




GEOLOGI FOR SAMFUNNET

SIDEN 1858



**NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE**
· NGU ·



Rapport nr.: 2015.064	ISSN: 0800-3416 (trykt) ISSN: 2387-3515 (online)	Gradering: Åpen	
Tittel: Overvåking av skred og andre skråningsprosesser med bakkebasert laserskanning			
Forfatter: T. Oppikofer		Oppdragsgiver: NIFS: naturfare - infrastruktur - flom - skred	
Fylke: -		Kommune: -	
Kartblad (M=1:250.000) -		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) -	
Forekomstens navn og koordinater: -		Sidetall: 71	Pris: kr. 285
		Kartbilag: 0	
Feltarbeid utført: 2012-2015	Rapportdato: 17.12.2015	Prosjektnr.: 350100	Sidemannskontroll: 
Sammendrag: <p>Dette er sluttrapporten til prosjektet om "Overvåking av skråninger med bakkebasert laserskanning" som er en del av etatsprosjektet NIFS (naturfare - infrastruktur - flom - skred). Prosjektets formål er å vise nytten av bakkebasert laserskanning for overvåking av bevegelser i skråninger, og legge til rette for at bakkebasert laserskanning blir til en mer vanlig metode for etatene i NIFS-prosjektet.</p> <p>Denne rapporten viser, gjennom gjentatte målinger i fem ulike testområder, mulige anvendelser av bakkebasert laserskanning for overvåking av skred og andre skråningsprosesser, både i fjell og løsmasser. Bakkebasert laserskanning er en aktiv fjernmålingsteknikk som samler inn topografiske data over et helt studieområde. De innmålte dataene gir en nøyaktig, tredimensjonal modell av jordens overflate. Sammenligning og beregning av forskjeller mellom skanninger fra ulike måletidspunkt muliggjør å oppdage skredhendelser (steinsprang, løsmasseskred), bevegelser av ustabile fjellpartier, og andre endringer i topografien. Den høyoppløselige punktskyen innmål av bakkebasert laserskanning bidrar også i skredkartleggingen og øker forståelsen av skredmekanismer og -prosesser.</p> <p>Eksempler vist i rapporten framhever bakkebasert laserskanning som en mangesidig teknikk for skredovervåking. Anvendelser som anses som teknisk modne omfatter lokalisering og kvantifisering av skredhendelser, måling av sprekkesett i en fjellvegg, geometrisk modelleringen av bruddflater som avgrenser et ustabil fjellparti, samt måling og detaljert analyse av større bevegelser (flere cm) i et ustabil fjellparti.</p> <p>Rapporten presenterer de viktigste lærdommene ved bruk av teknikken, og da særlig at stor avstand bør unngås. Andre viktige poeng er at punktavstand på 5 cm for bevegelsesmålinger og 10-15 cm for andre anvendelser er tilstrekkelig, at gjentatte laserskanninger bør utføres fra omtrent samme plassering, og at vegetasjon gir mange hull og skyggeområder i datasettet.</p> <p>Bruksmulighetene for teknikken for de ulike etatene involvert i NIFS-prosjektet er mangfoldige. Laserskanning er svært nyttig bl.a. for lokalisering og kvantifisering av skredhendelser, for skredfarekartlegging og for vurdering av bevegelser og skråningens stabilitet ved akutte skredhendelser, samt for overvåking og detaljerte analyser av ustabile fjellpartier. Mange av disse anvendelsene krever høyoppløselig terrenginformasjon før og etter en skredhendelse. Derfor anbefales det å satse på innsamling av bakkebaserte eller bil-/togbaserte laserskanningsdata av skredutsatte områder ovenfor bebyggelse og langs veier og jernbanespor, slik at det bygges opp et verdifullt datagrunnlag for analyser etter at et skred har skjedd.</p>			
Emneord: Skred	Bakkebasert laserskanning	Steinsprang	
Ustabil fjellparti	Jordskred	Bevegelsesmåling	
Overvåking	Volumberegning	Modellering	

INNHold

1. Innledning	7
2. Teknikk og analyseverktøy	9
2.1 Bakkebasert laserskanning teknikk.....	9
2.2 Arbeidsflyt for dataanalyse	11
2.3 Programvarer for analyse av bakkebaserte laserskannerdata.....	12
2.3.1 PolyWorks	12
2.3.2 Coltop3D	13
2.3.3 GlobalMapper.....	13
3. Gjeldende kunnskap.....	15
3.1 Kartlegging av skred og skråningsprosesser.....	15
3.2 Karakterisering av skråninger	15
3.3 Lokalisering og kvantifisering av skredhendelser	17
3.4 Bevegelsesmåling	17
3.5 Mobil laserskanning.....	20
4. Resultater fra utvalgte testområder	21
4.1 Svaddenipun.....	21
4.1.1 Datasett.....	23
4.1.2 Bevegelsesmålinger.....	23
4.1.3 Steinsprangsaktivitet	25
4.2 Lausefjellet.....	27
4.2.1 Datasett.....	27
4.2.2 Strukturanalyse.....	29
4.2.3 Geometrisk modellering av bruddflater	30
4.2.4 Bevegelsesmålinger.....	32
4.3 Mannen	34
4.3.1 Datasett.....	35
4.3.2 Bevegelsesmålinger.....	36
4.3.3 Steinsprangsaktivitet	38
4.4 Oppdølstranda	40
4.4.1 Datasett.....	40
4.4.2 Steinsprangsaktivitet i område A	43
4.4.3 Steinsprangsaktivitet i område B.....	43
4.4.4 Steinsprangsaktivitet i område C.....	44
4.4.5 Steinsprangsaktivitet i område D	47
4.5 Losna.....	48
4.5.1 Datasett.....	48
4.5.2 Skredaktivitet og menneskelig inngrep	51
5. Erfaringer fra testområdene	55
5.1 Fordeler med bakkebasert laserskanning for skredovervåking.....	56
5.2 Ulemper med bakkebasert laserskanning for skredovervåking	58
6. Bruksmuligheter i de ulike etatene	61
6.1 Felles bruksmuligheter.....	61
6.1.1 Bedre lokalisering og kvantifisering av skredhendelser.....	61
6.1.2 Vurdering av bevegelse og skråningens stabilitet ved akutte skredhendelser...62	

6.2 Norges vassdrags- og energidirektorat.....	62
6.2.1 Farekartlegging av skred i bratt terreng	62
6.2.2 Forbedret forståelse av skredprosesser og oppbygging av skredvifter.....	62
6.2.3 Overvåking av ustabile fjellpartier	62
6.2.4 Kartlegging av ustabile fjellpartier ved NGU	63
6.3 Statens vegvesen & Jernbaneverket.....	63
7. Oppsummering & Anbefalinger	65
Takksigelse.....	66
Referanser	67

1. INNLEDNING

Dette er sluttrapporten til prosjektet om "Overvåking av skråninger med bakkebasert laserskanning" ved Norges Geologiske Undersøkelse (NGU). Prosjektet er en del av etatsprosjektet NIFS (Naturfare – infrastruktur, flom og skred), et stort samarbeids- og forskingsprosjekt mellom de statlige etatene Jernbaneverket, Statens vegvesen (SVV) og Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). NGUs prosjekt om laserskanning inngår i delprosjekt "4.2 – Overvåking" av NIFS-prosjektet. Formålet med prosjektet er å vise nytten av bakkebasert laserskanning for overvåking av bevegelser i skråninger, og å gjøre bakkebasert laserskanning til en mer vanlig metode for de involverte etatene. Rapporten er derfor mest rettet mot fagfolk i de ulike etatene. Innholdet er allikevel holdt nok på et slikt nivå at personer uten tidligere kunnskap om laserskanning og overvåking av skred og andre skråningsprosesser kan forstå rapporten.

Norges geografiske, geologiske og klimatiske forhold byr mange utfordringer i forhold til skred og andre naturfarer. I den nasjonale skredhendelsesdatabasen er det registrert over 51.000 historiske hendelser langs veier, jernbanelinjer og i bebygde områder (skredatlas.nve.no). Nesten 2000 av disse hendelsene har ført til tap av menneskeliv. Totalt har nesten 4750 personer mistet livet i disse registrerte historiske skredhendelsene. Aktsomhetskartene for snøskred, steinsprang og jord- og flomskred viser områdene der slike skred kan løsne, samt hvilke områder kan nås (utløpsområder). Mer enn 100.000 mennesker bor eller oppholder seg innenfor disse aktsomhetsområdene og er derfor muligvis utsatt for skredhendelser (Devoli m.fl. 2011, Øydvin m.fl. 2011). Alt dette viser viktigheten av kartlegging, forebygging og overvåking av skred for å sikre befolkningen mot skredulykker. Samtidig er det også et stort behov for en bedre forståelse av skredprosesser.

Overvåking av skredutsatte områder i løsmasse- og fjellskråninger er svært krevende, blant annet på grunn av vanskelige og farlige terrengforhold, utilgjengelighet og størrelsen til mulige kildeområder. Derfor er *in situ* målinger bare mulig på noen få punkter i en skråning, og fjernmålingsteknikker er nødvendig for å oppdage bevegelser over en hel skredutsatt skråning.

Bakkebasert laserskanning er en fjernmålingsteknikk som samler inn topografiske data over et helt studieområde. Laserskanneren samler inn en punktsky av topografien, noe som kan forestilles som et veldig detaljert 3D-bilde av jordens overflate. Sammenligning mellom ulike måletidspunkter muliggjør beregning av forskjell mellom målingene. Dette kan brukes for skredovervåking av hele skråningen, både i fjell og løsmasser. Bakkebasert laserskanning kan også bidra i skredkartleggingen, og for å øke forståelsen av skredmekanismer og -prosesser gjennom en nøyaktig tredimensjonal modell av topografien.

Nytten av bakkebasert laserskanning for overvåking av bevegelser i skråninger er vist i denne rapporten gjennom flere eksempler fra fem testområder. Etter en teoridel om teknikk, analyseverktøy og gjeldende kunnskap i fagfeltet (kapitler 2 og 3), presenteres resultatene fra de ulike testområdene (kapittel 4). Testområdene dekker et bredt spekter av geologiske forhold (fjell, løsmasser) og ulike skredprosesser (steinsprang, løsmasseskred, bevegelser i ustabile fjellparti). Dermed gir rapporten en komplett oversikt over mulighetene bakkebasert laserskanning gir som overvåkingsteknikk, men også dens begrensinger (kapittel 5). Kapitlene 6 og 7 framhever hvordan teknikken kan brukes i de involverte etatene (Jernbaneverket, Statens vegvesen og NVE) og gir anbefalinger for videre arbeid med bakkebasert laserskanning.

2. TEKNIKK OG ANALYSEVERKTØY

2.1 Bakkebasert laserskanning teknikk

En bakkebasert laserskanner er et bærbart instrument for fjernmåling av topografi (Figur 1). I motsetning til mange andre overvåkingsteknikker (for eksempel totalstasjon, GPS eller ekstensometer), trenger bakkebasert laserskanning ingen reflektorer eller annen fastmontert instrumentering i det skredutsatte området. Dette er svært nyttig hvis området er utilgjengelig, for bratt eller for farlig. Videre måler bakkebasert laserskanning ikke bare enkle punkt, men dekker hele området. Dette er i likhet med bakkebaserte radarmålinger som også dekker store områder.

Laserskanning er en aktiv fjernmålingsteknikk, dvs. at instrumentet sender ut et signal og mottar det igjen. I en bakkebasert laserskanner er dette signalet en infrarød laserpuls som er sendt ut i en nøyaktig kjent retning (Figur 2). Pulsen blir reflektert eller tilbakespredt av topografien eller andre objekt i pulsens flybane (vegetasjon, bygninger osv.). Returpulsen blir mottatt av skanneren som beregner pulsens flytid tur/retur, Δt . Basert på flytiden og lysets hastighet, c , beregnes det avstanden, d , mellom skanneren og objektet:

$$d = c \cdot \Delta t / 2$$

Laserpulsene har en svært liten dispersjon, men diameteren av signalet øker med distanse, slik at laserens fotavtrykk kan være flere desimeter i stor avstand fra skanneren. Derfor kan flere objekter bli truffet i laserpulsens flybane, noe som vil føre til flere returpulser. Den første pulsen vil i slike tilfeller ofte representere vegetasjonen, mens den siste pulsen representerer topografien (Figur 2). Hvis vegetasjonen er for tett vil laserpulsene ikke nå topografien og retursignalet vil da bare representere vegetasjonen. Generelt måler laserskanneren kun det som er synlig (Figur 3). Områder gjemt bak andre objekter vil derfor ikke kunne måles inn. Det er viktig å nevne at flybasert laserskanning følger akkurat samme prinsipp for avstandsmåling og innmåling av flere returpulser, som bakkebasert laserskanning.

Rekkevidden av skanneren er bl.a. avhengig av laserens bølgelengde og laserens styrke, men også av overflatens beskaffenhet og reflektivitet. I dette prosjektet ble det brukt to ulike laserskannere, begge produsert av Optech Inc. i Canada (Optech 2015). Skanneren ILRIS-ER har en rekkevidde på omtrent 1,5 km og skanner cirka 2500 punkt pr. sekund (Figur 2b), mens skanneren ILRIS-LR oppnår gode resultater inntil 3,5 km distanse med cirka 10 000 punkt pr. sekund (Figur 2a). I tillegg klarer skanneren ILRIS-LR å måle topografien under våte forhold.

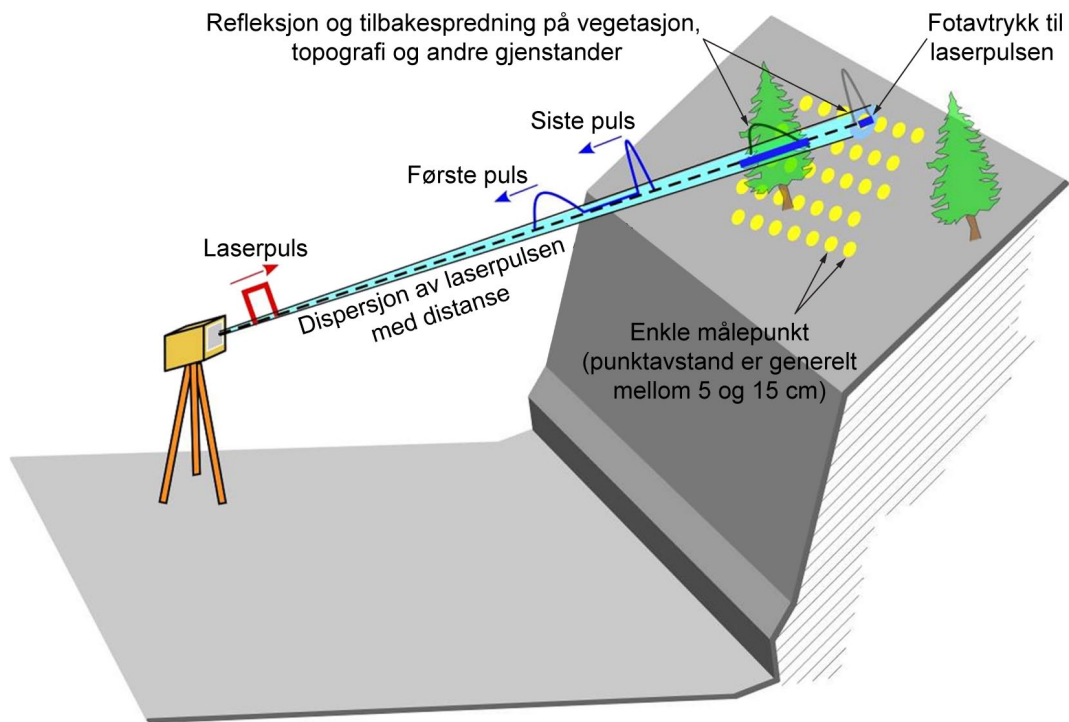


Bilde: T. Oppikofer

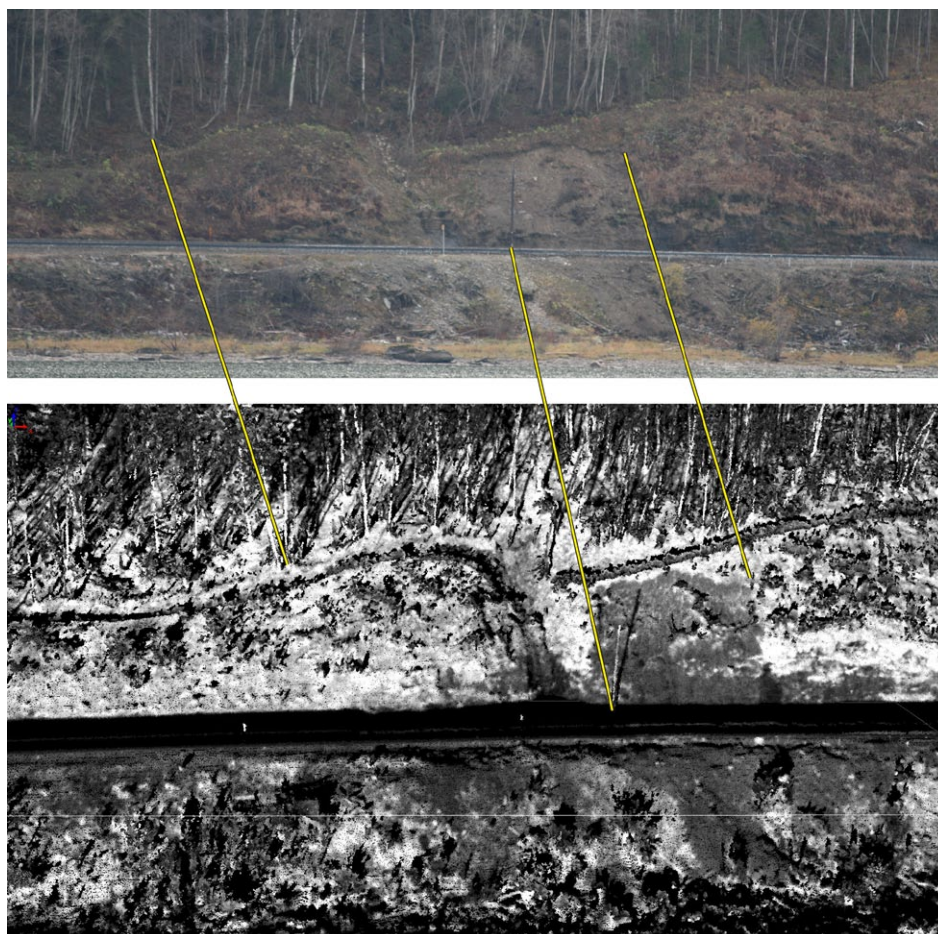


Bilde: L. Fischer, NGU

Figur 1: Bilder av bakkebaserte laserskannere i felt: a) langs innsjøen Losna i Ringebu kommune med jernbanespor på motsatt side; b) på foten av det ustabile fjellpartiet Lausefjellet i Askvoll kommune.



Figur 2: Funksjonsprinsipp for bakkebasert laserskanning: en laserpuls er sendt ut i en nøyaktig bestemt retning, blir tilbakespredt på topografien, vegetasjonen eller andre objekt og mottatt av skanneren. Størrelsen til laserpulsens fotavtrykk øker med distansen fra skanneren pga. dispersjon av laserpuls. Avstanden mellom enkle målepunkt er valgt av operatøren og er generelt bedre enn 15 cm (forandret fra Jaboyedoff m.fl. 2012).



Figur 3: Skjerm bilde av en rå punktsky fra bakkebasert laserskanning (under) og fotografi av samme område (over). Busker, trær og skilt langs jernbanesporet sør for Losna stasjon vises tydelig i punktskyen.

Ved å lede laserpulsene i ulike retninger måles det inn en punktsky av det skannede objektet (Figur 2, Figur 3). I laserskannere fra Optech Inc. gjøres dette ved hjelp av speil i skanneren, som med høy presisjon endrer retningen til laserpulsene. Oppløsningen til den resulterende punktskyen uttrykkes vanligvis som avstand mellom to nabopunkter i punktskyen (se Figur 2). Denne punktavstanden er avhengig av distansen, d , men også av vinkelforskjellen mellom to laserpulser. Denne vinkelforskjellen kan velges for hvert skann og brukeren kan dermed tilpasse skannet til ønsket bakkeoppløsning. I dette prosjektet er punktavstanden valgt generelt til mellom 5 og 15 cm, avhengig av formålet og størrelsen til studieområdet.

2.2 Arbeidsflyt for dataanalyse

En typisk arbeidsflyt for innsamling, prosessering og analyse av bakkebaserte laserskannerdata er vist i Figur 4. For å oppnå en 3D-modell som er så komplett som mulig, bør en samle inn bakkebaserte laserskannerdata fra ulike plasser og for ulike synsretninger (trinn 1). En ideell plassering av skanneren skal:

- gi en god oversikt over det skredutsatte området,
- tillate skanning av stabile områder rundt det skredutsatte området,
- ha minst mulig vegetasjon og andre gjenstander i synsfeltet, og
- være forholdsvis lett tilgjengelig med utstyret.

Etter en manuell fjerning av vegetasjon og andre uønskede punkt fra den rå punktskyen (trinn 2), må de ulike skannene settes sammen i et felles referansesystem (trinn 3). Denne samregistreringen skjer i en iterativ prosess som starter fra et manuelt utvalg av identiske punkter i forskjellige skann, etterfulgt av en automatisk algoritme (*Iterative Closest Point*, ICP algoritme) som minimerer avstanden mellom skannene. Dette fører til en sammensatt punktsky av studieområdet. Denne prosedyren for samregistrering gjøres både for skann fra samme tidspunkt, men også for skann fra ulike tidspunkt.

Etter samregistreringen kan punktskyen georefereres inn i et nasjonalt eller internasjonalt koordinatsystem (trinn 4), som for eksempel UTM 32N som er brukt i dette prosjektet. I dette prosjektet ble georeferering oppnådd gjennom en samregistrering av punktskyen med en eksisterende høydemodell. Alternativt kan det brukes flere kontrollpunkter med kjente koordinater som gjenfinnes i skannene.



Figur 4: Arbeidsflyt for innsamling og analyse av bakkebaserte laserskannerdata (basert på Conforti 2005, Oppikofer m.fl. 2012). Trinn 1-5 og 9 utføres på punktskyer fra samme måleår. Trinn 6-8 og 10 trenger flere målinger fra ulike år for å beregne forskjeller og volumer, og lage en geometrisk modell av bruddflatene som avgrensner et skred.

Den georefererte punktskyen kan deretter brukes for å lage en høyoppløselig terrengmodell eller overflatemodell av studieområdet (trinn 5). Punktskyen brukes også for å måle orienteringen av sprekker og andre geologiske strukturer i en fjellvegg (trinn 9). Dette gjøres enten gjennom en manuell tilpasning av flater i punktskyen, eller i en spesifikk programvare Coltop3D (se kapitler 2.3.2 og 3.2 for detaljer).

Forskjell mellom skann fra ulike måletidspunkt kan beregnes med ICP-algoritmen (trinn 6), som allerede ble brukt i samregistreringen. Algoritmen beregner vektoren mellom et punkt i en datapunktsky og det nærmeste punktet i referansepunktskyen. Algoritmen gir derfor ikke bare avstanden mellom punktene, men også retningen fra datapunktet til referansepunktet. Den beregnede forskjellen er enten positiv, hvis datapunktet ligger foran eller ovenfor referansepunktskyen, eller negativ, hvis datapunktet ligger under eller bak referansen. I skred eller andre skråningsprosesser tolkes positive forskjeller for eksempel som en fremflytning av skredmateriale eller som en opphoping av skredavsetninger. Negative forskjeller kan tolkes som innsynkninger, steinsprang- eller andre skredhendelser, og erosjon. Hvis forskjellen mellom skannene er nesten null betyr det at det ikke er målt signifikante bevegelser i måleperioden. Nøyaktigheten av instrumentet, atmosfæriske forstyrrelser, annen støy, og ulik punktavstand, gir en samlet målefeil i størrelsesorden av noen cm. Forskjeller som er mindre enn denne målefeilen kan derfor ikke oppdages ved sammenligning av skann fra ulike måletidspunkt. En detaljert vurdering av målefeilen finnes for eksempel i Oppikofer m.fl. (2009) og Abellán m.fl. (2009, 2010).

De beregnede forskjellene mellom skannene fra ulike måletidspunkt kan direkte benyttes for å beregne volumet av et skred (trinn 7). Metodikken er beskrevet i kapittel 3.3 og brukes både for kvantifisering av steinsprang og andre skredtyper, men også for erosjon i bekkeløp og for avsetninger etter skredhendelser.

Basert på forskjellsmålingen mellom skannene kan det også avgrenses delområder eller blokker som viser et homogent og koherent bevegelsesmønster. For å beregne den tredimensjonale bevegelsen av en slik blokk utføres det en rototranslasjonsanalyse (trinn 8). Blokkens bevegelse fra første til siste måling beskrives som en kombinasjon av en rotasjon og en forflytning (translasjon) ved å ta hensyn til alle målepunkter på blokken. Metodikken er basert på Monserrat og Crosetto (2008) og Oppikofer m.fl. (2009), og er nærmere beskrevet i kapittel 3.4.

Til sist kan de ulike resultatene fra forskjellsmålingen, rototranslasjonsanalysen og strukturanalysen kombineres i en geometrisk modell av skredet (trinn 10). Dette gjelder særlig ustabile fjellpartier der avgrensingene er godt synlig i topografiens morfologi. En modell av den underliggende glide- eller bruddflaten under et ustabil fjellparti kan så lages. Dette gjøres ved å tilpasse avgrensede flater i omgivelsene og forlenge dem under fjellpartiet. Eventuelt kan flatens orientering begrenses med resultater fra strukturanalysen. Se Oppikofer m.fl. (2008, 2009) for mer detaljer og eksempler.

2.3 Programvarer for analyse av bakkebaserte laserskannerdata

Dette kapitlet beskriver de ulike programvarer og analyseverktøy brukt i denne rapporten. Noen av prosesseringstrinnene kan utføres også i andre programvarer som klarer å håndtere bakkebaserte laserskannerdata.

2.3.1 PolyWorks

Programvaren PolyWorks er utviklet av InnovMetric Software Inc. i Canada (InnovMetric 2015). PolyWorks er en universell programvare for 3D-metrologi og er tilpasset alle slags målinger i tre dimensjoner. Programvaren er mest brukt i industriell design, bl.a. av store bilprodusenter for å sjekke om produserte bildeler samsvarer med planene (modellering og omvendt konstruksjon).

PolyWorks inneholder flere moduler som brukes i ulike trinn iht. arbeidsflyten i Figur 4. Modulen PifEdit brukes for redigering av rådataene, som for eksempel fjerning av vegetasjon, og feilaktige, uønskede punkter (trinn 2). I modulen ImAlign blir punktskyene omdannet til en masket overflate

med skannets punktavstand (oppløsning) som maskevidde. De finmaskede overflatene fra ulike skann kan deretter samregistreres og georefereres (trinn 3 og 4) med den innebygde punkt-til-overflate ICP-algoritmen.

Videregående målinger og analyser utføres på punktskyene i modulen ImInspect. Dette inkluderer sammenligningen og forskjellsmålingen mellom ulike måletidspunkt (trinn 6), beregning av volum (trinn 7), rototranslasjonsanalysen (trinn 8), strukturanalysen ved manuell tilpasning av flater (trinn 9), og geometrisk modellering av de underliggende bruddflatene under et ustabil fjellparti (trinn 10). ImInspect omfatter videre mange funksjoner for analysen av punktskyer, bl.a. enkle målinger av dimensjoner (bredde, lengde, høyde), tilpasning av geometriske former til punktskyen (flater, punkter, kuler, vektorer osv.), og tegning av linjer i 3D.

Programvaren inneholder også et gratis visualiseringsverktøy ImView som tillater sluttbrukeren å se dataene og analysene i 3D (<http://www.innovmetric.com/en/products/polyworks-viewer>).

2.3.2 Coltop3D

Programvaren Coltop3D ble utviklet i Sveits ved Universitetet i Lausanne og ved Terranum SàRL (Terranum 2015). Coltop3D brukes for en strukturanalyse av georefererte punktskyer fra bakkebasert laserskanning. Programvaren beregner den romlige orienteringen av hvert punkt i forhold til nabopunktene og viser punktskyen med en spesifikk fargekode for hver orientering (se Jaboyedoff m.fl. 2007 for detaljer). Dermed blir punkter med samme orientering vist med samme farge. Plane overflater dannet av mange punkt med samme farge tolkes til å være formet av en sprekk eller en annen diskontinuitet i fjellmassene. Et utvalg av flater med samme farge/orientering muliggjør etter hvertberegning av den gjennomsnittlige orienteringen til et sprekkesett, noe som tilsvarer klassiske feltmålinger av sprekker og andre geologiske strukturer.

2.3.3 GlobalMapper

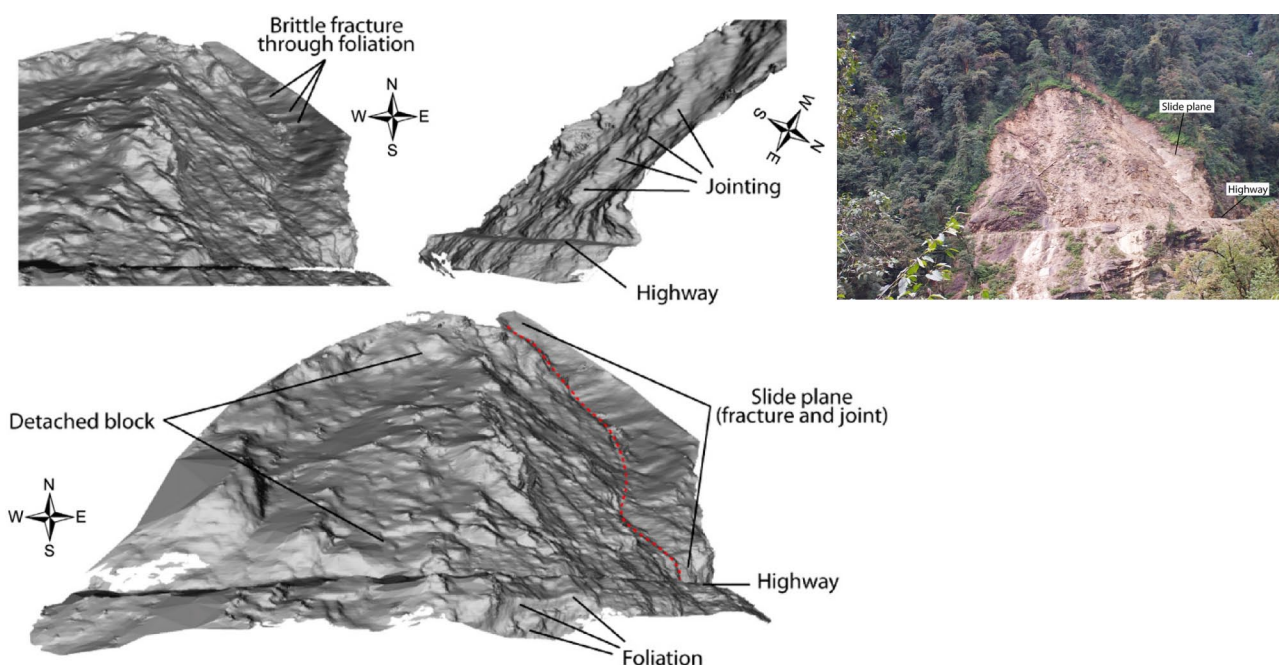
GlobalMapper er en GIS programvare utviklet av Blue Marble Geographics i USA (Blue Marble Geographics 2015). GlobalMapper kan laste inn mange ulike dataformat, bl.a. georefererte punktskyer fra bakkebasert eller flybasert laserskanning, og dataene kan omvandles og eksporteres i en rekke andre format. I dette prosjektet ble GlobalMapper brukt for å lage digitale overflate- og høydemodell fra punktskyene og å eksportere dem som en rasterfil.

3. GJELDENE KUNNSKAP

Dette kapitlet gir et overblikk over dagens muligheter for kartlegging, karakterisering og overvåking av skråningsprosesser med bakkebasert laserskanning. Sammendraget er hovedsakelig basert på tre nyere vitenskapelige artikler og rapporter (SafeLand 2010, Jaboyedoff m.fl. 2012, Abellán m.fl. 2014).

3.1 Kartlegging av skred og skråningsprosesser

Flybaserte laserskannerdata er brukt siden begynnelsen av 2000-tallet for kartlegging av skred (se eksempler i Jaboyedoff m.fl. 2012). Detaljerte høydemodeller framstilt av bakkebaserte laserskanningsdata kan brukes på samme måte som flybaserte laserhøydemodeller (Figur 5). Allikevel ble bakkebasert laserskanning bare sjelden brukt for kartlegging og karakterisering av skred (f.eks. Rowlands m.fl. 2003, Dunning m.fl. 2009, Jaboyedoff m.fl. 2009), særlig i områder der ingen høyoppløselig terrengmodell eksisterer fra før. Den høyere romlige oppløsningen og bedre presisjonen av bakkebaserte laserskanningsdata vil derimot gi mye mer lokale detaljer i en skråning sammenlignet med flybaserte datasett (Figur 5).



Figur 5: Kartlegging av et ustabil fjellparti i Bhutan basert på en høyoppløselig høydemodell framstilt av bakkebaserte laserskanningsdata (fra Dunning m.fl. 2009).

