

Christian Grønvold

Structure-from-Motion:

En bildebasert applikasjon for volumetrisk estimering av geomorfologiske endringer.

Masteroppgave i Geografi

Veileder: Geir Vatne

Trondheim, mai 2016

Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet

Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse

Geografisk Institutt



Abstract

This study addresses Structure-from-Motion as an easier application for successfully calculating geomorphological change in a volumetric context, without scientific background from geomatics. Fieldwork generated two terrain models of a landslide scar along the river Vekve in Oppdal municipality, Norway. The research data was captured with consumer grade SLR cameras. A LiDAR derived point cloud was used as ground proof to compare and evaluate SfMs ability to reconstruct the scene. The SfM terrain models was differentiated with GIS-application, GPS-referenced and adjusted for the associated uncertainty in terrain models. 97,63 % of the differences between LiDAR and SfM models was in the range of -8,8 cm and +10,6 cm. The differentiation of SfM models, dating 24.September and 11.November, adjusted for probability of real change was calculated to -4 m^3 . SfM represent a cheaper and more accessible alternative to capture high resolution topographic data. The method is well suited for modelling and estimation of volumetric change in a geomorphologic context for personnel without background from geomatics.

Abstrakt

Denne studien ønsker å belyse om Structure-from-Motion er en enkel og egnet metode for ufaglært personell å benytte til studie av geomorfologisk endring med en volumetrisk tilnærming. To feltarbeider resulterte i to terrengmodeller av et skredsår langs Vekveselva i Oppdal kommune, Norge. Datamaterialet ble hentet med vanlige speilreflekskameraer. En terrengmodell ble sammenlignet med LiDAR-derivert terrengmodell som kontroll. SfM-modellene ble differensiert ved bruk av GIS-programvare, referert med GPS-punkter, og justert for usikkerhet forbundet med terrengmodeller. 97,63 % av differanser mellom LiDAR- og SfM-modell ble funnet til å være mellom -8,8 cm og +10,6 cm. Differansene mellom SfM-modellene justert for sannsynlighet for at endringen er reell viser at volumetrisk endring i perioden mellom 24. september og 11. november var -4 m^3 . SfM representerer et billig og tilgjengelig alternativ til innsamling av høyoppløselige terrengdata. Metoden egner seg godt til modellering og estimering av volumetrisk endring av skredoverflater for personell uten bakgrunn fra geomatikk.

Forord

Denne masteroppgaven er gjennomført ved Geografisk Institutt ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. Oppgavens omfang er 60 studiepoeng, og er det naturlige endepunktet for fem års fordypning i geografis verden.

I løpet av det siste året har utallige timer gått med på å sitte foran skjermen og enorme mengde kaffe blitt konsumert. Modellering er en emosjonell berg- og dalbane. I det ene øyeblikket er du overlykkelig for at du endelig fikk det til, bare for å innse rett etterpå at det ikke stemte. Modellering er tidkrevende, og man må være tålmodig. Selvstendigheten i arbeidet har vært ekstremt lærerikt, og det er noe eget å levere et arbeid man med sikkerhet kan tilskrive egen innsats og vilje.

GIS, modellering og geodata er noe av det mest utfordrende og spennende jeg vet om. Derfor har dette året vært veldig spennende og underholdende. Det er utrolig spennende å kartlegge kapabiliteten og bruksområdene til en fersk datafangstmetode.

En velrettet takk til veileder Geir Vatne som har vært tilgjengelig for diskusjoner rundt valget av problemstilling. Allikevel går den største takknemligheten til Radmil Popovic som har stilt opp hver gang jeg har hatt behov for hjelp. En stor takk til mamma Elin og pappa Frank som støtter meg i alt jeg setter meg fore, og som kommer til å lese denne oppgaven og gi opp underveis. Takk til kontor-rottene som skaper trivsel og god stemning i hverdagen.

Trondheim 10.05.2016,

Christian Grønvold

Innholdsfortegnelse

Abstract	III
Forord.....	V
Figurliste	XI
Tabelliste.....	XI
1. Innledning	1
1.1 Introduksjon.....	1
1.2 Bakgrunn for tema	1
1.3 Disposisjon.....	2
1.4 Terminologi	3
2. Lignende studier: Gjennomføring og resultater	5
2.1 Studier som sammenligner LiDAR og SfM.....	5
2.1.1 Erosjon av elvebanker	5
2.1.2 Kystnær klippe i Wales	6
2.1.3 SfM til å kartlegge med et lite ubemannet fly	6
2.2 SfM i endringsundersøkelser	7
2.2.1 Kartlegging av snødybder	7
2.2.2 Småskala overflaterkonstruksjon.....	8
3. Områdebeskrivelse	11
3.1 Beliggenhet og topografi	11
3.1.1 Oppdal	11
3.1.2 Vekve	12
3.2 Geologi	12
3.3 Løsmasser	12
4. Teori.....	15
4.1 Structure-from-Motion som geomorfologisk forskningsmetode.....	15
4.2 Utstyr	17

4.3	Feltundersøkelsesstrategi	17
4.4	Matematiske prinsipper i sammenligningsstudier av terrengmodeller	18
4.4.1	Statistiske mål	18
4.4.2	Grense for å oppdage geomorfologisk endring	19
5.	Metodologi	23
5.1	Feltmetoder	23
5.1.1	GPS og dGPS	23
5.1.2	Feil i målinger	24
5.2	Feltutstyr	24
5.2.1	GPS	25
5.2.2	Kamera	25
5.3	Feltarbeid	25
5.3.1	Første feltarbeid 28.05.15	25
5.3.2	Andre feltarbeid 24.09.15	26
5.3.3	Tredje feltarbeid 11.11.15	26
5.4	Bearbeiding av data	26
5.4.1	Agisoft Photoscan	27
5.4.2	Differensiering av SfM terrengmodellene i ArcGIS	33
5.4.3	Differensiering av LiDAR og SfM 24.9.2015	35
6.	Resultater	41
7.	Diskusjon	47
7.1	Feltarbeidet	47
7.2	Prosesseringsarbeidet	49
7.2.1	Valg av programvare	49
7.2.2	Modelleringsarbeidet	50
7.2.3	De resulterende modellene	52
7.3	Structure-from-Motion sammenlignet med LiDAR	53

7.3.1	Differansemodeller	53
7.3.2	Resultat sammenlignet med andre studier	54
7.3.3	SfM som modelleringsverktøy	56
7.4	Structure-from-Motion som metode for geomorfologisk endringsundersøkelse 56	
7.4.1	Sammenligning med andre studier	56
7.4.2	Differansen mellom SfM-terrengmodellene	58
7.5	Arbeidets kompleksitet	60
7.6	Veien videre for SfM i geomorfologisk endringsundersøkelse	62
8.	Konklusjon	65
9.	Litteraturliste	67
9.1	Artikler og bøker	67
9.2	Internettkilder	68

Figurliste

Figur 1: Oversiktsbilde av studieområdet	11
Figur 2: Normalfordelingskurve med fordeling av observasjoner innenfor fire standardavvik. Skjermdump fra http://www.marin.edu/~npsomas/Lectures/Ch_1/Section_03.htm	19
Figur 3: Stegvis framgang i AgiSoft PhotoScan.	28
Figur 4: Parametervalg i Align-funksjonen. Default-verdiene for nøkkel- og knutepunkter er byttet ut med 0.	28
Figur 5: Kameraposisjoner og lavtetthetspunkttsky.	29
Figur 6: Punktantallet er økt betraktelig når de to modellene har blitt til høytetthetspunkttskyer.	30
Figur 7: Ferdigstilte modeller, endeproduktet for selve modelleringsprosessen.....	30
Figur 8: Resultatet etter å ha justert de to modellene til hverandre.....	31
Figur 9: Parametervalg for opprettelsen av DEM.	32
Figur 10: De to SfM-genererte DEM klare for bearbeiding.	33
Figur 11: Flytdiagram fra Model Builder i ArcMap.	34
Figur 12: Alternativ metode for å hente ut volumetriske data.	35
Figur 13: Punktskyen fra laserdataene.	36
Figur 14: Parametervalg for finjusteringen.	37
Figur 15: Parametervalg for LiDAR-SfM-differensieringen.	38
Figur 16: Differansemodell med verdifordeling til høyre.	38
Figur 17: Differensiering av LiDAR-punkttsky og SfM-modell.	41
Figur 18: Kart med differanser, student t-verdier og sannsynlighet for endring. Differanseverdiene er oppgitt i meter.....	43
Figur 19: Viser positiv og negativ endring med volumetrisk tilnærming i studieområdet.	44
Figur 20: Resultatet av vekting av differanser mot sannsynlighet for endring. Endringene er oppgitt i meter.	45
Figur 21: Skjermdump av høytetthetspunkttskyen fra november. Med dette detaljnivået kan man identifisere individuelle steiner, strukturer og kontrollpunktene.	58

Tabelliste

Tabell 1: Viser tidsbruken knyttet til hver prosess, som er ren data-prosessering. Tidsbruken er da som dødtid å regne, og man kan ikke ta seg til noe i programmet. Tiden er i formatet tt:mm:ss.	32
---	----

Tabell 2: Tabellen viser verdiene fra A) tilhørende figur 18.	43
Tabell 3: Spredningsmålene fra SfM-LiDAR-differensieringen. Verdier utenfor to standardavvik er fjernet fra datamaterialet.	54

1. Innledning

1.1 Introduksjon

Hvorfor skal man studere skred langs bratte fjellelver? Bratte fjellelver er en setting hvor man kan se på fluvial sedimenttransport. Under flommen i 2011 og 2013 i Nordre Gudbrandsdalen var massetransporten i elver og bekker stor. Massetransporten førte til store skader på veg og jernbane i området. Som følge av dette kom et ønske om økt kunnskap massenes opphav. Derfor er det en fordel å undersøke om SfM er en aktuell metode. Dette vil også ha mye å si for kraftproduksjonsselskaper med tanke på hvilke tiltak som må gjøres før man eventuelt kan bygge ut vassdrag til vannkraft. Bruk av høyoppløselige DEM (Digital Elevation Model, digitale terrengmodeller) er vanlig i dagens forskning. Til tross for økt bruk av denne type overflatedata, er innhenting av dataene ofte forbundet med vanskelig, samt mye, arbeid. Spørsmålet er derfor om det finnes metoder for å forenkle innhenting av overflatedata, og som samtidig har god nok kvalitet til å kunne gjennomføre kvantifiseringer av massetap eller masseøkning. Fordelen med å bruke laser er at metoden er etablert, og man har god og inngående kunnskap om dens nøyaktighet og bruksområder. Ulempen er at innhenting av data gjerne krever personell med ekstensiv faglig bakgrunn innenfor geomatikk, samt at utstyret er dyrt, og er vanskelig å frakte med seg inn i feltområder utilgjengelig fra allfarvei. Fordelen med Structure-from-Motion er at man ikke trenger faglærte for å benytte seg av metoden. Den hevdes også å være enkel, billig og rask, noe som gjør den godt egnet til forskning i utilgjengelige områder. Ulempen med denne metoden er at den er mindre etablert enn LiDAR-baserte løsninger, noe som medfører usikkerhet rundt nøyaktigheten på produserte overflater. I denne oppgaven skal fokuset være å kvantifisere volumendringer i et skredsår ved å sammenligne SfM-modeller innhentet under feltarbeider høsten 2015.

Forskningsspørsmålet i denne oppgaven er om Structure-from-Motion er egnet for å kalkulere volumendringer i et skredsår langs Vekveselva i Oppdal kommune. Oppgaven skal belyse om SfM er en enkel metode å benytte for å oppdage geomorfologiske endringer for personell uten faglig bakgrunn fra geomatikk.

1.2 Bakgrunn for tema

Første gang forfatter hørte om Structure-from-Motion var på en årskongress for geografi-studenter med den europeiske foreningen EGEA (European Geography Association for students and young geographers) i Romania høsten 2014, hvor et av bidragene under

presentasjon av studentprosjekter omhandlet kartlegging av raviner med droner. Senere ble også metoden omtalt under instituttets fagdag, Geografidagene. Metoden var relativ ny og nyskapende, noe som gjorde det meget interessant. Med geomatikk som perspektivemne i Bachelor-graden, hvor fotogrammetri var en vesentlig del av pensum, samt sommerjobb i geodata-avdelingen til Vann- og Avløpsetaten i Oslo Kommune var dette et naturlig steg videre. Interessen for metoden ble fordypet i en prosjektoppgave i faget GEOG3509, Naturgeografisk seminar. At metoden er såpass ny betyr store muligheter. Metoden er et spennende bidrag til datafangst, og representerer fronten for teknologisk nyvinning i geomorfologisk forskning. At metoden er fersk betyr også ekstra utfordring, da det er mindre hjelp tilgjengelig. Det kreves at man gjør et selvstendig arbeid og tar selvstendige beslutninger, som er viktig lærdom å ta med seg videre.

1.3 Disposisjon

Hoveddelen av oppgaven, etter innledningskapittelet, er delt opp i syv delkapitler. Hvorav de to første er innledende kapitler med lignende studier og kort avklaring av studieområdet. Først presenteres lignende forskning, en forlegning av introduksjonen, som har vært suksessfull på sine områder. Dette er for å illustrere diversiteten av bruksområder for metoden, men også at metoden blir brukt på ulike skalaer. Disse benyttes videre som inspirasjon og sammenligningsgrunnlag for resultatene i denne oppgaven. Etter de to introduksjonskapitlene avklarer teorikapittelet prinsippet bak metoden, samt utstyr, feltundersøkelserstrategis sentrale rolle og matematiske prinsipper i arbeid med terrengmodeller. Metodekapittelet er todelt, hvor de første kapitlene omhandler metoder, utstyr og gjennomføring av feltarbeidene, og det siste er en gjennomgang av prosesseringen i de ulike programvarene. Det er valgt å fokusere detaljert på modelleringen, da dette er funnet manglende i annen forskning der metoden ofte er prinsipporientert og gjennomføringen er løst forklart. Tanken bak en detaljert gjennomgang er at metodekapittelet kan benyttes av andre studenter som ønsker å ta i bruk metoden i deres arbeid. På den måten vil man spare tid i form av prøving og feiling, samt ha muligheten til å avsløre feil eller mangler i gjennomføringen presentert her. Resultatene er de produserte kartene fra arbeidet med differensiering av LiDAR-SfM (Light Detection and Ranging) og de to SfM-modellene. Diskusjonen er delt i seks-delkapitler hvor det siste er forslag til videre forskning. Diskusjonen er lagt opp til å belyse alle delene av arbeidet, fra feltarbeid til resultat, for å få en grundig gjennomgang av alle oppgavens ledd. Resultatene sammenlignes med resultat oppgitt av fremhevede prosjekter i starten. Dette legger grunnlaget for å besvare

om SfM er en egnet metode for å modellere geomorfologisk endring, samt om den er enkel å benytte.

1.4 Terminologi

I denne oppgaven benyttes en del forkortelser, og gjerne den engelske versjonen. Dette fordi det er normen og det mangler bedre alternativer på norsk

CloudCompare – Redigeringsprogram for 3D-data.

DEM – Digital Elevation Model. Digital terrengmodell.

dGPS – differensiell GPS. Posisjonsmåling relativt til en basestasjon.

DoD – DEM of Difference. Differanser mellom to terrengmodeller.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. Internasjonal tilbyder av GIS-programvare.

GNSS – Global Navigation Satellite System. Høypresisjonsposisjonstjenester.

GPS – Globalt posisjonssystem.

IPC-algoritme – Iterative Closest Point algoritme. Algoritme som minimerer avstand mellom to punktskyer.

LiDAR – Light Detection and Ranging. Samlebegrep for data innhentet med laser.

MATLAB – Omfattende matematikk program med eget script-språk.

Mesh – tirangulert sammenhengende overflate.

minLoD – minimumsgrense for å oppdage geomorfologisk endring.

SfM – Structure-from-Motion. Bildebasert 3D-modellering.

2. Lignende studier: Gjennomføring og resultater

Denne oppgaven baserer seg på at tidligere studier har konkludert med at SfM er en kostnads-, tids- og kunnskapsmessig effektiv måte for å overvåke geomorfologiske prosesser (Grønvold, 2015). Studier som effektivt har benyttet SfM i geomorfologisk kontekst er også Jones et al. (2007), Notebaert et al. (2009), Passalacqua et al. (2014) Sofia et al. (2014a), Sofia et al. (2014b), Tarolli (2014) og Tarolli et al. (2015). Denne oppgaven vil ikke omhandle hvordan LiDAR-deriverte terrengmodeller hentes inn, men benyttes som sammenligning til SfM terrengmodellen fra 24.9.2015. I dette kapittelet sees det nærmere på fem studier hvor SfM- og LiDAR-modeller har blitt benyttet i geomorfologisk endring.

2.1 Studier som sammenligner LiDAR og SfM

De siste årene har det blitt gjennomført mange sammenligningstudier av LiDAR og SfM for å validere SfM egnethet. LiDAR er en mer etablert metode som har vært i bruk i geomorfologiske studier i lang tid, og blir derfor sett på som et godt referansemål for å sikre at SfM-modellene har tilstrekkelig kvalitet.

2.1.1 Erosjon av elvebanker

Studien benytter sammenligning mellom SfM og LiDAR. Georeferert DEM innhentet med LiDAR er interpolert med «natural neighbour» for å lage en jevn overflate, og har en oppløsning på 0,1m (Prosdocimi et al., 2015). Kontrollpunkter ble hentet inn for å regne presisjon- og nøyaktighetsmål, som vil si RMSE (Root Mean Squared Error), gjennomsnittsfeilen og standardavviket for feilene (SDE, Standard Deviation Error). Viktig med innhenting av referanser for laserskanning for å luke ut eventuelle feilkilder, og validere datagrunnlaget. Når DEM fra LiDAR er validert kan man vurdere DEM fra SfM med LiDAR som referansegrunnlag. Til SfM ble det lagt ut 12 målskiver i studieområdet, og det ble tatt 60 bilder med tre forskjellige kameraer med ulikt antall megapiksler (Prosdocimi et al., 2015). For å få bedre sammenligningsgrunnlag med LiDAR ble punktskyen samlet til en punktavstand på 0,02 meter. Videre ble punktskyen manipulert med CloudCompare, et gratisprogram, for å fjerne støy som gjerne er assosiert med denne metoden (Prosdocimi et al., 2015). Videre ble punktskyen interpolert med «Natural Neighbour», som ga en jevn overflate med 0,1 meters oppløsning. Sammenligningen av de to punktskyene baserer seg på gjennomsnittlig differanse, standardavvik av differanse, RMSE, median, normalisert medians absolutte avvik og kvartilene 68,3 % og 95 % av absolutte høydeforskjeller (Prosdocimi et al., 2015).

Resultatene fra analysen er at SfM-teknologien er egnet til prediksjon av erosjon- og sedimentasjonsrater med resultater som kan sammenlignes presisjonen i LiDAR-teknologi.

2.1.2 Kystnær klippe i Wales

I denne studien ble det benyttet Bundler, et justeringsverktøy utviklet av Snavely et al. (2008), etter at man har manuelt identifisert nøkkelpunkter. Dette genererer en tynn punktsky hvor man får et rekonstruert tredimensjonalt motiv. Deretter blir motivet transformert ved manuell identifisering av kontrollpunktene i feltområdet. For å løse matrisen med rotasjon og translasjon, samt skaleringsfaktoren, ble det benyttet MATLAB (Westoby et al., 2012).

Den undersøkte klippen er cirka 80 meter høy, og det ble innhentet data for SfM og LiDAR. Det ble spredd gule kontrollpunkter på størrelsen 1x1 meter i studieområdet. Det totale antallet kontrollpunkter var 35. Det ble tatt 889 bilder av klippen med et vanlig digitalt kamera. Følgende ble dataene delt opp og manipulert for å redusere prosesseringstiden etter feltarbeidet. Terrengmodellene generert fra prosesseringen har oppløsning på 1 meter. Det ble funnet at 94% av differansene mellom SfM og LiDAR faller innenfor ± 1 meter, og 86% innenfor $\pm 0,5$ meter. De største differansene antas å korrelere med områder med høy gradient på grunn av stor avstand fra hvor bildene ble tatt (Westoby et al., 2012).

Forskningen konkluderer med at SfM er en metode som har lav kostnad og som benytter terrestrisk fotogrammetri fra relativt korte avstander, og er en visuell tilnærming for å anskaffe høyoppløselige terrengmodeller egnet til å undersøke landformer på meso- og mikroskala (Westoby et al., 2012). Et viktig punkt i arbeidsframgangen er å bruke en del tid på etablering av kontrollpunkter, fordi dette er viktig for transformasjonen til absolutte koordinater (Westoby et al., 2012). SfM viser seg som et effektivt alternativ til tradisjonell landmåling. Spesielt egner metoden seg bra i fjerne og utilgjengelige områder (Westoby et al., 2012).

2.1.3 SfM til å kartlegge med et lite ubemannet fly

I feltarbeidet ble det samlet inn 140 bilder som ble brukt i prosesseringen. Det ble plassert ut 28 kontrollpunkter i studieområdet på 1,92 kvadratkilometer, og de gule kontrollpunktene dimensjon var $0,6 \text{ m}^2$ (Hugenholtz et al., 2013).

Prosesseringen innebar å triangulere alle bildene med Inpho software for optimal kamera kalibrering. Deretter ble to modeller produsert. En overflatemodell og en terrengmodell. Forskjellen er at terrengmodellen viser bakken uten vegetasjon. Dermed ble terrengmodellen

brukt for det meste av studieområdet og overflatemodellen for å fylle inn de områdene terrengmodellen manglet på grunn av bratt terreng eller lignende (Hugenholtz et al., 2013). I denne studien ble det også samlet inn 99 GPS-punkter benyttet for å analysere modellens nøyaktighet. Det betyr at istedenfor kun å benytte direkte sammenligning av LiDAR og SfM ble de to modellene sammenlignet mot GPS-punktene, og feilene i de to modellene i forhold til GPS-punktene sammenlignet for å validere metoden. I tillegg ble de sjekket mot hverandre, og spredningsmål fra dette kalkulert (Hugenholtz et al., 2013).

