

NGU Rapport 2011.025

Foreløpig fare- og risikovurdering av ustabile
fjellparti ved Joasete-Furekamben-Ramnanosi,
Aurland kommune.

Rapport nr.: 2011.025		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Foreløpig fare- og risikovurdering av ustabile fjellparti ved Joasete-Furekamben-Ramnanosi, Aurland kommune.			
Forfatter: Reginald L. Hermanns, Halvor Bunkholt, Martina Bøhme, Luzia Fischer, Thierry Oppikofer, Jan Steinar Rønning, Trond Eiken		Oppdragsgiver: NVE	
Fylke: Sogn og Fjordane		Kommune: Aurland	
Kartblad (M=1:250.000) Årdal		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000)	
Forekomstens navn og koordinater: Stampa, Joasete, Furekamben, Ramnanosi, Flåm		Sidetall: 46 Kartbilag:	Pris: NOK 175
Feltarbeid utført: 2005-2010	Rapportdato: 18.02.2011	Prosjektnr.: 310100	Ansvarlig: <i>Øystein Nordgulen</i>
<p>Sammendrag: NGU utfører kartlegging av store fjellskred på oppdrag fra NVE. Fare- og risikoklassifisering av objekt inngår som en del av oppdraget. Det pågår pr. i dag kartlegging i tre fylke; Troms, Møre og Romsdal og Sogn og Fjordane. Resultatene fra denne kartleggingen vil ligge til grunn for hvilke objekt NVE vil bistå med ressurser til risikoreduserende tiltak, som i hovedsak vil være overvåking og varsling.</p> <p>Siden 2005 har NGU årlig utført arbeider ved det ustabile fjellpartiet ved Stampa i Flåmsdalen i Aurland oppsummert i denne rapporten. Ulike metoder for registrering av bevegelse har blitt benyttet, slik som dGPS, tolkning av flyfoto, luftbåren laserskanning, bakkebasert lidarskanning og strukturgeologiske analyser av data samlet i felt.</p> <p>NGU har i samarbeid med Universitetet i Oslo målt inn årlige dGPS data for det ustabile området siden 2005. Målingene viser at bevegelsene varierer mye fra år til år. Årsaker til dette antas å være påvirkning fra atmosfæriske forhold under innmåling, samt ugunstig plassering av dGPS-mottakerene. Gjennomsnittlig årlig horisontal bevegelse pr. målepunkt er maksimalt 12 mm/år i årene 2005-2010. Maksimal horisontal bevegelse for ett målepunkt innenfor ett års måling er ingen steder høyere enn 24 mm/år. Det ustabile området kan deles inn i ni delområder. Av disse er det seks delområder langs klippekanten i det ustabile området som anses som ustabile innenfor en sannsynlighet som omfattes av Plan- og bygningsloven. Ingen av disse seks delområdene har et individuelt volum som overstiger 450 000m³. Ett delområde, objekt B, anses som mest ustabil.</p> <p>Det er overveiende sannsynlig at de seks delområdene ikke vil kollapse samlet og samtidig, men i stedet komme ned som mindre steinskred som ikke vil nå ned til fjorden. Det presiseres at dette er en vurdering som trenger ytterligere testing og validering, i første omgang ved bruk av bakkebasert radar.</p> <p>I påvente av ferdigstilling av et nasjonalt system for fare- og risikoklassifisering av fjellskred, er det foretatt en foreløpig farevurdering av området. Tre ulike scenarier for fremtidige kollapser er utarbeidet.</p> <p>Scenario 1) En stor kollaps av et større segment av den ustabile fjellsiden som omfatter 10 -100 millioner kubikkmeter bergmasse. Massene vil ha utløp i dalbunnen og/eller fjordbassenget. Sannsynligheten for dette scenarioet er anslått som mindre enn 1/10 000 år.</p> <p>Scenario 2) En middels stor kollaps av et større segment av den ustabile fjellsiden som omfatter fra 100 000 til noen få millioner kubikkmeter masse, som kan nå ned til dalbunnen eller ut i fjorden. Sannsynligheten av dette scenarioet er anslått til 1-3 hendelser på 10 000 år.</p> <p>Scenario 3) En kollaps av et mindre segment av den ustabile fjellsiden som vil omfatte mellom 10 000 til 100 000 kubikkmeter masse som avsettes i dalsiden og ikke rekker ned til fjorden. Sannsynligheten for dette scenarioet er anslått til mellom 1/100 og 1/1000 hendelse pr år.</p> <p>En svært grov risikovurdering er foretatt. Denne viser at de minst sannsynlige scenarioene - fjellskred med utløp i fjorden - vil true liv og helse til mellom noen hundre og noen tusen mennesker, avhengig av når på året fjellskredet løser ut. Dette er koblet til turisttettheten, som er sesongvarierende.</p>			
Emneord:	ustabile fjellparti	skredavsetninger	
differensiell GPS-målinger	strukturgeologisk modell	kinematisk modell	
bakkebasert laserskanning	farevurdering	risikovurdering	

INNHold

1.	Innledning.....	7
2.	Foreløpig klassifiseringssystem brukt i dette notatet	8
3.	Berggrunngelogisk oversikt	8
4.	Oversikt over arbeider gjort av NGU 2003-2010.....	9
5.	dGPS målinger	10
5.1	dGPS-målingene fra 2006-2007	11
5.2	dGPS-målingene fra 2005-2010	11
6.	Sprekkesett og skifrihet i berggrunnen.....	13
7.	Beskrivelse av ulike blokker i det ustabile området.....	14
7.1	Blokk A.....	15
7.2	Blokk B.....	15
7.1	Blokk C.....	17
7.2	Blokk D.....	18
7.3	Blokkene E og F	19
7.4	Blokk G.....	19
7.5	Blokk H.....	19
7.6	Blokk J1	19
7.7	Blokk J2.....	20
7.8	De sørlige områder ved Gudmedøla	20
8.	Tidligere skredhendelser i Flåm-Aurland	20
9.	Vurderinger av arbeider og forslag fra NGI og SINTEF	21
9.1	Geologisk modell og stabilitetsmodellering av Stampa	21
9.2	Vurdering av elektromagnetiske målinger	22
9.3	Vurdering av kjerneboring.....	22
9.4	Vurdering av drenering.....	23

10.	Foreløpig fare- og risikoklassifisering	25
10.1	Farevurdering	25
10.2	Foreløpig risikovurdering	27
10.3	Konsekvens og risikoevaluering	28
11.	Konklusjoner	28
12.	Referanser.....	30
13.	Vedlegg	31
V.1	dGPS data.....	31
V.2	2500 strukturgeologiske målinger ved 122 stasjoner.....	37
V.3	Flåm – analysis of rotation of block B	40

FIGURER

Figur 1.	Utsnitt av berggrunnsgeologisk kart i området Flåmsdalen – Aurland	9
Figur 2:	Det ustabile området Stampa i Flåmsdalen..	10
Figur 3:	Horisontal endring i meter pr år for de ulike målepunktene..	11
Figur 4:	Vertikal endring i meter pr år for de ulike målepunktene.....	12
Figur 5:	Gjennomsnittlig horisontal- og 3D bevegelse pr år fra 2005-2010.....	12
Figur 6:	De ulike blokkene, samt de ulike dGPS-punktene med piler som viser størrelse på årlig horisontal middelbevegelse.....	16
Figur 7:	Detaljutsnitt av blokkene i fremkant av det bratte fjellpartiet.....	17
Figur 8:	Fotografier av blokk B.....	18
Figur 9:	Skisse av rotasjonsanalysen.....	18
Figur 10:	Kart som viser avsetningene kartlagt i fjellsiden ved Stampa, og volumer i millioner kubikkmeter.....	20
Figur 11:	Plassering av topografiske profiler.....	23
Figur 12:	Profil langs fjellsiden ved Stampa-Joasete	24
Figur 13:	Endring i strømningsretning for bekk/elv ved Joasete.	25
Figur 14:	Årlig horisontal gjennomsnittsbevegelse pr målepunkt	31
Figur 15:	Stereonett som viser svakhetsplan ved Flåm.....	37
Figur 16:	Hovedsett av svakhetsplan basert på feltmålinger	38
Figur 17:	Kart over fall og fallretning til lagdelingen.....	39

TABELLER

Tabell 1:	Oversikt over de ulike blokkeene, volumn og avgrensende strukturer	15
-----------	--	----

VEDLEGG

V.1	dGPS data.....	31
V.2	2500 strukturgeologiske målinger ved 122 stasjoner.....	37
V.3	Flåm – analysis of rotation of block B	40

1. Innledning

NGU utfører kartlegging av store fjellskred på oppdrag fra NVE. Fare- og risikoklassifisering av objekt inngår som en del av oppdraget. Det pågår pr. i dag kartlegging i tre fylke; Troms, Møre og Romsdal og Sogn og Fjordane. Resultatene fra denne kartleggingen vil ligge til grunn for hvilke objekt NVE vil bistå med ressurser til risikoreducerende tiltak, som i hovedsak vil være overvåking og varsling.

Dette notatet oppsummerer NGUs nåværende forståelse av det ustabile fjellpartiet ved Stampa i Flåmsdalen, Aurland kommune. Det er basert på dokumentasjon som er under utarbeidelse ved NGU vedrørende kartlegging av ustabile fjellparti i Sogn og Fjordane. NGU sitt arbeid har vært finansiert av Sogn og Fjordane fylke og Naturskadefondet frem til 2008, og av NVE fra og med 2009.

Siden 2005 har NGU årlig utført arbeider ved det ustabile fjellpartiet ved Stampa i Flåmsdalen i Aurland. Ulike metoder for registrering av bevegelse har blitt benyttet, slik som dGPS, tolkning av flyfoto, luftbåren laserskanning, bakkebasert lidarskanning og strukturgeologiske analyser av data samlet i felt.

Denne rapporten er en foreløpig fare- og risikoklassifisering og er utarbeidet på forespørsel fra NVE. Oppdraget omfatter også å gi en kort beskrivelse av metodikk for et foreløpig klassifiseringssystem (Kapitel 2), i tillegg til å kommentere de seneste aktivitetene som er utført av NGI og SINTEF (kapitel 9). Rapporten skal også gi råd om de foreslåtte boreprogrammene i det ustabile området.

NGU sine råd er basert på årelang erfaring med kartlegging og overvåking av ustabile fjellpartier i Norge, samt en kontinuerlig diskusjon med Åknes/Tafjord Beredskapssenter (ÅTB) som utfører den operative overvåking av høyrisiko-objekter. NGU har, i samarbeid med NVE, avholdt et arbeidsseminar på fare- og risikoklassifisering i juni 2010. Ledende nasjonale og internasjonale eksperter fra høyt rangerte universiteter og offentlige geologiske institusjoner deltok. De viktigste omforente konklusjonene fra dette arbeidsseminaret er oppsummert nedenfor, og har blitt benyttet som fundament for rådene som gis i denne rapporten.

Gjennom et program for kartlegging av ustabile fjellsider i fyllittområdet i Sogn og Fjordane ble det påvist en rekke ustabile fjellparti med aktiv bevegelse i større eller mindre deler av fjellsidene. Kartleggingen avdekket allerede i 2002 at et større fjellparti ved Stampa, Ramnanosi og Furekamben over Flåmsdalen i sørlige del av Aurlandfjorden er i bevegelse (Domaas et. al., 2002).

I en felles rapport til Forskningsrådet fra Forskningsprosjektet i fyllittområder (Domaas et. al. (2002), ble det foreslått å gjennomføre ytterligere undersøkelser av Stampa-området, og at disse burde inkludere en systematisk strukturell feltkartlegging og datainnsamling for å kunne konstruere modeller for definering av de kritiske områdene. NGU inkluderte området i sitt kartleggingsprosjekt over ustabile områder i Sogn og Fjordane, og tok samtidig initiativet til å installere observasjonspunkt for differensiell GPS-overvåking (dGPS). dGPS-data har senere blitt samlet inn årlig siden 2005 (NGU-Rapport 2008.033, samt data i denne rapporten). I tillegg har NGU utført omfattende feltarbeid med hovedfokus på strukturgeologien i området. Basert på høydetaljerte digitale terrengmodeller (1m oppløsning) har tidligere geomorfologiske kart blitt oppdatert, og volumer for ustabile blokker og førhistoriske skredavsetninger har blitt beregnet. Uavhengig av dette arbeidet ved NGU, har NGI utført analyser av skråningsstabiliteten (NGI Rapport 20081254-1). Disse analysene ble videre benyttet som et grunnlag for en risikomodell utført av SINTEF (SINTEF, 2009). I tillegg har NGI også utført storskala flybåren elektromagnetisk kartlegging (AEM) for å spore vannstrømninger i de ustabile områdene (Pfaffenhuber et al, 2010). E-CO Vannkraft har foreslått en drenering av utvalgte områder over 1000 meters høyde i de deformerende områdene som sikringstiltak mot fjellskred (E-CO, 2009b).

2. Foreløpig klassifiseringssystem brukt i dette notatet

NGU arbeider for tiden sammen med NVE og en nasjonal/internasjonale ekspertgruppe for å etablere et felles fare- og risikoklassifiseringssystem for ustabile fjellsider i Norge. Dette systemet skal brukes til evaluering av mulighetene for fjellskred. Klassifikasjonssystemet skal objektivt sammenlikne alle potensielle fjellskredområder i Norge og gi en prioritert liste over de stedene som har størst behov for rask oppfølging.

NVE har bedt NGU om en fare- og risikoklassifisering av den ustabile fjellsiden ovenfor Flåm i Aurland. Ettersom oppbygningen av klassifikasjonssystemet enda ikke er ferdig, kan NGU pr. i dag ikke gi en endelig fare- og risikovurdering av området. Vi kan likevel trekke ut de essensielle enighetene i ekspertgruppen fra det pågående arbeidet med systemet, og gi en foreløpig klassifisering av Stampa. Her skal vi kort oppsummere grunnlaget for rammeverket for den foreløpige klassifiseringen:

- Komplekse ustabile fjellsider trenger en grundig evaluering som reflekterer graden av kompleksitet. Forenklete scenarioer med enkle glideplan kan ikke beskrive komplekse fjellsider tilstrekkelig. Det er derfor behov for ulike scenarioer for områder som deformeres ulikt og/eller separat fra hverandre.
- I tillegg til det ustabile området i seg selv, må også alle andre områder som trues av et potensielt fjellskred (eller fjellskredrelatert oppdemming/flodbølge) analyseres. Det vil si alle områder som kan rammes av både primær- og sekundæreffekter.
- En god forståelse av fjellsidens nåværende tilstand (hastighet, historisk aktivitet langs fjellsiden) er essensielt for å kunne anslå sannsynligheten for en kollaps.
- Essensielt for å kunne fastsette en sannsynlighet for fremtidig kollaps er også en god forståelse av graden av deformasjon som har inntruffet frem til i dag, samt forståelse av det strukturelle rammeverket som tillater en fjellsidekollaps.
- Forhistorisk aktivitet langs fjellsiden med tilsvarende geologiske og topografiske forhold er en viktig del av forståelsen for fremtidige kollapser
- Usikkerhetene må også vurderes og forstås før en fullstendig klassifisering kan ferdigstilles.

Sannsynligheten skal beskrives i henhold til kravene i Plan- og bygningsloven. Foreløpig er konsekvenser av ulike scenarioer estimert svært grovt.

En forenklet modell for kartlegging av fjellskred er presentert i Høst (2006). De enkelte ustabile fjellparti har ulike egenskaper. Kartleggingen av objektene må tilpasses disse spesielle omstendighetene i hvert enkelt tilfelle. I det følgende er NGUs arbeid i Stampa oppsummert.

3. Berggrunneologisk oversikt

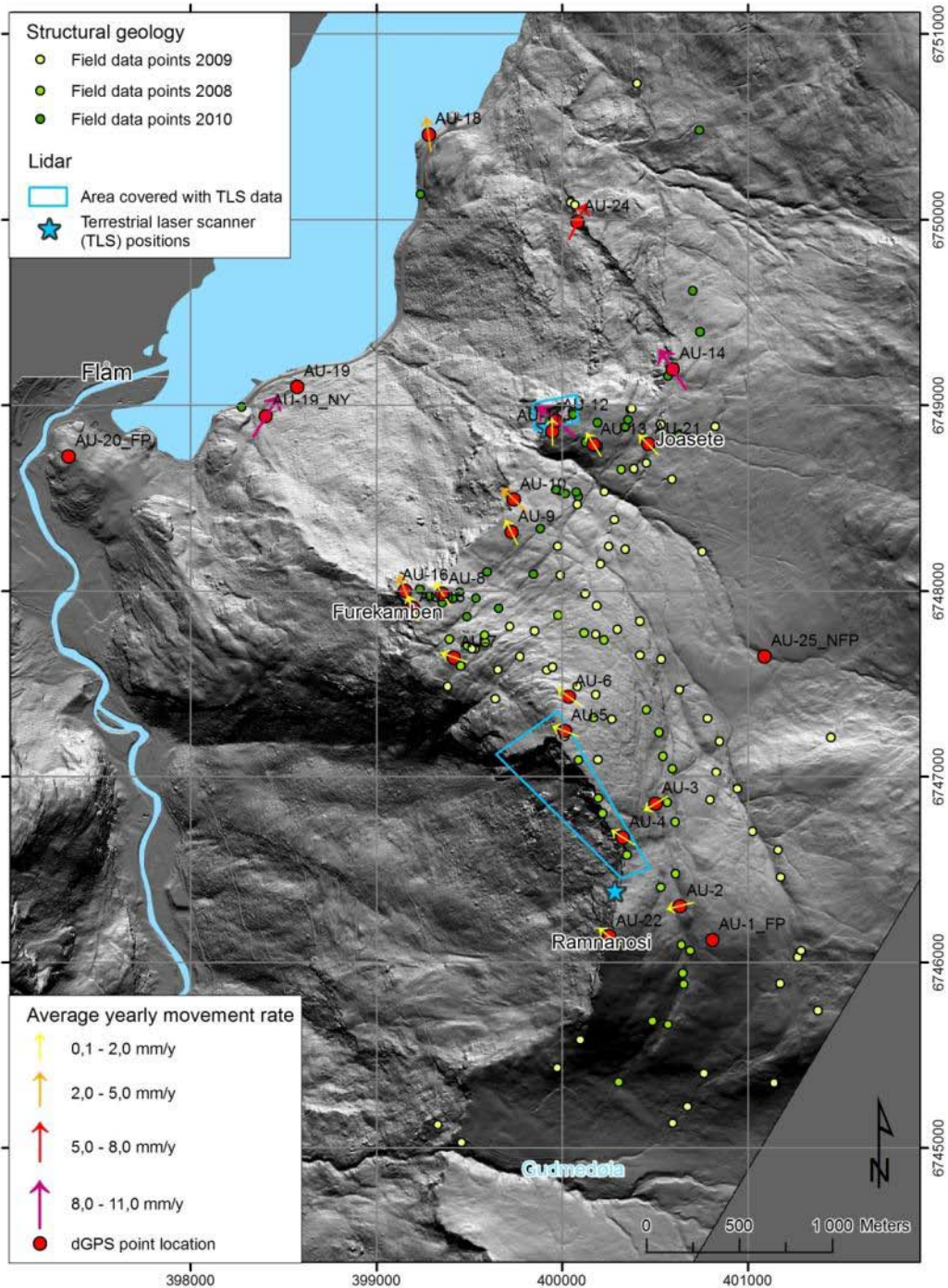
Berggrunnen består i hovedtrekk av tre hovedenheter med grunnfjellet som den underliggende enhet (**Figur 1**). Over dette ligger fyllitten som igjen er dekket av Jotundekket bergarter. Mellom fyllittdekket og Jotundekket opptrer det en markert skyveforkastning.



Figur 1. Utsnitt av berggrunnsgeologisk kart i området Flåmsdalen – Aurland (tatt fra NGUs berggrunnsgeologiske kart i Årdal i målestokk 1: 250 000). Bildet viser hvordan skyvedekket ligger over fyllitten ved Åberget. Dette er eneste stedet på østsida av Flåmsdalen hvor Jotundekket ligger over og stabiliserer fyllittbergartene.

4. Oversikt over arbeider gjort av NGU 2003-2010

- Årlige målinger med differensiell GPS (dGPS) har blitt utført siden 2005. I perioden 2005-2010 er det målt inn i alt 24 dGPS-punkter i området Flåm-Aurland, hvorav 20 i potensielt ustabil område (se Figur 2). 22 av målepunktene er innmålt årlig siden 2005 for å avdekke bevegelser. To punkter ble etablert og innmålt i 2009 og 2010.
- Detaljert strukturell feltkartlegging har blitt utført sommerne 2008, 2009 og 2010 i området nord for Gudmedøla.
- Orientering av sprekker og skifrihet (en tett og gjennomgripende planstruktur som gjør at fyllitten lett vil spaltes i millimeter- til centimeter-tykke flak) er registrert i over 2500 målepunkter fordelt på 122 lokaliteter i det ustabile området.
- Bakkebasert laserskanning ble utført samtidig i 2008 og 2009. Flybasert laserskanning er utført for å etablere en høyoppløselig digital terrengmodell med 1m oppløsning til bruk for terrengeanalyse og volumberegninger. De videre betraktningene i denne rapporten er basert på datagrunnlag fra disse arbeidene.



Figur 2: Det ustabile området Stampa i Flåmsdalen. Avmerket på kartet: dGPS målestasjoner med vektorer for gjennomsnittlig årlig forflytning og retning, punkter for feltobservasjoner og områder som er skannet med bakkebasert laserskanning (Lidar).

