan brukes til å gjenkjenne rygger eller liknende (Esri 2011c).



Figur 16: Dreneringsretnings raster og akkumulert drenering og D8 metoden (Engelsk: direction coding) (Esri 2012b)



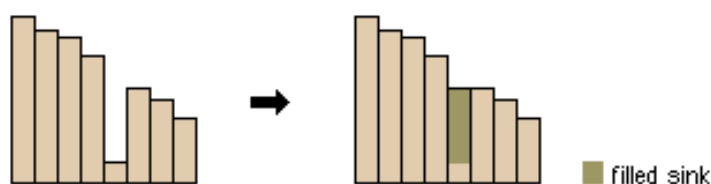
### 3.6.6 Forsenkning (engelsk: Sink):

En forsenkning er en rastercelle eller en samling av rasterceller hvor dreneringsretning ikke kan tilegnes en av de åtte retningskodene. Dette kan oppstå når alle cellene rundt den prosesserende cellen har høyere verdi eller når to celler har retning inn i hverandre, en såkalt to-celle-sløyfe (engelsk: Two cell loop). Forsenkninger i DHM har ofte en sammenheng med feil i data, ofte forårsaket avrunding av høydeverdiene til heltall. Naturlige forsenkninger kan også forekomme men disse må finnes og erfares i felt (Esri 2011b).

### 3.6.7 Fylling av forsenkning (engelsk: Fill):

For å kunne få vannet til å renne gjennom forsenkninger er det nødvendig å fylle igjen disse, ettersom de kan forårsake at avrenningsmodellene kan bli stoppet (drenerer ned i forsenkningen).

Fyll fungerer på den måten at den bruker flere verktøyer som fokal flyt (engelsk: Focal Flow), dreneringsretning, Forsenkning, nedbørsfelt og sone fyll (engelsk: Zonal Fill) for å fylle igjen forsenkninger. Figur 17 viser hvordan fyll verktøyet fyller igjen forsenkninger i datasettet.

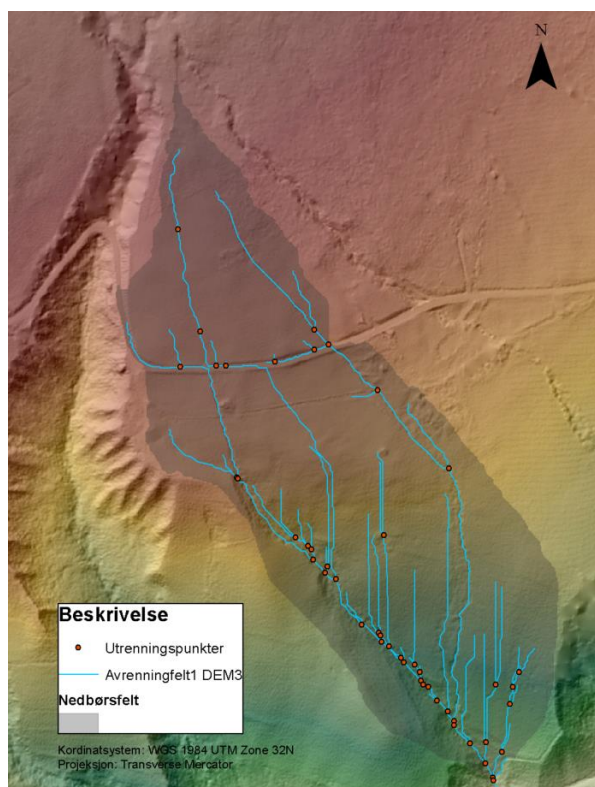


Figur 17: Hvordan fill fungerer (Esri 2011a).

Den kan også brukes til å kutte ned topper (Esri 2011a).

### 3.6.8 Nedbørsfelt (Engelsk: Watershed):

Et nedbørsfelt er et avgrenset område som bidrar til flyt av vann til et bestemt utløp. Dette nedbørsfeltet kan også være del av et større dreneringsområde. I ArcGIS kan nedbørsfelt avgrenses ved hjelp av ”watershed verktøyet”. For å kunne avgrense område er verktøyet avhengig av et dreneringsretningsraster og det må bestemmes et utløp som nedbørsfeltet genereres for. Dette kan for eksempel være elementer som en stikkrenne, en dam eller liknende (Esri 2012e). I oppgaven benyttes det stikkrenner under jernbanen som utløp ettersom



Figur 18: Nedbørsfeltet hvor det gikk ras i 2012

dette er siste fastsatte punktet før nedbørsfeltene evt treffer elva Sokna. Figur 18 viser det ene nedbørsfeltet som er jobbet med i oppgaven. De blå linjene er dreneringsnettverket, de røde prikkene er utløp (engelsk: pour points), hvert punkt har et lite nedbørsfelt. Det punktet som er brukt til å konstruere nedbørsfeltet er nederst i nedbørsfeltet og hit drenerer hele arealet. Dette punktet er en stikkrenne som går under jernbanen. Går denne tett vil hele nedbørsfeltet drenere videre inn i et annet nedbørsfelt og en har vann på avveie. Vannet vil i kunne drenere inn i en annen stikkrenne og overstige dens kapasitet evt vil også vann kunne drenere rett gjennom jernbanefyllinga.

## 4 Datagrunnlag, analyser og resultater:

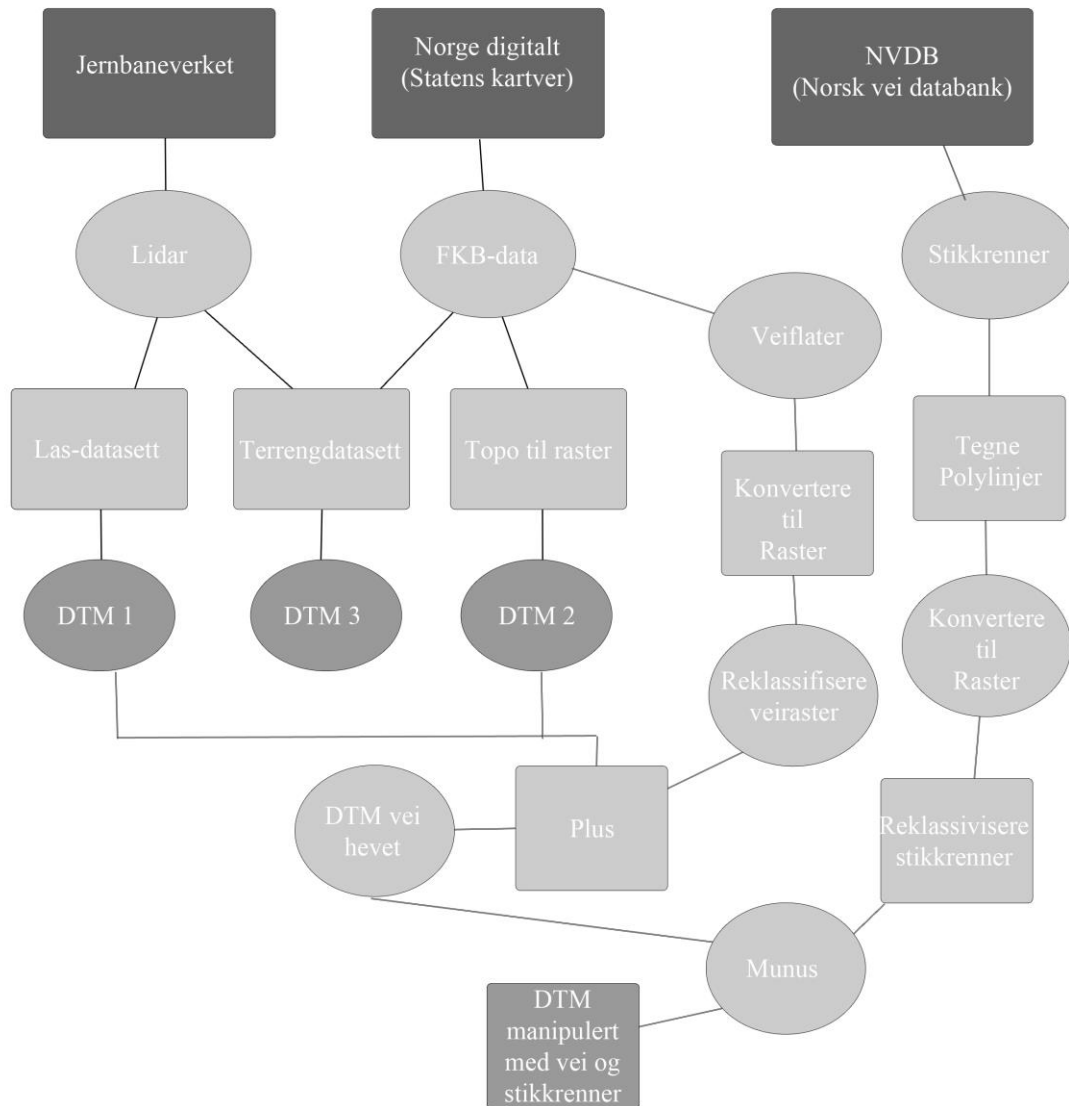
For å kunne lage en god hydrologisk flomveismodell må en ha nøyaktige data. Er data dårlig vil modellen bli dårlig, er dataen god vil modellen tilsvarende kunne bli bra (Beven 2012). Lidar punktenes nøyaktighet er viktig for om DHM'en er nøyaktig og kan brukes til å modellere flomveiene på en god måte. Laserdataen fra kartverket over Soknedal har en nøyaktighet på 1 punkt per kvadratmeter etter filtrert bakkepunkt. I følge Meiforth (2013) vil 2 punkt per kvadratmeter pluss høydeinfo fra FKB data gi grunnlag for en raster med oppløsning 1x1 m. Høydemodellen som er produsert ble manipulert ettersom stikkrenner/kulverter er en del av den naturlige flomveien. Data som dette er hentet fra JBV, SVV, kommunen og innsamlet GPS data. FKB data som er nødvendig i produksjonen av høydemodellen er vann-linje, vann-flate samt vei-linje denne dataen benyttes som en form for knekklinjer som gjør at vannet vil renne langs overvannsrør for eksempel langs veien eller jernbanen. Et vesentlig element ved dette vil være at høydeinformasjonen i FKB-dataen er riktig (har 3D geometri), slik at den kan kombineres med laserdataen i for eksempel et terreng datasett (Meiforth 2013).

Som grunnlag til flomveismodellen har det blitt produsert tre forskjellige høydemodeller:

- Kun Lidardata – Las datasett til raster
- FKB data (høyde kvoter, vannlinjer, vei- og jernbanelinjer) - topo til raster
- Lidar pluss FKB data (terrengdatasett) med vann, vei- og jernbanelinjer - Terrengdatasett til raster

Dette et forsøk på å finne hvilke av disse metodene som lager den hydrologisk mest korrekte modellen. For å kunne finne hvilken av metodene som er mest hydrologisk korrekt har drenerings akkumulerings verktøyet i ArcGIS blitt benyttet. Dette er et hydrologisk verktøy som gir inntrykk av at vannet renner der det normalt ville gjort i terrenget slik at det gir en slags pekepinn på om terrengets formasjoner er representert på en riktig måte. For eksempel om vannet renner i veigrøfter eller i bekker der dette ville vært tilfelle i virkeligheten. De er også sammenliknet med lidarpunktene ved kvadratisk middelvei forkortet KMV (se 4.7.1)

Under kommer det en beskrivelse av datagrunnlaget samt også hvordan høydemodellene er utarbeidet gjennom de forskjellige verktøyene benyttet i oppgaven. Figur 19 viser flytdiagram for konstruksjon og manipulasjon av de tre forskjellige terrengmodellene.



Figur 19: Flytdiagram for generering av høydemodellene og manipulasjonen.

## 4.1 Lidar data:

Lidar data som er benyttet for å bygge høydemodellene er tildelt fra Jernbaneverket og er samlet inn av kartverket. For området som er tatt utgangspunkt i er ser det ikke ut til å være noen negative verdier som vist i Figur 20. Med negative verdier menes Lidarpulser som kan ha returnert fra vann/hav under referanse høyden som er

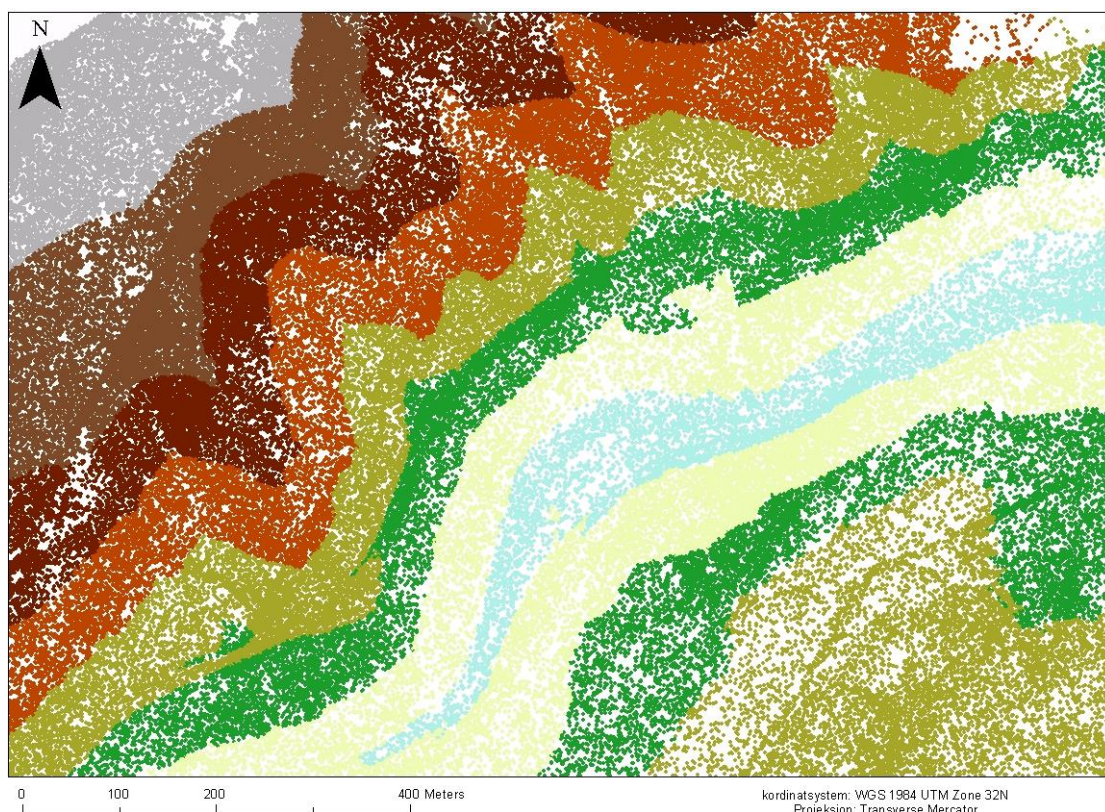
Return	Point Count	%	Z Min	Z Max
First	22 282 971	85,04	159,83	612,38
Second	3 618 236	13,61	160,31	605,40
Third	295 508	1,13	160,87	597,39
Fourth	5 879	0,02	163,78	574,70
Last	22 274 890	85,01	159,83	611,74
Single	18 656 836	71,20	159,83	611,74

Classification	Point Count	%	Z Min	Z Max	Min Int...	Max Int...	Synthe...
1 Unassigned	15 133 242	57,75	160,04	612,38	0	255	0
2 Ground	11 069 352	42,25	159,83	596,04	0	255	0

Name	Point Count	%
Model Key	0	0,00
Synthetic	0	0,00
Withheld	0	0,00

Figur 20: Egenskaper og verdier som er i Lidarpunktene

benyttet av måleinstrumentet i flyet. Jevnt over er det en punkttetthet på 0,5 m eller 0,9 m dette vises i Figur 14. Ifølge Meiforth (2013) vil det ikke være tilstrekkelig å bare benytte seg av bare Lidardata når punkttettheten er så «lav», hun mener derfor det vil være nødvendig å komplimentere med FKB data. Meiforth (2013) har gjort flomveismodellering hovedsakelig i et urbant område og er kanskje avhengig av en høyere nøyaktighet. Blant annet nevner hun at fortauskanter i modellen vil være nødvendig ettersom dette også kan styre vannet (Meiforth 2013). Vil en slik nøyaktighet være nødvendig i et ruralt område som Soknedalen? Ut fra klassifiseringen i Figur 20 har bakkepunkter blitt filtrert ut slik at det kun er bakken som representeres i høydemodellen. Dersom dette ikke hadde blitt gjort ville utfallet blitt en overflatemodell og ikke en høydemodell. Figur 6 i kapittel 3.3 viser også hvorfor en må filtrere ut bakkepunktene. Der kommer det tydelig frem at vegetasjon i stor grad ville ha påvirket høydemodellen, i og med at en tydelig ser trær ol. i profil A i Figur 6.



**Figur 21: Er et utsnitt av den filtrerte punktsky over studieområdet**

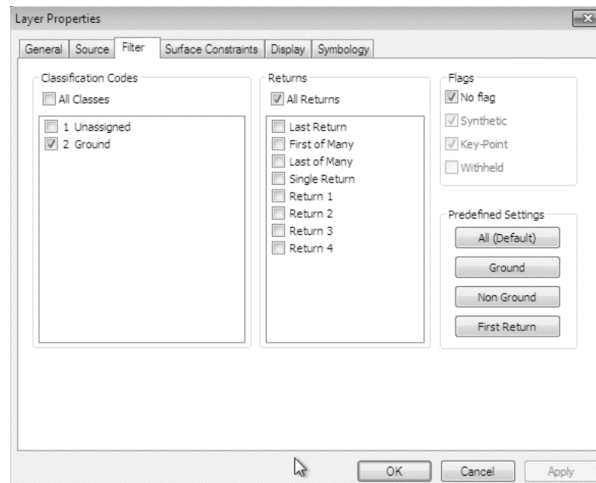
Etter å ha filtrert ut bakkepunktene er det igjen 11 069 352 punkter, Figur 21 er et utsnitt av denne filtrerte punkt skya som vil brukes som grunnlag for to av de tre høydemodellene.