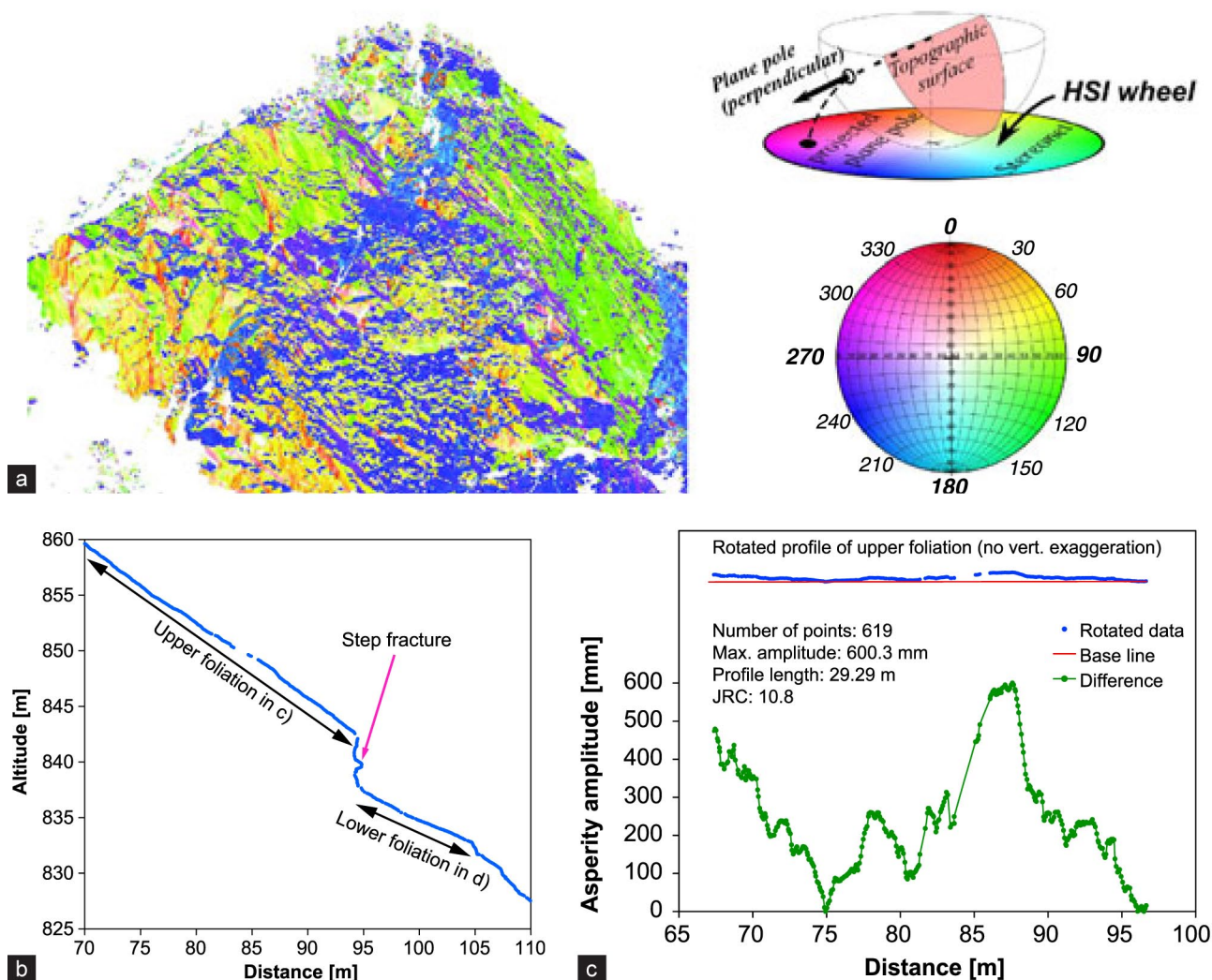
3.2 Karakterisering av skråninger

Vanlige anvendelser av bakkebasert laserskanning for karakterisering av skråninger fokuserer på fjellvegger. Det er der de høyoppløselige punktskyene fra bakkebasert laserskanning er mest nyttig, siden flybaserte laserskanningsdata som oftest inneholder bare få punkter fra bratte til vertikale skråninger (Derron m.fl. 2005). Bakkebaserte laserskanningsdata brukes bl.a. for analyse av geologiske strukturer som finnes i fjellet. Slike strukturer er for eksempel sprekker, lagdelingen, foliasjon eller forkastninger som har en nøkkelrolle for fjellets stabilitet (Bieniawski 1993).

Det finnes ulike metoder for å måle strukturenes orientering, men felles for alle er at strukturen må danne overflater av en viss størrelse i fjellveggen (Lato m.fl. 2009a, Sturzenegger og Stead 2009b). Den enkleste metoden for strukturmålinger er å tilpasse et plan på et manuelt utvalg av punkter i en overflate dannet av en gitt struktur (Sturzenegger og Stead 2009a). En annen teknikk lager en interpolert overflate gjennom punktskyen og prøver deretter automatisk å oppdage flater med

samme orientering (f.eks. Kemeny m.fl. 2006, Lato m.fl. 2009a, Lato og Vöge 2012). Problemet med denne teknikken er at brukeren har lite kontroll på målingene og det er mange artefakter. Mer avanserte teknikker beregner orienteringen til fjellsiden for hvert punkt i forhold til nabopunktene (Figur 6a) (Jaboyedoff m.fl. 2007, Ferrero m.fl. 2009). Programvaren Coltop3D (Terranum 2015) brukt i denne rapporten tilhører den siste kategorien. Sturzenegger og Stead (2009a) omtaler ulike avvik som kan oppstå ved strukturmålinger basert på bakkebasert laserskanning og brukeren må være klar over disse begrensninger.

I tillegg til strukturenes orientering kan bakkebaserte laserskanningsdata også brukes for å måle inn andre egenskaper til strukturene. Eksempler på dette er avstanden mellom sprekker med samme orientering (Figur 6a), strukturenes utholdenhet (dvs. over hvor lang distanse kan de følges), og ruhet (dvs. hvor ujevn overflaten er). Pr. i dag mangler standardmetoder for evaluering av disse parametrene. Avstanden mellom sprekker fra samme sprekkesett kan enten måles på et tverrsnitt laget i strukturens fallretning (Figur 6b) (Oppikofer m.fl. 2011), eller i 3D som avstand mellom plan tilpasset til punktskyen (Slob m.fl. 2005). Utholdenheten til en struktur kan også måles på tverrprofiler (Oppikofer m.fl. 2011) eller på punktskyen i 3D ved å beregne arealet dannet av en flate (Sturzenegger og Stead 2009b). Ruheten av en overflate måles ved å beregne forskjellen mellom et plan og den naturlige, ujevne overflaten. Dette kan gjøres enten på et profil (Figur 6c) (Oppikofer m.fl. 2011) eller direkte på punktskyen (Kulatilake m.fl. 2006, Pollyea og Fairley 2011).

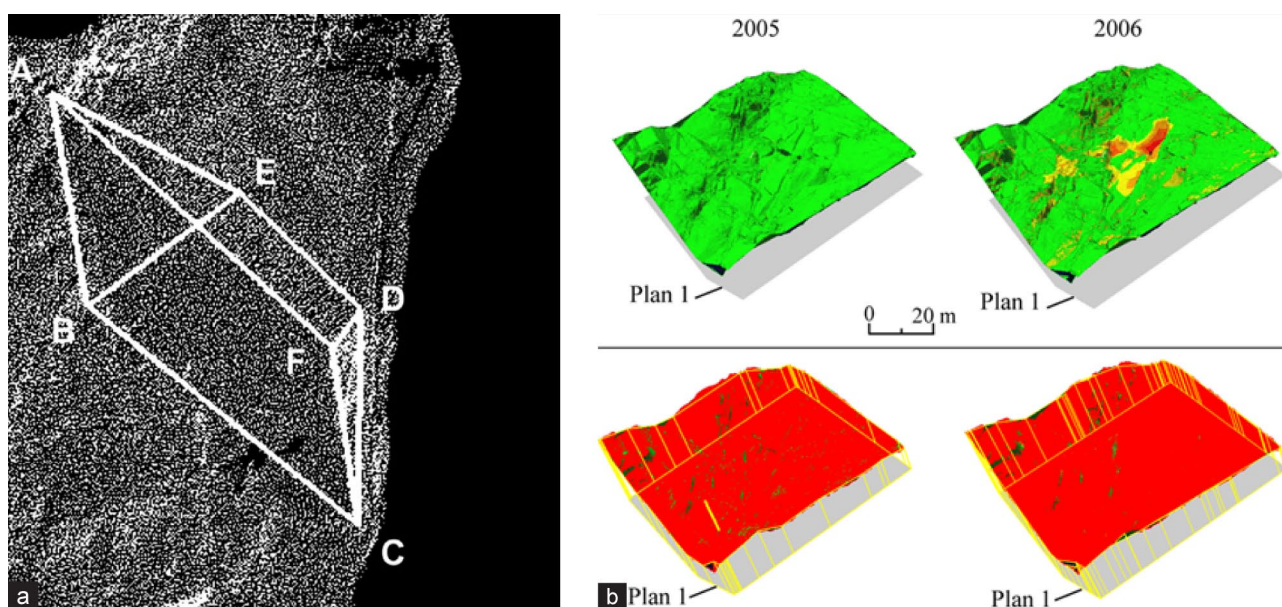


Figur 6: Karakterisering av fjellvegger: a) strukturanalyse basert på laserskannerdata i programvaren Coltop3D (fra Abellán m.fl. 2014); b) detaljerte profiler gjennom en bakkebasert laserskanningspunktsky for målinger av avstand og utholdenhet av sprekker (fra Oppikofer m.fl. 2011); c) estimering av sprekkes ruhet basert på detaljerte profiler (fra Oppikofer m.fl. 2011).

3.3 Lokalisering og kvantifisering av skredhendelser

Sammenligning av bakkebaserte laserskanningsdata fra ulike måletidspunkt viser steinsprang og andre skredhendelser som tydelig negativ forskjell, dvs. at overflaten etter skredet er bak overflaten før hendelsen. En systematisk analyse av disse forskjellene brukes for å lokalisere hendelsene og deretter å beregne volumet.

De fleste studiene for dette temaet fokuserer på steinsprang fra fjellvegg ved å sammenligne flere punktskyer (Lim m.fl. 2005, Rosser m.fl. 2005, Oppikofer m.fl. 2008, Rabatel m.fl. 2008, Abellán m.fl. 2011, Stock m.fl. 2012). Abellán m.fl. (2006) har gjenoppbygd overflaten fra før skredet med flere flater, og deretter beregnet volumet av den tredimensjonale formen (Figur 7a). Den mest brukte metodikken innebærer å måle volumet mellom et referanseplan litt bak overflaten, og de interpolerte punktskyene fra før og etter skredet (Figur 7b) (Rabatel m.fl. 2008). Forskjellen mellom disse volumene tilsvarer volumet av skredet som har gått. Med bakkebasert laserskanning er det mulig å oppdage alt fra små volum (noen dm³) til veldig store volum (flere tusen til millioner m³).

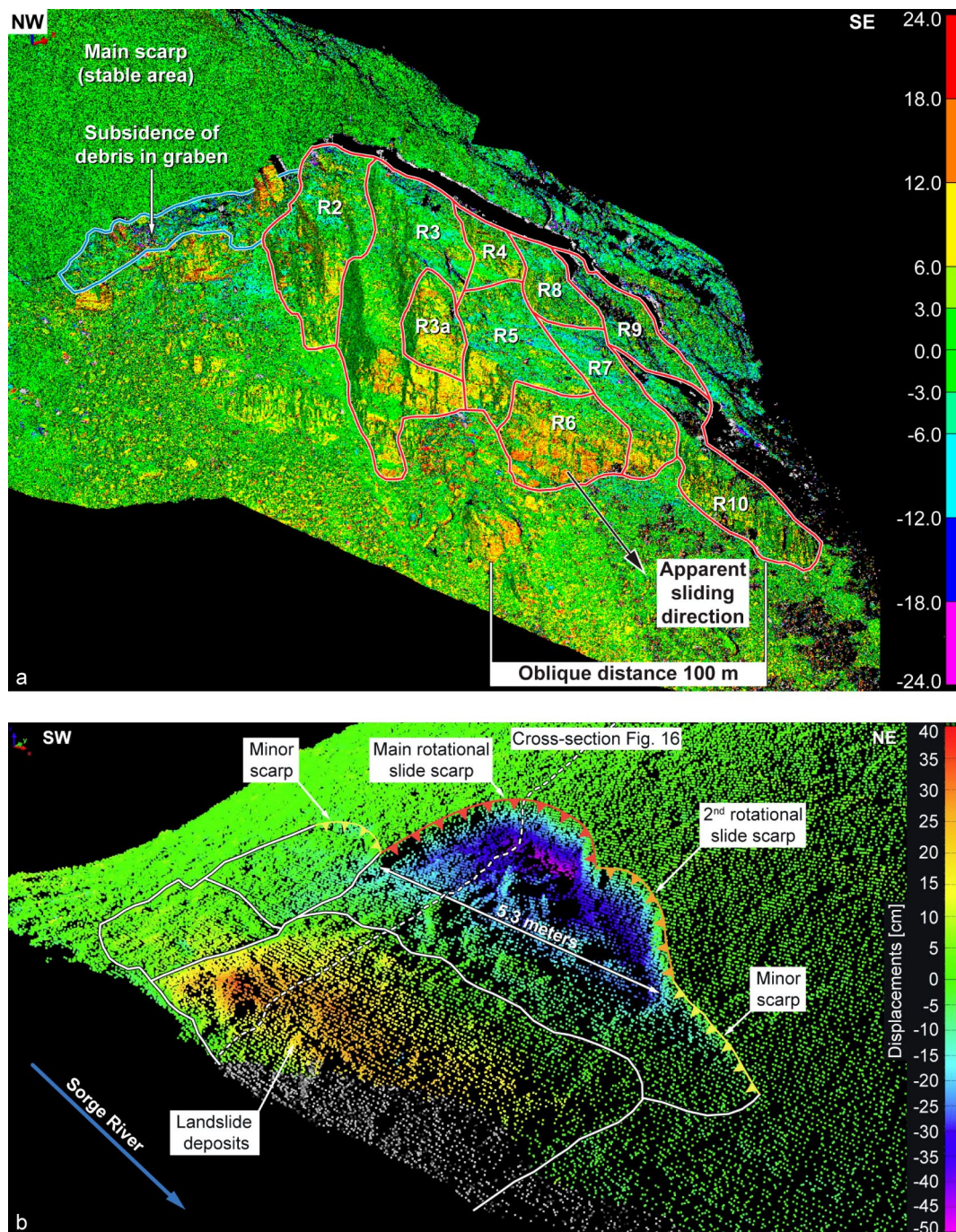


Figur 7: Volumberegning av steinsprang basert på bakkebaserte laserskanningsdata: a) gjenbygging av formen til en steinsprangsblokk ved å tilpasse flater til punktskyen (fra Abellán m.fl. 2006); b) volumberegning ved sammenligning av punktskyer fra før og etter skredet (fra Rabatel m.fl. 2008).

3.4 Bevegelsesmåling

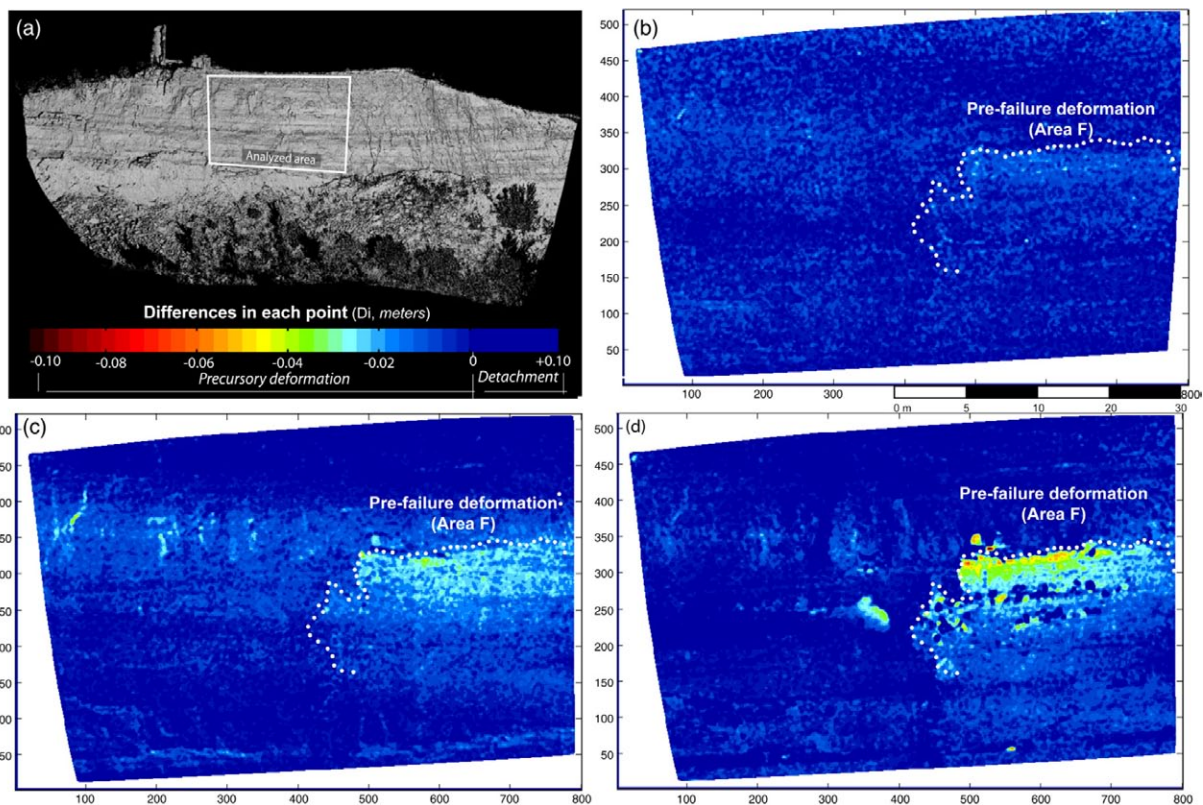
De første tester for bevegelsesmålinger fokuserte på vertikale forskjeller mellom to høydemodeller laget fra bakkebaserte laserskanningsdata (Bitelli m.fl. 2004). Ulempen med denne teknikken er at målefeilen blir veldig stor pga. den individuelle georefereringen av begge datasett, og at det kan bare måles høydeforskjeller.

Den automatiske ICP-algoritmen (se kapittel 2.2) er en rask metode for å sammenligne og måle forskjeller og bevegelser mellom ulike punktskyer. Eksemplene i Figur 8 viser tydelige bevegelser i det store ustabile fjellpartiet Åknes ovenfor Sunnlyvsfjorden (Møre og Romsdal) (Oppikofer m.fl. 2009), og i en liten løsmasseskråning i et bekkeløp (Jaboyedoff m.fl. 2009). Fordelen med denne metoden er at bevegelsesmålingene er gjort i tre dimensjoner. Ved å tolke de ulike positive og negative forskjellene er det mulig å kvantifisere både lengden og retningen til bevegelsene (Figur 8a). Ulempen med disse forskjellsmålingene er den relativt store målefeilen (f.eks. 2,7 cm i Oppikofer m.fl. 2009), men målepresisjonen kan forbedres betydelig med filtreringsteknikker (Abellán m.fl. 2009). Med en slik filtrering har Abellán m.fl. (2010) klart å oppdage deformasjon i størrelsesorden noen cm i en fjellvegg (Figur 9). Dette er deformasjon som ble tolket som små bevegelser i forkant av et større steinsprang.

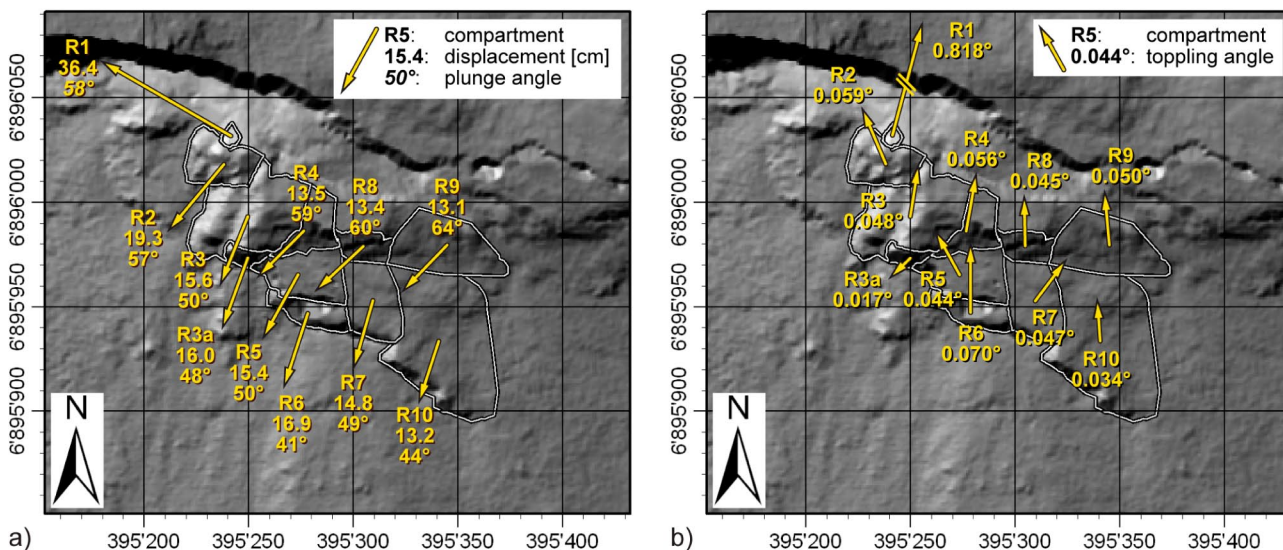
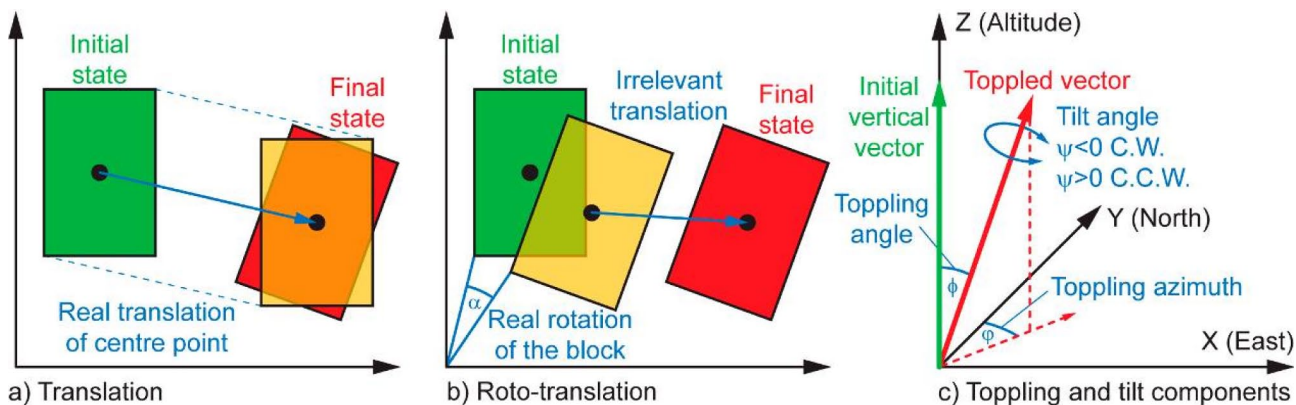


Figur 8: Bevegelsesmålinger basert på bakkebasert laserskannerdata: a) bevegelser av det ustabile fjellpartiet Åknes fra 2006 til 2008 (fra Oppikofer m.fl. 2009); b) rotasjonsutglidning i en løsmasseskråning langs et bekkeløp (fra Jaboyedoff m.fl. 2009).

Mer avanserte teknikker fokuserer på den komplette tredimensjonale bevegelsen av et område i forhold til et referansedatasett. Teza m.fl. (2007) beregner for eksempel skredets bevegelser ved å dele området i små deler, og samregistrere disse delene med referansepunktskyen. Monserrat og Crosetto (2008) og Oppikofer m.fl. (2009) har utviklet en lignende teknikk der skredet deles inn i ulike blokker eller delområder basert på morfologien og forskjeller i bevegelseshastigheten (se for eksempel Figur 8a). Blokkens tredimensjonale bevegelse fra første til siste datasett er satt sammen av en forflytning av blokkens senterpunkt, etterfulgt av en rotasjon (Figur 10). Oppikofer m.fl. (2009) tolker denne rotasjonsbevegelsen etterpå som en utvelting av blokken. Denne rototranslasjonsanalysen viser ulike bevegelseshastigheter og bevegelsesretninger, samt ulike veltevinkler og velteretninger (Figur 10).



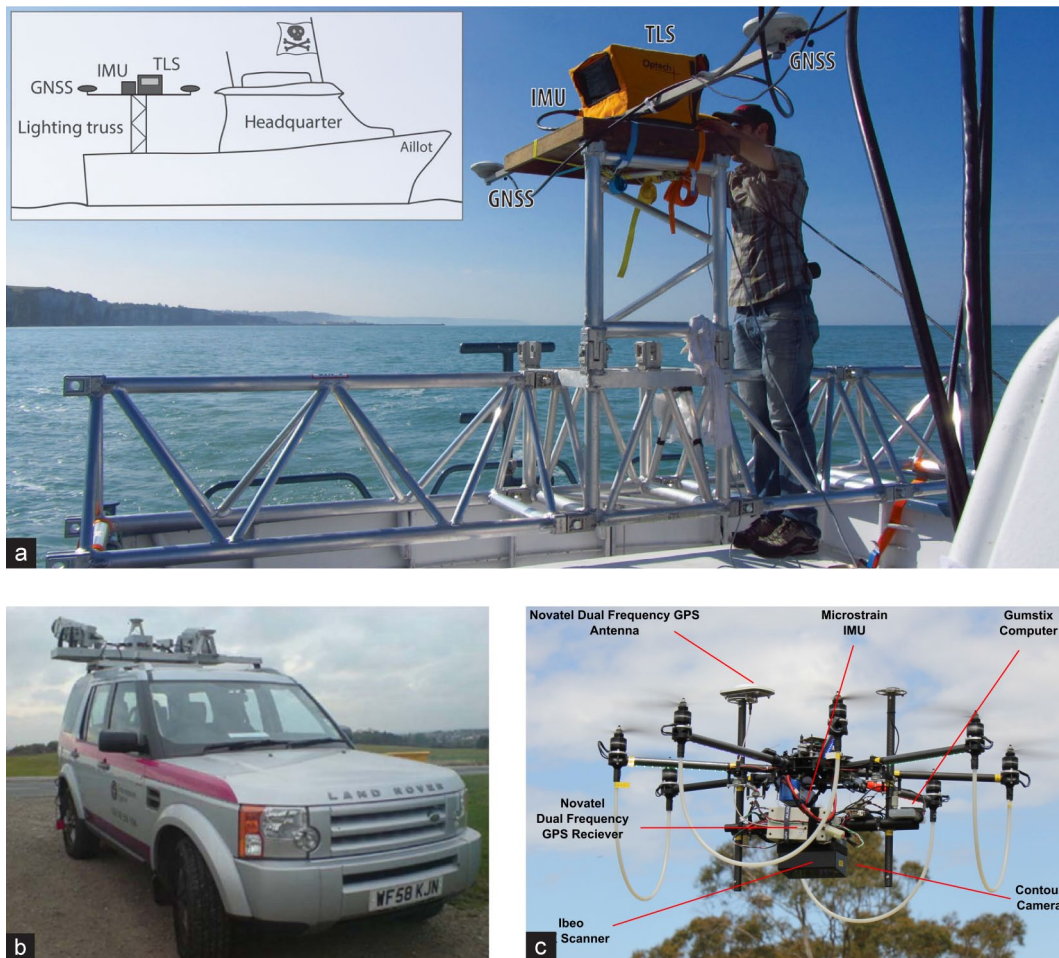
Figur 9: Tidsserie av små bevegelser i forkant av et større steinsprang i en fjellvegg (fra Abellán m.fl. 2010).



Figur 10: Detaljerte bevegesesanalyser basert på bakkebasert laserskannerdata: bevegelser av det ustabile fjellpartiet Åknes fra 2006 til 2008 (fra Oppikofer m.fl. 2009).

3.5 Mobil laserskanning

Nå til dags finnes det flere muligheter for å utføre laserskanninger også fra mobile plattformer, som for eksempel fra bil, tog eller båt (Figur 11). Ved mobile anvendelser er laserskanneren koblet til et differensiell GPS-system og et inertsystem (Figur 11a). Mens GPS-systemet måler kontinuerlig og nøyaktig instrumentets posisjon, måler inertsystemet laserskannerens orientering. Den innsamlede punktskyen er direkte georeferert, og bakkeoppløsningen er svært avhengig av avstanden mellom skanneren og studieområdet, og fartøyets hastighet. De siste årene har det kommet flere vellykkede anvendelser av mobile laserskanninger: Michoud m.fl. (2015) har sammenlignet laserskanninger fra båt for å kartlegge steinsprang og erosjon av fjellskrenter langs den britiske kanalen, bil- og togbasert laserskanning ble brukt av Lato m.fl. (2009b) og Sampson m.fl. (2012). Det kom lovende resultater fra en test hvor laserskanning ble utført fra en drone (Wallace m.fl. 2012).



Figur 11: Bilder av ulike løsninger for mobil laserskanning: a) fra båt (fra Michoud m.fl. 2015); b) fra taket av en bil (fra Sampson m.fl. 2012); fra en drone (fra Wallace m.fl. 2012).

4. RESULTATER FRA UTVALGTE TESTOMRÅDER

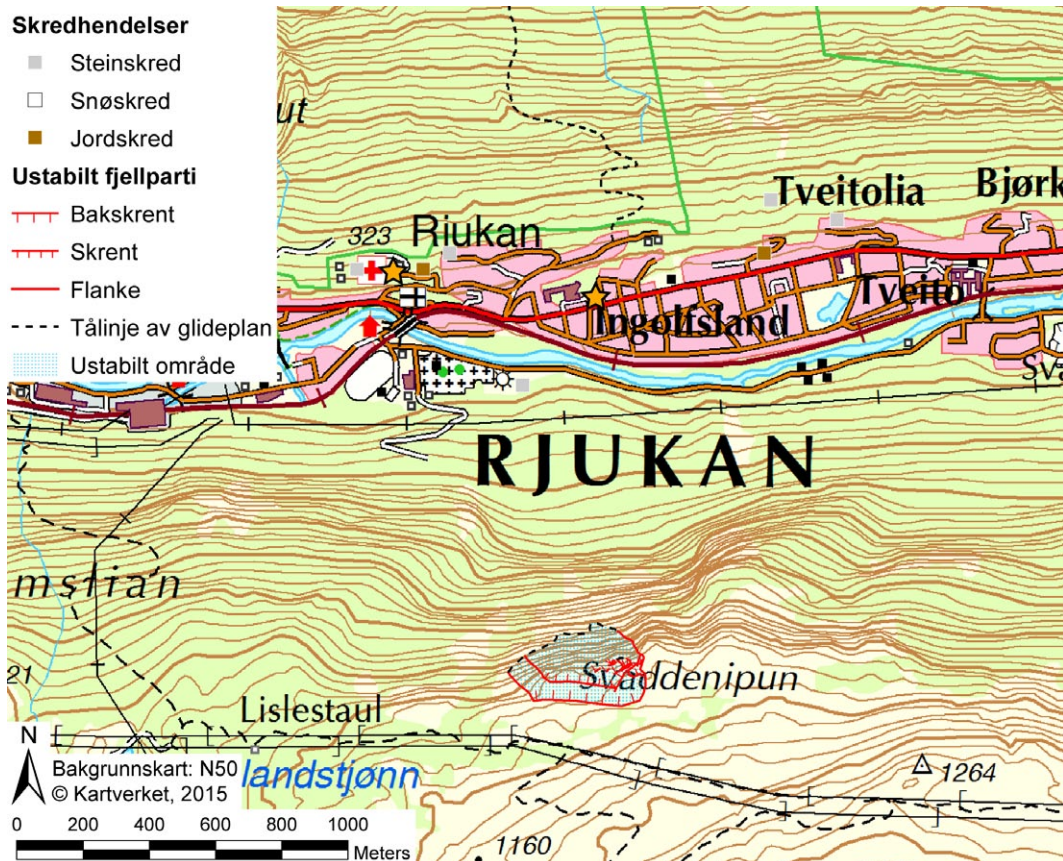
For dette prosjektet ble det valgt ut 5 testområder for å teste bakkebasert laserskanning som periodisk overvåkningsteknikk for skredprosesser (Figur 12). Testområdene omfatter ulike skredtyper, ulike skredmaterialer og ulik infrastruktur i hvert skredområde.



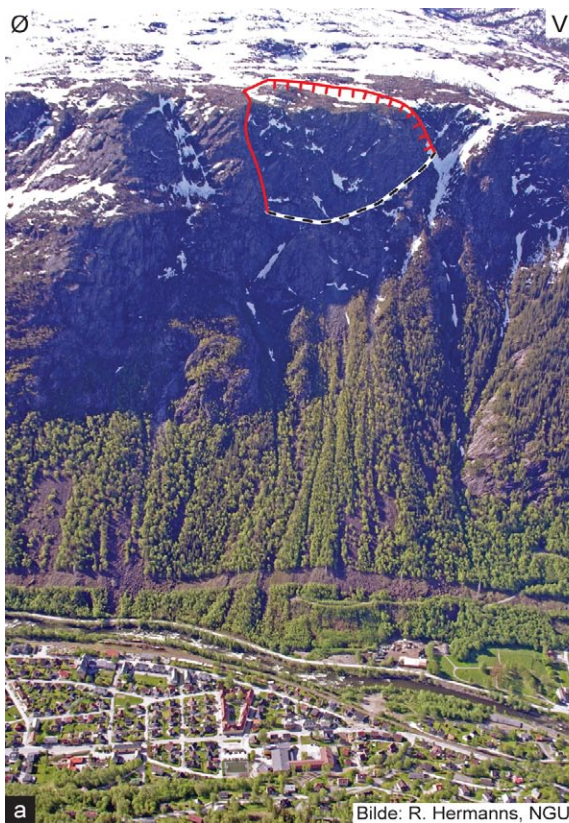
Figur 12: Oversiktskart over de fem utvalgte testområdene.

4.1 Svaddenipun

Svaddenipun er et ustabil fjellparti ovenfor Rjukan i Tinn kommune (Telemark) (Figur 13, Figur 14). Fjellpartiet er avgrenset av en bratt, øst-vestgående bakskrent som er minst 7 m høy i vest og 3 m høy i øst. På fronten av fjellpartiet finnes det mange åpne sprekker, særlig i den østlige delen. Hele det ustabile fjellpartiet har et volum av ca. 4,4 millioner m³, men mindre scenarier (delområder) kan avgrenses. Bl.a. er flere blokker med noen tusen kubikkmeter i volum avgrenset av åpne sprekker (Figur 13, Figur 14). Et fjellskred fra Svaddenipun vil føre til store ødeleggelser i Rjukan og dermed ha svært store konsekvenser. Også steinsprang eller steinskred fra de små blokkene langs fronten av det ustabile fjellpartiet kan nå bebyggelse. Periodiske bevegelsesmålinger med differensiel GPS utført av Universitet i Oslo i samarbeid med NGU, viser ingen signifikante bevegelser siden 2012.