Feltarbeidet genererte et orthorektifisert bildemosaikk med oppløsning på 0,1 m og en 1 m digital terrengmodell. De antas her at SfM vil være godt egnet i områder med lite vegetasjon som for eksempel i elveleier. Til tross for en del feilkilder er modellen sammenlignbar i kvalitet med LiDAR (Hugenholtz et al., 2013).

2.2 SfM i endringsundersøkelser

SfM blir gjerne benyttet til å sammenligne overflater før og etter bestemte hendelser. Bruken av SfM til sammenligninger før og etter hendelser er viktig fordi det gir flere mulighet til å undersøke geomorfologiske endringer, og det er derfor viktig å kartlegge hvilke studieområder metoden egner seg.

2.2.1 Kartlegging av snødybder

Studien fokuserer på kartlegging av snødybder ved å ta bilder av landskapet fra luften. Sammenligningen baserer seg på DEM av et snøfritt landskap og DEM etter at det har snødd. Et tilstrekkelig godt kamera som registrerer i RAW-format gjør det mulig å manipulere bildene i etterkant, slik at man kan skru opp kontrasten i et ellers detaljfattig landskap (Nolan et al., 2015). Studien påpeker at kvaliteten av modellene avhenger av fotografens evner til å takle vanskelige lysforhold, og at det ikke finnes noen enkle løsninger som sikrer perfekte resultater.

Kalkulering av snødybder skjer ved å konstruere en DoD (DEM of difference), som subtraherer en DEM av et snødekt landskap med en DEM uten snø. På denne måten kan man bestemme den vertikale endringen mellom hver piksel, og deretter snødybden (Nolan et al., 2015). For å optimalisere den resulterende modellen har de to DEM blitt samregistrert horisontalt, som vil si at de har samme origo, for å minimere feil i geografisk lokalisering. Til dette ble det brukt 2D-utligning bestemt med standard sub-piksels bildekorrelasjonsteknikk ved å bruke MATLAB (Nolan et al., 2015). I likhet med mange andre studier ble det også innhentet en DEM ved å bruke LiDAR for å validere de fotogrammetriske modellene samme

dagen. Studien påpeker at det er viktig å bedre kvaliteten på geografisk lokalisering, som relateres til GPS-data og hvordan dette brukes til å justere fotogrammetrisk justering. Det konkluderes med at metoden er tilstrekkelig nøyaktig til å måle snødybder i de fleste områder av verden, og kan benyttes til å kartlegge hele nedbørsfelt, med en systemkostnad som er vesentlig mindre enn med LiDAR og har en operasjonell kostnad på linje med bakkemålinger (Nolan et al., 2015). Lokaliseringsnøyaktigheten var 30 cm med en presisjon på 8 cm med en romlig oppløsning på centimeter- eller desimeter-nivå, som resulterte i snødybdenøyaktighet på 10 cm.

2.2.2 Småskala overflaterekonstruksjon

Studie som undersøker muligheten for å omgå kontrollpunkt delen i SfM. Absolutt skala blir riktig, men modellen mangler referanse i et absolutt koordinatsystem. På denne måten reduserer man tidsbruk og kostnad i felten ytterligere.

Artikkelen omhandler erosjon i Marokko, hvor det har blitt modellert en ravine på tre ulike tidspunkt, og deretter satt sammen for sammenligning. Ingen korrelasjon mellom antall bilder og detaljnivå i modellen ble funnet, fordi enkelte bilder muligens ikke inneholder ekstra informasjon til den ferdige modellen. Detaljnivået er da heller avhengig av antall perspektiver. Som en følge av dette er det umulig å kunne si noe om minimumsantall bilder for å produsere en god nok modell av overflaten (Kaiser et al., 2014). Det er viktig å tilpasse detaljnivået til maskinvaren tilgjengelig, da en del av dataprosessene er avhengig av kapasitet på maskinvaren. For å skalere modellen for volumestimeringer er det valgt å plassere objekter med kjent dimensjon i studieområdet, for senere å dimensjonere modellen i et annet program (Kaiser et al., 2014). Jo bedre synlighet på disse objektene i perspektivet, jo bedre nøyaktighet på den resulterende modellen.

På grunn av kompleksiteten av terrenget man forsøker å analysere, kreves det nytenkning av hvordan analysene utføres. Rasterdata behandler kun entydige z-verdier, noe som medfører at kompleksiteter som overheng og underkuttinger går tapt i endringsstudier (Kaiser et al., 2014). Punktskyer er derfor et mye bedre verktøy til å analysere komplekse overflater gjennom generering av kontinuerlige overflater, kalt mesh. SfM-genererte punktskyer kan i enkelte tilfeller overstige punktantallet i LiDAR-punktskyer (Kaiser et al., 2014). Dette faktum gjør analyser basert på punktskyer undervurdert i dagens forskning.

Volumestimeringer kan gjennomføres ved sammenligning av mesh, og man slipper å generere rasterbaserte terrengmodeller.

Det at man dropper kontrollpunktene, gjør arbeidet i felt enda lettere, og enda mindre kunnskapskrevende. Objektene man legger ut i studieområder sørger for at den absolutte skalaen er til stede, men man mangler altså de absolutte koordinatene for å plassere modellen i verden (Kaiser et al., 2014). MeshLab har målingsverktøy tilgjengelig, som gir informasjon om lengde i generert modell. Når man så har de virkelige målene kan man sammenligne genererte lengder med virkeligheten og hente ut en skaleringsfaktor. Skaleringsfaktoren brukes deretter videre til å skalere den ferdige modellen (Kaiser et al., 2014). Det finnes ingen krav om at absolutte koordinater er kjent for volumestimering av morfologiske endringer.

Samregistrering av de temporale modellene ble gjort ved steiner, røtter og andre immobile objekter i studieområdet. CloudCompare gir mulighet for direkte sammenligning av punktskyer eller punktskyer og mesh, som gjør at man kan se endringer eller offset mellom modellene (Kaiser et al., 2014).

Som validering ble det gjennomført en SfM og LiDAR innsamling av data i et steinbrudd hvor fluvial erosjon ble simulert. Pre- og post-modeller av SfM og LiDAR ble referert til hverandre, respektivt, for deretter å sammenligne volumestimer fra de to ulike metodene (Kaiser et al., 2014). Cellestørrelse på 1 cm ble valgt for studieområdet på 1x1m. DoD ble deretter generert for direkte sammenligning for både SfM og LiDAR. LoD ble valgt til å være <1cm, som betyr at verdier +-1cm i endring ikke telles med i analyse. Ved å klippe modellene til samme utbredelse, kunne differanser og distribusjon sammenlignes i nøyaktighetsanalyse (Kaiser et al., 2014). CloudCompare ble brukt til å manuelt referere LiDAR og mesh til hverandre. LiDAR-målingene ble brukt som representasjon av den faktiske bakkeoverflaten, deretter ble LiDAR-punktsky og mesh klippet til hverandre. Deretter ble kontrollpunkter i de to modellene lokalisert, igjen steiner, trær o.l. objekter i studieområdet. Når de to modellene så var sammenfalt, ble det benyttet en IPC-algoritme for å sikre høyere nøyaktighet, som vil si mindre mellomrom mellom LiDAR og SfM. For hvert punkt i LiDAR ble distansen til SfM kalkulert, og på den måten kunne man se på forskjellene mellom LiDAR- og SfM-modellene (Kaiser et al., 2014).

Metoden har evne til å undersøke undersnitt og komplekse hulrom, og er derfor av stor nytte i studie av erosjonsprosesser. Dersom man fortsetter å neglisjere terrestriske tilnærminger, vil man fortsette å undervurdere ravinevolumer. Rasterdata er tilstrekkelig så lenge bunnen i sprekker og groper ikke overstiger de øvre kantene. Uansett anser studien raster som et dårlig modelleringsverktøy (Kaiser et al., 2014). Metoden er funnet kapabel til å modellere

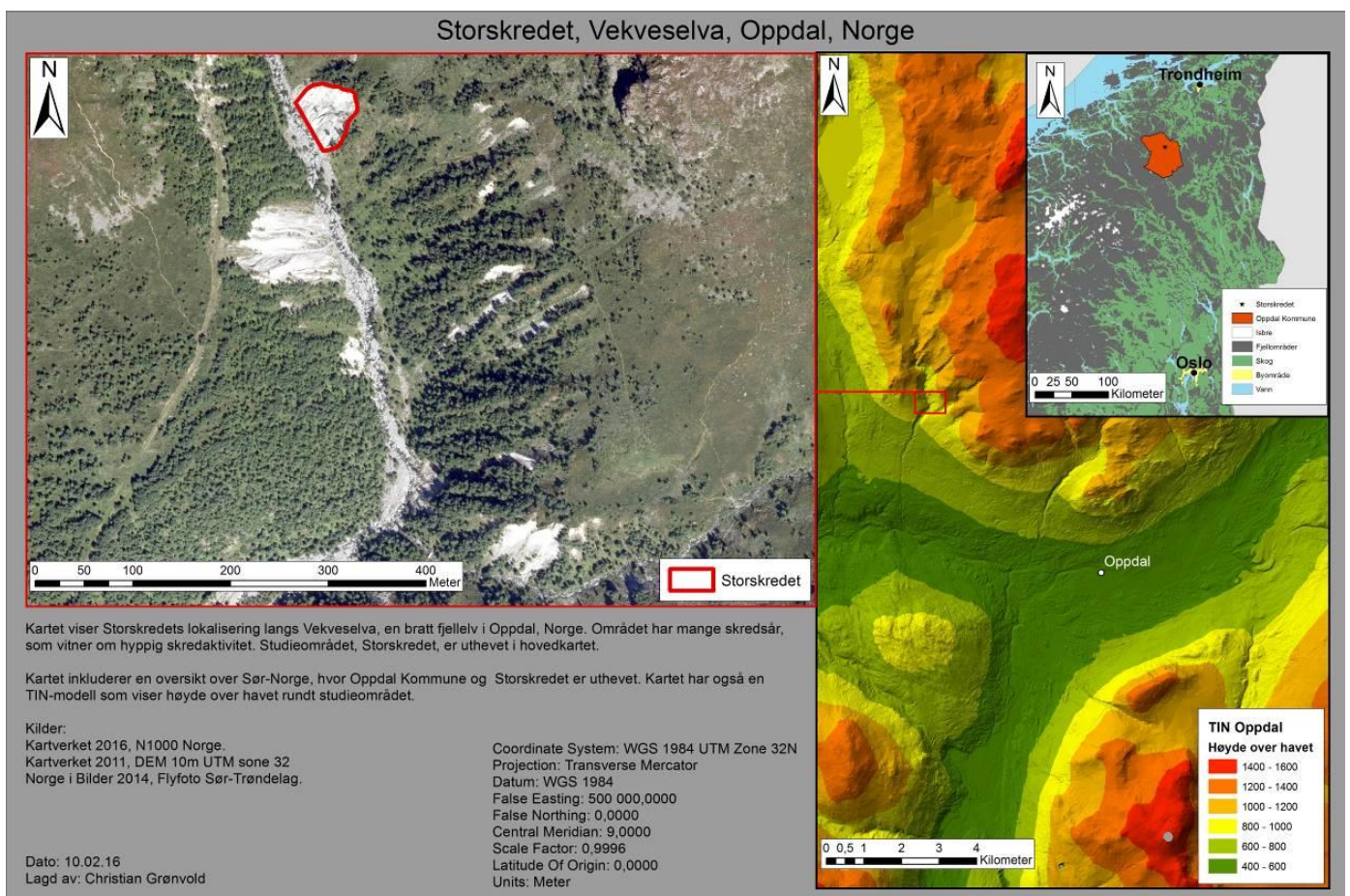
overflateavrenning og erosjonsprosesser. 10x10 m nok til å forutse erosjonsrater. TIN og mesh gir nye muligheter for analyse av overflater, fordi de er kapable til å behandle flere z-verdier samtidig, noe som gir mer dynamiske modellfremgangsmåter (Kaiser et al., 2014). Til tross for mange fordeler er denne fremgangsmåten krevende for både maskinvare og personell. Behandling av 3D-data er vanskelig og man behøver erfaring i post-prosesseringen. Forfatterne mener at LiDAR er enklere og mindre intensivt i post-prosessering, men er dyrere (Kaiser et al., 2014).

3. Områdebeskrivelse

3.1 Beliggenhet og topografi

3.1.1 Oppdal

Oppdal kommune er kjent for å være fjellbygda i Midt-Norge, plassert mellom fjellområdene Dovre og Trollheimen. Kommunen er kjent for å ha landets største alpine skiområde, dette på grunn av de store fjellområdene i umiddelbar nærhet av sentrum av bygda, Auna. Kommunen kan skilte med et bredt spekter av friluftaktiviteter uavhengig av sesong, store fjellområder med frisk luft og rent vann, langt unna storbyenes kjas og mas, og varer av godt gammeldags håndverk (Oppdal Kommune, 2016). Gjennom en prosess med flere interessenter og ressurspersoner har kommunen kommet fram til en felles visjon for Oppdal; Oppdal – verdifulle fjellopplevelser (Oppdal Kommune, 2016). Kommunen markedsfører seg selv som et opplevelsessenter med hovedfokus på nærheten til fjell og natur.



Figur 1: Oversiktsbilde av studieområdet

Nærheten til fjell og natur gjør det til et spennende område å observere geomorfologiske prosesser.

3.1.2 Vekve

Vekve er en bratt fjellelv som ligger nordvest for Oppdal sentrum som man kan se i figur 1. Vekveselva har den karakteristiske løpsmorfologien step-pool. Steps er karakterisert, som regel, ved steiner på grunn av motstandsdyktig orientering gjør at de blir liggende. Vannet renner over step ned i en lavgradients seksjon som kalles pool, hvor det er stort energitap fra step til pool (Church and Zimmerman, 2007).

Vekveselva har en lengde på 12,83 km, og har et tilsig på 28,51 millioner kubikkmeter nedbør i året. Elva har sin opprinnelse et sted mellom Snofjellet (1560 moh.) og Brattskarven (1578 moh.). Elva er lokalisert i nedbørsfelt 109.E4Z, har en størrelse på 32,95 kvadratkilometer og er en del av det større nedbørsfeltet 109.Z. Elva Driva drenerer nedbøren i området til havet og renner ut ved Sunndalsøra (NVE Atlas, 2015). Vekveselva har flere små sideelver som bidrar til vannføringa. Elva eroderer i bunn av et relativt bratt søkk i terrenget.

3.2 Geologi

Bergartene i området rundt Vekveselva stammer fra Trondheimsdekket, som for 442 til 417 millioner år siden ble skjøvet på plass (NGU, 1996). Bergartene har vulkansk opphav og er av typene grønn fyllitt og båndet tuffitt (NGU, 2016). Dannelsen av bergartene har bakgrunn fra forskjellige miljøer for 1000 til 600 millioner år siden under dannelsen av Iapetus-havet, og var forløpet til at de amerikanske og europeiske kontinentene ble skjøvet fra hverandre (NGU, 1996). Berggrunnen i studieområdet er bestående av metamorfe bergarter som følge av oppsprekking og utstrømming av varme fra mantelen mot overflaten. Bergarten består av omdannede sedimenter som følge av at det ble dannet innsynkningsbasseng, og dette ble fylt av tykke lag med leire, sand og grus når kontinentene ble drevet fra hverandre. Bergarten er produktet av varme og trykk over lengre tid. Området er i dag kjent for å inneholde løsmasser fra de siste istidene.

3.3 Løsmasser

Isbreer fra kvartær tid har avsatt sedimenter som dekker berggrunnen i området. Disse løsmassene er definert tykt morenemateriale, og dekker området sammenhengende samt med stor mektighet i enkelte områder (NGU, 2016). Materialet er transportert og avsatt av isbreer og kjennetegnes ved å være dårlig sortert, samt være hardt sammenpakket. Dette kalles overkonsolidert morenemateriale. Vekveselvas karakteristiske v-form har derfor oppstått ved at

elva eroderer i dette materialet. Elveløpet er preget av steiner i alle størrelser og fasonger, fra grus til immobile kampesteiner. Området er også preget av å ha store skredsår ned mot elveløpet i de øvre delene. Disse skredsårene forsyner elva med sedimenter og mengden tilgjengelige sedimenter er relativt stor. Nedstrøms fra studieområdet observeres mindre skredaktivitet, men det er sig av materiale i skråningene. Dette observeres ved at trærne har en karakteristisk bue ved roten, noe som indikerer sig.

4. Teori

Teknologisk nyvinning er i full framgang, og med denne framgangen har mengden tilgjengelig terrengdata økt. LiDAR er en etablert metode i geomorfologiske studier, men SfM seiler opp som en velegnet utfordrer. SfMs kvalitet blir sagt å kunne sammenlignes med LiDAR (Grønvold, 2015). Samtidig er metoden lettvinnt og billig, og man trenger heller ingen inngående kunnskap som er tilfelle med LiDAR. Eventuelle feil i terrengmodeller vil mest sannsynlig være på grunn av vegetasjon, noe som betyr at metoden egner seg best for åpne områder (Hugenholtz et al., 2013). SfM har vist seg å være egnet til å undersøke formasjoner på liten og middels skala, hvor man kan komme tett på studieobjektet. Metoden gir forskere gode terrengmodellen raskt, enkelt og billig, og er foretrukket over LiDAR for mindre studieområdet med mye vegetasjon (Grønvold, 2015).

4.1 Structure-from-Motion som geomorfologisk forskningsmetode

I det siste har produksjon av høyoppløselige topografiske datasett fått økende interesse. Til tross for utvikling i teknologien for romlig analyse er det fortsatt vanskelig å skaffe høykvalitetsterrengdata fra avsidesliggende, høyalpine områder raskt (Westoby et al., 2012). Selv med økt tilgang på teknologiske hjelpemidler er produksjon av digitale terrengmodeller fortsatt kostbart med tanke på tidsbruk, utstyr og eventuell programvare (Fonstad et al., 2013). SfM er en metode som ble utviklet for raskere, billigere og enklere tredimensjonal modellering av små bygninger og formasjoner, og som senere har vist seg egnet til høyoppløselig rekonstruksjon av topografi (Fonstad et al., 2013; Westoby et al., 2012). Metoden benytter bildebaserte gjenkjenningmetoder for rekonstruksjon av overflater, og tar i bruk de nyeste automatiserte bilde-til-bilde registreringsalgoritmene (Fonstad et al., 2013). Dette gjør metoden egnet for lavbudsjettforskning og anvendelse i avsidesliggende områder (Westoby et al., 2012).

Metoden baseres på at tredimensjonale strukturer kan løses med en serie overlappende bilder fra ulike posisjoner (Westoby et al., 2012). Sammenlignet med klassisk fotogrammetri er arbeidsflyten automatisert, samt gjort enklere, av de sofistikerte bildegjenkjenningalgoritmene (Fonstad et al., 2013). I fotogrammetri må posisjon og vinkel på kameraet, eller posisjonen på flere kontrollpunkter, være kjent (Westoby et al., 2012). I kontrast til klassisk fotogrammetri vil geometri, kameraposisjon og orientering behandles automatisk uten at man på forhånd har spesifisert et nettverk med kjentpunkter. I likhet med klassisk fotogrammetri benyttes bilder fra ulike posisjoner for å rekonstruere strukturen til en formasjon eller en overflate (Fonstad et al., 2013; Westoby et al., 2012). I fotogrammetri

benyttes triangulering og manuell identifisering av kontrollpunkter for å rekonstruere geometri. Med SfM trengs ingen av disse metodene benyttes, fordi kameravinkel og motivets geometri rekonstrueres samtidig gjennom automatisert identifikasjon av sammenfallende formasjoner synlig i flere bilder (Westoby et al., 2012). Til tross for en ny generasjon med bildegjenkjenningialgoritmer er det fortsatt en forutsetning at fysiske punkter er synlig i et minimum av 2-3, helst flere, bilder (Fonstad et al., 2013). En kritisk egenskap ved metoden er derfor evnen til å gjenkjenne formasjoner i flere bilder til tross for store forskjeller i skala og kameraposisjoner. Formasjonene spores fra bilde til bilde som gir et initialt estimat av kameraposisjon og formasjonenes koordinater (Fonstad et al., 2013; Westoby et al., 2012). Gjenkjenningialgoritmenes evne til å oppdage gradienter istedenfor absolutte pikselverdier gjør det mulig å identifisere formasjoner fra ulike vinkler takket være fargegradienten mellom formasjonen og bakgrunnen (Fonstad et al., 2013).

Manglende kameraposisjon, skala og orientering som kontrollpunkter vanligvis gir, fører til en punktsky generert i et vilkårlig «bilde-rom»-koordinatsystem. Dette må senere overføres til et absolutt koordinatsystem (Westoby et al., 2012). I SfM blir kollinearitetsligninger løst før introduksjon av absolutte koordinater. Som et resultat av at sammenfallende formasjoner er automatisk identifisert i bildegjenkjenningsfasen kan SfM løse kollinearitetsligningene i et vilkårlig skalert koordinatsystem (Fonstad et al., 2013). I mellomfasen finnes altså en relativ punktsky med x-, y- og z-koordinater uten kobling til absolutte koordinater. Vanligvis overføres relative koordinater til absolutte koordinater ved en romlig likhetstransformasjon basert på et lavt antall kontrollpunkter brukeren tilfører med kjente, absolutte, koordinater (Fonstad et al., 2013; Westoby et al., 2012). Denne prosessen kalles syvparametertransformasjon og består av en skala-parameter, tre translasjonsparametere og tre rotasjonsparametere (Fonstad et al., 2013). Kontrollpunktene kan hentes ved å måle inn koordinatene på formasjoner synlig i både punktskyen og ute i feltområdet med konvensjonell landmåling (GPS etc.). I praksis er det enklere å legge ut målskiver med høy kontrast, samt klart definert, senter i feltområdet før bildene tas (Westoby et al., 2012).

Kvaliteten på kamerakalibreringen og punktsky baseres på et relativt stort antall autogenererte og sammenfallende punkter i bildene, alle med varierende grad av feil gjemt for brukeren, og feilene er en funksjon av bildeegenskapene (Fonstad et al., 2013). Siden siste steg i generering av SfM-punktsky er lineær transformasjon, vil ikke-lineære forvrengninger introdusert av feil i den automatiske bildegjenkjenningsfasen beholdes (Fonstad et al., 2013). Med et veldistribuert nettverk av kontrollpunkter forenkles lokalisering av bilde og formasjon i

rommet, noe som muliggjør vurdering av eventuelle ikke-lineære strukturelle feil i konstruksjonen av punktskyen (Westoby et al., 2012). Videre kan ytterlige lineære feil introduseres ved dårlig kvalitet på innmåling av kontrollpunkter som medfører feil i syvparametertransformasjonen (Fonstad et al., 2013).