5. dGPS målinger

I ulike rapporter og notater knyttet til Stampa er det i utstrakt grad benyttet mistolkede måledata, hvorpå gale konklusjoner og antagelser er trukket vedrørende bevegelseshastigheten til bergmassene ved Stampa. Som eksempel på dette er bevegelser på opp mot 4 cm/år referert (NGI, 2008), (NGI & NGU, 2008), (E-CO Vannkraft, 2009a), (E-CO Vannkraft, 2009b).

5.1 dGPS-målingene fra 2006-2007

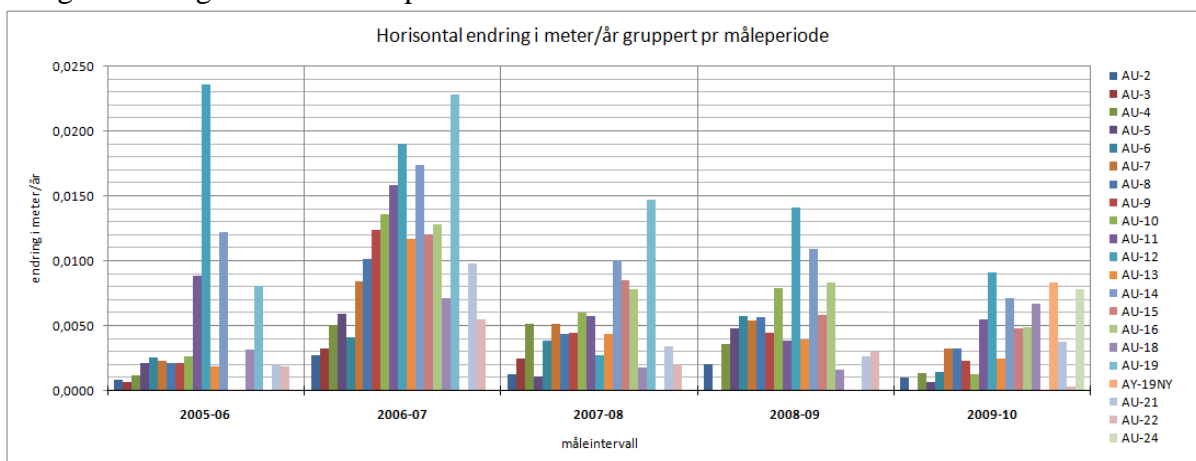
Målingene foretatt i tidsrommet 2006-2007 har blitt benyttet som et argument for at vantrykket er det avgjørende for stabiliteten til området (E-CO-vannkraft AS, 2009a). Begrunnelsen er at for de fleste målepunkter avviker målingene i 2006-2007 vesentlig fra tidligere og senere målinger med høyere verdier for årlig bevegelse. Dette illustreres i Figur 3. Avvikene gjelder både bevegelseshastigheter og bevegelsesretning. I det følgende vi bare diskutere signifikante resultater. Med signifikant i denne sammenhengen menes bevegelse større enn en definert måleusikkerhet. Denne usikkerheten er typisk i størrelsesorden 3-6 millimeter for 99 % signifikansnivå (Eiken, 2009) i horisontalplanet. For målinger i vertikalplanet er usikkerheten tre ganger større enn for horisontalplanet, det vil si ca 1-2 cm. Bevegelseshastighetene og -retningene til de ulike målepunktene varierer betydelig fra år til år. Figur 2 viser plasseringen av de fleste målepunktene. Variasjon mellom to påfølgende års målinger kan indikere tilfeldige målefeil (Eiken, 2009). Denne måleusikkerheten reduseres ved å midle den kumulative bevegelsen fra gjentatte målinger over flere år.

De beregnede bevegelsesvektorene viser at 17 av 19 dGPS-punkter hadde sine største bevegelser i tidsrommet 2006-2007. I en tidligere rapport (NGU 2008) ble det antatt at sterk snøsmelting og nedbør kan ha bidratt til de høye målingene i 2006-2007. Etter å ha fått målinger fra flere år konkluderte Eiken (2009) med at resultatene i 2007 mest sannsynlig er et resultat av ekstern påvirkning av måledataene fra atmosfæriske forhold under innmåling, og ikke representerer virkelige bevegelser. Hvor sterkt atmosfæriske forhold kan virke inn på målinger kommer frem i resultatene for 2010, der vi ser at 15 av 19 målepunkt viser en heving av bergmassene i tidsrommet 2009-2010 (Figur 4).

Den korrekte tolkningen av dataene er at den *sammenlagte* horisontale bevegelsen for de to årene fra 2005 til 2007 er 3,8 cm i målepunkt [AU-12]. Dette gir en årlig gjennomsnittlig horisontal bevegelse på 1,9 cm. Ingen målepunkt i Stampa viser en *årlig* registrert horisontal bevegelse høyere enn 2,4 cm. (Se Figur 3).

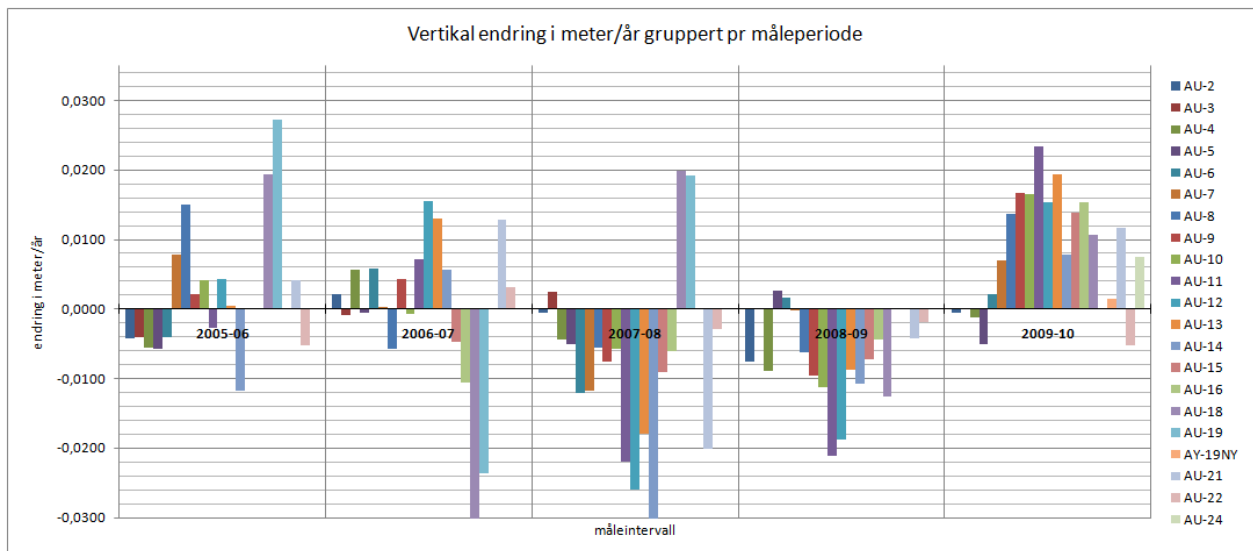
5.2 dGPS-målingene fra 2005-2010

I det følgende gis en gjennomgang av nåværende forståelse av dGPS-dataene etter seks års måling. Vi håper dette vil være med på å oppklare en del misforståelser angående bevegelseshastigheter ved Stampa.



Figur 3: Horisontal endring i meter pr år for de ulike målepunktene. Vi ser hvordan noen få punkter utmerker seg med større forflytning enn andre, særlig [AU-12, AU-14 & AU-19]. Året 2006-2007 har en større forflytning enn andre år for de fleste målepunkter.

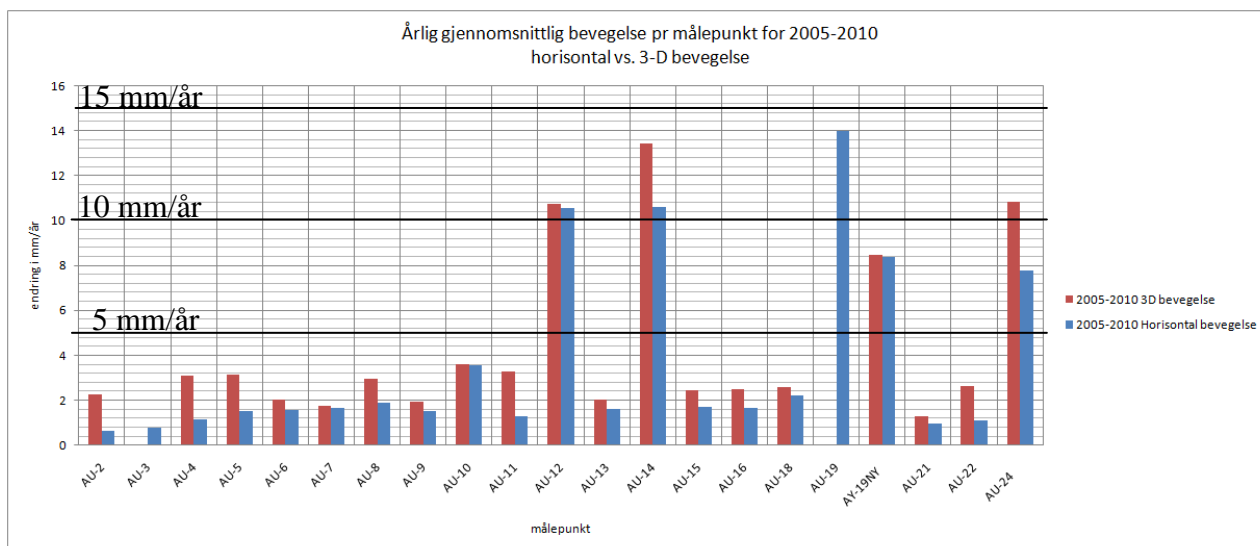
Det henvises også til Vedlegg V.1 dGPS data i dette notatet, hvor en komplett oversikt over alle dGPS data er presentert grafisk og i tabellform.



Figur 4: Vertikal endring i meter pr år for de ulike målepunktene. Merk hvordan nesten samtlige punkt viser en heving og ikke nedsynkning i 2010. Dette indikerer måleusikkerhet i høyderetningen.

Fra 2005 til 2010 har alle punktene i det antatt ustabile området, med unntak av to punkt [AU-3 & AU-18], vist signifikant bevegelse for en eller flere målinger. For målingene i 2010 var det kun [AU-12 & AU-14] som viste signifikant bevegelse.

Som nevnt er usikkerheten i målinger av vertikale bevegelser i størrelsesorden 1-2 cm. Av Figur 4 ser vi tydelig usikkerhetene knyttet til de vertikale målingene, da nesten samtlige målinger for 2010 viser bevegelse oppover.



Figur 5: Gjennomsnittlig horisontal- og 3D bevegelse pr år fra 2005-2010. Legg merke til at den 3-dimensjonale bevegelsen (inkludert høyde) ikke er vesentlig større enn den horisontale for majoriteten av målestasjoner. NB: AU-19 er kun målt fra 2005-2008, mens AU-19_ny og AU-24 kun er målt fra 2009-2010.

Vi fraråder å benytte de vertikale måledataene som grunnlag for konklusjoner eller beslutninger. Av dette følger også at vi fraråder å benytte den sammensatte bevegelsen av horisontal- og vertikal måling, altså en 3D-vektor. I det følgende vil derfor all referanse til bevegelse gjelde bevegelse i horisontalplanet. Dersom man likevel beregner en 3D-vektor, ser vi av Figur 5 at det ikke utgjør en stor forskjell på den årlige gjennomsnittlige forflytningen. Videre anbefaler vi at måledataene fra 2010 behandles med forsiktighet, da det kun er to av målepunktene som har statistisk signifikante bevegelser. For en komplett oversikt over alle målinger med signifikansnivå, se Vedlegg V.1 dGPS data.

Gjennomsnittlige årlige horisontale bevegelser varierer mellom 1 og 12 mm/år mellom 2005 og 2010.¹ Tre målepunkter [AU-12, AU-14 & AU-19] viser horisontale bevegelser større enn 10 mm/år. To av disse [AU-12 og AU-14] er plassert nær hverandre i den nordlige del av området, på to mindre blokker som er nesten fullstendig adskilt fra omkringliggende bergmasser (blokk B og A i Figur 6). Det tredje punktet [AU-19] var plassert på en kampestein i ura i nedre del av fjellskråningen hvor overflatebevegelser generelt er vanlig, og forteller derfor ingenting om bevegelsene for det ustabile fjellpartiet. Dette punktet er nå fjernet pga. anleggsarbeid.

Mellom Joasete og Furekamben indikerer dGPS-målinger av punktene [AU-19NY og AU-24] i nedre del av fjellsiden en bevegelse på 8 mm/år. Begge disse punktene var nye i 2009, og bevegelse ble målt inn første gang i 2010 (Figur 2 og Figur 6). Når det gjelder punkt [AU-24] er bevegelsesretningen noe merkelig, så flere år med målinger behøves før en konklusjon kan trekkes. Øvrige målepunkt i det ustabile området viser årlige gjennomsnittshastigheter lavere enn 5mm/år.

Det fremgår av bevegelsesplottene dGPS-dataene at det bare er punktene [AU-12, AU-14 & AU-19] som har en konsistent bevegelsesretning, mot nordvest. Se Vedlegg V.1 dGPS data

6. Sprekkesett og skifrihet i berggrunnen

Den strukturgeologiske modellen for Stampaområdet er kompleks og blir fortløpende forbedret. En detaljert foreløpig gjennomgang av de strukturelle forhold ble skissert i NGU (2010a). Dagens forståelse baserer seg på ca 2500 strukturgeologiske målepunkter fordelt på 122 lokaliteter. Videre er det benyttet bakke- og luftbasert laserskanning som har ledet frem til en svært detaljert digital terrengmodell med 1 meters oppløsning.

Basert på disse dataene er det konkludert med at småskala sprekker i fjellet opptrer i fire hovedgrupper med svært konsistent orientering og opptreden over hele det ustabile området. Disse fire sprekkesettene avgrensede de ustabile blokkene (A, B, C, D, E., F, G1, G2, G3, G4, G5, H, J1, J2)) som er vist i Figur 6. Sprekkesettene har gitt opphav til flere åpne kløfter (opp til 300 m lange og 10 m brede) som har utviklet seg langs de fire retningene. Sprekkesettene har generelt en utstrekning på noen ti-talls meter. Det er derfor nødvendig å aktivere svært mange sprekker for å danne store, åpne bak- og sideavgrensede sprekker.

Skifriheten i fjellet er sterkt foldet i et komplekst mønster. Tross dette kan skifrihetens foretrukne orientering sies å være svakt til moderat fallende mot vest til sørvest, med andre ord skrått ned mot fjorden. Den gjennomsnittlige orienteringen til skifriheten er 15 graders fall i retning sørvest med et standardavvik på 19°. Denne store variasjonen i skifriheten gjør det lite sannsynlig at det kan dannes et enkelt, gjennomgående glideplan for større områder. Bevegelsesanalyser basert på disse strukturelle data viser at både velting og glidning er mulige kollapsmekanismer for massene både i den nordvestvendte og sørvestvendte fjellsiden i området. Det må likevel understrekes at skifriheten varierer over korte avstander, og at et skifrihetsplan ikke kan representere et kontinuerlig glideplan over større områder. For å danne et slikt utstrakt glideplan må dermed mange "steinbroer" brytes av, noe som vil kreve svært mye energi.

Analysen av de strukturelle feltmålingene viser ingen signifikant ulikhet mellom de strukturelle hovedområdene, altså blokkene G, H og J som vil omtales og beskrives senere i dette dokumentet (Figur 6, og Figur 15 i Vedlegg V.2). Også på denne skalaen er gjennomsnittsorienteringen til skifriheten veldig konsistent. På grunn av de lave fallvinklene

¹ Punktet AU-19 er kun midlet mellom 2005-2008, og viste i dette tidsrommet 14mm/år bevegelse. Dette punktet var plassert på en kampestein i ura i fjellsiden, og representerer ikke bevegelsen til fjellsiden.

til skifriheten vil små folder og unduleringer likevel gi signifikante endringer i fallretningen (se Tukkensæter, 2010 og Vedlegg V2).

Bevegelsesanalysene for de strukturelle hovedområdene (blokkene G, H og J) viser mulighet for planar glidning delvis på skifrihet (S1) dersom denne er brattere enn bergartenes friksjonsvinkel som er satt til 20° i denne studien. (Se Figur 16 i Vedlegg V2). I tillegg indikerer bevegelsesanalysene at utvelting langs enkelte eller flere sprekkesett er mulig i hele området. Dette vil i hovedsak påvirke blokker og bratte fjellsider i fronten av det ustabile området. En allerede inntruffet utvelting på 5° kan dokumenteres for blokk B (se Figur 9).

Skifriheten er svært variabel over hele området, selv innenfor de enkelte blokkene. Fallretningen varierer med 70-130 grader innenfor små avstander på bare noen titalls meter. Man kan derfor utelukke glidning på ett enkelt skifrihetsplan. En slik modell vil trenge omfattende tøyning/strekking av bergartsbroer, hvorpå den deformerte bergmassen vil brytes opp i mindre blokker. Dette er observert i felt. En kollapsmekanisme sammensatt av utvelting og planar glidning på en skala for mindre blokker, kinematisk lik modellen foreslått av Brideau og Stead (2009), er den mest sannsynlige kollapsmekanismen.

7. Beskrivelse av ulike blokker i det ustabile området

Basert på den høyoppløslige digitale terrengmodellen har vi delt området fra nord for Joasete og ned til Gudmedøla i 14 blokker (delområder). Inndelingen er basert på dGPS-data, strukturelle data og morfologiske observasjoner som indikerer deformasjon av fjellsiden. Noen av disse blokkene samsvarer med blokkene definert i Domaas et al., (2002) og avgrenset på flyfoto. Vi anbefaler å bruke dette notatets blokkindelning i fremtiden, fordi det er basert på de nyeste dataene og bedre definerte konturer.

Den nordlige delen av området (nord og vest for Joasete) viser de mest utviklede tegn til deformasjon. Det er i dette området vi finner de største åpne sprekkene, samt to nesten helt frittstående blokker (blokk A og B). Det er på blokk A og B de største bevegelsene er målt. Skifriheten i dette området faller ca 20° mot vest, og kan ikke utelukkes å virke som et underliggende glideplan.

Den midtre delen av den ustabile fjellsiden mellom Joasete og Furekamben har åpne sprekker, som er opp til 50 m lange og 5 m brede. Større bakkeinnsynkninger har utviklet seg her (opptil 700 m lange og 10 m brede, se Figur 6). Horisontale bevegelseshastigheter er 2-4 mm/år nær fronten av klippen [AU-10, AU-15 & AU-16], og hastigheten avtar med avstand fra fronten.

I den sørlige delen av området, sør for Furekamben og rundt Ramnanosi, har større bakkeinnsynkninger utviklet seg langs foliasjonen. Disse kan spores opp til 3 km på den høyoppløselige digitale terrengmodellen. Området er videre preget av en 200 m høy fjellside med høy steinsprangaktivitet. Bevegelseshastighetene her er mindre enn 4 mm/år, og det er færre og mindre utviklede tegn til gravitasjonskollaps enn i de øvrige områdene.

Tabell 1: Oversikt over de ulike blokkene, volum og avgrensende strukturer (se figur 6 & 7).

	GPS punkt	Volum [m ³]	Avgrensende strukturer		
			Baksprekke	Laterale frigjøringsprekker	Undre grense
Blokk A	AU-14	130 000	120/90 (J3)	247/74 (J1) 036/80 (J4)	259/18 333/29
Blokk B	AU-12	280 000	281/75 (J3)	226/46 331/74 (J4)	302/38
Blokk C	AU-11	100 000	331/74 (J4) 313/74 (J3)	270/80 (J1) 016/75 (J2)	283/41
Blokk D	AU-15	280 000	-	240/80	310/40
	AU-16				
Blokk E	AU-10	380 000	300/76 (J3)	258/80 (J1)	005/18
Blokk F	-	450 000	333/85 (J4)	258/80 (J1)	005/18
Blokk G1	AU-21 AU-13 AU-11 AU-12	31 millioner	285/80 (J3) 310/80 (J4)	-	300/27
Blokk G2	AU-13 AU-11 AU-12	27 millioner	290/90 (J3) 310/90 (J4)	-	300/27
Blokk G3	AU-11 AU-12	7 millioner	290/80 (J3) 335/80 (J4)	-	309/34
Blokk G4	-	2 millioner	335/80 (J4)	250/80 (J1)	309/34
Blokk G5	-	1.5 millioner	290/80 (J3)	250/80 (J1)	309/34

Figur 6 viser at de punktene som har en bevegelse mer enn 5 mm/år ligger på frittstående eller delvis frittstående blokker i fronten av den bratte fjellsiden. Ved bruk av luftbasert laserskanningsdata har vi utført en detaljert analyse av disse områdene. De avgrensende strukturerne er undersøkt og volumet for hver blokk er vurdert. Figur 6 viser de avgrensede blokkene. Alle blokkene viser en indre oppsprekning, og det er ikke gitt at de vil kollapse som én stor blokk hver for seg. Dette innebærer at volumene som er angitt nedenfor må betraktes som øvre grenser for volumestimat. Av samme grunn kan det heller ikke utelukkes at de enkelte dGPS-punktene som er satt ut på hver blokk kun gjenspeiler bevegelsen til en del av blokken avgrenset av interne sprekker, istedenfor hele blokkens bevegelse.