## **4.2 Valg og konstruksjon av digitale høydemodeller:**

### **4.2.1 DHM1 (Las datasett til raster):**

DHM 1er bygget opp ved bruk av Lidardata. Denne modellen er bygget ved hjelp av verktøyet ”las datasett til raster” som er i programpakken ArcGIS. Las filene er først lagt inn i et las datasett hvor klassifisering av punktene er lagt inn. Det er her viktig at en velger at Las datasettet kun skal vise bakke punkt, hvis ikke vil det bli en digital overflatemodell og ikke en digital høydemodell (Esri 2013). Dette fordi den da også vil benytte seg av returpunktene fra trær, bygg og lignende. Dette er grunnen til at det er valgt å kjøre det via et las datasett da dette fungerer som et filter, ved å spesifisere at en ønsker bakkepunkt som eneste data i egenskaps dialogboksen til Las datasettet som vist i Figur 22 (Esri 2012f).

Resultatet til høydemodellen vil kun avhenge av nøyaktigheten til Lidar dataen og interpolasjonen. Esri skriver at hvis piksel størrelsen er tre ganger så stor som punkt avstanden vil de fleste feilene bli luket ut med mindre punktene kommer fra vann. Det vil derfor være viktig å vite om punkt avstanden gjelder for bare bakke punkter eller om det gjelder alle punktsignalene. Cellestørrelsen er



**Figur 22: Valg/filtrering av bakkepunkter fra Lidardataen**

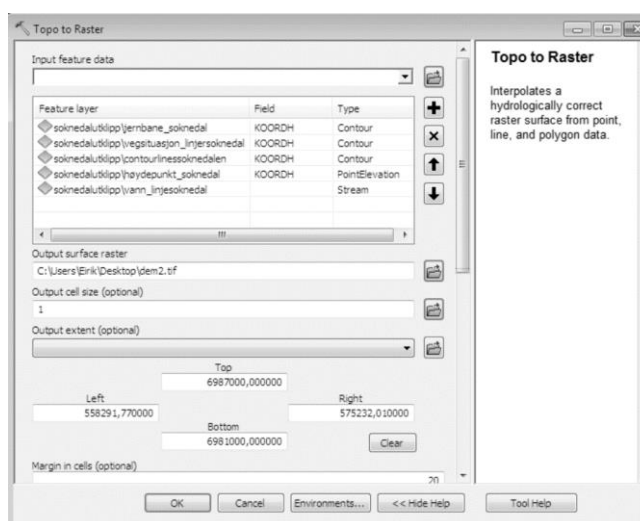
regnet ut via likning 2 og beskrevet hvorfor i avsnitt 3.5.6. Dette er viktig fordi punkt tettheten kan være lavere ettersom det kan være færre punkter som kun er bakke signal. Punkt tettheten kan hentes fra egenskapene til Las datasettet (Esri 2014a).

Etter at verktøyet LAS datasett til raster er kjørt vil en være avhengig av å bearbeide resultatet ytterligere. Kunstige forsenkninger må fylles igjen. Slik at modellen vil være hydrologisk sammenhengende. Forsenkninger kan drenere store deler vann å stoppe modellen. Da det ble tatt utgangspunkt i likning 2 har Esri sin anbefaling vedrørende cellestørrelse blitt sett bort fra. Mer nøyaktig raster kan gi et hydrologisk mer korrekt resultat (Yang et al. 2014).



#### 4.2.2 DHM2 (Topo til raster):

DHM2 er bygget opp ved hjelp av FKB data, Her er det brukt høydekurver med 1m ekvidistanse samt vei og bane linjer. Verktøyet som er benyttet er «topo til raster» som i følge Esri skal interpolere en hydrologisk korrekte høydemodell fra punkter, linjer og polygondata (Esri 2012c).



Figur 23: Topo to Raster interface

Ved bruk av «topo to raster» velger en hvilke «type» de forskjellige FKB dataene er slik at høydemodellen interpoleres riktig. Som vist i Figur 23 har høydelinjer, vei og bane har fått høydekurve som «type». Dette fordi dette var den eneste «type» i metoden som var nært liggende til et vanlig linjetema og det ikke er noen egen «type» for dette som for bekker (stream). Field er hvilke felt i egenskapstabellen som skal benyttes til å interpolere høydemodellen. Naturlig nok er det høydeverdiene til de forskjellige FKB dataene som her er benyttet. Da vei og jernbanelinjer har høydeverdier ble det tenkt at disse også kunne ha høydekurve som «type». Men da disse ikke er isolinjer vil det ikke bli det samme. Hensikten er at de skulle brukes til å lage knekklinjer slik at vannet vil renne i grøftene langs veien. Topo til raster bruker en iterativ endelig interpolasjonsmetode hvor den bruker prinsipper fra flere metoder. (Esri 2012c, Esri 2015a).

Resultatet fra denne prosessen vises i Figur 27B. Dette resultatet ble ikke helt som ønsket. Det ble derfor også laget en høydemodell på denne måten med kun bruk av høydekurver og i ettertid manipulert høydemodellen som vist i kap. 4.6. Det at vei og jernabene linjer ikke er isolinjer slik som høydekurver kan ha ført til dårlige resultater fra denne metoden. Dette er noe en burde ha tatt i betraktning før verktøyet ble kjørt.



### 4.2.3 DHM3 (Terrein til raster):

DHM3 bygges opp ved hjelp av Lidardata og FKB data, via et terrengdatasett. Det er de samme Lidarpunktene som benyttes i denne høydemodellen som ble brukt i DHM1.

For å kunne lage et terrengdatasett må en begynne med å lage et feature datasett i benyttet geodatabase. Lidardataen som skal benyttes i et terrengdatasett, må konverteres til masspoints. Dette gjøres ved hjelp av verktøyet "Las to masspoint" i programpakken ArcGIS. Disse punktene lagres i featuredatasettet i geodatabasen. Når dataen konverteres skal den gjennomsnittlige punktavstanden skrives inn samt valg av

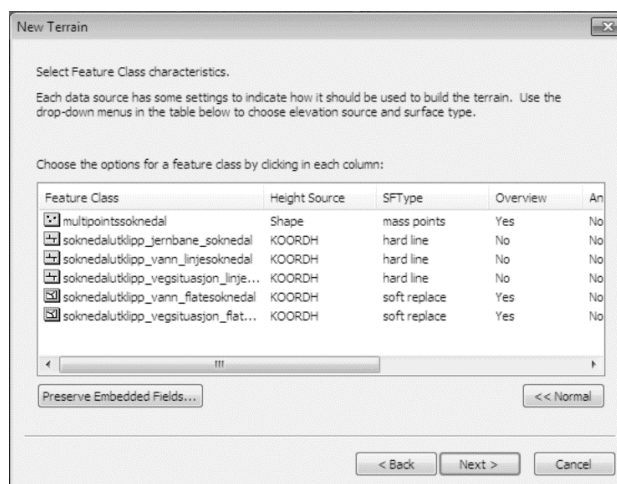


Figur 24: Las to multipoint interface

hvilke klassifisering som benyttes som bakkepunkt i lasfiler. Klassifiseringsverdi 2 er valgt som vist i Figur 24 fordi dette går som bakke punkt i las klassifisering vist i tabell 1. Når multipunktene er konstruert, blir de lagret i feature datasettet i den lokale geodatabasen. Deretter blir FKB dataen som er

- Vei, bane og vann linjer
- Vei og vann flater

sett over for å se om høydedataen stemmer med laserdataen, når dette er gjort importeres disse filene inn i featuredatasettet (Meiforth 2013). Når alle filene som skal brukes ligger i datasettet, begynner en å bygge et terrengdatasett.



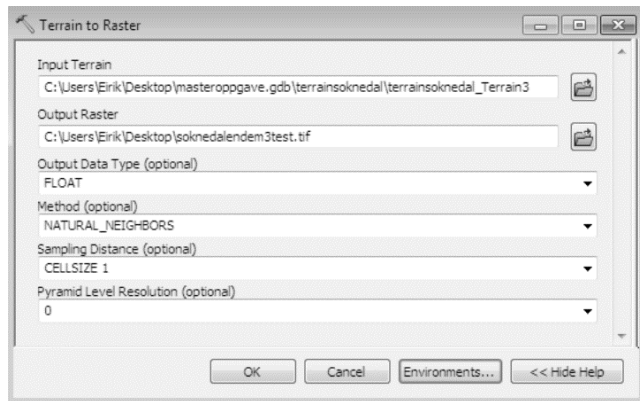
Figur 25: Egenskapene til de forskjellige elementene som skal være med å bygge Terrainet

Terrengdatasettet bygges ved hjelp av dataen som nå ligger i datasettet,

via det som kalles terrain wizard i ArcGIS. I terrain wizard begynner en først med å velge hvilke data som skal være med å bygge terrenget, og deretter hvilke egenskaper de forskjellige elementene skal ha når terreng datasettet bygges som vist i Figur 25. Et viktig element som hører med når en velger egenskapene til elementene er at riktig felt

fra egenskapstabellen velges. Slik at en bruker høydedataen til FKB dataen og ikke for eksempel vei nr eller liknende.

Når terrenget er bygget, bruker en terreng til Raster for å konvertere det til en raster basert høydemodell. Til den raster baserte høydemodellen velger en egenskapene en



Figur 26: Terreng til raster egenskaper og Interface

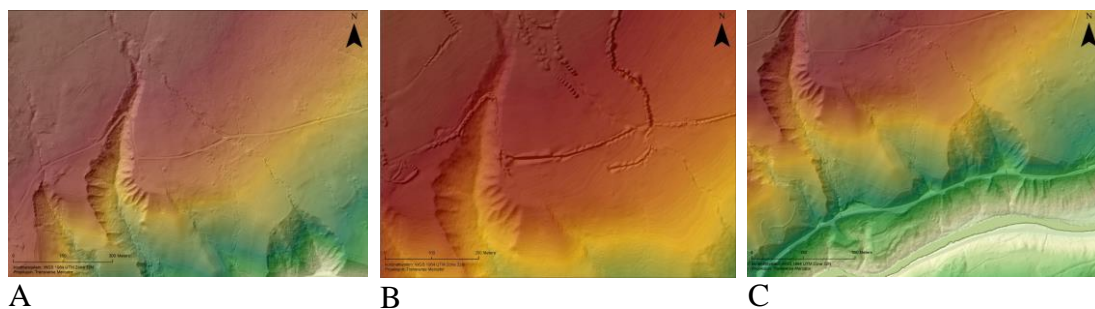
ønsker for å få en mest mulig hydrologisk korrekt terreng modell. Figur 26 viser hvilke egenskaper som er benyttet ved produksjonen av raster modellen. Når terreng til raster har gjort seg ferdig, brukes verktøyet fyll for å fylle forsengkinger slik at modellen blir mer hydrologisk

korrekt. Som vist i Figur 26 har interpolasjonsmetoden naturlig nabo blitt valgt, hvorfor er beskrevet i avsnitt 3.4.4.

### 4.3 Resultat fra konstruksjon av høydemodeller:

#### 4.3.1 DHM1:

Som nevnt over ble denne høydemodellen konstruert kun ved bruk av Lidar data, og resultatet ble egentlig ganske tilfredsstillende. Nøyaktigheten på Lidardataen var muligens noe lav. I åpne områder hvor det er lite vegetasjon ble resultatet bra. Så fort det var mer forstyrrelser for Lidarmålingene som vegetasjon ble resultatet noe dårligere. Elementer som vei grøfter ble ikke representert like godt i høydemodellen (se Figur 35). Stikkrenner er heller ikke blitt generert i denne høydemodellen. Resultatet av denne høydemodellen vises i Figur 27A



Figur 27: Et utsnitt fra de tre høydemodellene A: DHM1, B: DHM2 og C: DHM3

Videre har det blitt valgt å manipulere DHM1 for å gjøre denne mer hydrologisk korrekt. Manipulasjonen gjort på høydemodellene var å heve veiflater for å få tydeligere veigrøfter og deretter senke stikkrenner for å føre vannet gjennom naturlige veier i flomveismodellen. Dette er også delvis gjort fra felt erfaringer høsten 2014, da grøftene nylig hadde blitt utbedret.

#### **4.3.2 DHM2**

I denne høydemodellen er det litt usikker på hva som har skjedd. Resultat fra denne ble ikke noen god høyderepresentasjon og velger derfor ikke å gå videre med å bruke denne. Som en ser i Figur 27b har veiene blitt tydelige knekklinjer men disse knekklinjene er ikke modellert som en naturlig vei slik som i Figur 27a og c. Terrenget generelt har blitt derivert ganske godt, resultatet ble ganske likt så lenge avrenningen ikke traff infrastruktur.

Det har derfor blitt laget en høydemodell med denne metoden uten noen former for knekklinjer før den i ettertid ble manipulert ved å heve veien og senke stikkrenner. Dette er gjort fordi terrenget ble generert relativt bra, slik at dialogboksen i Figur 23 kun har inngangsdata av høydekurver.

#### **4.3.3 DHM3**

Som skrevet i 4.4 ble denne høydemodellen laget ved hjelp av Lidar samt FKB data som veilinjer, vannlinjer, og jernbanelinjer. Resultatet ble mer tilfredsstillende enn høydemodell 1 hvor det kun ble brukt Lidar. Bruddlinjene som ble brukt i form av veilinjer osv. supplerte høydemodellen i områdene hvor DHM 1 ikke var god nok spesielt der det var vegetasjon tett opp mot veien. Dette resultatet vises i Figur 27C. Fra Figur 27 er det vanskelig å si noe om modellene er hydrologisk korrekte, annet enn estetisk fin derivering av terrenget.

#### 4.4 Forsenkninger:

For å kunne vise hvilke av metodene som konstruerer den hydrologisk mest korrekte modellen uten noe preparering kan en kjøre ”forsenkings verktøyet” i ArcGIS for å finne antallet forsenkninger i høydemodellen. Forsenkning har blitt kjørt for hele arealet av høydemodellene som er på 11,52 km<sup>2</sup>.

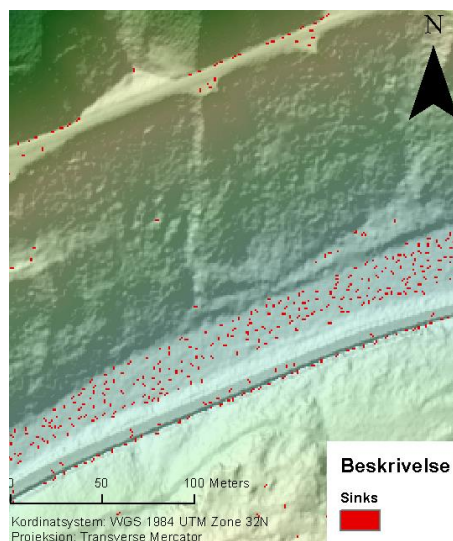
**Tabell 2: Antallet forsenkninger i de tre høydemodellene**

DHM1	DHM2	DHM3
26487	1013	1604

Ved kun å se på tallene i Tabell 2 ser det ut til at Topo til raster (DHM2) fjerner flere forsenkninger og lager en mer hydrologisk korrekt høydemodell. Metoden fjerner forsenkninger ved en tvunget drenerings algoritme ved interpolasjonen. Noe som vil føre til færre forsenkninger i den ferdige høydemodellen. Men det er vanskelig å si at

den er hydrologisk mer korrekt uten å faktisk ha kjørt en avrenningsmodell. Men det er også i denne høydemodellen benyttet annen inngangsdata enn for de to andre høydemodellene. Las datasett til raster (DHM1) fjerner tydelig færre forsenknings enn hva både topo til raster (DHM2) og terrengdatasett til raster (DHM3) gjør. Det er generelt flere enkeltstående forsenkninger fra las datasett til raster (DHM1), men disse ser ut til å være på steder hvor det enten naturlig ville samlet seg litt vann eller hvor vann høyst sannsynlig ville

filtrert ned i bakken. Når en derimot ser på plasseringen av forsenkninger i DHM 2 og 3 ser det ut til at forsenkninger er plassert i områder langs grøfter eller steder langs jernbanen hvor det er stikkrenner og er en naturlig senkning hvor vannet vil renne gjennom og under veien eller jernbanen. Det er også tydelig at det er høy ansamling av forsenkninger i elva Sokna, men siden dette er i bunnen av dalen vil ikke disse påvirke analysen. Figur 28 gir et utsnitt av hvor det er forsenkninger i DHM1.



**Figur 28: Et utsnitt av et område med mange forsenkninger i DHM1, særlig høy ansamling er det i elva**

## 4.5 Redigering av høydemodellene:

Når en bruker høydeverdier til å generere en høydemodell vil elementer som bruer og kulverter fungere som sperrer slik at disse bør implementeres for riktig avrenning (DHI 2012).

Avrenningsresultatene fra DHM 1 viste ganske naturlige egenskaper vist i Figur 36 denne høydemodellen er som nevnt interpolert kun ut fra Lidarpunkter og ikke noe annen data. Det ble derfor valgt å heve veien for å få mer korrekt høydeverdi for denne slik at høydemodellen skal bli mest mulig hydrologisk korrekt. For å få avrenningen dit den faktisk vil renne i virkeligheten er det også behov for å manipulere og senke stikkrennene.