Figur 13: Kart over testområdet Svaddenipun: plasseringer av bakkebasert laserskanner er vist med oransje stjerner. Historiske skredhendelser er vist med ulike punktsymboler for forskjellige skredtyper. Lineamenter som avgrensner det ustabile området er framstilt med ulike symboler.



Figur 14: Bilder av testområdet Svaddenipun: a) oversiktsbilde av fjellpartiet som befinner seg overfor Rjukan; b) detaljbilde av den østlige flanken med flere åpne sprekker; c) avgrenset blokk med åpne sprekker langs fronten i den østlige delen av det ustabile fjellpartiet.

4.1.1 Datasett

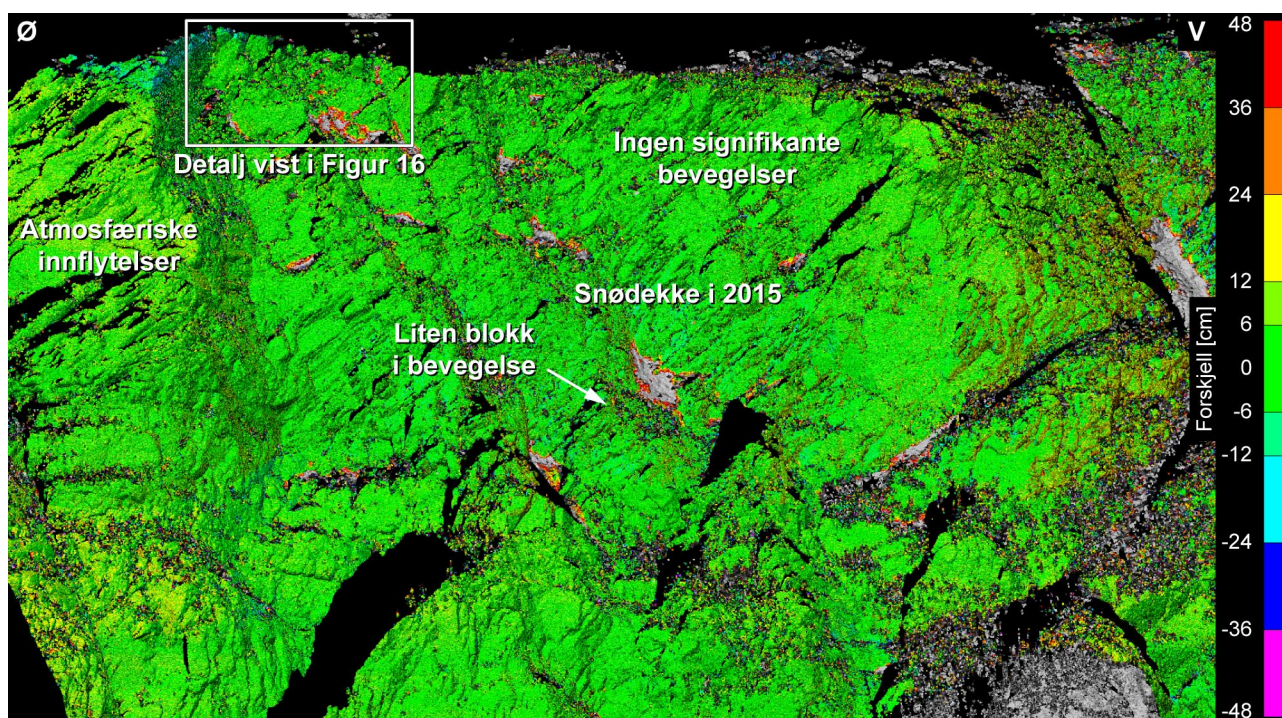
Det ustabile fjellpartiet Svaddenipun ble innmålt hvert år mellom 2012 og 2015 fra to steder i dalbunnen i Rjukan (Figur 13). Gjennomsnittlig distanse mellom skannerplasseringene og det ustabile fjellpartiet er ca. 1300 m fra plasseringen ved skolen og ca. 1500 m fra plasseringen ved sykehuset, men inkluderer også en stor vertikal høydeforskjell på omtrent 700 m. Med den valgte skannopløsningen gir dette en gjennomsnittlig punktavstand på mellom 7,8 og 9,0 cm.

Under databearbeiding viste det seg at den geografiske plasseringen av laserskanneren og av det ustabile fjellpartiet byr noen utfordringer, særlig den store høydeforskjellen og skannretningen mot sør. Disse utfordringene medfører betydelige meteorologiske innflytelser som kan påvirke kvaliteten av skanningene. Den største påvirkningen kommer fra forskjellige luftsjikt med ulik temperatur og fuktighetsinnhold, noe som er særlig utpreget i Rjukan når dalbunnen fortsatt er i skygge, mens de øvre luftsjikt allerede er i sol. Til tross for disse utfordringene er minst ett skann per år ikke eller bare litt påvirket av disse atmosfæriske innflytelsene.

Videre finnes det busker og trær over store deler av fjellpartiet, og det lå snø på bakken i noen av måleårene. Vegetasjon og snø kan være en utfordring ved sammenligning av skann fra ulike år, siden de danner målbare forskjeller mellom skannene pga. vekst av vegetasjon og ulik snødekning. Derfor må alle forskjeller sjekkes for om de skyldes endringer i vegetasjon, snø eller i selve fjellet.

4.1.2 Bevegelsesmålinger

Punktskyer fra ulike måleår ble sammenlignet med referanseskann fra 2012 for å oppdage eventuelle forskjeller. Datasettet tillater ikke å oppdage forskjeller som er mindre enn ± 6 cm på grunn av ovennevnte meteorologiske innvirkninger på skanningen (Figur 15). Det er dermed ikke mulig å måle bevegelser på det ustabile fjellpartiet som er mindre enn denne målefeilen på 6 cm.



Figur 15: Bevegelsesmålinger på det ustabile fjellpartiet Svaddenipun: sammenligning mellom skann fra 2012 og 2015 viser ingen signifikante bevegelser i det ustabile fjellpartiet, bortsett fra en liten blokk (<5 m³) i nedre delen av skråningen (se detaljer i Figur 17). Vegetasjon, store snødekte områder i 2015 og atmosfæriske forstyrrelser gjør det vanskelig å sammenligne skann fra ulike måleår.



Figur 16: Bevegelsesmålinger på det ustabile fjellpartiet Svaddenipun: detaljbilde av den øvre, østlige delen av fjellpartiet der det finnes flere store blokker avgrenset av åpne sprekker (se Figur 14c), men som ikke viser signifikant bevegelse.

Sammenligning av skann fra 2012 og 2015 viser ingen signifikante bevegelser verken på hele det ustabile fjellpartiet (Figur 15) eller på de store blokkene som er avgrenset av åpne sprekker i den øvre, østlige delen (Figur 16, Figur 14c). Derimot viser sammenligningen tydelige forskjell i snødekke (gule til røde områder), og også flere horisontale striper og linjer som tyder på atmosfærisk påvirkning på skanningene.

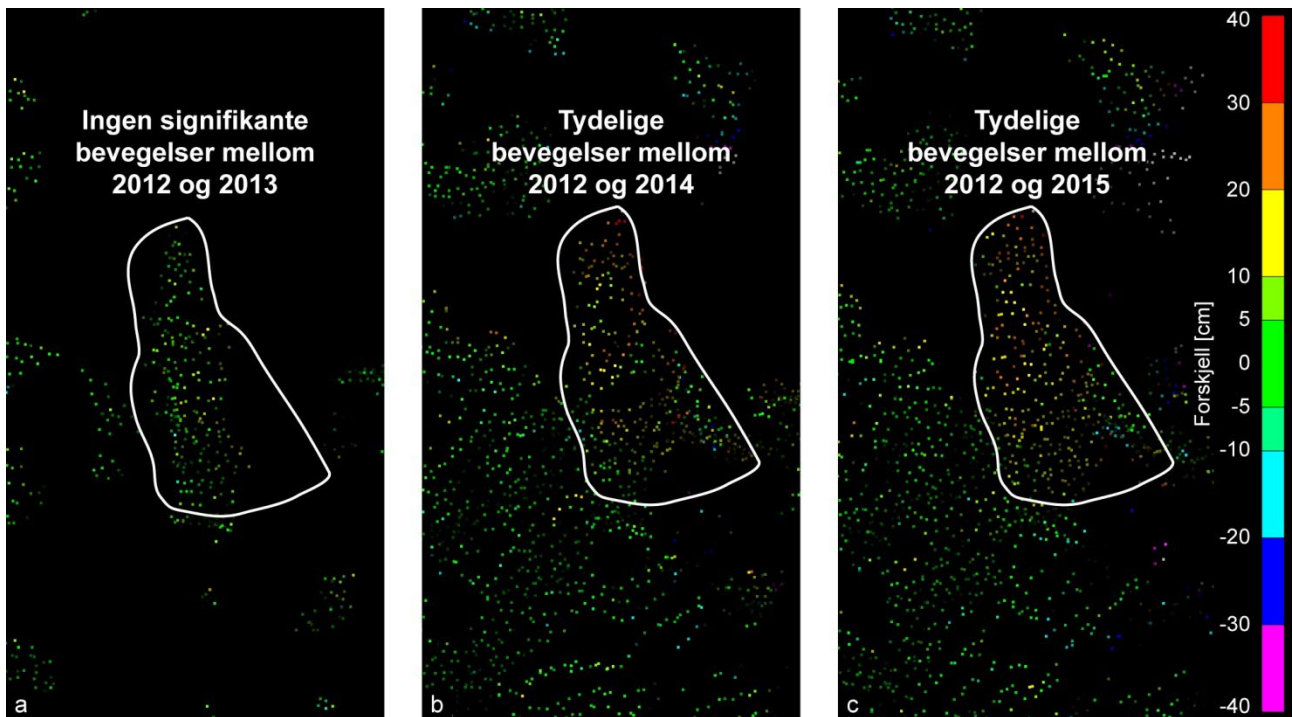
Til tross for disse utfordringene ble en liten blokk med signifikante bevegelser oppdaget i den nedre, midtre delen av det ustabile fjellpartiet (se Figur 15 for lokalisering). Figur 17 viser sammenligning mellom ulike måleår mot referanseskann fra 2012. En visuell analyse av bevegelsene viser nesten ingen signifikante bevegelser mellom 2012 og 2013 (Figur 17a), mens bevegelser blir tydeligere og tydeligere i de følgende måleperiodene (Figur 17b, c). Sammenligningen mellom 2012 og 2015 viser opp til 30 cm bevegelse (omtrent 10 cm/år) med høyere bevegelser på toppen av blokken enn ved foten. Dette tyder på utvelting av blokken som mulig mekanisme.

Den ustabile blokken er 3,26 m høy og 1,16 m bred, men tykkelsen er vanskelig å fastslå siden laserskannerpunktskyen bare dekker forsiden av blokken og ikke sidene. Et volumanslag iht. prosedyren beskrevet i kapittel 3.3, gir et volum på mellom 2 og 5 m³.

En rototranslasjonsanalyse av bevegelsene av den lille blokken ble utført for alle måleår iht. metodikken beskrevet i kapittel 3.4. Denne analysen tillater en mer detaljert beskrivelse av hele blokkens bevegelser i tre dimensjoner, som kan være sammensatt av en utglidning (translasjon), en utvelting samt en vridning rundt en vertikal akse (rotasjon).

To stabile referanseområder i nærheten av blokken ble valgt for å fastslå nøyaktigheten av analysen med de gitte datasett. Gjennomsnittlig usikkerhet for lengden av bevegelsesvektoren er 3,4 cm med et maksimum på 4,8 cm. Usikkerhetene er gjennomsnittlig 0,34° (maksimum: 0,50°) for veltvinkelen og 0,17° (maksimum: 0,25°) for vridningsvinkel.

Resultatene av rototranslasjonsanalysen er gitt i Tabell 1 og viser en tydelig forflytning av blokken mot nordvest med en hastighet på mellom 6,2 og 7,7 cm/år, kombinert med en utvelting mot vestnordvest med omtrent 0,6° til 2,8° per år.



Figur 17: Bevegelsesmålinger på en liten blokk i nedre del av det ustabile fjellpartiet Svaddenipun (se lokalisering i Figur 15): a) nesten ingen bevegelser er synlig mellom juni 2012 og juni 2013; b) tydelige bevegelser observeres mellom 2012 og 2014; c) forskjeller mellom 2012 og 2015 er større enn i perioden 2012–2014. Resultatene tilsier en total bevegelse av omtrent 10 cm/år for blokken med et volum på mellom 2 og 5 m³.

Tabell 1: Detaljert bevegelsesanalyse for blokken i nedre delen av det ustabile fjellpartiet Svaddenipun basert på rototranslasjonsanalysen av bakkebaserte laserskannerdata mellom 2012 og 2015.

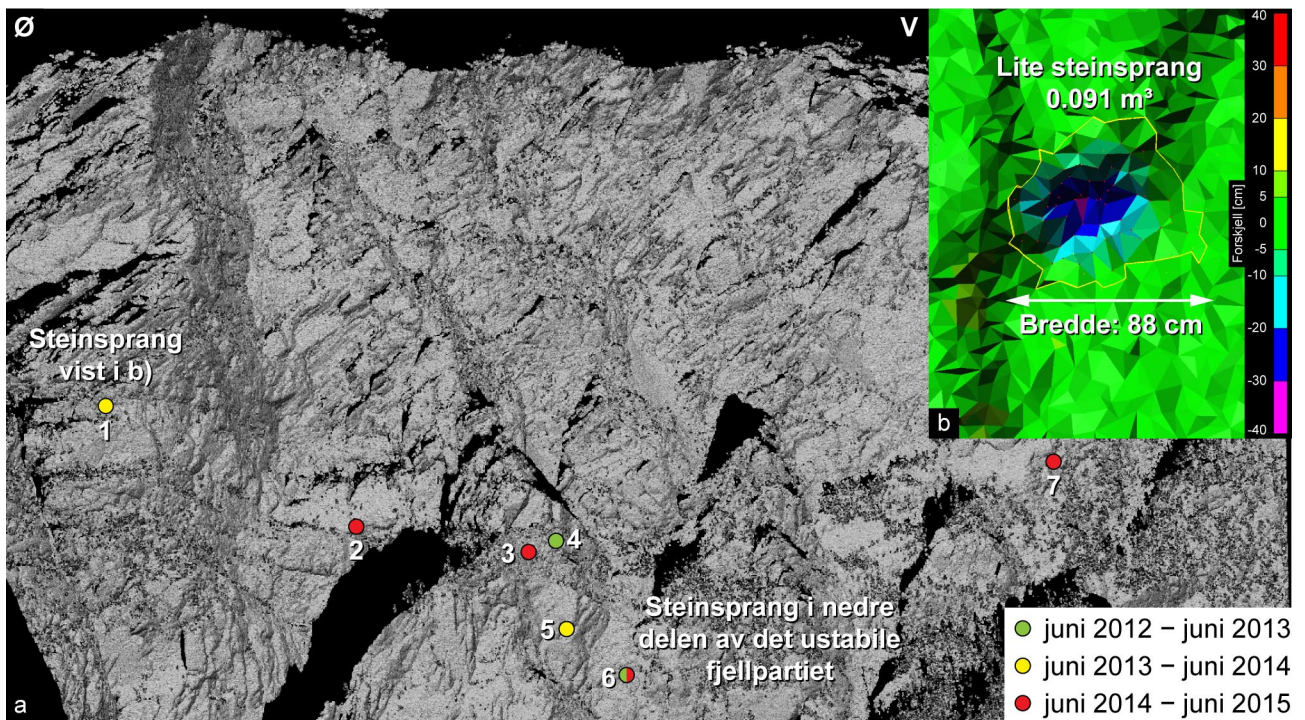
Periode	Forflytning				Utvelting		Rotasjon
	Lengde [cm]	Hastighet [cm/år]	Retning/fall med usikkerhet	Vinkel [°]	Vinkelhastighet [°/år]	Velteretning med usikkerhet	[°]
06.2012 – 06.2013	6,0	6,2	325°/-19° ± 30°	2,1	2,1	66°N ± 6°	-6,2
06.2012 – 06.2014	15,3	7,7	317°/16° ± 15°	5,5	2,8	306°N ± 5°	-9,1
06.2012 – 06.2015	20,8	7,0	313°/-24° ± 9°	1,7	0,6	299°N ± 11°	1,6

Anmerkning: årlige hastigheter og vinkelhastigheter er basert på eksakt måledato, og måleintervall kan derfor være noe kortere eller lengre enn ett år.

4.1.3 Steinsprangsaktivitet

Sammenligning av skann fra 2012 og 2015 viser 7 små steinspranghendelser i nedre del av det ustabile fjellpartiet Svaddenipun (Figur 18a). Disse steinsprangene vises som tydelige negative forskjeller mellom målingene (Figur 18b). Forskjellene brukes også for å kvantifisere steinsprangets dimensjoner og volum (Tabell 2). Ved å analysere målingene fra alle måleår kan man kartlegge når steinsprangene skjedde. Analysen viser at to steinsprang gikk mellom juni 2012 og juni 2013, to mellom juni 2013 og juni 2014 og fire mellom juni 2014 og juni 2015. En av hendelsene (nr. 6) kollapset delvis i den første måleperioden (juni 2012 til juni 2013), mens størstedelen av volumet falt ut mellom juni 2014 og juni 2015 (Figur 18a).

Forskjellsmålingene og analysene viser at steinsprangene fra Svaddenipun var ganske små: fire steinsprang hadde et volum rundt 0,1 m³ som tilsvarer 100 liter, mens de tre andre hendelsene var ca. 0,5 m³, 0,8 m³ og 1,1 m³ (Tabell 2). Variasjoner av bredde og høyde for alle steinsprangene er 0,8-2,2 m og variasjoner av maksimum dybde (målt som forskjell mellom laserskannerdatasett) er 0,2-0,8 m.



Figur 18: Steinsprangaktivitet på det ustabile fjellpartiet Svaddenipun: a) i måleperioden 2012 til 2015 finnes det spor etter 7 steinsprang, hvorav 3 skjedde mellom juni 2014 og juni 2015 og ett område (nr. 6) var aktivt både i perioden juni 2012-2013 og juni 2014-2015; b) forskjellsmåling mellom 2012 og 2015 for steinsprang nr. 1 (gult omriss) som var ca. 88 cm bred, 82 cm høy og opp til 35 cm dyp med et volum på 0,091 m³.

Tabell 2: Parametere for steinspranghendelser ved Svaddenipun mellom 2012 og 2015 inkludert tidsperiode, bredde, høyde og maksimal dybde og volum for steinsprangene.

Steinsprang-nummer	Hendelsesperiode	Bredde [cm]	Høyde [cm]	Maks. dybde [cm]	Volum [m ³]
1	06.2013 – 06.2014	88	82	35	0,091
2	06.2014 – 06.2015	164	128	21	0,141
3	06.2014 – 06.2015	102	90	36	0,114
4	06.2012 – 06.2013	83	99	29	0,114
5	06.2013 – 06.2014	186	173	82	1,138
6	06.2014 – 06.2015 (del i 06.2012 – 06.2013)	222	133	78	0,818
7	06.2014 – 06.2015	201	208	44	0,541

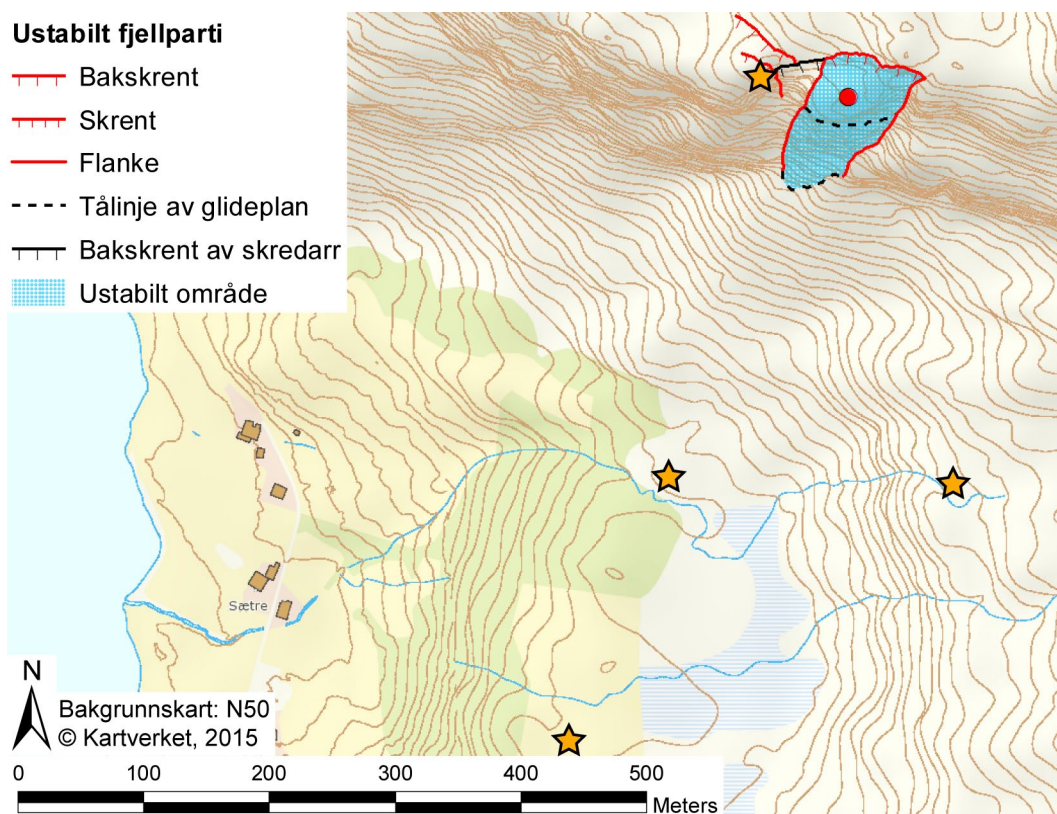
4.2 Lausefjellet

Lausefjellet er et ustabil fjellparti på Atløyna i Askvoll kommune (Sogn og Fjordane) (Figur 19, Figur 20). Fjellpartiet er dannet av en frittstående blokk som er avgrenset mot nord av en bratt øst-vestgående bakskrent, som i vest utgjør bruddflaten til en tidligere utglidning (Figur 20). Den østlige flanken er også fri og markert med mange løse blokker og ur. Ved foten av fjellpartiet er det et veldig oppsprukket område (Figur 20b), noe som tyder på deformasjon i fjellsiden. Videre finnes det tegn til steinsprangaktivitet fra den stupbratte til overhengende fronten av fjellpartiet (Figur 20a). Periodiske bevegelsesmålinger med differensiel GPS utført av NVE Region Vest viser ingen signifikante bevegelser mellom 2011 og 2014.

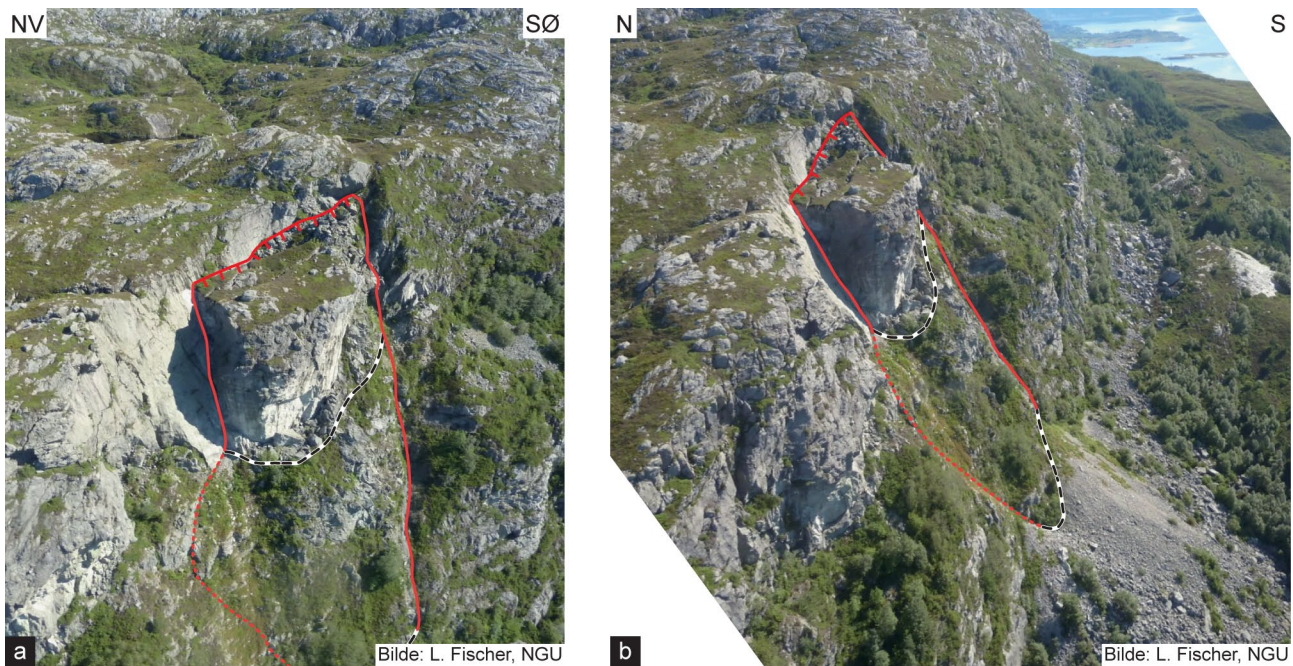
4.2.1 Datasett

Det ustabile fjellpartiet Lausefjellet ble innmålt med en bakkebasert laserskanner i 2012, 2014 og 2015 fra flere steder i dalbunnen og fra vestsiden (Figur 19). Gjennomsnittlig distanse mellom skannerplasseringene og det ustabile fjellpartiet er ca. 400 m fra plasseringene i dalbunnen og ca. 60 m fra plasseringen på vestsiden. Med den valgte oppløsningen gir dette en gjennomsnittlig punktavstand på 2,8-6,1 cm.

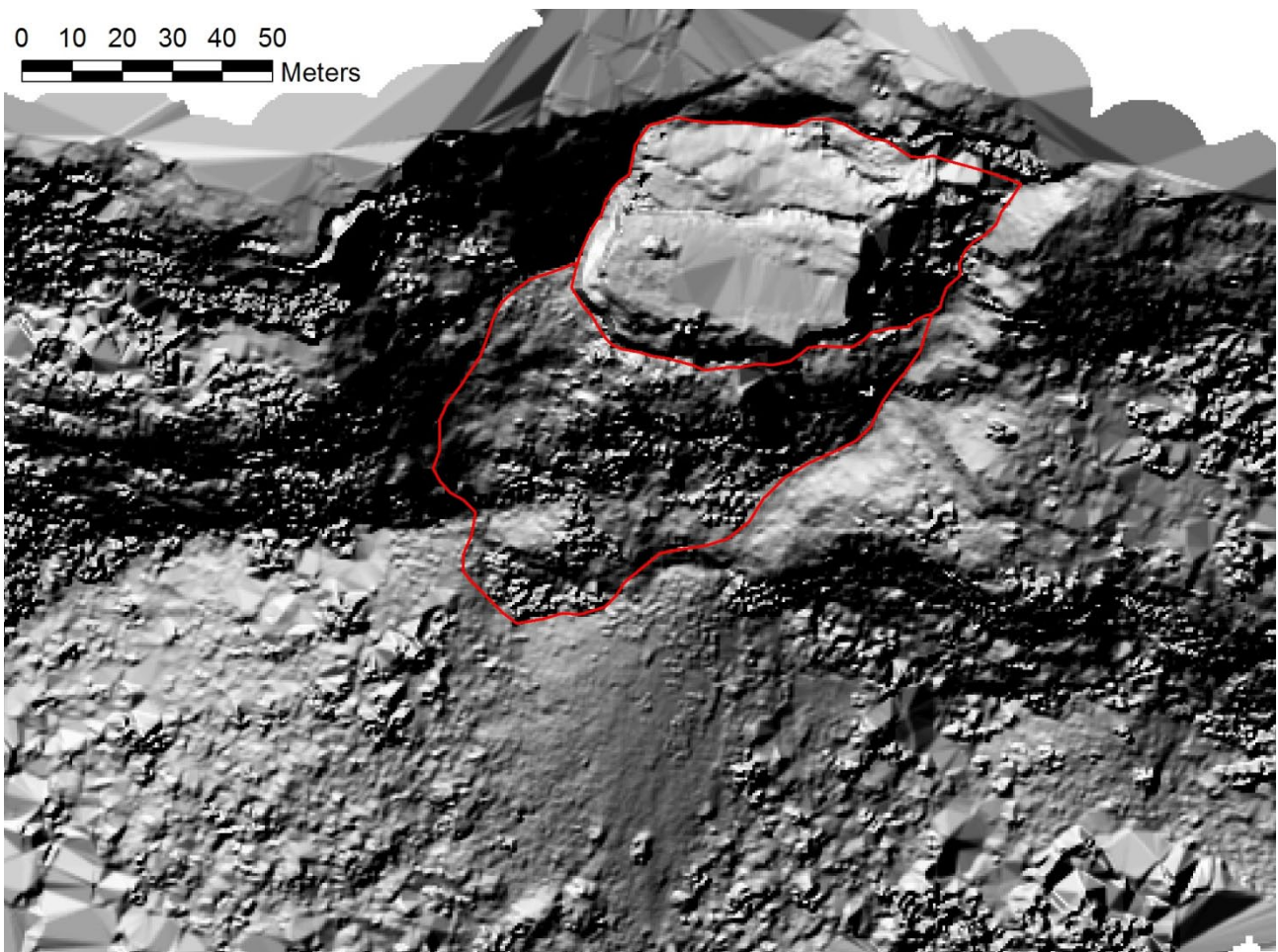
Det sammensatte og georefererte datasettet med over 6,3 millioner punkter ble brukt for å lage en digital overflatemodell av det ustabile fjellpartiet (Figur 21). Modellen med en cellestørrelse på 25 cm ble laget i programvaren GlobalMapper. Modellen er strengt tatt ikke en digital høydemodell, men en digital overflatemodell siden vegetasjon ikke ble fjernet fra punktskyen. Å lage denne modellen innebar noen utfordringer på grunn av store overheng i de bratte fjellveggene. Disse overhengene måtte fjernes manuelt fra punktskyen før den ble omvandlet til en overflatemodell. Til sammenligning har ikke flybaserte laserskannerdata denne utfordringen fordi overheng vanligvis ikke er synlige fra fly, og er derfor ikke registrert i punktskyen.



Figur 19: Kart over testområdet Lausefjellet: plasseringer av bakkebasert laserskanner er vist med oransje stjerner. Lineamenter som avgrenser det ustabile området er framstilt med ulike symboler.



Figur 20: Bilder av testområdet Lausefjellet: a) en frittstående blokk har beveget seg flere meter nedover langs den bratte sørhellende bakskrenten. Arret etter en tidligere utglidning vest for den ustabile blokken, og steinsprangaktivitet fra den vertikale fjellveggen, er tydelig synlige; b) innsyn fra siden med to mulige nedre avgrensninger inntegnet: den øvre ved foten av den vertikale fjellveggen og den nedre ved foten av et ganske oppsprukket område.



Figur 21: Digital overflatemodell med 25 cm cellestørrelse laget fra den georefererte punkttskyen fra bakkebasert laserskanning. Overflatemodellen dekker nesten hele den ustabile blokken ved å sy sammen skann fra ulike synsvinkler.

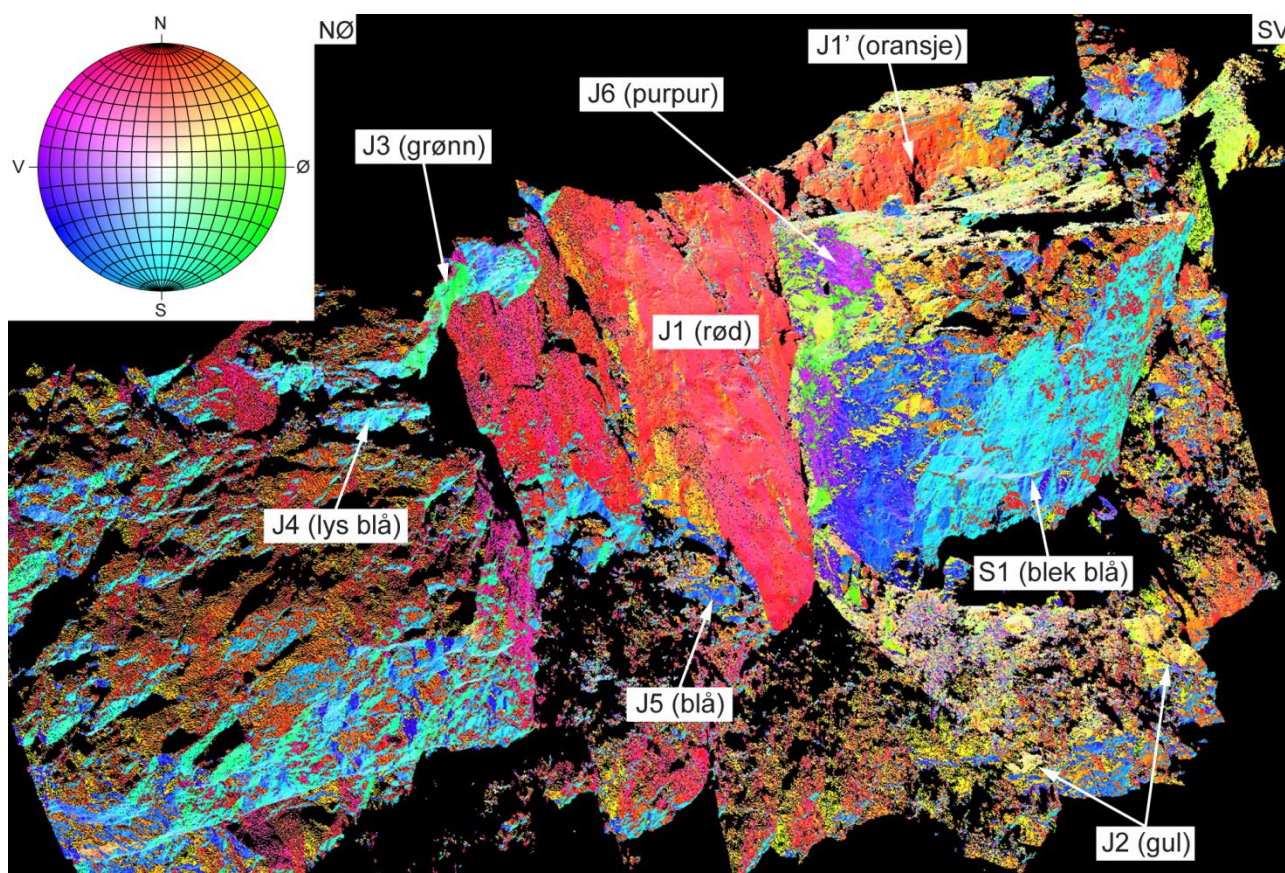
Den sammensatte og georefererte punktskyen ble også brukt til å utføre en detaljert strukturanalyse i programvaren Coltop3D, en kinematisk analyse av mulige bevegelsesmekanismer, og en geometrisk modellering av bruddflatene som avgrenser det ustabile fjellpartiet.