7.1 Blokk A

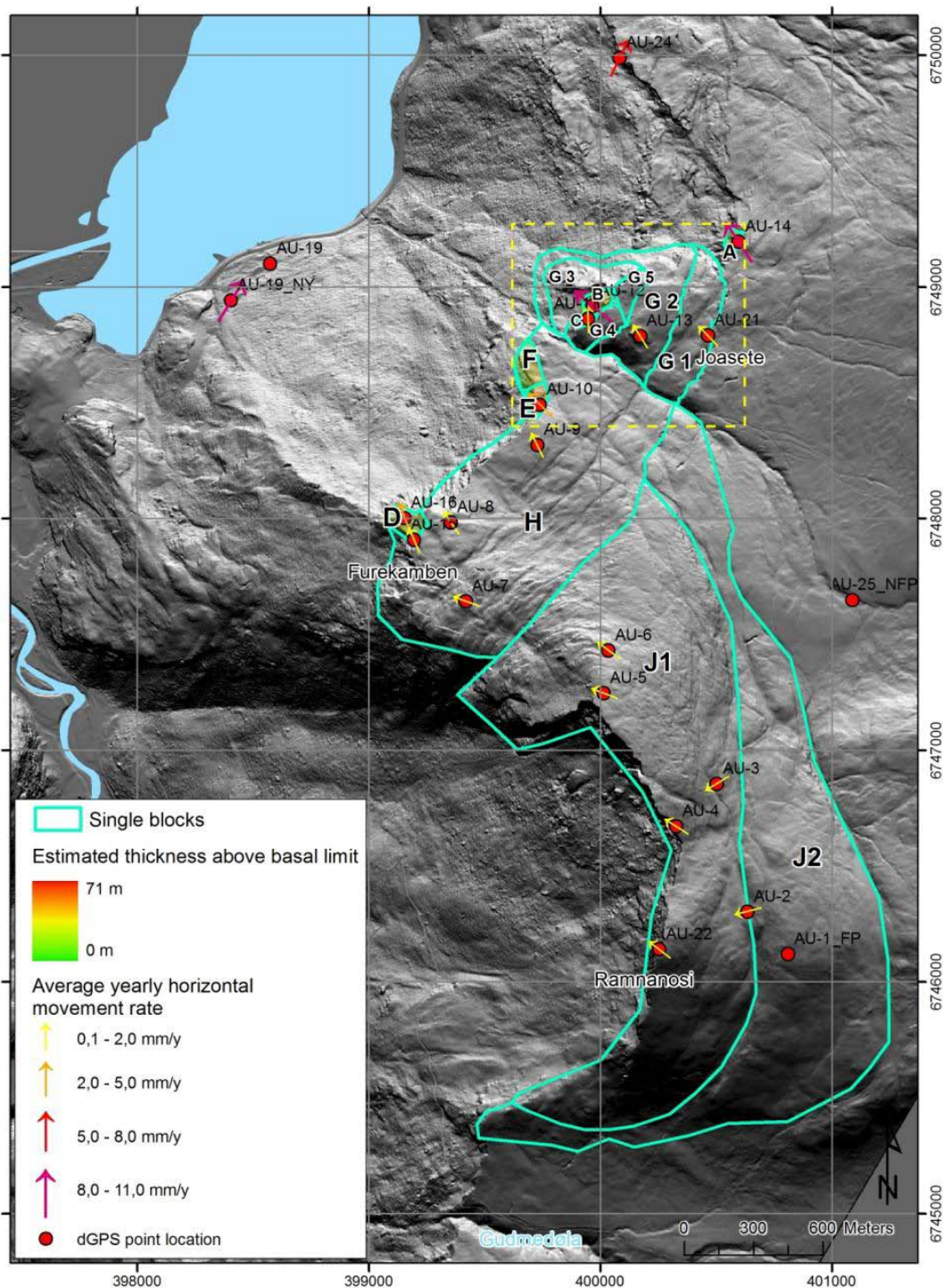
dGPS-punktet som viser den høyeste årlige horisontale bevegelse i snitt (11mm/år) er på blokk A [AU-14]. Blokk A er tydelig avgrenset av sprekker på tre sider som følger tre av de tidligere omtalte sprekkesettene. Sprekkene er flere meter dype og brede. Den undre avgrensningen av blokken er anslått fra den detaljerte digitale terrengmodellen (DTM), og er sannsynligvis representert ved skifriheten. Bevegelsesvektoren fra dGPS-målingene samsvarer utmerket med glidning på et av de identifiserte planene i foten av blokken.

Volumestimat er satt til maksimalt 130 000 m³. Store sprekker gjør at blokken er nesten fullstendige frikoblet fra berget i bakkant av blokken. Det er dermed svært lite sannsynlig at det er et felles grunnvannsspeil mellom denne blokken og fjellsiden i bakkant.

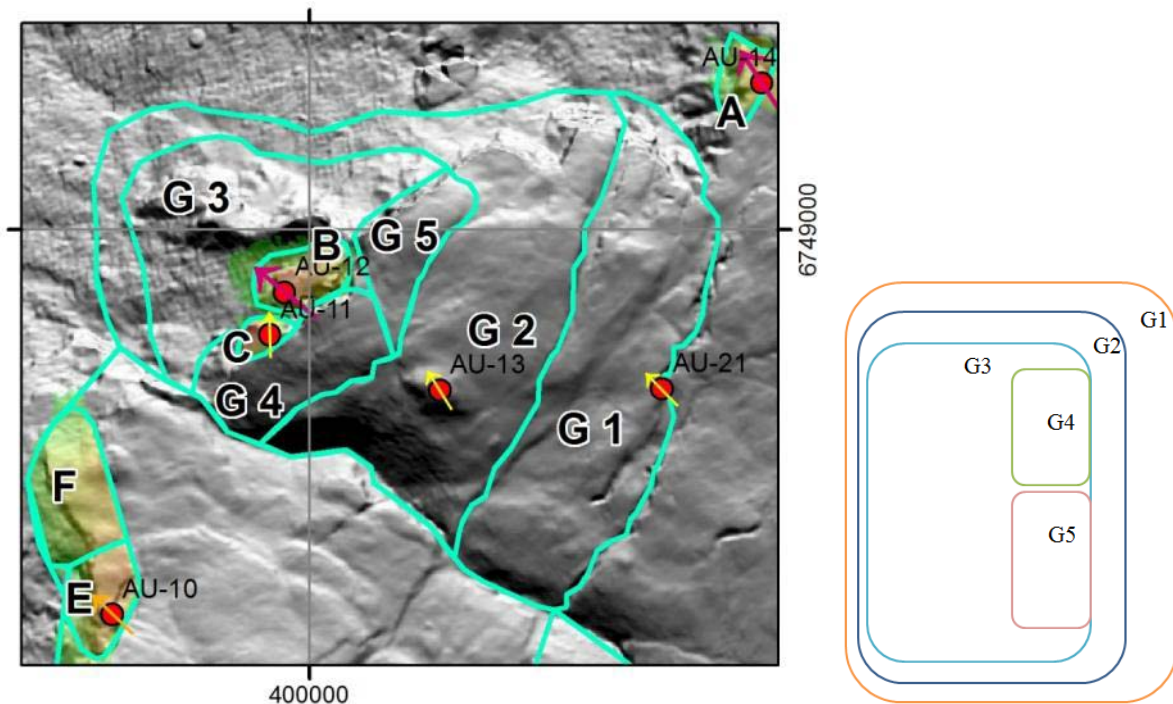
7.2 Blokk B

Blokk B anses som den mest kritiske blokken. dGPS-punkt [AU-12] på blokken viser en horisontal snitthastighet på 11mm/år. Denne blokken er kraftig oppsprukket av mange sprekkesett, og det er ikke kjent om den registrerte bevegelsen er representativ for hele blokken eller kun en liten del av blokken avgrenset av de mange sprekke. Videre er blokken fullstendig frittstående på tre sider, atskilt av flere titalls meter dype og brede sprekker. Ved å

avgrense blokken i underkant er volumanslaget satt til 220 000 – 280 000 m³ for blokk B (kalt blokk Dynga i Domaas et al., 2002). Ifølge NGI (2009) er dette kritisk volum med tanke på eventuell flodbølgedannelse. Men det må presiseres at blokk B viser en høy grad av deformasjon, og det er ikke gitt at hele blokken vil løsne samtidig. Det mest sannsynlige er at den vil falle ned i flere mindre hendelser. På grunn av blokkens nesten fullstendige frikobling fra berget i bakkant, er det svært lite sannsynlig at det er et felles grunnvannsspeil mellom denne blokken og fjellsiden i bakkant. Siden blokk B anses som mest ustabil, er den gitt et eget avsnitt i vedlegg V.3 Flåm – analysis of rotation of block B



Figur 6: De ulike blokkene, samt de ulike dGPS-punktene med piler som viser størrelse på årlig horisontal middelbevegelse. Gul firkant: Se Figur 7 for detaljer.



Figur 7: Detaljutsnitt av blokkene i fremkant av det bratte fjellpartiet. Legg merke til at G1 inneholder alle blokkene G2-G5, G2 inneholder G3-G5 og G3 inneholder blokkene G4 & G5.

I det følgende gjengis et kort sammendrag på norsk av dette vedlegget:

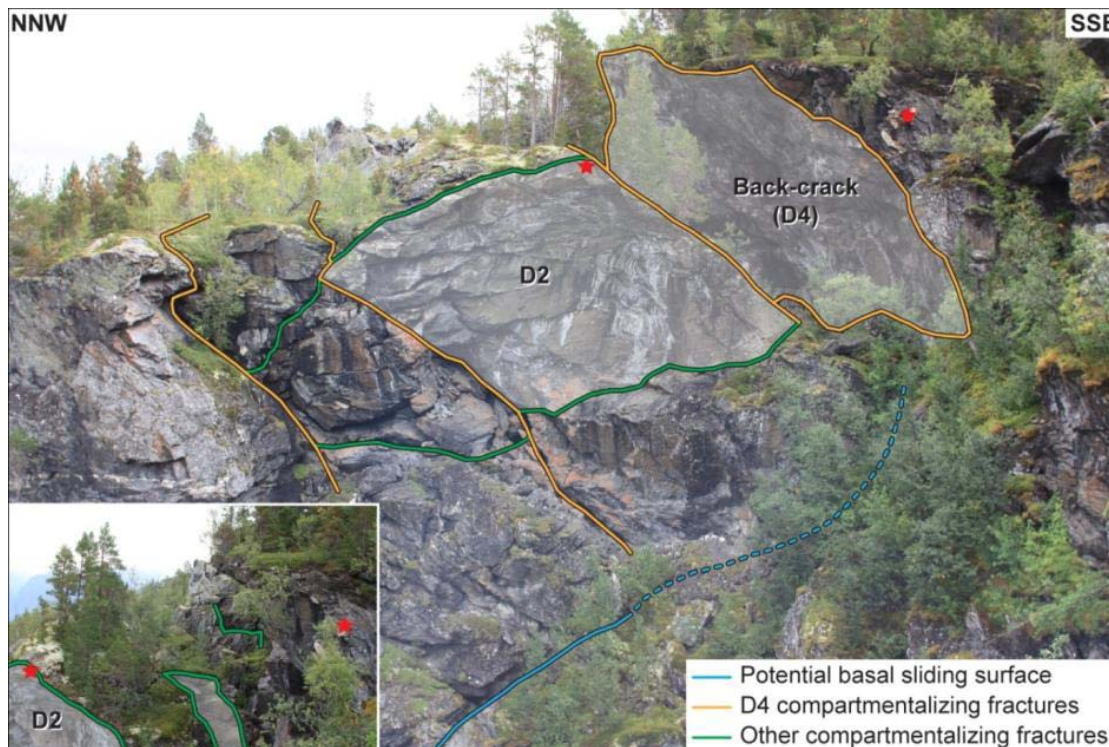
En detaljert strukturell analyse av blokk B, basert på data fra bakkebasert laserskanning, viser at blokken har en høy oppsprekkingsgrad. Opptil 8 ulike grupper svakhetsstrukturer er registrert (skifrihet, sprekker, brudd, forkastninger m.m.). Kinematiske glidetester viser at det er mulig for bergmassene å gli oppå skifriheten. Skifriheten er derimot ikke gjennomgående, på grunn av isoklinal folding. Dermed må det dannes bruddstrukturer på tvers av skifriheten dersom det skal eksistere et gjennomgående felles glideplan. Dette eksisterer mest sannsynlig under blokk B, da store forflytninger har skjedd i tidligere tider (Figur 8). Dette underliggende glideplanet kan også forårsake kileutglidning sammen med bruddstrukturer som faller bratt mot sør (D4 & D5), eller mot nord (D1). De subvertikale, sørøstlig fallende bruddstrukturene (D2, D3, D3') muliggjør velting som mekanisme for kollaps. Videre later det til at bruddstrukturene D2 og D4 deler blokk B inn i flere segmenter (Figur 8). Dette indikerer at en fullstendig kollaps av hele blokk B i én hendelse ikke er sannsynlig.

Basert på forskjellene i orientering av bruddstrukturene mellom den relativt stabile baksprekken og den ustabile blokk B, ble det beregnet en sammenlagt rotasjonsbevegelse av blokk B. Denne rotasjonen har funnet sted etter at blokk B frigjorde seg fra baksprekken (Figur 9). Denne analysen indikerer en rotasjon på 4.3° mot nord-nordvest. Dette er om lag samme bevegelsesretning som er målt av dGPS.

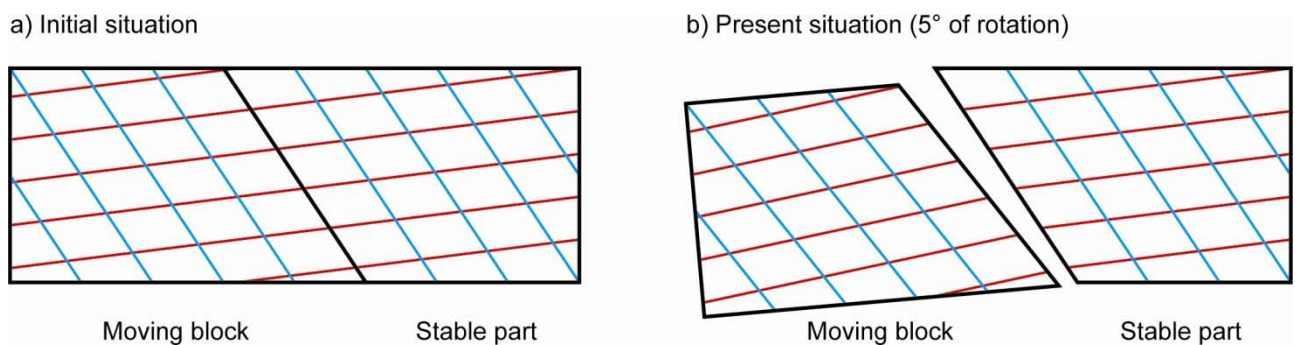
7.1 Blokk C

Blokk C ligger rett ved siden av blokk B. Punktet [AU-11] står tett opptil den bakre avgrensende sprekken og viser en årlig horisontal middelbevegelse på 1 mm/år. Som for de andre blokkene er den underliggende avgrensning heller ikke for blokk C entydig kjent, men det antas et plan i foten av blokken parallelt med fjellsiden. Dette gir et volum på $100\,000\text{ m}^3$. Bevegelsesvektoren for punkt [AU-11] passer ikke for glidning langs det undre planet, men snarere for glidning parallelt baksprekken. Det vil altså si en dominerende vertikal forflytning.

På grunn av dype sprekker har blokken en relativt høy grad av frikobling fra berget i bakkant. Det er derfor svært lite sannsynlig at det er et felles grunnvannspeil mellom denne blokken og fjellsiden i bakkant.



Figur 8: Fotografier av blokk B. Viser inndelingen av blokken forårsaket av bruddsettene D2 og D4. Røde stjerner indikerer felles punkter i begge bildene. Segmentet avgrenset av D2 kan velte mot vest (mot leseren).



Figur 9: Skisse av rotasjonsanalysen. Analysen er basert på endringer i orienteringen av svakhetsstrukturene (røde og blå linjer) på grunn av rotasjonen av blokken mens den var i bevegelse. a): opprinnelig tilstand, hvor svakhetsstrukturene er kontinuerlige; b): nåværende tilstand med 5° rotasjon av den forflyttede blokken sammenliknet med den stabile delen.

7.2 Blokk D

Denne blokken er mindre utviklet som selvstendig blokk enn blokkene A-C. Det er to frie sider og en side som er et markert søkk i topografien. Den fjerde siden av blokken er svært usikkert definert, og kan bare anes som en innsynkning i topografien. Som for blokk C antas en undre avgrensning som et plan parallelt med fjellsidens helning i foten av blokken. Dette muliggjør et volumestimat som er anslått til 280 000 m³.

dGPS-punktene [AU-15] og [AU-16] viser samme bevegelsesvektor, og begge punktene antas derfor å representere denne blokken. Begge punktene viser en årlig gjennomsnittshastighet på 2 mm/år mellom 2005-2010. Denne blokken er ikke frikoblet fra berget i bakkant ved store

sprekker slik som blokkene A-C. Det er likevel mest sannsynlig at det ikke eksisterer et felles grunnvannsspeil mellom denne blokken og fjellsiden i bakkant.

7.3 Blokkene E og F

Punkt [AU-10] er plassert på blokk E. Den årlige gjennomsnittshastigheten for dette punktet er 4 mm/år mellom 2005 og 2010. Dersom blokk E beveger seg som en hel blokk, må blokk F som står foran blokk E, også bevege seg. Blokkene har samme avgrensende strukturer.

Dersom en underliggende avgrensning defineres parallelt fjellsiden i foten av blokkene, vil blokk E få et volum på 380 000 m³ og blokk F 450 000 m³. Et slikt plan samsvarer derimot ikke med bevegelsesvektoren fra punkt [AU-15]. Det finnes ikke store sprekker som frikobler blokken fra berget i bakkant. Det er likevel mest sannsynlig at det ikke eksisterer et felles grunnvannsspeil mellom disse blokkene og fjellsiden i bakkant.

7.4 Blokk G

Blokk G omfatter hele det ustabile området nordvest for Joasete. Denne blokken viser ikke store bevegelsehastigheter fra dGPS-data. Men fordi NGI (2009) utførte flodbølgemodelleringer med utgangspunkt i denne blokken har vi likevel utført detaljerte volumberegninger av blokk G. Med utgangspunkt i synlige strukturer fra den detaljerte digitale terrengmodellen (DTM), kan blokk G deles inn i 5 delblokker.

Figur 7 viser hvordan delblokk G1 omfatter hele området, inklusive alle underblokker G2-G5. Strukturene som avgrenser blokken i bakkant og på sidene kan lett identifiseres, men nok en gang er det stor usikkerhet knyttet til avgrensningene i sålen av blokken. Dersom man igjen antar et plan parallelt fjellsiden, langs foten av det bratte fjellpartiet frontklippen, gir dette et volum på 31 millioner m³. De andre delblokkene kan sees i Figur 6 og volumet er oppgitt i tabell 1.

Grunnvannsspeilet til blokk G1 er mest sannsynlig ikke forbundet med grunnvannsspeilet for blokkene A-F.

7.5 Blokk H

Blokk H representerer et 1 km² stort område mellom Markåna og Furekamben, med unntak av blokkene D, E og F langs kanten av det bratte fjellpartiet. Blokken er delt opp av sprekker som har åpnet seg noen titalls cm, og søkk eller innsynkninger i bakken som er flere meter brede og titalls meter lange.

dGPS punkt AU-6, AU-7 og AU-9 ligger på blokken. Disse indikerer at blokken har beveget seg totalt mellom 2-7 mm mot nordvest siden 2005. Dette er omtrent like mye som den statistiske usikkerheten ved målingene.

7.6 Blokk J1

Blokk J1 omfatter Ramnanosi og den bakre delen av deformasjonssonen ned til Markåna. Blokken er mer enn 1 km bred i nord og flere hundre meter bred i sør. Baksiden av blokken avgrenses av et flere meter til titalls meter dypt et søkk i bakken..

Den sørvestlige avgrensningen av blokken er en flere hundre meter høy fjellside med aktivt blokkfall og utvelting av masser med volum på mellom 100 til flere tusen m³. Noen av blokkene i fjellsiden virker kritiske og vil falle ned i nær fremtid, men volumene er for små til at de vil nå ned til bebyggelsen. Da det ikke er mulig å foreta feltarbeid på disse blokkene er det nødvendig å benytte fjernmålingsanalyser som radar eller lidar (light detection and ranging radar).

7.7 Blokk J2

Blokk J2 omslutter blokk J1 i øst og sør. Den markeres av et søkk som ligger 100 til 700 meter bak søkket som markerer den østlige grensen av blokk J1. dGPS-punktene [AU-1, AU-2, AU-3, AU-4, AU-5, AU-6 & AU-22] er plassert på J1 og J2.