4.2 Utstyr

SfM som metode belager seg på å være en relativt billig metode for å gjenskape objekter i 3D for senere bruk. De fleste studier baserer seg derfor på å benytte relativt enkle og billige digitale kameraer. Westoby et al. (2012) benytter seg av et Panasonic DMC-G10 kamera med 12 megapiksler oppløsning. Prosdocimi et al. (2015) benytter tre ulike kameraer, et Canon, et Nikon og en Iphone 5 og sammenligner de ulike modellene generert fra ulike kameraer mot LiDAR. De fleste ulike studiene som finnes benytter forskjellige typer kamera, uten at det virker å utgjøre noen vesentlig forskjell. De fleste benytter seg av ulike speilreflekskameraer som kan kjøpes over disk i de fleste elektronikkforhandlere. Studiene spenner over forskjellige skalaer og størrelsesomfang, fra mikro- til storskala landformer.

4.3 Feltundersøkellesstrategi

Differensiering mellom terrengmodeller er hyppig brukt for å identifisere og kvantifisere geomorfologiske endringer. Dette kan være skuring og fyllingsvolumer, eller overflateerosjon i skredsrår. Denne type studier kan gi detaljert innsikt i romlig og temporal geomorfologisk endring (Heritage et al., 2009). Derfor er det viktig at terrengmodellen har tilstrekkelig nøyaktighet, som er styrende for suksess eller fiasko. Nøyaktige observasjoner av volumetriske endringer hviler derfor på at man har en tilstrekkelig nøyaktig terrengmodell (Heritage et al., 2009). I noen tilfeller kan størrelsen på feilene overstige den vertikale endringen man vurderer som er pluss/minus 25 cm.

Nøyaktighet og kvalitet på terrengmodeller avhenger derfor av hvilken interpoleringsmetode man velger å benytte i rekonstruksjonen av en overflate. Algoritmevalg er delvis avhengig av naturen på den morfologiske overflaten (Heritage et al., 2009). TIN eller kriging er de vanligste metodene i fluvial geomorfologi, hvor TIN oftere blir funnet å være mer pålitelig. Valget av algoritme er likevel mindre viktig enn undersøkelsesstrategi (Heritage et al., 2009). Det finnes sterke sammenhenger mellom lokal variasjon i overflatetopografi og feil i DEM. Naturen til disse sammenhengene viser variasjon til feltundersøkelsesstrategi og interpoleringsalgoritmen benyttet (Heritage et al., 2009). Feil i terrengmodellen er derfor sterkt påvirket av lokalisering av undersøkelsesposisjoner relativt til morfologien som

undersøkes. Feil over en modellert overflate er ikke uniform, og er en funksjon av lokal formruhet.

Kvaliteten på en DEM er en funksjon av;

- i) Kvaliteten på de individuelle datapunktene innad overflaten.
- ii) Tettheten av datapunkter som benyttes til å representere overflaten.
- iii) Distribusjonen av datapunkter innad overflaten.

hvor de to siste er relatert til feltarbeid og hardware som benyttes til å hente inn dataene (Heritage et al., 2009).

4.4 Matematiske prinsipper i sammenligningsstudier av terrengmodeller

Når man skal analysere kvaliteten på terrengmodeller er det viktig å benytte seg av statistiske spredningsmål, da dette sier noe om hvordan feilene fordeler seg internt i modellene.

4.4.1 Statistiske mål

Fordelen med å benytte spredningsmål er også at det gjør det enklere å sammenligne modellen man har produsert selv med andre studier. Dette gjør det enklere å oppdage om modellen er innenfor de nøyaktighetsmålene andre har oppnådd. Dette gir grunnlag for å fatte bedre konklusjoner på om overflatene konstruert er gode nok, eller om de bør forkastes. De vanligste statistiske målene i differanseundersøkelser er gjennomsnitt, standardavvik, minimumsavvik og maksimumsavvik.

Gjennomsnitt er summen av alle variabelverdier delt på antall verdier. Når man benytter seg av terrengmodeller vil dette si summen av alle pikselverdier delt på antall piksler.

Gjennomsnitt er gitt ved formelen;

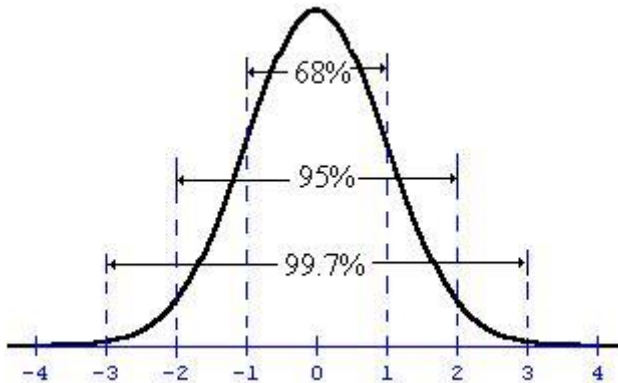
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Når man differensierer SfM- mot en LiDAR-terrengmodell vil verdien beskrive generelt hvor langt unna de to modellene befinner seg hverandre. Høye snittverdier vil være negativt med tanke på kvaliteten av SfM-modellen.

Mange ganger har vi bruk for informasjon utover snittverdiene i datagrunnlaget. Dette er fordi gjennomsnittet ofte ikke er tilstrekkelig beskrivende i seg selv. Standardavviket forteller oss hvordan verdiene i datagrunnlaget fordeler seg rundt sentralitetsmålet (Rød, 2009). Den romlige variasjonen av differanser er viktig å ta med i analysen, og for å validere

differensieringen. I figur 2 ser man hvordan prosentandelen av datamaterialet fordeler seg etter standardavviket. Standardavviket er gitt ved formelen;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$



Figur 2: Normalfordelingskurve med fordeling av observasjoner innenfor fire standardavvik. Skjermdump fra http://www.marin.edu/~npsomas/Lectures/Ch_1/Section_03.htm

Variasjonsbredden til datagrunnlaget er også vanlig å inkludere, fordi det sier noe om ekstremverdiene. Ytterpunktene definerer bredden i verdiene. Det er derfor vanlig å inkludere minimumsverdier og maksimumsverdier når man presenterer modellresultater.

4.4.2 Grense for å oppdage geomorfologisk endring

Siden 1990 har det vært vanlig med gjentakende topografiske undersøkelser i morfologisk forskning. Produktet av disse undersøkelsene er differensierte terrengmodeller, kjent som DoD. Estimering av endringer i morfologiske sedimentbudsjett er fundamentalt kontrollert av terrengmodellenes kvalitet, som igjen er avhengig av kvaliteten på landmålingsdelen. Kvaliteten på en terrengmodell er en funksjon av innmålte punkter, feltarbeidsstrategi, overflatesammensetning, topografisk kompleksitet og interpoleringsmetode (Wheaton et al., 2010). Fagmiljøene har kunnskap om usikkerhet i terrengmodellene, men estimatene er relativt enkle siden de antar at usikkerhetene er romlig uniforme eller at de varierer kun på basis av våte og tørre områder. Som konsekvens er ofte estimater unødvendig konservative i områder med lite endringer, og for liberale i områder hvor store endringer inntreffer. minLoD (minimum level of detection, minimumsgrense for oppdagelse) benyttes ofte for å styre usikkerheten i en terrengmodell (Wheaton et al., 2010). Denne minimumsgrensen for oppdagelse blir satt for å skille virkelige endringer mot iboende støy i modellene. Det vil si at

verdier som legger seg inn under denne minimumsgrensa blir forkastet, eller justert ved å bruke vektingsfunksjoner. Verdier utenfor oppdagelsesverdien blir behandlet som sanne.

Usikkerhet i z-verdiene, altså høyde, i modellen er relatert til den faktiske høyden, gitt matematisk med;

$$Z_{ekte} = Z_{DEM} \pm \delta z \quad (3)$$

Hvor δz er usikkerheten i høyde. Variabelen δz er bestående av flere komponenter, deriblant målingsfeil, prøve-skjevhet og interpoleringsmetode (Wheaton et al., 2010). For å presist punktfeste størrelsen på δz trengs informasjon langt utover topografisk data i seg selv, men det er kjent at verdien har en tendens til å vise mønstre av romlig utbredelse som er sammenhengende og forutsigbart. Individuelle feil i DEM kan forplantes videre inn i DoD som gitt ved;

$$\delta U_{DoD} = \sqrt{((\delta Z_{SfM1})^2 + (\delta Z_{SfM2})^2)} \quad (4)$$

Hvor δU_{DoD} er den forplantede feilen i DoD og δZ_{SfM1} og δZ_{SfM2} er individuelle feil i DEM_{SfM1} og DEM_{SfM2} respektivt (Wheaton et al., 2010). Dette sikrer at feil i hver celle er tilfeldig og selvstendig. Kombinert feil kan kalkuleres som en enkelt verdi for hele DoD hvis det mangler eksplisitte romlige estimater av δZ_{SfM1} og δZ_{SfM2} . Primært finnes det to måter å uttrykke signifikansen til usikkerheten i DoD-predikerte høydeendringer. Begge støtter seg på å sette en grense, $_{min}LoD$, og forkaste eller benytte en lavere vekting av høydeendringene. Volumetriske og areal-estimeringer er sensitive for oppdagelsesgrensen, som vil si økt usikkerhet i terrengmodellene vil gi økt tap av informasjon i det totale budsjettet. Det er derfor viktig å kalkulere den kombinerte feilen i modellen ved å bruke ligning (4), for å sikre at sedimentbudsjettet blir optimalt.

Kalkulasjonene av volumetriske endringer er veldig sensitive til minimumsgrense for geomorfologisk oppdagelse. Det faktum at usikkerhet i modellen fører til at verdier forkastet, gjør endringsundersøkelsene veldig restriktive. Det finnes en tilnærming basert på sannsynlighetsberegning (Wheaton et al., 2010). Denne tilnærmingen går ut på å kalkulere student t-verdi basert på absoluttverdien mellom to terrengmodeller relativt til den kombinerte feilen kalkulert med ligning (4).

$$t = |Z_{SfM1} - Z_{SfM2}| / \delta U_{DoD} \quad (5)$$

Deretter kan man relatere t-verdien til dens kumulative distribusjonsfordeling (Wheaton et al., 2010). Dette kan gjøres relativt enkelt i Excel. Fra dette får man sannsynlighet for at endringen i hver piksel er reell. Dette kan man ta videre i kalkulasjonen av differansen mellom de to terrengmodellene, og dermed få differansene justert etter sannsynligheten for at endringen er reell, noe som gir et mer riktig bilde av geomorfologisk endring.

5. Metodologi

5.1 Feltmetoder

I feltarbeidet har det blitt benyttet differensiell GPS (dGPS) og digitalkamera for å innhente datagrunnlaget.

5.1.1 GPS og dGPS

GNSS er en betegnelse som betyr Global Navigation Satellite System, og er en fellesbetegnelse for satellittbaserte navigasjonssystemer. Fellesbetegnelsen inkluderer det amerikanske GPS, de russiske GLONASS, det kinesiske BeiDou og det europeiske Galileo (Kartverket, 2013).

Opprinnelig er GPS utviklet av det amerikanske forsvaret, og er et posisjon- og navigeringssystem basert på satellitter. Systemet muliggjør stedsposisjonering i tre dimensjoner, med koordinater i XYZ-format (Kartverket, 2013). X og Y gir posisjon horisontalt og Z vertikal posisjon. GPS-satellittene i bane rundt jorda sender ut radiosignaler. Signalet kodes med navigasjonsmeldinger som kan leses av GPS-mottagerne. Denne meldingen inneholder informasjon om hvor satellitten befinner seg. Ut i fra denne informasjonen kan posisjonen til en GPS-mottager beregnes. GPS benytter seg av referanserammen WGS1984, og gir koordinater i henhold til dette (Kartverket, 2013). For tilstrekkelig dekning er GPS-systemet designet slik at ethvert punkt på jordas overflate skal kunne sees av minst 4 satellitter. Derfor er det minst 4 satellitter i hvert baneplan, og minst 24 satellitter totalt. Totalt er det seks forskjellige baneplan, og alle har en helningsvinkel relativt til ekvatorplanet på 55 grader (Kartverket, 2013).

I feltarbeidet er det benyttet differensiell GPS, eller dGPS, for posisjonsbestemmelser i studieområdet. Valget av dGPS over enkeltpunktbestemmelse er studieområdets natur. Det er bratte skrånninger på begge sider noe som fører til dårlig sikt mot himmelen, og kan gjøre det vanskeligere å hente inn signaler. Ved å sette opp en basestasjon på et høyereliggende sted med bedre sikt, vil det gjøre det lettere å koble seg opp mot tilstrekkelig antall satellitter og bedre nøyaktigheten på målingene. Dessuten er nøyaktigheten i grunnriss på enkeltpunktbestemmelser i sanntid 15 meter eller bedre (Kartverket, 2009). I dette arbeidet er det derimot nødvendig med større nøyaktighet enn det som er oppnåelig med enkeltpunktbestemmelse.

Målingene utført med rover i felt blir derfor korrigert mot en basestasjon med kjente koordinater. De målte observasjonene i felt er av typen sanntidsmålinger med samtidig måling med to tofrekvente GNSS-mottagere i hvert sitt punkt, også kalt Real Time Kinematic (RTK). Denne type sanntidsmåling krever kommunikasjon mellom rover og basestasjon, og basestasjonen sender sine GNSS-målinger til roveren (Kartverket, 2009). Nøyaktigheten oppgitt for slik type måling er 10 - 20 millimeter.

Generelt er det anbefalt at basestasjonen er plassert på et høyereliggende punkt, slikt at man optimaliserer forholdene for å sende radiosignaler (Kartverket, 2009).

5.1.2 Feil i målinger

Når man benytter seg av landmålingsutstyr i feltarbeid er det personen som utfører arbeidet som har ansvar for at nødvendige kvalitetssikringer er utført og resultatet oppfyller kravene for nøyaktighet (Kartverket, 2009). For å ha kontroll over dataene må man måle med kontroll slik at nøyaktigheten kan dokumenteres. Det finnes to grupper feil som kan oppstå når man måler med GNSS-systemer; grove feil og systematiske feil. For å redusere muligheten for feil i arbeidet bør man gjennomføre uavhengige målinger. På den måten kan man oppdage avvikende målinger (Kartverket, 2009).

Den første kategorien for feil, grove feil, skyldes oftest menneskelig svikt. Eksempler på slike feil kan være; feil avlesning av antennehøyde, oppstilling i feil punkt eller bruk av feil koordinater, slurv i oppsett av utstyret (f.eks skjevt oppsett av basestasjon) eller feil i datumsparametere (Kartverket, 2009). I kategorien systematiske feil finner vi feil i selve målingene som skyldes ukontrollerte faktorer. Eksempler på disse feilene er; effekt av ionosfære og troposfære, flerveisinterferens, feil i initialisering/falsk fix (kinematiske målinger), signaler fra sterke radiosendere som mobiltelefoner og lignende, samt skjerming på grunn av vegetasjon, bygninger eller andre fysiske hindringer (Kartverket, 2009). RTK-målinger er korrelert i tid, noe som gjør uavhengige målinger umulig. Korrelasjonene kan avta betraktelig over tid. I feltarbeidet er måleboken satt til å måle 10 målinger, for så å bruke et gjennomsnitt av disse målingene som punktbestemmelse.

5.2 Feltutstyr

Feltutstyret benyttet er det samme som andre studier. GPS med høy nøyaktighet og speilreflekskameraer benyttes til innhenting av datamaterialet til SfM.

5.2.1 GPS

For innhenting av de posisjonelle dataene ble det benyttet Altus APS-3 GPS/GLONASS-mottager som basestasjon, rover og tilhørende målebok. Utstyret dekker behovet for innhenting av posisjonelle data på centimeters nøyaktighet.

5.2.2 Kamera

Bildene fra 24.09.15 ble tatt med et Nikon D700 speilreflekskamera, som har en brennvidde på 20 mm. Kameraet har en oppløsning på 12,87 megapiksler. Kameraets opprinnelige bruksområde er fastmontert på laserskanneren.

Bildene fra 11.11.15 ble tatt med et Nikon D5300 speilreflekskamera, som har en brennvidde på 20 mm. Kameraet har en oppløsning på 24,2 megapiksler.

Begge kameraene kan skaffes enkelt hos elektronikkforhandlere, og har en gunstig pris.

5.3 Feltarbeid

I forbindelse med masteroppgaven ble det gjennomført tre turer til Vekveselva i Oppdal. Feltarbeidene ble gjort på forskjellige tidspunkt slik at det skulle være mulig å oppdage endring i skredsåret.

5.3.1 Første feltarbeid 28.05.15

Første runde i feltområdet ble gjennomført torsdag 28. mai etter snøen hadde gått i området. Feltarbeidet ble gjennomført på en dagstur til feltområdet med avreise på morgenen og retur i løpet av kvelden.

Det ble opprettet en basestasjon for GPS. Været ble vurdert til å være optimalt, siden det var overskyet som gir lite skygger. Etter befarings av elveleiet ble det fattet en avgjørelse om at et skredsår med ferske spor etter et skred var egnet studieobjekt. Aktuelt skredsår hadde muligheten for både sammenligning med LiDAR-data, samt størst sannsynlighet for endring i løpet av sommer og høst. Dette ga et godt utgangspunkt, da snømengden i fjellet er liten, og sannsynligheten for vårfloam relativt liten. Det ble tatt bilder av skredet, med god dekningsgrad av hele skredområdet. Bilder ble tatt både fra elveleiet og langs kantene og toppen. Noe som forhåpentligvis skulle gi god nok dekning til å kunne lage en god tredimensjonal representasjon av overflaten. Det ble også målt GPS-punkter på eksisterende bolter som benyttes til orientering av laserskanneren. Feltarbeidet gikk relativt for raskt og knirkefritt til tross for at det var første gjennomføring.

5.3.2 Andre feltarbeid 24.09.15

Det andre feltarbeidet ble gjennomført som en del av et feltkurs i GEOG2004, som læringsassistent. Det vil si at forfatter veiledet studentene i hvordan de skulle gjennomføre feltarbeidet, og dermed få dataene samlet inn til videre bruk i oppgaven. Basestasjonen ble satt opp av teknisk ansvarlig på instituttet på en høyde sør for feltområdet. Et problem fra det første feltarbeidet var å få kontrollpunkter som var synlig i modellen. Derfor ble det benyttet spraybokser med blå maling for å merke kontrollpunktene i skredsåret. Det ble lagt vekt på at kontrollpunktene skulle være godt synlig fra elveleia, samt at de i størst grad skulle være jevnt fordelt utover hele skredets utstrekning. Feltarbeidsdagen var optimal med overskyet vær og lite skygger. Bildene ble tatt fra elveleia for å sikre høy kvalitet med minst mulig himmel og mest mulig skred. Deretter ble kontrollpunktene målt inn med GPS på de forhåndssprayede punktene.

5.3.3 Tredje feltarbeid 11.11.15

Dette feltarbeidet var det første som ble gjennomført selvstendig. Avreise fra Trondheim var 7 om morgenen, og returtidspunktet var 18. Omtrentlig tid brukt på feltarbeid ble 3 timer eksklusive gangtid fra parkeringsplass. De tre timene inneholdt oppsett av basestasjon, markering av kontrollpunkter i skredsåret, innhenting av bilder og måling av kontrollpunkter. Med på feltarbeidet var Johannes Flesjø og Vegard Sæther, som også er studenter på Geografisk institutt. Johannes var med og hjalp til med GPS-målingene i skredet da det er litt vanskelig å operere både rover og måleboken samtidig.

Denne dagen ble vurdert til å ha forhold under det optimale i området. Dette fordi det var en klar dag med mye sol, som gir masse skygger. I tillegg lå det et tynt lag med snø i feltområdet. Det skyet også til underveis under arbeidet, noe som førte til ujevne lysforhold. Det ble samlet inn bilder rundt hele skredsåret. Etter en rask avgjørelse avslutningsvis ble det tatt et ekstra sett med bilder fra elveleia, fordi sola hadde gått bak noen skyer som ga optimale bildeforhold. Feltarbeidet ble gjennomført uten problemer, til tross for mindre optimale lysforhold.

5.4 Bearbeiding av data

Store deler av arbeidet har gått med på å lære hvordan man skal bearbeide dataene fra feltarbeidet til analyserbart materiale, og videre til resultater som kan diskuteres. Til SfM-delen har Agisoft Photoscan blitt benyttet. Videre har ESRI's programvare for geografisk informasjon ArcMap og ArcScene.

5.4.1 Agisoft Photoscan

Agisoft Photoscan er et kommersielt verktøy for å produsere SfM-modeller på en intuitiv og adekvat måte. Det er ikke et såkalt Open Source verktøy, så man må kjøpe en lisens for å benytte programmet. Man kan derimot registrere seg for en 30 dagers gratis periode hvor man har tilgang til alle funksjoner. Selv om det er lett å komme i gang med bruken av programmet, trengs det en del prøving og feiling før man behersker det på en god måte. Dersom framgangsmåten beskrevet under følges, har man et resultat som er klar for eksport og videre analyse i enten ArcGIS eller andre GIS-programmer.

Fra felt- og etterarbeid viste det seg at hvordan man velger å ta bildene har mye å si for sluttresultatet. Fra feltarbeidet i mai viste det seg at til tross for mange hundre bilder var ikke programmet i stand til å rekonstruere feltområdet på en tilfredsstillende måte, selv etter mange forsøk på å velge kun de antatt beste bildene. Etter mye om og men ble det besluttet å forkaste hele datagrunnlaget. To feltarbeid ble fruktbare. Feltarbeidene ble gjennomført med en tidsramme på en dag. Mye av grunnen til at de to siste feltarbeidene genererte bedre resultater var fordi de hadde jevnere lyssetting, som gjør plasseringen av bildene mye enklere for programmet. Dersom man har store kontrastforskjeller i bildene vil programmet slite med å plassere bildene i rommet, og man får en dårligere modell. Det viktigste er å få med mest mulig av undersøkelsesmotivet, og minst mulig himmel. Dersom man får med mye himmel vil motivet bli mørkere. Dårlig kamerabruk kan gjøre feltarbeidsdataene ubrukelige.