For sammenligning av skann fra ulike år kunne bare skann tatt fra flere steder i dalbunnen brukes. Skannene fra vestsiden viste seg å være ubrukelig siden de inneholdt for lite stabilt referanseområde. Referanseskannet fra 2012 er heller ikke helt ideelt siden det bare inneholder et stabilt område vest for det ustabile fjellpartiet, og ikke i øst. For en best mulig sammenligning burde alle skanninger inneholde referanseområder på begge sider, noe som vil redusere usikkerhetene.

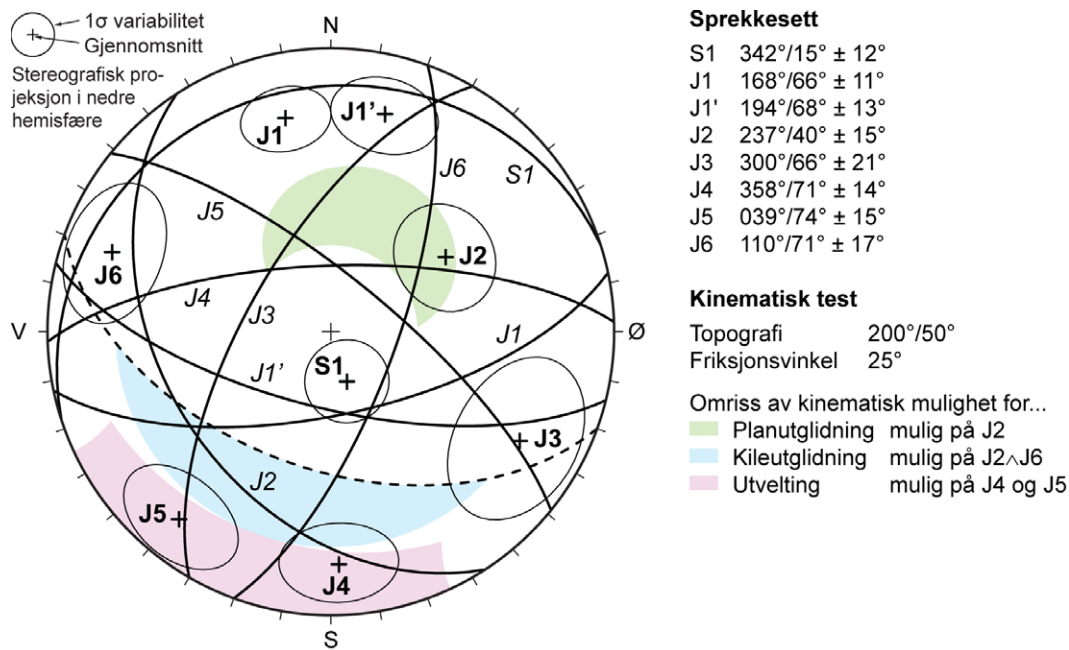
4.2.2 Strukturanalyse

Strukturanalysen av den georefererte punktskyen fra bakkebasert laserskanning er utført i programvaren Coltop3D (Figur 22). En visuell inspeksjon av den fargekodete punktskyen viser store flater med ensartet farge, og det antas at disse flatene er dannet av sprekkesett som krysser fjellet. Det finnes 8 sprekkesett, som er karakterisert med hver sin egen farge (Figur 22, Figur 23).

Bakskrenten av det ustabile fjellpartiet er sammensatt av to ulike orienteringer, dannet av det SSØ-fallende settet J1 (rød i Figur 22) og det sørhellende settet J1' (oransje i Figur 22). Fronten av fjellpartiet er hovedsakelig dannet av de nesten vertikale sprekkesettene J4 og J5 som faller henholdsvis til nord og nordøst (hhv. lysblå og blå i Figur 22). Den frie vestlige flanken av fjellpartiet er formet av to sprekkesett, ett som faller mot nordvest (J3, grønn i Figur 22) og ett som danner et sørøst-hellende overheng (J6, purpur i Figur 22).



Figur 22: Strukturanalyse av det ustabile fjellpartiet Lausefjellet med programvaren Coltop3D. Punktskyen fra laserskanningen er fargelagt med en ensartet farge for hver romlige orientering iht. fargekoden gitt i stereonettet. Dette vil si at fargen er avhengig av fallretningen, og at fargeintensiteten er avhengig av fallvinkelen. For eksempel er horisontale overflater hvite, bratte overflater mot nord lyseblåe, og bratte overflater mot sør røde. Overhengene langs fronten av Lausefjellet er også tydelig framhevet i Coltop3D-analysen som lyseblåe og blåe overflater.



Figur 23: Strukturanalyse av det ustabile fjellpartiet Lausefjellet: stereonett av strukturene med gjennomsnittlig orientering og variabilitet, som er beregnet på utvalgte flater for hvert sprekkeseett i programvaren Coltop3D (etikett til polen i stereonett i fet skrift; etikett til storsirkelen i skråskrift). Kinematisk analyse basert på strukturmålingene tilsier mulighet for planutglidning på J2 og kileutglidning på J2 i kombinasjon med J6, men også utvelting langs J4 og J5.

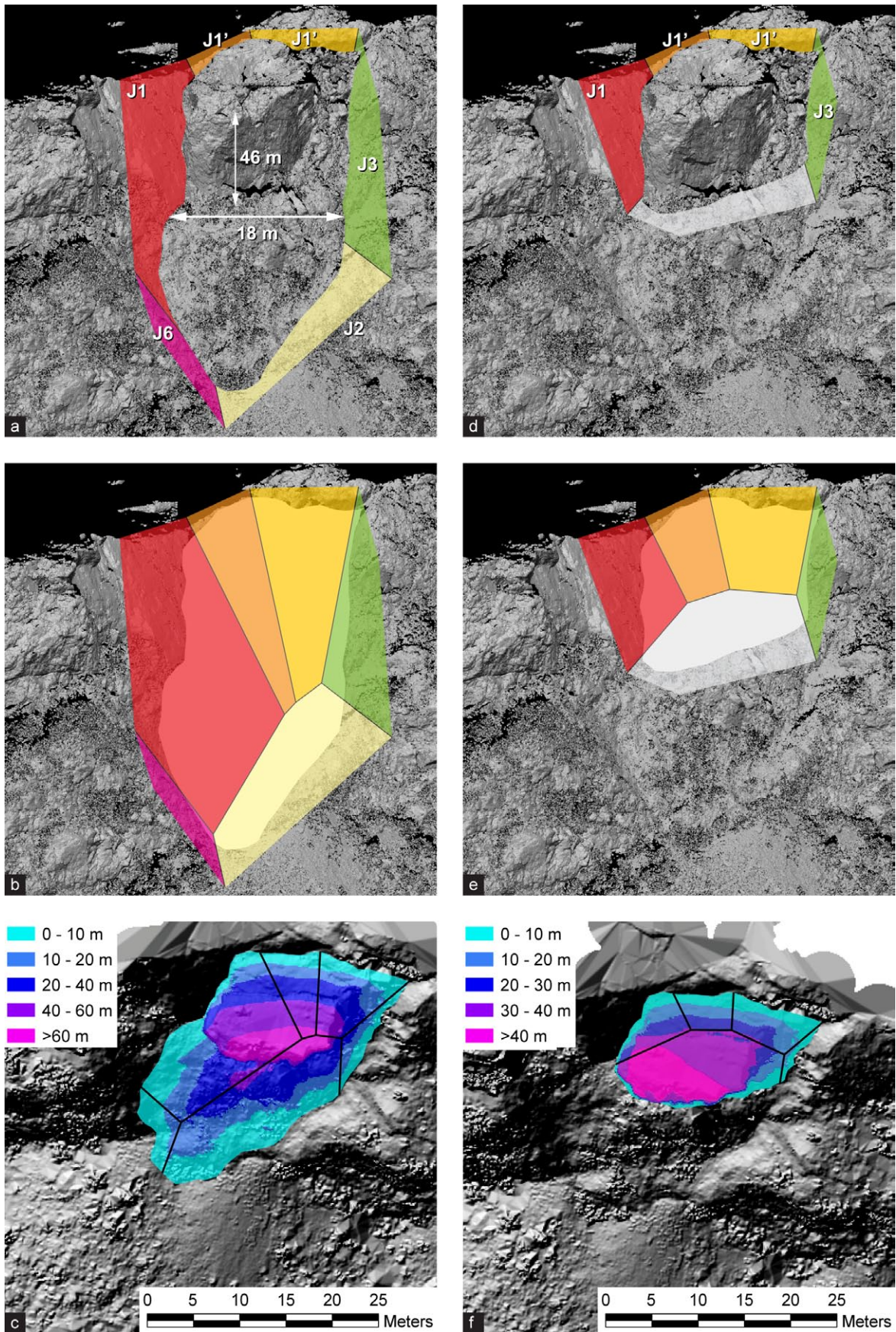
Sprekkesettet J2 faller mot sørvest med 40° og er sjeldent observert. Dette skyldes synsvinkelen av laserskanneren som gjør at flater dannet av J2 er dårlig representert i punktskyen. Det er mulig at flere av hullene i datasettet (svarte områder i Figur 22) faktisk er dannet av sprekkeseettet J2. Langs fronten av fjellpartiet finnes det et slakt, nord-hellende sprekkeseett (S1, blekblå i Figur 22). Dette kan identifiseres som fjellnets foliasjon ved sammenligning med feltnmålinger.

En kinematisk analyse ble utført basert på de innmålte strukturene og fjellsidens orientering (Figur 23). Denne analysen tester hvilke bruddmekanismer som er mulige for fjellens form fra et geometrisk synspunkt. Analysen tilsier at utglidninger langs sprekkeseettet J2 er mulige, enten som planutglidning eller som kileutglidning i kombinasjon med sprekkeseettet J6. I tillegg består den geometriske muligheten for utvelting langs de overhengende sprekkeseett J4 og J5. En utvelting er en mulig mekanisme for små utfall fra fronten av det ustabile fjellpartiet. Derimot er det ikke mulig for hele det ustabile fjellpartiet å velte ut, når man tar i betrakt fjellpartiets form, siden tyngdepunktet av fjellet er for langt bak.

4.2.3 Geometrisk modellering av bruddflater

Modelleringen av bruddflatene som avgrensner det ustabile fjellpartiet er basert på antakelsen om at overflatene som er synlig i morfologien fortsetter videre. Dette gjelder særlig for den bratte sørhellende bakskrenten, den østlige flanken, samt mulige nedre avgrensninger (Figur 20).

Bakskrenten er sammensatt av tre flater med bratt fall mot sør (rød flate i Figur 24: 173°/61°; oransje flate: 189°/64°; gul flate: 206°/66°). Den østlige flanken faller bratt mot vest (grønn flate i Figur 24: 264°/68°). Det finnes to mulige underliggende glideplan (blekgule flater i Figur 24): det nedre ved foten av et ganske oppsprukket område (246°/40°; Figur 24a, b) og det øvre ved foten av den vertikale fjellveggen (202°/41°; Figur 24d, e). I tillegg til det nedre mulige glideplanet finnes det en laterale struktur som avgrensner fjellpartiet mot vest (purpur flate i Figur 24a, b: 137°/53°). Orienteringen av disse bruddflatene stemmer bra overens med de innmålte sprekkeseettene, særlig for bakskrenten (J1 og J1'), det nedre mulige glideplanet (J2) og den laterale avgrensningen mot vest (J6), mens orienteringen av det øvre mulige glideplanet gjenspeiles ikke strukturmålingene (se kapittel 4.2.2 og Figur 22).



Figur 24: Modellering av bruddflatene og volumet til det ustabile fjellpartiet Lausefjellet for to mulige nedre avgrensinger: a)-c) for foten av oppknust sone og d)-f) for foten av den vertikale vegg. a) & d) viser flatene brukt for modellering av bruddflatene under det ustabile fjellpartiet med etiketter av tilhørende sprekkesett (3D bilde mot nord); b) & e) viser den modellerte overflaten under fjellpartiet (3D bilde mot nord); c) & f) viser høydeforskjell (i meter) mellom den nåværende overflaten og de modellerte bruddflatene som er framstilt som svarte snittlinjer (i kartvisningen).

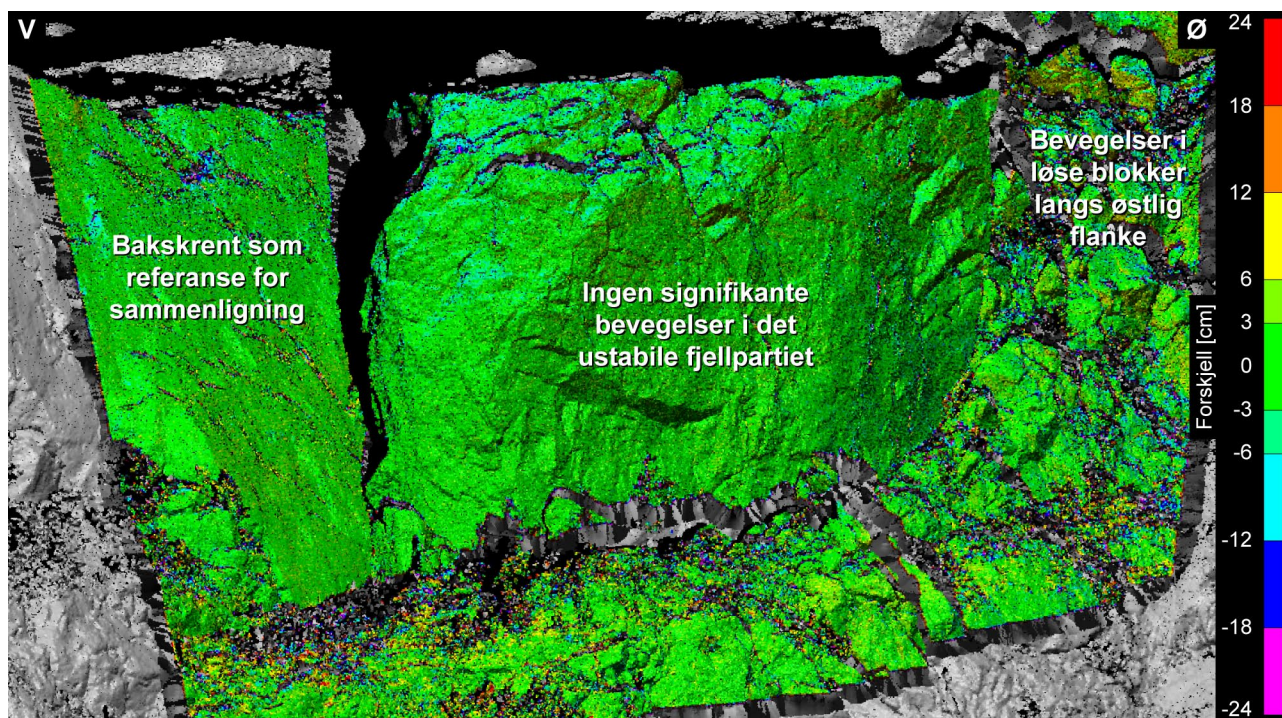
Figur 24a og d viser dagens morfologi rundt det ustabile fjellpartiet Lausefjellet, med de ulike flatene som er tilpasset morfologien. Det ustabile området er fjernet i Figur 24b og e, noe som viser tydeligere snittlinjene mellom de ulike flatene. For eksempel vises det i Figur 24b at snittlinjen mellom den røde bakskrenten og det gule glideplanet ikke har utgående i fjellsiden. Derfor trenges også den purpurfargete, laterale strukturen i vest slik at fjellpartiet er fullstendig avgrenset. Det øvre glideplanet i Figur 24e har derimot en gunstig orientering for å danne en planutglidning.

De modellerte bruddflatene ble brukt for å beregne høydeforskjellen mellom dem og dagens overflate, gitt av den høyoppløselige overflatemodellen (Figur 24c, f). Høydeforskjellen er opp til 76,4 m ved bruk av det nedre mulige glideplanet med en gjennomsnittlig høydeforskjell på 23,5 m. Høydeforskjellene er mindre ved bruk av det øvre mulige glideplanet med et maksimum på 46,4 m. Ved å summere høydeforskjellene over hele det ustabile området kan en beregne volumet av Lausefjellet til 159 000 m³ for det nedre glideplanet og 80 500 m³ for det øvre glideplanet. Presise volumestimater er viktige for å beregne skredets utløpsrekkevidde og dermed også mulige konsekvenser av et skred.

4.2.4 Bevegelsesmålinger

Punktskyer fra bakkebasert laserskanning fra 2014 og 2015 ble sammenlignet med referanseskann fra 2012. Som nevnt i kapittel 4.2.1 er referanseskannet ikke optimalt siden det bare omfatter den vestlige bakskrenten som stabilt område, noe som øker usikkerhetene. Derfor tillater datasettet ikke å oppdage bevegelser og andre forskjeller som er mindre enn ±3 cm.

Forskjellsmålingen mellom 2012 og 2015 viser ingen signifikante bevegelser i det ustabile fjellpartiet, men framhever noen bevegelser i løse blokker langs den østlige flanken (Figur 25). Bevegelsene til disse blokkene kan kvantifiseres til mellom 6 og 12 cm over 3 år. Målingen er imidlertid ganske usikker pga. relativ stor avstand mellom blokkene og det stabile referanseområdet. Dette gjør at små feil i sammenslåing av punktskyer (f.eks. noen tusendels grader i vinkel) amplifiseres til målbare forskjell jo lenger man kommer fra referanseområdet. Denne effekten kan tydelig reduseres ved å måle inn stabile områder på begge sider av et ustabil fjellparti.



Figur 25: Bevegelsesmålinger på det ustabile fjellpartiet Lausefjellet: sammenligning av skann fra 2012 og 2015 viser ingen signifikante bevegelser i det ustabile fjellpartiet, men framhever bevegelser i små løse blokker langs den østlige flanken med opp til 6-12 cm over 3 år.

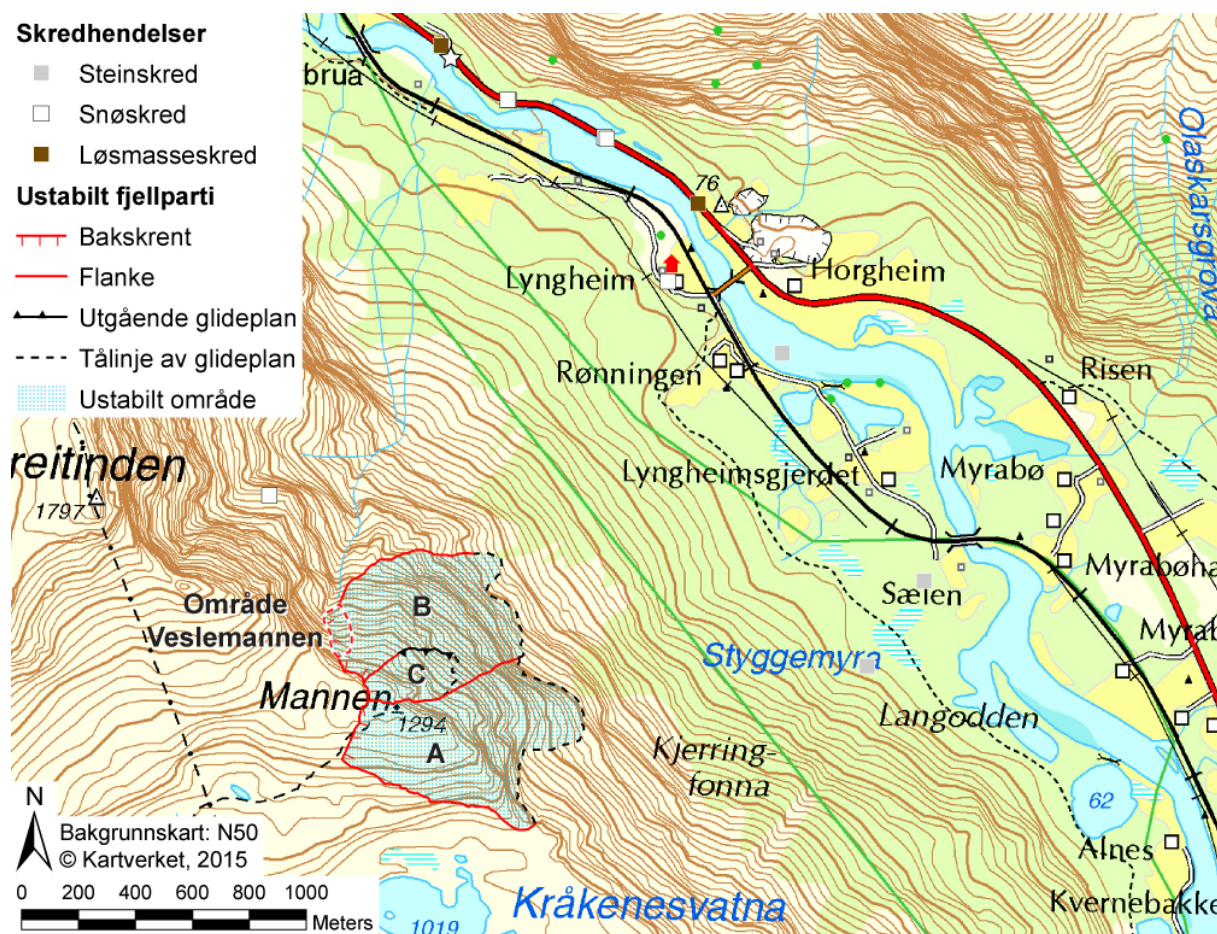
Det ble ikke utført en detaljert deformasjonsanalyse, verken av det ustabile fjellpartiet eller de små blokkene. Dette var fordi det ustabile fjellpartiet ikke viser tegn til bevegelse, og fordi målingene på de små blokkene er usikre pga. ovennevnte problemer.

4.3 Mannen

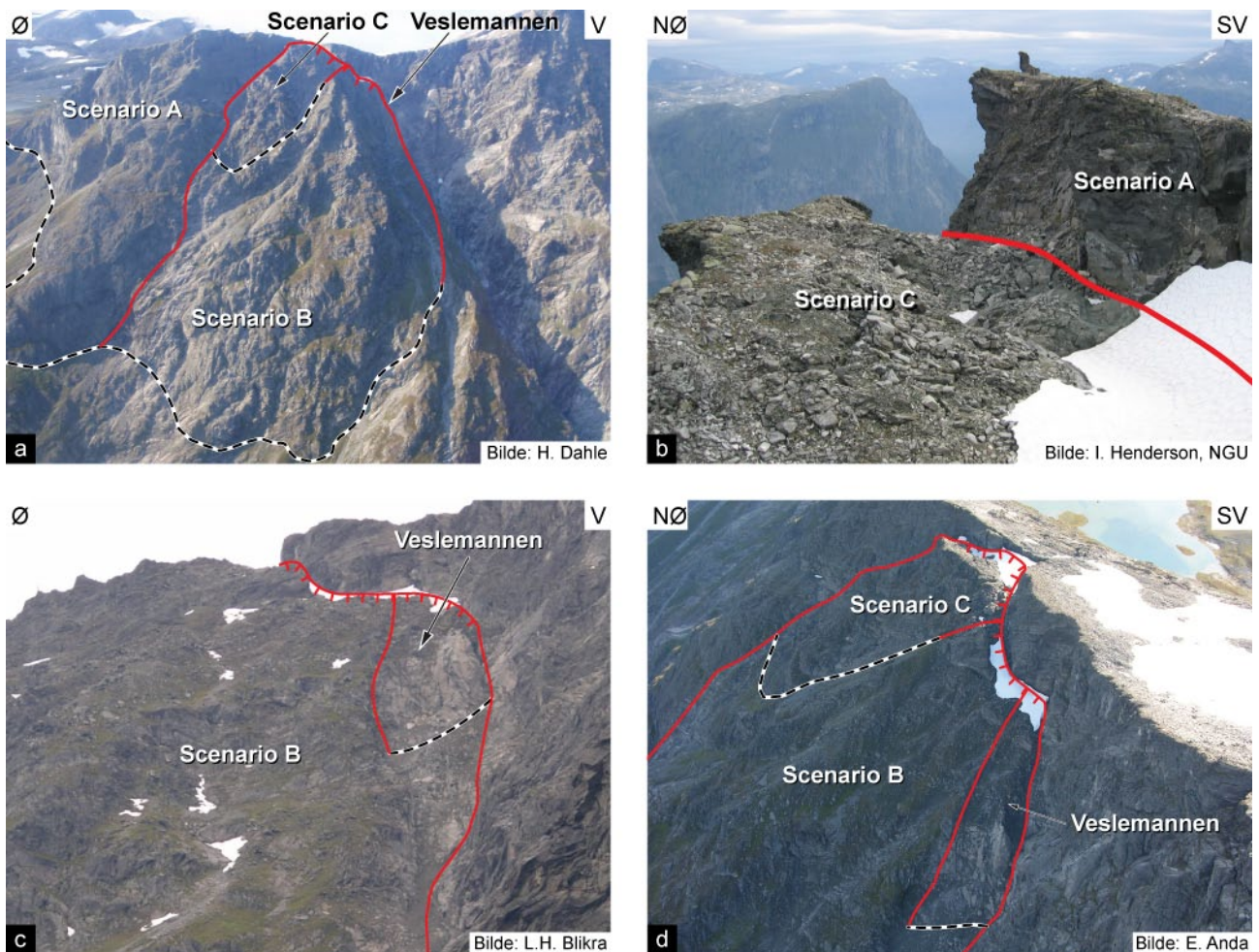
Mannen er et ustabil fjellparti ovenfor Rønningen i Romsdalen i Rauma kommune (Figur 26, Figur 27). Dette store, komplekse ustabile fjellpartiet er karakterisert av en subvertikal baksprekk bestående av to vegger orientert Ø-V og N-S som skiller platået og en terrasse som ligger omtrent 20 m lavere. I nordvest er fjellpartiet avgrenset av ei skredrenne og i sørøst av en bratt flanke. Fjellpartiet består av sterk oppsprukket gneis i ryggformer med enkelte skrenter og morfologiske depresjoner (Figur 27).

Siden 2009 har Mannen vært kontinuerlig overvåket av Åknes/Tafjord Beredskap IKS og et omfattende bevegelsesmålingsnettverk og varslingssystem er bygd opp. Overvåkingsnettverket består i dag av et permanent GPS-system, laseravstandsmåler, ekstensometer, en permanent bakkebasert radar (InSAR), og borehull med instrumenter for deformasjonsmålinger i dybde (DMS-kolonner). Per juli 2014 er bevegelsene oppimot 20 mm/år på det nedsegne platået. Det er en skarp overgang til områder med mindre bevegelse under dette, og bevegelsene er på noen få mm per år og avtar nedover fjellsida (L. Kristensen, NVE, personlig kommunikasjon).

Den foreløpige geologiske modellen viser mulighet for en planutglidning langs strukturer med gunstig orientering samt danning av en grabenstruktur/innsynking i øvre del av fjellpartiet. Flere scenarier er definert med et volum opp til 114 millioner m³ for det hele deformerte området (scenario A), 11–14 millioner m³ for scenario B og 1–2 millioner m³ for scenario C. Scenario C er det mest sannsynlige, basert på dagens bevegelsesmålinger. Et stort fjellskred fra Mannen kan krysse Romsdalen og demme opp elva Rauma, med fare for nedstrøms flom hvis demningen bryter (Dahle m.fl. 2011, Hermanns m.fl. 2013).



Figur 26: Kart over testområdet Mannen: scenarioene A, B og C og det aktive delområdet Veslemannen er vist. Plasseringen av bakkebasert laserskanner er vist med oransje stjerne. Historiske skredhendelser fra den nasjonale skredhendelsesdatabasen er vist med ulike punktsymboler for forskjellige skredtyper. Lineamenter som avgrenser det ustabile området er framstilt med ulike symboler.



Figur 27: Bilder av testområdet Mannen: a) oversiktsbilde med lokalisering av de ulike scenarioene, samt det aktive delområdet Veslemannen; b) detaljbilde av det nedsunkne topplået med omtrent 20 m forflytning; c) og d) detaljbilder av Veslemannen langs nordlig avgrensning av scenario B, som viser sterkere oppsprekking enn omgivelsene (merk at bildene i c) og d) ble tatt i hhv. 2005 og 2008).

I tillegg ble et mindre område med raske bevegelser oppdaget i høsten 2014. Dette området, kalt Veslemannen, befinner seg langs bakskrenten av scenario B og munner ut i skredrenna i nordvest. Veslemannen har et volum på 70 000–140 000 m³ og bevegelse var på det meste 5 cm/dag høsten 2014. På grunn av disse store hastighetene ble Mannen høsten 2014 valgt som testområdet for dette prosjektet.

Det aktive område Veslemannen ble innmålt med bakkebasert laserskanner i oktober og november 2014 og igjen i august 2015 fra samme posisjon nede i dalbunnen (Figur 26).

4.3.1 Datsett

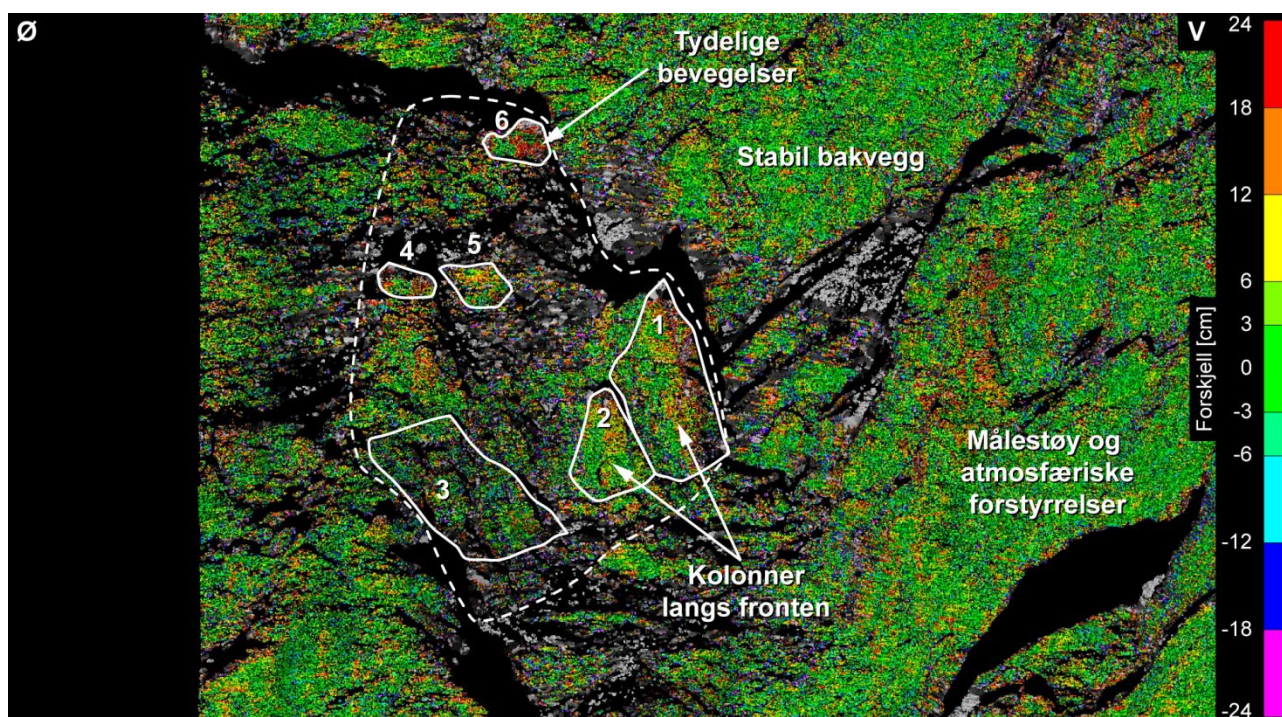
Det ustabile fjellpartiet Mannen ble innmålt med bakkebasert laserskanner to ganger høsten 2014 (23. oktober og 12. november 2014) og igjen den 23. august 2015 fra et sted i dalbunnen i Romsdalen (Figur 26). Skanningene fokuserte hovedsakelig på det svært aktive området Veslemannen med en gjennomsnittlig punktavstand på 8,2 cm med distanse ca. 2040 m. Den vertikale høydeforskjellen mellom skanneren og Veslemannen er omtrent 1100 m, noe som kan gi betydelige meteorologiske innflytelser som påvirker kvaliteten av skanningene.

Begge skanningene høsten 2014 ble utført mens det allerede lå et tynt, uregelmessig snødekke over studieområdet. Dette kan gi målbare forskjeller siden laserskanneren måler inn overflaten som den er. De bratte partiene av fjellsiden var derimot snøfrie og kan derfor brukes for å sammenligne ulike skann.