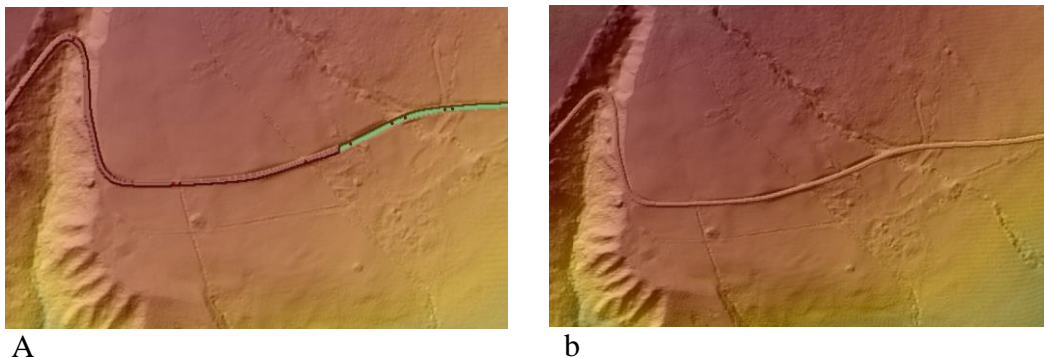
### 4.5.1 Manuell forbedring av høydemodell med FKB-data

For å forbedre DHM 1 ved hjelp av veidata det ble først prøvd å integrere z verdien fra veien. Dette ved å konvertere veiflatene til raster, deretter gi den samme areal som høydemodellen. Cellene som var rundt veiene ble gitt verdien null ved hjelp av reklassifiseringsverktøyet.

For å lage en høydemodell hvor høydeverdiene er hentet fra vei der det er vei og fra terreng der det er terreng, ble rasterkalkulator brukt med en betingelsesoperator. Utrykket i rasterkalkulatoren ble skrevet som følger:

$$\text{Con}(if \text{ rasterVei} == 0, \text{ Høydemodell}, \text{ minraster})$$

Det vil si at hvis *rastervei* har høyde 0 henter den verdi fra høydemodellen, hvis den har verdi annet enn 0 henter den høydeverdien fra vei. Resultatet fra dette vises i Figur 29A. Figuren viser at veien noen steder ble hevet og dette gav et tilfredsstillende resultat. Andre steder ble veien imidlertid lavere enn høydemodellen og laget en slags bred dreneringsgrøft noe som kan tyde på feil i høyde verdien til veidataen.

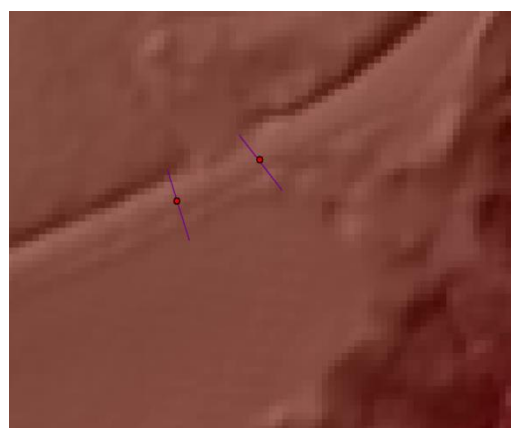


**Figur 29:** Samme utsnitt av DHM1 hvor A ene er hevet med z-verien fra vei dataen, mens B er veien hevet manuelt med 1m

Ettersom veien ikke ble generert som ønsket ved å hente veiflatenes z-verdi, ble det valgt å prøve å reklassifisere veiflatene til en bestemt verdi i dette tilfelle 1 og omliggende celler til 0. Dette ble gjort for å kunne heve veiflatene med en bestemt verdi. Den ble hevet med 1 m fordi reklassifiseringsverktøyet ønsket hele verdier, selv om det ville vært ønskelig å bare benytte seg av 0,5 m. Kartalgebra funksjonen pluss ble så benyttet for å legge på verdien fra valgt raster. I dette tilfelle legger den på 1 m på høydemodellen der det er vei. Noe som fører til at veien heves 1 m og gir en tydeligere knekklinje. Dette ble gjort for å se om en kunne få et bedre resultat ut fra høydemodellen med Lidar data ved enkelt å gjøre en manuell manipulasjon. Et utsnitt av resultatet er vist i Figur 29B her ser en tydelig veien i høydemodellen. Etter at dette ble gjort har stikkrennene manuelt blitt generert dette forklares i 4.6.2. Resultatet med avrennings modellen med og uten stikkrenner vises i Figur 39.

#### 4.5.2 Manuell generering av stikkrenner:

For manuell generering av stikkrenner kan en benytte seg av linjetema. Dette gjøres ved å lage et nytt karttema, starte redigeringsverktøyet og tegne linjer på tvers av veien der det er stikkrenner (se Figur 30). Linjene må tegnes manuelt for hver stikkrenne før de konverteres til raster. Her må en velge hvilke utbredelse rasteret med linjene skal ha via egenskapene til verktøyet.

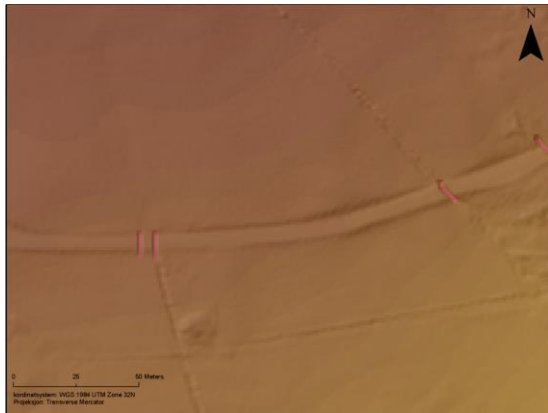


**Figur 30:** Linjer som representerer stikkrenner

Dette er gjort for å være sikker på at stikkrenne rasteren dekker det samme området

som høydemodellen. Ut fra dette er det da sørget for at disse rasterene går kant i kant, slik at det ikke blir noe avvik på plasseringen til stikkrennene.

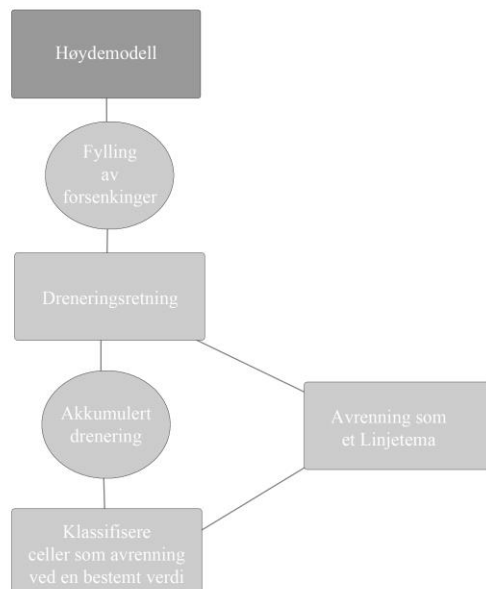
Videre må en reklassifisere data slik at verdien til stikkrennene er 10 og resten av området som dekkes har verdien 0. Grunnen til at stikkrennene får verdi 10 er fordi en stikkrenne normalt ligger lavere enn veien. Denne verdien kan forandres og tilpasses til datasettet som det jobbes med, men er gitt som en anbefaling av (Meiforth 2013). Deretter brukes minus verktøyet med DHM som inngangsraster #1 og rasteret for stikkrennene som inngangsraster # 2 slik at verdiene fra



**Figur 31:** viser stikkrennene som er generert manuelt ved linjetema, de rosa linjene viser rasteret en genererte fra.

stikkrennene trekkes fra og senkes. Videre brukes verktøyet fyll for å fylle igjen forsengkninger som eventuelt har kommet fra generering av stikkrennene. Et utsnitt av genererte stikkrenner i DHM1 er vist i Figur 31.

#### 4.6 Avrenningsmodellering:



**Figur 32:** Flyttdiagrammet benyttet til flomveismodelleringen i de tre høydemodellene

Figur 32 viser flytdiagrammet som er benyttet for å modellere avrenning i de forskjellige høydemodellene. Inngangsdataen en trenger er en av høydemodellene som vist i Figur 27. Modellen fyller igjen forsenkninger, bestemmer dreneringsretning og akkumulerer drenering. Videre bestemmes verdien som avgjør om cellene klassifiseres som avrenning. En verdi som vanligvis er benyttet er 5000, det vil bety at celler med høyere akkumulert drenering enn 5000 blir klassifisert som avrenning. De resterende cellene vil klassifiseres som overflate vann til flomveiene. Jo høyere tallet er jo flere celler vil være med på avrenningen og mer vann vil flyte gjennom denne cellen. Ved verdi 5000 på en 1x1 m raster vil det si at  $5000 \times 1 \times 1 = 5000 \text{ m}^2$  minimum drenerer inn i hver celle klassifisert som avrenning (Olivera et al. 2002). Dette er en avgrensing som kan gjøres selv og tilpasses dataen, men 5000 så ut til å gi et godt resultat i dette tilfelle.

Det siste som vises er at avrenning blir konvertert til et linjetema fra avrenningen vist i raster. Det vil si at den akkumulerte drenerings rasteren har blitt konvertert og representeres på en finere måte. Disse linjene vises i Figurene i resultatene som avrenning enten med åpne eller lukkede stikkrenner (se Figur 39).

## 4.7 Vurdering av nøyaktighet for høydemodeller:

### 4.7.1 Kvadratisk middelvei (Engelsk: Root mean square error, RSME):

Kvadratisk middelvei (KMV) kan forklares som et mål på forskjellen mellom kjente- eller estimerte/interpolerte verdier. Det finnes flere metoder for å beskrive avvik på høydemodeller men KMV er en av de mest standardiserte metodene. En finner KMV ved hjelp av likning 4 hvor en tar roten av forskjellen ved målt verdi og estimert verdi for de samme punktene (Hengl & Reuter 2009).

$$KMV = \sqrt{\frac{\sum(Z_{\text{verdier målt}} - Z_{\text{verdier estimert}})^2}{n \text{ (antallet punkter)}}} \quad \text{Likning 4}$$

KMV indikerer hvor nært høydemodellen ligger de målte verdiene. Jo nærmere null denne feilen er jo bedre bør høydemodellen være.



KMV ble regnet ut ved 11 000 tilfeldig valgte punkter (0,1 % av Lida-punktene), hvor den målte verdien var Lidarpunktene. Verdier fra høydemodellene ble hentet ut for de samme punktene for å kunne finne KMV. Dette er gjort for å kunne si noe om hvor korrekte høydemodellenes representasjon er. KMV ut fra de tilfeldig valgte punktene fra lidardataen og høydemodellene vises i tabell 3.

**Tabell 3: KMV avvikene fra de tre høydemodellene**

DHM1	DHM2	DHM3
0,000 007 1	0,000 086 5	0,000 017 5

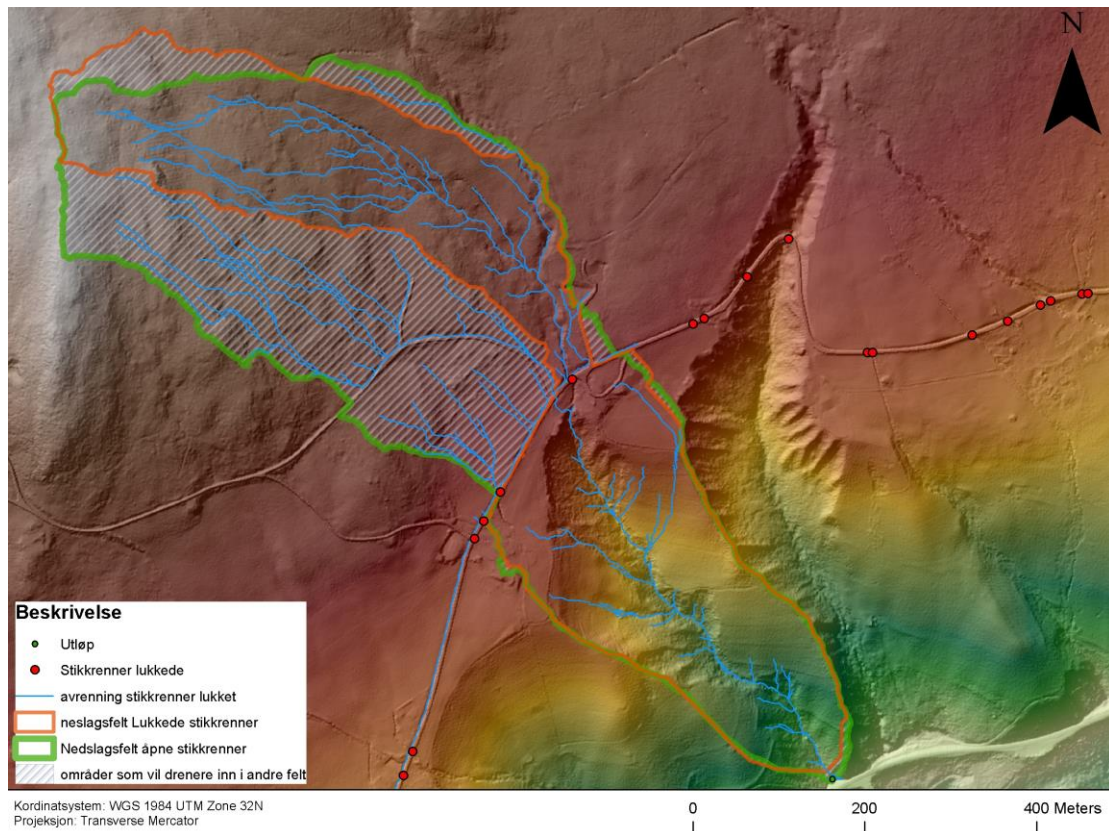
Som det kommer frem av Tabell 3 har alle høydemodellene lave verdier, men DHM1 har den laveste verdien. Hadde alle verdiene vært med ville det nok blitt et litt større avvik også på denne høydemodellen. Mens DHM2 og 3 er avviker noe mer fra disse verdiene, men det er ingen store avvik ifølge likning 4. Da avvikene er såpass lave ser det fortsatt ut til at DHM1 er den som er mest nøyaktige. Som det er nevnt er det et tilfeldig utvalg av punkter slik at det muligens ville blitt et annet resultat hvis andre punkter hadde blitt valgt ut. Da det er et tilfeldigutvalg vil en kunne se dette som representativt for resten av dataen.

#### **4.8 Bestemmelse av nedslagsfelt:**

Dette gjøres for å finne ut hvilket område som drenerer ned til jernabanens stikkrenne. Dette kan enten henvises til som et lite nedbørsfelt, eller nedslagsfelt i dette tilfellet. Ved å gjøre dette kan en se når vann er på avveie ved at det drenerer ut av det gitte nedslagsfeltet.

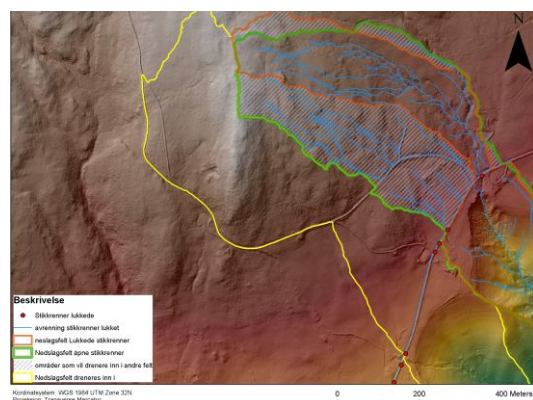
For å generere nedslagsfeltene har watershed verktøyet i ArcGIS blitt benyttet. Stikkrennene til jernbanen brukes som utløp til nedslagsfeltene. Da disse er siste bestemte dreneringspunkt før en bratt skråning ned til elva Sokna. Slik at avrenningen nedstrøms fra jernbanen ikke vil ha noe innvirkning på noe annen infrastruktur. Resultatet av nedslagsfeltene avhenger av hvilke dreneringsretningsraster som er inngangsdata. Etter litt vurdering virket nedbørsfeltet hvor stikkrenner er benyttet mest korrekt. Dette fordi det er her vannet vil renne ved normale nedbørssituasjoner når stikkrennene er åpne og ikke stengt av slam, vegetasjon og annet. Nedslagsfeltet som vises med en brun strek i Figur 33 er det feltet som kommer frem om stikkrennene er

lukket. Det feltet som er merket med grønn strek er nedslagsfelt ved normalsituasjon og åpne stikkrenner og er det feltet som ble tatt utgangspunkt i.



**Figur 33: Forskjellen på nedslagsfeltet hvor stikkrenner er lukket eller åpne. Hvor det skraverte område vil drenere inn i andre felt om stikkrennene er tette.**

Det kommer tydelig frem at nedslagsfeltets form avhenger av om stikkrenner er åpne eller lukket. Når stikkrennene er lukket blir feltet mindre og avrenningen i de skraverte områdene vil drenere til et annet nedslagsfelt å føre til mer avrenning i dette feltet. Det vises i Figur 34 at avrenningen fra det største skraverte område vil drenere inn i nedbørsfeltet merket med en gul strek. Grunnen til at det blir forskjell på nedbørsfeltene er fordi vannet ikke får renne der det naturlig ville gjort.