Feltarbeidet 24.9.2015 ga totalt 254 bilder, som i ettertid ble kuttet ned til 58 bilder. For å kutte ned tidsbruken i etter-prosesseringen. Feltarbeidet 11.11.2015 genererte 327 bilder, kuttet ned til 55 bilder. Erfaringsmessig er grunnarbeidet med bildene viktig endelig prosessering. Det er derfor hensiktsmessig å bruke tid på denne delen. Arbeidet er visuelt, og krever at man velger bilder med lik lyssetting. Velg bort mørke og dårlige bilder. I figur 3 er en oversikt over stegvis framgangsmåte i genereringen av den endelige SfM-modellen.

Som ny bruker av programvaren anbefales det å lese igjennom brukerhåndboken, samt søke på opplæringsvideoer på www.youtube.com. Videoene er god læring og viser funksjoner, tips og triks for gode resultater. Ved å lese seg opp og se videoer sparer man vesentlig tid, og slipper bomturer.

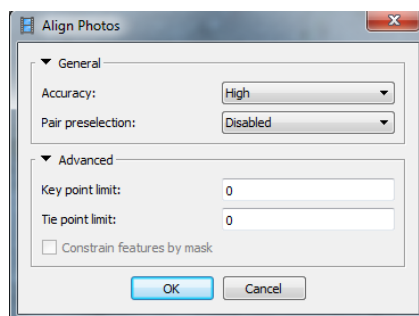
Det er valgt å gå igjennom metoden SfM stegvis og relativt detaljert som vist i figur 3. Dette er fordi metoden ofte er løst beskrevet i forskningen, og som fersk bruker av metoden går mye tid tapt til testing og feiling. Håpet er at ved detaljert beskrivelse av metodisk framgangsmåte

kan benyttes av andre studenter som ønsker å benytte SfM i studiesammenheng. Dette metodekapittelet kan da brukes som en veiledning til brukbart resultat.

1. Align Photos
2. Fjerne unødvendige punkter fra punktskyen
3. Optimize Alignment
4. Build Dense Point Cloud
5. Fjerne unødvendige punkter fra punktskyen
6. Build Mesh
7. Build Texture
8. Referering
9. Align Chunks
10. Fjerne unødvendige deler av modellen
11. Build DEM

Figur 3: Stegvis framgang i AgiSoft PhotoScan.

Den aller første prosessen er «Align photos». Det er valgt høy kvalitet og ingen grense for nøkkel- og knutepunkter som vist i figur 4. Ved å velge disse verdiene vil programmet prøve å finne så mange punkter som overhodet mulig i justeringen. Man sikrer da at programmet finner så mange fellespunkter som det er mulig å oppdrive ut i fra bildematerialet. Dersom man velger verdier her, vil justeringen av bilder bli begrenset til et visst antall nøkkel- og knutepunkter.

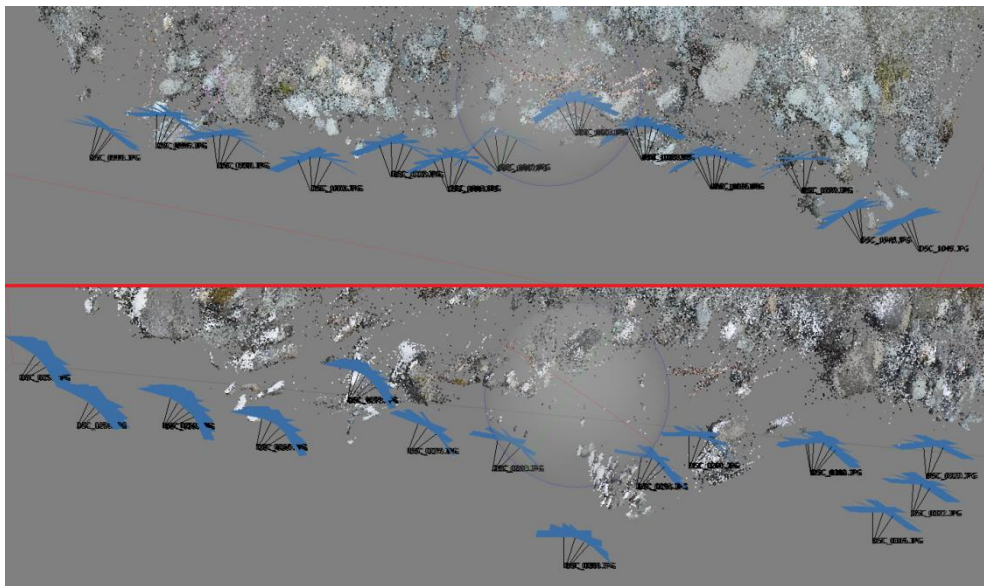


Figur 4: Parametervalg i Align-funksjonen. Default-verdiene for nøkkel- og knutepunkter er byttet ut med 0.

Etter at justeringen er ferdig, er det viktig å «vaske» modellen. Vasking går ut på at man fjerner punkter man ikke trenger i videre modellering. Dette betyr punkter som åpenbart ligger utenfor interessefeltet, men også punkter som ligger utenfor modellens overflate, både over og under. Det er viktig å gjøre seg flid i dette arbeidet, da punkter man ikke fjerner blir dratt videre i modelleringen, og kan være medvirkende til dårligere modellert overflate. Dette arbeidet er, i likhet med seleksjon av fotografier, et visuelt arbeid. Det vil si at det er opp til brukeren å avgjøre når man synes at modellen er god nok. Det har blitt vektlagt å fjerne punkter som avviker fra de andre.

Når man er fornøyd med vaskingen optimaliserer man kameraposisjonene. Dette bedrer geometrien, og justerer flere av kameraparameterne. Denne prosessen er man ikke nødt til å gjennomføre, men går raskt, og kan være med på å bedre resultatet.

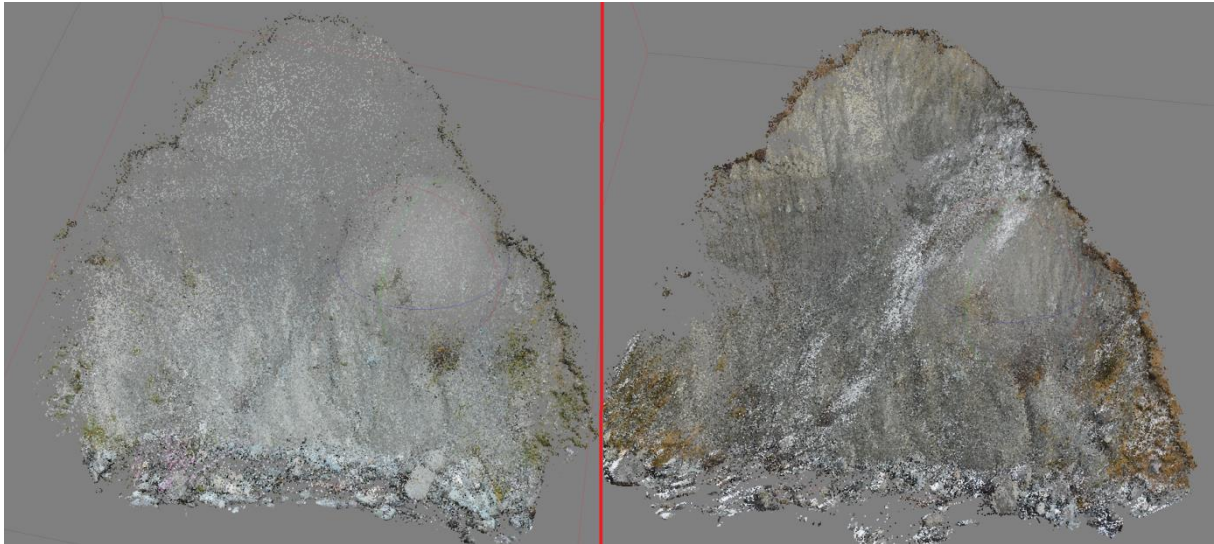
Resultatet fra bildejusteringen er vist i figur 5. Figuren viser hvordan programmet har posisjonert bildene i forhold til hverandre. Resultatet er en lavtetthetspunkttsky som diffust viser hvordan modellen kommer til å bli seende ut til slutt.



Figur 5: Kameraposisjoner og lavtetthetspunkttsky.

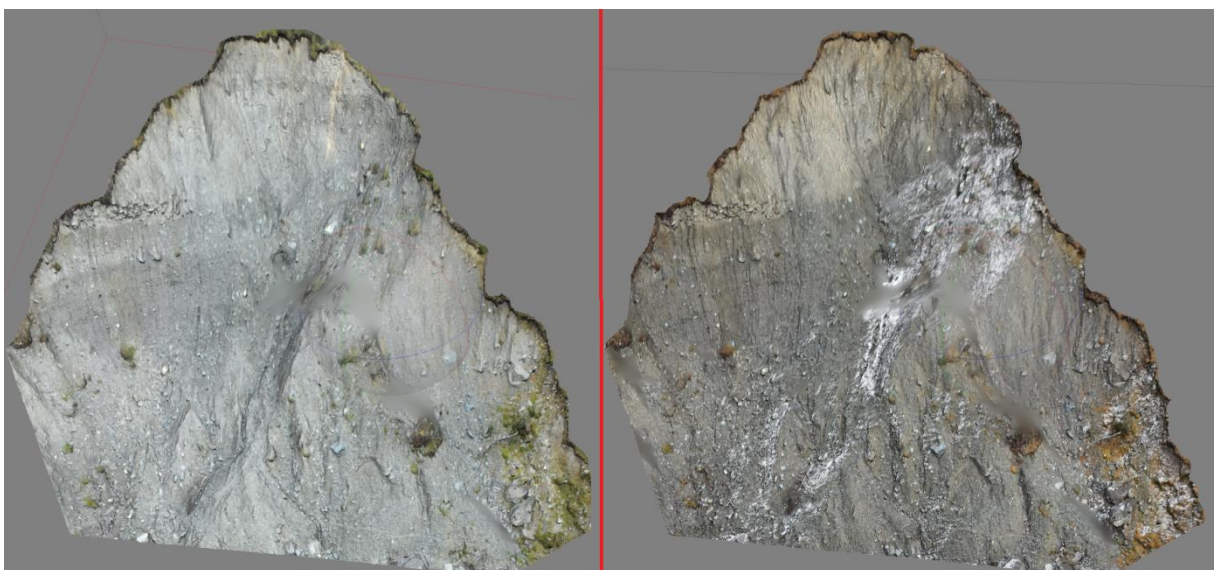
Etter at lavtetthetspunkttskyen er generert og kameraparameterne optimert bygger man høytetthetspunkttsky. Det er valgt å sette kvaliteten til høy og dybdefilteret til aggressivt. Resultatet fra denne prosessen finner man i figur 6. Denne prosessen fyller på punkttskyen, og antallet punkter øker betraktelig. Igjen blir det viktig å vaske bort punkter som ligger utenfor. Her er det enda viktigere å bruke tid, da avstikkere vil direkte påvirke opprettelsen av Mesh-laget. Opprettelsen av Mesh skjer ved triangulering av punktene i høytetthetspunkttskyen, og

er en versjon av Delaunay-triangulering lignende det man finner i ESRI's programvare. Det er valgt å bruke ekstrapolering for å tette eventuelle hull på grunn av at punktskyen i enkelte områder er glissen. Produktet er en kontinuerlig overflate.



Figur 6: Punktantallet er økt betraktelig når de to modellene har blitt til høytetthetspunktskyer.

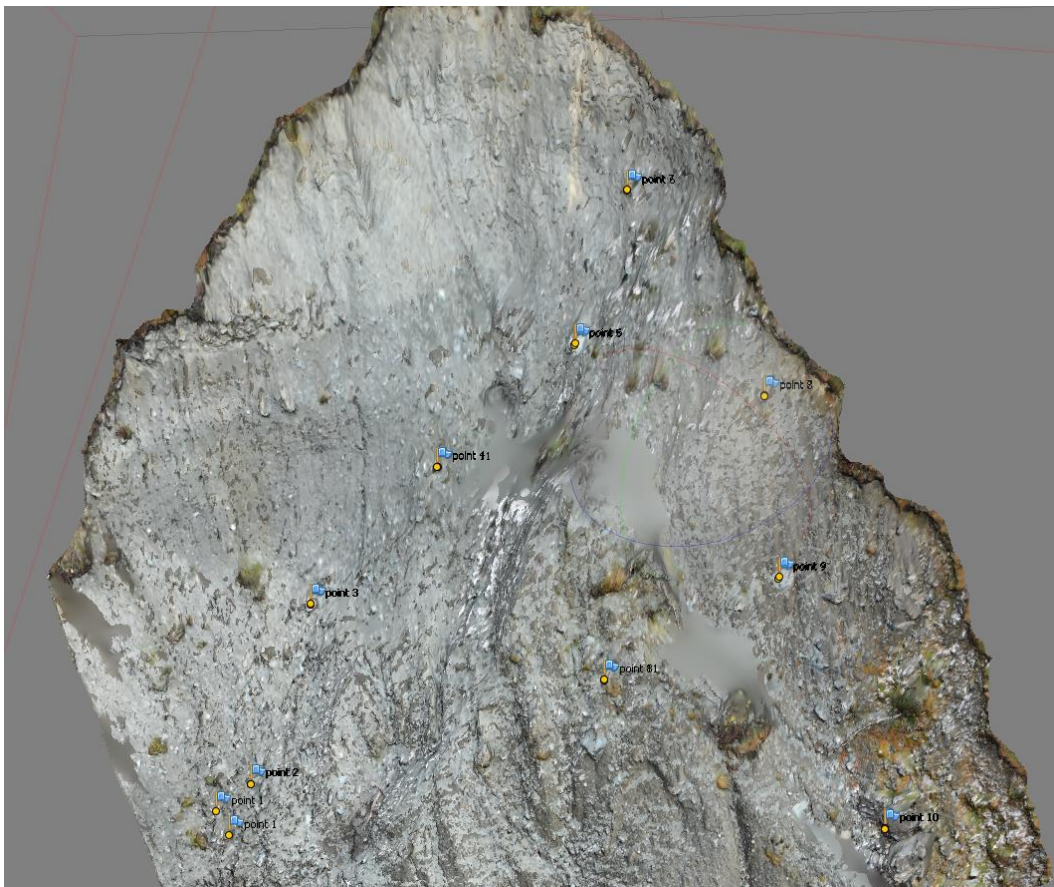
De ferdig produserte overflatene i figur 7 kan nå i teorien eksporteres. Å bygge tekstur for overflaten er viktigst dersom man skal eksportere modellen for videre analyse i et annet program og trenger et naturtro utseende. Teksturen kan eksporteres som en egen fil, og draperes over modellen. Selv om modellene nå har naturtro utseende mangler de koordinater i et absolutt referansesystem. Til nå har programvaren rekonstruert overflatene i et vilkårlig bilde-rom-koordinatsystem.



Figur 7: Ferdigstilte modeller, endeproduktet for selve modellingsprosessen.

Referering er viktig for at vi kan analysere videre med riktige enheter for x-, y- og z-verdier. Til dette arbeidet trenger man GPS-punktene målt inn under feltarbeidet. Dette arbeidet er avhengig av nøyaktighet. Hvis man plasserer punktene feil, vil dette forringe kvaliteten i modellen. Dersom målet er å modellere erosjon av en overflate vil 2 cm feil i z-verdi gi en feilkilde på 2 cm i ferdig modell. Derfor er det viktig at man sørger for å sette markørene riktig, og dobbeltsjekke koordinatene. Det er bedre å være nøyaktig. Man kan velge å referere modellen på to måter; enten direkte på modellen, eller igjennom prosjektbildene. Her har markørene blitt opprettet direkte i modellen for senere justering i bildene. Dette for å sikre at programmet plasserer markørene riktig.

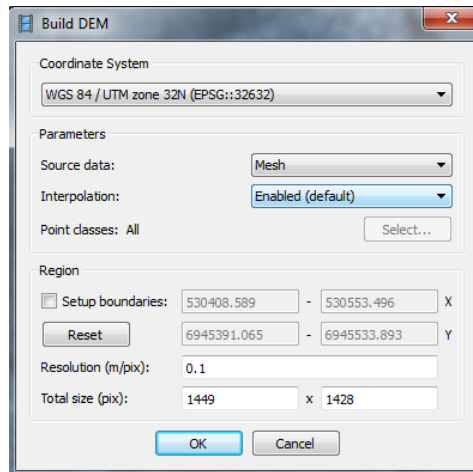
Når modellene har koordinater i et absolutt koordinatsystem er det ønskelig å få de plassert samsvarende rommet. Derfor justerer man de to modellene til hverandre. Dette får de to overflatene til å sammenfalle basert på markørene. Resultatet fra justeringen kan observeres i figur 8.



Figur 8: Resultatet etter å ha justert de to modellene til hverandre.

Modellene er justert til hverandre, og man kan kutte felles omriss. Dette gjør det enklere å analysere senere, og man slipper problematikk med store differanser i randsonen mellom de to

modellene. Deretter opprettes en DEM for skredet. Parametervalg for resulterende DEM er illustrert i figur 9. Det er valgt en oppløsning på 0,1 m for terrengmodellen, og filformatet er GeoTIFF. Filformatet er et geografisk referert bilde.



Figur 9: Parametervalg for opprettelsen av DEM.

Fremgangsmåten for å generere en SfM-modell er en rett fram prosess. Tidsbruken er derimot skjult. Så i tabell 1 vises tidsbruken for de ulike verktøyene for modellene. I tillegg til dette må det påberegnes tidsbruk i manuelt arbeid.

Tabell 1: Viser tidsbruken knyttet til hver prosess, som er ren data-prosessering. Tidsbruken er da som dødtime å regne, og man kan ikke ta seg til noe i programmet. Tiden er i formatet tt:mm:ss.

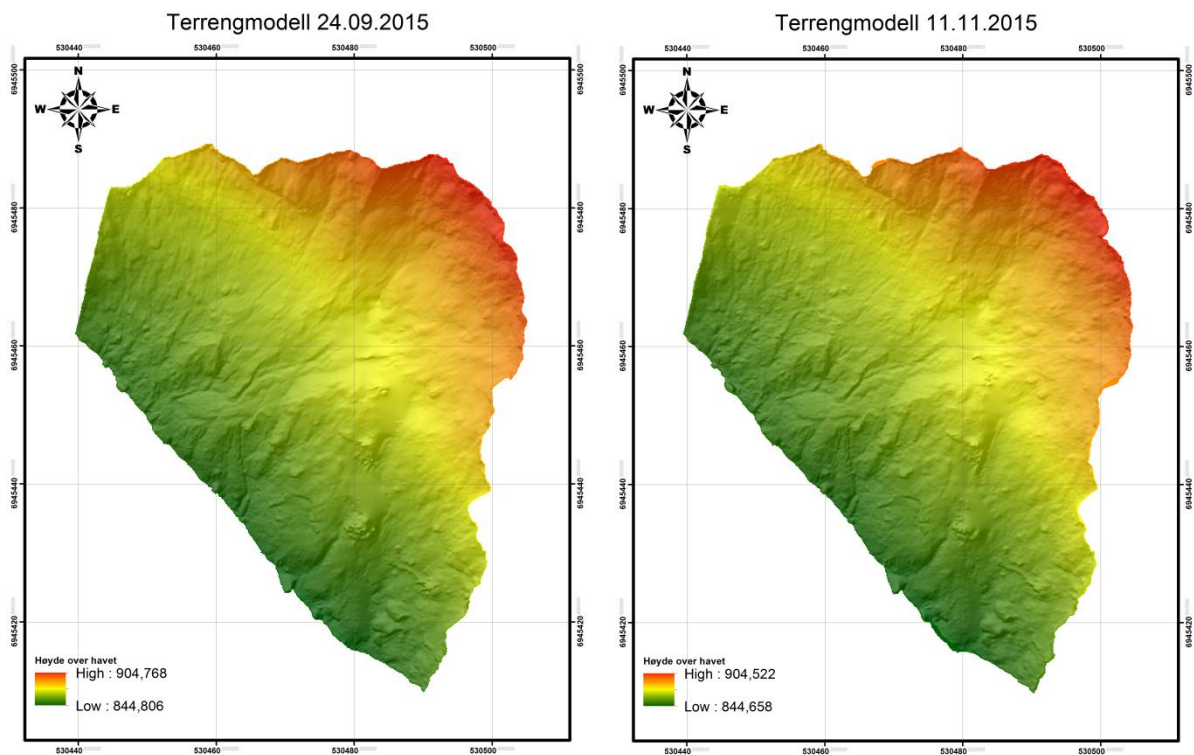
Verktøy	Prosess	24.9.2015	11.11.2015
Align Photos	Tilpasningstid	00:53:29	00:52:13
	Justeringstid	00:11:57	00:08:44
Optimize Alignment	Optimeringstid	00:00:37	00:00:40
Build Dense	Prosesseringstid	00:26:47	00:53:28
Build Mesh	Prosesseringstid	06:31:00	01:28:00
Build Texture	UV	00:04:38	00:01:44
	kartleggingstid	00:04:18	00:01:14
	Blandetid		
Totaler		08:12:46	03:26:03
Totalt for begge	11:38:49		

Neste steg er å bruke de to DEMene generert i Photoscan videre i ArcGIS.