4.3.2 Bevegelsesmålinger

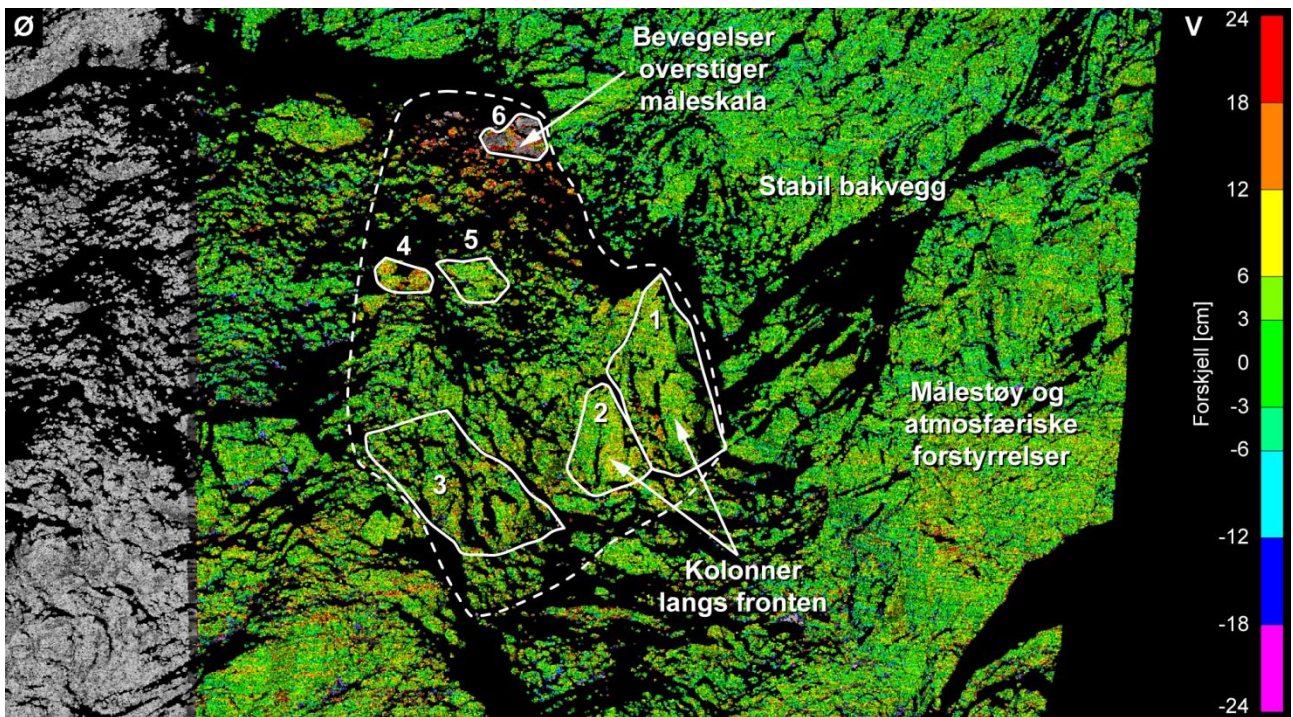
Sammenligning av skann fra oktober og november 2014 (Figur 28) viser svært stor målestøy, noe som gjør det vanskelig å måle bevegelsene i det ustabile området. Grunnen til støyen kan ikke bare være atmosfæriske innflytelser, men må også være en annen feil som påvirket skanningen i oktober 2014. Årsaken er ukjent og må ha skjedd under selve skanningen, og kan dermed ikke rettes opp.

Sammenligningen fra oktober til november 2014 viser også tydelige forskjell i den stabile bakveggen (Figur 28), men disse forskjellene tolkes som ikke-signifikant siden de mest sannsynligvis er forårsaket av det ovennevnte problemet med referanseskannet. Allikevel viser denne sammenligningen klare bevegelser i noen av blokkene i det ustabile fjellpartiet Veslemannen, men de er vanskelig å kvantifisere (Figur 28). En større blokk i bakre delen (#6 Figur 28) i viser de raskeste bevegelsene med over 18 cm i løpet av den 20 dagers måleperioden.

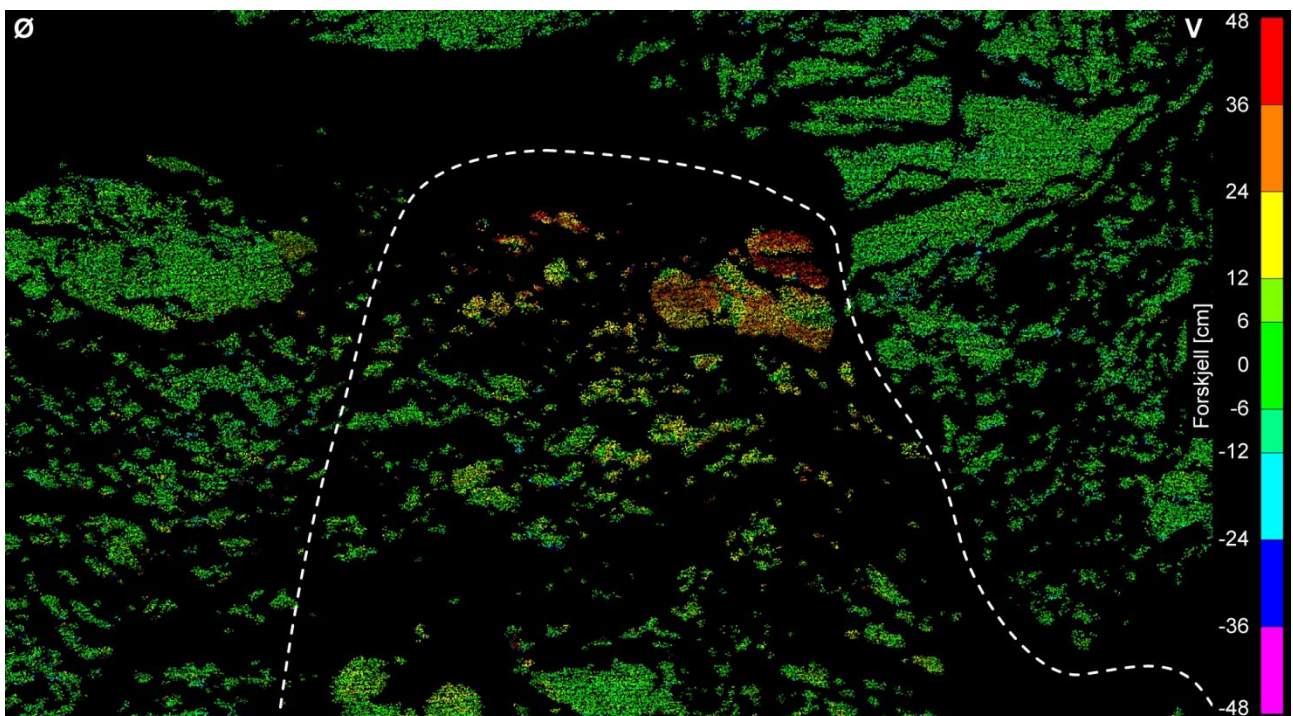


Figur 28: Bevegelsesmålinger på det ustabile fjellpartiet Veslemannen: sammenligning mellom skann fra 23. oktober og 12. november 2014 (20 dagers intervall) viser tydelige bevegelser i noen avgrensede blokker og kolonner på Veslemannen (nummerert og omringet i hvit), selv om målestøy og atmosfæriske forstyrrelser er svært store. Hele det aktive området Veslemannen er vist med stiplet linje.

For den følgende perioden fra november 2014 til august 2015 viser sammenligningen tydelige bevegelser i det ustabile fjellpartiet Veslemannen, særlig i bakre del, men også langs kolonnene i fronten (Figur 29). I bakre del er bevegelsene større enn 18 cm i den 284 dagers måleperioden. Blokk #6 viser mer enn 36 cm bevegelse i denne perioden (Figur 30). Toppen av en rygg i østlig del av området (#4 i Figur 29) viser også omtrent 12 cm bevegelse i samme tidsrom. Derimot viser fronten av denne ryggen (#3 i Figur 29) ingen tydelige tegn for bevegelse. De adskilte kolonnene i fronten av området (#1 og #2 i Figur 29) viser tegn til noen få cm bevegelser i løpet av vinteren og sommeren 2015, selv om de ikke skiller seg tydelig fra målestøy og atmosfæriske forstyrrelser. Disse forstyrrelsene skyldes den lange skannedistansen (> 2 km) og ulike meteorologiske forhold (kaldt og fuktig i november 2014, varmt og tørt i august 2015).



Figur 29: Bevegelsesmålinger for det ustabile fjellpartiet Veslemannen: sammenligning mellom skann fra 12. november 2014 og 23. august 2015 (284 dagers intervall) viser tydelige bevegelser i noen avgrensede blokker og kolonner på Veslemannen, selv om målestøy og atmosfæriske forstyrrelser er betraktelige.



Figur 30: Detalj av bevegelsesmålinger på den øvre delen av Veslemannen: sammenligning mellom skann fra 12. november 2014 og 23. august 2015 (284 dagers intervall) viser mer enn 36 cm bevegelser.

En rototranslasjonsanalyse av bevegelsene ble utført for 6 lokaliserte områder av Veslemannen (Figur 29) og for alle ulike måleperioder iht. metodikken beskrevet i kapittel 3.4. I denne analysen beregnes blokkenes bevegelser i tre dimensjoner, som kan være sammensatt av en utglidning (translasjon), en utvelting, samt en vridning rundt en vertikal akse (rotasjon). Fire referanseområder i nærheten av Veslemannen ble brukt for å estimere nøyaktigheten av analysen. Usikkerhetene er store for den første måleperioden fra oktober til november 2014 sammenlignet med den andre

perioden fra november 2014 til august 2015. Dette skyldes den store målestøyen i skannet fra oktober 2014. Gjennomsnittlig usikkerhet på lengden av bevegelsesvektoren er 7,0 cm med et maksimum på 12,1 cm i første måleperiode, men er mer enn halvert i andre måleperiode med et gjennomsnitt på 2,9 cm (maksimum: 5,3 cm). I første måleperiode er usikkerhetene gjennomsnittlig 0,12° (maksimum: 0,14°) for veltevinkelen og 0,02° (maksimum: 0,04°) for vridningsvinkelen. Disse usikkerhetene minker også i andre måleperiode med gjennomsnittlig 0,07° (maksimum: 0,22°) for veltevinkelen og 0,01° (maksimum: 0,03°) for vridningsvinkelen.

Resultatene fra rototranslasjonsanalysen er gitt i Tabell 3 og viser omtrent 10 cm forflytning mot nord mellom oktober 2014 og august 2015 for de to kolonnene i fronten av Veslemannen (#1 og #2). I tillegg til forflytningen viser kolonnene også en utvelting med hhv. ca. 0,3° til ØNØ og 0,5° til NNØ. Bevegelsene til område #3 er ikke signifikante for hele måleperioden, men indikerer en forflytning mot nordvest med ca. 4,7 cm mellom november 2014 og august 2015.

Blokkene i midtre del (#4 og #5) og bakre del av Veslemannen (#6) viser tydelige bevegelser med en koherent trend over de ulike måleperiodene (Tabell 3). Retningen av forflytningen er temmelig konstant mot nord med et fall på omtrent 30° for alle blokkene. Lengden til forflytningen varierer derimot med 11,9 cm for blokk #5, 23,0 cm for blokk #4 og 56,2 cm for blokk #6. De målte vinklene av utveltingen er også store med 0,53° for blokk #5, 1,23° for blokk #4 til 2,24° for blokk #6. Velteretningen er omtrent mot nordøst, noe som er på skrå i forhold til forflytningsretningen. Dette kan skyldes lokale geologiske og strukturelle forhold som bestemmer hvordan blokkene kan bevege seg for å fylle mulige åpninger og hull dannet av hele fjellsidens bevegelser.

Tabell 3: Detaljert bevegelsesanalyse for blokkene i det ustabile fjellpartiet Veslemannen basert på rototranslasjonsanalyse av bakkebaserte laserskannerdata mellom oktober 2014 og august 2015. Målingene i grått underlagte felt er ikke signifikante pga. måleusikkerhetene.

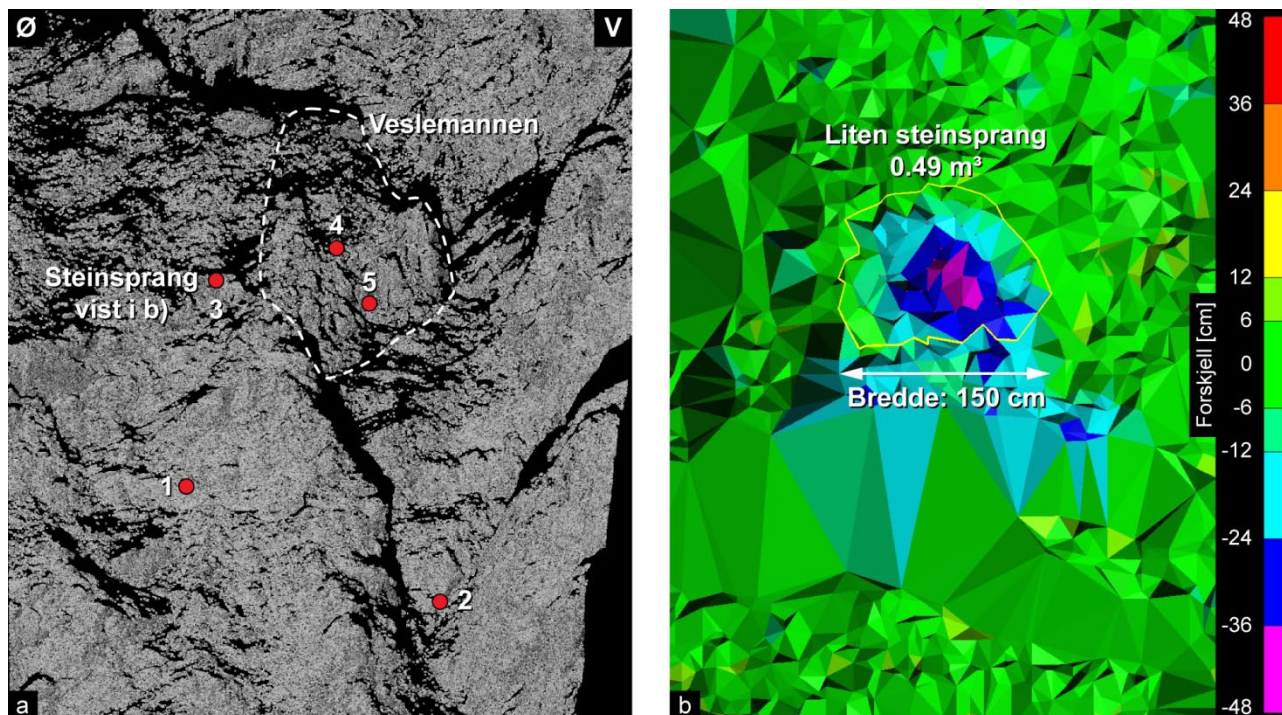
Blokk	Periode	Forflytning		Utvelting		Rotasjon [°]
		Lengde [cm]	Retning/fall med usikkerhet	Veltevinkel [°]	Velteretning med usikkerhet	
1	23.10.14 - 12.11.14	6,4	008°/03° ± 63°	0,18	41°N ± 36°	-0,37
	12.11.14 - 23.08.15	3,3	011°/11° ± 50°	0,18	112°N ± 25°	0,02
	23.10.14 - 23.08.15	9,7	009°/05° ± 44°	0,29	76°N ± 20°	-0,35
2	23.10.14 - 12.11.14	5,6	006°/-17° ± 71°	0,57	356°N ± 12°	-0,51
	12.11.14 - 23.08.15	5,4	334°/-31° ± 31°	0,20	114°N ± 22°	-0,12
	23.10.14 - 23.08.15	10,6	351°/-25° ± 40°	0,51	17°N ± 11°	-0,63
3	23.10.14 - 12.11.14	6,4	101°/25° ± 62°	0,10	279°N ± 71°	-0,03
	12.11.14 - 23.08.15	4,7	310°/-18° ± 36°	0,20	114°N ± 22°	-0,04
	23.10.14 - 23.08.15	3,1	053°/25° ± 136°	0,11	128°N ± 56°	-0,06
4	23.10.14 - 12.11.14	14,2	330°/18° ± 28°	0,63	58°N ± 11°	-0,18
	12.11.14 - 23.08.15	11,7	028°/43° ± 14°	0,61	55°N ± 7°	-0,28
	23.10.14 - 23.08.15	23,0	352°/32° ± 19°	1,23	57°N ± 5°	-0,47
5	23.10.14 - 12.11.14	7,5	019°/-06° ± 54°	0,34	5°N ± 20°	0,06
	12.11.14 - 23.08.15	7,1	024°/64° ± 24°	0,36	85°N ± 12°	0,00
	23.10.14 - 23.08.15	11,9	021°/28° ± 36°	0,53	46°N ± 11°	0,06
6	23.10.14 - 12.11.14	20,2	004°/11° ± 20°	1,23	58°N ± 5°	-0,99
	12.11.14 - 23.08.15	39,8	346°/53° ± 4°	1,32	1°N ± 3°	-0,24
	23.10.14 - 23.08.15	56,2	354°/39° ± 8°	2,24	29°N ± 3°	-1,25

Anmerkning: forflytningen, utveltingen og rotasjonen for hele måleperioden stemmer ikke nødvendigvis overens med summen av individuelle måleperioder fordi bevegelsene kan gå i ulike retninger. Dette er det tatt hensyn til i analysen.

4.3.3 Steinsprangsaktivitet

Sammenligningen av skann fra oktober 2014, november 2014 og august 2015 har påvist 5 små steinspranghendelser som har gått fra Veslemannen og omgivelsene (Figur 31a). Alle de 5 steinsprangene ble oppdaget i andre måleperiode. Steinsprangene vises som tydelig negativ forskjell mellom datasettene (Figur 31b) og disse forskjellene brukes for å beregne volumet til hendelsene (Tabell 4).

Volumberegningen viser at steinsprangene fra Veslemannen og området var ganske små, med volum fra 0,27 m³ til 1,46 m³ (Tabell 4). Steinsprangene har en bredde på 1,5 til 2,0 m og høyde på 1,1 til 1,9 m, med unntak av steinsprang #1 som er 3,3 m høyt. Den maksimale dybden eller tykkelsen av steinsprangene (målt som forskjell mellom laserskannerdatasett) er også ganske ensartet, med dybder på 0,31 til 0,49 m.



Figur 31: Steinsprangaktivitet på det ustabile fjellpartiet Veslemannen mellom 12. november 2014 og 23. august 2015: a) oversiktsbilde i 3D med lokalisering av steinspranghendelsene; b) forskjellsmåling for steinsprang nr. 3 (gult omriss) som var ca. 150 cm bredt, 171 cm høyt og opp til 48 cm dypt med et volum på 0,49 m³ (merk at området under steinspranget var snødekt i november 2014, men snøfritt i august 2015, og vises derfor som en negativ forskjell).

Tabell 4: Parametrer for steinspranghendelser ved Mannen mellom 12. november 2014 og 23. august 2015 inkludert bredde, høyde, maksimal dybde og volum til steinsprangene.

Steinsprang-nummer	Bredde [cm]	Høyde [cm]	Maks. dybde [cm]	Volum [m ³]
1	184	332	37	1,459
2	163	187	31	0,272
3	150	171	48	0,491
4	161	133	45	0,431
5	197	111	49	0,624

4.4 Oppdølstranda

Oppdølstranda er en 6,5 km lang strekning av riksvei Rv70 mellom Oppdøl og Sunndalsøra i Sunndal kommune (Møre og Romsdal) (Figur 32, Figur 33). Veistrekningen følger kystlinjen og går gjennom flere tunneler. Ca. 3,3 km av strekningen er utsatt for steinsprang som kommer fra fjellvegger flere hundre meter ovenfor veien. Det har vært flere skredhendelser de siste årene (Figur 33), og risiko for steinsprang langs veistrekningen er vurdert til høy (Moen 2009). Statens vegvesen har satt i gang flere overvåkings- og sikringstiltak, bl.a. steinsprangfangnett og periodiske målinger med bakkebasert radar (utført av Åknes/Tafjord Beredskap IKS). I august 2014 åpnet en ny tunnel som unngår hele det skredutsatte området, og den gamle veistrekningen er nå stengt for all ferdsel.

Et første datasett fra bakkebasert laserskanning ble samlet inn i 2010 av Universitetet i Lausanne i Sveits, i samarbeid med NGU, og på oppdrag av Statens vegvesen. Skanningen ble da utført både fra båt og fra flere plasser langs veien. Mellom 2012 og 2015 ble det utført årlige målinger med bakkebasert laserskanning langs veistrekningen, og også fra motsatt side av fjorden (Figur 32).

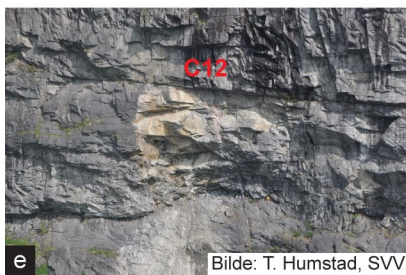
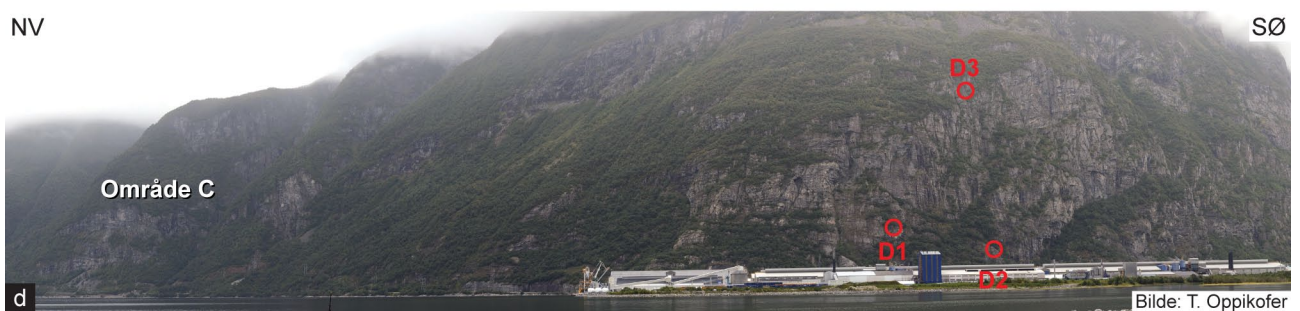
4.4.1 Datasett

De fire delområdene (A til D) langs den skredutsatte veistrekningen mellom Sunndalsøra og Oppdøl ble målt inn med bakkebasert laserskanner fra ulike plasser langs riksveien 70 i 2010, 2013 og 2015 (Figur 32). I tillegg ble delområdene C og D målt i 2012 og 2014 fra to plasser på motsatt side av fjorden (Figur 32). Avstanden mellom skanneren og fjellveggene er svært forskjellig for de ulike delområdene (ca. 100 m for område A, 400-500 m for område B, 200-250 for område C og 2,2 km for område D). Derfor er oppløsningen til skannene svært ulik og varierer fra ca. 4 cm punktavstand i områdene A og C til 7-8 cm i område B og 18 cm i område D.

Datasettene for områdene A, B og C er lite påvirket av atmosfæriske forstyrrelser, mens område D er sterk påvirket pga. stor avstand mellom skanneren og fjellveggen. Det finnes busker og små trær i mange skråninger (Figur 33), noe som gjør det vanskelig å oppdage steinsprang eller andre forskjeller i topografien bak vegetasjonen eller dens nærhet.



Figur 32: Kart over testområdet Oppdølstranda: den skredutsatte veistrekingen er inndelt i fire områder A, B, C og D (røde stiplede linjer). Seks plasseringer av bakkebasert laserskanner er vist med hvite stjerner. Historiske skredhendelser fra den nasjonale skredhendelsesdatabasen er vist med ulike punktsymboler for forskjellige skredtyper.

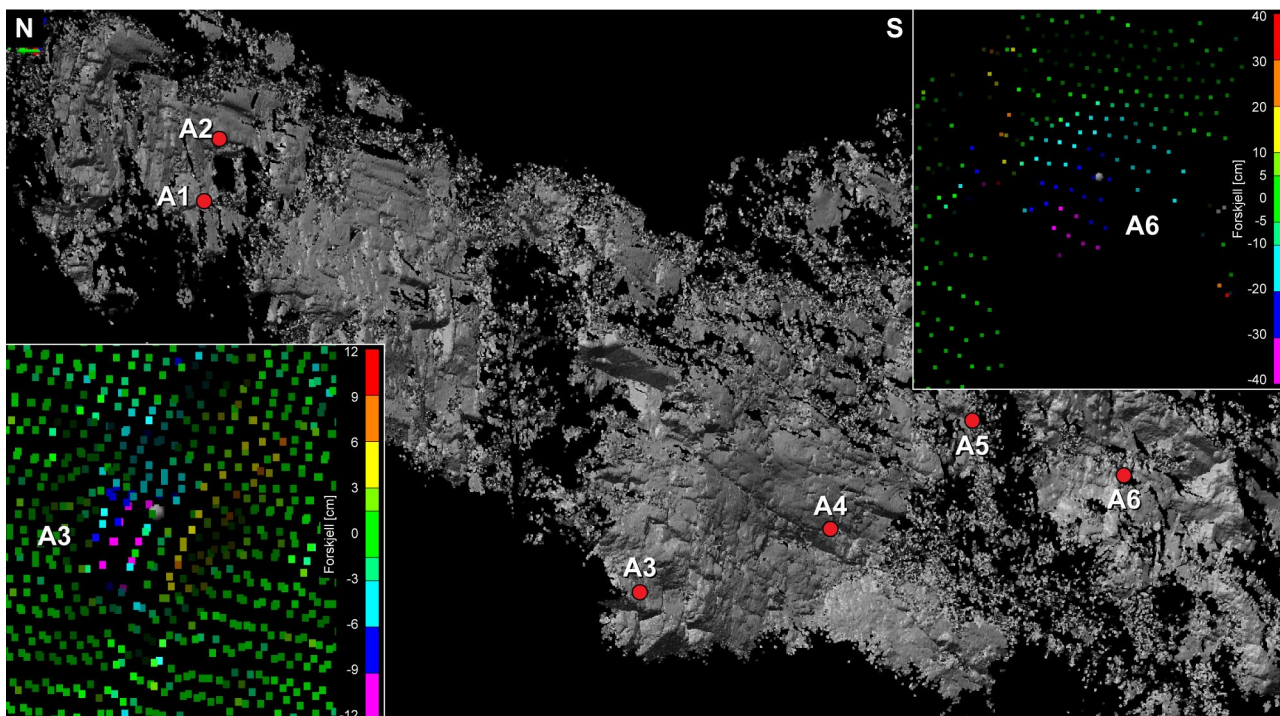


Figur 33: Bilder av testområdet Oppdølstranda: a) panoramabilde av område A; b) panoramabilde av område B; c) panoramabilde av område C; d) panoramabilde av område D; e) til g) bilder av steinspranghendelsen C12 som skjedde den 8. juni 2011. Punktene indikerer steinspranghendelser med tydelige topografiske forskjeller mellom 2010 og 2015.

4.4.2 Steinsprangsaktivitet i område A

Område A befinner seg ovenfor den nordlige enden av Midtbekktunnelen i ca. 50-100 m.o.h. (Figur 32, Figur 33a). Figur 34 viser punktskyen av området A samt lokalisering av 6 steinsprang som hendte mellom 2010 og 2015.

Volumene av de oppdagede steinsprangene er svært små. Steinsprang A3 er det minste med bare 0,015 m³ i volum og 18 cm i bredde. For steinsprang A3 er forskjellen mellom punktskyene mindre enn 12 cm og omfatter bare 40 punkt, noe som er helt på grensen av det som visuelt kan oppdages i sammenligningene (innsats i Figur 34). Steinspranget A6 har et volum på 0,24 m³ og er 60 cm bredt og opp til 40 cm dypt. Steinspranget A6 er dermed den største hendelsen i delområde A.

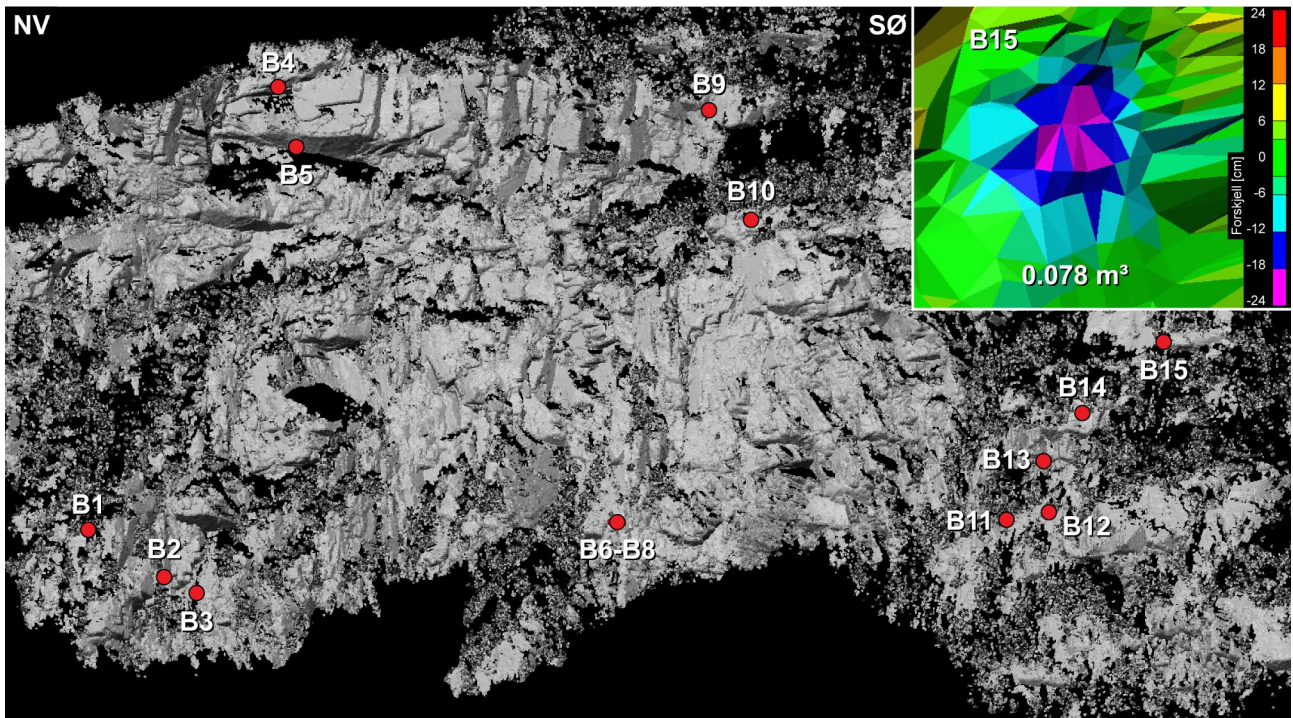


Figur 34: Steinsprangsaktivitet i måleperioden 2010 til 2015 i delområde A ovenfor nordlig ende av Midtbekktunnelen: seks steinsprang ble oppdaget. De innsatte bildene viser forskjellene for steinsprang A3 med opp til 12 cm i forskjell over en bredde på 18 cm, og for steinsprang A6 med opp til 40 cm i forskjell over en bredde på 60 cm.

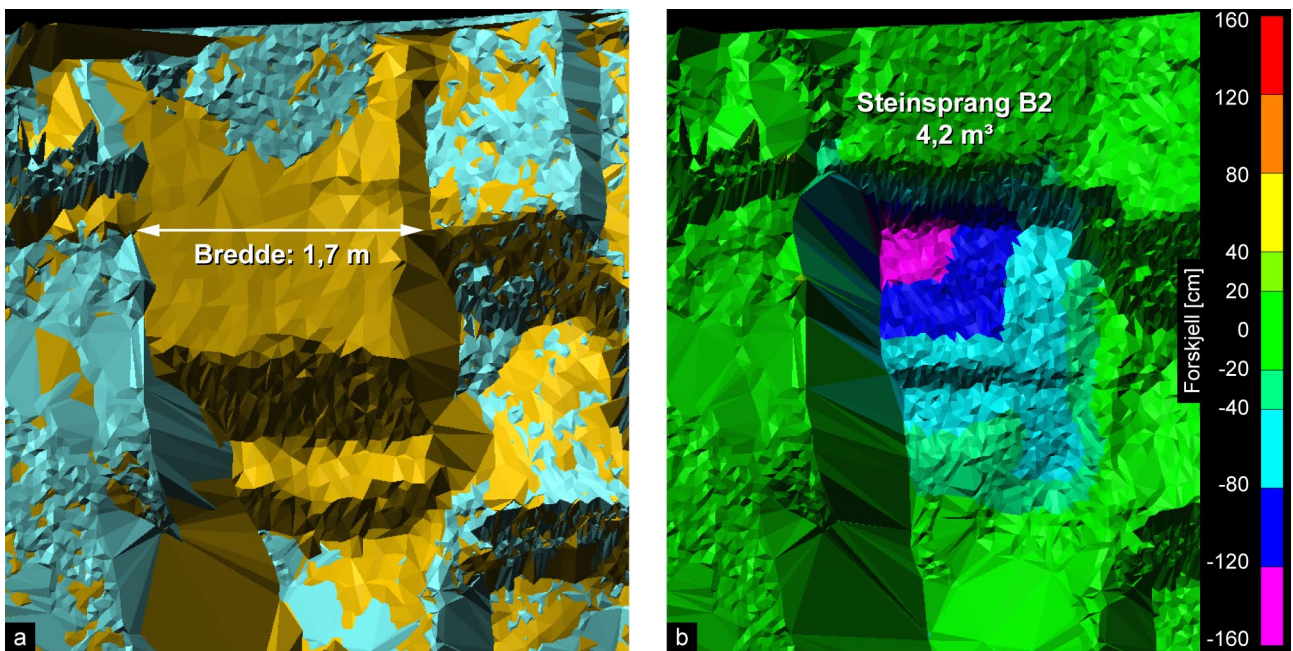
4.4.3 Steinsprangsaktivitet i område B

Område B er en 450 m lang strekning mellom Midtbekktunnelen og Trettøytunnelen, og ligger ca. 300-450 m.o.h. (Figur 32, Figur 33b). Sammenligning mellom datasett fra 2010 og 2015 har vist 15 områder med steinsprang (Figur 35). Steinsprangene er ikke jevnt fordelt over skråningen, men klynget sammen. 11 steinsprang skjedde ved foten av fjellveggen, hvorav tre løsnet på et lite område i midten av lokaliteten (steinsprang B6, B7 og B8).

De fleste av steinsprangene i delområde B har et lite volum, som for eksempel steinsprang B15 med 0,078 m³. Dette steinspranget er ca. 86 cm bredt, 1,1 m høyt og inntil 24 cm dypt (innsats i Figur 35). Steinsprang B2 skiller seg ut fra resten med betydelig større utbredelse og volum (Figur 36). Sammenligningen av laserskannerdata fra 2010 og 2015 viser tydelig formen til blokken som har løsnet fra et overheng. Blokken er hovedsakelig avgrenset av tre ulike sprekkesett, og har en nesten kubisk form: blokken er 1,7 m bred, 2,1 m høy og inntil 1,6 m dyp (Figur 36). Volumet til steinsprang B2 er beregnet til 4,2 m³.



Figur 35: Steinsprangaktivitet i delområde B: 15 steinsprang ble oppdaget i måleperioden 2010 til 2015. Det innsatte bildet viser forskjellene for steinsprang B15 med opp til 24 cm i forskjell over en bredde på 86 cm. Detaljer av steinsprang B2 er vist i Figur 36.