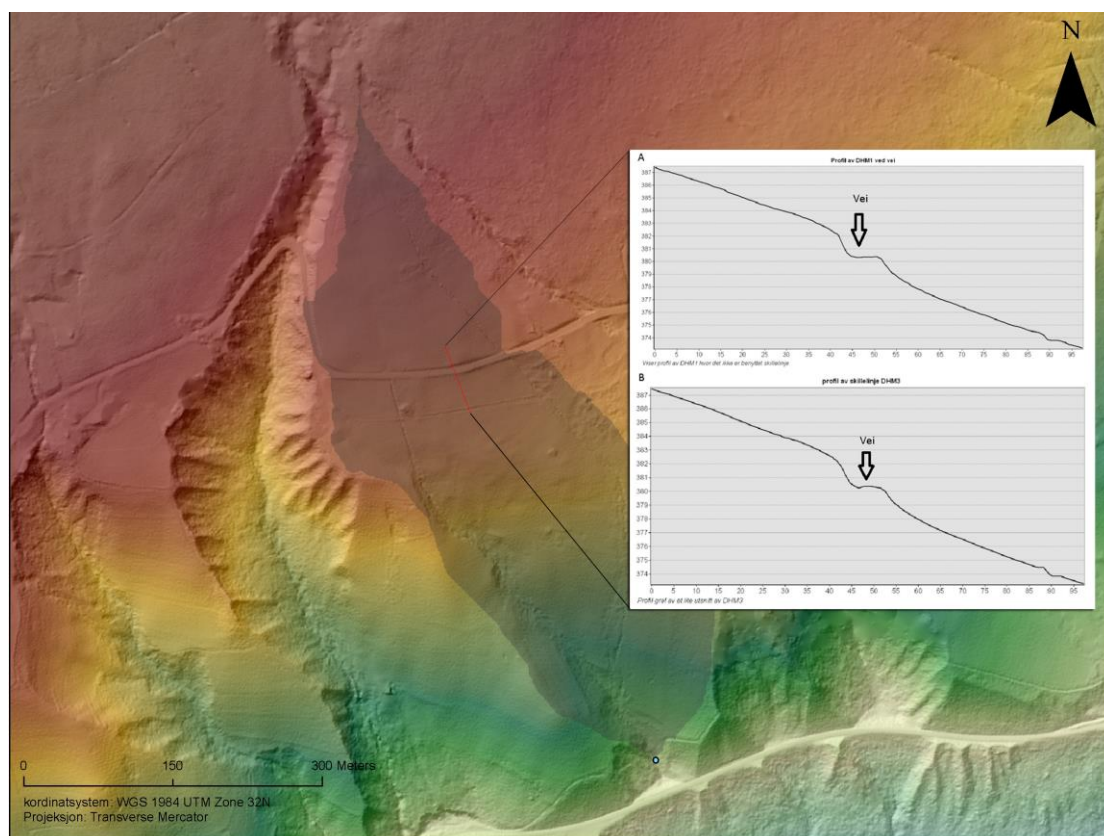
**Figur 34: Gir et bilde av feltet det skraverte området drenerer inn i.**

For å kunne si noe om vann er på avveie vil det være nødvendig å ha generert nedslagsfeltet ved en normal situasjon altså når stikkrennene er åpne. Slik at feltet med den grønne streken vil være det riktige feltet.

## 4.9 Erfaringer fra høydemodellene:

I dette delkapittelet vil det vises til erfaringer en har fått og kommet frem til ved høydemodellene før og etter manipulasjon (tilføring av veier og stikkrenner). Dette blir gjort for å finne hvilke av høydemodellene som kan sies å være hydrologisk mest korrekt.

### 4.9.1 Før manipulering av høydemodeller:



**Figur 35: Profil av (A) DHM 1 som ikke er manipulert og (B)DHM 3 hvor det er brukt knekklinjer for å generere modellen.**

Figur 35 viser to profilgrafer av DHM1 (høydemodell kun basert på Lidardata) og DHM3 (høydemodell basert på Lidardata og FKB data).

Ut fra profilene ser en at vei og veigrøft kommer tydeligere frem i DHM3 profil B hvor FKB dataen er benyttet. Pilene i profilene indikerer hvor veien er modellert i høydemodellen.

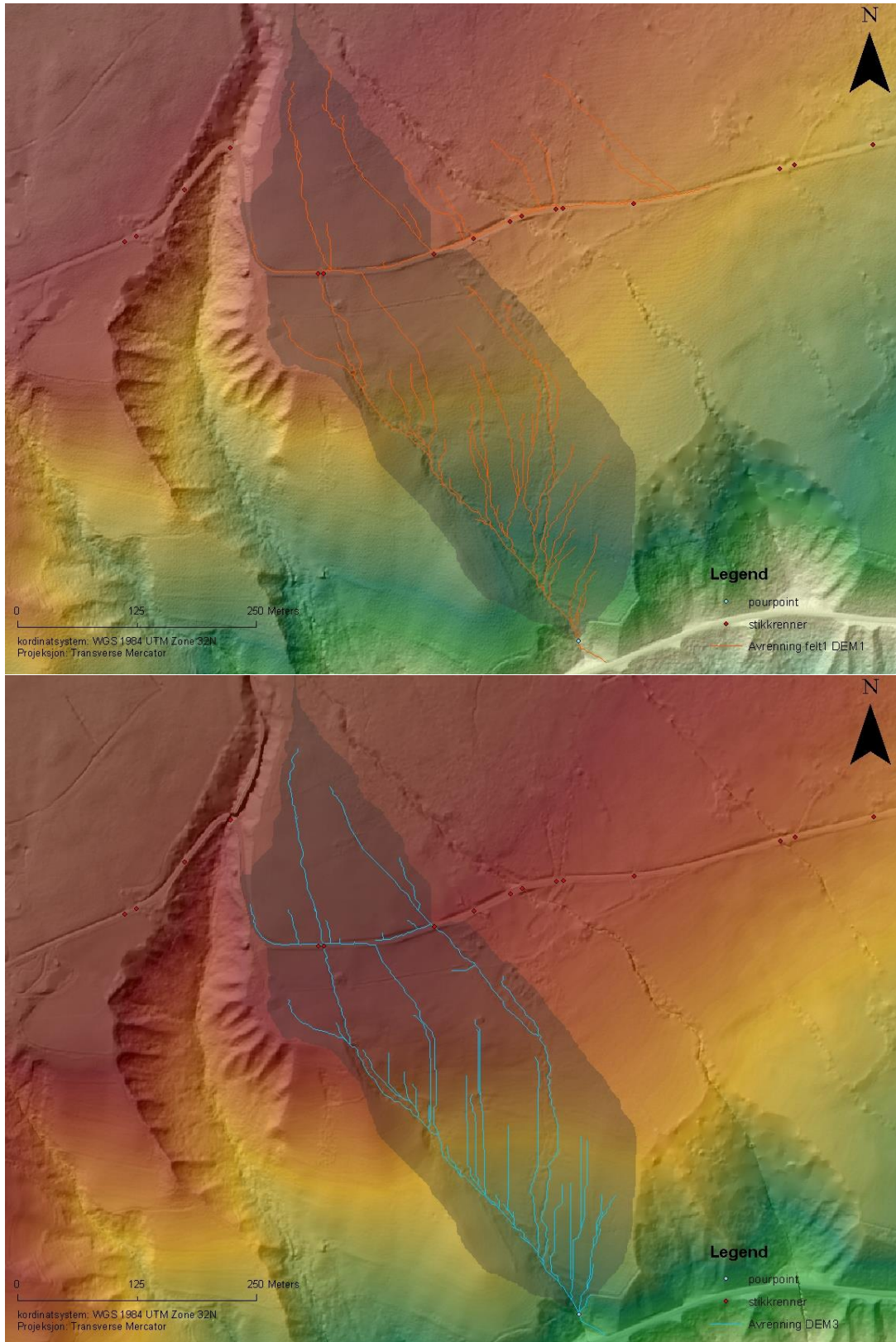
Profil B av DHM3 har en oscillerende effekt, altså en tydeligere veigrøft ved en bølgeeffekt. Her er veiflater benyttet som knekklinjer i genereringen av høydemodellen. Dette gjør at z-verdiene fra veiflatene erstatter z-verdiene fra Lidardata

der det er vei. Profil A som er kun Lidardata får ikke den samme effekten og grøftene langs veien er omtrent ikke eksisterende som en ser i profil A. Som Figur 36 også viser ved avrenning er grøftene og elementer tydeligere i DHM3 enn hva det er i DHM1. Det er vesentlig at vannet renner langs de naturlige vannveiene som i dette tilfellet vil være i veigrøftene. Dette gjør at FKB dataen hjelper til å gjøre modellen mer hydrologisk korrekt, ved punkttettheten i Lidardataen som er benyttet.

Figur 36 viser avrenningen fra DHM1 og DHM3 før redigering, ved vei og stikkrenner i tilfellet med DHM1 og kun med stikkrenner ved DHM3.

Ut fra denne Figuren ser en at DHM1 uten redigering får en del mangler blant annet følger den menneskeskapte elementer ganske dårlig, noe som kan være forårsaket av punkt tettheten på Lidardataen. Ser en dermed på Figur 39 A hvor høydemodellen er manipulert, renner vannet langs veiene når stikkrennene er lukket. Når de derimot er åpne renner vannet gjennomstikkrennene og videre ned i nedbørsfeltet til utløpet.



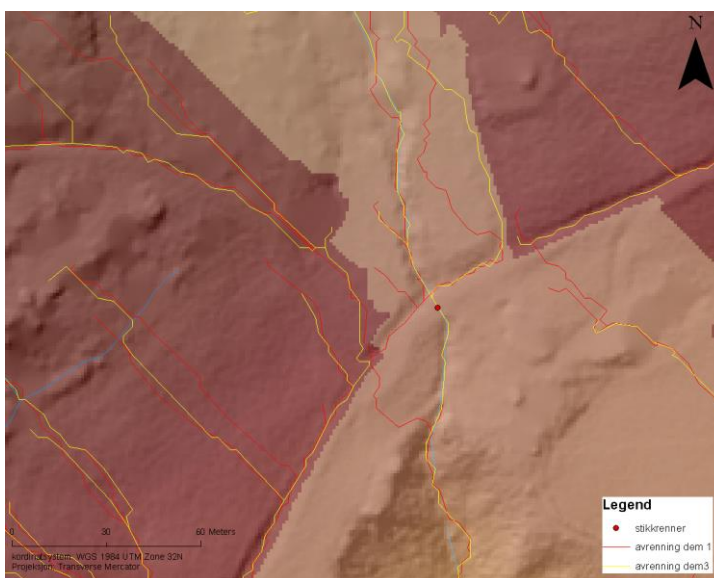


**Figur 36: Forskjellen på avrenning i DHM1 og 3. Øverst dem en vil bli omtalt som Figur 36A og dem 3 under vil bli omtalt som Figur 36B.**

Med utgangspunkt i Figur 36 A og B, ser en at avrenningen er blitt modellert forskjellig. I a som er DHM 1 hvor det kun er benyttet Lidar data, har avrenningslinjene blitt

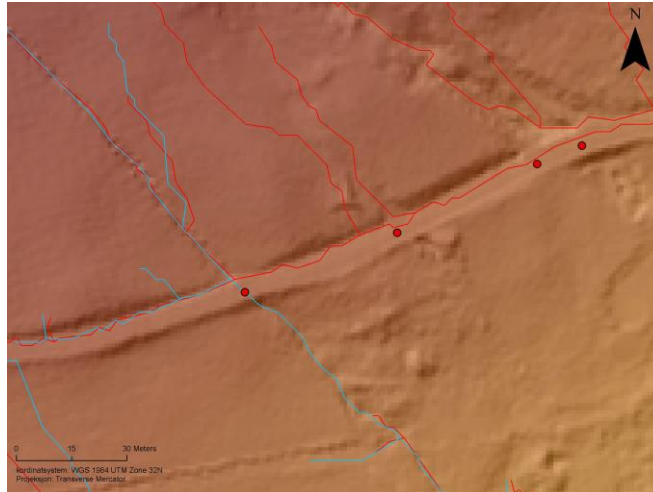
buktende og mer naturlige mens i B hvor det er brukt en kombinasjon av Lidar og FKB data har avrenningen blitt mer rette linjer noen steder samt at avrenningen går mer likt med bekkene ettersom fysiske vannveier er benyttet i modelleringen av høydemodellen. Grunnen til at høydemodellene har blitt forskjellige i terrenget er muligens metoden som er benyttet til å derivere den digitale høydemodellen. Den som kun har blitt tatt utgangspunkt i Lidar data har fått en ujevn overflate hvor vannet renner mer naturlig mens der det er benyttet terreng til raster ser det ut til at terreng til raster har påvirket resultatet noe.

Det er også en forskjell ved avrenning ved infrastrukturen i de to høydemodellene, som nevnt tidligere har DHM3 derivert med FKB data. Dataen som er benyttet er infrastruktur som vei og banelinjer samt fysiske vannveier som bekker. Det kommer frem av Figur 37 og 38 at elementer som veigrøfter har blitt generert tydeligere og mer naturlig i DHM3 enn 1. Dette viser at supplerende FKB-data gir noe mer nøyaktig generering av menneskeskapte elementer. Dette gjør at også det ble valgt å manipulere DHM1 med veiflatter slik det kommer frem i Figur 39 i kapittel 4.8.2.



**Figur 37: Avrenning i DHM1 som ikke er manipulert og DHM3 som er konstruert ved bruk av FKB data.**

I Figur 36b ser en at vannet faktisk renner gjennom noen av de røde punktene på veien som representerer stikkrenner. Stikkrennene har blitt generert der det flyter fysiske vannlinjer gjennom veien, altså bekker som kommer frem av FKB dataen benyttet i modellen. De stikkrennene som ikke er generert er en avhengig av å generere manuelt hvis en ønsker å benytte seg av disse. Dette gjøres som vist i avsnitt 4.6, resultatet med generering av stikkrenner og avrenning vises i Figur 39.



**Figur 38: Avrenning fra DHM1 og DHM3, Lidar data virker og være tilstrekkelig ved lite vegetasjon som vist ved den røde linja i figuren.**

Figurene 36-38 viser forskjell ved bruk av FKB data og ikke, forskjellen er i første omgang relatert til infrastruktur og hvor vannet renner langs menneskeskapte elementer. Lidardata ser ikke ut til å være i stand til å representere lineære menneskeskapte landskapsstrukturer helt nøyaktig. Ved å bruke FKB data blir lineære formasjoner bedre representert, da spesielt veigrøfter ol. Stikkrenner kan også genereres ved bruk av knekklinjer, som i Figur 34 er bekker brukt som harde knekklinjer bekken bryter da gjennom veien og en stikkrenne blir generert automatisk. Dette tilfellet skjer kun hvis en har bekker som renner gjennom en stikkrenne langs veien. I de fleste tilfeller er det også flere stikkrenner slik at en blir nødt til å manuelt gå inn og manipulere høydemodellen uansett. Som nevnt over gir DHM1 mer naturlig avrenning i terrenget mens DHM3 gir mer naturlig avrenning rundt infrastruktur grunnet veigrøfter ol, som kommer frem av Figur 36. En ting som også kommer frem av avrenningen i de to høydemodellene er at i områder med vegetasjon viser det seg at Lidar dataen benyttet i oppgaven ikke alltid er nøyaktig nok. Derimot områder hvor det er lite vegetasjon som vist i Figur 38 er Lidardataen i de fleste tilfeller tilstrekkelig. Ville resultatet vært annerledes om Lidardataen nylig var samlet inn? Supplerende FKB- data ville vært ønskelig også i DHM1. Det er valgt å gjøre dette ved å heve veiflatene med 1m som vist i 4.6 for å få en hydrologisk mer korrekt modell.

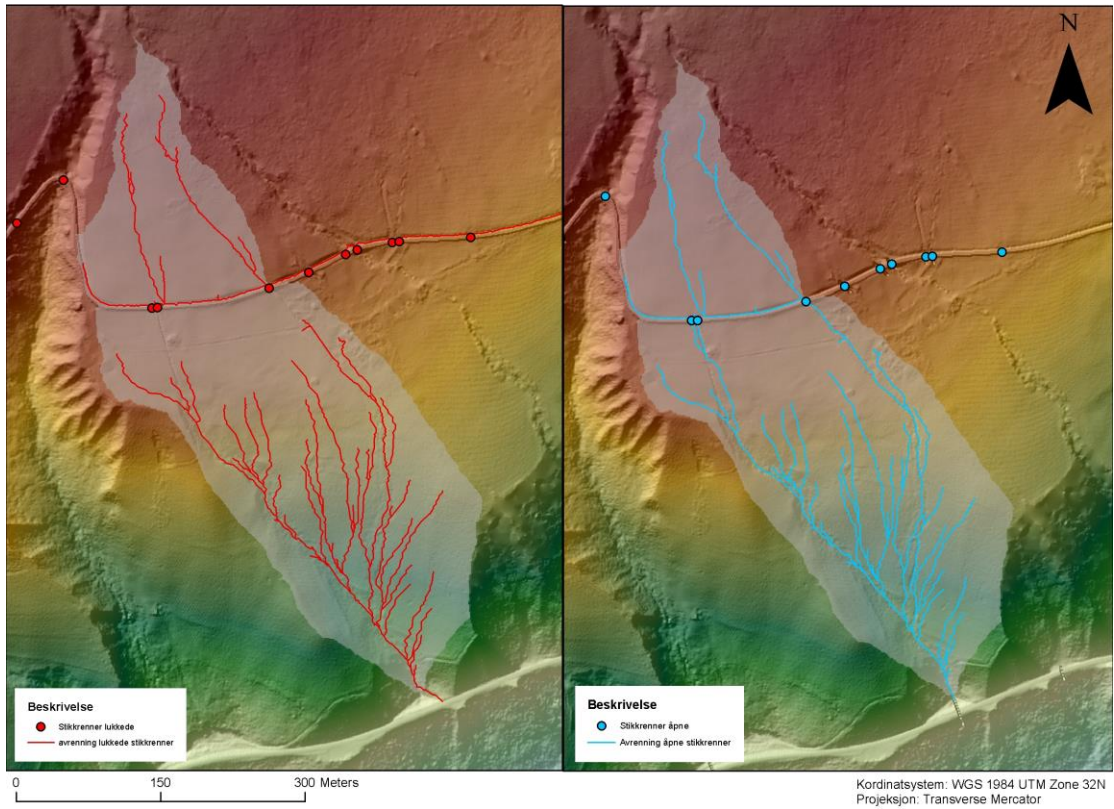
#### **4.9.2. Etter manipulasjon av høydemodeller:**

I dette avsnittet vil resultatene fra høydemodellene som er manipulert komme frem. Det vil vises avrenning fra de forskjellige høydemodellene med åpne og lukkede stikkrenner.