5.4.2 Differensiering av SfM terrengmodellene i ArcGIS

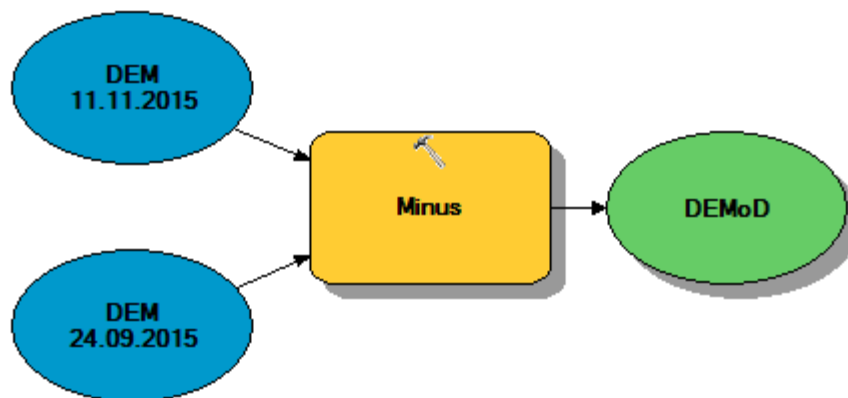
Etter at prosessering og ferdigstilling av arbeidet i Photoscan er ferdig er det klart for å analysere resultatene i ArcGIS. I figur 10 er de resulterende DEMene fra Photoscan-prosesseringen.

Det første man må gjøre i ArcMap er å opprette et hjemmeområde og en geodatabase, slik at man har kontroll på alle dataene sine. Dette gjør ting mye mer oversiktlig for brukeren selv. Det er også viktig å konfigurere Enviroment-settninger for rasterye. Dette gjør at produktene alltid har samme omriss som en av terrengmodellene. Ved å velge en snap-raster vil programvaren best mulig justere pikslene til de ulike lagene for optimal overlapping.



Figur 10: De to SfM-genererte DEM klare for bearbeiding.

De to terrengmodellene sier ikke så mye annet enn høyde over havet. Derfor er de manipulert etter flyttdiagrammet i figur 11. Målet for manipulasjonen av de to terrengmodellene er å vise differansen mellom de to SfM-genererte overflatene. Ut i fra disse differansene kan man gå innpå hva som faktisk er endringer og hva som er tilfeldig støy.



Figur 11: Flyttdiagram fra Model Builder i ArcMap.

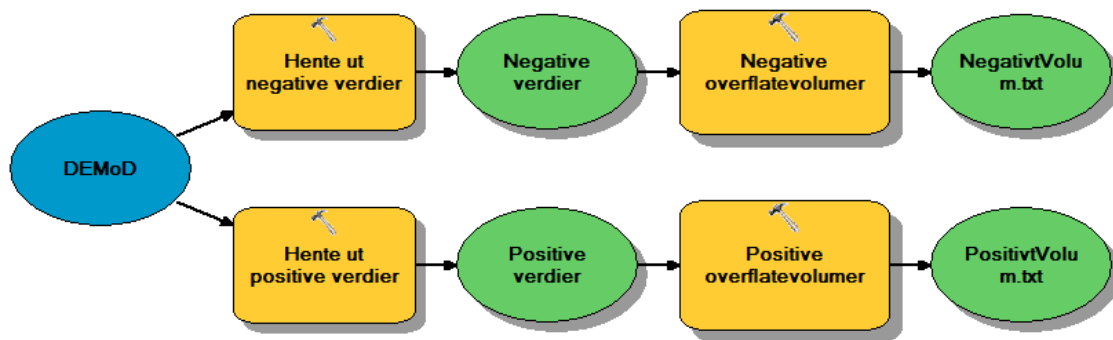
Differansieringen av de to terrengmodellene skjer ved å benytte seg av verktøyet minus. Verktøyet trekker fra verdiene i alle pikslene til den ene terrengmodellen fra den andre. Her er det valgt å trekke fra verdiene i den første modellen fra den andre modellen. På denne måten sikrer man at den resulterende differansmodellen har positive verdier for pålagring og negative verdier for erosjon. Hvis man velger å bruke den første som konstant 1 vil man få negative verdier for høyere og motsatt for lavere pikselverdier. Resulterende differansmodell og statistikk blir presentert i resultatkapitlet.

For å undersøke endringen i studieområdet med en volumetrisk tilnærming er det gjennomført to operasjoner som begge kalkulerer volum, men som skiller seg fra hverandre. ArcMap har et verktøy som heter CutFill som produserer en ferdig klassifisert modell. Modellen viser hvilke områder som har pålagring og erosjon, samt har en tabell hvor volumetriske verdier er lagret. Denne fremgangen er veldig enkel.

Den andre framgangsmåten tar høyde for at det finnes feilmarginer i de to terrengmodellene. Først er det kalkulert δU_{DoD} fra ligning (4) basert på residualene fra refereringen i PhotoScan. Deretter benyttes dette tallet for å beregne Student t-verdier for hver piksel. Etter at t-verdien er regnet ut, blir verdiene i rasteren eksportert til en tabell. I Excel blir deretter t-verdiene relatert til t-distribusjonen og konvertert til sannsynlighet med formelen $=TDIST(ABS(t);df;2)$. Excel-tabellen blir så importert tilbake til ArcMap og projisert ved å konvertere punkter til raster. Resultatet av differensiering, t-verdi- og sannsynlighetsberegning blir presentert i figur 18 i resultatdelen. Sannsynlighetsrasteren blir deretter benyttet for å vekte differansene ved å gange sannsynlighetslaget med differanselaget.

Dermed får man et differansekart som er justert etter sannsynligheten for at endringen i hver piksel er reell.

Det er også gjennomført en møysommelig manipulasjon av justert differansemodell for å kalkulere volum. Fremgangsmåten er illustrert i figur 12.



Figur 12: Alternativ metode for å hente ut volumetriske data.

Det er flere operasjoner i den alternative metoden for å hente ut volumetriske data, men man har fordelen av at man kan benytte seg av spørringer. De to verktøyene som er benyttet er Extract by Attribute og Surface Volume. Spørringene valgt henter ut negative og positive verdier, og er basert på bestemmelsen av sannsynlighet for at endringen er reell. Fordelen med å benytte denne framgangsmåten er at CutFill-verktøyet slår sammen piksler som har samme benevning. Resultatet av dette er at produsert tabell angir samlet verdi for større felter, og det er vanskelig å ekskludere uønsket støy for videre analyse av dataene. Resultatet for både CutFill-verktøyet og figur 19 blir presentert i resultatdelen.

5.4.3 Differensiering av LiDAR og SfM 24.9.2015

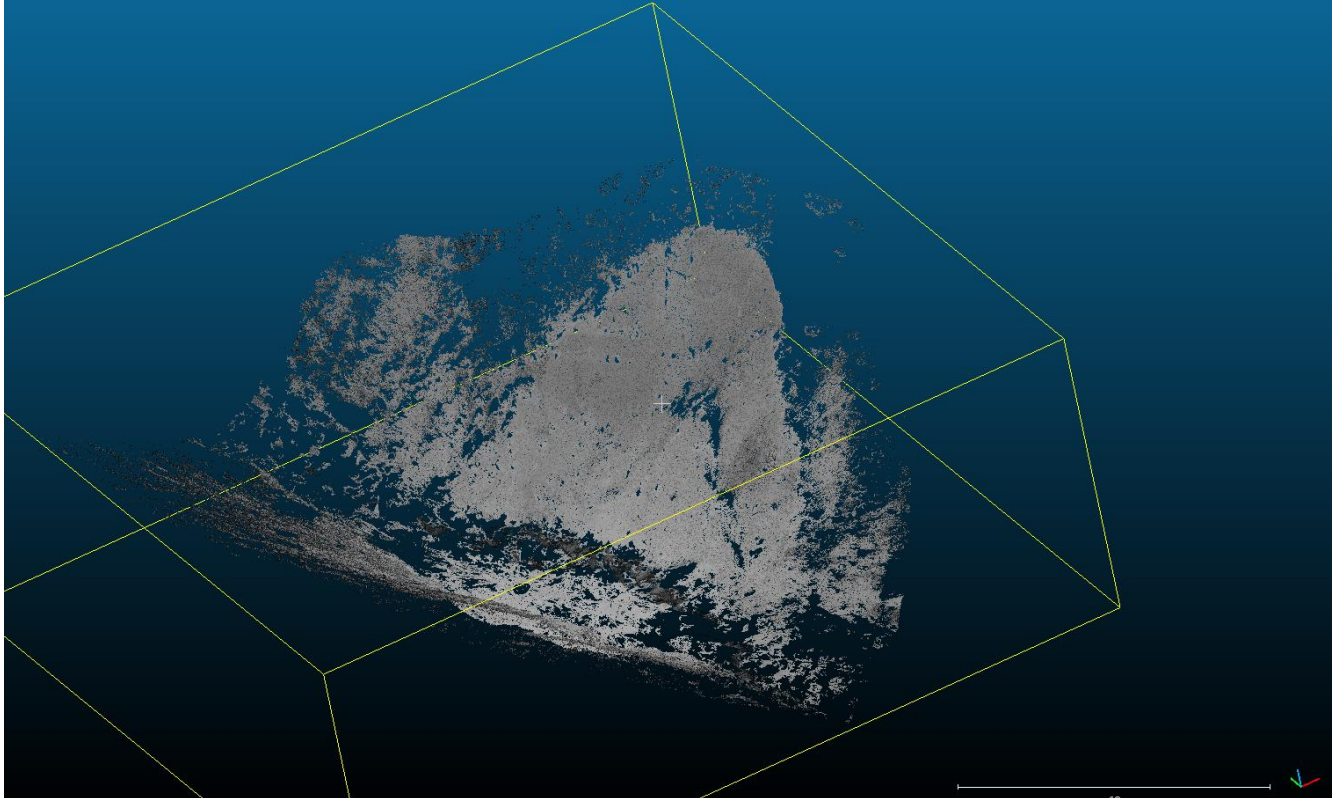
Til tross for at metoden SfM er godt dokumentert er det en fordel å undersøke hvor godt terrengmodellen måler seg mot LiDAR-teknologi. I forbindelse med feltarbeidet for studentene i GEOG2004 ble det gjennomført laserskanning av Storskredet datert 22.9.2015. LiDAR-modell av skredsåret vil benyttes som referanse for kvaliteten på SfM-modellen fra 24.9.2015. Innhenting av data ble gjennomført i samarbeid med teknisk ansvarlig på instituttet. Selve bearbeidingen til ferdig punktsky ble gjort av teknisk ansvarlig i ettertid. Ferdig produkt ble gjort tilgjengelig og åpnet for fri bruk gjennom instituttets datasystemer. Innhenting av LiDAR-data og framgangsmåte for punktskyen vil derfor ikke omtales her.

Fremgangsmåten for å differensiere LiDAR-punktskyen med SfM-overflaten er relativt enkel med passende programvare tilgjengelig. Siden ESRI's programvare ikke har noen justeringsmuligheter for terrengoverflatene må de bearbeides før endelig presentasjon. Konvertering er stikkordet her, og det lønner seg å ha god kjennskap til programmens kapabilitet med 3D-dataformater. Her har det blitt forsøkt å ta vare på dataene på best mulig måte, som vil si å produsere data som er håndterlig uten å måtte justere ned kvaliteten. CloudCompare er kompatibel med .obj- og .las-filer, så ved å eksportere fra PhotoScan i .obj-format kunne dataene enkelt importeres uten videre arbeid.

CloudCompare er benyttet til differensieringen mellom modellene. Deretter ble differansmodellen eksportert for presentasjon i ArcMap.

CloudCompare:

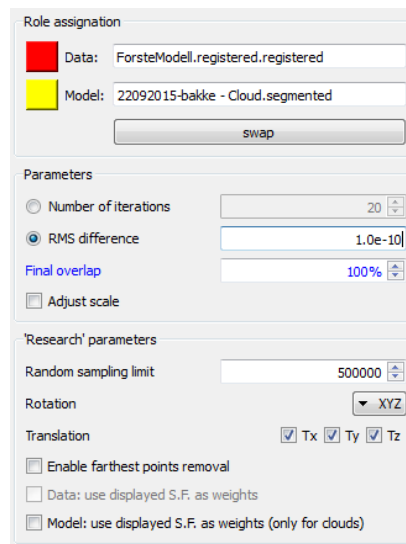
Første steg for CloudCompare-framgangen er å importere modellene man skal differensiere. Her er det valgt å godta forespørselen om å foreta et lokalt skifte i koordinater for å ivareta nøyaktigheten. I dette prosjektet er dette den ferdige overflatemodellen fra SfM-modelleringen, samt punktskyen av LiDAR-dataene som kan man se i figur 13.



Figur 13: Punktskyen fra laserdataene.

Målet i dette programmet er å få de to modellene til å ligge så nærme hverandre som mulig. CloudCompare har et justeringsverktøy som gjør dette mulig. Prosessen er lignende det i steg 9 i SfM-genereringen. Når man importerer de to modellene vil de ikke samsvare godt nok, og uten justering vil differensieringen garantert bli dårlig.

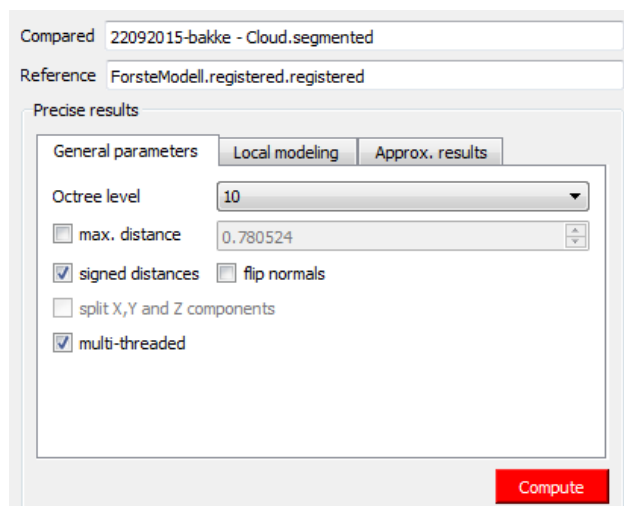
Første steg er å justere modellene grovt i forhold til hverandre. Dette gjøres med verktøyet Translate/Rotate. Her er det viktig å få de to modellene til å ligge nærme hverandre i rommet. Når grovjusteringen er utført kan man benytte seg av justeringsverktøyet Clouds registration, som finjusterer de to modellene til hverandre. Det er viktig å velge punkttskyen som modell, fordi LiDAR blir benyttet som modell for den ekte overflaten. Vinduet for verktøyet og parametervalg er illustrert i figur 14.



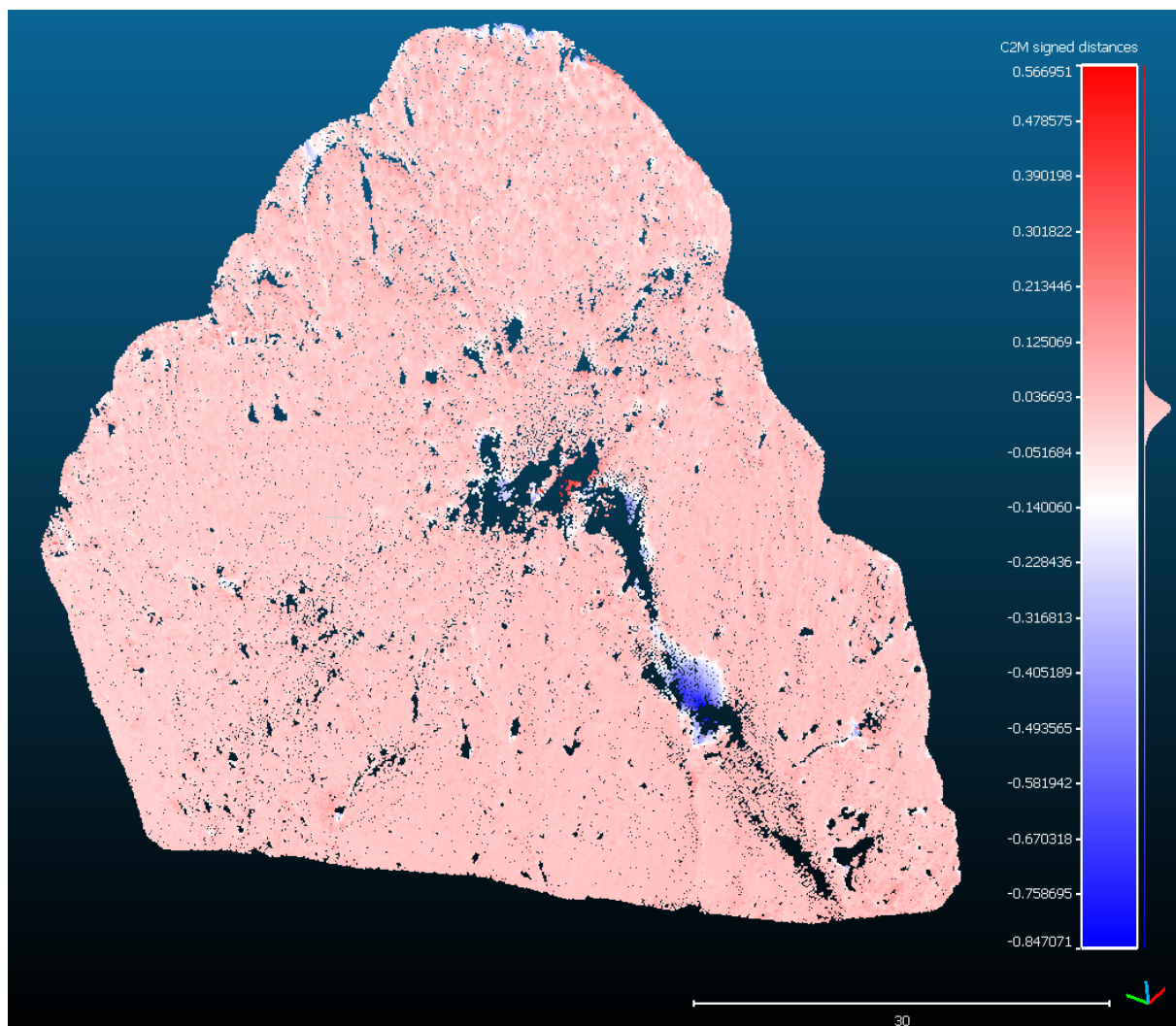
Figur 14: Parametervalg for finjusteringen.

Når verktøyet er ferdig med registreringen fjernes punkter som ligger utenfor skredområdet i SfM-modellen. Dette blir gjennomført ved å bruke Segment-funksjonen. Man tegner manuelt en linje langs kanten av modellen, og velger Segment in fra verktøymenyen. Da vil programmet fjerne alle punkter som ligger utenfor det konstruerte polygonet.

Siste steget er å benytte verktøyet Distance computation, som kalkulerer distansen mellom punkttskyen og SfM-modellen. Parametervalg for dette finnes i figur 15, og differansemodellen i figur 16



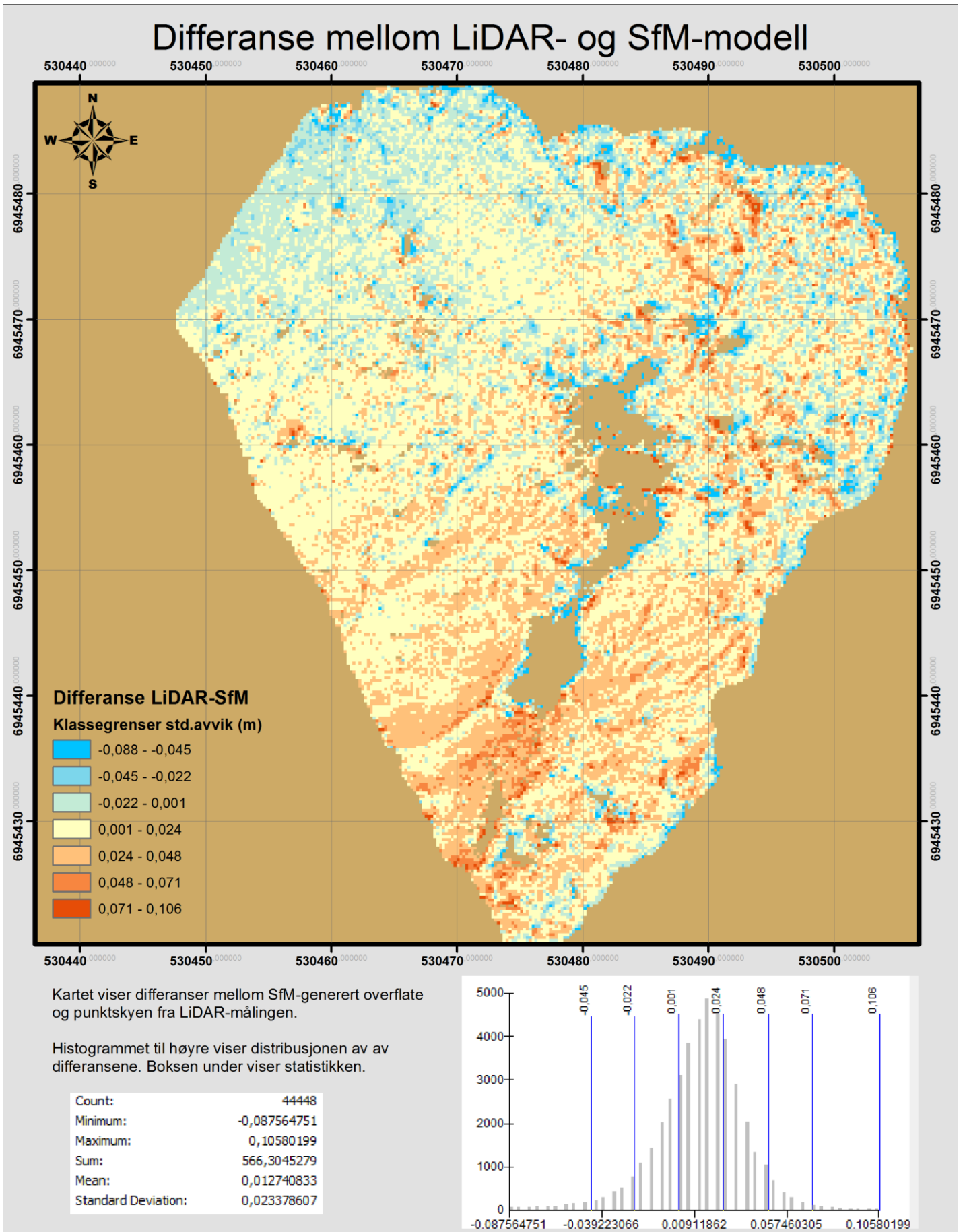
Figur 15: Parametervalg for LiDAR-SfM-differensieringen.