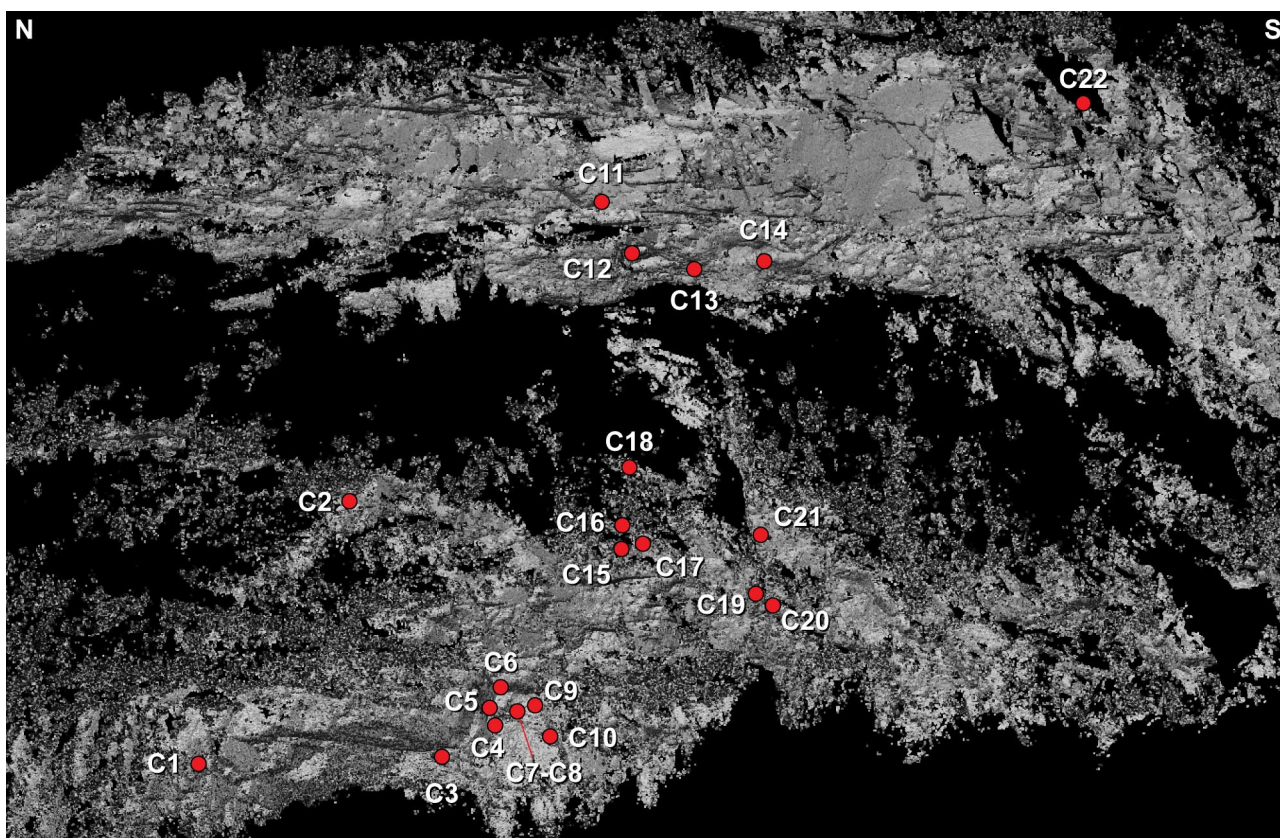
Figur 36: Detalj av steinsprang B2: a) blokkens form er synlig på datasettet fra 2010 (okergul). 2010-datasettet er tydelig foran 2015-datasettet (lyseblå). Blokken løsnet i et overheng som er vist som mørkt område; b) forskjellsmålingen mellom 2010 og 2015 viser at blokkens tykkelse er inntil 1,6 m.

4.4.4 Steinsprangsaktivitet i område C

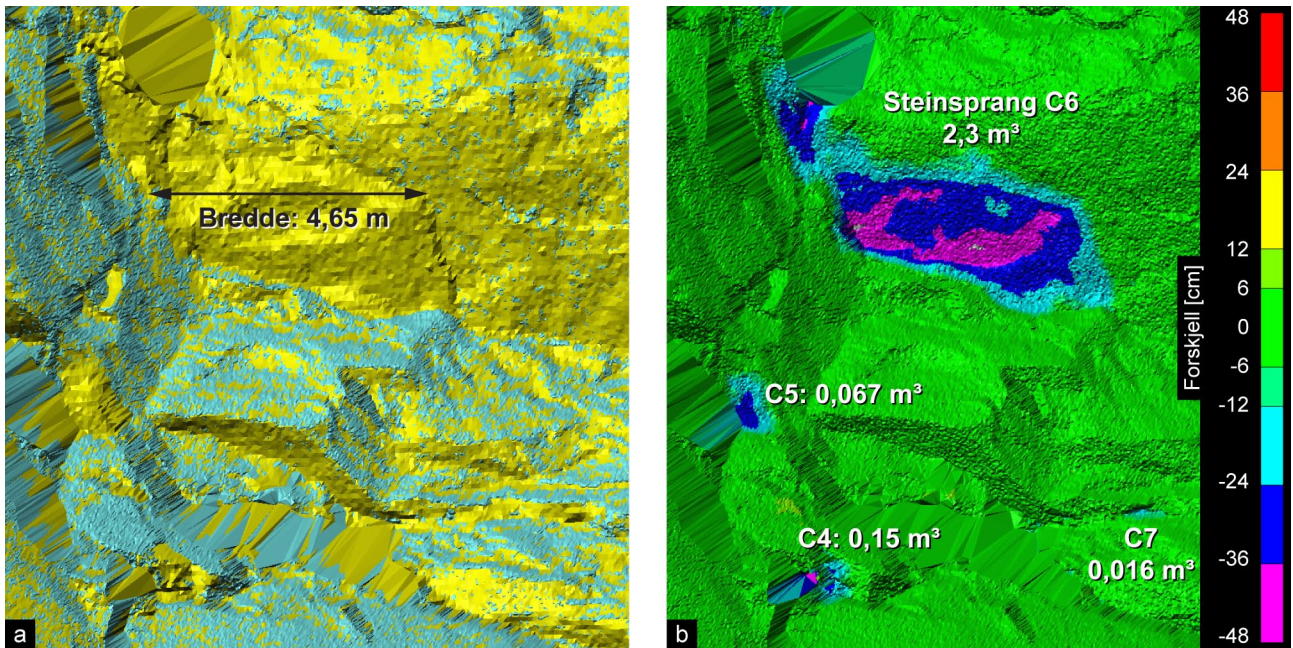
Område C er en 800 m lang strekning mellom Sandvikdalen og Tussdalen og ligger ca. 90-270 moh. (Figur 32, Figur 33c). Figur 37 viser lokaliseringen av 22 steinsprang som ble oppdaget i perioden 2010-2015, bl.a. det store steinspranget som skjedde den 8. juni 2011 (C12 i Figur 37, Figur 33e-g). De fleste steinsprangene løsnet fra den sentrale delen av området C, både fra den nedre fjellveggen (steinsprangene C3 til C10) og den øvre fjellveggen (C11 til C14), men også fra skråningen mellom fjellveggene (C15 til C21).

De fleste steinsprangene har små volum i størrelsesorden 0,1 til 0,3 m³, tilsvarende som volumene målt i andre delområder. Steinsprangene C6 og C12 var derimot mye større (Figur 38, Figur 39). Steinsprang C6 løsnet fra et overheng i den nedre fjellveggen. Blokken kan karakteriseres som et 4,65 m bredt og 1,8 m høyt flak som var mindre enn 50 cm tykt (Figur 38). Basert på forskjellen mellom skanningene fra 2010 og 2015 ble volumet av steinsprang C6 beregnet til 2,3 m³ (Figur 38b). Selv om området C6 er sammenhengende kan det hende at et litt adskilt område nord for hovedblokken løsnet i etterkant av hovedblokken. Volumet av dette adskilte området er estimert til 0,26 m³ og hovedblokkens volum reduseres i så fall til 2,0 m³. I nærheten av steinsprang C6 har det skjedd fem andre små hendelser i måleperioden (C4, C5 og C7 til C9), hvorav C4, C5 og C7 er synlige i Figur 38.

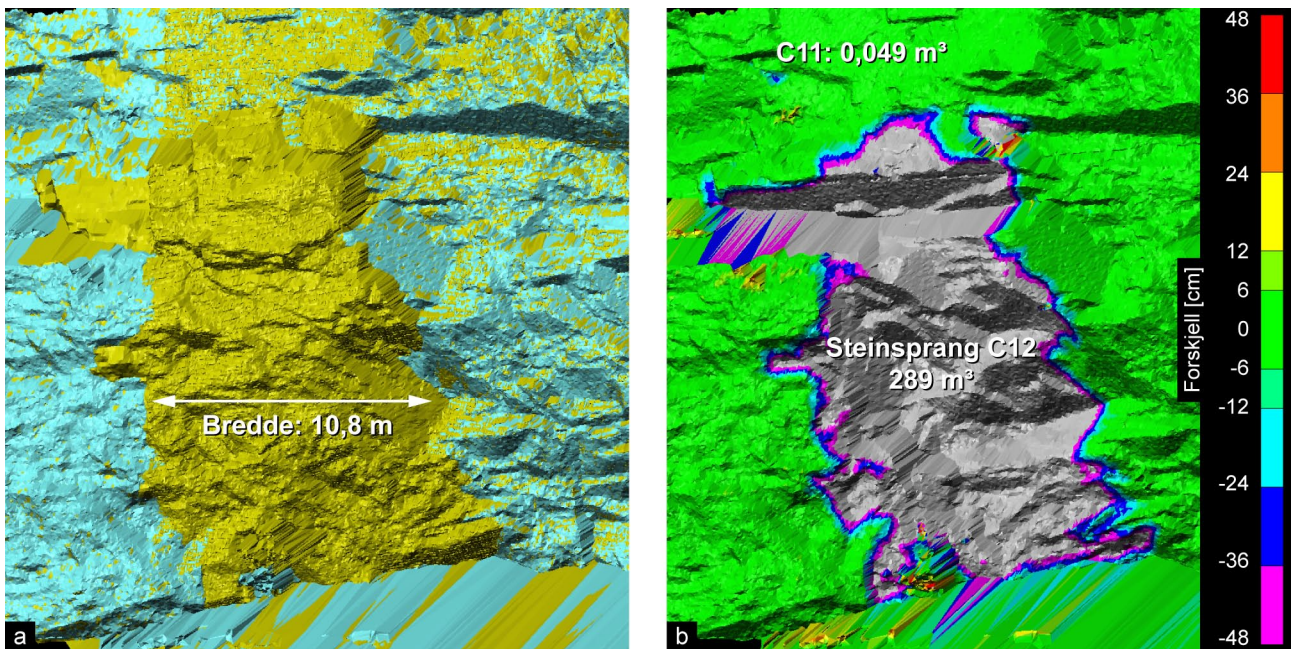
Steinspranget C12 som skjedde den 8. juni 2011 er tydeligvis den største hendelsen i måleperioden 2010-2015 i hele studieområdet. Steinspranget var ca. 10,8 m bredt, 19,9 m høyt og inntil 4 m tykt (Figur 39). Skredarret er også tydelig på bilder tatt etter hendelsen (Figur 33e). Det totale volumet til steinspranget C12 er beregnet til 289 m³, men steinspranget splittet seg opp i mange mindre blokker under fallet ned til riksveien Rv70 (Figur 33f, g). Skanningen etter steinspranget C12 viser en kompleks morfologi av bruddflaten som er sammensatt av mange sprekker, hvorav noen er overhengende (mørke flater i Figur 39b). Morfologien til den øvre delen av steinspranget C12 er forskjellig fra hovedblokken, noe som kan tyde på at den øvre blokken løsnet i etterkant av hovedblokken. Volumet av denne øvre delen er 72 m³, og volumet av hovedblokken reduseres dermed til 217 m³.



Figur 37: Steinsprangaktivitet i delområde C: 22 steinsprang ble oppdaget mellom 2010 og 2015, hvorav 19 skjedde i den sentrale delen av delområdet (C3 til C21). Detaljer av steinsprangene C6 og C12 er vist hhv. i Figur 38 og i Figur 39.



Figur 38: Detalj av steinsprang C6 og andre mindre steinsprang i området: a) blokken er et relativt tynt flak som løsnet fra et overheng. 2010-datasettet (gul) er tydelig foran 2015-datasettet (lyseblå). Blokken løsnet i et overheng som er vist som mørkt område; b) forskjellsmålingen mellom 2010 og 2015 viser blokkens tykkelse som er inntil 0,5 m.

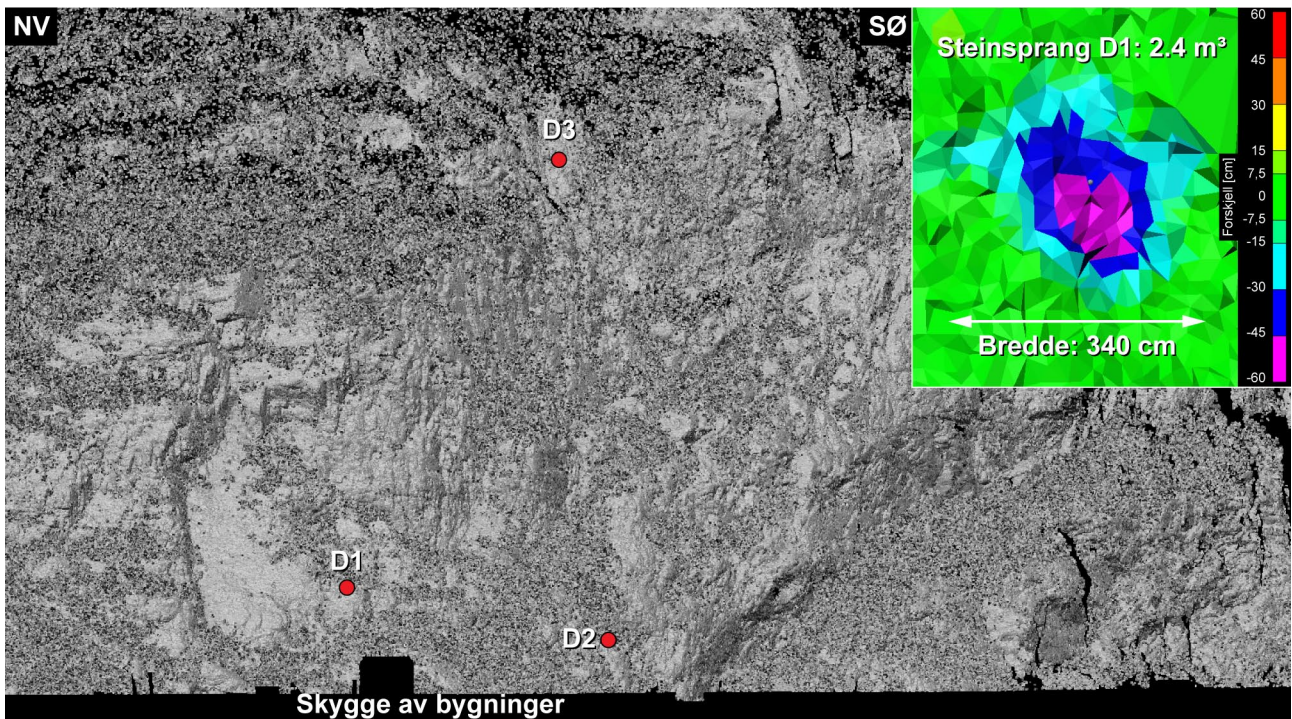


Figur 39: Detalj av steinsprang C12: a) en 10,8 m bred og 19,9 m høy blokk løsnet den 8. juni 2011 fra den vertikale til overhengende fjellveggen. 2010-datasettet (gul) er tydelig foran 2015-datasettet (lyseblå); b) forskjellsmålingen mellom 2010 og 2015 viser blokkens tykkelse som er inntil 4 m, men måleskalaen er redusert i bildet for å framheve avgrensingen av blokken, samt for å vise noen mindre delområder og andre steinsprang (C11).

4.4.5 Steinsprangsaktivitet i område D

Område D ligger ovenfor Hydro Aluminiums fabrikk i Sunndalsøra, og strekker seg fra havnivå til mer enn 400 moh. (Figur 32, Figur 33d). Figur 40 viser et utsnitt av punktskyen med lokaliseringen til tre steinspranghendelser som skjedde mellom 2012 og 2015.

Det største av steinsprangene i område D (D1) befinner seg 104 moh. Det er 3,4 m bredt, 3,2 m høyt og opp til 60 cm dypt, med et volum på 2,4 m³ (innsats i Figur 40). Fjellveggen ovenfor Sunndalsøra fremstår dermed som temmelig stabilt sammenlignet med andre fjellvegger i studieområdet Oppdølstranda.



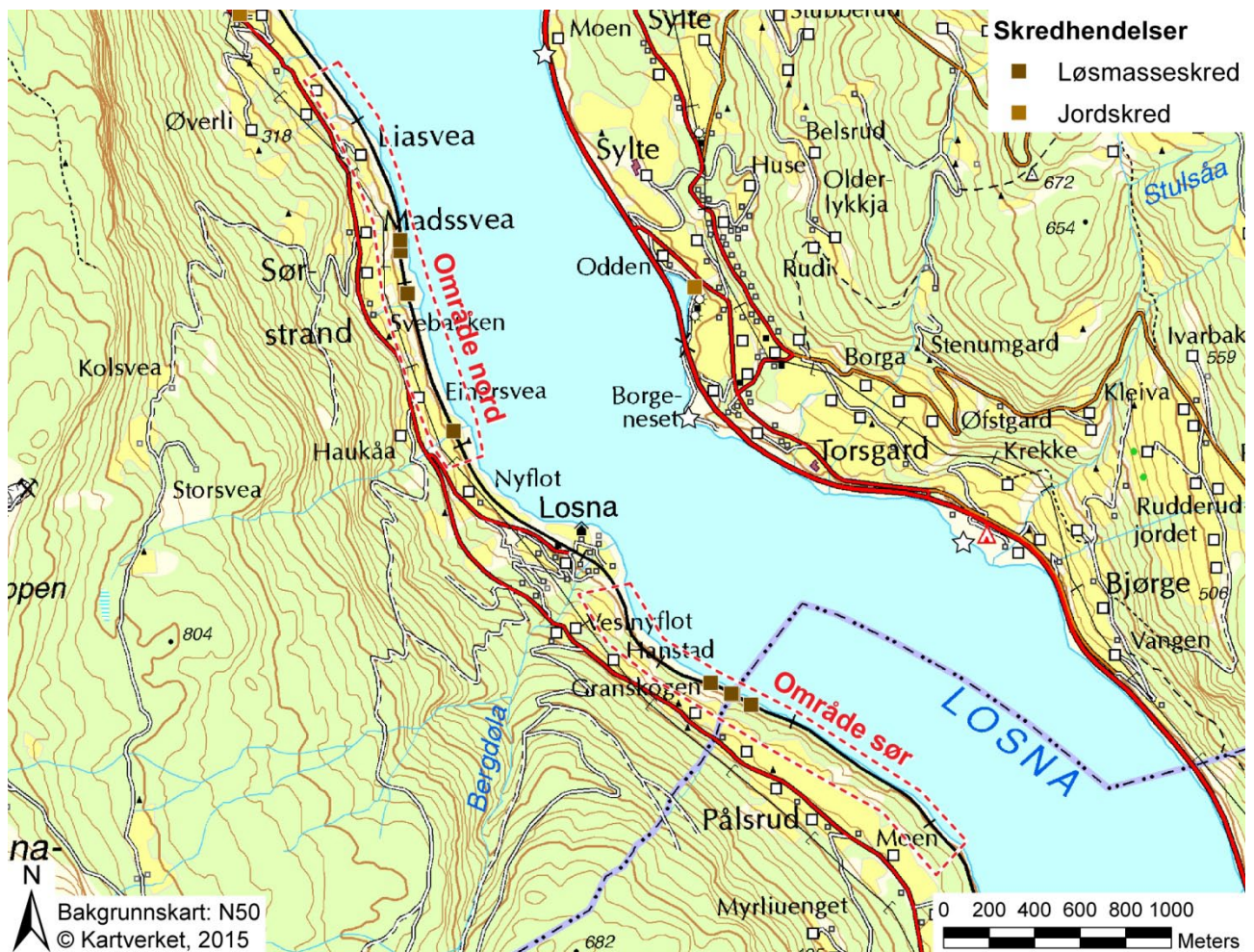
Figur 40: Steinsprangsaktivitet i måleperioden 2012 til 2015 i delområdet D ovenfor Sunndalsøra: det finnes spor etter tre steinsprang. Steinsprang D1 er den største hendelsen i området med et volum på 2,4 m³. Det innsatte bildet viser forskjellene for steinsprang D1 med opp til 60 cm i forskjell over en bredde på 3,4 m. Skyggen til bygningene fra Hydro Aluminium-fabrikken er tydelig synlig i punktskyen.

4.5 Losna

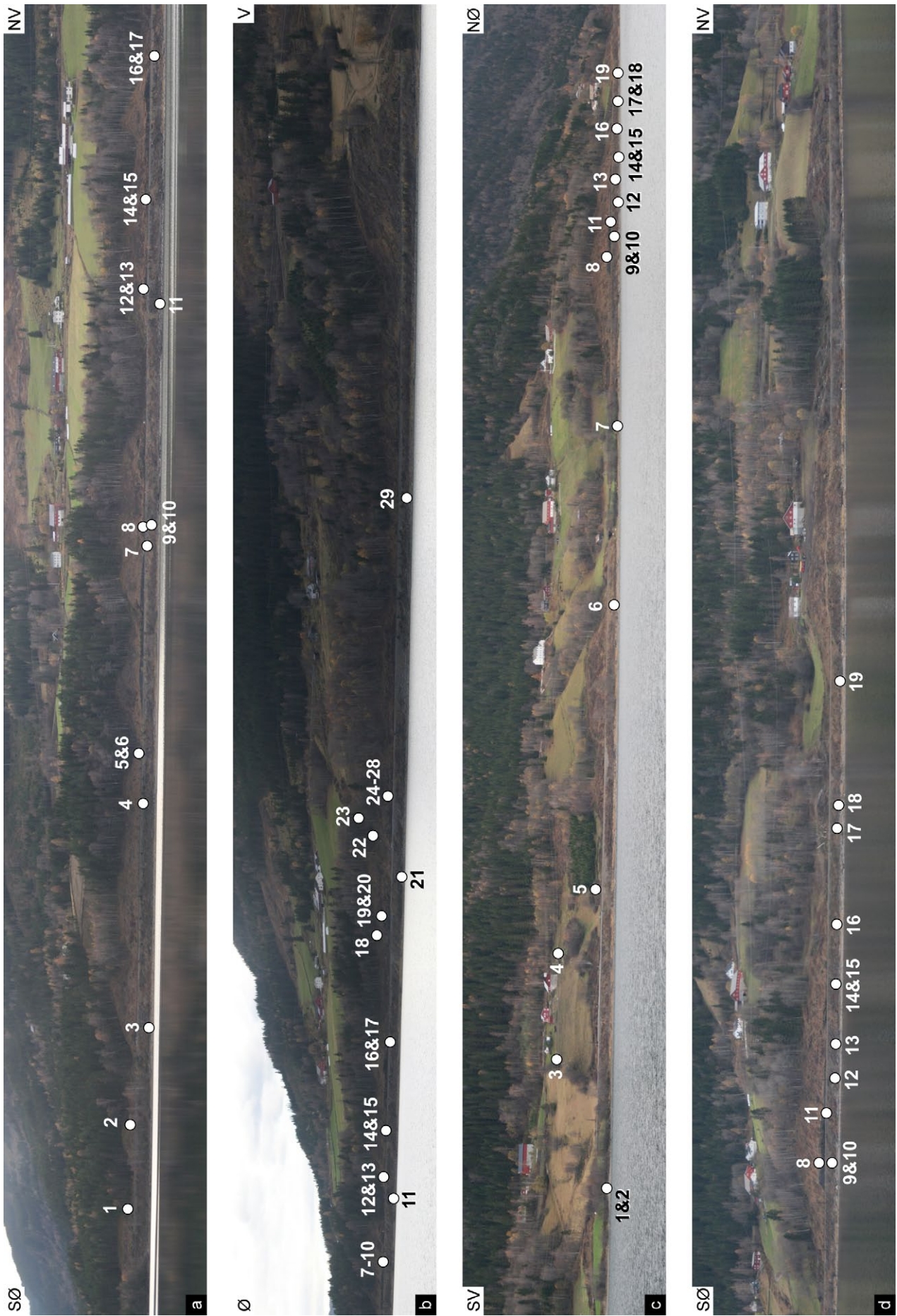
Studieområdet langs innsjøen Losna i Ringebu kommune (Oppland) befinner seg langs Dovrebanen. Området omfatter en 1,2 km lang strekning rundt Madssvea nord for Losna stasjon og en 1,9 km lang strekning mellom Hanstad og Moen sør for Losna stasjon (Figur 41, Figur 42). Jernbanesporet følger innsjøen og er utsatt for jordskred og utglidninger i løsmasser. I skredhendelsesdatabasen er det registrert 7 løsmasseskred i det nordlige delområdet og 6 skred i det sørlige delområdet (Figur 41). I forbindelse med vedlikeholdsarbeider høsten 2013 ble trærne hogget og vegetasjonen kuttet i større områder ovenfor og nedenfor jernbanesporet (Figur 42). Det eksisterer ingen tidligere målinger om skråningsprosesser i området, bortsett fra de registrerte skredhendelsene.

4.5.1 Datasett

Området rundt jernbanelinjen i testområdet Losna ble innmålt med en bakkebasert laserskanner i 2013, 2014 og 2015 fra tre lokaliteter fra motsatt side av innsjøen (Figur 41). Distanse mellom skannerplasseringene og studieområdet spenner fra 950 m til 1600 m. Med den valgte skannopløsningen gir dette en gjennomsnittlig punktavstand mellom 4,0 og 9,5 cm.

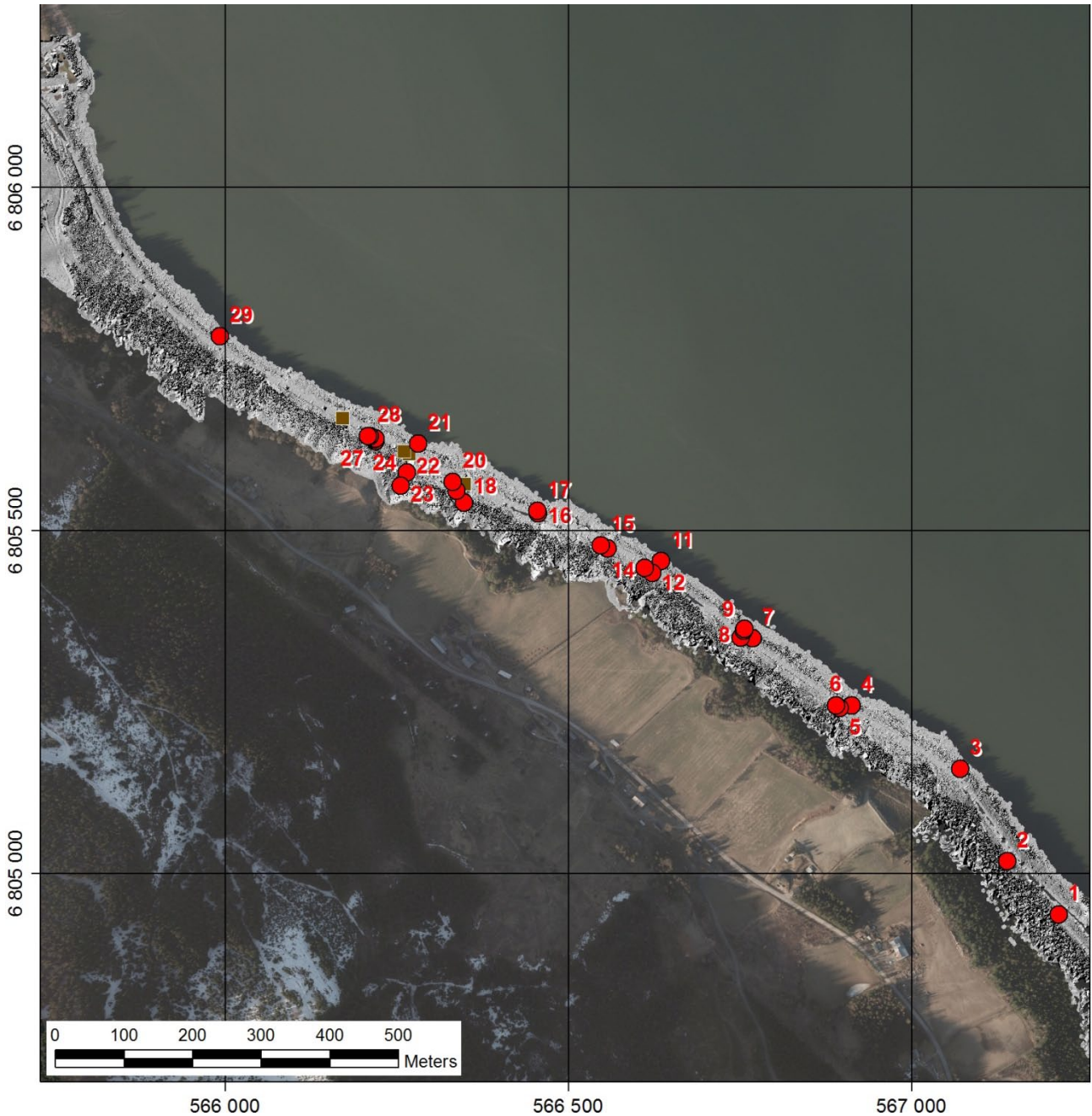


Figur 41: Kart over testområdet Losna: den skredutsatte jernbanestrekningen er inndelt to områder, henholdsvis sør og nord for Losna stasjon (røde stiplede linjer). Plasseringer av bakkebasert laserskanner er vist med hvite stjerner. Historiske skredhendelser fra den nasjonale skredhendelsesdatabasen er vist med ulike punktsymboler for forskjellige skredtyper.

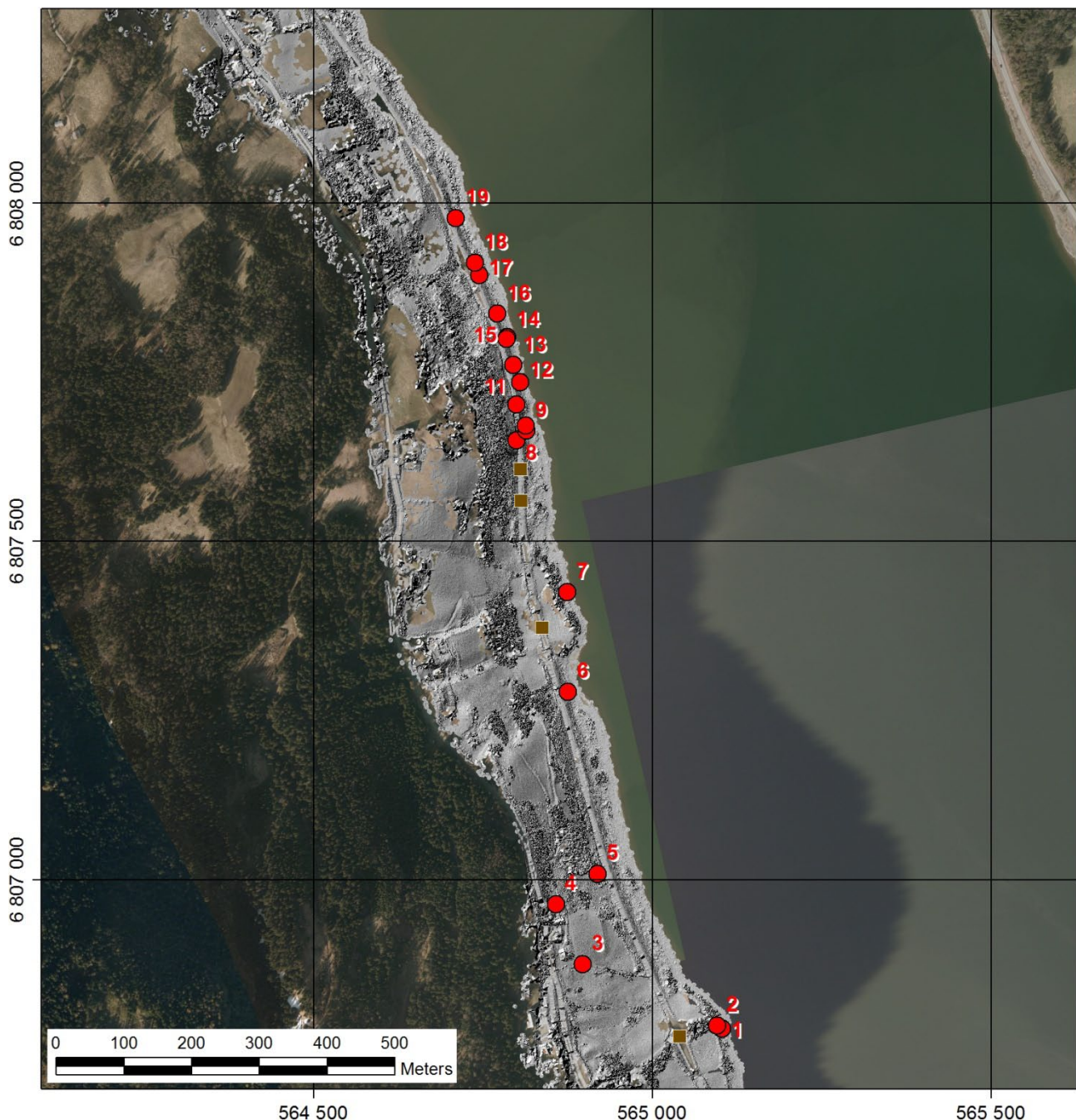


Figur 42: Bilder av testområdet Losna: a) og b) panoramabilde av delområdet sør; c) og d) delområdet nord. Punktene og numrene indikerer områder med tydelige topografiske forskjeller mellom 2013 og 2015.

Det sammensatte og georefererte datasettet består av over 44 millioner punkter for delområdet sør for Losna stasjon og 17 millioner punkter for delområdet nord for Losna stasjon. Datasettet ble brukt for å lage en digital overflatemodell av det ustabile fjellpartiet (Figur 43 og Figur 44). Modellen med en cellestørrelse på 25 cm ble laget i programvaren GlobalMapper og representerer ikke bare topografien, men også en god del vegetasjon og felte trær.