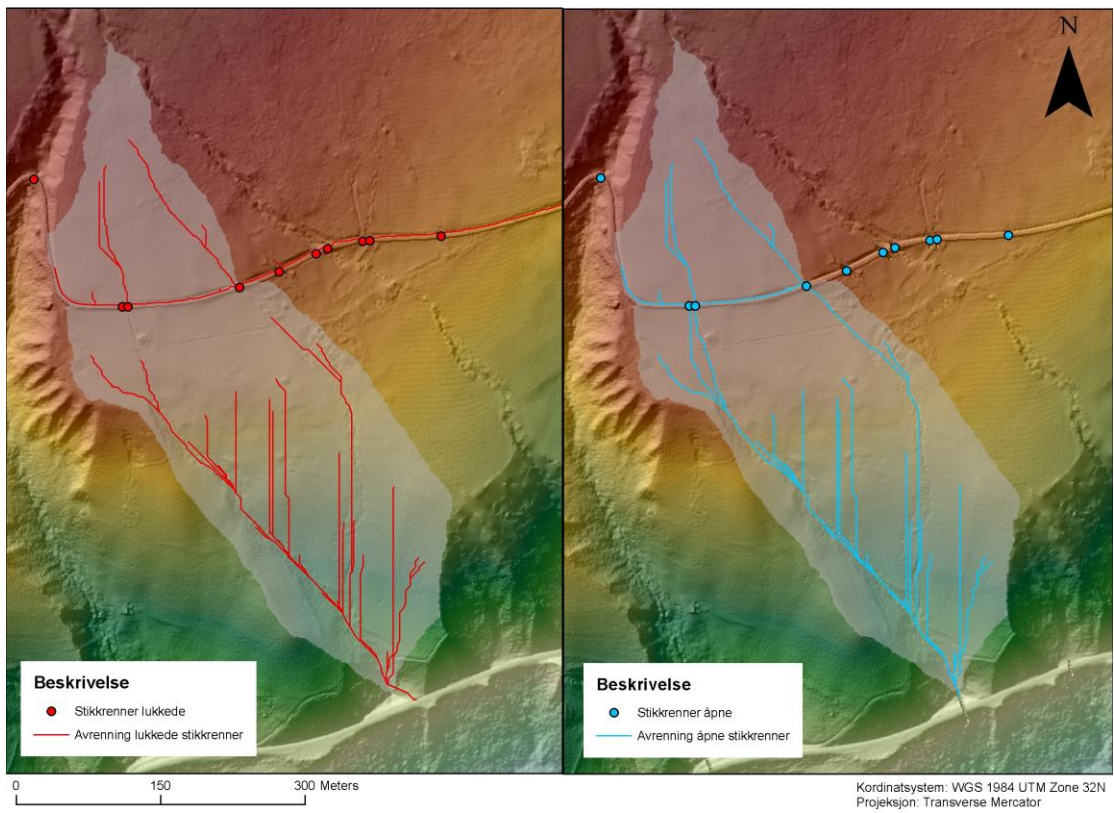
#### **4.9.3 Felt 1:**

Resultatet fra Figur 39 A med B og C er høydemodellene etter manipulasjon. En kan se at avrenningen er nokså lik langs infrastruktur i alle høydemodellene når stikkrennene er lukket og åpne. C vises kun avrenningen med åpne stikkrenner da stikkrennene har blitt generert av bekker som knekklinjer. Ser en på DHM3 renner også vannet over veien et sted selv om z-verdien fra veiflater er benyttet i genereringen av høydemodellen, dette kan ha en sammenheng med når Lidardataen er samlet inn. Avrenning over veien kan ha forekommet når lidaraen ble samlet inn. Men ut fra felt erfaring vil ikke dette være tilfellet i dag da grøftene ble utbedret i 2014. Det som skiller høydemodellene fra hverandre her er hovedsakelig avrenningen i terrenget. B og C har tydelig rette linjer i avrenningen mens A har mer bokne og mer naturlig avrenning. Ut fra tabell 2 ser en at antallet forsenknings er mye høyere i DHM 1. enn 2. og 3. en kan da lure på om interpolasjonen og metoden som er benyttet har påvirket høydemodellene? Ut fra Figur 26, ser en også at majoriteten av forsenkninger i DHM1 ligger i elva.

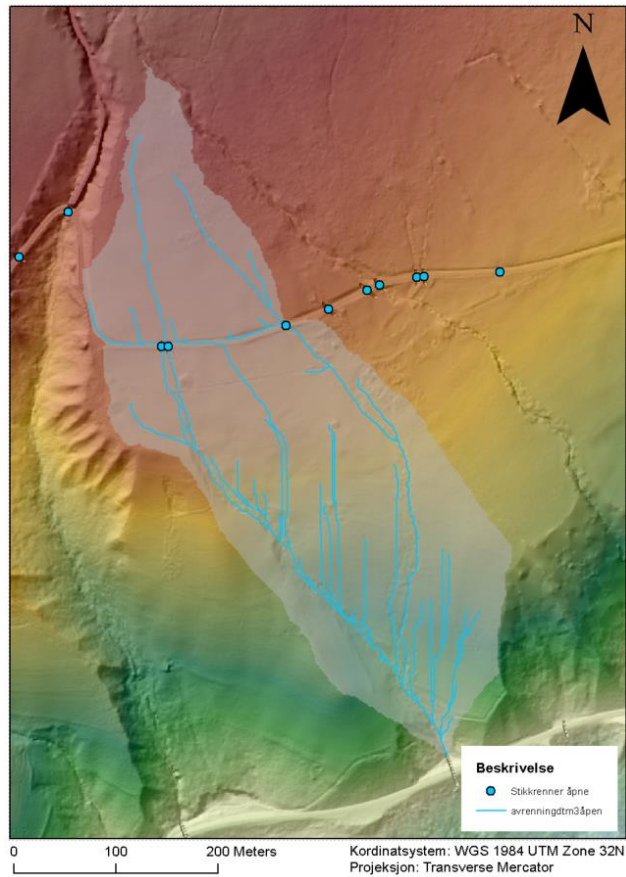




A: Manipulert DHM1 åpne eller lukkede stikkrenner



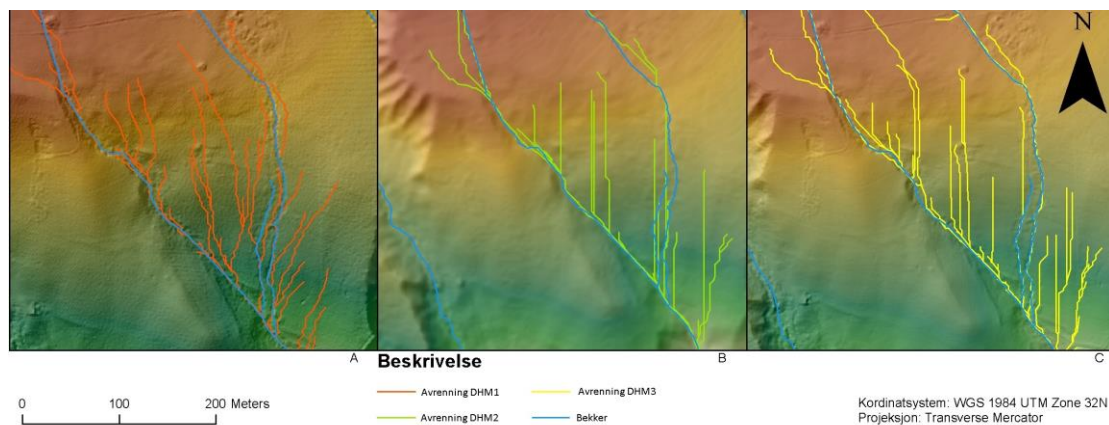
B: Manipulert DHM2 åpne eller lukkede stikkrenner



C: DHM3 Med åpne stikkrenner, med lukkede stikkrenner vises i Figur 35 b

**Figur 39:** Avrenningen fra de tre høydemodellene etter manipulasjon, hvor alle høydemodellene er manipulert med vei og stikkrenner, slik at til venstre er avrenning med lukkede stikkrenner og til høyere er med åpne.

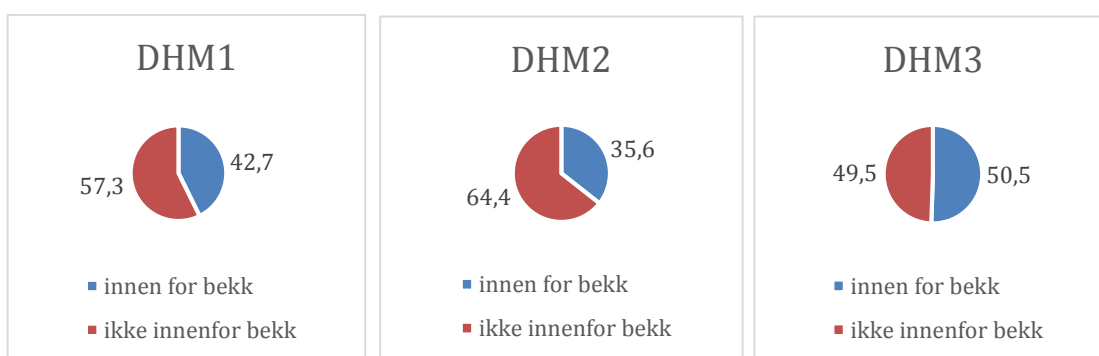
#### 4.9.4 Bekker og avrenning fra modellene:



**Figur 40:** Avrenningen fra de tre høydemodellene sammenliknet med bekker

Figur 40 gir et bilde av avrenningen i forhold til bekker og naturlige vannveier. Avrenningen langs bekkene er ganske lik i DHM1 og 3 men i 2 er avrenningen langs bekkene i veldig rette linjer. Avrenningen i DHM3 er nesten helt lik som bekkene, grunnen til dette er nok at bekkene har blitt benyttet som knekklinjer ved genereringen

av høydemodellen. Avrenningen avviker fortsatt litt fra bekkene noen steder, og generelt i terrenget ser avrenningen mer unaturlig ut. Fordi avrenningslinjene fra denne høydemodellen er ganske rette, noe de ikke ville vært i virkeligheten. DHM1 har avrenningen ganske likt som bekkene. Det er noen avvik her og der, men for det meste er denne minst like nøyaktig som DHM3 langs bekkene til tross for at knekklinjer ikke er benyttet. Ut fra Figur 39 og 40 vil det være mulig å si at DHM1 vil være mer nøyaktig i dette tilfelle da avrenningen generelt i terrenget er mer naturlig, noe som også kommer frem av Figur 36.



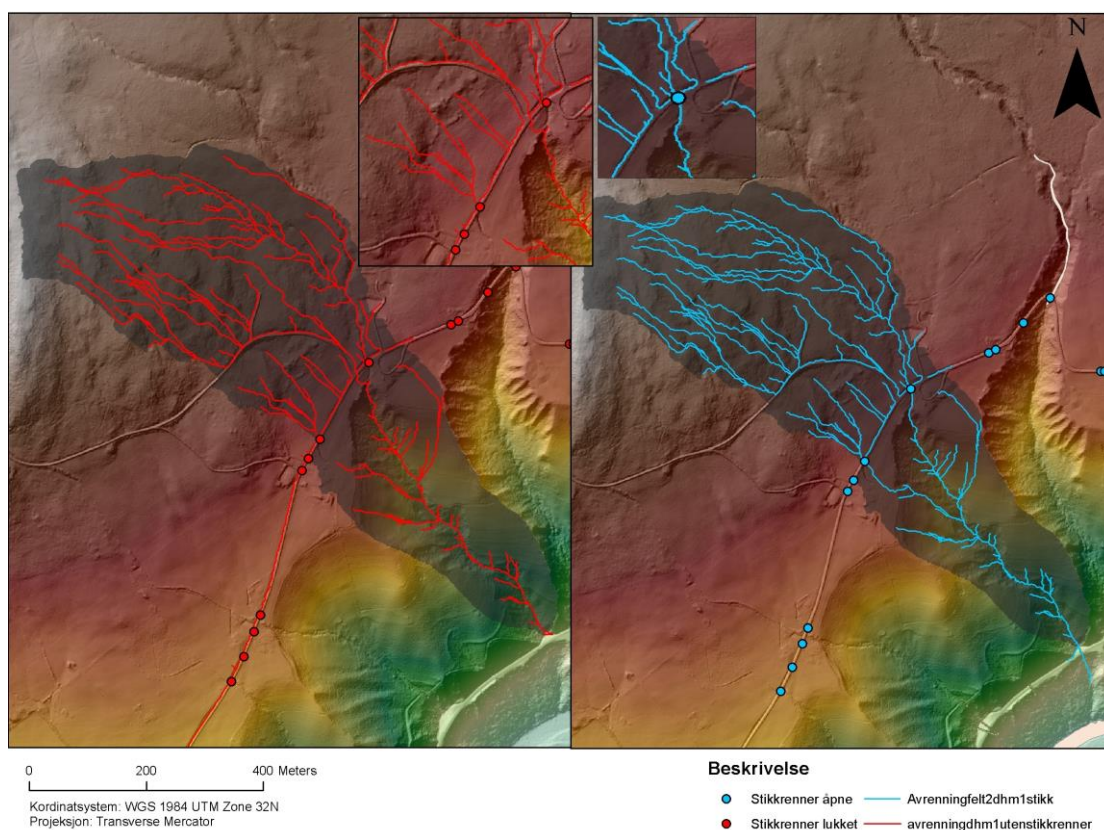
**Figur 41: Andel av dreneringslinjene som treffer bekkene fra FKB-dataen**

Figur 41 viser prosenten av all avrenningen i høydemodellene som er innenfor en avstand på 3 m fra bekkene. Av Figuren kommer det frem at DHM3 er den som har mest avrenning langs bekkene. Som nevnt over ble bekker benyttet som knekklinjer slik at dette resultatet er forventet. Men som nevnt virker avrenningen unaturlig i terrenget i DHM3. Avrenningen fra DHM1 går litt på kryss og tvers av bekken noen steder men renner for det meste langs vannlinjene. Det er derfor en ganske høy prosentandel sammenfall med bekkene og en mer naturlig avrenning generelt. DHM2 derimot ser ikke ut til å ha fått noe særlig naturlig avrenning verken langs bekker eller i terrenget. Dette gjenspeiles i den laveste prosent delen langs bekkene.

Ut fra erfaringen i felt 1 med manipulasjon, har det blitt valgt å ta utgangspunkt i at DHM1 er den mest hydrologisk korrekte, selv om antallet forsenkninger er mye høyere når modellen først blir konstruert. Avrenningen i terrenget og rundt infrastruktur er mer korrekt ut fra hva som er observert i felt og hva som vil være naturlig. Vann vil ikke renne i rette kanaliserte veier på overflaten da det alltid er ujevnheter og terrengforandringer, samt følger også avrenningen i DHM1 bekkene godt.



### 4.9.3 Felt: 2



**Figur 42: Avrenning i felt 2 med lukkede stikkrenner til venstre og åpne stikkrenner til høyere. De to utsnittene øverst fører avrenning med lukkede stikkrenner vann over veien, med åpne føres det gjennom stikkrenna.**

Ut fra Figur 42 ser en avrenningen i DHM1 i nedslagsfelt 2. grunnen til at det kun vises avrenning fra DHM1 i dette feltet er fordi avrenningen fra denne høydemodellen virket mest hydrologisk korrekt. Som det også kommer frem av denne modellen renner vannet langs veien når stikkrennene er lukket. Som det også vises i de to små utsnittet øverst i Figur 42, renner det noe vann over veien når stikkrennene er tette, dette vil faktisk kunne være tilfellet om stikkrenner er lukket. Fra utsnittet med åpne stikkrenner vises det at vannet derimot drenerer gjennom stikkrenna. Det er et lite dreneringsrør på tvers av en privat vei, men ut fra felt observasjoner var denne tett. Det er store muligheter for at vannet faktisk vil renne over veien. Om stikkrennene er tette vil vannet i deler av dette feltet drenere videre ned til et annet nedbørsfelt.

#### 4.10 Tilføring av fysisk vannmengde.

Det er tidligere blitt tilført faktiske vannmengder i avrenningsmodeller. Det finnes flere programmer hvor en har muligheten til å gjøre dette. Disse er blant annet Powersim «the rainfall module», HEC-HMS/RAS, og Mike By DHI. Men det ble ikke tid til og gjennomføre dette i denne oppgaven. Men i avsnitt 4.10.1 er det beregnet responstid og den faktiske vannmengden i de to nedslagsfeltene.

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-the hydrologic modeling system) er designet til å simulere hele den hydrologiske prosessen ved et nedbørsfelt. Programvaren inneholder en del tradisjonelle analyser som infiltrasjonsevne, akkumulert avrenning, men også simulering av snøsmelting og jordas metningsgrad. Supplerende analytiske verktøy som flomprognoser, erosjon og sedimenttransport er også tilgjengelig (Hydrologic-engineering-center 2015a). Denne programvaren har også en kobling med andre GIS verktøy blant annet ArcGIS.

«Powersim software rainfall simulation»: Simulerer avrenning fra nedbøren og ser hvor det akkumulerer vann men samtidig også hvor lang tid det tar før dette vannet tørker opp eller drenerer videre enten til en større elv eller ut i havet. I denne modellen kan en selv tilføre enten fiktive data eller tilføre faktiske nedbørsdata for et bestemt område. For eksempel kan en ta utgangspunkt i fem dager med mye nedbør eller en lengere nedbørsperiode (Powersim 2015).