Figur 16: Differansemodell med verdifordeling til høyre.

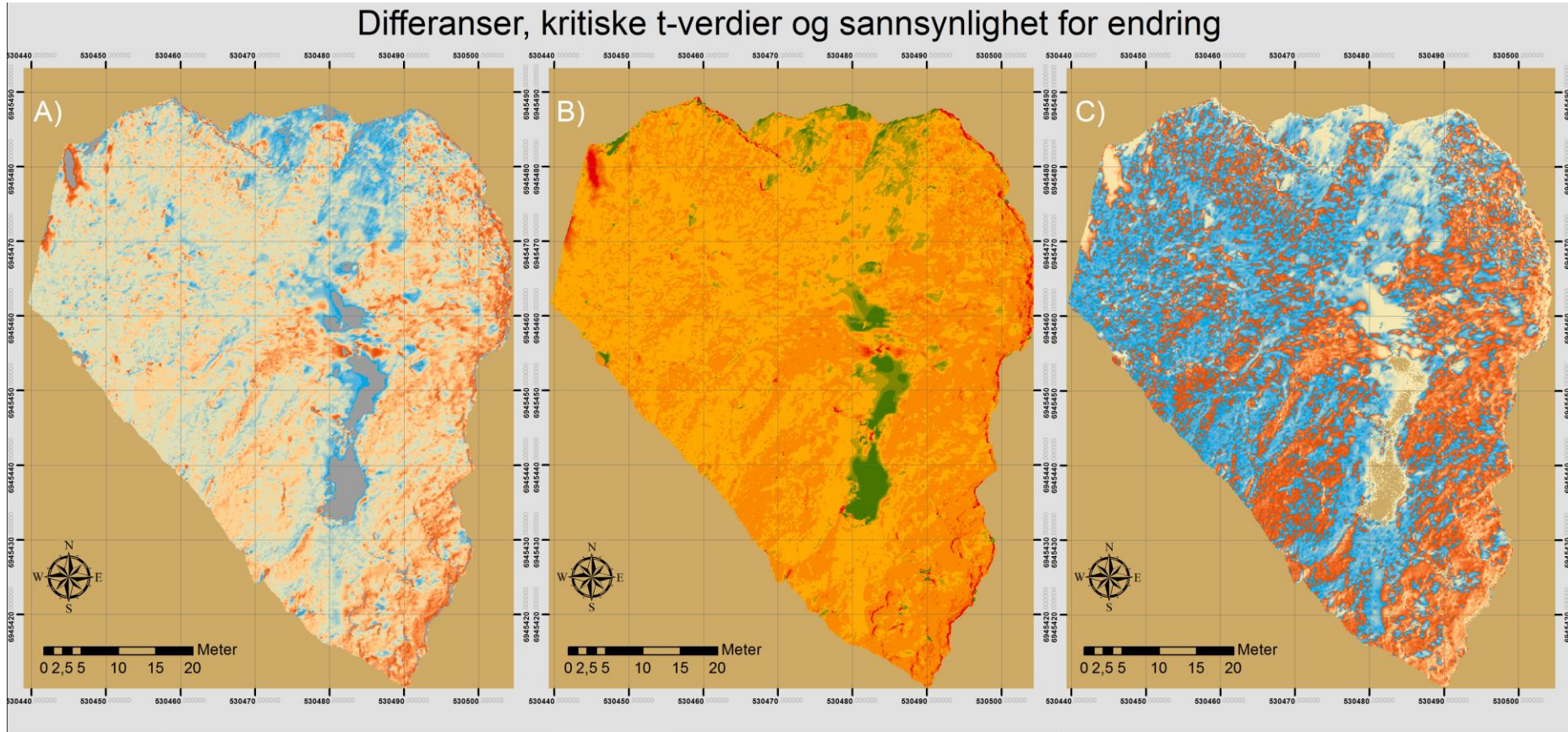
Differansemodellen kan eksporteres fra CloudCompare som en punktsky med differanseverdiene lagret i tekst-format, som muliggjør import til ESRI-programvare. For ferdigstilling i 2D-format har punktskyen med differanseverdier blitt importert i ArcMap. Her har tekstfila blitt omgjort til xy-data og transformert til raster-format med verdier fra differansene. Den resulterende differansemodellen har en oppløsning på 0,23 m som er default-verdien foreslått av programmet. Man kan også kalkulere statistikk i CloudCompare ved å bruke Histogram- og Distribution-verktøyene. Dataene generert fra dette blir presentert i resultatdelen.

6. Resultater

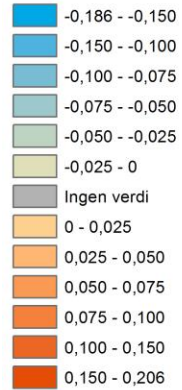


Figur 17: Differensiering av LiDAR-punktsky og SfM-modell.

Differanser, kritiske t-verdier og sannsynlighet for endring

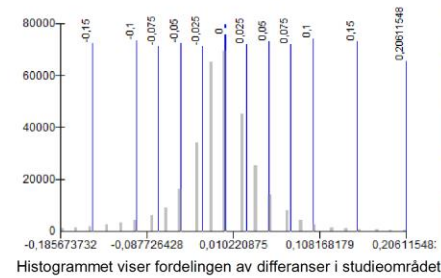


Differanser

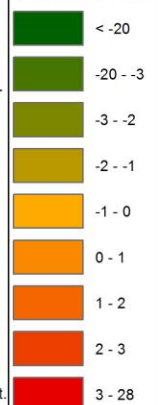


A)

Kartet illustrerer differansene mellom de to terrengmodellene datert 24.9.2015 og 11.11.15. Data med verdien "ingen verdi" er punkter som befinner seg utenfor 2 standardavvik fra gjennomsnittet. Kartet viser reelle differanser, som vil si at negative verdier er erosjon og positive verdier er pålagring.

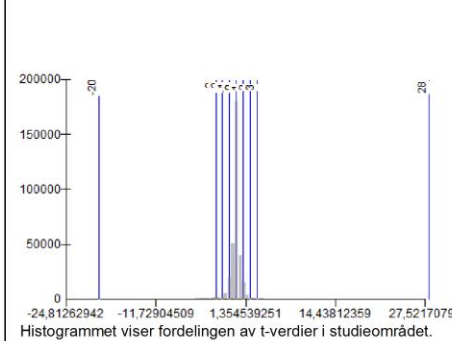


Student t-verdi

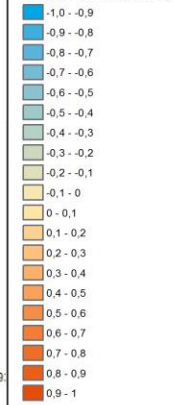


B)

Kartet viser kalkuleerte student t-verdier fra differensiering av terrengmodellene med bakgrunn fra iboende feil i de to overflatene.

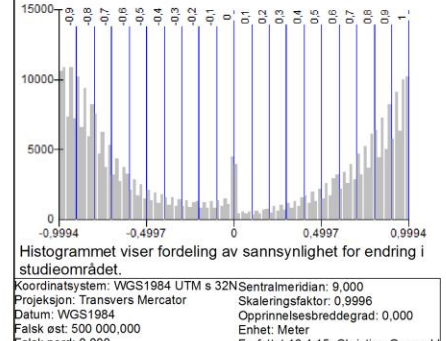


Sannsynlighet for endring



C)

Kartet viser kalkuleerte sannsynligheter konvertert fra student t-verdiene i kart B. Kartet angir relativ usikkerhet i differansene fra de to terrengmodellene



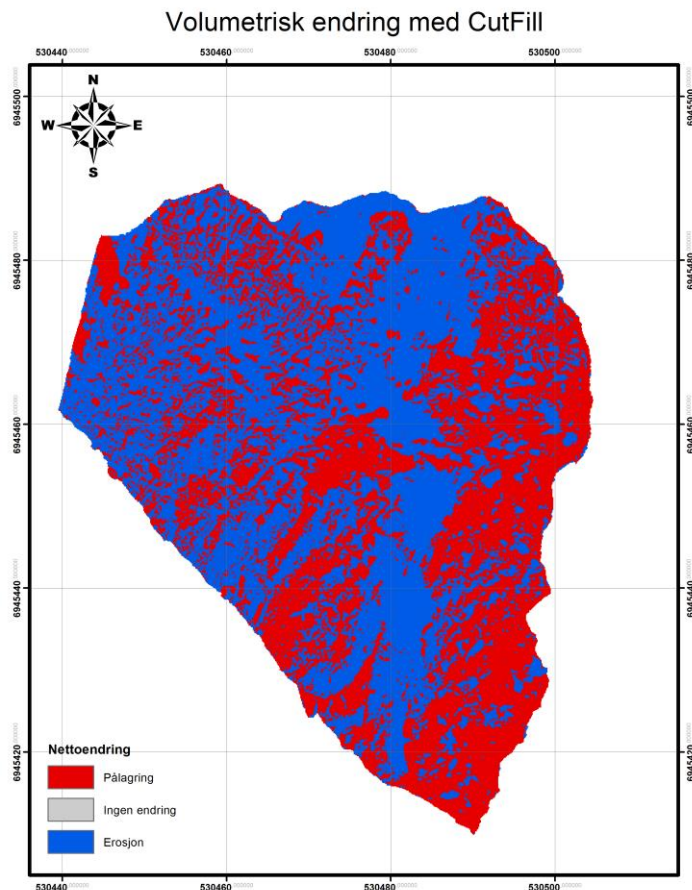
Figur 18: Kart med differanser, student t-verdier og sannsynlighet for endring. Differanseverdiene er oppgitt i meter.

Tabell 2 angir spredningsmål og individuelle feil i de to terrengmodellene som resulterer i kart A) i figur 18. δU_{DoD} ble benyttet i kalkulasjonen av student t-verdier, som igjen ble benyttet til å regne sannsynligheten for at differansen i en gitt piksel er sann eller ikke.

Tabell 2: Tabellen viser verdiene fra A) tilhørende figur 18.

	Antall piksler	Gjennomsnitt	Standardavvik	Maks	Minimum
Før eksklusjon	331887	0,012	0,1	2,284	2,06
Etter eksklusjon	319201	-0,004	0,047	0,206	-0,186
Prosent utenfor	3,83 %				
Posisjonsfeil	X	Y	Z		
DEM 24.9.2015	0,105	0,115	0,057		
DEM 11.11.2015	0,076	0,116	0,06		
δU_{DoD}			0,083		

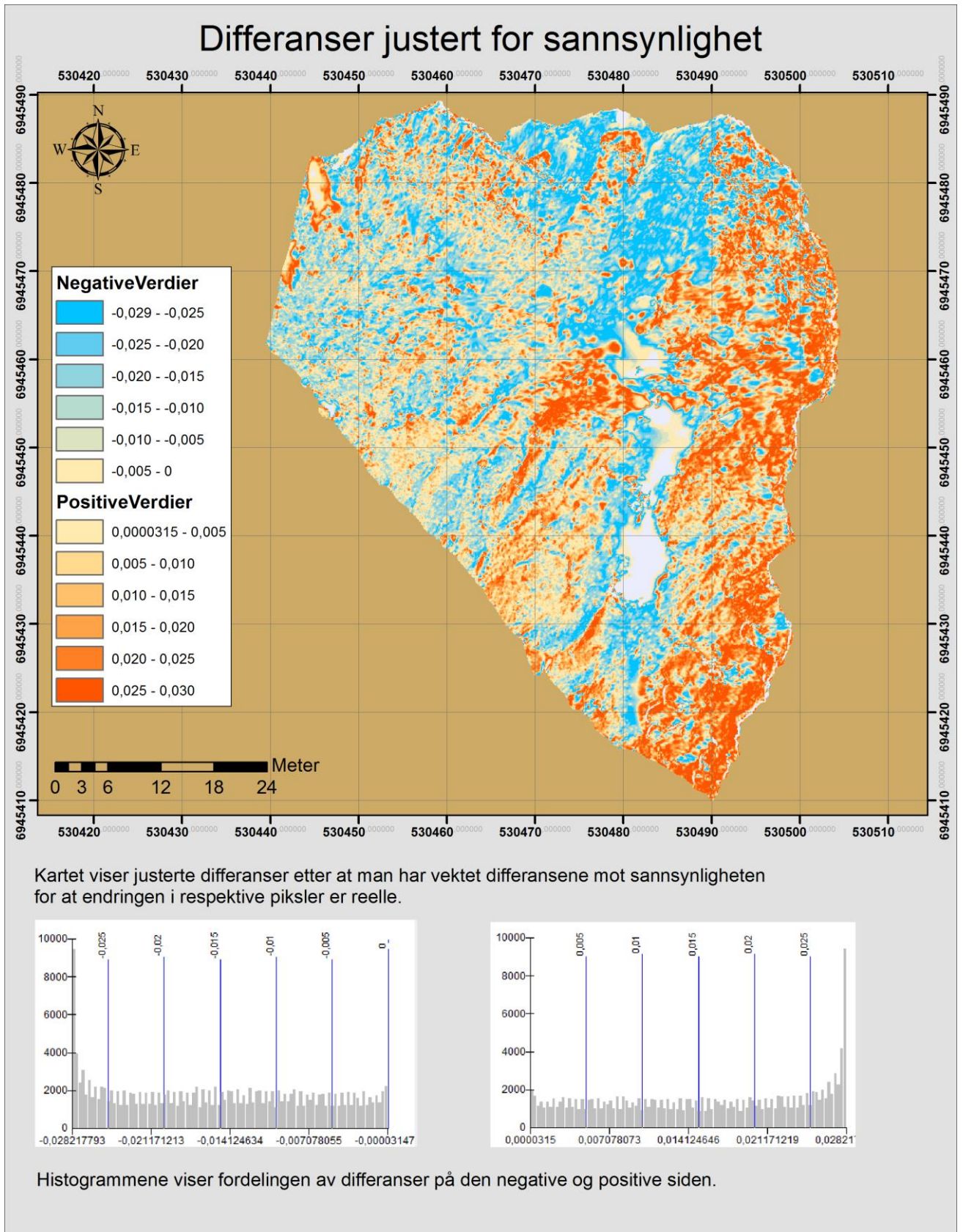
Figur 19 viser områder med pålagring og erosjon i studieområdet. Kartet tar ikke høyde for usikkerhet i differansene, og kan dermed benyttes som sammenligning til mer restriktiv volumendringskalkulasjon.



Figur 19: Viser positiv og negativ endring med volumetrisk tilnærming i studieområdet.

Fra tabellen tilhørende figur 19 er budsjettet for volumendring; pålagring 57,052, erosjon 97,175. Dette gir $-40,123$ kubikkmeter. Det vil si at uten å ta usikkerhet i modellene til rette har storskredet mistet 40 kubikk med masse mellom september og november.

Med bakgrunn i sannsynlighetene i kart C) i figur 18 har det blitt konstruert et differansekart som er vektet mot sannsynligheten for at endringen er reell. Dette gir en mer restriktiv overflateendring som tar høyde for iboende feil i de to terrengmodellene. Resultatet av sannsynlighetsvektingen ser man i figur 20.



Figur 20: Resultatet av vektning av differanser mot sannsynlighet for endring. Endringene er oppgitt i meter.

Med verktøyet Surface Volume har differansene blitt omgjort til volumetriske endringer. Informasjonen hentet ut av figur 20 beløper seg til; negativ volumendring er 23,42 og positiv volumendring er 19,31. Dette gir totalendring på -4,11 kubikkmeter. Dette volumestimatet er kun 10,24 % av beregnet endring fra CutFill.

7. Diskusjon

Denne studien fokuserer på om SfM er en enkel metode å benytte i geomorfologisk endringsundersøkelse for personell uten faglig bakgrunn fra geomatikk. Derfor er det valgt å diskutere og belyse alle komponentene fra feltarbeid til ferdig modell, differensiering og behandling av resultatene. Dette er for å få fram at alle deler av arbeidet ikke er like innlysende, og man ikke burde ta for gitt at alle delene av prosessen er like selvforklarende. Dessuten finnes det mange fallgruver, og uten innsikt i metodisk framgang og programvarer finnes det mange blindveier.

7.1 Feltarbeidet

Feltarbeid kan være krevende når man ikke har noen praktisk erfaring fra før. Mye kan gå galt underveis og det gjelder å ta vare på de erfaringene man får fra hver gang. Fordelen med gjentagende feltarbeider, da man kan justere fra gang til gang. Ustabile værforhold er en av utfordringene med å arbeide i fjellområder. Heldigvis var det forholdsvis stabile forhold under feltarbeidene. Viktig å merke seg at metoden egner seg best med stabile lysforhold. Derfor burde dette være et viktig punkt i planleggingsfasen. Det er en fordel å være fleksibel på feltarbeidstidspunktet slik at man kan gjennomføre det etter værmeldingen.

Utstyret i feltarbeidet er relativt enkelt, og lett tilgjengelig. Som Prosdocimi et al. (2015) trekker fram kan man benytte seg av kamera innebygd i smarttelefoner, noe de fleste har i dag. Her ble det valgt å benytte speilreflekskameraer. Det ble benyttet to forskjellige, da det opprinnelige kamera ble glemt 24.09.15 og man måtte basere seg på å bruke kamera fastmontert på laserskanneren. Dette vurderes ikke som et problem for den videre analysen, da de fleste studier benytter forskjellige kameraer. Prosdocimi et al. (2015) diskuterer også om det innebygde kameraet i smarttelefonen er det beste, noe som antyder at kvaliteten på resulterende modell ikke er avhengig av antall megapiksler. Erfaringsmessig er det hvordan man velger å eksponere objektet som avgjør om modellen blir bra eller dårlig, samt antall kameraposisjoner. Bildeserier på 4-5 bilder per posisjon, og som eksponerte skredsåret godt, resulterte i best modellering. Med god eksponering menes at man har mest mulig objekt, og minst mulig av alt annet. Dersom man får med for mye himmel og vegetasjon kan dette forringe lysforholdene i bildet. Objektet blir mørkere hvis for mye av den lyse himmelen kommer med. Dette medfører at SfM-programvaren ikke klarer å justere bildene relativt til hverandre. Som Heritage et al. (2009) påpeker er feltarbeidsstrategien viktig for resultatet i modelleringen. Mange posisjoner og godt eksponert objekt vil i større grad gi en modell som sammenfaller med Heritage et al. (2009) punkter for DEM-kvalitet som er; kvalitet på

punktene i overflaten, tettheten av punkter i representasjonen og distribusjonen av punkter innad overflaten. Dersom man forflytter seg for langt mellom hver posisjon kan det oppstå problemer med justering av bildene. Derfor er det viktig å bevege seg kort mellom hver kameraposisjon for å sørge for at programvaren klarer å gjenkjenne punkter i hvert av bildesettene mellom de ulike posisjonene. Fordi kvaliteten på bildene er så førende for resulterende kvalitet er det et godt utgangspunkt å prøve seg på enklere objekter før feltarbeidet, for å bli kjent med hva som fungerer best. Med et enkelt bildesett får man testet hvilken eksponering som gir best resultat. Det kan være modellering av en kaffekopp, ansiktet til en venn og lignende.

Studieområdet Vekve er relativt krevende. Topografien gjør det vanskelig å få inn GPS-signaler, og man behøver derfor en basestasjon. Basestasjonen må settes opp på et egnet punkt, noe som betyr avstand fra feltområdet. Det at feltområdet er såpass skjermet, medfører mulighet for systematiske feil i kontrollpunktene. GPS'en godtar i midlertid ikke måling med dårlig dekning, eller store feilkilder. Dermed har man en viss kontroll på at innmålte punkter har tilstrekkelig kvalitet. Fra Kartverket (2013) retningslinjer for GPS-måling skyldes grove feil menneskelig svikt. I feltarbeidet ble det benyttet en rover festet til en relativt kort antenne. Kontrollpunktene ble spredd vilkårlig i studieområdet, og størrelsen på de malte flekkene var varierende. Nettopp dette er et kritikkverdig punkt, da Westoby et al. (2012) og Prosdociami et al. (2015) benytter kontrollpunkter med definert sentrum, noe som gjør det lettere å plassere punktene i referereringen. I feltarbeidet 24.09.15 var det andre- og tredjeårsstudenter som målte inn kontrollpunktene, så mulighet for slurv og unøyaktig plassering er til stede. Den korte antennen gjør det vanskeligere å holde libellen sentrert under måling. GPS'en ble i midlertid innstilt til å måle et snitt av 10 målinger, noe som i teorien gjør målingene mer nøyaktig og normaliserer eventuelle avvik. I feltarbeidet 11.11.15 var det mer kontroll på størrelsen av kontrollpunktene, men det manglet fortsatt et definert senter. Studieområdets bratte helning gjør innmåling krevende på grunn av dårlig fotfeste til å gjennomføre stabile målinger. Særlig i de øvre delene av skredsåret var det for bratt til å etablere kontrollpunkter. I etterkant av feltarbeidet 24.09.15 ble det også oppdaget at GPS'en var innstilt med feil høydereferansemodell, og høydene ble justert med 43,5 meter.

Fra GPS-delen av feltarbeidet ser man at det er krevende å oppnå resultater av høy kvalitet. Valg av punkter, vanskelige målingsforhold og usikkerhet i om målingene er gode nok bevitner om at rutine og gode arbeidsvaner er en fordel. For å være sikker på at målingene er gode nok trengs det både opplæring og forståelse av utstyret som benyttes. Desto mer

krevende studieområdet er, jo større krav stilles det til brukeren. Det kan derfor være en fordel å tenke i utradisjonelle baner, slik Kaiser et al. (2014) fremhever i sin studie. Ved kun å benytte forskjellige objekter av kjent størrelse for realistisk skalering av modellen, kvitter man seg effektivt med GPS og kontrollpunkter. Det finnes en del fallgruver når det kommer til feltarbeidet, og i dette arbeidet er det viktig med nøyaktighet. Den iboende feilen i terrengmodellen vil dras videre i differensieringen og volumestimatene. Dersom man ikke er avhengig å plassere modellen i absolutte koordinater, kan bruken av kjente objekter være en forenkling for geomorfologisk endringsundersøkelse med SfM.