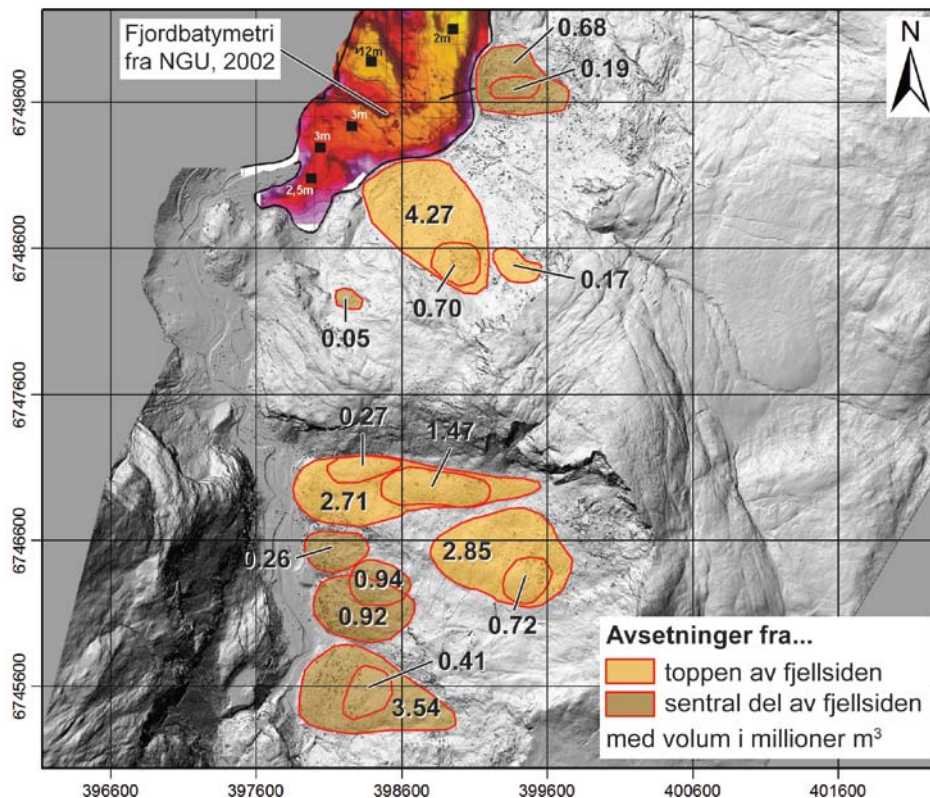
Bevegelsesretningen er ikke konsistent, men indikerer en retning mot nordvest og sørvest. Bevegelsene har vært mindre enn måleusikkerheten for de fleste punktene i de siste 5 årene. Dette gjør det vanskelig å si om blokkene har beveget seg i det hele tatt i dette tidsrommet.

7.8 De sørlige områder ved Gudmedøla

I den sørlige delen av det ustabile området renner Gudmedøla, med bratte fjellsider på nord- og sørsiden av elveleiet. Dette området preges av steinsprangaktivitet. NGU har ikke arbeidet i områdene sør for Gudmedøla.

8. Tidligere skredhendelser i Flåm-Aurland

På starten av 2000-tallet ble det målt batymetri og skutt refleksjonsseismikk i Aurlandsfjorden (NGU, 2002). Både batymetriske data og de seismiske undersøkelsene viser at store deler av bunnen langs Aurlandsfjorden inn mot Flåm er dekket av tykke skredavsetninger. Det største skredet er anslått å være ca 11000 år gammelt og dekker hele fjordbunnen ut til Klovnasteinen (NGU, 2002). Ett eller flere mindre skred er identifisert i området ut fra Stampa. Rekkevidden er mindre, og datering som er foretatt på sedimentprøver viser at skredet er ca 3000 år gammelt (NGU, 2002; Blikra et al., 2006).



Figur 10: Kart som viser avsetningene kartlagt i fjellsiden ved Stampa, og volumer i millioner kubikkmeter. Enkelte avsetninger har sitt opphav i hovedskrenten av fjellsiden, mens andre har sitt kildeområde i midtre del av fjellsiden. Merk: Volumene av overlappende avsetninger ble subtrahert fra de større volumene. Batymetridata støtter analysene gjort i fjellsidene.

NGU har i 2010 foretatt en analyse av tidligere kartlagte skredavsetninger (NGU, 2002) som befinner seg i fjellsidene ved Stampa. Disse kan sees som tunger av skredmateriale i fjellsiden. Disse steinskred- og fjellskredavsetningene har blitt kartlagt i detalj basert på fjellskyggekart fra den digitale terrengmodellen og feltkart fra NGU (2002). Tykkelsen på avsetningene er beregnet ved å bruke en algoritme fra Jaboyedoff et al. (2004). Denne algoritmen beregner en jevn overflate mellom grensene for hver tunge av avsatt skredmateriale. Dette gir en antatt topografioverflate før skredhendelsen. Ved å integrere tykkelsen over denne overflaten innenfor tungen av skredmateriale kan volumet til det avsatte skredmaterialet beregnes.

Analysen viser skredavsetninger fra 50 000 m³ til 4,27 millioner m³, se Figur 10. Enkelte av de eldre skredene har sitt kildeområde i de bratte fjellsidene i fronten av det ustabile området ved Stampa. Andre har kildeområde i den midtre delen av fjellsiden. Mye taler for at enkelte av hendelsene i Flåmsdalen utviklet seg som steinskred, og ikke fjellskred. Dette begrunnes med at avsetningene stanset ved foten av fjellsiden. Skredhendelsen som avsatte 4,27 millioner m³ på den nordvestlige fjellsiden var mest sannsynlig et fjellskred som nådde fjorden.

Dersom man antar at disse forhistoriske avsetningene er forårsaket av enkelthendelser (og ikke mange kollapser av mindre volumer som avsettes ovenpå hverandre), later det til at de ustabile blokkene ved Stampa (blokk A til F: alle mindre enn 500 000 m³) mest sannsynlig vil utvikle seg som steinskred og ikke rekke ned til fjorden. Det presiseres at denne foreløpige hypotesen trenger mer validering og testing. Undersøkelser med bakkebasert radar og lidar er anbefalt.

9. Vurderinger av arbeider og forslag fra NGI og SINTEF

9.1 Geologisk modell og stabilitetsmodellering av Stampa

NGI (2008) har foreslått en forenklet stabilitetsmodell som forutsetter et kontinuerlig glideplan med 20° fall ut mot fjorden. Denne modellen er basert på vilkårlig utvalgte observasjonspunkt, som er ikke kartlagt, og konkluderer med at glideplanet i stor grad er kontinuerlig langs skifriheten i bergarten. Denne hypotesen finner ikke støtte i NGUs omfattende datainnsamling av strukturelle data, som tvert imot viser at det ikke finnes en kontinuerlig skifrihetsorientering over hele fjellsiden.

NGUs målinger viser at skifriheten er svært variabel, og det vil dermed ikke dannes et kontinuerlig glideplan for større områder uten at bergartsbroer brytes av med påfølgende sterk indre deformasjon av bergmassen.

I tillegg er de kinematiske modellene benyttet av NGI overforenklet, da modellen i sin helhet er basert kun på de begrensede målingene av skifriheten. NGUs strukturelle målinger avdekker fire steile sprekkesett som er godt utviklet over hele det ustabile området. Disse muliggjør utvelting som kollapsmekanisme i de bratte fjellpartiene. Dette har også blitt dokumentert som en allerede pågående prosess i vedlegg V.3 Flåm – analysis of rotation of block B.

Stabilitetsmodellen som NGI har benyttet i NGI (2008), og som også SINTEF har benyttet i notat fra SINTEF (2009), passer for enkle beregninger av veiskjæringer, men ikke for stabilitetsvurderinger av så store og komplekse fjellsider som Stampa. Her må langt mer sofistikerte stabilitetsmodeller implementeres, for eksempel Kveldsvik et al. (2008) og Welkner et al. (2010).

9.2 Vurdering av elektromagnetiske målinger

Elektromagnetiske målinger i Holo (sør for Gudmedøla) ble rapportert i Domaas et al. (2002). Nye elektromagnetiske målinger fra helikopter, utført av SkyTEM fra Danmark, viser meget gode data og interessante variasjoner i resistiviteten i bakken. Om disse data kan benyttes til vurdering av stabiliteten i fjellpartiet er imidlertid uklart. I de fremstillinger hvor resistivitetsskala er presentert (Pfaffenhuber et al. 2010) opptrer de beste ledende partiene med en resistivitet (inverte av elektrisk ledningsevne) klart lavere enn 10 ohmm. NGU har ikke målt så lav resistivitet i norsk berggrunn unntatt i sulfidmineraliseringer eller grafitt. De laveste resistivitetsverdiene ligger rundt 1 ohmm, og så lave verdier er kun målt i grafitt. Det er ikke rapportert at fyltitten i Flåm inneholder grafitt, men dette er slett ikke uvanlig i slike bergarter.

NGU er kjent med at NGI har målt resistivitet i kombinasjon med såkalte IP-målinger (Indusert Polarisasjon) på bakken i det aktuelle området, og lave resistivitetsverdier kobles til oppknyt fjell og økt vanninnhold på grunn av dette. Etter det NGU kjenner til, er ikke IP-data prosessert. IP-data vil kunne avklare om den spesielt lave resistiviteten skyldes grafitt. Som kjent er grafitt et meget godt smøremiddel, og det kan tenkes at dette er medvirkende årsak til at fjellpartiet er ustabil. NGU vil derfor anbefale at utførte IP-målinger prosesseres og samtolkes med resistivitetsdata målt fra helikopter. Dette vil kunne bidra til en større forståelse av hva som styrer bevegelsene i det ustabile fjellpartiet.

9.3 Vurdering av kjerneboring

Basert på elektromagnetiske data har NGI i skriv til Aurland Kommune (NGI, 20081254-00-284-UK) anbefalt kjerneboring i det ustabile området uten samtidig å spesifisere hvor boringene bør foretas.

Kjerneboring er en vanlig teknikk å benytte i vurderinger av stabilitet av fjellsider og skråninger for å få tilgang til undergrunnsdata som ikke er tilgjengelig ved andre teknikker (eks. Cornforth, 2005). Kjerneboring har blitt benyttet med gode resultater i ustabile fjellsider andre steder i Norge for å definere dypet til deformasjonen (Kristensen et al., 2010), og kan være svært effektivt for å lokalisere glideplan. Samtidig er kjerneboring den dyreste teknikken for datainnsamling, og det bør derfor utøves stor nøyaktighet i forkant av boring for å velge ut det mest optimale stedet for boring.

En regional forståelse av ustabilitetens hastigheter kan oppnås ved bruk av for eksempel satellittbasert eller bakkebasert radar, og dette vil kunne være til stor hjelp i utvelgelse av sted for kjerneboring.

Ved Åknes, med en årlig gjennomsnittsflytning på 6 cm/år, kunne ikke noe underliggende kontinuerlig glideplan påvises for hele den ustabile massen. Den potensielle bruddflaten ved kollaps forblir derfor svært kompleks (Kristensen et al., 2010).

Ved Stampa er de høyeste bevegelseshastighetene målt ved de frittstående blokkene A og B, med hastigheter noe over 1 cm/år. Kjerneboring i disse blokkene vil være vanskelig, men ikke umulig. Våre kinematiske analyser indikerer utvelting som en delmekanisme ved deformasjonen av fjellsiden. Utvelting kan lett oppdages ved overflateinklinometer eller bakkebaserte radaranalyser. Siden glideplan ikke nødvendigvis eksisterer ved disse blokkene, anbefales disse to teknikkene anvendt forut for eventuell kjerneboring.

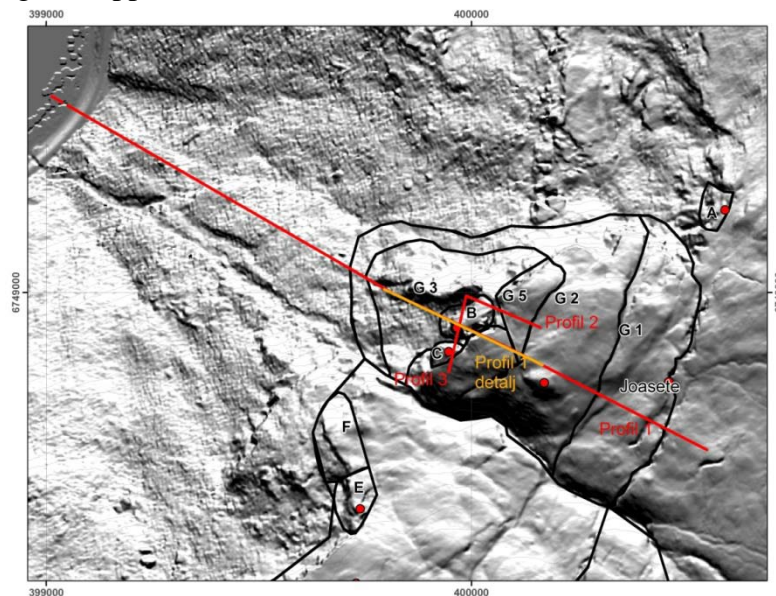
Ved blokk G1 og G2 er bevegelseshastighetene mindre enn 2 mm/år, altså 1/30 av bevegelsen ved Åknes. Disse blokkene har baksprekker med en mer enn 10 meter bred grabenstruktur (innsynking). Dermed må deformasjon nødvendigvis også fortsette nedover i undergrunnen. Tatt i betraktning den høye variasjonen i skifrihetsplan i dagen, kan man også anta at skifrihetsplanets orientering varierer sterkt i undergrunnen. En deformasjonshorisont oppdaget i et borhull kan dermed lett mistolkes som et glideplan, og mange borhull er derfor

nødvendig på hver blokk. Dette fører til svært høye kostnader for datainnsamling. På grunn av de lave bevegelseshastighetene til deformasjonen av blokk G, anbefaler NGU ikke kjerneboring som undersøkelsesmetodikk her.

NGI har knyttet forslaget om kjerneboring tett til de elektromagnetiske undersøkelsene. Som nevnt tidligere er det diskutabelt hvorvidt de elektromagnetiske dataene indikerer vannspeil i undergrunnen. Videre samsvarer ikke utslagene med laveste resistivitetsmålinger i profilet gitt av NGI (NGI, 20081254-00-284-UK) med områdene for høyeste hastighet ved dGPS-målinger. Resistivitetsprofilen viser snarere at sonene med utpreget lav resistivitet befinner seg i områdene som har de laveste eller ingen bevegelseshastighet på dGPS-målingene.

9.4 Vurdering av drenering

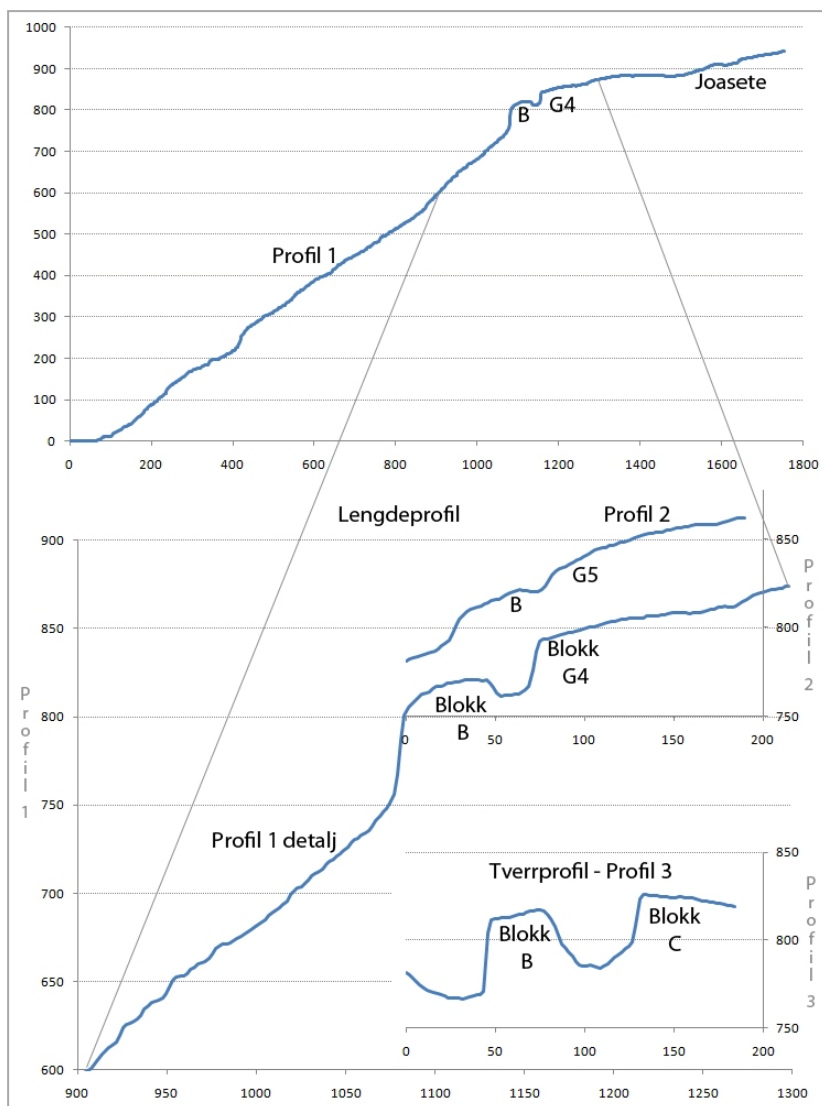
Grunnvann er en faktor som sterkt kan påvirke stabiliteten eller utviklingen til en potensielt ustabil fjellside. Tross dette har ikke detaljerte hydrologiske studier blitt rapportert utført fra Stampa-området så langt, verken på vannspeil, vanntryksmålinger eller vannstrømningstester med sporstoffer. Grunnvannundersøkelse har vært konsentrert til Holo (sør for Godmedøla) og ble rapportert i Domaas et al. (2002).



Figur 11: Plassering av topografiske profiler i Figur 12 som viser separasjonen av blokkene. dGPS-stasjonene er markert med røde punkter (jfr. Figur 12). Profil 1: fra fjord til bakkant av ustabil område; Orange delprofil: detaljert utsnitt av Profil 1, Profil 2: fra blokk G5 til blokk B; Profil 3: tverrprofil fra blokk B til blokk C.

En drenering av hele fjellsiden i retning Viddalsmagasinet ved de foreslåtte dreneringstunellene vil mest sannsynlig ikke påvirke stabiliteten til frontblokkene A, B, C, G3 (scenario 2 og 3), da disse blokkene er fristilt topografisk fra fjellsiden. Vanninntaket ved Joasete er plassert ved 1000 moh (NGI, 2008; E-CO Vannkraft AS, 2009b) og dermed om lag 200 m høyere i terrenget enn de mest kritiske frontblokkene (scenario 2 og 3). Denne plasseringen medvirker til å redusere det totale overflatevannet i fjellsiden ovenfor blokkene, men har ingen direkte drenerende effekt på de ustabile blokkene.

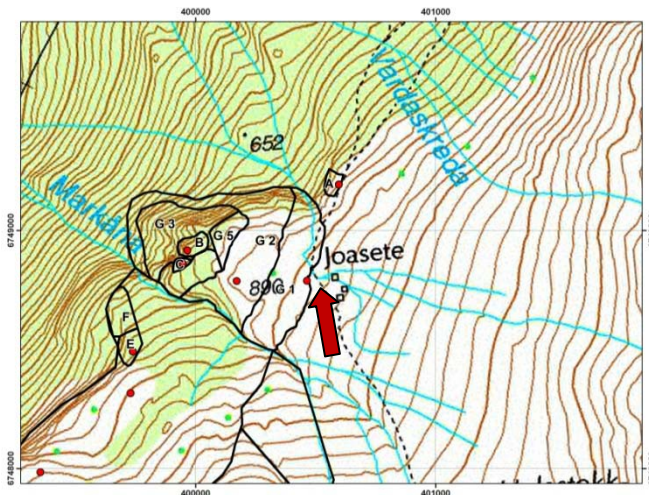
Da frontblokkene er avkoblet fra fjellsiden ved sprekker på mellom meter til titalls meter bredde, kan man anta at disse blokkene også har et grunnvannsregime som ikke er koblet til grunnvannet i fjellsiden. I tillegg er disse blokkene og frontdelene av fjellsiden sterkt oppsprukket, hvor hver av blokkene har frie vegger eller sider. Dette forhindrer i seg selv oppbygning av høyt internt vanntrykk. Figur 11 og Figur 12 viser detaljerte profiler av blokk B, som er ansett som den mest kritiske.



Figur 12: Profiler langs fjellsiden ved Stampa-Joasete, med detaljerte profiler i fronten av den bratte fjellsiden. Inkluderer blokkene B, C og G5.

Figur 12 viser at blokk B er svakt koblet/fristilt fra blokk G5 (profil 2), med en baksprekk på 10-15 meter bredde og 2-4 meter dybde. I retning sørøst utvides denne baksprekken seg til en bredde på 25-30 meter og en dybde på 10-20 meter (profil 1 detalj). Mellom blokk B og blokk C (tverrprofil - profil 3) utvikler baksprekken seg til en 50 meter bred og 30-40 meter dyp depresjon. Denne ligger 30-40 meter lavere i terrenget enn baksprekken, og gjør det mulig for vannet i baksprekken å drenerer ut på den sørlige siden av blokken. Dette medvirker til å hindre oppbygning av høyt vanntrykk i blokkene. Siden baksprekken blir dypere mot sør, vil heller ikke vanntrykket i et antatt glideplan under blokken kunne bygge seg opp til et nivå høyere enn ved det laveste punktet definert av baksprekkens dypeste punkt. Vi mener derfor at baksprekken i seg selv drenerer blokkene svært effektivt.

Observasjoner fra fotografier og gjennom feltarbeid viser at overflatedreneringen av nedslagsfeltet for overflatevann ovenfor Joasete skjer i den lille bekken utenfor blokk G. Her følger bekken først fjellsidens gradient, for så å snu og følge den første store baksprekken nordover ved Joasete. Dette indikerer at hele blokk G ikke er sterkt påvirket av vannet ovenfor det ustabile området, og at heller ikke store endringer i stabiliteten til fjellsiden vil oppnås ved å drenerer langs de foreslåtte traseer. Det bemerkes at denne påstanden kun er bygd på kvalitative observasjoner. NGU anbefaler derfor at det samles inn hydrologiske data før og etter svingen på elven ved Joasete for å vite hvorvidt vann forsvinner i sprekkesystemet eller ikke, se pil i Figur 13.