DHI (Danish Hydraulic Institute) har en pakke som de kaller «MIKE Flood» de nevner at dette er den mest komplette verktøysboksen for flom modellering tilgjengelig. Den inkluderer et bredt utvalg av både 1D og 2D simuleringsverktøyer, som gir muligheter til å simulere nesten alle flomsituasjoner. 1D flom simulering takler dårlig flere dimensjoner ved terrengforandringer og bør muligens bare brukes ved feks avrenning langs en veibane. 2D verktøy bruker to dimensjoner og kan fint brukes ved større terrengforandringer for eksempel i parkområder, jorder ol. (Leandro et al. 2009). Enten det dreier seg om elver, flomsletter, dreneringsnettverk, urbane flommer i gatene evt kan disse også kombineres i «Mike flood» (DHI 2015a). Innen applikasjonene «Mike flood» er det en del underprogrammer. Blant annet «Mike 11 River modellering» hvor en har en rekke applikasjoner hvor det kan være mulig å modellere

regnvannsavrenning. Innen «Mike flood» gir også gode muligheter til å modellere flom på en rekke skala, alt fra store nedbørsfelt til lokale mindre nedslagsfelt langs elver. Programmet gir gode muligheter for simulering av flommer, da det også kan inkludere dreneringsnettverk som for eksempel Stikkrenner eller liknende (DHI 2015b, DHI 2015c).

#### 4.10.1 Beregning av vannmengde og responstid:

I nedbørsfelt som er mindre enn 2-5 km<sup>2</sup> kan en benytte seg av den rasjonelle formel. Formelen baserer seg på tidligere målt nedbør hvor avrenningen (Q) er gitt ved likning 5. Ved bruk av den rasjonelle formel, må det tas hensyn til usikkerhet. Jo mindre feltet som skal beregnes er jo mindre blir usikkerheten, og derfor egner den seg best for små felt (Vegdirektoratet 2014). Feltene som blir beregnet av linking 5 har en størrelse på felt 1: 12 Ha og felt 2: 29 Ha noe som vil si at disse ikke overskrider størrelsen som er anbefalt i håndbok N200 gitt av (Vegdirektoratet 2014).

$$Q=A*C*I*Kf$$

Likning 5

Der:

Q: regnvannsavrenning

C: avrenningsfaktor

A: feltareal, ha (1 hektar = 10000 m<sup>2</sup>)

I: dimensjonerende nedbørsintensitet l/(s\*ha)

Kf: klimafaktor

Avrenningsfaktoren velges ut fra overflatetype i feltet. Avrenningsfaktoren C er gitt ved tallene i tabell 4. Det kan også regnes ut avrenningsfaktor for delfelt som sammen gir en bestemt avrenningsverdi. Ut fra felterferfaring er det i feltene stort sett jordbruk og skog, slik at en avrenningsfaktor på 0,4 er valgt for å være litt konservativ. Det er samt lagt til 30 % da en returperiode på 200 år er valgt (Vegdirektoratet 2014). Det er også noe usikkerhet ved fastsettelse av avrenningsfaktoren, da faktoren varierer i hendhold til helning på feltet, innsjøareal, avstand til grunnvann mv.

Tabell 4: Avrenningsfaktorer som er gitt fra (Vegdirektoratet 2014)

Overflatetype	Avrenningsfaktor, C
- Betong, asfalt, bart fjell og lignende	0,6 - 0,9
- Grusveier	0,3 - 0,7
- dyrket mark og parkområder	0,2 - 0,4
- skogområder	0,2 - 0,5

Nedbørsintensiteten (I) hentes fra eklima.no dersom det er representative data for området. I dette tilfellet har en IVF kurve for målestasjon på Risvollan i Trondheim blitt benyttet denne vises i Figur 43 og Tabell 5. Det vil være noe usikkerhet ved bruk av denne IVF kurven da det vil være lokale forskjeller. Denne IVF-kurven (intensitet/varighet-frekvens kruver) er valgt fordi det er den nærmeste med gode nok måleserier. For å velge den aktuelle nedbørsintensiteten må en velge følgende parametere: returperiode per år og regnvarighet i minutter (lik feltets konsentrasjonstid) gitt ved Likning 6 (Vegdirektoratet 2014). En 200 års returperiode er valgt da det var ønskelig å beregne avrenningen ved en ekstrem flomhendelse. Etter å ha beregnet konsentrasjonstiden ble det rundet av til nærmeste varighet i min satt opp i IVF-kurven, for felt 1: 30 min og felt 2: 45 min. Hvor nedbørmengden ved L/s\*ha ble hentet fra varighetene nevnt over ved en 200 års returperiode som vises i tabell 5.

$$t_c = 0,6 * L * H^{-0,5} + 3000 * A_{se}$$

Likning 6

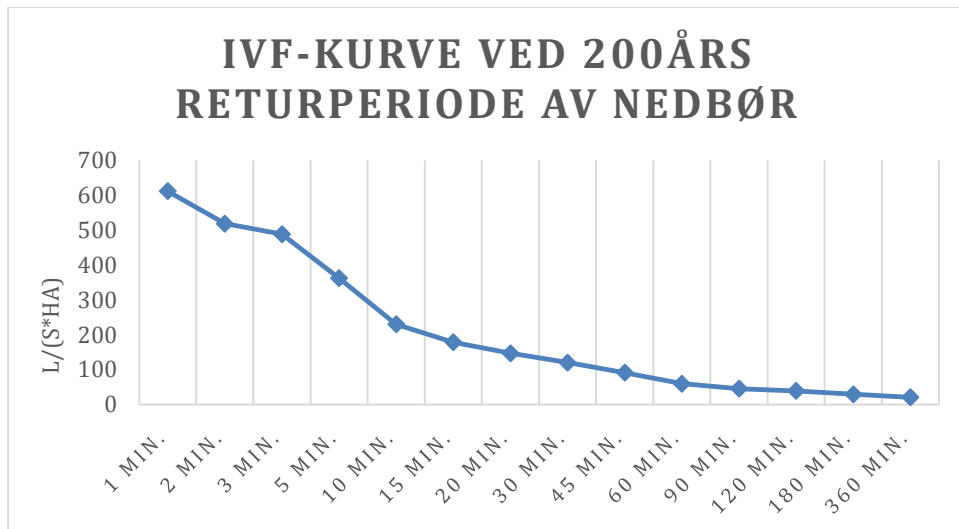
Der:

$t_c$  = tidsfaktor, minutter

L=lengde av feltet, M

H, Høydeforskjellen i feltet, M

$A_{se}$ = andelen innsjø i feltet, forholdstall



Figur 43: IVF kurven for målestasjon på Risvollan ved en returperiode på 200år hentet fra (Metrologisk-institutt 2015).

Tabell 5: Tabellen for IVF-kurven fra (Metrologisk-institutt 2015) kurven er fra Risvollan i Trondheim.

År	1 min.	2 min.	3 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.
2	223,9	181,8	166	136,8	96,3	75,1	63
5	313,2	259,3	240,1	188,6	127,1	98,9	82,3
10	372,2	310,5	289,2	222,9	147,5	114,7	95,1
20	428,9	359,7	336,2	255,8	167	129,9	107,4
25	446,9	375,3	351,2	266,3	173,2	134,7	111,3
50	502,3	423,4	397,2	298,4	192,3	149,5	123,4
100	557,3	471,1	442,8	330,3	211,3	164,2	135,3
200	612,1	518,7	488,4	362,2	230,2	178,9	147,2
30 min.	45 min.	60 min.	90 min.	120 min.	180 min.	360 min.	
48	36,2	29,4	23,2	20,3	16,6	12,5	
64,7	49	36,5	28,4	24,7	19,6	14,5	
75,8	57,5	41,2	31,8	27,6	21,6	15,8	
86,4	65,6	45,7	35,1	30,3	23,5	17	
89,7	68,2	47,1	36,1	31,2	24,1	17,4	
100,1	76,1	51,5	39,3	33,9	26	18,6	
110,4	84	55,8	42,5	36,6	27,8	19,8	
120,7	91,9	60,2	45,7	39,3	29,7	21	

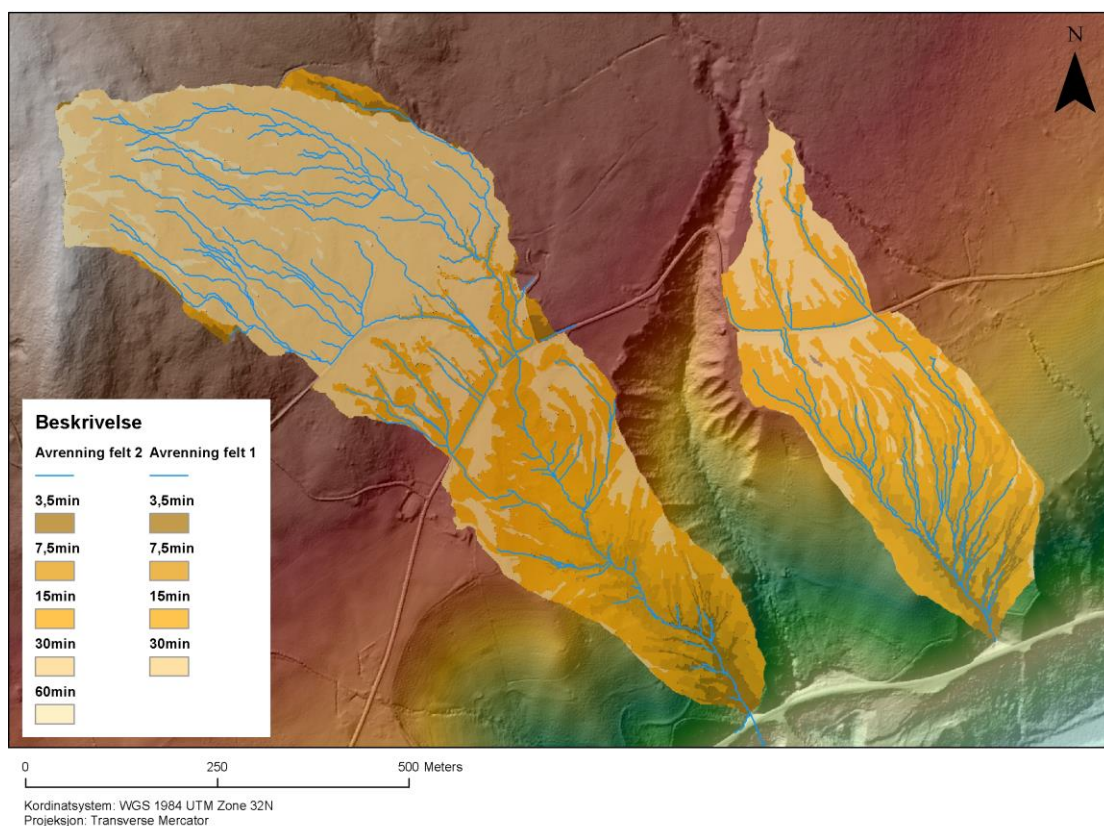


Ut fra likning 5 og 6 har responstiden og avrenningen i feltene blitt beregnet, resultatene vises i Tabell 6

**Tabell 6: Resultatene fra likning 5 og 6.**

Responstid:	Avrenning:
Felt 1: 34 min	Felt1: 811 L/s
Felt2: 48 min	Felt2: 1492 L/s

Figur 43 viser avrenningstiden i felt 1 og 2 hvor det ser ut til at beregningen gjort fra likning 6 stemmer ganske godt overens med dette. Det som vises i Figur 44, er responstiden til feltene. Her er det tatt utgangspunkt i at vannet renner med en hastighet på 1 m/s. Dette valget er tatt ut fra en anbefaling fra Reinemo (2015).



**Figur 44: Responstiden for de to feltene, hvor det mørkeste er avrenning som skjer på under 3,5 min hakket under er avrenning mellom 3,5 min og 7,5 min osv. Felt 1 til høyere og felt 2 til venstre.**



## 5 Diskusjon:

I denne oppgaven er det undersøkt hvilke metode som gir den hydrologisk mest korrekte høydemodellen, utfra en modellering av overvannsveier i to mindre nedslagsfelt i Soknedalen. Det har også blitt beregnet avrenning ved en 200års nedbørintensitet ut fra IVF kurver, samt responstiden fra feltene. I dette kapittelet vil datagrunnlaget, metodikken, analysen og resultatene diskuteres for å belyse problemstillingene som ble definert innledningsvis i oppgaven.

### 5.1 Evaluering av analysen og datagrunnlaget:

Både feilkilder og valg en selv har gjort vil innvirke på analysens resultater of derfor ha betydning for kvaliteten på dataene.

#### 5.1.1 Feilkilder knyttet til høydemodellene:

Når det gjelder høydemodellene er det etter min mening liten grunn til å anta at feil i disse har påvirket flomveismodelleringene i noe særlig grad. Størrelsen på områdene der det er generert høydemodeller for er 11,52 km<sup>2</sup>. Antallet datapunkter innenfor dette arealet er 26 202 594 uten filtrering av bakkepunkter. Etter at bakkepunktene er filtrert ut er det 11 069 352. Disse har fått verdien bakkepunkt mens de gjenstående 15 133 242 har blitt uklassifisert. Ut fra likning 2 i avsnitt 3.5.5 vil den riktige celledørrelse med utgangspunkt i Lidardataen være 1,02 m slik at det ble valgt og runde denne av til 1m, da det er mer praktisk med hele tall. Ved å bruke alle punktene for å generere en overflatemodell og ikke en høydemodell ville en kunne hatt en celledørrelse på 0,6 m ut fra likning 2. Det kommer også frem i en undersøkelse om punktetthetens påvirkningsgrad på detaljnivå at en kan redusere denne drastisk uten at det vil ha noe særlig innvirkning i nøyaktigheten til høydemodellen, samtidig som dette reduserer produksjonstiden (Liu et al. 2007). Det ble derfor antatt at Lidardataen var nøyaktig nok for generering av høydemodellene.

Det ble valgt å lage høydemodeller som dekker begge nedbørsfeltene ettersom begge disse ligger nært hverandre. Dette for å slippe å måtte generere to høydemodeller per metode.

For DHM1 og 3 ble den samme Lidardataen benyttet og samme raster oppløsning J.fr. fra likning 2 hvor den minste anbefalte størrelse til raster cellene var 1 m. Som nevnt tidligere er DHM1 derivert fra Lidardata og DHM3. fra Lidar og FKB data.

I følge Meiforth (2013) vil ikke en Lidarpunkt oppløsning på under 2 punkter per kvadratmeter være tilstrekkelig nok for flomveismodellering. Modelleringen hun har gjennomført er gjort i et urbant område med mye menneskeskapte elementer som påvirker avrenningen. Området benyttet i oppgaven er ruralt og det vil ikke være like mye elementer i og rundt infrastrukturen slik at dette ikke nødvendigvis var en like stor feilkilde. Det er valgt å se bort fra denne anbefalingen, men det likevel i to av høydemodellene supplert med FKB-data ved vei, da grøftene på oversiden av fylkesveien ikke var interpolert godt nok i DHM1. Mens DHM2 er kun interpolert fra høydekurver og veiene kom da ikke frem i høydemodellen.

Et annet aspekt er imidlertid også innsamlingen av Lidar dataen. Denne er samlet inn

av Kartverket. Dataen er gitt av Jernbaneverket, og er samlet inn i 2008 og 2010, slik at en ikke ser spor fra skredet som gikk i 2012. Etter erfaringer i felt høsten 2014 ble det i løpet av dette året gjort utbedringer i grøftene, noe som også kan føre til at Lidardataen kanskje ville gitt et annet resultat



**Figur 45: Bilde av grøft langs fylkesveien i soknedalen privat foto: Åsmund Ertshus Mathisen**

flere steder hvis den var samlet inn etter dette. Som en ser et par steder i DHM1 uten manipulasjon Figur 36 og 37, renner vannet over veien steder det normalt ikke ville gjort det. Årsaken til dette kan enten være vegetasjon som gjør at bakkepunktene får lavere punkttetthet, eller årstallet Lidardataen er samlet inn. Ut fra feltobservasjoner er det valgt å manipulere DHM1 for å få avrenningen hydrologisk mer korrekt.

Metodene som er benyttet til å generere høydemodellene kan også ha påvirket hvordan resultatet med avrenning har blitt. Det vises tydelig i Figur 39 der A har mer naturlig avrenning i terrenget enn både B og C. Dette til tross for at det i utgangspunktet var et mye høyere antall forsenkninger i denne enn de to andre. J.fr tabell 2.

Ut fra Figur 27B ser en at DHM2 (topo til raster) ikke ga et tilfredsstillende resultat, dette gjorde at det ble valgt å lage høydemodell ved denne metoden kun ved bruk av høydekurver. Grunnen til at resultatet ikke ble helt ideelt kan ha vært bruken av vei- og jernbanelinjer som «type» høydekurve. Det ble tenkt at det var en god måte å la disse fungere som knekklinjer. Dette viste seg å være feil, noe en burde ha skjønt før høydemodellen ble laget. Det kommer tydelig frem av Figur 27B at vei- og jernbanelinjene ikke fungerte som knekklinjer. Grunnen til dette har nok en sammenheng med at disse ikke er isolinjer slik som høydekurver. Dette gjorde at disse linjene ikke ble derivert som veier eller knekklinjer. Det kommer frem av figur 39b at valget å kun derivere terrenngmodellen fra høydekurver og manipulere den i ettertid ga et mer tilfredsstillende resultat.

### **5.1.2 Feilkilder knyttet til interpolasjon av høydemodellene**

I følge Fisher&Tate (2006) finnes det ikke noe fasit på hvilken interpolasjonsmetode som lager den beste høydemodellen. Bruk av interpolasjonsmetoder påvirkes av den naturlige overflaten til terrenget enten om den er jevn eller er kompleks. Nøyaktigheten og fordelingen av punkter som er brukt til å interpolere modellen er også med på å bestemme hvilke metode som fungerer best.