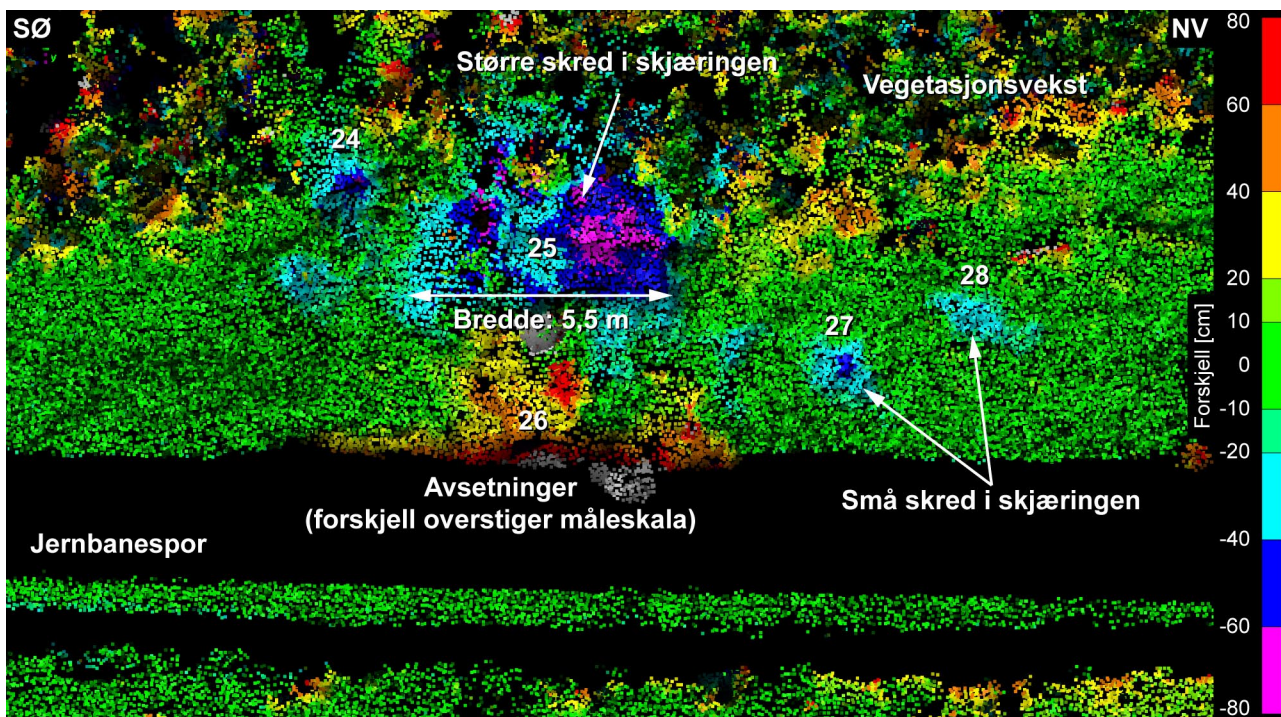
Figur 43: Digital overflatemodell av det sørlige delområdet. De røde punktene og numrene indikerer områder med tydelige topografiske forskjeller mellom 2013 og 2015. Historiske jordkredhendelser fra den nasjonale skredhendelsesdatabasen er vist med brune kvadrater. Koordinatene i UTM32N.



Figur 44: Digital overflatemodell av det nordlige delområdet. De røde punktene og numrene indikerer områder med tydelige topografiske forskjeller mellom 2013 og 2015. Historiske jordskredhendelser fra den nasjonale skredhendelsesdatabasen er vist med brune kvadrater. Koordinatene i UTM32N.

4.5.2 Skredaktivitet og menneskelig inngrep

Forskjellmålingene mellom 2013 og 2015 viser mange områder med tydelige forskjeller, hvorav 29 områder er i sørlig del og 19 i nordlige del av studieområdet (Figur 43 og Figur 44). Flertallet av disse områdene befinner seg rett ovenfor eller nedenfor jernbanesporet og er dermed i området der vegetasjonen ble kuttet og trær felt i forbindelse med vedlikeholdsarbeider utført av Jernbaneverket høsten 2013. Mange av forskjellene kan derfor være forårsaket av menneskelige inngrep, som rydding av vegetasjon og fjerning av ustabile løsmasser. Under skanningen høsten 2013 var det for eksempel mange felte trær i hele studieområdet, som kanskje ble fjernet av arbeidere i etterkant. Årsaken til de målte forskjellene kan dessverre ikke utredes fra laserdatasettene. Det antas derfor i det følgende at alle forskjeller skyldes naturlige årsaker, som utglidninger, skred og erosjon. Områdene som har tydeligst morfologi fra naturlige skråningsprosesser er analysert videre og vist i Figur 45 til Figur 48.



Figur 45: Forskjellmålinger mellom 2013 og 2015 ved punktene 24 til 28 i delområdet sør for Losna st. Flere små og et større skred eller fjerning av masser, og tilhørende avsetninger finnes i skjæringen rett ovenfor jernbanesporet.

Den romlige fordelingen av endringene viser sammenklynngning av områder med forskjeller, særlig nord for Losna st. der 12 områder (punkter 8 til 19) finnes i en mindre enn 400 m lang strekning (Figur 44). I det sørlige delområdet finnes det mange klynger med 3 til 5 områder med forskjeller, som for eksempel punktene 4-6, 7-10, 11-14 og 24-28 (Figur 43). Området mellom punktene 18 og 28 i sørlig delområdet er mindre enn 250 m langt og har tidligere vist størst skredaktivitet (6 jordskredhendelser) (Figur 43). Seks av de syv historiske jordskredhendelsene i nordlige delområdet skjedde i områder der det også ble målt forskjeller mellom 2013 og 2015 (Figur 44).

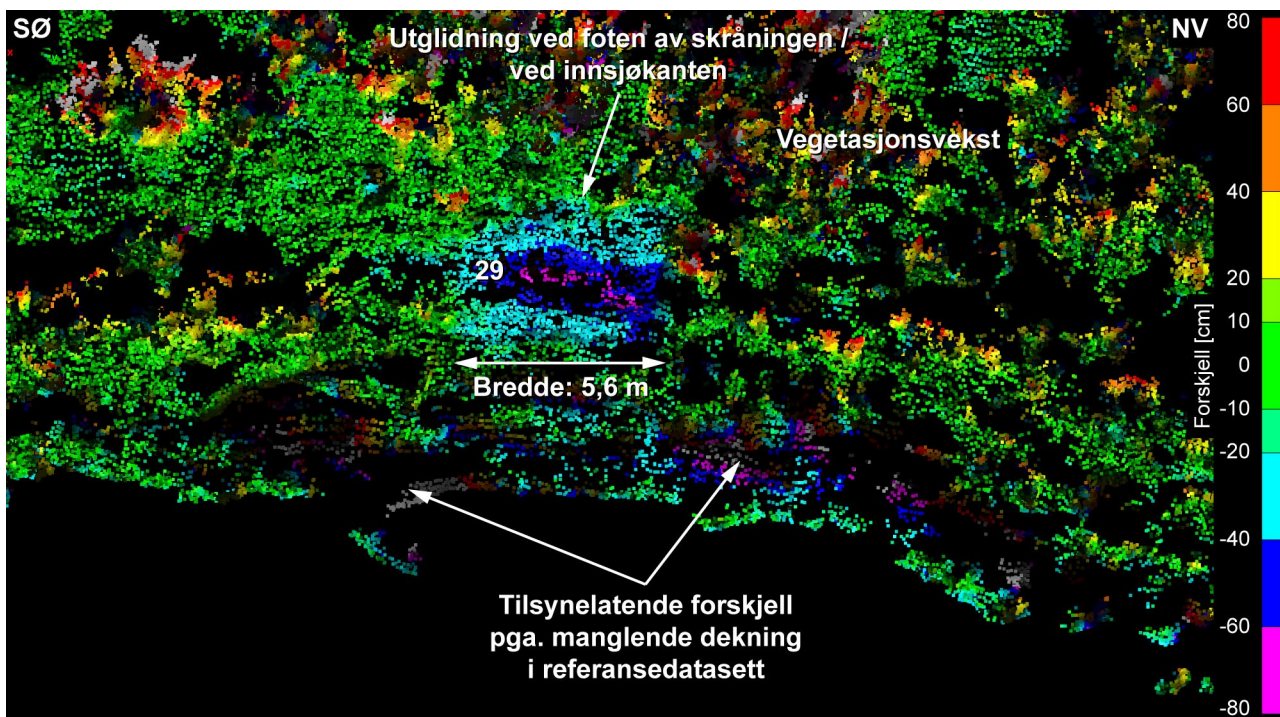
Forskjellmålingen mellom 2013 og 2015 for området rundt punktene 24 til 28 i det sørlig delområdet er vist i Figur 45. Området befinner seg i en skråning rett ovenfor jernbanesporet og det finnes fire plasser med tydelig tegn etter skred eller fjerning av masser (punkter 24, 25, 27 og 28). Punktet 25 er ca. 5,5 m bredt og opp til 0,8 m dypt. Volumet er anslått til å være 13,3 m³. Ved foten av denne skråningen og rett under punktet 25, finnes det avsetninger (positive forskjeller ved punkt 26), som kan stamme fra en utglidning i skjæringen. Måleforskjellen for avsetningene overstiger måleskalaen i Figur 45. Avsetningene ble bare delvis målt av laserskanneren, så volumanslaget på 4,4 m³ er derfor et minimum. Andre små skred i skjæringen har et volum mellom 0,66 og 1,0 m³. Vegetasjonsveksten er også veldig synlig i Figur 45.

Området 29 sør for Losna st. er en tydelig utglidning ved kanten av innsjøen (Figur 46). I forskjellmålingene mellom 2013 og 2015 vises denne utglidningen som et sammenhengende område med negative forskjeller på over 5,6 m i bredde, 4,0 m i høyde, og opp til 0,8 m i dybde. Volumet av utglidningen er beregnet til 8,1 m³. Utglidningen har skjedd mellom høsten 2013 og 2014, muligvis under flommen den 8. juli 2014 (NRK, 2014). Tilsvarende utglidninger, men med mindre utstrekning og volum, ble oppdaget flere steder sør og nord for Losna st. Dette antyder at skråningen nedenfor jernbanesporet noen steder kan være ustabil, særlig langs innsjøkanten der en variasjoner i vannivå kan destabilisere skråningen.

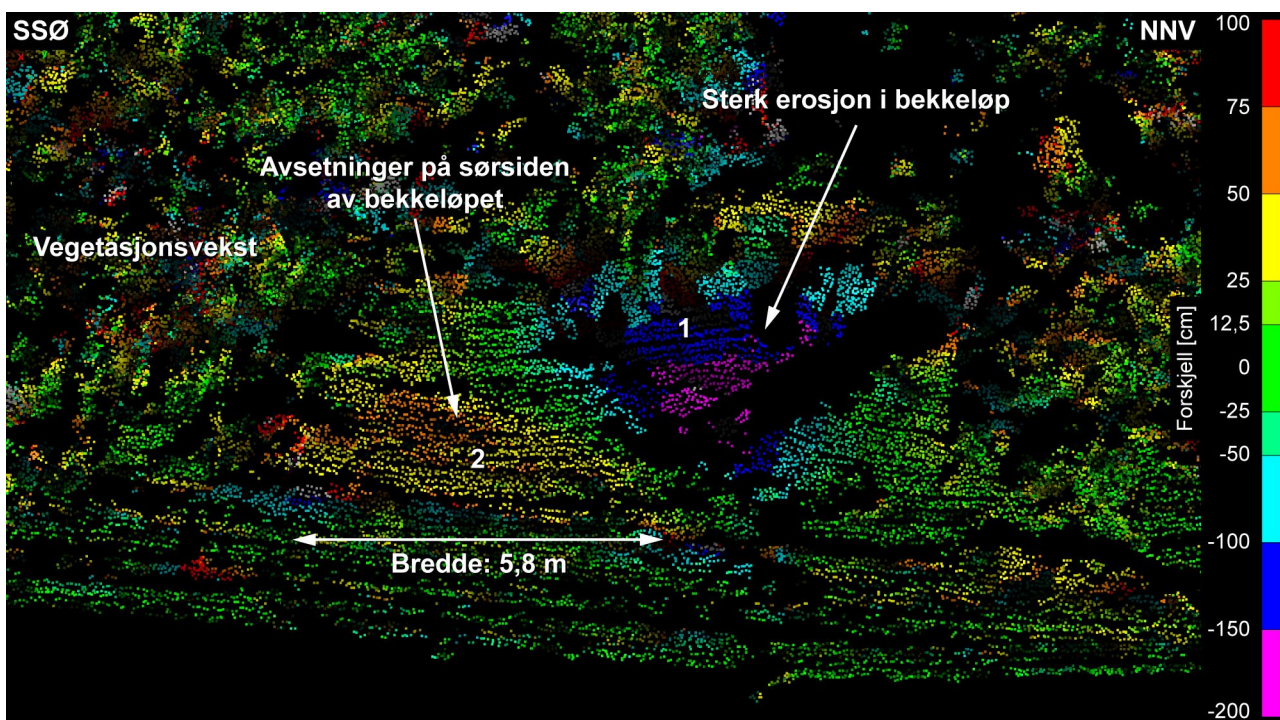
Områdene 1 og 2 nord for Losna st. er en flere meter dyp erosjon av skråningen i Haukåbekken (Figur 47). Flomskred i Haukåbekken har tidligere tettet stikkrennen under jernbanesporet og ført til skader (tre registrerte hendelser, sist i mai 2013). Det eroderte området i bekkeløpet er minst 6 m bredt og 9 m langt med et volum på minst 59 m³. Volumet er sannsynligvis større fordi

laserskannermålingene ikke dekker det hele eroderte området (Figur 47). På sørsiden av bekkeløpet finnes det tydelige tegn på avsetninger med opp til 75 cm i forskjell mellom 2013 og 2015. Volumet av avsetningen er estimert til 18,3 m³.

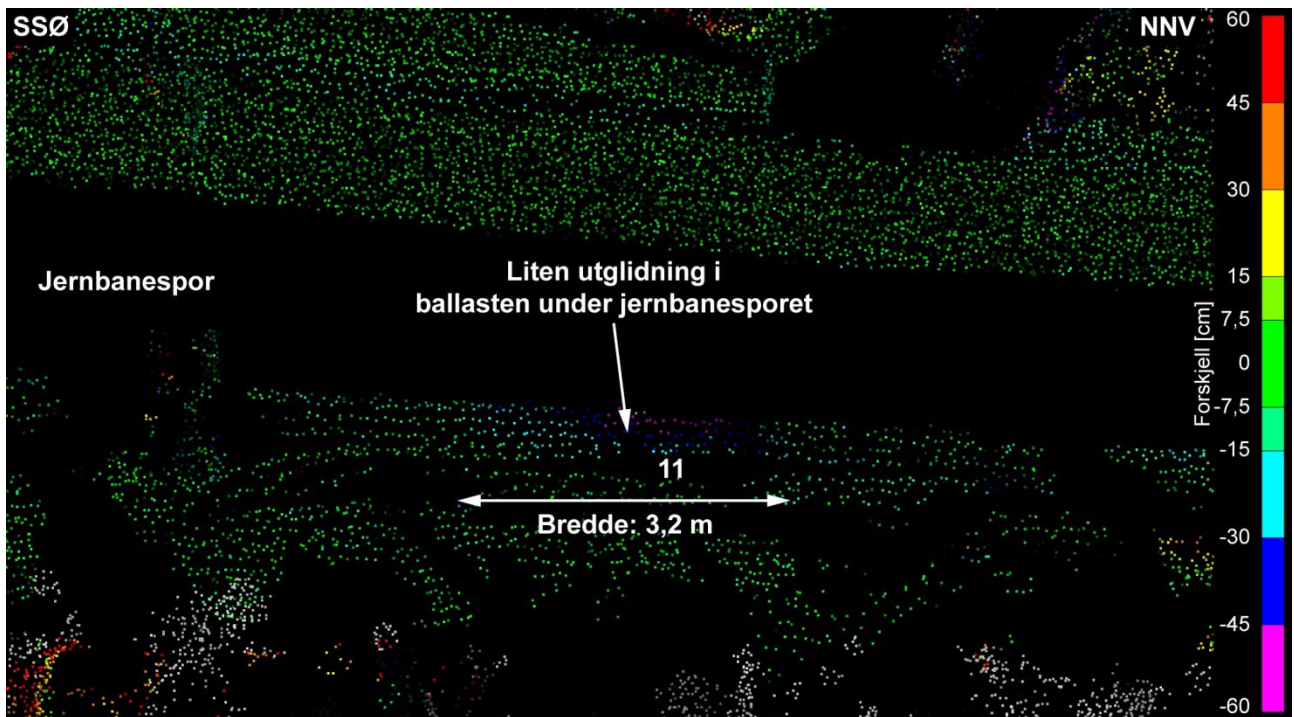
Området 11 nord for Losna st. befinner seg i ballasten under jernbanesporet. Tydelige negative forskjeller på opp til 60 cm vises over en bredde på 3,2 m. Volumet er anslått til 0,46 m³. Disse forskjellene kan enten være naturlige utglidninger av ballasten eller et menneskelig inngrep.



Figur 46: Forskjellsmålinger mellom 2013 og 2015 ved punktet 29 i delområdet sør for Losna st. En del av skråningsfoten ved innsjøen har glidd ut.



Figur 47: Forskjellsmålinger mellom 2013 og 2015 ved punktene 1 & 2 i delområdet nord for Losna st. Løpet til Haukåbekken viser sterk erosjon med opp til 2 m forskjell samt opp til 75 cm tykke avsetninger på sørsiden av bekkeløpet.



Figur 48: Forskjellsmålinger mellom 2013 og 2015 ved punktet 11 i delområdet nord for Losna st. En liten utglidning i ballasten under jernbanespor er oppdaget, med forskjell på opp til 60 cm.

5. ERFARINGER FRA TESTOMRÅDENE

Resultater fra de fem utvalgte testområdene viser de ulike mulighetene ved bakkebasert laserskanning for overvåking av skred og andre skråningsprosesser. Tabell 5 gir en oversikt over anvendelser og analyser utført i de ulike testområdene. Det ble også utført en vurdering av modenheten av bakkebasert laserskanning som overvåkingsteknikk for en gitt anvendelse.

Tabell 5: Oversikt over anvendelser av bakkebasert laserskanning for analyse og overvåking av skred og andre skråningsprosesser. Den tekniske og teknologiske modenheten av anvendelsene er vist med ulike farger (grønn: moden; gul: moden med noen utfordringer; rød: ikke moden pga. tekniske begrensninger).

Anvendelse	Testområde	Videre referanser	Fordeler	Utfordringer
Steinsprang: Lokalisering og kvantifisering (volum og mekanisme) av steinspranghendelser	Svaddenipun Mannen Oppdølstranda	Rosser m.fl. 2005, Abellán m.fl. 2010, Abellán m.fl. 2011	<ul style="list-style-type: none"> • Presis lokalisering av kildeområder • Lav volumterskel for oppdagelse (noen dm³) 	<ul style="list-style-type: none"> • Små steinsprang i vegeterte områder vanskelig å oppdage
Steinsprang: Bevegelsesmålinger for forutsigelse av steinsprang	Svaddenipun	Abellán m.fl. 2010, Royán m.fl. 2014	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisering av blokker med aktive bevegelser • Romlig forutsigelse av steinspranghendelser 	<ul style="list-style-type: none"> • Små bevegelser kan ikke oppdages pga. målefeil • Tidsmessig forutsigelse er vanskelig/umulig
Ustabile fjellparti: Måling av orientering av sprekkeseett og kinematisk analyse av mulige bruddmekanismer	Lausefjellet	Lato m.fl. 2009a, Oppikofer m.fl. 2009, Sturzenegger og Stead 2009b	<ul style="list-style-type: none"> • Måling av sprekkeseett som danner større overflater i fjellvegg som ikke er tilgjengelig i felt • Bra samsvar med feltmålinger 	<ul style="list-style-type: none"> • Flattliggende sprekker vanskelig å oppdage pga. laserskannerens synsretning og vegetasjonsdekke
Ustabile fjellparti: Geometrisk modellering av bruddflater som avgrens et ustabil fjellparti ved å følge områdets morfologi	Lausefjellet	Oppikofer 2009, Böhme m.fl. 2012, Pedrazzini m.fl. 2012	<ul style="list-style-type: none"> • Konstruksjon i 3D av underliggende bruddflater under et fjellparti • Følger områdets morfologi • Persist volumestimat 	<ul style="list-style-type: none"> • Modellen består av flater, mens det generelt finnes en mer oppknyt bruddsone i virkeligheten
Ustabile fjellparti: Måling av større bevegelser (flere cm) i et ustabil område ved sammenligning av punktskyer fra ulike måletidspunkt	Mannen	Oppikofer m.fl. 2008, 2009, Travelletti m.fl. 2008, Kasperski m.fl. 2010	<ul style="list-style-type: none"> • Oppdagelse av bevegelser over hele området • Lokalisering av områder med ulik bevegelsehastighet og retning 	<ul style="list-style-type: none"> • Målefeilen kan være større enn bevegelsene, særlig over lang distanse • Behov for stor stabilt området for sammenslåing
Ustabile fjellparti: Måling av små bevegelser (mm til få cm) i et ustabil område ved sammenligning av punktskyer fra ulike måletidspunkt	Svaddenipun Lausefjellet	-	<ul style="list-style-type: none"> • Oppdagelse av bevegelser over hele området • Lokalisering av områder med ulik bevegelsehastighet og retning 	<ul style="list-style-type: none"> • Målefeil og -støy er større enn bevegelsene, særlig ved laserskanning over lang distanse
Ustabile fjellparti: Detaljert analyse av 3D-bevegelser av enkle delområder/blokker (rotasjon og forflytning)	Svaddenipun Mannen	Teza m.fl. 2007, 2008, Oppikofer m.fl. 2009, Aryal m.fl. 2012	<ul style="list-style-type: none"> • Komplette analyse av bevegelser i 3D for sammenhengende områder • Mindre målefeil enn ved sammenligning av punktskyer 	<ul style="list-style-type: none"> • Målefeilen kan være større enn bevegelser • Behov for stort, stabilt område for sammenslåing av punktskyer
Løsmasseskred: Lokalisering og volumberegning av løsmasseskredhendelser og deres avsetninger	Losna	Jaboyedoff m.fl. 2009, Schürch m.fl. 2011, Laute og Beylich 2014	<ul style="list-style-type: none"> • Presis lokalisering av kildeområder og avsetninger 	<ul style="list-style-type: none"> • Vanskelig å skille mellom vegetasjon og skredhendelser • Delvis uklar avgrensning av kildeområder og avsetninger

I de ulike testområdene var det flere utfordringer angående laserskannerens plassering, avstand til studieområdet, vegetasjon i studieområdet, oppløsningen til punktskyen og værforhold. Følgende lærdommer kan tas av de ulike anvendelser og testområder:

- **Stor avstand bør unngås:** Bakkebasert laserskanning over lang distanse og med stor høydeforskjell mellom instrumentet og studieområdet gir store målefeil. Grunnen for disse målefeil er atmosfæriske innflytelser (luftfuktighet, temperatur, ulike luftlag) som øker med distanse og særlig også med høydeforskjeller (se for eksempel kapittel 4.1.2). Også øker instrumentfeil med økende distanse. Skanninger fra dalbunn opp mot studieområdet bør derfor unngås, men ofte finnes det ingen andre egnede plasseringer. For å redusere atmosfærisk innflytelse bør man utføre gjentatte målinger helst under like værforhold.
- **God oversikt over studieområdet:** Egnede instrumentplasseringer har kortest mulig avstand til studieområdet (noen hundre meter til 1-2 km hvis mulig), liten vertikal høydeforskjell, og har samtidig en god oversikt over studieområdet. For ustabile fjellpartier trengs det i tillegg minst 30 % med stabile område på flere sider av det ustabile fjellpartiet. Videre er det en stor fordel hvis alt dette kan innmåles i et skann, slik at man unngår små feil som oppstår ved sammenslåing av ulike skann fra samme måletidspunkt.
- **Optimale punktavstand er avhengig av skanningens formål:** For bevegelsesmålinger av alle skredtyper (ustabile fjellpartier, steinsprang, løsmasseskred osv.) anbefales det en punktavstand på ca. 5 cm (eller ca. 400 punkt pr. m²), mens 10-15 cm avstand (ca. 40-100 punkt pr. m²) er tilstrekkelig for strukturmålinger av en fjellside og for framstilling av en detaljert digital overflate- eller høydemodell. Den høyere oppløsningen for bevegelsesmålinger er nødvendig for å minimere feilen ved sammenslåing av punktskyene og dermed den samlede målefeilen av sammenligningen mellom ulike måletidspunkt. Selv om bakkebaserte laserskannere muliggjør enda bedre oppløsninger, må man inngå et kompromiss mellom ønsket oppløsning, formål, tidsbruk for datainnsamling, og datamengde.
- **Gjentatte laserskanninger fra omtrent sammen plassering:** Dette trenger ikke å være veldig nøyaktig, men må være slik at de innsamlede punktskyene dekker stort sett samme område. Videre er det fordelaktig å bruke samme eller bedre oppløsning på gjentatte laserskanninger, slik at målefeilen minker og ikke øker med gjentatte målinger.
- **Ingen bakkekontrollpunkter er nødvendig:** Sammenslåing av punktskyer fungerer greit uten bakkekontrollpunkter med kjente koordinater, både for sammenslåing av punktskyer fra samme måletidspunkt og fra ulike målekampanjer (se kapittel 2.2). Kontrollpunkter kan være nødvendig ved noen spesielle omstendigheter. Kontrollpunkter trengs for eksempel hvis det ikke finnes eksisterende høydemodell for georeferering av punktskyene og/eller hvis det ikke finnes et stabilt område for sammenslåing av skanningene fra ulike måletidspunkt.
- **Vegetasjon gir mange hull og skyggeområder:** Disse gjør det vanskelig å oppdage eventuelle forskjeller i topografien mellom ulike måletidspunkt. Skanninger fra ulike plasseringer kan gi mindre hull og skyggeområder, men kan ikke helt oppheve problemet. Med dagens bakkebaserte laserskannere kan ikke dette problemet løses tilfredsstillende. Grunnen er at de bare måler inn en eller flere returpulser, men ikke pulsens bølgeform – slik flybaserte laserskannere gjør. Hvis framtidige skannere kan måle inn hele retursignalet inkludert bølgeform, vil det være mulig å skille mellom topografi, trær, busker og andre objekter automatisk. Da blir det mulig å filtrere bort vegetasjonen og oppnå en ryddig punktsky av topografien, som vil gjøre forskjellsmålingene i områder med vegetasjon mye enklere.

5.1 Fordeler med bakkebasert laserskanning for skredovervåking

Bakkebasert laserskanning har mange fordeler sammenlignet andre måleteknikker:

- **Punktskyer med høy oppløsning:** Bakkebasert laserskanning gir punktskyer (3D-informasjon) over hele studieområdet med en svært høy bakkeoppløsning, som er generelt mellom 5 og 15 cm. Avstanden mellom punktene kan faktisk være enda mindre, hvis distansen mellom skanneren og

objektet er kort (mindre enn 200-500 m). Til sammenligning har bakkebaserte radarmålinger en mye dårligere romlig oppløsning (flere meter i stor avstand).

- **Høy datatetthet i bratte skråninger:** Punkttskyer fra bakkebasert laserskanning har svært høy punkttetthet i bratte, vertikale og overhengende fjellvegger eller skråninger, siden disse er i omtrent rett vinkel mot laserens synsretning. Dette er en stor fordel for analyser av skred i bratt terreng sammenlignet med flybasert laserskanning, som generelt har svært dårlig dekning i stupbratte fjellvegger – siden skanneren da ser ovenfra. Av samme grunn, har flybasert laserskanning mye bedre dekning i flate områder, sammenlignet med bakkebaserte laserskanning.
- **Detaljert digital overflatemodell:** Den høyoppløselige punkttskyen fra bakkebasert laserskanning kan brukes for å framstille en detaljert digital overflatemodell med en celledimensjon på 25 cm eller bedre. Denne modellen tilsvarer en digital høydemodell av topografien, hvis ikke området er dekket av vegetasjon eller hvis vegetasjonen har blitt fjernet.
- **Forskjellmålinger over hele området:** Tidsserier av punkttskyer fra bakkebasert laserskanning kan påvise bevegelser og forandringer over hele det skredutsatte området. Det kan dermed også oppdages skredaktivitet, eller andre årsaker til forskjeller, i områder som ikke var kjent tidligere. Dette er særlig nyttig for lokalisering av steinsprang og jordskred, fordi det er veldig vanskelig å forutse hvor en hendelse kommer til å skje. Bakkebasert radar har den samme fordelene med å kunne oppdage forskjeller over hele området, mens de fleste andre teknikker bare måler på forhåndsbestemte punkter (f.eks. GPS, ekstensometer, totalstasjon osv.).
- **Forskjellmålinger i tre dimensjoner:** Sammenligningen av punkttskyer fra ulike måletidspunkt gir ikke bare en måling av avstanden mellom to punkt, men også om forflytningens retning. Tolkning av oppdagede bevegelser er dermed betydelig enklere, sammenlignet med for eksempel bakkebaserte radarmålinger, som bare måler avstandsendringer i radarens siktelinje.
- **Stor spenn i målbare bevegelser:** Forskjeller som kan oppdages ved sammenligning av punkttskyer fra ulike måletidspunkt spenner fra noen få centimeter til flere titalls meter. Den nedre grensen for forskjeller som kan oppdages er hovedsakelig avhengig av distansen mellom instrumentet og objektet, siden instrumentelle målefeil, atmosfærisk innflytelse og annen målestøy øker med distansen. Videre er den nedre grensen avhengig av skannets oppløsning (punktavstand), siden algoritmen brukt for samregistreringen og forskjellmålingen prøver å minimere avstanden mellom de nærmeste punktene i ulike skann. En større punktavstand fører derfor til en større samlet målefeil. Det er ingen definerbar øvre grense for forskjeller som kan oppdages, men for bevegelsesmålinger i et skred må brukeren fortsatt kunne identifisere samme blokker eller punkt i ulike skann. Til sammenligning kan en bakkebasert radar oppdage mye mindre bevegelser (ca. 0,5 millimeter) ved å gjøre hyppige, gjentatte målinger (Kristensen m.fl. 2013). Likevel, bakkebasert radar mister koherensen av signalet hvis bevegelsene er for raske og overstiger radarens bølgelengde mellom to målinger (f.eks. 8,8 mm for NVEs radarsystemer fra LisaLab) (Kristensen m.fl. 2013).
- **Ulike anvendelser for mange skredtyper:** Det store spennet av forskjeller som kan måles med bakkebasert laserskanning åpner tallrike muligheter, bl.a. overvåking av bevegelser i skredutsatte områder i fjell, løsmasser, is og snø. Den eneste forutsetningen er at den undersøkte prosessen danner topografiske forskjeller. Andre anvendelser omfatter volumberegninger av steinsprang, erosjon i bekkeløp og avsetninger, strukturanalyser av fjellvegg, og produksjon av detaljert digital høydemodell for bruk i geomorfologisk kartlegging eller farekartlegging (f.eks. for utløpsmodellering) (Nguyen m.fl. 2011). Kombinasjonen av ulike analyser av bakkebaserte laserskanningspunkttskyer kan øke forståelsen av skredprosesser. Dette gjelder særlig i fast fjell, der det er mulig å avlede mekanismer av steinsprang og ustabile fjellpartier og utføre en geometrisk modellering.
- **Bærbart instrument:** Bakkebaserte laserskannere er generelt bærbare og batteridrevne, slik at de er ganske enkle å transportere til studieområdet av 1-2 personer. Skanneren brukt i dette prosjektet veier ca. 19 kg og kan transporteres i en tilpasset ryggsekk. I tillegg trengs det et

trebent stativ for å sette opp instrumentet og batterier for strømforsyning. Ett sett av 4 Li-ioner batterier med 90 Wh kapasitet forsyner skanneren i 2-3 timer.

- **Fleksibel instrumentplassering:** Det er ikke nødvendig å sette opp skanneren på nøyaktig samme plass hver gang for å kunne sammenligne datasett fra ulike måletidspunkt i et studieområde. Årsaken til denne fleksibiliteten er at datasett fra ulike måletidspunkt samregistreres under dataanalysen ved å minimere avstanden mellom punktskyene. Det samme resonnement gjør det heller ikke nødvendig å måle inn den nøyaktige posisjonen og orienteringen til instrumentet for hvert skann. Allikevel anbefales det å utføre gjentatte målinger fra omtrent samme posisjon og med samme innstillinger, slik at sammenligningen mellom ulike måletidspunkt blir enklere. Mange andre fjernmålingsteknikker som for eksempel totalstasjoner og bakkebaserte radarsystemer trenger en fast base og har dermed mindre fleksibilitet enn bakkebasert laserskanning.
- **Reflektorløs og kontaktløs fjernmålingsteknikk:** Bakkebasert laserskanning trenger ingen reflektorer eller andre målepunkter installert i studieområdet. Det er derfor ikke nødvendig å ha fysisk kontakt med studieområdet, dvs. at ingen personell må oppholde seg i skredutsatte, farlige og evt. utilgjengelige områder.
- **Rask databehandling:** Innsamlingen av data med bakkebasert laserskanning går relativt raskt (15 til 40 minutt avhengig av størrelsen av området og valgt oppløsning). Det første resultatet fra sammenligningen av ulike måletidspunkt kan fås direkte under feltarbeidet etter ca. 30 minutt med dataprosessering og -analyse. Dette gjør bakkebasert laserskanning til en fleksibel og pålitelig metode for overvåking av akutte skredhendelser, slik det ble utprøvd innenfor NIFS-prosjektet (Kristensen m.fl. 2013).