Figur 13: Endring i strømningsretning for bekk/elv ved Joasete. Elven følger sprekkesystemene ut på siden av blokkene ved klippeområdet. Målinger av vannføring i bekken før og etter retningsendringen kan gi svar på om vann forsvinner ned i undergrunnen og fører til økt vanntrykk i glidesoner, eller dreneres ut og vekk fra de ustabile blokkene naturlig.

Den sørlige grenen av den foreslåtte dreneringstunnelen vil kun drenere stabile områder i Kloppelvibassenget utenfor det ustabile Stampaområdet. Derfor vil denne dreneringstunnelen ikke kunne ha noen skredsikrende funksjon.

Før en dreneringstunnel vurderes anbefaler NGU at en detaljert hydrologisk undersøkelse av fjellsiden gjennomføres. Dette bør inkludere piezometere, kartlegging av sporstoff, og målinger av vannføring i utvalgte bekker/elver. Dette vil øke forståelsen av fjellsidens hydrologiske tilstand, og dermed også gjøre det lettere å vurdere effekten av drenering som stabiliserende tiltak.

I neste kapittel redegjøres det for sannsynligheten av kollaps for de enkelte blokkene, og det gis en foreløpig fare- og risikouttalelse. Før noen beslutning fattes vedrørende fremtidige undersøkelser av fjellsiden ved Stampa, anbefaler NGU at denne informasjonen tas hensyn til.

10. Foreløpig fare- og risikoklassifisering

NVE har bedt NGU om en fare- og risikoklassifisering av den ustabile fjellsiden ovenfor Flåm i Aurland. Ettersom oppbygningen av klassifikasjonssystemet enda ikke er ferdig, kan NGU pr. i dag ikke gi en endelig fare- og risikovurdering av området.

10.1 Farevurdering

Basert på kriteriene ovenfor kan vi foreløpig gi følgende farevurdering:

Den ustabile fjellsiden ovenfor Flåm er en av de største ustabile fjellsidene som er kjent i Norge i dag. Det er et komplekst strukturgeologisk område. Steile sprekker er vanlig over hele fjellsiden med relativt stabil orientering, samtidig som skifriheten er sterkt foldet og varierer mye i sin orientering. Fordi skifriheten har et relativt svakt fall (liten vinkel ift horisontalplanet) er det en mulighet for at glideplan kan utvikles. Bevegelsehastighetene varierer mye over hele området fra horisontal gjennomsnittlig hastighet på 11 mm/år og ned til hastigheter under det statistiske signifikansnivået. På grunn av dette konkluderer NGU med at hele fjellsiden ikke kan betraktes som ett bruddscenario. Man må etablere flere scenarier for å kunne beskrive hele området med all den variasjonen og kompleksiteten som finnes.

Basert på en geomorfologisk studie av forhistoriske hendelser, strukturell variasjon og variasjon i observerte hastigheter kan vi skille mellom tre scenarier:

Scenario 1:

En stor kollaps av ett større segment av den ustabile fjellsiden: 10 -100 millioner kubikkmeter bergmasse. Massene vil ha utløp i dalbunn og/eller fjordbassenget

En slik hendelse inntraff ved slutten av siste istid som et resultat av utgravningen av dalene under istiden og en påfølgende rask isostatisk justering etter avsmeltingen. Dette førte til store lokale og regionale spenningsforskjeller. Et moderne scenario av samme størrelse vil være utglidning av blokken G1 som deformerer i dag. Dette området er avgrenset av sprekker mer enn 10 meter brede og noen få meter dype. Bruddflater langs sidene er dårlig utviklet. Siden skifriheten varierer innenfor blokken, kan ikke et kontinuerlig glideplan antas å etablere seg langs en kontinuerlig skifrihetsflate.

Bevegelseshastigheten til blokken registrert ved dGPS er i størrelsesordenen noen få mm/år. Dette er samme hastighet som åpningshastigheten til sprekken, dersom man fordeler sprekkenes nåværende åpning på 10 meter ut på de 10 000 årene som har gått siden siste istid. Det innebærer altså å tilegne området en kontinuerlig sakte deformasjon med jevn hastighet på 1-2 mm/år siden siste istid.

Forut for en kollaps må det finne sted kraftig deformasjon av bergmassene i bruddflatene bak, på siden av og under blokkene. Dette vil bryte blokkene ned til mindre blokker, noe som reduserer sannsynligheten for at hele blokk G1 kollapser i hele sitt totale volum i en hendelse. Som følge av sterk erosjon av fjellsidene og store regionale og lokale spenningsendringer relatert til dalnedising i etterkant av istider, kan noen av disse blokkene likevel kollapse som hele enheter. Derfor, i likhet med forhistorisk tid, kan slike kollapser kun inntreffe etter en glacial syklus og har dermed en sannsynlighet på mindre enn 1/10 000 år. Usikkerheter knyttet til dette estimatet er mest sannsynlig i samme størrelsesorden som usikkerheter knyttet til istidssykluser.

Scenario 2:

En middels stor kollaps av ett større segment av den ustabile fjellsiden: 100 000 – noen få millioner kubikkmeter som kan nå ned til dalbunnen av Flåmsdalen eller fjorden.

Minst to slike hendelser har inntruffet etter siste istid. Et av disse skredene har blitt datert eldre enn 3000 år før nåtid. Sammenliknbart med dette scenarioet vil være at flere av blokkene langs frontklippen vil kollapse (blokkene A-F). Disse blokkene er dannet av flere ulike sprekkesett, og noen av dem er nesten helt frittstående (blokkene A & B).

Disse åpne sprekkenes drenerer seg selv svært godt, og uheldige vanntrykk kan ikke bygge seg opp. Side- og baksprekker er nesten fullstendig utviklet. Skifriheten varierer mye innenfor blokkene, og kontinuerlige glideplan langs skifriheten trenger mye energi for å dannes. En detaljstudie av blokk B indikerer at den brytes opp i mindre segmenter på stedet, og at en kollaps av blokk B vil skje ved utvelting av blokken eller mindre deler av den. Hastighetene til blokkene som ikke er helt frittstående (C-F) er i størrelsesordenen 1-4 mm/år.

Den horisontale gjennomsnittshastigheten til de frittstående blokkene (A og B) er 11 mm/år. Dette innebærer at før en kollaps kan inntreffe må ytterligere deformasjon først finne sted. Dette vil mest sannsynlig føre til at blokkene vil bryte opp i mindre segmenter forut for en katastrofal kollaps. NGU kan likevel ikke utelukke at hele blokker kan kollapse katastrofalt i hele sitt nåværende volum som en hendelse med en lav årlig sannsynlighet.

Det er registrert minst to slike hendelser etter siste istid. Basert på dette vil sannsynligheten av slike kollapser være flere innenfor 10 000 år. Siden begge de

forhistoriske hendelsene kan ha inntruffet som én hendelse, er sannsynligheten av én slik hendelse vanskelig å anslå. Den settes til 1-3 hendelser på 10 000 år. Siden sprekkene til disse blokkene svært effektivt drenerer klippeområdet, er usikkerhetene på frekvensanslaget ikke knyttet til klimatiske scenarier, men snarere til vanskeligheten ved å predikere jordskjelv og jordskjelvsvermer innenfor dagens ”stabile inter-kontinentale posisjon” (Adams, 1995).

Scenario 3:

Kollaps av ett mindre segment av den ustabile fjellsiden: 10 000 - 100 000 kubikkmeter som avsettes i dalsiden og ikke rekker ned til fjorden

Flere slike avsetninger finnes i dalsidene under klippene i det ustabile området. Dette er steinskred- og ikke fjellskredavsetninger. NGU har publisert en aktomshetskart for steinsprang/steinskred på skrednet.no i målestokk 1:50.000. Disse kart viser området som potensielt kan bli berørt. For disse avsetningene er det vanskelig å anslå om de er avsetninger fra enkelthendelser eller flere hendelser. Dette kommer av at de etter å ha blitt avsatt har fortsatt å krype/sige nedover fjellsidene slik at det ikke lenger er klare grenser mellom de ulike avsetningene. Alle blokkene A-F kan ytterligere underinndeles i mindre enheter som kan kollapse uavhengig av hverandre.

Det er umulig å fastsette hastighetene til disse blokkene med dGPS, da dette vil kreve for mange målepunkter. Metoder som bakkebasert radar eller laserskanning (lidar) anbefales som et godt alternativ. Slike metoder vil trenge måledata fra en periode fra flere måneder til flere år.

NGUs konklusjon er at kollapser som beskrevet i dette avsnittet kan inntreffe spontant og uforutsett, da dGPS-nettverket er ikke i stand til å fange opp kollapser av denne typen. Denne typen kollapser har imidlertid ikke blitt registrert i historisk tid. Basert på det anslåtte volumet kan disse kollapsene inntreffe med en sannsynlighet mellom 1/100 og 1/1000 år.

De forhistoriske hendelsene av denne typen har ikke nådd ned til fjorden eller dalbunnen som katastrofale hendelser. Det er ikke ventet at liknende hendelser i fremtiden vil utvikle seg annerledes enn hva som har skjedd i fortiden. Usikkerheter knyttet til frekvensestimatet er mest sannsynlig knyttet til hva som kan skje med de tidligere avsetningene som i dag er i krypbevegelse. Disse avsetningene har i sum bygd seg opp til flere millioner kubikkmeter, og ligger i dag i fjellsiden som løsmasser. Stabiliteten av disse massene kan utfordres av en fremtidig last fra nye avsetninger (det scenarioet ble diskutert i Domaas (2002)). Slike fremtidige kollapser av eldre avsetninger kan ikke vises i det geologiske arkivet, og har derfor en sannsynlighet lik scenario 2 ovenfor.

10.2 Foreløpig risikovurdering

Kompliserte risikovurderinger er ikke en problemstilling NGU tar på seg å gjøre pr. i dag. For å foreta en fullstendig risikovurdering trengs det en grundig forståelse av emnet og mange analyser (Lacasse & Nadim, 2009), noe NGU ikke har foretatt. I tillegg vil konsekvensene av at et fjellskred når ned til fjorden variere vesentlig gjennom et år på grunn av den svært varierende befolkningstettheten i og utenfor turistsesongen.

På tross av dette og basert på NVEs konkrete forespørsel, vil NGU gi et estimat på potensiell dødelighet knyttet til hvert scenario i det tilfelle at ingen forebyggende tiltak eller tidligvarslingstiltak er utført:

10.3 Konsekvens og risikoevaluering

Scenario 1

Ovenfor ble det anslått at et slikt scenario har en sannsynlighet på mindre enn 1 pr 10 000 år, og er knyttet til kraftige klimaendringer som de som inntraff på slutten av siste istid. Slike endringer i klimaet (i størrelsesorden glasiiale sykluser) vil ha en mye større påvirkning på hele det norske samfunnet enn hva et fjellskred vil kunne gjøre som er forårsaket av scenario 1.

Scenario 2

Ovenfor ble det anslått at et slikt scenario har en sannsynlighet på 1-3 hendelser på 10 000 år. Aurlandsfjorden besøkes av hundretusener av turister hvert år, hovedsakelig i sommermånedene. Dette øker de potensielle konsekvensene sterkt. Konsekvens og risiko knyttet til et fjellskred etter scenario 2 vil derfor variere sterkt gjennom sesongen, og det kan være forventet at et fjellskred som forårsaker en flodbølge i Aurlandsfjorden kan forårsake hundrevis til tusenvis av dødsfall avhengig av årstid. Et fjellskred ned i Flåmsdalen vil forårsake færre dødsfall. Risikoreduserende tiltak bør konsentreres rundt dette scenarioet.

Scenario 3

Ovenfor ble det anslått at et slikt scenario er en steinskred, og ikke et fjellskred, og at det har en årlig sannsynlighet mellom 1/100 og 1/1000. Vurdering av steinskredfare ble ikke utført i området, men vi minner om bruk av aktsomhetskart for steinsprang som grunnlag for en vurdering av skredpotensialet. Aktsomhetskart steinsprang gir en konservativ ytre grense for utløpsområder for steinskred. Der det finnes hus i utløpsområdene under Stampa, anbefaler vi en farekartlegging.

11. Konklusjoner

NGUs arbeid bekrefter at det er problemer med stabiliteten til fjellsiden i området mellom Joasete, Furekamben og Ramnanosi.

Mens det i området mellom Joasete og Furekamben er potensial for steinskred eller fjellskred, vil området rundt Ramnanosi mest sannsynlig kun oppleve steinskred og steinsprangaktivitet. De årlige middelbevegelsene på de periodisk overvåkede blokkene i den nordlige delen av området er små sammenlignet med andre områder i Norge, som for eksempel Mannen, Åknes og Nordnes. Det presiseres at dGPS-målinger generelt kun er punktmålinger, som alene ikke gir informasjon om bevegelser for et større fjellparti. For Stampaområdet spesielt er plasseringen av flere av dGPS-målepunktene heller ikke optimal.

Studieområdet kan deles inn i flere delområder. Blokkene A, B og C bør gis særlig oppmerksomhet. Disse er tydelig avgrenset av bruddstrukturer. dGPS-målinger viser horisontale gjennomsnittsbevegelser i størrelse 1-11 mm/år, der blokk A og B begge viser 11 mm/år mens blokk C viser en snittbevegelse på 1 mm/år. Volumet av blokk B, gitt at hele blokken faller ut i én hendelse, er anslått til 280 000 m³. Dersom man setter som antakelse at disse massene vil nå ned til fjorden, vil 280 000 m³ være stort nok til å skape en flodbølge ifølge terskelverdier gitt av NGI (2009). NGU mener det er størst sannsynlighet for at denne blokken vil falle ned i flere små hendelser med vesentlig mindre volumer pr hendelse, og at utløpet derfor ikke når ned til fjorden.

Punkt [AU-24] ligger lengst nord i studieområdet, se Figur 6. Dette punktet har kun ett års gjentatt måling (2009-2010), og viser 8 mm/år bevegelse i dette tidsrommet. Kompassretningen til bevegelsen er uventet (se Figur 6). Vi anbefaler derfor at dette punktet ikke tillegges videre betydning før flere års målinger er foretatt.

Alle øvrige dGPS-punkt i området viser årlig horisontal gjennomsnittsbevegelse mellom 1-3 mm/år, se vedlegg V.1 dGPS data. Dette er lik eller under usikkerhetsgrensen til målesystemet.

NGU anbefaler at periodisk overvåkning fortsetter, da måledataene inneholder mye støy. Dette problemet reduseres ved lange måleserier. NGU anbefaler også at alternative målemetoder til dGPS anvendes som kan gi målinger over større områder samtidig. Et godt alternativ er bakkebasert radar.

Det er ikke påvist noen entydig relasjon mellom overflatevann, vanntrykk og observerte bevegelser i måledataene. Med dagens kunnskap konkluderer NGU at en eventuell kollaps vil inntreffe i de mer eller mindre frittstående blokkene ved klippekanten omtalt ovenfor. Kollapser i form av steinskred eller blokkfall har en stor sannsynlighet for å inntreffe plutselig og uten mulighet for prediksjon med dagens overvåkningssystem bestående utelukkende av dGPS. Rasmaterialet involvert i disse kollapsene vil etter NGU sitt skjønn ikke nå dalbunnen eller fjorden.

Blokkene A-F er separert fra omkringliggende berggrunn ved store åpne sprekker og kløfter. Tilført overflatevann til dette området vil umiddelbart dreneres vekk i disse velutviklede sprekkesystemene.

NGU kan ikke se at dreneringstiltak kan stabilisere blokkene A til F.

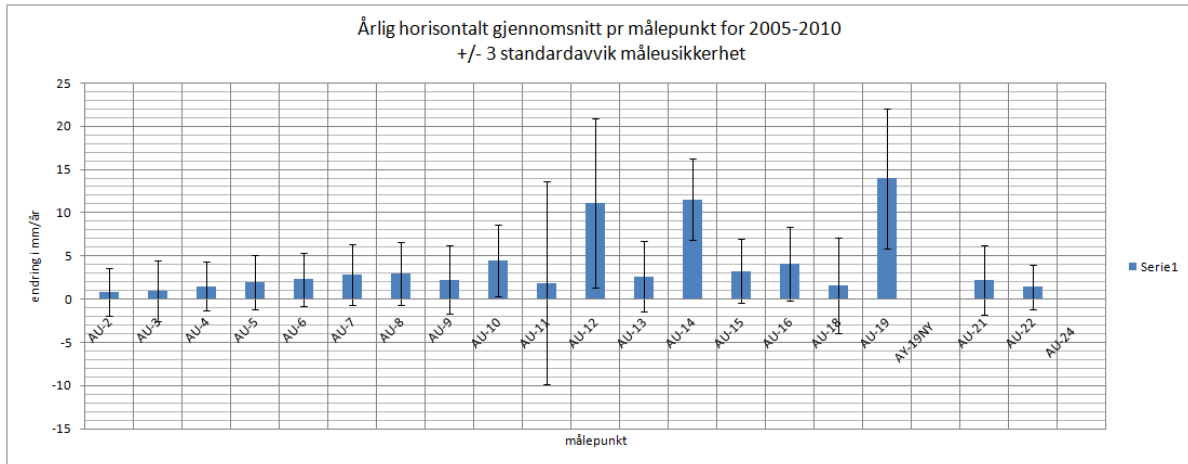
12. Referanser

- Adams, J., Basham, P., Halchik, S. 1995: Northeastern north America earthquake potential; new challenges for seismic hazard mapping. Current research – Geological Survey of Canada, pp. 91-99
- Blikra, L. H., Longva, O., Braathen, A. 2006: Rock slope failures in Norwegian fjord areas: examples, spatial distribution and temporal pattern, in Landslides from Massive Rock Slope Failure, NATO Science Series, IV Earth and Environmental Sciences - Vol. 49, pp475-496,
- Böhme, M. m fl. 2010a: Structural analysis of the unstable rock slope area at Stampa above Flåm, Norway, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-13433
- Brideau M.A., Stead, D. 2009: The role of rear release surface, block size and lateral confinement on rock slope failure mechanisms, GeoHalifax 2009, Halifax, 8p.
- Domaas, U., Rosenvold, B.S., Blikra, L.H., Johansen, H., Grimstad, E., Sørli, J.E., Gunleiksrud, O., Engen, A., Læg Reid, O., 2002: Studie av fjellskred og dalsidestabilitet i fyllittområder. NFR rapport 20001132-2, 146p.
- ECO-Vannkraft AS, 2009a: Redegjørelse til Olje- og energidepartementet – Avbøtende drenering av ustabil fjellmassiv i Aurland kommune med mulighet for kraftutbygging og flomdemping, Rapport.
- E-CO Vannkraft AS, 2009b: Overføring av vann til Viddalsmagasinet for skredsikring i Flåm og Flåmsdalen. 47 sider.
- Eiken, T. 2009: Deformasjonsmålinger i potensielle fjellskred, Sogn og Fjordane 2005-09. Universitetet i Oslo, institutt for Geofag. 47 sider.
- Eiken, T. 2010: Deformasjonsmålinger i potensielle fjellskred, Sogn og Fjordane 2005-09. Universitetet i Oslo, institutt for Geofag. *Midlertidige resultat*.
- Cornforth, D.H. 2005: Landslides in practice, Wiley, Hoboken, 596p.
- Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Couture, R., Locat, J. & Locat, P. 2004: Toward preliminary hazard assessment using DEM topographic analysis and simple mechanical modeling by means of sloping local base level. In: Lacerda, W.A., Ehrlich, M., Fontoura, A.B. & Sayão, A. (eds): Landslides: Evaluation and Stabilization, Balkema, London, p. 199–205.
- Kveldsvik, V., Einstein, H.H., Nilsen, B., Blikra L.H. 2008: Numerical analysis of the 650,000 m² Åknes rock slope based on measured displacements and geotechnical data, Rock Mech. Rock Eng., DOI 10.1007/s00603-008-0005-1.
- Lacasse, S., Nadim, F. 2009: Landslide risk assessment and mitigation strategy. In Sassa, K., Canuti, P., (eds.) Landslides disaster risk reduction, Springer, Berlin, p 213-222.
- NGI, 2008: Utredning av ustabile dalsider i fylitt, Aurland. NGI rapport 20081254-1
- NGI, 2009: Beregning av flodbølger for tre potensielle fjellskred fra Stampa. NGI rapport 20081693-1
- NGI & NGU, 2008: Muligheter for effekter av forebyggende dreneringstiltak i ustabil fyllittområde i Aurland – geofaglig oppsummering. Notat til Aurland kommune signert Lars Harald Blikra og Anders Solheim. 4 sider.
- NGI, 20081254-00-284-UK, Fjellskred i Stampa – Joasete. EM-målinger, boring og stabilitet. 3 sider.
- NGU, 2002: Fjellskred og stabilitet i fyllittområder – Geologiske og geofysiske studier. Foreløpig NGU Rapport 2002.005
- NGU. 2008: Ustabile fjellparti i fyllittområdene i Flåm-Aurland. NGU-rapport 2008.033
- NGU, 2010a: Foreløpig oppsummering av status for Stampaområdet. NGU-notat sendt til NVE. 2 sider.
- NGU, 2010b: E-CO Vannkraft AS – Melding om planlagt overføring av vatn til Viddalsmagasinet for skredsikring i Flåmsdalen, NGU notat referanse 05/00308-25
- Pfaffenhuber, A., Grimstad, E., Domaas, U., Auken, E., Halklaer, M.M., Foged, N. 2010: Airborne EM Mapping of Rock Slides and Tunneling Hazards, Near Surface 2010, Zurich.
- SINTEF, 2009: Utvikling av risikomodel for fjellskred i Aurland kommune, 10 sider.
- Tukkensæter, Å., 2010: Stabilitetsanalyse av deformert fjellside i Flåmsdalen, Aurland, Masteroppgave, Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU, 289pp
- Welkner, D., Eberhardt, E., Hermanns, R.L. 2010: Hazard investigation of the Portillo rock avalanche site, central Andes, using an integrated field mapping and numerical modelling approach. Engineering Geology, v. 114, p. 278-297.
- Kristensen, L., Blikra, L. H., Hole, J. 2010: Åknes: State of instrumentation and adata analysis, Åknes report 02.2010, Åknes/Tafjord Beredskap IKS, Stranda, 41 p.