I denne oppgaven har naturlig nabo blitt brukt til derivering av DHM1 og 3, dette fordi en i terreng til raster (DHM3) kun hadde to valg og det ble derfor valgt å bruke samme metode på ved Las-datasett til raster (DHM1). Topo til raster bruker en iterativ endelig differanse interpolasjons teknikk (engelsk: iterative finite difference), hvor den benytter seg av lokale interpolasjons teknikker som IVA uten å miste fordelene med interpolasjonsmetoder som kriging og glatte overflater (Esri 2015a). En annen grunn til at Naturlig nabo har blitt benyttet er også det at metoden ikke gir noen glattende effekt som nevnt i 3.4.5 slik at den egner seg til geomorfologiske applikasjoner (Pirotti& Tarolli 2010).

Valgene ved interpolasjon i DHM1 ser ut til å ha fungert ganske bra. Her ser det ut til at det er punktettheten på Lidaren som har ført til feil og mangler i høydemodellen. DHM2 derimot har i større grad blitt påvirket av interpolasjonen. En kan anta at verktøyet sliter når utvalget av punkter ligger tett. Hvis flere høydekurver eller punkter dekker en celle, vil verktøyet slite med å fastslå en verdi for cellen. Her kunne man muligens ha interpolert mindre områder av dataen og deretter slått dem sammen. Ved bruk av denne metoden kan en også støte på problemer med bruk av tvunget drenering (engelsk: Enforce drainage). En mulighet kunne vært å ikke bruke tvunget drenering (engelsk: no\_enforce), slik at den ikke fjerner forsenkninger under interpolasjonen. En kunne da heller bruke fyll verktøyet og fylle igjen forsenkninger etter modellen var interpolert. Topo til raster bruker en tvunget dreneringsprosess, hvor den prøver å fjerne flest mulig forsenkninger (Esri 2015a) noe som muligens kan ha ført til resultatet med avrenningen i denne høydemodellen. DHM3 hvor terreng til raster er benyttet var det kun mulighet til å benytte seg av Lineære eller naturlig nabo interpolasjon da disse er TIN baserte metoder (Esri 2012g). Ut fra de forskjellige metodene kan det at lidardataen har blitt konvertert til en tin modell i DHM3 påvirke nøyaktigheten til høydemodellen. Sammenliknes avrenningen fra DHM3 og DHM1 kan en muligens anta at dette har en påvirkning da referansedataen er den samme i begge modellene. Spørsmålet blir da om bruk av terreng datasett vil være hensiktsmessig i et ruralt felt selv om det er en god måte og tilføre knekklinjer som veier, bekker ol. Terrengdatasett til raster gir god avrenning langs veier og infrastruktur, men i et ruralt terreng ser det til at det å kun bruke lidardata til interpolasjon av høydemodellen er det beste.

Punkt tettheten på 0,5 - 0,9 m var også innvirkende i valget av naturlig nabo. Metoden veker areal fra nært liggende punkter slik at verdien ville havne nært referansepunktene. Dette blir også reflektert i KMV som vises i tabell 3. Selv om resultatene gir et inntrykk av at DHM1 har blitt interpolert best, er det vanskelig å dra frem noen feil som er knyttet til resultatene fra interpolasjonen (Wechsler 2007). Da avvikene er så lave for alle høydemodellene er det ikke mye som skiller de forskjellige høydemodellene.

Valget av interpolasjonsmetode kan ha påvirket genereringen av høydemodell ved at grøftene ikke har blitt modellert som en kanskje ønsket. Den kan ha hentet celleverdien fra en annen verdi enn det som faktisk er tilfelle. Slik at det i DHM1 og 2 ble valgt å

manipulere disse ved å heve veien med 1 m, da grøftene nylig har blitt utbedret, som delvis vises i Figur 45.

## **5.2 Hydrologisk mest korrekt høydemodell:**

De tre høydemodellene er generert på tre forskjellige måter som nevnt i Kapittel 4. Resultatene er også forskjellig som vist i 4.5 og 4.8 der en ser at det å kun bruke Lidar med punkttetthet på 50-90 cm stort sett er tilstrekkelig der det ikke er vegetasjon. Punkttettheten vil kunne være utilstrekkelig i områder med vegetasjon. Grunnen til dette er som Bater&Coops (2009) nevner at en har flere returpunkter fra vegetasjonen slik at bakkepunktene ikke blir like tett. Dette kan føre til en mindre detaljert høydemodell. Ved denne punkttettheten vil det kanskje være nødvendig å benytte seg av veidata for å få modellert grøfter bedre der det er vegetasjon. Generelt er ikke grøftene generert så dype som vist i Figur 35. Som nevnt tidligere er Lidar-dataen eldre og det er gjort inngrep i veigrøftene sist høsten 2014. Grøftene var nødvendigvis ikke like dype da dataen ble samlet inn. Det kan godt være at lidardataen med denne punkttettheten kan ha vært tilstrekkelig selv om det i utgangspunktet ikke ser slik ut fra resultatene i avsnitt 4.9.

Som nevnt er det laget tre høydemodeller basert på forskjellige metoder. I terrenget ble avrenning fra DHM1 mest nøyaktig slik at denne ble manipulert for å gi mer korrekt representasjon av terrenget rundt infrastruktur. Det ble først prøvd å heve veien ved hjelp av høydeverdiene fra vei dataene. Dette ga ikke et tilfredsstillende resultat da det så ut til å være feil i høydeverdiene til veidataen som vist i Figur 27A. Veilinjene ble derfor reklassifisert og deretter hevet i høydemodellen med den gitte verdien (se 4.5.1). Resultatet fra dette ble mer tilfredsstillende og skapte tydelige og gode knekklinjer slik at avrenningen fortsatte langs grøftene når stikkrennene var lukket (se Figur 39A).

Til tross for at høydemodellen hvor det kun ble brukt Lidar data hadde et mye høyere antall forsengkninger er det fortsatt denne som har gitt det beste resultatet ved avrenning. I tilfellet hvor topo til raster er benyttet er det en såkalt Tvunget dreneringsprosess engelsk (The drainage enforcement process) hvor den antar at alle uidentifiserte forsengkninger er feil da forsengkninger i naturen ikke forekommer ofte (Goodchild& Mark 1987). Denne algoritmen fyller og fjerner spredte forsengkninger. En kan derfor

lure på om denne algoritmen kan ha ført til at avrenningen i terrenget har blitt rett og mindre naturlig enn i DHM1 (Esri 2015a).

J.fr Figur 40 og 41 ser en at DHM3 hvor det er benyttet bekker som knekklinjer har avrenningen blitt modellert godt rundt disse. Dette er naturlig da bekkene mest sannsynlig vil skape lavbrekket i terrenget om høydedataen i vannlinjene er riktig. DHM1 har fått relativt god avrenning langs bekkene til tross for at knekklinjer ikke har blitt benyttet. DHM2 har fått dårligst avrenning langs bekkene noe som kan komme av store feil grunnet valg som er gjort i metoden, det er heller ikke benyttet bekker som knekklinjer.

Etter å ha sett på høydemodellene virker det som at det å kun bruke Lidardata kan være godt nok i rurale områder. Resultatet fra DHM1 er generelt bedre i terrenget enn resultatene fra DHM2 og 3. Etter å ha manipulert denne høydemodellen ser den ut til å ha blitt mer hydrologisk korrekt. Det Meiforth (2013) sier med at en trenger supplerende FKB data vil tildels være sant. Det kommer frem av avrenningsmodellene før manipulasjon, da vann noen steder drenerte over veien. Stort sett er erfaringen min at en ikke nødvendigvis trenger manipulasjon med infrastruktur i et ruralt område. Da avrenningen i DHM1 uten manipulasjon også viser at den har fått generert grøfter ganske godt. Dataen er som nevnt 4-5 år gammel og Grøfter som ble utbedret i 2014 er ikke med i Lidar dataen. Grøftene kan noen steder ha vært så grunne at vannet faktisk har kunnet renne over veien. Ettersom grøftene ble utbedret i 2014 har det blitt valgt å heve veien og gjøre grøftene tydeligere, da dette blir mer realistisk ved en flomhendelse ved dagens tilstand. Verdien på 1 m er muligens litt høy, men da reklassifiseringsverktøyet bare ville ha hele verdier var dette det beste alternativet.

Etter å ha vurdert hvilke av de tre høydemodellene som er mest hydrologisk korrekt, har det også blitt gjort en vurdering av hvilke høydemodell som avviker mest fra de målte punktene (Lidar punktene). Dette ble gjort ut fra likning 4 som bestemmer KMV, hvor en som nevnt i avsnitt 4.7.1 finner avviket til de estimerte punktene fra de målte verdiene. Resultatet som vises i Tabell 3. gir et inntrykk av at DHM1 nesten er helt korrekt mens DHM2 og 3 avviker noe mer fra disse punktene. Denne verdien er funnet ved hjelp av 11 000 tilfeldig utvalgte punkter (0,1 % av alle punktene), fordelt ut på 11.52km<sup>2</sup> hvor det er 11 069 352 Lidar punkter. DHM1 avviker minst og kan nesten



sies å være helt korrekt. Selv om avviket muligens ikke er helt korrekt kan en si at resultatet er representativt for hvilke høydemodell som er mest korrekt. Dette blir antatt fordi det er gjort flere utvalg med flere og færre punkter og regnet ut KMV av disse, hvor resultatet ble tilsvarende likt hver gang. Ut fra dette ser det ut til at DHM1 er den mest korrekte, deretter følger DHM3 og 2. KMV ble regnet ut i Excel slik at det og jobbe med mange punkter ble litt tungvint. Det kunne nok også vært mulig å beregne KMV i egenskapstabellen i ArcGIS. Dette kunne også vært regnet ut for målte punkter høydepunkter fra FKB-data, men da dette bare var 13 punkter innenfor terrengmodellene ble dette sett bort fra.

### **5.2.1 Behov for supplerende FKB data i rurale områder?**

For generering av en hydrologisk korrekt høydemodell ble det nevnt av (NVE 2012, Meiforth 2013) at en del høydemodeller ville ha behov for supplerende FKB data. Erfaringen de har hentet inn kommer stort sett fra mer rurale områder hvor det er mye menneskeskapte elementer som påvirker avrenningen. Meiforth (2013) har benyttet seg av terreng til raster i et urbant område, men denne metoden virket ikke å fungere like godt i rurale områder. Forskningsområdet i oppgaven ligger mer ruralt. Det er lite bebyggelse og lite menneskeskapte elementer som påvirker avrenningen. Stort sett viste det seg at høydemodellen hvor det kun er Lidardata var god nok. Det har skjedd utbedring av grøfter og liknende det siste året og spørsmålet vil da være om resultatet vært enda bedre om Lidardataen var samlet inn i år. Det ble valgt å supplere med veidata i høydemodellene, men dette utfra felterfaringer. Ut fra resultatene med avrenning vil en kunne anta at det ikke nødvendigvis er behov for supplerende fkb data i rurale områder. Dette avhenger selvfølgelig av punkttettheten på Lidar dataen, samt også når Lidar dataen er samlet inn. Det vil muligens også være nødvendig å være kjent i området å ha gjort feltobservasjoner. En kan ut fra resultatene kunne anta at en punkt tetthet på alt fra 0,50-0,90 m er god nok til å derivere en høydemodell uten noen form for supplerings med FKB-data.

### **5.3 Nedbørs data, avrenning og responstid:**

I problemstillingen er det formulert et spørsmål om det er mulig å tilføre regnvann i flomveis modellen. Det er mulig å simulere en faktisk vannmengde med avrenning i en høydemodell ved bruk av en rekke programvarer. Det ble dessverre ikke tid til å gjøre en slik simulering men det er gjort en beregning ved bruk av den rasjonelle formel, samt er responstiden beregnet og en Figur laget i ArcGIS viser også dette (se avsnitt 4.10.1).

Ut fra de tre mulighetene for å simulere regnvannsavrenning som nevnes i avsnitt 4.10 ser det ut til at «Mike flood» vil være den mest komplette muligheten for å simulere eller gjøre dette. Selv om «HEC-HMS» også ser ut til å være et godt alternativ. «Mike flood» gir muligheter for avrenning med drenerings nettverk som stikkrenner, grunnvann o.l. Den gir også realistiske avrenninger av overvann da det er muligheter for avrenning til flere celler. Eneste ulempen med dette er muligens at programmet opprinnelig er laget for urban flom modellering. Men ut fra hva som kommer frem er også programmet benyttet til flom-modellering i rurale strøk. Fordelen med bruk av HEC-HMS vil være at programvaren ligger tilgjengelig gratis, og gir da muligheter for alle og benytte seg av dette. HEC-HMS har en kobling med ArcGIS, Mike flood har en delpakke ved navn Mike11 GIS som kan kobles til ArcGIS. Generelt kan en tro at HEC-HMS er mer kompatibelt sammen med ArcGIS.

Det ville vært spennende å se på avrenning med en faktisk vannmengde er for å se hvor mye dette vil påvirke flomveismodellene. Samt at det ville vært spennende å se hvor mye vann en stikkrenne vil tåle ved forskjellige nedbørintensiteter. Disse metodene er som nevnt ikke brukt i oppgaven men dette vil være spennende elementer å jobbe videre med i senere masteroppgaver.

#### **5.3.1 Responstid og avrenning:**

Istedenfor å bruke mye tid på å lære disse programmene har det blitt valgt å beregne responstiden til Nedslagsfeltene ut fra den rasjonelle formel som står i håndbok N200 gitt av Vegdirektoratet (2014). Dette er sammenliknet med Figur 42 som viser feltenes responstid. Dette er gjort ut fra avrennings lengde (engelsk: flow lenght) i ArcGIS med utgangspunkt i at vannet renner med en hastighet på 1 m/s. Valget av 1 m/s, kom fra en anbefaling fra Reinemo (2015). Etter å ha sammenliknet dette med responstiden som

står nevnt i delkapittel 4.10.1 ser dette ut til å stemme ganske bra. Det kommer frem at vann dreneres fortere vekk noen steder i feltene. Hvis en ser på den høyeste verdien i feltene kontra verdien som er regnet ut fra likning 6, ser dette ut til å stemme ganske bra. Da høyeste verdi i felt 1 vist i Figur 44 er 30 min hvor det mangler noe smått med punkter, her er responstiden fra likning 6 34 min slik at dette bekrefter Figur 44. Det samme gjelder felt 2 hvor høyeste verdi er mellom 30 og 60 min, hele feltet er med og det ser ut til at responstiden på 48 min bekrefter at Figur 44 kan være riktig. Størrelsen på feltene er også innenfor den øvre grensen som står nevnt i håndbok N200 (Vegdirektoratet 2014).

Ved en 200-års flom vil vannmengden ut av bunnen av feltene være på 811 L/s ved felt 1 og 1492 L/s. Disse verdiene er ved en ekstrem flomhendelse og det er tatt med en klimafaktor på 20 % som anbefales ut fra håndboka.

Før en gjør slike avrenningsberegninger gir Vegdirektoratet (2014) en sjekklister som kan være behjelpelig.

1. Er det nedbørsobservasjoner i nærheten av feltet som skal beregnes? Er IVF-kurvene for området oppdaterte og som er representative for det aktuelle feltet?
2. Nedbørsfeltets areal og avrenningsfaktor må beregnes, Er feltet større enn 10km<sup>2</sup> bør ikke den rasjonelle formel brukes. C verdien er et mål på hvor mye av den totale nedbøren som dreneres gjennom stedet. Den valgte C verdien skal være en middelvei for hele feltet.
3. Hva kan skje ved underdimensjonering vil det være en alternativ flomvei slik at evt skader ikke nødvendigvis vil oppstå?

Ut fra beregningene som er gjort, har det blitt tatt utgangspunkt i IVF-kurver fra Risvollan i Trondheim da dette var den nærmeste målestasjonen med gode og lange nok måleserier. Avstanden fra Risvollan til feltene i Soknedalen er på ca. 65 km, dette er en ganske god avstand og lokale forskjeller kan forekomme når det gjelder nedbør. Det ble valgt å benytte denne måleserien selv om avstanden mellom målestasjonen og feltene er stor. IVF kurven er oppdatert og kan være representative nok for å få frem tall på en mengde nedbør. Uansett never også Vegdirektoratet (2014) sier også at det er ganske stor usikkerhet ved bruk av lange returperioder slik at det vil være stor usikkerhet dataen fra en returperiode på 200 år. Ved så store returperioder vil dataen også bli bedre ved lange og gode måleserier slik som det er på Risvollan.

Derimot størrelsen på feltene overskrider ikke grensen som er nevnt i sjekkpunkt nr 2. C verdien som er valgt 0,4 ut fra tabell 4 for å være konservativ samt ut fra et eksempel som står nevnt i håndbok N200 gitt av Vegdirektoratet (2014) hvor de har benyttet 0,38 ved tilsvarende tilstand ved en 100 års retur periode. Feltet er stor sett bare dekket av skog og jordbruk og det er anbefalt at det bør legges på 30 % på C verdien ved en returperiode på 200 år.

Ut fra sjekkpunkt 3 vil dette gjelde ved beregning av kapasitet på stikkrenner, dette er ikke tatt hensyn til. Men med dimensjonen på stikkrenna ville dette være enkelt å gjennomføre. Når det gjelder alternative flomveier, finnes dette delvis langs jernbanegrøftene. Vannet føres forhåpentligvis til neste stikkrenne, men det er en god mulighet for at kapaisteteten på denne vil overskrides.