7.2 Prosesseringsarbeidet

7.2.1 Valg av programvare

Arbeidet med datagrunnlaget fra feltarbeidet er en møysommelig prosess. Uten klare retningslinjer for hvordan man vil gå fram for å visualisere dataene vil det bli mange bomturer. For å ende opp med et godt resultat kreves forskjellige programvarer med forskjellige funksjoner, da alle programmer har styrker og svakheter. Man vil gjerne utnytte styrkene i de ulike programmene. Et annet moment er at man har et sett med basiskunnskaper fra verktøy man har benyttet i undervisningssammenheng. Det er viktig å påpeke her at man i teorien kan gjennomføre denne modelleringen helt kostnadsfritt kun ved å benytte Open Source programvare som er relativt lett tilgjengelig. Dette ville i midlertid ført til tapt tid i å sette seg inn i nye brukergrensesnitt og ukjente verktøy. AgiSoft PhotoScan ble valgt på bakgrunn av at det er relativt billig å anskaffe en lisens (3000 kr), og at brukergrensesnittet er enkelt å sette seg inn i. Det at produsenten har kommersielle insentiver gjør at brukervennligheten er høy. De ulike programvarene gjør stort sett samme jobb, og er basert på bildegjenkjenningssalgoritmene utviklet av Snavely et al. (2008). Programvaren har en arbeidsflyt som tar deg fra bilder til resulterende sammenhengende overflate kalt Mesh. Mesh er en TIN-basert interpolering som konstruerer triangler mellom punktene i punktskyen. Dette er i tråd med Heritage et al. (2009) påstand om at TIN gir mer pålitelige resultater. En annen fordel er at man har en sømløs løsning fra bilder til DEM, hvor man ikke trenger å konvertere mellom flere programvarer.

Gjennom de ulike undervisningsfagene ved Geografisk Institutt har man fått god kjennskap til ESRI's programvare ArcGIS. Dette er et program med mange funksjoner innen manipulering av geografiske data. Når programvaren er tilgjengelig for alle studenter, blir dette et naturlig valg som analyseverktøy. Dessuten tilbyr ESRI mye informasjon om verktøy gjennom deres

søke-funksjon i programvaren, og på deres hjemmesider. Deres brukerforumer er en massiv kunnskapsbase, som er svært fordelaktig å benytte seg av. På bakgrunn av dette er valget av GIS-programvare åpenbart.

Fordelen med å benytte CloudCompare er at det er et gratisprogram, tilgjengelig for alle. Både Prosdocimi et al. (2015) og Kaiser et al. (2014) benyttet verktøyet i arbeidet med SfM-LiDAR-sammenligning. Fordelen med å analysere differansene i 3D er at man har muligheten til å få med kompleksiteten i overflaten, og dermed få en bedre representasjon enn med standard 2D differensiering. Programmet er brukervennlig, og det er lett å få oversikt over verktøyene. Programmet støtter også mange 3D-filformater som gjør det meget anvendelig.

7.2.2 Modelleringsarbeidet

7.2.2.1 PhotoScan

Selv om framgangsmåten i PhotoScan er relativt enkel, er det fortsatt en del parametervalg man må bestemme. Hvilke kvalitetsparametere man velger å benytte vil ha konsekvenser for resulterende modell. I denne oppgaven har fokuset vært å få en tilstrekkelig overflaterestruksjon med et fornuftig tidsperspektiv. Når parametervalg er gjort, og verktøyet initiert er brukeren inaktiv i tiden det tar før verktøyet er ferdigkjørt. Dette har mye å si for tidsdisponering i løpet av modelleringen. Prosesseringstiden er også en funksjon av størrelsen på datagrunnlaget, parametervalg og hardware man benytter. Man er avhengig å ha en PC som er kapabel til å kjøre på høy datakraft. Forskjellen på modellering på en standard PC og en arbeids-PC kan være flere titalls timer. Jo kraftigere hardware tilgjengelig, jo raskere modellering (Nolan et al., 2015). Igjen er erfaring og rutine et element. Det er viktig at man ser over at alt er slik det bør før man kjører verktøyene. For eksempel er justering av «bounding box» viktig, fordi det bestemmer området som modelleres i genereringen av høytetthetspunktsky. I et stort datagrunnlag kan denne enkle glippen resultere i flere timer bortkastet tid, fordi programmet ikke modellerer hele det ønskede området. Som illustrert i tabell 1 er det varierende hvor tidskrevende hver enkelt prosess er. De mest tidkrevende prosessene er justering av bilder, høytetthetspunktsky og mesh-generering. Det er valgt å kjøre modelleringen på nest høyeste kvalitet. Dette gjør inaktiv tidsbruk overkommelig, og man skal være i stand til å produsere et ferdig produkt i løpet av en dag. Dersom man ikke kutter ned bildebasen og kjører på de høyeste parameterne vil prosessid for hver av disse tre verktøyene fort nærme seg 9 timer. Det er usikkert hvor mye parametervalgene har å si rent kvalitativt. Teoretisk sett er det et minimum på tre kameraposisjoner for å løse geometrien.

Det ble derfor antatt at mange veldistribuerte kameraposisjoner som eksponerer studieobjektet godt vil være tilstrekkelig (Prosdociami et al., 2015). Heller kvalitet på bildene framfor kvantitet. Når man begynner å bli kjent med arbeidsflyten kan man vurdere å skru opp kvalitetsparameterne, samt øke datagrunnlaget.

7.2.2.2 CloudCompare for differensiering av LiDAR-SfM

Sammenligning av LiDAR- og SfM-modellene er i prinsippet en enkel prosess når man har kjennskap til egnet programvare. Det skulle allikevel by på noen problemer. I utgangspunktet var ideen å prosessere LiDAR-punktskyen til en mesh tilsvarende den produsert i PhotoScan. Det var ikke mulig å konstruere en mesh ut av punktskyen i MeshLab av uvisse grunner. .las-filen er lesbar i CloudCompare og kan importeres direkte. Punktskyen dekker et større område, og det er derfor nødvendig å fjerne punkter som befinner seg utenfor studieområdet. Hvis ikke vil differansene til disse punktene også tas med i videre vurdering.

Selve sammenligningen i CloudCompare relativ enkel prosess. Når det kommer til parametervalg for finjusteringen ble default-verdiene justert til høyere RMS og høyere antall sampling-enheter. Programmet vil uansett justere de to skyene best mulig ut i fra datagrunnlaget, og her var ikke datagrunnlaget stort nok til at det er fordelaktig å benytte lavere parametere. Heller høye parametervalg, enn for lave. Når registreringen er ferdig er det enkelt å eksportere differansepunktsky i tekst-format for ferdigstilling i ArcMap.

7.2.2.3 ArcGIS SfM

For å oppdage geomorfologisk endring i Storskredet fra september til november, må dataene analyseres i GIS. ArcMap har verktøyet CutFill innebygd som er en volumetrisk tilnærming til differensiering av terrengmodeller. Selv om dette er letteste vei, kommer man ikke unna det faktum at alle terrengmodeller har iboende feil (Wheaton et al., 2010). Derfor er det viktig å finne en løsning på hvordan man skal behandle de individuelle feilene i modellene. En direkte sammenligning og volumkalkulasjon uten å ta høyde for feil vil gi et naivt volumestimat. Å ta høyde for usikkerhet i terrengmodellene er en viktig prosess. I Wheaton et al. (2010) trekkes det fram eksisterende metoder for å håndtere unøyaktigheter og det foreslås en ny metodisk tilnærming ved bruk av korrelasjonsteknikker mellom egenskaper ved terrengmodellene. Den nye tilnærmingen ble for sofistikert og komplisert for å benyttes her, så det ble valgt å støtte seg på å kvantifisere unøyaktighetene i modellene og ta høyde for signifikansen dette utgjør. I forsøk med å sette $\min \text{LoD}$, var det tydelig at mye av dataene ble forkastet, og kartet ble lite informativt. I vakuemet mellom et liberalt og et restriktivt

volumestimat sto sannsynlighetstilnærmingen fram som en overkommelig metode for et mer realistisk volumestimat. Utregning av Student t-verdier kan kalkuleres direkte i ArcMap med raster kalkulator. Deretter må alle pikselverdiene eksporteres i tabell-format for å omgjøre verdiene til sannsynligheter i Excel. I statistikken finnes ikke negative sannsynligheter. Her er det valgt å skille mellom sannsynlighet for negative og positive overflateendringer. Ved å konvertere sannsynligheten til negative endringer til negative sannsynlighetsverdier. Dette gir et informativt kart over sannsynlighet for at endringen er reell i hver piksel. Det vil si at negative verdier for sannsynlighet kun har den funksjon at det skal illustrere sannsynligheten for erosjon, og de positive er for pålagring. Derfor er det viktig å ta vare på de positive sannsynlighetsverdiene for negative overflateendringer når man videre skal relatere sannsynligheten for at endringen er reell i til differansekartet. Med denne framgangsmåten står man igjen med et kart som illustrerer differanser med økt realisme, og som man kan benytte til å kalkulere overflateendring med volumetrisk tilnærming.

7.2.2.4 Prosessering og kunnskapskrav

Alt i alt er prosesseringen det mest tidkrevende arbeidet. Feltarbeidet for hver av modellene tar en dag, og det finnes konkrete retningslinjer å forholde seg til. Prosesseringen er derimot vanskeligere. Det finnes ingen fastsatte rammeverk på hvordan dataene skal behandles. Man bør ha inngående kunnskap om terrengmodeller og GIS-programmer, samt gjeldende praksis for håndtering av feil i terrengmodellene. Erfaring viser at det gjelder å sette seg godt inn i programvaren man benytter og prøve seg fram før man setter i gang med prosesseringen. Det tas ingen skade å være nøyaktig, og det danner grunnlaget for god modellering.

Framgangsmåten i PhotoScan og differensieringen av SfM- og LiDAR-modell har på mange måter vært preget av prøving og feiling for å finne en framgangsmåte som er kapabel til å utføre det som ønskes. Man kan hente inspirasjon fra det andre har gjort, men prosesseringsarbeidet preges av selvstendige valg, og det er opp til en selv å finne ut av hvordan man skal løse oppgaven.

7.2.3 De resulterende modellene

Kvaliteten til en terrengmodell avhenger av kvaliteten på de individuelle datapunktene innad overflaten, tettheten av datapunkter som benyttes til å representere overflaten og distribusjonen av datapunkter innad overflaten. Det vil si at høytetthetspunkttskyene har mye å si for resulterende terrengmodell. Som vi ser i figur 6 er det forskjell på de to SfM-genererte punkttskyene. Modellen fra 24.09 har henholdsvis 14 millioner punkter, og modellen fra 11.11 har 33 millioner punkter. Det vil si at det er en relativ kvalitetsforskjell mellom de to

modellene. Modellen fra 11.11 har langt bedre tetthet og distribusjon i datapunktene. Modellen fra 24.09 har relativt god tetthet og distribusjon i de nedre delene av studieområdet, men det tynnes ut jo lengre opp i skredsåret man kommer. Påliteligheten til modellen fra 11.11 er derfor høy, og representerer hvor god modelleringen kan bli dersom man gjør alt riktig i feltarbeid og prosessering.

I figur 17 kan vi se resultatene fra differensieringen mellom LiDAR og SfM. Det første man legger merke til er at de fleste differansene er positive. Mange av de største negative verdiene befinner seg langs kanten av skredsåret, langs kanten av skyggeområdet (der laser og SfM ikke klarte å modellere ordentlig) og lengst til venstre av modellen. De største positive verdiene befinner seg til høyre i modellen. Dette indikerer en liten skjevhet mellom modellene. Allikevel er de største differansene der man forventer å finne dem, og bortsett fra dette er kartet dominert av verdier i rekkevidden 0,001 m – 0,024 m.

Kart A) i figur 18 har litt den samme tendensen som i LiDAR SfM- differensieringen. De største positive differansene befinner seg langs kanten til høyre i modellen. De største negative verdiene er her i den øverste delen og følger renna ned mot elva. Dette stemmer overens med det mønsteret man forventer i avrenning for skredet. For sannsynlighetskartet C) i figur 18 ser vi at mønsteret blir annerledes. De små verdiene har fått sterkere vektning enn de høye, noe som vil si at det er større sannsynlighet for at disse verdiene er reelle. Resultatet av vektningen finner man i figur 20. Dette kartet er klart dominert av blått, som vil si negativ endring, i midten og til venstre i skredsåret. Til høyre i skredet er det dominerende positive verdier, selv om verdiene nå er langt mindre enn før vektningen. Andelen nøytrale verdier er mindre dominerende enn i kart A).

7.3 Structure-from-Motion sammenlignet med LiDAR

7.3.1 Differansemodeller

Terrengmodellen fra 24.09.15 har residual-verdier, hentet fra AgiSoft PhotoScan, som viser 0,209 m i x, 0,132 m i y og 0,057 m i z. Den posisjonelle feilen i x og y er relativt stor med tanke på at GPS-målingene skal ha en rapportert nøyaktighet på 0,02 m. Uansett er residual-verdien til z mye mindre enn x og y. Noe som tyder på at høydereferansene i modellen er av bedre kvalitet enn de horisontale. Feilen i z kan være på grunn av manglende definert senter i kontrollpunktene. De relativt store avvikene mellom GPS-punkter og modellen kan også ha sitt opphav i at studieområdet er ganske stort. CloudCompare vil uansett justere de to terrengoverflatene til hverandre før differensieringen. Dermed vil eventuelle posisjonelle feil

fra referering fjernes, og differensieringen analyserer geometriske forskjeller mellom de to modellene i et lokalt, justert, koordinatsystem. I analysen av differanser mellom SfM- og LiDAR-modellene er verdier som befinner seg utenfor to standardavvik fra gjennomsnittet fjernet. Verdier utenfor dette blir regnet som støy, og upålitelige punkter. Statistikk fra figur 17 er illustrert i tabell 3.

Tabell 3: Spredningsmålene fra SfM-LiDAR-differensieringen. Verdier utenfor to standardavvik er fjernet fra datamaterialet.

Statistikk	DEM _{SfM} - DEM _{LiDAR}
Gjennomsnitt	0,013 m
Standardavvik	0,023 m
Minimumsdifferanse	-0,088 m
Maksimumsdifferane	0,106 m
Antall avvik (punkter utenfor to standardavvik)	2,37 %
Antall piksler	44448

Fra tabellen ser vi at snittdifferansen mellom terrengmodellene er relativt lav, bare 1,3 cm. Standardavviket vurderes som lavt, kun 2,3 cm. 97,63 % av verdiene befinner seg mellom -8,8 cm og +10,6 cm noe som er meget bra. Av de resulterende verdiene befinner 62,74 % av differansene (ett standardavvik fra snittet) seg innenfor -1 cm og +3,6 cm. Skanneren brukt til å innhente lasermodellen er forventet å ha en nøyaktighet på 8 mm, og snittavviket er litt under det dobbelte av dette. Alt i alt viser resultatene at SfM har evnen til å rekonstruere studieområdet med meget høy kvalitet.

7.3.2 Resultat sammenlignet med andre studier

I studien av erosjon i et elveleie har Prosdocimi et al. (2015) sammenlignet SfM med LiDAR. Studieområdet er mindre enn Storskredet, og avstanden mellom kamera og objekt er mye kortere. I studien var avstanden på rundt 7 meter mot rundt 70 meter for Storskredet. I tillegg var kontrollpunktene for SfM og laserskanningen de samme. Rapporterte spredningsmål var; gjennomsnitt 0,031 m(etter å ha fjernet avvikende punkter), standardavvik 0,034 m(etter å ha fjernet avvikende punkter), minimum -0,534 m, maksimum 0,501 m og antall piksler 10116

(Prosdocimi et al., 2015). Snittavviket er dårligere enn oppnådd for Storskredet, og både standardavvik, samt minimum og maksimum verdier er langt dårligere. Største observerte differanse mellom LiDAR og SfM for Storskredet var -0,811 m. I modellen fra Storskredet er minimum- og maksimumsverdiene mindre enn fra i studien av elveleiet, og spredningen på differansene er langt bedre.

Sammenligning mellom SfM og LiDAR av den kystnære klippen fant at 94 % av dataene falt innenfor ± 1 m, og 86% mellom $\pm 0,5$ m. En hypotese var at de største differanseverdiene plasserte seg i områder med høy gradient, og at lange avstander mellom kameraposisjon og objekt delvis har skylden i dette. Det ble også funnet at 100 % av differanseverdiene i vegetasjonsfrie områder falt innenfor $\pm 0,5$ m, og 61 % av verdiene var innenfor $\pm 0,1$ m (Westoby et al., 2012). Storskredet har ikke signifikant innhold av vegetasjon, derfor er funnene fra de vegetasjonsfrie områdene mest sammenlignbare. Differansene plasserer seg langt bedre enn oppnådd for kystklippen.

Hughenoltz et al. (2013) benytter et ubemannet flyvende system som kartlegger et relativt stort område i Canada. Differensiering mellom de to terrengmodellene viser at snittavvikene måler seg til 0,07 m med et standardavvik på 0,51 m, hvor 80% av verdiene fra stabile områder har en vertikal differanse under 0,3 m. Denne studien belager seg på større avstand mellom overflate og utstyret bruk til å hente informasjonen, og flyhøyden er oppgitt til å være 200 m. Resultatene viser at modellen fra Storskredet er langt bedre enn oppnådd her.

SfM ble testet mot LiDAR på to testområder på 1 m^2 og 5 m^2 med 30 og 90 bilder i et pukkverk (Kaiser et al., 2014). Oppløsningen på differansemodellene ble valgt til 1 cm. Minimumsgrense for geomorfologisk endringsoppdagelse ble satt til å være 1 cm. De to overflatene ble referert til hverandre i CloudCompare og kuttet til sammenfallende omriss. Resultatene fra differensieringen mellom LiDAR og SfM (6 totalt) viser gjennomsnittsavstander på -0,01 cm til -0,32 cm med standardavvik fra 0,77 cm til 1,26 cm og minimum- og maksimumsverdier mellom -8,72 cm og +5,91 cm (Kaiser et al., 2014). De gode resultatene kan tilskrives et lite test-område og korte distanser mellom utstyr og studieobjekt. Selv om gjennomsnittsverdiene og standardavvik er langt mindre enn det oppnådd i Storskredet, er minimum- og maksimumsdifferansen svært nære de oppnådd for Storskredet.

7.3.3 SfM som modelleringsverktøy

Differensieringen mellom LiDAR og SfM fra Storskredet viser at metoden egner seg godt som modelleringsverktøy for skredoverflater. Sammenlignet med andre studier viser differansene at spredningsmålene i SfM-modellen langt på vei er av bemerkelsesverdig høy kvalitet. SfM er kapabel til å produsere en overflate som plasserer 97,63 % av verdiene innenfor -8,8 cm og +10,6 cm fra en LiDAR-punktsky. Dette gjør at SfM er egnet som metode for modellere terrengoverflater.

Allikevel er det noen punkter som må adresseres. Ved direkte sammenligning av de to overflatene i ArcGIS ville resultatet vært annerledes. CloudCompare justerer de to overflatene til hverandre med en algoritme som sørger for optimal overlapp mellom de to modellene. Når man importerer de to modellene, ligger de ikke like tett som når man foretar differensieringen. Det vil si at programmet eliminerer eventuelle forskjeller fra refereringen med GPS-punkter. En transformasjonsmatrise viser at programmet har manipulert dataene som skal sammenlignes. Det vil si at når man registrerer modellene velger man en av modellene som «sann» overflate, i dette tilfellet vil det være LiDAR-punktskyen. Allikevel gjør dette oss i stand til å analysere SfMs evne til å rekonstruere overflaten ved å gjennomføre en «best fit» analyse. Denne analysen er avhengig av at laserdataene har god kvalitet. Dersom laserdataene ikke er av tilstrekkelig kvalitet, vil analysen være ubrukelig. Uansett er laserdata målte data og SfM er beregnede data. Disse resultatene tyder på at SfMs evne til å rekonstruere skredoverflaten er tilstrekkelig til å fange opp endringer. Jo større endringene er, jo større sannsynlighet er det for at de er reelle. Men også små endringer bør være mulig å oppdage med denne metoden.

7.4 Structure-from-Motion som metode for geomorfologisk endringsundersøkelse

7.4.1 Sammenligning med andre studier

I motsetning til andre lignende studier har det blitt valgt å benytte et mindre antall bilder for å få ned tidsbruken i prosesseringsdelen. Det viktigste verktøyet man har for å sammenligne med andre SfM-modeller referert med GPS-målte kontrollpunkter er residualene fra transformasjonen mellom relativt til absolutt koordinatsystem. For terrengmodellen produsert 24.9.15 er parameterne for xyz-verdiene 0,105 m, 0,115 m og 0,057 m respektivt. For 11.11.15 er verdiene 0,076m, 0,116 m og 0,06 m. Den posisjonelle feilen for z-verdiene er mindre enn for x og y. Spørsmålet videre er om dette kan relateres til transformasjonsresidualene i andre lignende studier.

Kaiser et al. (2014) benyttet ikke GPS til å referere modellene sine. Ved å benytte objekter av kjent størrelse for senere å måle disse og bruke en faktor av forholdet mellom modell og målte lengder, ble metoden validert som egnet til å kartlegge geomorfologisk endring. Dette skiller seg fra andre studier, hvor alle støtter seg til tradisjonelle målingsmetoder for å referere modellene sine.

Prosdocimi et al. (2015) oppnådde residualer på 0,015 m, 0,0081 og 0,005 for x, y og z respektivt. Dette er mye lavere verdier enn oppnådd i Storskredet. Det er forskjeller mellom Storskredet og elvebanken. Avstand spiller helt klart en stor rolle. Prosdocimi et al. (2015) hadde en avstand på 7 meter fra studieobjektet, langs Vekve var avstanden til punktet lengst unna drøyt 70 meter.

For de luftbårne undersøkelsene hadde Hugenholtz et al. (2013) 0,18 m horisontalt og 0,29 m vertikalt, og Nolan et al. (2015) -0,13 m, -0,34 m og 0,13 m. De horisontale verdiene for transformasjonene er i samme størrelsesorden som fra Storskredet, og den vertikale er markant bedre enn disse to studiene. Hugenholtz et al. (2013) hadde en flyhøyde på 200 meter, og som kan være forklaringen på høyere residualer. Nolan et al. (2015) benyttet også PhotoScan i modelleringsdelen, og oppnådde gode resultater i kartlegging av mer sofistikert art enn modelleringen av Storskredet som er et godt tegn.