13. Vedlegg

V.1 dGPS data

I det følgende oppsummerer vi dGPS-data for Flåm i perioden 2005-2010. Merk at resultatene for 2010 er midlertidige, da disse trenger ytterligere validering. Endelige resultater vil publiseres i fylkesrapporten for NGU prosjekt 310100 - Risiko og sårbarhetsanalyse for fjellskred i Sogn og Fjordane.



Figur 14: Årlig horisontal gjennomsnittsbegivelse pr målepunkt, med 3σ standardavvik for 99% konfidensintervall.

I det følgende gjengis dGPS data fra alle tidligere års målinger. Dataene er fra Eiken (2009) og Eiken (2010 – foreløpig evaluering).

Flåm - Aurland: dGPS grunnlagsdata 2005 - 2010														Bevegelse fra år til år								
PUNKT	År	N	E	H	σH	σE	σH	dH	dE	Avst.	Retn. (gon)	dH	dE	Avst.	Retn. (gon)	dH	PUNKT	År				
AU-1_FP	2007	6746120.0710	400810.1600	1430.7750																		
AU-1_FP	2009	6746120.0710	400810.1600	1430.7750																		
AU-20_FP	2007	6748724.8380	397342.0100	112.6950																		
AU-20_FP	2009	6748724.8380	397342.0100	112.6950																		
AU-23_FP	2007	6753117.9200	400831.2450	69.8760																		
AU-23_FP	2009	6753117.9200	400831.2450	69.8760																		
AU-25_FP	2009	6747647.8930	401088.5860	1160.5960	0.0004	0.0003	0.0009	0.0000	0.0000	0.0000												
AU-1_FP	2010	6746120.0710	400810.1600	1430.7750				0.0000	0.0000	0.0000												
AU-20_FP	2010	6748724.8380	397342.0100	112.6950				0.0000	0.0000	0.0000												
AU-23_FP	2010	6753117.9200	400831.2450	69.8760				0.0000	0.0000	0.0000												
AU-25_FP	2010	6747647.8930	401088.5860	1160.5960				-0.0005	0.0004	0.0000												
AU-2	2005	6746302.8900	400635.2030	1395.2854	0.0007	0.0005	0.0017	0.0018	-0.0003	0.0000	0.0009	123	-0.0042									
AU-2	2006	6746302.8900	400635.2046	1395.2812	0.0008	0.0005	0.0018	0.0000	-0.0008	0.0000	0.0021	123	-0.0042	-0.0003	0.0000	0.0009	122.8401	-0.0042	AU-2	2005-06		
AU-2	2007	6746302.8896	400635.2019	1395.2833	0.0013	0.0008	0.0021	0.0000	-0.0008	-0.0019	0.0021	278	-0.0021	-0.0005	-0.0027	288.3438	0.0021	288.3438	0.0021	AU-2	2006-07	
AU-2	2008	6746302.8888	400635.2010	1395.2827	0.0008	0.0004	0.0015	0.0000	-0.0017	-0.0028	0.0033	265	-0.0027	-0.0009	-0.0008	0.0013	280.0050	-0.0006	280.0050	0.0013	AU-2	2007-08
AU-2	2009	6746302.8905	400635.2004	1395.2751	0.0005	0.0004	0.0010	0.0002	-0.0034	0.0034	304	-0.0103	0.0019	-0.0008	0.0020	380.8271	-0.0076	380.8271	-0.0008	AU-2	2008-09	
AU-2	2010	6746302.8895	400635.2006	1395.2748	0.0006	0.0005	0.0011	-0.0008	-0.0032	0.0033	284	-0.0109	-0.0010	0.0002	0.0010	187.4334	-0.0055	187.4334	-0.0005	AU-2	2009-10	
AU-3	2005	6746854.9430	400502.4577	1336.8511	0.0010	0.0006	0.0020	0.0018	0.0000	0.0001	0.0011	100	-0.004									
AU-3	2006	6746854.9430	400502.4583	1336.8471	0.0007	0.0005	0.0018	0.0000	0.0000	0.0001	0.0011	100	-0.004	0.0000	0.0001	0.0001	100.00	-0.004	100.00	0.0001	AU-3	2005-06
AU-3	2007	6746854.9442	400502.4553	1336.8462	0.0015	0.0010	0.0029	0.0001	-0.002	0.002	330	-0.005	0.0001	-0.0003	0.0003	324.22	-0.001	324.22	-0.001	AU-3	2006-07	
AU-3	2008	6746854.9418	400502.4527	1336.8498	0.0007	0.0005	0.0016	-0.0001	-0.002	0.002	266	-0.003	-0.0002	0.0000	0.0002	189.449	0.0002	189.449	0.0002	AU-3	2007-08	
AU-4	2005	6746871.3879	400327.8084	1402.1787	0.0009	0.0006	0.0018	0.0000	-0.001	0.001	283	-0.005										
AU-4	2006	6746871.3876	400327.8073	1402.1732	0.0007	0.0005	0.0018	0.0000	-0.001	0.001	283	-0.005	0.0000	-0.001	0.0001	283.05	-0.005	283.05	-0.005	AU-4	2005-06	
AU-4	2007	6746871.3915	400327.8041	1402.1788	0.0015	0.0009	0.0025	0.0004	-0.004	0.006	344	0.000	0.004	-0.003	0.0005	356.26	0.006	356.26	0.006	AU-4	2006-07	
AU-4	2008	6746871.3864	400327.8036	1402.1744	0.0008	0.0004	0.0015	-0.002	-0.005	0.005	281	-0.004	-0.0005	-0.001	0.0005	206.22	-0.004	206.22	-0.004	AU-4	2007-08	
AU-4	2009	6746871.3899	400327.8026	1402.1655	0.0005	0.0003	0.0010	0.0002	-0.006	0.006	322	-0.013	0.003	-0.001	0.004	385.69	-0.009	385.69	-0.009	AU-4	2008-09	
AU-4	2010	6746871.3910	400327.8035	1402.1643	0.0005	0.0005	0.0011	0.0003	-0.005	0.006	336	-0.014	0.001	0.001	0.001	36.08	-0.001	36.08	-0.001	AU-4	2009-10	
AU-5	2005	6747245.8905	400014.1372	1359.2934	0.0016	0.0009	0.0026	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000											
AU-5	2006	6747245.8912	400014.1352	1359.2877	0.0007	0.0005	0.0019	0.0001	-0.002	0.002	321	-0.006	0.001	-0.002	0.0002	321.43	-0.006	321.43	-0.006	AU-5	2005-06	
AU-5	2007	6747245.8902	400014.1294	1359.2871	0.0013	0.0008	0.0023	0.0000	-0.008	0.000	290	-0.006	-0.001	-0.006	0.006	289.13	-0.001	289.13	-0.001	AU-5	2006-07	
AU-5	2008	6747245.8891	400014.1290	1359.2820	0.0006	0.0004	0.0015	-0.001	-0.008	0.000	289	-0.011	-0.001	0.000	0.001	205.77	-0.005	205.77	-0.005	AU-5	2007-08	
AU-5	2009	6747245.8930	400014.1301	1359.2846	0.0004	0.0003	0.0009	0.0003	-0.0071	0.0070294	328	-0.0080	0.0047	0.0008	0.004768	10.73322	0.0026	10.73322	0.0026	AU-5	2008-09	
AU-5	2010	6747245.8932	400014.1302	1359.2795	0.0006	0.0004	0.0011	0.0027	-0.007	0.0075927	323	-0.0139	-0.0006	0.0001	0.000608	189.4863	-0.0051	189.4863	-0.0051	AU-5	2009-10	
AU-6	2005	6747430.4218	400035.4699	1298.8257	0.0018	0.0009	0.0028	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000											
AU-6	2006	6747430.4225	400035.4674	1298.8217	0.0007	0.0005	0.0018	0.0001	-0.003	0.003	315	-0.004	0.001	-0.003	0.0003	315.00	-0.004	315.00	-0.004	AU-6	2005-06	
AU-6	2007	6747430.4245	400035.4630	1298.8275	0.0014	0.0008	0.0023	0.0003	-0.006	0.007	326	0.002	0.002	-0.004	0.004	332.28	0.006	332.28	0.006	AU-6	2006-07	
AU-6	2008	6747430.4211	400035.4620	1298.8154	0.0009	0.0004	0.0015	-0.001	-0.008	0.008	294	-0.010	-0.003	-0.002	0.004	231.00	-0.012	231.00	-0.012	AU-6	2007-08	
AU-6	2009	6747430.4263	400035.4622	1298.8170	0.0004	0.0003	0.0009	0.0005	-0.008	0.009	336	-0.009	0.006	0.000	0.006	2.23	0.002	2.23	0.002	AU-6	2008-09	
AU-6	2010	6747430.4265	400035.4636	1298.8191	0.0005	0.0004	0.0011	0.0005	-0.006	0.008	340	-0.007	0.000	0.001	0.001	113.44	-0.002	113.44	-0.002	AU-6	2009-10	
AU-7	2005	6747842.2173	399417.6382	1079.2150	0.0016	0.0010	0.0029	0.0018	0.0000	0.0000	0.0000											
AU-7	2006	6747842.2173	399417.6359	1079.2228	0.0009	0.0006	0.0021	0.0000	-0.002	0.002	300	0.008	0.000	-0.002	0.002	300.00	0.008	300.00	0.008	AU-7	2005-06	
AU-7	2007	6747842.2220	399417.6289	1079.2231	0.0016	0.0010	0.0031	0.0005	-0.009	0.010	330	0.008	0.005	-0.007	0.008	337.64	0.000	337.64	0.000	AU-7	2006-07	
AU-7	2008	6747842.2189	399417.6287	1079.2113	0.0007	0.0006	0.0017	0.0000	-0.009	0.010	297	-0.004	-0.005	0.000	0.005	202.50	-0.012	202.50	-0.012	AU-7	2007-08	
AU-7	2009	6747842.2222	399417.6280	1079.2111	0.0004	0.0003	0.0009	0.0049	-0.0102	0.0113159	329	-0.0039	0.0053	-0.0007	0.005346	391.6402	-0.0002	391.6402	-0.0002	AU-7	2008-09	
AU-7	2010	6747842.2201	399417.6304	1079.2181	0.0007	0.0005	0.0014	0.0028	-0.0078	0.0082873	323	0.0031	-0.0021	0.0024	0.003189	145.7621	0.007	145.7621	0.007	AU-7	2009-10	

Fålm - Aurland: dGPS grunnlagsdata 2005 - 2010													Bevegelse fra år til år						
PUNKT	År	N	E	H	σN	σE	σH	dN	dE	Avst.	Retn. (gon)	dH	dN	dE	Avst.	Retn. (gon)	dH	PUNKT	År
AU-8	2007	6747983.5183	399353.2060	986.1499	0.0016	0.0011	0.0032	0.007	-0.010	0.012	339	0.009	0.006	-0.008	0.010	341.09	-0.006	AU-8	2005-07
AU-8	2008	6747983.5181	399353.2072	986.1444	0.0009	0.0006	0.0018	0.003	-0.009	0.009	320	0.004	0.004	0.001	0.004	182.28	-0.005	AU-8	2007-08
AU-8	2009	6747983.5187	399353.2076	986.1381	0.0004	0.0003	0.0008	0.008	-0.008	0.012	359	-0.002	0.006	0.000	0.006	-4.54	-0.006	AU-8	2008-09
AU-8	2010	6747983.5182	399353.2108	986.1517	0.0007	0.0005	0.0014	0.008	-0.005	0.009	363	0.011	-0.001	0.003	0.003	109.87	0.014	AU-8	2009-10
AU-9	2005	6748316.3132	399728.8202	948.5071	0.0017	0.0011	0.0032												
AU-9	2006	6748316.3123	399728.8221	948.5093	0.0011	0.0008	0.0026	-0.001	0.002	0.002	128	0.002	-0.001	0.002	0.002	128.16	0.002	AU-9	2005-06
AU-9	2007	6748316.3197	399728.8122	948.5136	0.0016	0.0011	0.0030	0.007	-0.008	0.010	343	0.006	0.007	-0.010	0.012	340.86	0.004	AU-9	2006-07
AU-9	2008	6748316.3156	399728.8138	948.5060	0.0008	0.0006	0.0018	0.002	-0.006	0.007	323	-0.001	-0.004	0.002	0.004	176.31	-0.008	AU-9	2007-08
AU-9	2009	6748316.3200	399728.8145	948.4984	0.0005	0.0004	0.0010	0.006	-0.0057	0.00872	356	-0.007	0.0044	0.0007	0.004455	10.04387	-0.0056	AU-9	2008-09
AU-9	2010	6748316.3201	399728.8160	948.5131	0.0007	0.0006	0.0015	0.0069	-0.0034	0.0078922	371	0.006	1E-04	0.0023	0.0023022	97.233848	0.0167	AU-9	2009-10
AU-10	2005	6748491.2891	399738.1889	885.8302	0.0018	0.0011	0.0032												
AU-10	2006	6748491.2710	399738.1871	885.8343	0.0013	0.0008	0.0028	0.002	-0.002	0.003	382	0.004	0.002	-0.002	0.003	381.72	0.004	AU-10	2005-06
AU-10	2007	6748491.2790	399738.1781	885.8336	0.0018	0.0012	0.0033	0.010	-0.013	0.016	343	0.005	0.008	-0.011	0.014	340.03	-0.001	AU-10	2006-07
AU-10	2008	6748491.2732	399738.1776	885.8279	0.0008	0.0006	0.0018	0.004	-0.011	0.012	322	-0.002	-0.006	0.002	0.006	183.89	-0.006	AU-10	2007-08
AU-10	2009	6748491.2807	399738.1781	885.8187	0.0005	0.0004	0.0010	0.012	-0.014	0.018	344	-0.014	0.008	-0.003	0.008	379.52	-0.011	AU-10	2008-09
AU-10	2010	6748491.2815	399738.1781	885.8332	0.0007	0.0006	0.0015	0.012	-0.013	0.018	349	0.003	0.001	0.001	0.001	87.04	0.017	AU-10	2009-10
AU-11	2005	6748861.2224	399946.4906	870.5067	0.0037	0.0041	0.0076												
AU-11	2006	6748861.2228	399946.4994	870.5040	0.0032	0.0030	0.0052	0.000	0.009	0.009	97	-0.003	0.000	0.009	0.009	97.11	-0.002	AU-11	2005-06
AU-11	2007	6748861.2208	399946.4837	870.5112	0.0036	0.0028	0.0072	-0.002	-0.007	0.007	285	0.000	-0.002	-0.016	0.016	281.83	0.001	AU-11	2006-07
AU-11	2008	6748861.2281	399946.4815	870.4893	0.0023	0.0020	0.0052	0.004	-0.009	0.010	328	-0.017	0.005	-0.002	0.006	374.95	-0.022	AU-11	2007-08
AU-11	2009	6748861.2274	399946.4851	870.4882	0.0018	0.0016	0.0038	0.008	-0.0088	0.007433	347	-0.038	0.0013	0.0036	0.003276	77.8386415	-0.0111	AU-11	2008-09
AU-11	2010	6748861.2289	399946.4904	870.4916	0.0024	0.0027	0.0057	0.0065	-0.002	0.006531	386	-0.0151	0.0015	0.0053	0.0055082	82.4416485	0.0234	AU-11	2009-10
AU-12	2005	6748917.2548	399960.0499	863.2413	0.0034	0.0025	0.0057												
AU-12	2006	6748917.2736	399960.0360	863.2456	0.0043	0.0035	0.0066	0.019	-0.014	0.024	360	0.004	0.019	-0.014	0.024	359.79	0.004	AU-12	2005-06
AU-12	2007	6748917.2732	399960.0170	863.2612	0.0032	0.0019	0.0061	0.019	-0.033	0.038	333	0.020	0.000	-0.019	0.019	298.66	0.016	AU-12	2006-07
AU-12	2008	6748917.2711	399960.0187	863.2352	0.0016	0.0013	0.0035	0.016	-0.031	0.035	331	-0.006	-0.002	0.002	0.003	156.68	-0.026	AU-12	2007-08
AU-12	2009	6748917.2852	399960.0177	863.2164	0.0009	0.0011	0.0020	0.030	-0.032	0.044	349	-0.000	0.014	-0.001	0.014	395.49	-0.011	AU-12	2008-09
AU-12	2010	6748917.2881	399960.0091	863.2317	0.0017	0.0019	0.0045	0.033	-0.041	0.053	344	-0.010	0.003	-0.009	0.009	320.71	0.015	AU-12	2009-10
AU-13	2005	6748787.9196	400171.0182	936.5379	0.0017	0.0011	0.0031												
AU-13	2006	6748787.9213	400171.0188	936.5383	0.0011	0.0008	0.0026	0.002	0.000	0.002	386	0.000	0.002	0.000	0.002	386.08	0.000	AU-13	2005-06
AU-13	2007	6748787.9228	400171.0072	936.5513	0.0017	0.0011	0.0031	0.003	-0.012	0.012	317	0.013	0.002	-0.010	0.012	308.19	0.010	AU-13	2006-07
AU-13	2008	6748787.9250	400171.0110	936.5334	0.0008	0.0006	0.0017	0.005	-0.008	0.010	338	-0.005	0.002	0.004	0.004	66.59	-0.018	AU-13	2007-08
AU-13	2009	6748787.9282	400171.0133	936.5246	0.0006	0.0005	0.0012	0.007	-0.0059	0.0105119	362	-0.033	0.0032	0.0023	0.0039400	39.6741	-0.0080	AU-13	2008-09
AU-13	2010	6748787.9264	400171.0149	936.5440	0.0009	0.0006	0.0017	0.0069	-0.0043	0.0081302	365	0.0061	-0.0010	0.0016	0.0024003	153.740507	0.0194	AU-13	2009-10
AU-14	2005	6749194.4802	400596.5187	907.3882	0.0019	0.0013	0.0038												
AU-14	2006	6749194.4707	400596.5105	907.3464	0.0012	0.0009	0.0027	0.011	-0.006	0.012	368	-0.012	0.011	-0.006	0.012	368.04	-0.012	AU-14	2005-06
AU-14	2007	6749194.4782	400596.4848	907.3820	0.0022	0.0014	0.0041	0.018	-0.022	0.028	344	-0.008	0.007	-0.016	0.017	328.37	0.006	AU-14	2006-07
AU-14	2008	6749194.4882	400596.4840	907.3188	0.0009	0.0007	0.0021	0.028	-0.022	0.036	358	-0.038	0.010	0.000	0.010	0.00	-0.032	AU-14	2007-08
AU-14	2009	6749194.4954	400596.4910	907.3091	0.0005	0.0005	0.0012	0.038	-0.026	0.046	362	-0.010	0.010	-0.004	0.011	377.30	-0.010	AU-14	2008-09
AU-14	2010	6749194.5046	400596.4876	907.3170	0.0003	0.0007	0.0019	0.044	-0.029	0.053	363	-0.041	0.006	-0.003	0.007	368.07	0.008	AU-14	2009-10
AU-15	2005	6747908.4275	399194.5502	964.8979	0.0011	0.0007	0.0026												
AU-15	2006	6747908.4306	399194.5503	964.8922	0.0018	0.0013	0.0042	0.009	-0.008	0.012	354	-0.005	0.009	-0.008	0.012	354.49	-0.005	AU-15	2005-06
AU-15	2007	6747908.4282	399194.5489	964.8842	0.0009	0.0007	0.0020	0.001	-0.009	0.009	305	-0.014	-0.008	-0.001	0.009	218.51	-0.009	AU-15	2006-07
AU-15	2008	6747908.4337	399194.5508	964.8774	0.0005	0.0004	0.0011	0.006	-0.007	0.010	344	-0.021	0.003	0.002	0.008	211.18	-0.007	AU-15	2008-09
AU-15	2010	6747908.4338	399194.5556	964.8908	0.0004	0.0005	0.0014	0.0083	-0.0026	0.008154	375	-0.0071	1E-04	0.0048	0.004801	96.8739029	0.0138	AU-15	2009-10

Fålm - Aurland: dGPS grunnlagsdata 2005 - 2010													Bevegelse fra år til år						
PUNKT	År	N	E	H	σN	σE	σH	dN	dE	Avst.	Retn. (gon)	dH	dN	dE	Avst.	Retn. (gon)	dH	PUNKT	År
AU-16	2007	6748501.8341	399153.9936	928.2028	0.0020	0.0014	0.0048	0.009	-0.009	0.013	352	-0.011	0.009	-0.009	0.013	351.78	-0.011	AU-16	2006-07
AU-16	2008	6748501.8263	399153.9942	928.1965	0.0010	0.0010	0.0022	0.002	0.008	0.008	312	-0.017	-0.008	0.001	0.008	196.11	-0.006	AU-16	2007-08
AU-16	2009	6748501.8348	399153.9951	928.1921	0.0005	0.0004	0.0009	0.010	-0.007	0.012	358	-0.021	0.008	0.001	0.008	6.80	-0.004	AU-16	2008-09
AU-16	2010	6748501.8325	399153.9995	928.2074	0.0007	0.0006	0.0015	0.008	-0.003	0.008	377	-0.006	-0.002	0.004	0.005	128.35	0.015	AU-16	2009-10
AU-18	2005	6750457.9108	399281.1999	58.2533	0.0022	0.0015	0.0048												
AU-18	2006	6750457.9132	399281.2019	58.2726	0.0015	0.0011	0.0034	0.002	0.002	0.003	44	0							

Nedenfor presenteres tabellene ovenfor etter beregning. Legg merke til at enkelte punkt ikke har fullstendig måleserie 2005-2010. Dette er fordi punktene enten er opprettet senere enn 2005, eller fordi de ble ødelagt og dermed erstattet med nytt punkt.