Resultatene ut fra mengden avrenning i L/s ved en 200 års flomhendelse kan sies og være ganske korrekt ved bruk av den rasjonelle formel for disse to feltene. Disse to feltene er relativt små slik at feilmarginen som nevnes av Vegdirektoratet (2014) ikke vil være så stor. Det eneste som muligens kunne vært bedre ved beregningen er å ha brukt IVF-kurver som var nærmere feltene. Da dette ikke var tilgjengelig, ble den dataen som var best og nærmest benyttet. På denne måten kan det være noe feil, men en kan allikevel ta utgangspunkt i at resultatet er relativt korrekt.

Det kunne også blitt stilt spørsmål ved om den rasjonelle formel ville vært mulig å implementere som et verktøy i ArcGIS. Dette vil muligens være veldig komplisert, men ville gitt muligheter for å kunne tilføre nedbørsmengder og sammenlikne intensiteter fra forskjellige gjentaksintervaller.

#### **5.4 Bruk av verktøy i ArcGIS, fordeler og ulemper?**

Som nevnt har ArcGIS blitt benyttet som analyseverktøy gjennom oppgaven. Blant annet behandling av rådata, konstruksjon av høydemodeller, beregning av KMV og konstruksjon av avrenningsmodeller. Ved bruk av programmet er det selvfølgelig fordeler og ulemper avhengig av bruksområder. Geodatabase formatet og organiseringen av filer i ArcGIS gjør en del analyseverktøyer enklere, samt skaper en

god arbeidsflyt i programmet. ArcGIS har også en bred plattform hvor det kan bruke en rekke dataformater og gjøre analyser. Ulemper er at en del hydrologisk modelleringsprogrammer ofte er eksterne, da spesielt hvis det skal tilføres faktisk nedbør.

Hvis eksterne aktører skal benytte dette som en bruksanvisning for konstruksjon av høydemodeller, vil de muligens være avhengige av og leie inn andre lisenser til ArcGIS er kostbart. Dette gjør at for eksempel kommuner nødvendigvis ikke har økonomi til å ha tilgang til denne programvaren. Men det kan tas utgangspunkt i at en kun trenger å benytte seg av Lidar til å derivere hydrologisk korrekte høydemodeller.

### **5.5 Relevans for Jernbaneverket og Nifs-prosjektet:**

Som nevnt i bakgrunnen for oppgaven skrives dette innenfor DP 5 av nifs-prosjektet, det kan derfor være nyttig i å diskutere hvordan arbeidet kan komme nifs og jernbaneverket til nytte.

Oppgaven kan komme NIFS-prosjektet og Jernbaneverket til nytte ved deres videre arbeid for å lage en slags fast metode til generering av hydrologisk korrekte høydemodeller. Det kommer frem at det er stor usikkerhet både ved datagrunnlag og beregningsverktøy for flom. Slik at det som er gjort i oppgaven ved å ta utgangspunkt i bestemte datagrunnlag og finne hvilke høydemodell som er den mest hydrologisk korrekt ut fra dette. Det kan komme NIFS-prosjektet til nytte i den form at de vet hvilke datagrunnlag de kan benytte for å skape en god nok høydemodell til flomveisberegninger. Det er også et ønske om å ha enkelhet til bruk av slike beregninger og når en har kommet med forslag for hva som kan gjøres vil dette være enklere for andre senere. Erfaringer fra oppgaven vil kunne være med å hjelpe DP5.1 til å komme nærmere et mål om å lage en veileder for flomberegninger i små nedslagsfelt (NIFS 2014).



## 6 Konklusjon:

Det har i oppgaven blitt sett på hvilke metode som lager den hydrologisk mest korrekte høydemodellen. 1. Las til raster 2. topo til raster 3. terrengdatasett til raster. Det viser seg at det og direkte derivere en terrengmodell fra Lidar data ved bruk av Las datasett til raster gir det hydrologisk mest korrekte resultatet. Dette kommer både frem fra flomveismodellene ved avrenning og KMV beregningene. Det kommer også frem at punkttettheten på Lidar-dataen har innvirkning på resultatet og påvirker mer enn hva interpolasjonsmetoden gjør, men at punktettheten på 0,5 m - 0,9 m er god nok. Valget av metode i ArcGIS viser seg å være den faktoren som påvirket mest ved konstruksjon av høydemodellene.

Det er også undersøkt muligheter for å tilføre fysiske nedbørsmengder og om dette har noe å si i flomveismodellen. Det kommer frem av oppgaven at det finnes flere programmer som kan gjøre dette, hvor det viser seg at Hec-HMS og Mike-Flood er de beste alternativene. Det kan dessverre ikke svares på om det vil ha noen innvirkning på selve flomveismodellen da det ikke ble tid til å bruke noen av disse programmene. Det ble derfor heller beregnet responstid og avrenning i de to nedbørsfeltene ved den rasjonelle formel. Responstiden til feltene viste seg å være 34 min i felt 1 og 48 min i felt 2 noe som også stemte med modellen for Figuren med responstid. Avrenningen i feltene viste seg å være 811 L/s i felt 1 og 1492 L/s i felt 2 ved en 200 års returperiode av nedbør gitt av en IVF-kurve.

Jernbaneløst og NIFS-prosjektet kan dra nytte av oppgaven da det er en del usikkerhet rundt datagrunnlag ved konstruksjon av høydemodeller til bruk i flomveismodellering. Oppgaven tar utgangspunkt i to typer referansedata og konstruerer hydrologisk korrekte høydemodeller, som kan hjelpe til å gi mindre usikkerhet rundt datagrunnlag som kan brukes med denne hensikten. Samtidig vil denne oppgaven kunne hjelpe dem å komme et skritt nærmere målet om å lage en felles veileder for flomberegninger i mindre nedbørsfelt.

## 6.1 Bemerkninger og videre forskning

Metodikken benyttet i denne oppgaven er basert på grunnleggende prinsipper i GIS. Dette vil da si at denne analysen ikke nødvendigvis er stedbunden og teoretisk sett vil det være mulig å gjennomføre til forskning hvor en selv ønsker. Realiteten er at data vil variere mye fra et sted til et annet. Dette vil kunne gjøre det vanskeligere å gjennomføre like undersøkelser andre steder. Noen steder er det høyoppløselig geografiske data andre steder er det ikke det. Dette kan gjøre det vanskelig å gjennomføre tilsvarende analyse andre steder i landet, Selv om det er planer om å kartlegge store deler av Norge med Lidar slik som det er gjort i Sverige.

Resultatene i denne oppgaven kan ut fra min mening sees som et utgangspunkt for videre forskning, og er et metodisk eksempel på anvendelse av høyoppløselige data til konstruksjon av hydrologisk korrekte høydemodeller. Elementer kan brukes til videre forskning, men en må være påpasselig på er følgende:

- En kan benytte seg av høyoppløselig data til og konstruere en digital høydemodell basert på mine resultater, og deretter prøve og tilføre nedbørsmengder fra ekstremhendelser. Dette vil kunne kreve grunnleggende kunnskap om fluviale systemer, eller bør gjøres i samarbeid med noen med en fluvialgeomorfologisk bakgrunn.
- Da naturlige prosesser og menneskelige inngrep skjer over tid, som vist i denne oppgaven vil tidspunktet for datafangsten påvirke analysen. Det vil derfor være hensiktsmessig og benytte seg av så ny data som mulig. Brukes flere datakilder bør disse være samlet inn med relativt kort intervall. Det vil også være nødvendig og være kjent i området en undersøker som vist i oppgaven med felterfaringer ved utbedring av grøfter.



## Referanseliste:

Bater, C. W. & N. C. Coops (2009). "Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation." Computers & Geosciences **35**(2): 289-300.

Beven, K. J. (2012). "Rainfall-runoff modelling the primer."

Borga, M., E. N. Anagnostou, G. Blöschl & J. D. Creutin (2011). "Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project." Environmental Science & Policy **14**(7): 834-844.

Bratlie, R. (2013). "GIS finner flomveiene."

Childs, C. (2004). "Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst." ArcUser, July-September: 32-35.

Collier, C. G. (2007). "Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?" Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society **133**(622): 3-23.

DHI (2012). "Urban climate change - how to achieve sustainable adaptation in urban areas."

DHI (2015a). "Mike flood." Retrieved 27.04, 2015, from <http://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-flood>.

DHI (2015b). "Mike 11 River modelling unlimited."

DHI (2015c). "Mike flood Urban, coastal and riverine modelling."

Esri (2011a). "How Fill works." Retrieved 04.11, 2014, from [http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How\\_Fill\\_works/009z00000061000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Fill_works/009z00000061000000/).

Esri (2011b). "How sink works." Retrieved 04.11, 2014, from [http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How\\_Sink\\_works/009z00000065000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Sink_works/009z00000065000000/).

Esri (2011c). "How Flow Accumulation works." Retrieved 04.11, 2014, from [http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How\\_Flow\\_Accumulation\\_works/009z00000062000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Flow_Accumulation_works/009z00000062000000/).

Esri (2011d). "How natural neighbour works." Retrieved 12.02, 2015, from [http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How\\_Natural\\_Neighbor\\_works/009z00000077000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Natural_Neighbor_works/009z00000077000000/).

Esri (2011e). "How Natural Neighbor works." Retrieved 01.05, 2015, from [http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How\\_Natural\\_Neighbor\\_works/009z00000077000000/](http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/How_Natural_Neighbor_works/009z00000077000000/).

Esri (2012a). "Exploring digital elevation models." Retrieved 04.11, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z0000005n000000>.

Esri (2012b). "How Flow Direction works." Retrieved 04.11, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How Flow Direction works/009z00000063000000/>.

Esri (2012c). "How topo to raster works." Retrieved 06.11, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z0000007m000000>.

Esri (2012e). "How Watershed works." Retrieved 04.12, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/How Watershed works/009z00000068000000/>.

Esri (2012f). "Las dataset to Raster." Retrieved 05.12, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//001200000052000000>.

Esri (2012g). "Terrain to raster (3d analyst)." Retrieved 11.04, 2015, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//00q90000002t000000>.

Esri (2012h). "How spline works." Retrieved 05.05, 2015, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000078000000>.

Esri (2013). "Creating raster DEMs and DSMs from large lidar point collections." Retrieved 04.11, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//015w0000004q000000>.

Esri (2014a). "Las dataset to raster function." Retrieved 21.11, 2014, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/LAS Dataset To Raster function/009t00000205000000/>.

Esri (2014b). "TIN." Retrieved 05.11, 2014, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/TIN>

Esri (2014c). "Raster." Retrieved 08.02, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/raster>.

Esri (2014d). "Vector." Retrieved 08.02, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/vector>.

- Esri (2014e). "What is a terrain dataset." Retrieved 12.02, 2015, from <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.2/index.html#//005v00000002000000>.
- Esri (2015a). "Using topo to raster in 3d analyst." Retrieved 14.04.2015, 2015, from [http://resources.esri.com/help/9.3/ArcGISDesktop/com/Gp\\_ToolRef/Geoprocessing/using\\_topo\\_to\\_raster\\_in\\_3d\\_analyst.htm](http://resources.esri.com/help/9.3/ArcGISDesktop/com/Gp_ToolRef/Geoprocessing/using_topo_to_raster_in_3d_analyst.htm).
- Esri (2015b). Retrieved 14.04, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/breakline>.
- Esri (2015c). "Extrapolation." Retrieved 24.04, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/extrapolation>.
- Esri (2015d). "interpolation." Retrieved 24.04, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/interpolation>.
- Esri (2015e). "Spatial autocorrelation." Retrieved 25.04, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/spatial%20autocorrelation>.
- Esri (2015g). "Delaunay triangulation." Retrieved 05.05, 2015, from <http://support.esri.com/en/knowledgebase/GISDictionary/term/Delaunay%20triangulation>.
- Esri (2015h). "Working with 3D data." Virtual campus course.
- Fisher, P. F. & N. J. Tate (2006). "Causes and consequences of error in digital elevation models." Progress in Physical Geography **30**(4): 467-489.
- Georgakakos, K. P. (1986). "On the Design of National, Real-Time Warning Systems with Capability for Site-Specific, Flash-Flood Forecasts." Bulletin of the American Meteorological Society **67**: 1233-1239.
- Goodchild, M. F. & D. M. Mark (1987). "The fractal nature of geographic phenomena." Annals of the Association of American Geographers **77**(2): 265-278.
- Gruber, S. & S. Peckham (2009). Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. Developments in Soil Science. H. Tomislav and I. R. Hannes, Elsevier. **Volume 33**: 171-194.
- Hartkamp, A. D., K. De Beurs, A. Stein & J. W. White (1999). Interpolation techniques for climate variables, CIMMYT Mexico, DF.
- Hengl, T. (2006). "Finding the right pixel size." Computers & Geosciences **32**(9): 1283-1298.

Hengl, T. & I. S. Evans (2009). Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface. Developments in Soil Science. H. Tomislav and I. R. Hannes, Elsevier. **Volume 33**: 31-63.

Hengl, T. & H. I. Reuter (2009). Developments in Soil Science, Elsevier.

Hu, Y. (2004). Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data.

Hydrologic-engineering-center (2015a). "HEC-HMS." Retrieved 23.04, 2015, from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.

Jones, R. (2002). "Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples." Computers & Geosciences **28**(9): 1051-1060.

Kartverket (2013). "hva er kart." Retrieved 06.11, 2014, from <http://www.statkart.no/Kunnskap/Kart-og-kartlegging/Hva-er-kart/>.

Kartverket (2015). "Norgeskart." Retrieved 08.05, 2015, from [www.norgeskart.no](http://www.norgeskart.no).

Kienzle, S. (2004). "The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives." Transactions in GIS **8**(1): 83-111.

Lawrence, D. & H. Hisdal (2011). Hydrological projections for floods in Norway under a future climate. Oslo, Norwegian Water Resources and Energy Directorate.

Leandro, J., A. Chen, S. Djordjević & D. Savić (2009). "Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation." Journal of Hydraulic Engineering **135**(6): 495-504.

Liu, X. (2008). "Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues." Progress in Physical Geography **32**(1): 31-49.

Liu, X., Z. Zhang, J. Peterson & S. Chandra (2007). The effect of LiDAR data density on DEM accuracy. Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM07), Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc.

Lohani, D. B. (2015). "Airborne altimetric Lidar." Retrieved 09.05, 2015, from [http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR\\_Tutorial/Airborne\\_AltimetricLidar\\_Tutorial.htm](http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm).

Maidment, D. R. (1996). GIS and hydrologic modeling-an assessment of progress. Proceedings of the Third International Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling.

Marchi, L., M. Borga, E. Preciso & E. Gaume (2010). "Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management." Journal of Hydrology **394**(1-2): 118-133.

McCullagh, M. (1988). "Terrain and surface modelling systems: theory and practice." The photogrammetric record **12**(72): 747-779.

Meiforth, J. (2013). "Kartlegging av åpne flomveier i urbane områder." Fremtidens byer.

Metrologisk-institutt (2015). "eKlima." Retrieved 22.04, 2015, from [www.eklima.met.no](http://www.eklima.met.no).

MSEH (2010). "Remote sensing techniques." Retrieved 27.04, 2015, from <http://www.emodnet-seabedhabitats.eu/default.aspx?page=1735>.

Murphy, P. N. C., J. Ogilvie, F.-R. Meng & P. Arp (2008). "Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification." Hydrological Processes **22**(12): 1747-1754.

Nelson, A., H. I. Reuter & P. Gessler (2009). Chapter 3 DEM Production Methods and Sources. Developments in Soil Science. H. Tomislav and I. R. Hannes, Elsevier. **Volume 33**: 65-85.

NIFS (2014). "Naturfare, infrastruktur, flom og skred." Retrieved 04.11, 2014, from <http://www.naturfare.no/>.

NVE (2012). "Hvordan ta hensyn til klimaendringer i arealplanleggingen."

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

Olaya, V. (2009). Chapter 6. Basic Land-Surface Parameters. Geomorphometry: concepts, software, applications. T. Hengl and H. I. Reuter, Elsevier. **33**: 141-169.

Olivera, F., J. Furnans, D. Maidment, D. Djokic & Z. Ye (2002). Chapter 4 Drainage systems. Arc Hydro GIS for water Resources. D. R. Maidment, Esri Press: 55-86.

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

Powersim (2015). "The rainfall module." Retrieved 17.03, 2015, from [http://www.powersim.com/main/business-simulation/view\\_simulation/rainfall-simulation-video2/](http://www.powersim.com/main/business-simulation/view_simulation/rainfall-simulation-video2/).

Reinemo, P. (2015). Hastighet på avrenning til beregning av responstid. mail, NVE.

Reuter, H. I., T. Hengl, P. Gessler & P. Soille (2009). Chapter 4 Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. Developments in Soil Science. H. Tomislav and I. R. Hannes, Elsevier. **Volume 33**: 87-120.

Romano, M. E. (2004). "Innovation in LiDAR processing technology." Photogrammetric engineering and remote sensing **70**(11): 1201-1206.

Siccardi, F., G. Boni, L. Ferraris & R. Rudari (2005). "A hydrometeorological approach for probabilistic flood forecast." Journal of Geophysical Research: Atmospheres **110**(D5): D05101.

Sjøvold, F., M. Viklund, Å. Elgvasslien & E. Jjunju (2013). Skredfarekartlegging Dovrebanen, Garli - Støren. Cowi. jernbaneverket, Sweco: 37.

Tarboton, D. (2013). "D-infinity flow directions." Retrieved 02.05.2015, 2015, from <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/help/DInfinityFlowDirections.html>.

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): 309-319.

Vatne, G. (2013). styrtflommer og klimaendringer. mot en farligere fremtid? M. L. Bye, H. Lein and J. K. Rød, akademika forlag.

Vegdirektoratet (2014). Vegbygging N200, Statensvegvesen.

Wechsler, S. (2007). "Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review." Hydrology and Earth System Sciences **11**(4): 1481-1500.

Yang, P., D. P. Ames, A. Fonseca, D. Anderson, R. Shrestha, N. F. Glenn & Y. Cao (2014). "What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results?" Environmental Modelling & Software **58**(0): 48-57.