5.2 Ulemper med bakkebasert laserskanning for skredovervåking

Selv om bakkebasert laserskanning har mange fordeler som fjernmålingsteknikk innebærer den også noen mangler og ulemper:

- **Direkte sikt til studieområdet:** Bakkebasert laserskanning måler bare topografien og objekter som er synlige fra skannerens plassering. Områder som er skjult bak andre objekter eller som ikke er synlig vil mangle i punktskyen og vises som hull i datasettet. Dette medfører også en ulik dekningsgrad og punkttetthet over studieområdet. Ved å kombinere skann fra ulike plasseringer kan denne ulempen delvis, men ikke fullstendig, overvinnes. En kombinasjon med punktskyer fra flybasert laserskanning som generelt har bra dekning i flate områder kan gi et sammensatt datasett som er så fullstendig som mulig.
- **Måler også inn vegetasjon:** Hvis det er vegetasjon i studieområdet, så vil den også vises i punktskyen, noe som gir høyere målestøy ved sammenligning av datasett. Derfor blir også den digitale overflatemodellen som kan lages fra laserskannerpunktskyer en overflatemodell og ikke en høydemodell. Vegetasjonen kan fjernes manuelt fra punktskyen, men dette er svært tidkrevende og blir derfor sjelden gjort. Skanneren brukt i dette prosjektet kan bare registrere den første eller siste pulsen som er tilbakespredt, noe som gjør det umulig å filtrere vegetasjonen og andre gjenstander automatisk gjennom en klassifisering av punktene slik det er gjort for flybaserte laserskannerdata (Mallet og Bretar 2009). Andre systemer for bakkebasert laserskanning registrer flere tilbakespredte pulser samtidig, eller hele bølgeformen (f.eks. Riegl 2015).
- **Relativt lav målenøyaktighet:** Instrumentets nøyaktighet varierer litt mellom de ulike produsentene, men er under 1 cm for relativt korte avstander (f.eks. 7 mm i 100 m avstand for skanneren brukt i dette prosjektet). Denne målefeilen er allikevel mye større enn det som kan oppnås med totalstasjoner (2-3 mm i 100 m avstand) eller bakkebasert radar (0,5 mm) (SafeLand 2010). Målefeilen øker med avstanden mellom skanneren og objektet (f.eks. 16,5 mm i 400 m avstand, Oppikofer m.fl. 2009). Dette er målefeilen på et enkelt målepunkt. Filtrerings- og interpolasjonsteknikker kan redusere målefeilen ved å ta hensyn til den høye punkttettheten av bakkebaserte laserskannerdata (f.eks. Lindenbergh og Pfeifer 2005, Teza m.fl. 2007, Abellán

m.fl. 2009). Rototranslasjonsmetoden, brukt i dette prosjektet for å analysere den tredimensjonale bevegelsen av blokker, gjør også nytte av den høye punkttettheten for å redusere usikkerhetene i forhold til enkle målepunkt.

- **Påvirket av meteorologiske forhold:** Som en optisk måleteknikk er bakkebasert laserskanning påvirket av meteorologiske og atmosfæriske forhold. Lufttemperatur og fuktighet påvirker den målte avstanden mellom skanneren og objektet. Ved å utføre gjentatte skann i ulike atmosfæriske forhold kan dette føre til flere cm i forskjell, særlig ved å skanne over lang avstand, over en fjord eller over en stor vertikal høydeforskjell. Disse atmosfæriske innflytelser kan gi målefeil som er større enn skredets bevegelser og umuliggjør i så fall oppdagelsen av dem. Skanningen bør derfor utføres fra så kort avstand som mulig og ideelt fra omtrent samme høyde. Selv om våte overflater kan måles inn med skanneren brukt i dette prosjektet, er rekkevidden betydelig redusert i forhold til tørre overflater. Skyer, tåke og regn minker sikten til studieområdet og reduserer derfor dekningsgraden og punkttettheten av datasettet betydelig. Skann ved slike meteorologiske forhold bør derfor unngås.
- **Høye kjøps- og vedlikeholdskostnader:** Bakkebaserte laserskanningsinstrumenter og nødvendig tilleggsutstyr er dyre i innkjøp, men også for årlig vedlikehold. Dette er en av de største hindringer for at bakkebasert laserskanning blir mer vanlig brukt, særlig for private konsulentselskaper.
- **Problemer med flytransport:** De siste årene har det vært stadig vanskeligere å frakte en bakkebasert laserskanner og nødvendige batterier med fly. Dette skyldes både vekten av instrumentet med sin transportboks, men særlig også batteriene som må nå deklarerer som farlig gods.

6. BRUKSMULIGHETER I DE ULIKE ETATENE

Dette prosjektet har vist mulige anvendelser av bakkebasert laserskanning for analyse og overvåking av skred og skråningsprosesser i de ulike etatene involvert i NIFS-prosjektet. Dette kapitlet gir en kort oversikt over bruksmuligheter av bakkebasert laserskanning i NVE, Statens vegvesen og Jernbaneverket, samt anvendelser som kan være felles for alle etater.

Denne rapporten omtaler hovedsakelig bakkebasert laserskanning, men for mange anvendelser testet i dette prosjektet finnes det også alternativer. Mobil laserskanning er en av dem (se kapittel 3.5 for detaljer), men også fotogrammetri. Fotogrammetri ble omfattende brukt for fremstilling av digitale høydemodeller, men ble avløst av laserskanning ved slutten av 1990-tallet (Jaboyedoff m.fl. 2012). Nylige fremskritt i feltet av datafremstilling og økende datamaskinenkapasitet ga en ny driv til fotogrammetrifeltet (Lim m.fl. 2005, Prokop m.fl. 2015). I dag kan vanlige fotokameraer brukes for å lage 3D-modeller av hele studieområder i meget automatiserte programvarer som krever liten brukerkompetanse, som for eksempel VisualSFM (<http://ccwu.me/vsfm>) eller Agisoft Photoscan (<http://www.agisoft.com>). 3D-modeller fremstilt med fotogrammetriske teknikker kan ikke se gjennom vegetasjon, og presisjonen til disse automatisk lagede modellene er usikker. NGU er i ferd med å teste ut mulighetene for å lage 3D-modeller av ustabile fjellpartier og andre skråninger basert på bilder tatt i felt, fra helikopter eller fra drone. Det blir meget viktig å sammenligne disse fotogrammetriske 3D-modellene med punktskyer fra bakkebasert laserskanning for å kunne vurdere presisjonen til begge teknikker. Deretter kan det vurderes hvordan fotogrammetri kan brukes for ulike bruksmuligheter nevnt i dette kapitlet. I NIFS-prosjektet ble det utført en test med dronebasert fotogrammetri (Blankenberg m.fl. 2015). Ved å sammenligne målinger fra ulike måleår var det mulig å oppdage noen steinsprangshendelser.

6.1 Felles bruksmuligheter

6.1.1 Bedre lokalisering og kvantifisering av skredhendelser

Nyttig kunnskap om skredhendelser kan skaffes ved å utføre bakkebasert laserskanning umiddelbart etter en skredhendelse. Bakkebaserte laserskanninger kan enkelt sammenlignes med en eksisterende høydemodell for å måle forskjeller og fastlå skredets volum. Dette gjelder særlig for løsmasse- og kvikkleireskred (se f.eks. Jaboyedoff m.fl. 2009), men også for snøskred. For snøskred kan tykkelsen av snødekket evalueres ved å sammenligne bakkebaserte laserskannerdata med en høydemodell (se f.eks. Prokop 2008). I tillegg kan skredets mektighet og utbredelse finnes ved å sammenligne punktskyer før og etter skredet (Adams m.fl. 2013, Prokop m.fl. 2015), eller ved å rekonstruere snøoverflaten før skredet.

Formålet med en forbedret lokalisering, kvantifisering og karakterisering av skredhendelser er å kunne utføre bedre farevurderinger og å oppnå tilstrekkelig grunnlag for valg av for eksempel sikringstiltak. En viktig forutsetning her er å besitte en høyoppløselig høydemodell som referansedatasett. Høsten 2015 ble det besluttet å lage en høyoppløselig høyde- og terrengmodell av hele Norge basert på flybasert laserskanning i kombinasjon med fotogrammetri av flybilder (Kartverket 2015). Dette vil gi svært gode høydemodeller som referansedatasett for framtidige sammenligninger med bakkebaserte laserskanninger etter skredhendelser. I bratte fjellvegger og skjæringer er dekningsgrad og punkttetthet til disse flybaserte laserskanningene ikke tilstrekkelig for å kunne utføre sammenligninger. Dermed er det først og fremst steinsprangutsatte områder som ikke har et referansedatasett som er gode nok.

Det forslås derfor å satse på innsamling av referansedatasett i steinsprangutsatte områder langs veier, jernbanespor og ovenfor bebyggelser. Slike topografiske data kan samles inn både med bakkebasert laserskanning og mobil laserskanning på bil eller tog. Prosessering av dataene må ikke nødvendigvis utføres med en gang, men kan gjøres etter en skredhendelse. Ingen markedsanalyse ble utført i dette prosjektet, men det finnes flere leverandører av slike tjenester i Norge, og tilbudet

utvides stadig. Viktige tekniske faktorer i vurdering av anbud er bl.a. punktavstand eller punkttetthet på bakken, maksimal rekkevidde under realistiske forhold (og ikke under perfekte forhold), relative målefeil (før georeferering) og absolutte målefeil (etter georeferering), og forenlighet av laserskanningsdata med programvarer som brukes hos oppdragsgiveren.

6.1.2 Vurdering av bevegelse og skråningens stabilitet ved akutte skredhendelser

I etterkant av en skredhendelse er det viktig å vurdere stabiliteten av skredets kildeområde – om det fortsatt finnes bevegelse der. Øvelsen om overvåking av en akutt skredhendelse, utført innenfor NIFS-prosjektet (Kristensen m.fl. 2013), har påvist at bakkebasert laserskanning kan brukes raskt for en slik vurdering. De fleste bakkebaserte laserskannere kan også settes opp for en automatisert, kontinuerlig overvåking (se f.eks. Adams m.fl. 2013), noe som kan være nyttig i krisesituasjoner.

6.2 Norges vassdrags- og energidirektorat

6.2.1 Farekartlegging av skred i bratt terreng

Skred i bratt terreng omfatter et bredt spektrum av skredtyper og omfatter steinsprang og steinskred, jord- og flomskred, men også snø- og sørpeskred. Skredfarekartlegging i statlig regi utføres både av NVE og av konsulenter på oppdrag for NVE. Bakkebasert laserskanning kan være nyttig for skredfarekartleggingen i statlig regi, selv om de finansielle og tidsmessige begrensninger av kartleggingen pr. i dag ikke tillater det. En mulig anvendelse er framstilling av svært detaljerte høydemodeller. Dette gjelder særlig der det ikke finnes gode flybaserte laserhøydemodeller eller der eksisterende modeller for eksempel ikke gjenspeiler de bratte fjellveggene godt nok.

Videre vil målinger over flere år kunne avsløre hvor skred har gått, særlig for steinsprang. Med en slik sammenligning av skann kan kildeområder og volumer bestemmes bedre, og man kan dermed oppnå en bedre forståelse av den romlige og tidsmessige frekvensen av steinsprang og andre skredtyper. Dette kan føre til en mer nøyaktig vurdering av skredsannsynligheter og volumer knyttet til ulike gjentaksintervall. Sammen med en detaljert høydemodell vil disse parametrene deretter kunne bli brukt i en forbedret utløpsmodellering. Lato m.fl. (2009b) og Nguyen m.fl. (2011) har testet slike anvendelser, men etter forfatterens kunnskap behøves det mer forskning, utvikling og uttesting.

6.2.2 Forbedret forståelse av skredprosesser og oppbygging av skredvifter

Det er foreslått et forskningsprosjekt ved NVE og NGU for videre uttesting av mulighetene for analyse og overvåking av løsmasseskred og andre skråningsprosesser. Dette inkluderer detaljerte undersøkelser og periodisk overvåking av skredvifter med kompleks morfologi og lagfølge dannet av flere ulike skredprosesser. Prosjektets formål vil først og fremst være en bedre forståelse av skredprosesser og oppbygging av skredvifter. Også mer nøyaktig lokalisering og kvantifisering av hendelser vil bli inkludert i prosjektet, bl.a. ved bruk av droneteknologi og bakkebasert laserskanning. Prosjektet "Skredvifter; prosesser og kompleks morfologi" starter mest sannsynlig i 2016 og vil gå ut 2019.

6.2.3 Overvåking av ustabile fjellpartier

Denne rapporten har påvist muligheten til å oppdage og kvantifisere bevegelser på flere centimeter i ustabile fjellpartier, ved å sammenligne bakkebaserte laserskanningsdata fra ulike måletidspunkt. Selv om målefeilen er større enn ved andre måleteknikker, gir bakkebasert laserskanning nyttig informasjon om bevegelsene i et stabilt fjellparti. For kontinuerlig overvåke, ustabile fjellpartier med flere centimeter i årlig bevegelse (som for eksempel Åknes, Mannen og Jettan), kan periodiske målinger med bakkebasert laserskanning bekrefte resultater fra andre områdebaserte måleteknikker, som for eksempel bakkebasert eller satellittbasert radarinterferometri. Fordelen med bakkebasert laserskanning er å måle forskjeller i 3D og ikke bare i siktelinje som radaren gjør. Dette gjør det

mulig å analysere fjellpartiets bevegelse i 3D og skille mellom forflytningen av fjellpartiet og eventuelle rotasjonsbevegelser gjennom en rototranslasjonsanalyse.

I tillegg er det mulig å sette opp instrumentet for en automatisert kontinuerlig overvåking av det ustabile området (se f.eks. Adams m.fl. 2013) for å supplere andre målingsteknikker, bl.a. i krisesituasjoner. NGUs bakkebasert laserskanner har pr. i dag ikke tilleggsfunksjonen for kontinuerlig skanning, men kan relativt enkelt oppgraderes.

6.2.4 Kartlegging av ustabile fjellpartier ved NGU

I tillegg til disse bruksmuligheter ved NVE, kommer anvendelser for kartlegging av ustabile fjellpartier som NGU utfører på oppdrag av NVE. I denne kartleggingen brukes vanligvis bakkebasert laserskanning for å måle inn en presis høydemodell av området og å utføre en strukturanalyse av fjellveggene. Disse målingene supplerer feltmålinger av strukturens orientering, eller kan erstatte dem hvis fjellpartiet er utilgjengelig for feltarbeid. Videre utfører NGU periodiske forskjellsmålinger mellom punktskyer fra ulike måleår for å oppdage mulige bevegelser, eller små steinsprang og andre forskjeller som kan antyde deformasjon i fjellet. Punktskyer fra bakkebasert laserskanning kunne derimot brukes hyppigere for å lage en tredimensjonal modell av det ustabile fjellpartiet, og utføre et bedre volumestimat. Dette gjelder særlig for ustabile fjellpartier som tydelig kan avgrensnes av plane strukturer, men muligvis også for større ustabile fjellpartier med mer diffuse avgrensinger.

6.3 Statens vegvesen & Jernbaneverket

Bruksområder for bakkebasert eller mobil laserskanning for Statens vegvesen og Jernbaneverket vil hovedsakelig være i skjæringer og naturlige skråninger ovenfor en vei/jernbane. Mulige anvendelser omfatter detaljerte strukturanalyser for å lokalisere mulige ustabile blokker som kan føre til steinsprang, og en nøyaktig lokalisering og kvantifisering av skredhendelser ved sammenligning av data før og etter en skredhendelse (se kapittel 6.1.1 for detaljer). I denne sammenhengen kan det være spesielt nyttig å samle inn høyoppløselige punktskyer fra en bakkebasert eller mobil laserskanning (eller muligvis fra fotogrammetri) av de bratte skråningene ovenfor skredutsatte veier/jernbane. Det anbefales derfor å utføre mobil laserskanning i noen skredutsatte testområder, som kan sammenlignes med framtidige data (etter en skredhendelse f.eks.).

En bruksmulighet som er ganske spesifikk for Statens vegvesen og Jernbaneverket er problematikken ved isnedfall fra bratte fjellvegger i løpet av vinteren og våren. Det er mulig å skanne is med en bakkebasert laserskanner og dermed sammenligne flere skann tatt i løpet av en vintersesong. Disse sammenligningene vil vise hvordan ismassene bygger seg opp i løpet av den kalde sesongen, men også hvor, hvordan og når isen faller ned. Et lite testprosjekt langs en kort vei- eller jernbanestrekning med hyppig isnedfall vil kunne gi økt forståelse av prosessen bak.. Forhåpentligvis vil dette kunne gjøre det mulig å vurdere stabiliteten til ismassene og definere kritisk masse av is som kan føre til isnedfall.

7. OPPSUMMERING & ANBEFALINGER

Denne rapporten har gjennom fem ulike testområder vist mulige anvendelser av bakkebasert laserskanning for overvåking av skred og andre skråningsprosesser, både i fjell og løsmasser. Bakkebasert laserskanning er en aktiv fjernmålingsteknikk som samler inn topografiske data over et helt studieområde. De innmålte dataene gir en nøyaktig tredimensjonal modell av jordens overflate. Sammenligning og beregning av forskjeller mellom skanninger fra ulike måletidspunkter gjør det mulig å oppdage skredhendelser (steinsprang, løsmasseskred), bevegelser av ustabile fjellpartier, og andre endringer i topografien. Den høyoppløselige punktskyen innmål av bakkebasert laserskanning bidrar også i skredkartleggingen og øker forståelsen av skredmekanismer og -prosesser.

Bakkebasert laserskanning framstår som et mangesidig instrument for skredovervåking. Mulige bruksområder der teknikken er vurdert som "moden" omfatter:

- Lokalisering og kvantifisering av steinspranghendelser
- Måling av sprekkens orientering og kinematisk analyse av mulige bruddmekanismer i et ustabil fjellparti
- Geometrisk modellering av bruddflater som avgrensner et ustabil fjellparti
- Måling av større bevegelser (flere cm) i et ustabil fjellparti ved sammenligning av punktskyer fra ulike måletidspunkt
- Detaljert analyse av 3D-bevegelser av enkle delområder/blokker i et ustabil fjellparti

Bakkebasert laserskanning har likevel noen utfordringer og tekniske begrensninger. For eksempel er det vanskelig å forutse et steinsprang ved å sammenligne skanninger, og å lokalisere og kvantifisere løsmasseskredhendelser og deres avsetninger. Videre er det pr. i dag nesten umulig å måle signifikante bevegelser i størrelsesorden noen mm til få cm i et ustabil fjellparti.

Rapporten presenterer også de viktigste lærdommene fra de ulike testområdene, og da særlig at stor avstand bør unngås. Andre lærdommer er at tilstrekkelig punktavstand er 5 cm for bevegelsesmålinger og 10-15 cm for andre anvendelser, at gjentatte laserskanninger bør utføres fra omtrent sammen plassering, og at vegetasjon gir mange hull og skyggeområder i datasettet.

Bruksmulighetene til bakkebasert laserskanning for de ulike etatene involvert i NIFS-prosjektet (Norges vassdrags- og energidirektorat, Statens vegvesen og Jernbaneverket) er mangfoldige. Laserskanning er svært nyttig bl.a. for en bedre lokalisering og kvantifisering av skredhendelser, for farekartlegging av skred i bratt terreng, for vurdering av bevegelse og stabilitet ved akutte skredhendelser, samt for overvåking og detaljerte analyser av ustabile fjellpartier. Mange av disse anvendelsene krever høyoppløselig terrenginformasjon før og etter en skredhendelse. Derfor anbefales det i denne rapporten å satse på innsamling av bakkebaserte eller bil-/togbaserte laserskanningsdata av skredutsatte områder ovenfor bebyggelser og langs veier og jernbanespor, slik at det bygges opp et verdifullt datagrunnlag for analyser etter at et skred har skjedd.

Dette er sluttrapporten til prosjektet om "Overvåking av skråninger med bakkebasert laserskanning", som er del av etatsprosjektet NIFS. Prosjektets formål om å vise nytten av bakkebasert laserskanning for overvåking av bevegelser i skråninger anses dermed som oppnådd. Rapporten legger også til rette for at bakkebasert laserskanning kan bli en mer vanlig metode for etatene involverte i NIFS-prosjektet.

TAKKSIGELSE

Takk til de tre etatene i NIFS-prosjektet, Norges vassdrags- og energidirektoratet, Statens vegvesen og Jernbaneverket, for finansiering av dette prosjektet. En stor takk også til Tore Humstad og Halgeir Dahle fra Statens vegvesen i Molde for ledelse av delprosjektet 4.2 "Overvåking av skredhendelser", og for jevn oppfølging av dette prosjektet. Takk til mine kolleger ved NGU, Reginald Hermanns, Martina Böhme, Gro Sandøy, Ivanna Penna, Freddy Yugsi Molina og ved Universitet i Lausanne i Sveits, Clément Michoud og Céline Longchamp, for hjelp ved datainnsamling i de ulike testområdene, og for nyttige diskusjoner og tilbakemeldinger på denne rapporten. Tusen takk også til Inger-Lise Solberg fra NGU for retting og språklig forbedring av rapporten.

REFERANSER

- Abellán, A., Calvet, J., Vilaplana, J.M. og Blanchard, J. (2010) Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring. *Geomorphology*, **119**, 162-171.
- Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T. og Vilaplana, J.M. (2009) Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 365-372.
- Abellán, A., Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Rosser, N.J., Lim, M. og Lato, M.J. (2014) Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities. *Earth Surface Processes and Landforms*, **39**, 80-97.
- Abellán, A., Vilaplana, J.M., Calvet, J., García-Sellés, D. og Asensio, E. (2011) Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 829-841.
- Abellán, A., Vilaplana, J.M. og Martinez, J. (2006) Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology*, **88**, 136-148.
- Adams, M.S., Gleirscher, E., Gigele, T. og Fromm, R. (2013) Automated Terrestrial Laser Scanner measurements of small-scale snow avalanches. *International Snow Science Workshop*, Grenoble, France, s. 1060-1065.
- Aryal, A., Brooks, B.A., Reid, M.E., Bawden, G.W. og Pawlak, G.R. (2012) Displacement fields from point cloud data: Application of particle imaging velocimetry to landslide geodesy. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, **117**, F01029, doi:10.1029/2011JF002161.
- Bieniawski, Z.T. (1993) Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In: Hudson, J.A. og Hoek, E. (red.) *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon, New York, s. 553-573.
- Bitelli, G., Dubbini, M. og Zanutta, A. (2004) Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress Geo-Imagery Bridging Continents*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, s. 246-251.
- Blankenberg, L.E. m.fl. (2015) Deformasjonsanalyse av bratt fjellside ved bruk av dronebasert fotogrammetri. *NIFS-rapport 114-2015*, Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket, Oslo.
- Blue Marble Geographics (2015) Global Mapper. Nettside til Blue Marble Geographics. <http://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php> (hentet 12/02 2015).
- Böhme, M., Hermanns, R.L., Oppikofer, T., Fischer, L., Eiken, T., Bunkholt, H., Derron, M.-H., Jaboyedoff, M. og Blikra, L.H. (2012) A detailed assessment of the deep seated gravitational deformation at Stampa above Flåm, Norway. In: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A.K. og Leroueil, S. (red.) *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*, Taylor & Francis Group, London, s. 647-652.
- Conforti, C. (2005) Terrestrial Scanning Lidar Technology applied to study the evolution of the ice-contact image lake (Mont Blanc, Italy). *9th Alpine Glaciological Meeting*, Milano, s. 1-5.
- Dahle, H., Bjerke, P.L., Crosta, G.B., Hermanns, R.L., Anda, E. og Saintot, A. (2011) Faresoner for utløp, oppdemming og flom som følge av fjellskredfare ved Mannen. *NGU rapport 2011.058*, Norges geologiske undersøkelse, Trondheim.
- Derron, M., Blikra, L.H. og Jaboyedoff, M. (2005) High resolution digital elevation model analysis for landslide hazard assessment (Åkerneset, Norway). In: Senneset, K., Flaate, K. og Larsen, J.O. (red.) *Landslides and Avalanches: ICFL 2005 Norway*, Taylor & Francis Group, London, s. 101-106.
- Devoli, G., Eikenæs, O., Taurisano, A., Hermanns, R.L., Fischer, L., Oppikofer, T. og Bunkholt, H. (2011) Plan for skredfarekartlegging - Delrapport steinsprang, steinskred og fjellskred. *NVE rapport 15/2011*, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.

- Dunning, S.A., Massey, C.I. og Rosser, N.J. (2009) Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from Terrestrial Laser Scanning. *Geomorphology*, **103**, 17-29.
- Ferrero, A., Forlani, G., Roncella, R. og Voyat, H. (2009) Advanced Geostructural Survey Methods Applied to Rock Mass Characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **42**, 631-665.
- Hermanns, R., Dahle, H., Bjerke, P., Crosta, G., Anda, E., Blikra, L., Saintot, A. og Longva, O. (2013) Rockslide Dams in Møre og Romsdal County, Norway. In: Margottini, C., Canuti, P. og Sassa, K. (red.) *Landslide Science and Practice*, Springer, Berlin Heidelberg, s. 3-12.
- InnovMetric (2015) PolyWorks - the universal 3D metrology software platform. Nettside til InnovMetric Inc., Canada. <http://www.innovmetric.com/en/products-overview> (hentet 12/02 2015).
- Jaboyedoff, M., Demers, D., Locat, J., Locat, A., Locat, P., Oppikofer, T., Robitaille, D. og Turmel, D. (2009) Use of terrestrial laser scanning for the characterization of retrogressive landslides in sensitive clay and rotational landslides in river banks. *Canadian Geotechnical Journal*, **46**, 1379-1390.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M., Locat, J. og Turmel, D. (2007) New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. In: Eberhardt, E., Stead, D. og Morrison, T. (red.) *Rock mechanics: Meeting Society's challenges and demands. Proceedings of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27-31 May 2007*, Taylor & Francis, London, s. 61-68.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M., Loye, A., Metzger, R. og Pedrazzini, A. (2012) Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, **61**, 5-28.
- Kartverket (2015) Klarsignal for 3D-modell av Norge. Nettside til Kartverket. <http://kartverket.no/Om-Kartverket/Nyheter/klarsignal-for-3d-modell-av-norge/> (hentet 12/14 2015).
- Kasperski, J., Delacourt, C., Allemand, P., Potherat, P., Jaud, M. og Varrel, E. (2010) Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France). *Remote Sensing*, **2**, 2785-2802.
- Kemeny, J., Turner, K. og Norton, B. (2006) LIDAR for rock mass characterization: hardware, software, accuracy and best-practices. In: Tonon, F. og Kottenstette, J. (red.) *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization*, ARMA, s. 49-62.
- Kristensen, L., Oppikofer, T. og Bergeng, T. (2013) Overvåking ved akutte skredhendelser – Rapport fra øvelse på Sunndalsøra med ÅTB og NGU. *NVE rapport 31/2013*, Norges vassdrags- og energidirektorat i et samarbeid med Statens vegvesen og Jernbaneverket, Oslo.
- Kulatilake, P., Balasingam, P., Park, J. og Morgan, R. (2006) Natural rock joint roughness quantification through fractal techniques. *Geotechnical and Geological Engineering*, **24**, 1181-1202.
- Lato, M., Diederichs, M.S., Hutchinson, D.J. og Harrap, R. (2009a) Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **46**, 194-199.
- Lato, M., Hutchinson, J., Diederichs, M., Ball, D. og Harrap, R. (2009b) Engineering monitoring of rockfall hazards along transportation corridors: using mobile terrestrial LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 935-946.
- Lato, M.J. og Vöge, M. (2012) Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **54**, 150-158.
- Laute, K. og Beylich, A.A. (2014) Environmental controls, rates and mass transfers of contemporary hillslope processes in the headwaters of two glacier-connected drainage basins in western Norway. *Geomorphology*, **216**, 93-113.

- Lim, M., Petley, D.N., Rosser, N.J., Allison, R.J., Long, A.J. og Pybus, D. (2005) Combined Digital Photogrammetry and Time-of-Flight Laser Scanning for Monitoring Cliff Evolution. *The Photogrammetric Record*, **20**, 109-129.
- Lindenbergh, R. og Pfeifer, N. (2005) A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. *Proceedings of the 7th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, Vienna, Austria, pp. 61-70.
- Mallet, C. og Bretar, F. (2009) Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64**, 1-16.
- Michoud, C., Carrea, D., Costa, S., Derron, M., Jaboyedoff, M., Delacourt, C., Maquaire, O., Letortu, P. og Davidson, R. (2015) Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. *Landslides*, **12**, 403-418.
- Moen, K. (2009) Risikovurdering av rv. 70 forbi Oppdølstranda. *Rapportnr.119654-1*, Multiconsult, Oslo.
- Monserrat, O. og Crosetto, M. (2008) Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **63**, 142-154.
- Nguyen, H.T., Fernandez-Steeger, T.M., Wiatr, T., Rodrigues, D. og Azzam, R. (2011) Use of terrestrial laser scanning for engineering geological applications on volcanic rock slopes - an example from Madeira island (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 807-817.
- NRK, (2014) Flom på Lillehammer og Øyer. Nettside til NRK Hedmark og Oppland. <http://www.nrk.no/ho/1.11820131> (hentet 11/12 2015).
- Oppikofer, T. (2009) Detection, analysis and monitoring of slope movements by high-resolution digital elevation models. PhD thesis, Institute of Geomatics and Analysis of Risk, University of Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Oppikofer, T., Bunkholt, H., Fischer, L., Saintot, A., Hermanns, R.L., Carrea, D., Longchamp, C., Derron, M.-H., Michoud, C. og Jaboyedoff, M. (2012) Investigation and monitoring of rock slope instabilities in Norway by terrestrial laser scanning. In: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A.K. og Leroueil, S. (red.) *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*, Taylor & Francis Group, London, pp. 1235-1241.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L.H. og Derron, M. (2009) Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 1003-1019.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M. og Keusen, H.-R. (2008) Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps. *Nature Geoscience*, **1**, 531-535.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Pedrazzini, A., Derron, M.H. og Blikra, L.H. (2011) Detailed DEM analysis of a rockslide scar to improve the basal failure surface model of active rockslides. *Journal of Geophysical Research*, **116**, F02016.
- Optech (2015) Optech ILRIS Terrestrial Laser Scanner. Nettside til Teledyne Optech Inc. <http://www.teledyneoptech.com/index.php/product/optech-ilris/> (hentet 12/02 2015).
- Øydvin, E.K., Devoli, G., Bargel, T., Wiig, T., Taurisano, A., Berg, H., Eikenæs, O., Lyche, E., Fergus, T., Kvakland, M.R., Wasrud, J., Helle, T.E., Orvedal, K., Peereboom, I.O., Andersen, ØB., Hermanns, R.L., Høst, J., Hansen, L., Bunkholt, H., Eilertsen, R., Fischer, L., L'Heureux, J.-., Oppikofer, T., Rubensdotter, L., Sletten, K., Solberg, I.-. og Stalsberg, K. (2011) Plan for skredfarekartlegging - Status og prioriteringer innen oversiktskartlegging og detaljert skredfarekartlegging i NVEs regi. *NVE rapport 14/2011*, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo.
- Pedrazzini, A., Froese, C.R., Jaboyedoff, M., Hungr, O. og Humair, F. (2012) Combining digital elevation model analysis and run-out modeling to characterize hazard posed by a potentially unstable rock slope at Turtle Mountain, Alberta, Canada. *Engineering Geology*, **128**, 76-94.
- Pollyea, R.M. og Fairley, J.P. (2011) Estimating surface roughness of terrestrial laser scan data using orthogonal distance regression. *Geology*, **39**, 623-626.

- Prokop, A. (2008) Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. *Cold Regions Science and Technology*, **54**, 155-163.
- Prokop, A., Schön, P., Singer, F., Pulfer, G., Naaim, M., Thibert, E. og Soruco, A. (2015) Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters. *Cold Regions Science and Technology*, **110**, 223-230.
- Rabatel, A., Deline, P., Jaillet, S. og Ravel, L. (2008) Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial lidar measurements: A case study in the Mont Blanc area. *Geophysical Research Letters*, **35**, 10502.
- Riegl (2015) Terrestrial laser scanning. Nettside til RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. <http://riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/> (hentet 12/04 2015).
- Rosser, N.J., Petley, D.N., Lim, M., Dunning, S.A. og Allison, R.J. (2005) Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **38**, 363-375.
- Rowlands, K.A., Jones, L.D. og Whitworth, M. (2003) Landslide Laser Scanning: a new look at an old problem. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **36**, 155-157.
- Royán, M.J., Abellán, A., Jaboyedoff, M., Vilaplana, J.M. og Calvet, J. (2014) Spatio-temporal analysis of rockfall pre-failure deformation using Terrestrial LiDAR. *Landslides*, **11**, 697-709.
- SafeLand (2010) Review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring. *SafeLand deliverable 4.1*, Edited for the SafeLand European project by Michoud C., Abellán, A., Derron, M.-H. and Jaboyedoff, M., available at <http://www.safeland-fp7.eu>.
- Sampson, C.C., Fewtrell, T.J., Duncan, A., Shaad, K., Horritt, M.S. og Bates, P.D. (2012) Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models. *Advances in Water Resources*, **41**, 1-17.
- Schürch, P., Densmore, A.L., Rosser, N.J., Lim, M. og McArdeell, B.W. (2011) Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, **36**, 1847-1859.
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K. og Kemeny, J. (2005) Method for Automated Discontinuity Analysis of Rock Slopes with Three-Dimensional Laser Scanning. *Transportation Research Record*, **1913**, 187-194.
- Stock, G.M., Luco, N., Harp, E.L., Collins, B.D., Reichenbach, P., Frankel, K.L., Matasci, B., Carrea, D., Jaboyedoff, M. og Oppikofer, T. (2012) Quantitative rock fall hazard and risk assessment in Yosemite Valley, California, USA. In: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A.K. og Leroueil, S. (red.) *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*, Taylor & Francis Group, London, s. 1119-1125.
- Sturzenegger, M. og Stead, D. (2009a) Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, **106**, 163-182.
- Sturzenegger, M. og Stead, D. (2009b) Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **9**, 267-287.
- Terranum (2015) Coltop3D - LIDAR data processing and analyzing software for geologists. Nettside til Terranum SàRL, Bussigny, Switzerland, Lausanne, Switzerland. <http://www.terranum.ch/coltop3d-features> (hentet 12/02 2015).
- Teza, G., Galgaro, A., Zaltron, N. og Genevois, R. (2007) Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: a new approach. *International Journal of Remote Sensing*, **28**, 3425-3446.
- Teza, G., Pesci, A., Genevois, R. og Galgaro, A. (2008) Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation. *Geomorphology*, **97**, 424-437.

- Travelletti, J., Oppikofer, T., Delacourt, C., Malet, J.-. og Jaboyedoff, M. (2008) Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS). *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **37 Part B5**, 485-490.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C. og Turner, D. (2012) Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing*, **4**, 1519.



NORGES
GEOLOGISKE
UNDERSØKELSE
· NGU ·

Norges geologiske undersøkelse
Postboks 6315, Sluppen
7491 Trondheim, Norge

Besøksadresse
Leiv Eirikssons vei 39
7040 Trondheim

Telefon 73 90 40 00
E-post ngu@ngu.no
Nettside www.ngu.no