Forenklet presentasjon av dGPS data for Flåm 2005 - 2010

	Horisontal endring pr år [mm]					Total forflytning [mm]		Arlig gjennomsnitt [mm]		Arlig gjennomsnittlig måleusikkerhet 3σ [mm]
	2005-06	2006-07	2007-08	2008-09	2009-10	2005-2009	2005-2010	2005-2009	2005-2010	
AU-2	1	3	1	2	1	3	3	1	1	+/- 3
AU-3	1	3	2			3	2	1	1	+/- 4
AU-4	1	5	5	4	1	6	6	1	1	+/- 3
AU-5	2	6	1	5	1	8	8	2	2	+/- 3
AU-6	3	4	4	6	1	9	8	2	2	+/- 3
AU-7	2	8	5	5	3	11	8	3	2	+/- 4
AU-8	2	10	4	6	3	12	9	3	2	+/- 4
AU-9	2	12	4	4	2	9	8	2	2	+/- 4
AU-10	3	14	6	8	1	18	18	5	4	+/- 4
AU-11	9	16	6	4	6	7	7	2	1	+/- 12
AU-12	24	19	3	14	9	44	53	11	11	+/- 10
AU-13	2	12	4	4	2	11	8	3	2	+/- 4
AU-14	12	17	10	11	7	46	53	12	11	+/- 5
AU-15		12	9	6	5	10	7	3	2	+/- 4
AU-16		13	8	8	5	12	8	4	2	+/- 4
AU-18	3	7	2	2	7	6	11	2	2	+/- 6
AU-19	8	23	15			42	42	14	14	+/- 8
AY-19NY					8		8		8	+/- 4
AU-21	2	10	3	3	4	9	5	2	1	+/- 4
AU-22	2	5	2	3	0	6	6	1	1	+/- 3
AU-24					8		8		8	+/- 6

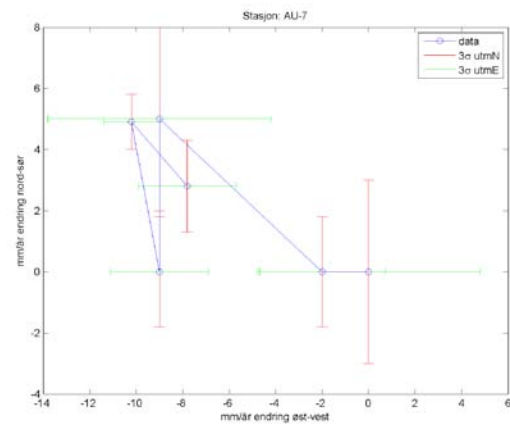
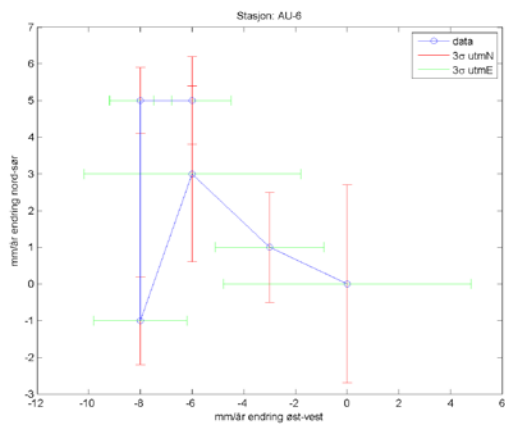
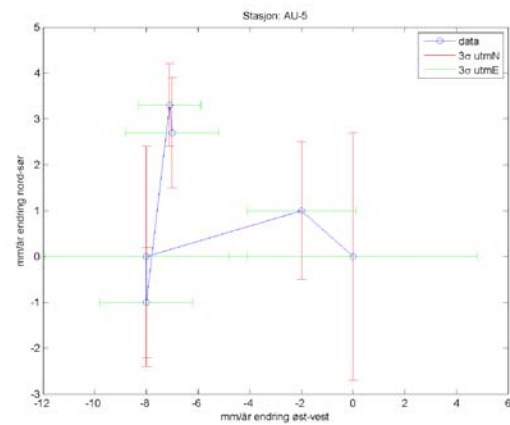
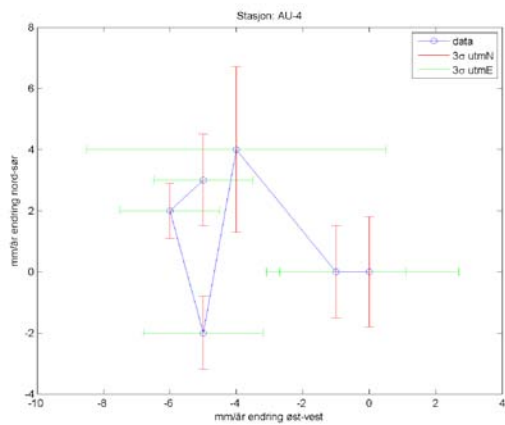
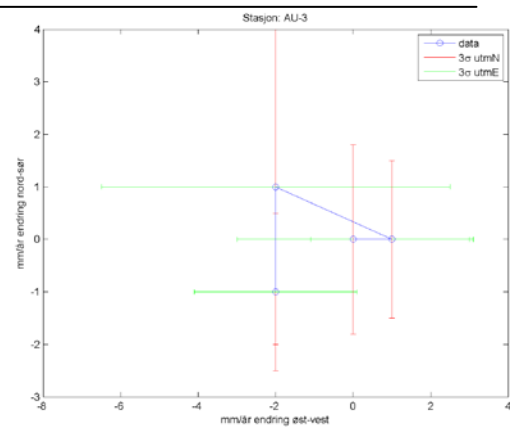
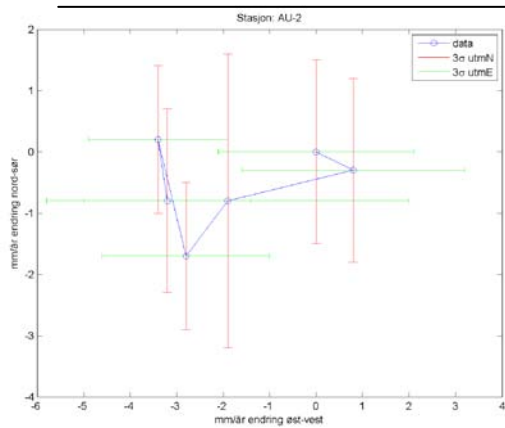
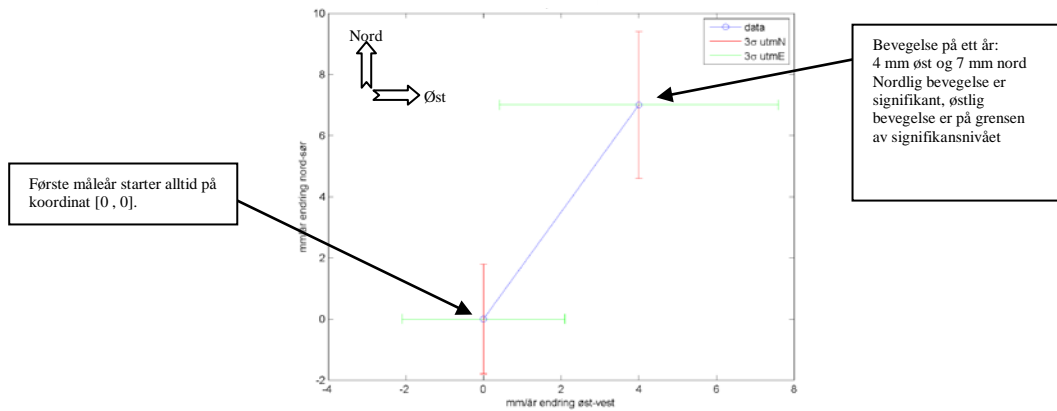
	Vertikal endring pr år [mm]					Total forflytning [mm]		Arlig gjennomsnitt [mm]		Arlig gjennomsnittlig måleusikkerhet 3σ [mm]
	2005-06	2006-07	2007-08	2008-09	2009-10	2005-2009	2005-2010	2005-2009	2005-2010	
AU-2	-4	2	-1	-8	-1	-11	-11	-2		+/- 5
AU-3	-4	-1	2			-3		-1	(2005-2008)	+/- 6
AU-4	-5	6	-4	-9	-1	-14	-14	-3		+/- 5
AU-5	-6	-1	-5	3	-5	-14	-14	-3		+/- 5
AU-6	-4	6	-12	2	2	-7	-7	-1		+/- 5
AU-7	8	0	-12	0	7	3	3	1		+/- 6
AU-8	15	-6	-5	-6	14	11	11	2		+/- 6
AU-9	2	4	-8	-10	17	6	6	1		+/- 7
AU-10	4	-1	-6	-11	17	3	3	1		+/- 7
AU-11	-3	7	-22	-21	23	-15	-15	-3		+/- 17
AU-12	4	16	-26	-19	15	-10	-10	-2		+/- 15
AU-13	0	13	-18	-9	19	6	6	1		+/- 7
AU-14	-12	6	-32	-11	8	-41	-41	-8		+/- 8
AU-15		-5	-9	-7	14	-7	-7	-2	(2006-2010)	+/- 7
AU-16		-11	-6	-4	15	-6	-6	-1	(2006-2010)	+/- 8
AU-18	19	-30	20	-13	11	7	7	1		+/- 10
AU-19	27	-24	19			23	23	8	(2008-2010)	+/- 14
AY-19NY					1	1	1	1	(2009-2010)	+/- 6
AU-21	4	13	-20	-4	12	4	4	1		+/- 7
AU-22	-5	3	-3	-2	-5	-12	-12	-2		+/- 4
AU-24					7	7	7	7	(2009-2010)	+/- 9

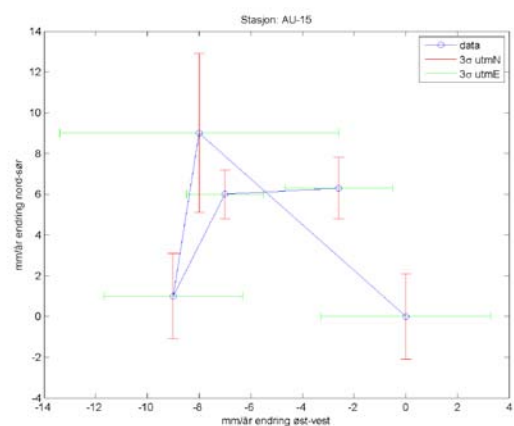
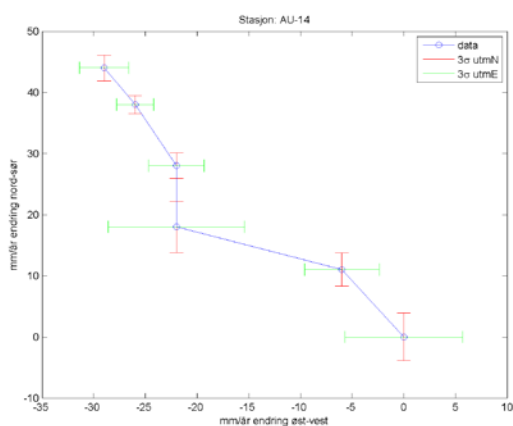
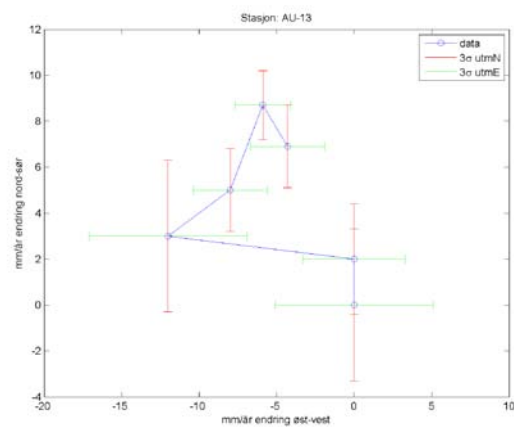
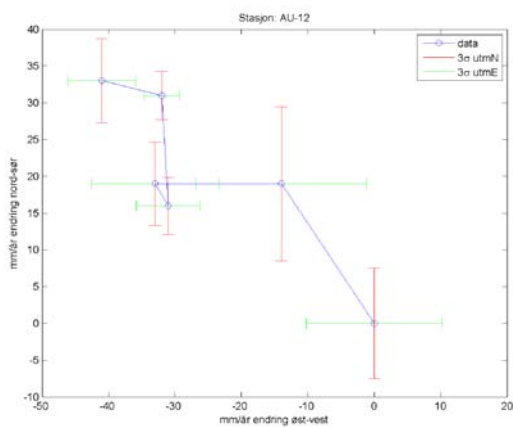
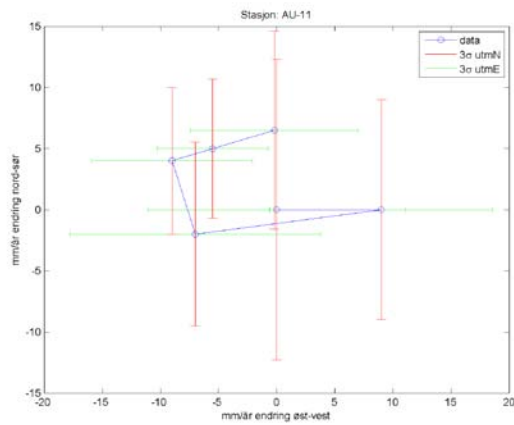
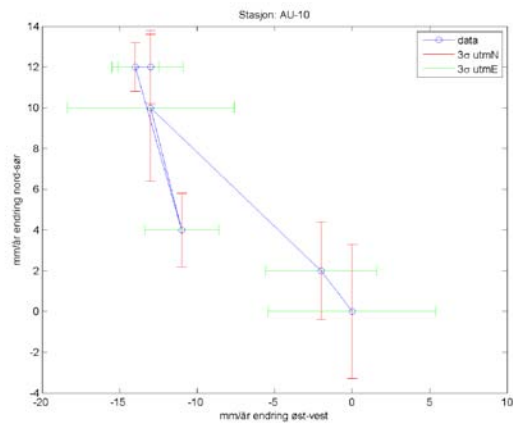
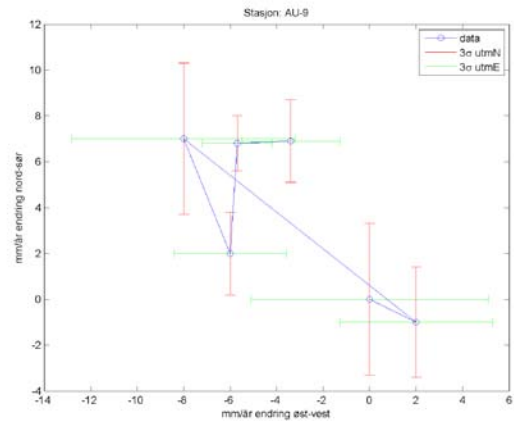
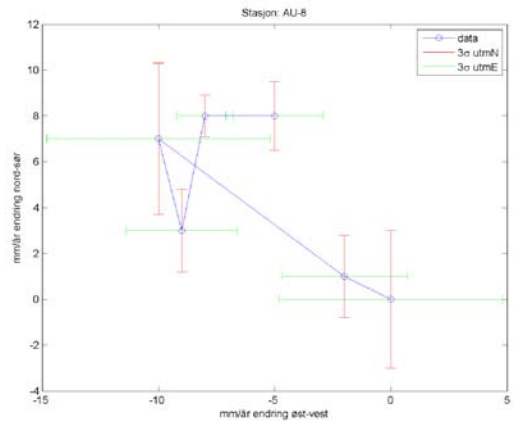
	Total 3-D forflytning fra første måling [mm]					Arlig 3D gjennomsnitt [mm]		Arlig 3D gjennomsnitt [mm]		Arlig 3D gjennomsnittlig måleusikkerhet 3σ [mm]
	2005-06	2005-07	2005-08	2005-09	2005-10	2005-2009	2005-2010	2005-2009	2005-2010	
AU-2	4	3	4	11	11	3	3	2		+/- 5
AU-3	4	6	3			1	1		(2005-2008)	+/- 7
AU-4	6	6	7	14	16	4	4	3		+/- 6
AU-5	6	10	14	12	16	3	3	3		+/- 6
AU-6	5	7	13	13	10	3	3	2		+/- 6
AU-7	8	13	10	12	9	3	3	2		+/- 7
AU-8	15	15	10	12	15	3	3	3		+/- 7
AU-9	3	12	7	14	10	3	3	2		+/- 8
AU-10	5	17	12	23	18	6	6	4		+/- 8
AU-11	9	8	20	39	16	10	10	3		+/- 21
AU-12	24	43	36	51	54	13	13	11		+/- 18
AU-13	2	18	11	17	10	4	4	2		+/- 8
AU-14	17	29	52	67	67	17	17	13		+/- 9
AU-15		13	17	23	10	8	8	2	(2006-2010)	+/- 8
AU-16		17	19	24	10	8	8	3	(2006-2010)	+/- 9
AU-18	20	13	12	7	13	2	2	3		+/- 11
AU-19	28	31	48			16	16		(2008-2010)	+/- 16
AY-19NY					8			8	(2009-2010)	+/- 7
AU-21	5	20	10	11	6	3	3	1		+/- 8
AU-22	6	4	6	9	13	2	2	3		+/- 5
AU-24					11			11	(2009-2010)	+/- 0

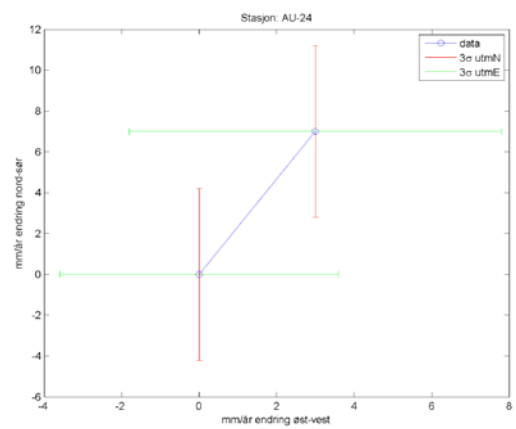
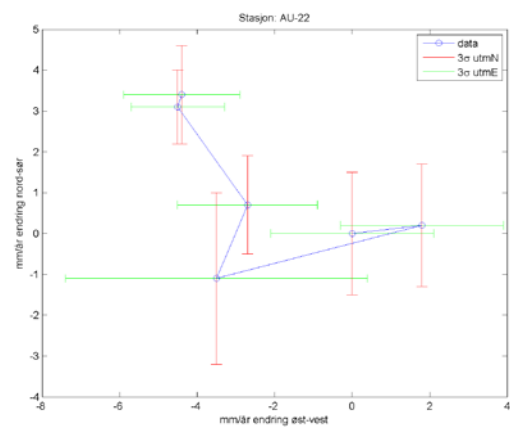
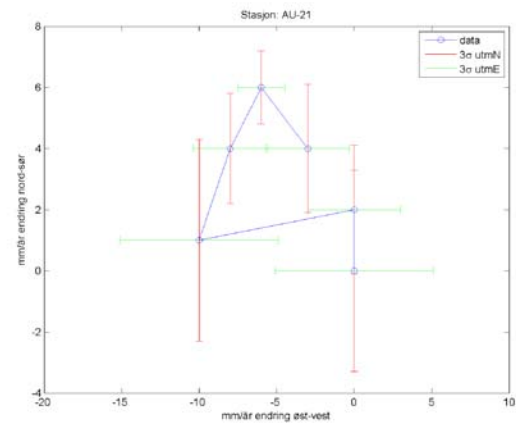
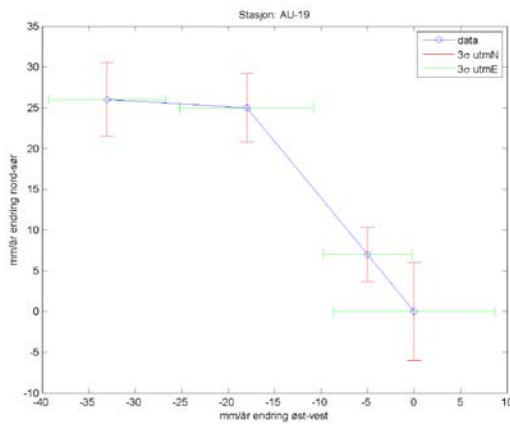
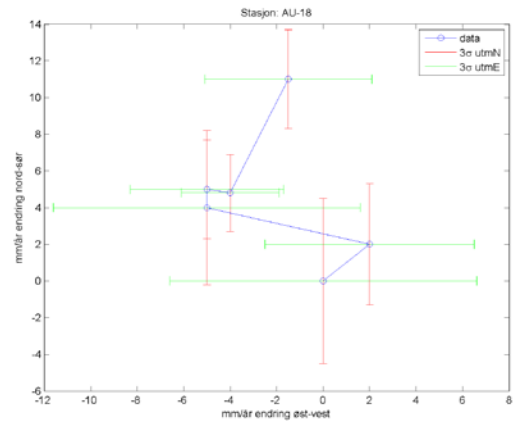
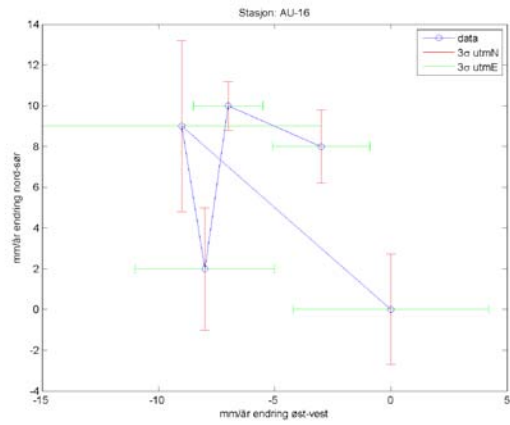
I det følgende representeres hvert målepunkt grafisk.