Den av de fremhevede studiene som ligner mest på modelleringen av Storskredet er Westoby et al. (2012) modellering av Constitution Hill i Wales. Fra transformasjonen av SfM-punktskyene var residualene 0,124 m, 0,058 m og 0,031 m i gjennomsnitt. Disse transformasjonsresidualene er meget like fra modelleringen av Storskredet. At denne studien har litt mindre residualer kan ha sin forklaring i at det ble benyttet større kontrollpunkter med bedre kontrast og med definert senter. Dette gjør det enklere å sette referansepunktene nøyaktig. Westoby et al. (2012) trekker også fram at den ferdige høytetthetspunktskyen har 11 300 000 punkter, et antall som kan sammenlignes med antall punkter fra laserskann. Modelleringen av Storskredet ga høytetthetspunktskyer på 14 300 000 og 33 500 000 for september- og november-modellen respektivt. Laserfila benyttet for sammenligning i denne studien var på 398026 innenfor studieområdet. Tettheten av punkter for SfM-skyene var derfor langt større enn den ferdigprosesserte LiDAR-skyen.

Det massive antall punkter i høytetthetspunktskyen kombinert med tekstur fra bildene gjør at man kan identifisere steiner og strukturer på en tilfredsstillende måte. Figur 21 illustrerer detaljnivået til punktskyen fra 11.11.15. Men som vi ser er det enkelte områder som mangler

punkter totalt, dette er fordi de blir offer for skyggeområder hvor PhotoScan ikke har klart å modellere punkter.



Figur 21: Skjermdump av høytetthetspunkttskyen fra november. Med dette detaljnivået kan man identifisere individuelle steiner, strukturer og kontrollpunktene.

Fra transformasjonsresidualene basert på GPS-kontrollpunkter plasserer modelleringen av Storskredet seg mellom kvalitetene oppnådd av de luftbårne studiene og studien av den kystnære klippen i Wales. Antallet punkter i modellen er langt høyere enn i Westoby et al. (2012), og er på høyde med punktsky generert av laser og med et detaljnivå som er svært overbevisende.

På bakgrunn av dette kan det slås fast at modellen er tilstrekkelig for å modellere geomorfologisk endring.

7.4.2 Differansen mellom SfM-terrengmodellene

For å fjerne utliggere i datasettet ble verdier utenfor 2 standardavvik på begge sider av skalaen ekskludert. Kun 3,83 % av differanseverdiene lå utenfor dette. Dette ga en differansemodell med 319201 piksler. 96,17 % av differansene er innenfor intervallet -0,186 m – 0,206 m. Fordi feltarbeidene var tett på hverandre, var det ikke forventet store endringene. Det er begrenset hva man kan forvente av geomorfologisk endring på halvannen måned uten at det

inntreffer en større hendelse. Som man ser i kart A) i figur 18 er de største differansene langs kanten av studieområdet, og lengst unna kameraposisjonene. Når man jobber med terrengmodeller og geomorfologiske endringer kommer man ikke unna at det finnes svakheter i metoden. Dette er viktig for å skille mellom faktiske høydeendringer og tilfeldige avvik. Tilnærmingen til de metodiske feilene var å bruke transformasjonsresidualene i z-verdier med en sannsynlighetvurdering, fremhevet som eksisterende tilnærming til feil forbundet med terrengmodeller i Wheaton et al. (2010). Denne tilnærming var gjennomførbar, og forståelig. δU_{DoD} ble kalkulert til 8,3 cm, som vil si at endringer under 8,3 cm vil bli forkastet og behandlet som ugyldige. Problemet da er at mye data vil forsvinne. Med standardavvik på 0,047 m for differansedataene blir over 90 % av differansene satt som ugyldige, noe som er en ufornuftig tilnærming til problemet. Dessuten er det urealistisk at kun små differanser behandles som ugyldige. Derfor ble det kalkulert Student t-distibusjon for differansene, og disse verdiene omgjort til sannsynlighet for at endringene i hver piksel er reell. Som det kommer fram i kart C) i figur 18 er det de områdene med små differanser som har størst vektning med tanke på sannsynligheten. Store endringer blir vektet lavere, basert på distibusjonen i datasettet. Når sannsynligheten så relateres til differansene får man et datasett som ikke lengre er normalfordelt, og som har vesentlig reduserte differanser. Som man ser i figur 20 er det romlige mønsteret i differanser relativt likt det opprinnelige i figur 18 kart A), men variasjonsbredden i dataene er nå -0,029 m – 0,030 m.

Volumetrisk estimat av erosjon uten å gå inn på feilene innad i modellene gir minus 40 kubikk. Dette er et ganske høyt estimat og 40 kubikk er urealistisk mye i den tidsperioden feltarbeidene ble utført. Hvis man setter en $_{min}LoD$ vil mye av dataene forsvinne og gi et i overkant restriktivt estimat. Når det er tatt høyde for sannsynligheten basert på iboende feil i de to modellene blir estimatet -4 m^3 . Dette illustrerer hvor misvisende differensiering og volumkalkulasjon blir dersom man ikke tar høyde for at det finnes unøyaktighet i modellene. Den metodiske utviklingen er i fremgang, og som fremhevet av Wheaton et al. (2010) vil bruk av to nye metoder kunne gi enda mer robuste og romlige variable estimeringer av terrengmodellens unøyaktigheter, og på den måten gi mer plausible og meningsfulle estimater av geomorfologisk endring. De to nye metodene ble ikke tatt i bruk her, da dette er utenfor forfatterens kapasitet rent teknisk. Allikevel vil denne metodiske framgangen gi mer realistiske volumestimer enn ikke å ta høyde for iboende feil, eller kun å sette en $_{min}LoD$.

7.5 Arbeidets kompleksitet

SfM er egnet til å rekonstruere overflater med imponerende detaljnivå. Det er vist her at ved å bruke i underkant av 60 bilder, er det mulig å oppnå kvalitet som kan sammenlignes med LiDAR-genererte punktskyer. Modellene er kapable til å visualisere komplekse overflater med svært høy detaljrikdom. Det er viktig at feltarbeidet gjennomføres på en god måte, da det er datagrunnlaget som danner fundamentet for modellering av høy kvalitet. Dersom man er nøye på å eksponere studieobjektet godt, samt sørger for å ha jevne lysforhold vil resultatet bli bra. Allikevel er det slik at når man skal differensiere to modeller, er man avhengig av at refereringen er tilstrekkelig. Dette er et svakt punkt, da man er avhengig å få best mulig kontrollpunkter til transformasjonen. GPS-bruk er i prinsippet enkelt, men det er en klar fordel å ha praktisk og teoretisk erfaring med målingsarbeid for best mulig resultat. Dette medfører at ikke enhver person kan gjennomføre feltarbeidet selvstendig. Selve bildefangsten er noe alle kan gjennomføre, bare man passer på å ha tilstrekkelig med kameraposisjoner til å løse bildegjenkjenningialgoritmene. Som utrent personell er det vanskelig å si noe om kvaliteten til GPS-punktene man måler inn, og om man er flink nok til å måle nøyaktig. For best mulig transformasjon fra relativt til absolutt koordinatsystem kreves det at punktene man måler inn er av tilstrekkelig kvalitet. Dessuten vil geometrien i SfM-modellen endres etter GPS-punktene. Dersom man har store avvik i referansepunktene vil dette påvirke den resulterende modellen direkte. I landmålingsarbeid er det vanlig å dele inn datainnsamlingen i kvalitetskoder. Det vil si at laserskanning, GPS, nivellement eller totalstasjon har egne kvalitetskoder som gir informasjon til brukeren om hva slags kvalitet man kan forvente. Dette mangler for Structure-from-Motion. Det ville vært av stor betydning for bruken at man etablerer en slik kvalitetskode. På denne måten kan man vite anslagsvis hvor nøyaktige resultater man kan forvente seg. Da kan man på forhånd avgjøre hva slags kvalitet som ønskes, for så å bestemme metoden som er best egnet til å oppfylle kravet. Kaiser et al. (2014) framgangsmåte er derfor verdt å fremheve. Vi er klar over feilkildene assosiert med å benytte GPS til å måle inn punkter. Det finnes ingen krav om at terrengmodellen må være referert i et absolutt koordinatsystem så lenge den relative geometrien stemmer overens med virkeligheten. Ved å måle objekter av kjent størrelse i studieområdet kan man eliminere feilkilder assosiert med GPS-målingsfeil. Målingsfeilen vil da belage seg på hvor nøyaktig man måler disse objektene. Denne typen manuell måling av lengder på kjente objekter bør resultere i avvik langt under GPS-relaterte målingsfeil, og kan være en framgangsmåte kapabel til å produsere modeller med mindre feilmarginer. På denne måten vil man også få mindre $\min\text{LoD}$, som vil gjøre sediment-budsjettet mer nøyaktig og mindre av dataene går tapt

som følge av usikkerhet i terrengmodellene. Selv om referanseeksperimentet er av relativt liten skala er dette studien med de minste avvikene mellom LiDAR og SfM, noe som tyder på at dersom geometrien er av riktig størrelsesorden vil man være kapabel til å produsere terrengmodeller med svært høy nøyaktighet.

I bearbeidningen av data er det en fordel å ha kunnskap om egnede programvarer og manipulasjon av geografiske data. Fremgangsmåten for SfM-modellering er i stor grad selvforklarende, og programvaren gjør mesteparten av arbeidet. Allikevel må man påregne å bruke tid på manuell fjerning av punkter som ikke stemmer overens med overflaten. Det gjelder å gjøre seg flid og være nøye for å oppnå best mulig resultat. Brukeren bør ha evne til å ta visuelle avgjørelser. For eksempel er det viktig å velge bilder med likest mulig lyssetting, samt skille støy fra punktskyen. Prosessene og verktøyene i programvaren er enkle å sette seg inn i, men for mest effektiv modellering bør man ha et sett med basisprinsipper. Erfaring herfra viser at dersom man har bildesett med varierende lysforhold, vil programmet slite med å rekonstruere overflaten godt nok. Det er heller ikke nødvendig å benytte flere hundre bilder. Dersom man følger prinsippene om jevne lysforhold, god eksponering og godt distribuerte kameraposisjoner kan man med i underkant av 60 bilder produsere en terrengmodell av høy kvalitet på rundt 4 timer, hvor brorparten av tidsbruken er i ren prosessering. Brukeren er fri til å gjøre andre ting i prosessperioden, noe som gjør metoden enda mer effektiv.

Differensieringen av LiDAR og SfM i CloudCompare er en rask og enkel prosess dersom man har kjennskap til programmets filformater og verktøy. Tidsbruken i dette programmet er minimal, og man har et eksporterbart resultat på få minutter. En klar fordel med dette programmet er at man fjerner eventuelle feil i GPS-refereringen og sammenligner overflatene rent geometrisk. Man kan dermed analysere SfMs evne til å rekonstruere overflater konkret, uten å måtte ta høyde for eventuelle målingsfeil. Det er her vist at SfM er kapabel til å produsere terrengoverflater av kvalitet sammenlignbar med LiDAR, og dette fra et bildesett på underkant av 60 bilder.

Dersom man har kjennskap til GIS-programmer og rasterdata, er manipulasjon og ferdigstilling en enkel prosess. Man må ha en klar plan på hva man ønsker å produsere og hvordan man skal visualisere det. Fra terrengmodeller til ferdig differansemodell er en rask prosess. Dersom man har opparbeidet rutine burde man være i stand til å modellere og ferdigstille dataene på en arbeidsdag, som vist i tabell 1. Dette gjør metoden effektiv og brukervennlig. Her er det benyttet effektive og gode programvarer, og disse programmene

medfører en finansiell investering som bidrar til økt kostnad. Det burde merkes at det skal være mulig å gjennomføre alle ledd i Open Source-verktøy, noe som gjør tilgjengeligheten enda større. Programmene brukt her er allikevel sømløse og brukervennlige, noe som senker kunnskapskravet og gjør arbeidet enklere. Kostnaden er likevel langt unna LiDAR-teknologien. Når man skal kalkulere geomorfologisk endring er det viktig å ta høyde for feil i overflatene, og manipulere resultatene deretter. Prosessen brukt her var av det enkle slaget, og behøver ingen sofistikerte spesialverktøy. Dersom man skal benytte seg av verktøyene som Wheaton et al. (2010) legger fram burde man ha høye GIS-ferdigheter og god innsikt. Det skal være mulig å produsere en god differensiering, og med gode volumetriske estimeringer ved å benytte seg av framgangsmåten presentert i denne oppgaven.

Alt i alt er SfM en spennende metode som gjør undersøkelser av geomorfologisk endring enklere og mer tilgjengelig for studenter og forskere. Der det før trengtes sofistikert utstyr i millionklassen, kan man nå ta med seg et kamera og knipse løs. Allikevel er det en fordel å ha kjennskap til GPS-måling i felt, terrengmodeller og GIS-programmer for å kunne bearbeide dataene. Dersom man har dette på plass vil SfM være en meget enkel framgangsmåte for å innhente data i felt, prosessere og ferdigstille geografiske data av høy kvalitet.

7.6 Veien videre for SfM i geomorfologisk endringsundersøkelse

Gjennom dette arbeidet har det kommet noen spørsmål som er verdt å ta videre, ikke minst for å videreutvikle metodens egenskaper og kapabilitet. I dette arbeidet er det tatt en del absolutte valg. For eksempel er det valgt å benytte få bilder, men som har god eksponering og distribusjon. Det hadde vært interessant å undersøke hvordan parametervalg og bildemengde påvirker det endelige resultatet. Dette kunne vært passende for en bacheloroppgave. Modellering av skredet med samme bildesett men ulike parametervalg for kvaliteten, samt større bildesett og ulike kvalitetsparametere.

Som nevnt tidligere er studien til Kaiser av stor interesse. Dette er fordi det lanseres en metode for å eliminere målingsfeilen assosiert med å benytte GPS. Her er sannsynligheten stor for at geomorfologisk endringsundersøkelse kan bli enda mer nøyaktig. Dette burde følges opp. En studie hvor man sammenligner LiDAR-punktsky med en GPS-referert SfM mesh og en SfM mesh som er skalert med kjente objekter ville være av stor verdi. Potensielt vil dette gjøre metoden enda mer tilgjengelig og enda mindre utstyrskrevenende, da man kan kutte kostnaden ytterligere ved å droppe GPS.

Det ville også være av stor verdi å få på plass et rammeverk som sikrer at modellene blir gode. Ett sett med kriterier som må oppfylles i både feltarbeid og modelleringen. På den måten vil det være enklere for personell uansett bakgrunn å benytte metoden, fordi rammeverket for god modellering er godt beskrevet og dokumentert.

Noe som burde vært gjort i denne oppgaven sett i ettertid, men som ikke ble mulig var å få til en differensiering av både SfM og LiDAR for så å sammenligne volumendringene opp mot hverandre. Dette vil gi en god pekepinn på kvaliteten i SfM-terrengmodeller som verktøy i geomorfologisk endringsundersøkelse, og kunne gitt informasjon om hvor mye informasjon som eventuelt blir borte fra volumkalkulasjonen ved å benytte SfM framfor LiDAR.

8. Konklusjon

SfM har blitt trukket fram som et alternativ til den mer etablerte LiDAR tilnærmingen i geomorfologisk endringsundersøkelser. Metoden er sagt å være rask, billig og enkel å benytte. Det er hevet over enhver tvil at metoden er relativt rask og billig. Spørsmålet er om den er enkel og kan benyttes av de fleste. Derfor har denne oppgaven omhandlet validering av SfM-generert overflate mot LiDAR, kalkulasjon av geomorfologisk endring, og samtidig søkt å finne om metoden egner seg for personell uten geomatikk-bakgrunn.

Undersøkelsen av resultatene for LiDAR-SfM-differensieringen er veldig gode. 97,63 % av differansene ble funnet til å være mellom -8,8 cm og +10,6 cm. Dette viser at SfM er kapabel til å produsere høykvalitets terrengmodeller, som visualiserer komplekse strukturer helt på høyde med LiDAR-teknologi. Resultatene er svært gode sammenlignet med andre lignende studier, noe som bygger under argumentet om at SfM er en egnet metode for geomorfologisk forskning.

De to SfM-modellene ble differensiert for å gjennomføre volumetrisk kalkulasjon av den geomorfologiske endringen mellom september og november. Her kommer det fram at de to z-residualverdiene fra refereringen er ganske høye sammenlignet med andre studier, henholdsvis 0,057 og 0,06 m. Dette medfører at volumestimatet blir mer restriktivt som følge av at man må sette en høy δU_{DoD} . For bedre resultater måtte man ha vært mer nøyaktig i innhenting av GPS-punktene. Allikevel viser differensieringen at 96,17 % av verdiene faller innenfor -0,186 m og +0,206 m, med en $\min LoD$ på 8,3 cm. Volumestimatet, etter at differansene ble vektet med en sannsynlighetstilnærming, viser at det mellom september og november forsvant 4 kubikkmeter med masse fra Storskredet. Volumestimatet er på negativ side, noe som er i tråd med forventningen og er et realistisk estimat.

Så; er SfM en enkel metode å benytte? Resultatet av modelleringen av rundt 60 bilder med prosesseringstid på cirka 4 timer fra 11.11 kan ikke beskrives med annet enn imponerende. Evnen til å rekonstruere med høyt nivå av naturtro kompleksitet viser hvordan teknologien åpner for større tilgjengelighet i analysealternativer. Som nevnt over medfører GPS en feilkilde i arbeidet, samt et økt kunnskapskrav fordi GPS ikke uten videre er enkelt å bruke dersom man ikke har kjennskap til utstyret. Den resulterende modellen er også sterkt avhengig av kvalitet i GPS-målingene. I bearbeidingsprosessen burde man ha kjennskap til 3D-formatet og tilgjengelige programvarer, samt GIS. Bortsett fra dette er det veldig enkelt å sette seg inn i metoden, og er langt mindre kunnskapskrevende enn andre metoder. For

eksempel kreves det en annen innsikt og tidsbruk i fotogrammetri når man benytter digital fotogrammetrisk arbeidsstasjon. SfM representerer, som illustrert i denne oppgaven, en billig og tilgjengelig framgangsmåte for innhenting av høyoppløselige terrengdata, og er absolutt et billig, raskt og enklere alternativ godt egnet til volumetriske estimater av geomorfologisk endring.

9. Litteraturliste

9.1 Artikler og bøker

- Church, M., Zimmerman, A., 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research* 43.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms* 38:421-30.
- Grønvold, C., 2015. Structure-from-Motion og LiDAR; hvilken metode er best egnet i skredvolumestimering. Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet.
- Heritage, G.L., Milan, D.J., Large, A.R.G., Fuller, I.C., 2009. Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112:334-44.
- Hugenholtz, C.H., Whitehead, K., Brown, O.W., Barchyn, T.E., Moorman, B.J., LeClair, A., Riddell, K., Hamilton, T., 2013. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology* 194:16-24.
- Jones, A.F., Brewer, P.A., Johnstone, E., Macklin, M.G., 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms* 32:1574-92.
- Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., Schmidt, J., 2014. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex moroccan Gully morphology using structure from motion. *Remote Sensing* 6:7050-80.
- Nolan, M., Larsen, C., Sturm, M., 2015. Mapping snow depth from manned aircraft on landscape scales at centimeter resolution using structure-from-motion photogrammetry. *Cryosphere* 9:1445-63.
- Notebaert, B., Verstraeten, G., Govers, G., Poesen, J., 2009. Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* 34:217-31.
- Passalacqua, P., Hillier, J., Tarolli, P., 2014. Innovative analysis and use of high-resolution DTMs for quantitative interrogation of Earth-surface processes. *Earth Surface Processes and Landforms* 39:1400-03.
- Prodocimi, M., Calligaro, S., Sofia, G., Dalla Fontana, G., Tarolli, P., 2015. Bank erosion in agricultural drainage networks: New challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth Surface Processes and Landforms* 40:1891-906.

Rød, J.K., 2009. Verktøy for å beskrive verden. Statistikk, kart og bilder. Tapir Akademisk Forlag, Trondheim.

Snavely, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *International Journal of Computer Vision* 80:189-210.

Sofia, G., Fontana, G.D., Tarolli, P., 2014a. High-resolution topography and anthropogenic feature extraction: testing geomorphometric parameters in floodplains. *Hydrological Processes* 28:2046-61.

Sofia, G., Marinello, F., Tarolli, P., 2014b. A new landscape metric for the identification of terraced sites: The Slope Local Length of Auto-Correlation (SLLAC). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 96:123-33.

Tarolli, P., 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology* 216:295-312.

Tarolli, P., Sofia, G., Calligaro, S., Prosdociami, M., Preti, F., Dalla Fontana, G., 2015. Vineyards in Terraced Landscapes: New Opportunities from Lidar Data. *Land Degradation & Development* 26:92-102.

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179:300-14.

Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E., Sear, D.A., 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms* 35:136-56.

9.2 Internettkilder

Kartverket, 2009. Satellittbasert posisjonsbestemmelse, versjon 2.1. Geodesidivisjonen, Hønefoss. Hentet 20.04.15 fra

<http://www.kartverket.no/globalassets/standard/bransjestandarder-utover-sosi/satbaspossystemer.pdf>

Kartverket, 2013. GPS og GNSS. Hentet 20.04.15 fra

<http://www.kartverket.no/Kunnskap/Posisjon-og-navigasjon/GPS-og-GNSS/>

NGU, 1996. Grus til vegvedlikehold i foreslåtte verneområder på Dovrefjell. NGU rapport 96.099. Hentet 23.04.16 fra www.ngu.no/upload/publikasjoner/rapporter/1996/96_099.pdf

NGU, 2016. Kart for geologi og løsmasser. Hentet 23.04.16 fra geo.ngu.no/kart/berggrunn og geo.ngu.no/kart/losmasse

NVE Atlas, 2015. Karttjeneste fra NVE. Hentet 23.10.15 fra

<https://www.nve.no/karttjenester/kartlosninger/nve-atlas/>

Oppdal Kommune, 2016. Hjemmeside for Oppdal Kommune. Hentet 23.04.16 fra

<https://www.oppdal.kommune.no/>