Hver målestasjon er plottet som ett målepunkt pr år langs aksene utmN og utmØ. Røde og grønne stolper er 3σ intervallet, som illustrerer usikkerheten til hver måling for et 99% signifikansnivå. For at en måling skal være signifikant må bevegelsen mellom to målinger være større enn intervallet 3σ . Vi ser at det er målestasjonene

AU-12, AU-14 og AU-19 som viser klart systematisk bevegelse i kompassretning. Det er også disse tre målestasjonene som viser størst endring fra år til år.

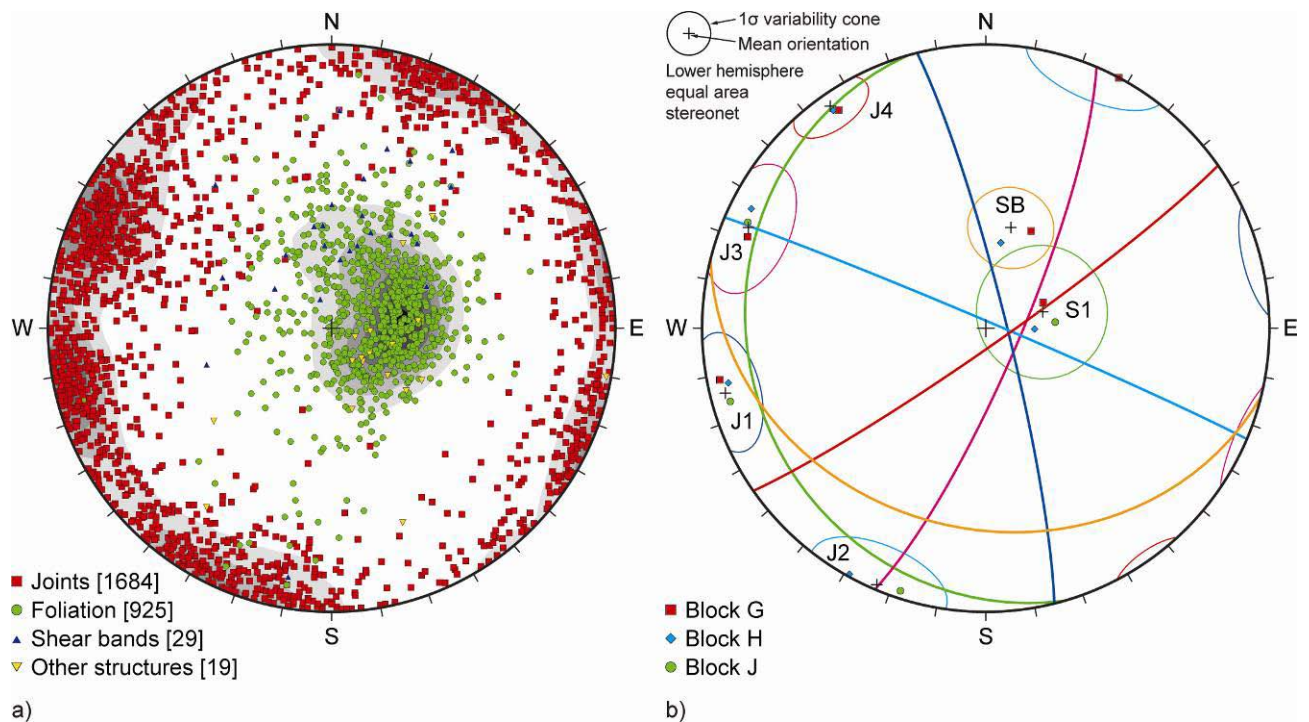






V.2 2500 strukturegeologiske målinger ved 122 stasjoner

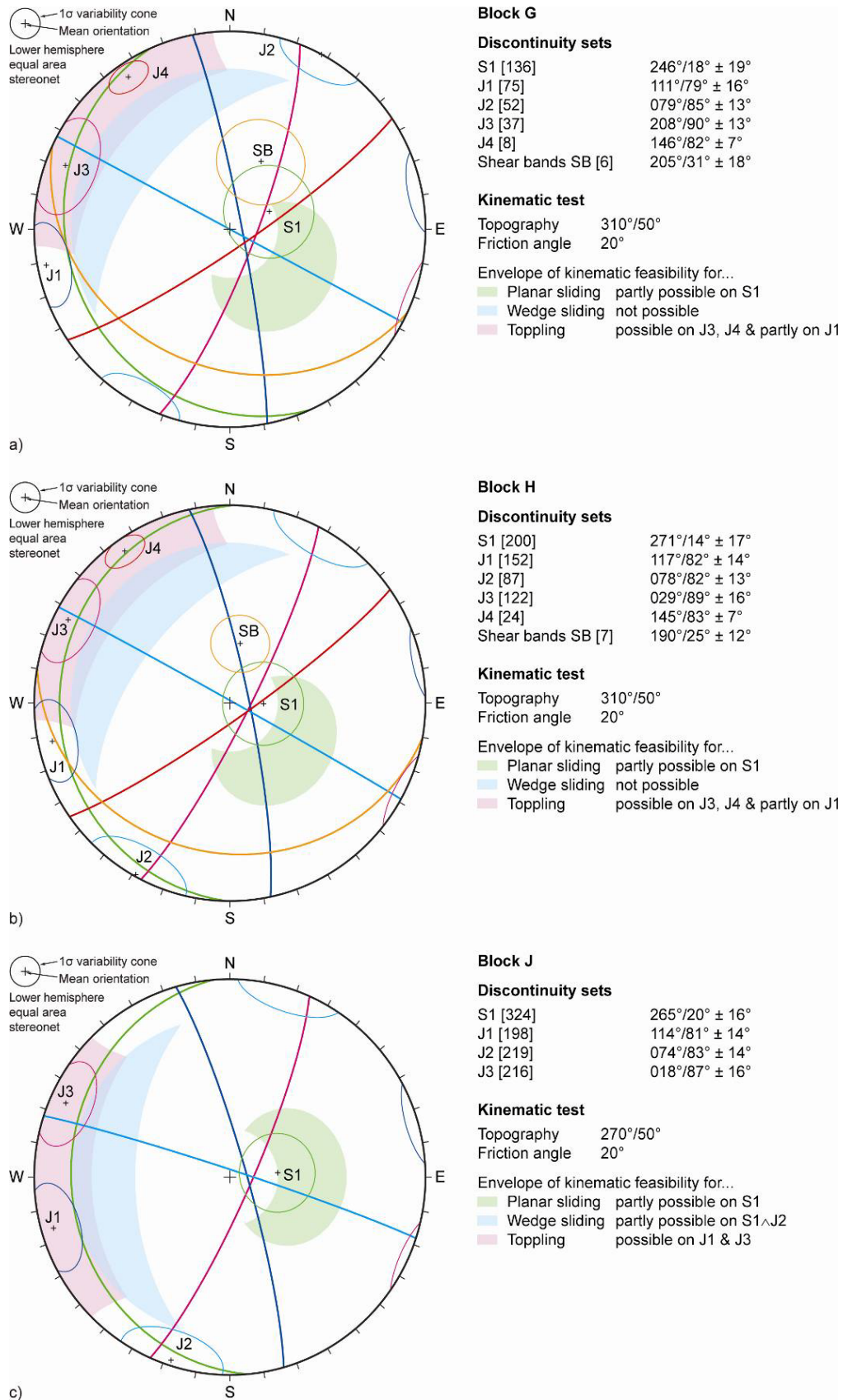
For oversikt over de ulike målestasjonene, se Fig 2.



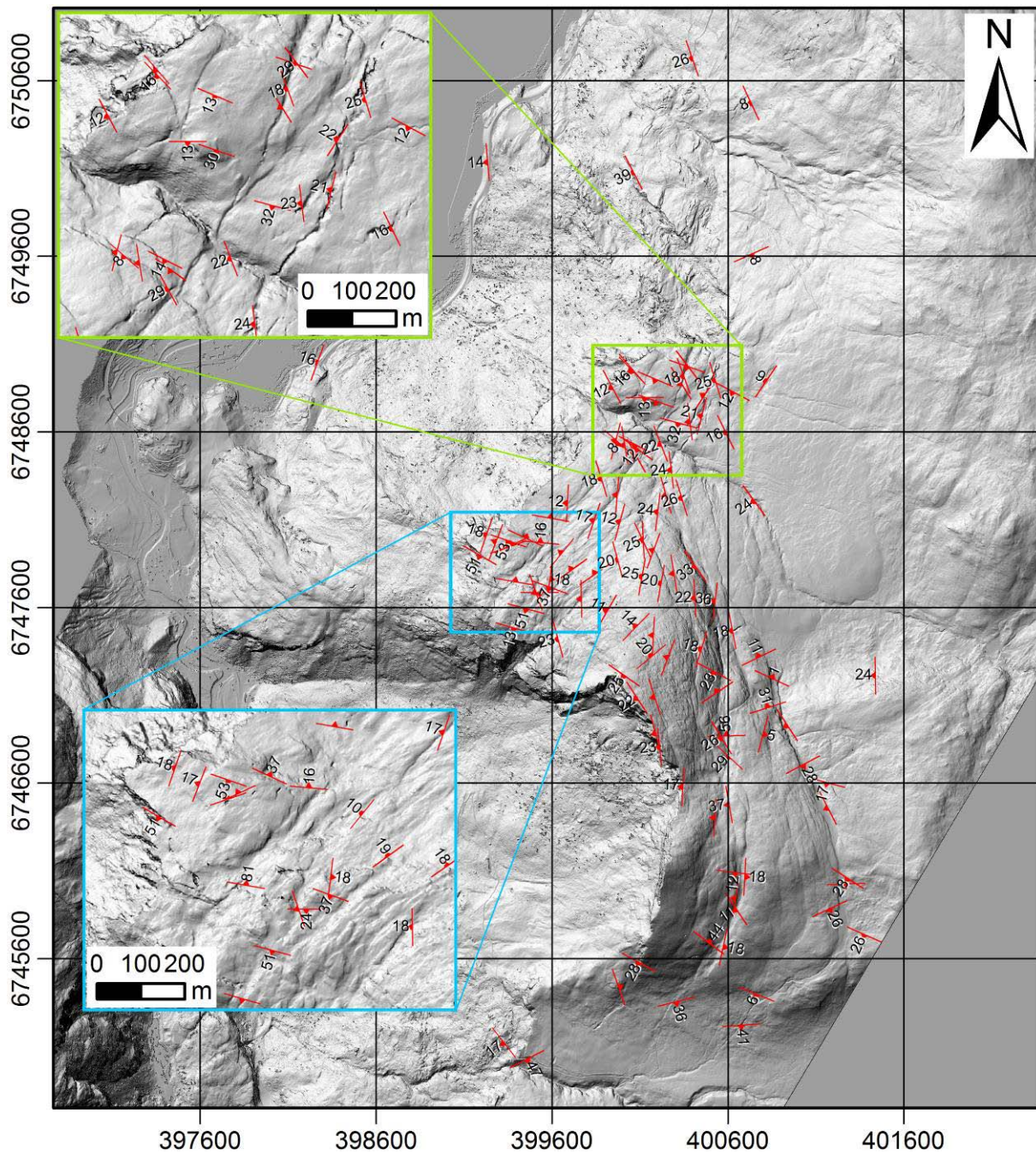
Figur 15: Stereonett som viser svakhetsplan ved Flåm:

a) feltmålinger gruppert som sprekker, lagdeling, skjærbånd og andre strukturer (for eksempel eksfoliasjon);

b) polplott som viser hovedsettene av svakhetsplan kalkulert ut fra alle feltmålingene i plott a). Inkluderer også de samsvarende storsirkler og variasjonsskjegler. Beregningen er basert på utvalg fra hver av hovedblokkene G, H og J. Ingen signifikant forskjell observeres mellom de tre ulike blokkene.



Figur 16: Hovedsett av svakhetsplan basert på feltmålinger og tester for mulighet for bevegelse (kinematiske tester) for hovedblokkene G, H og J.



Figur 17: Kart over fall og fallretningen til lagdelingen. Legg merke til den store variasjonen i fallretning på grunn av små folder og unduleringer i fyltitten.

V.3 Flåm – analysis of rotation of block B

Thierry Oppikofer, Geological Survey of Norway (NGU)

Introduction

The goal of this study is to quantify the total rotational movement of the unstable block B at Flåm based on the differences in orientation of the main discontinuity sets between the moving block and its (relatively) stable surroundings.

Structural analysis

Using the complete terrestrial laser scanning (TLS) dataset acquired in 2008 (Figure 1), a structural analysis has been carried out using the Coltop3D software (www.coltop3d.ch) (Jaboyedoff et al. 2007). This software computes the spatial orientation of each point with respect to its neighbourhood and displays the points with an orientation-specific colour. Selecting surfaces with homogeneous colour allows obtaining the mean orientation and variability of each discontinuity set.

The TLS point cloud was divided into 4 parts, two on the moving block B (SW-facing cliff & SE-facing counter scarp), one on the unstable block G3 (northern ridge) and one relative stable part (back-crack) (Figure 1).

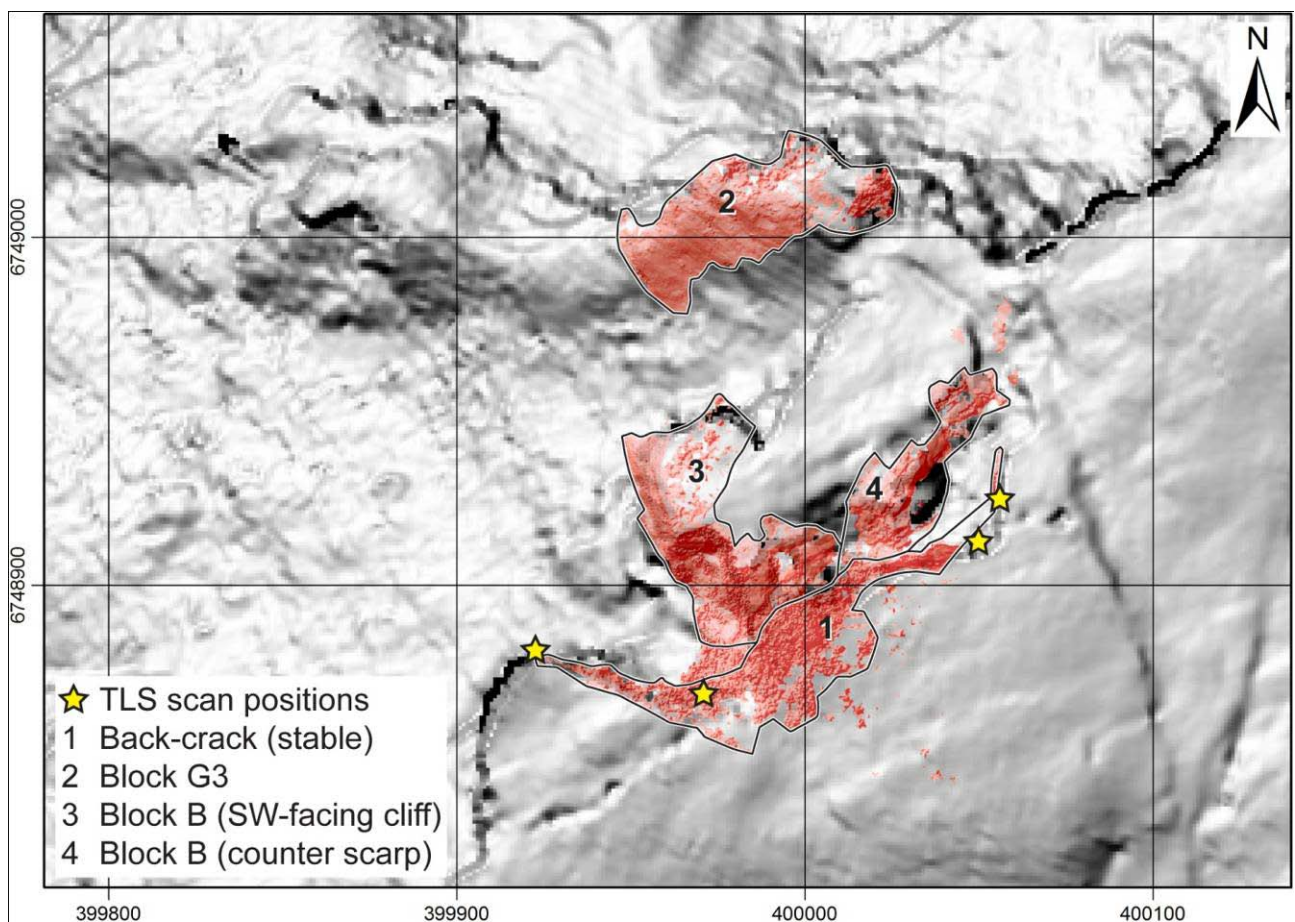


Figure 1: Hillshade map of the Flåm block B area with the surface covered by the 2008 TLS data (red) and the four parts used for the detailed structural analysis.

Table 1: Main discontinuity sets at Flåm block B (dip direction/dip angle $\pm 1\sigma$ variability).

Set	Back-crack (reference)	Block B SW cliff	SE cliff	Block G3
D1		017°/64° \pm 19°	001°/65° \pm 19°	010°/71° \pm 14°
D2	080°/78° \pm 13°	076°/78° \pm 11°		
D2'	059°/50° \pm 12°		075°/52° \pm 19°	
D3	137°/82° \pm 10°		125°/83° \pm 25°	
D3'	108°/78° \pm 10°	111°/60° \pm 19°		
D4	187°/59° \pm 12°	185°/55° \pm 16°	174°/59° \pm 18°	
D4'	160°/53° \pm 14°			
D5	214°/55° \pm 19°	220°/50° \pm 17°		223°/64° \pm 11°
D6		253°/68° \pm 14°		253°/81° \pm 12°
D7			279°/64° \pm 16°	274°/57° \pm 13°
S1	262°/19° \pm 16°	246°/27° \pm 12°		229°/30° \pm 10°
S1'	298°/44° \pm 20°	278°/33° \pm 13°		
Other	357°/43° \pm 21°			
(mainly	153°/27° \pm 12°			
single	094°/38° \pm 14°			
cracks)	321°/81° \pm 15°		035°/63° \pm 13°	051°/77° \pm 16°

The structural analysis of the different parts of block B and its surroundings reveals numerous different discontinuity sets and significant differences between the parts (

Table 1 & Figure 2). However, the principal discontinuity sets (D2, D3, D4, D5 and the foliation S1) are identified in several parts, both on the back-crack and on the unstable blocks B & G3. This high number of discontinuities indicates a highly fractured rock mass. However the spatial distribution of these discontinuity sets shows that some discontinuity sets are only to be found in certain parts of the rock mass reducing the number of simultaneously present sets to 3 to 6. This finding further underlines the complexity of fracturing of the phyllitic rock mass at Flåm.

The discontinuity sets D1, D2, D3 and D3' are also detected by field work and form the most important regional discontinuity sets. Field measurements of the foliation give a similar mean value ($246^{\circ}/15^{\circ}$) than the measurements on the TLS point cloud (S1: $262^{\circ}/19^{\circ}$).

Kinematic tests

Based on the structural analysis of block B at Flåm and the orientation of the slope face ($290^{\circ}/50^{\circ}$), simple kinematic feasibility tests have been made using following standard criteria:

- For planar sliding, the discontinuity must daylight the topography, i.e. it needs to dip in the same direction as the topography with a tolerance that depends on the slope angle and its dip angle must be smaller than the slope angle, but also steep enough to exceed the friction angle along the discontinuity (20° in this study) (Hoek and Bray 1981, Wyllie and Mah 2004). In a stereographic projection this signifies that the pole of the sliding plane has to fall inside the daylight envelope of the topography and at the same time be outside of the pole friction angle cone (green area in Figure 2).
- The same criteria apply for wedge sliding formed by the intersection of two discontinuities (Markland 1972, Hoek and Bray 1981, Wyllie and Mah 2004). The plunge of the wedge intersection line must be smaller than the slope angle and steeper than the friction angle. Seen in a stereographic projection, the intersection line must fall into the zone delimited by the friction angle cone and the great circle of the slope face (blue area in Figure 2). In addition, for wedge sliding the intersection line and the slope aspect must be included between the dip directions of the planes forming the wedge (Markland 1972).
- For toppling failure the discontinuity must dip into the slope face and its dip direction must be within $\pm 45^{\circ}$ of the slope orientation. Furthermore, the dip angle must be steep enough for interlayer slip to occur, which depends on the friction angle and the slope angle (Wyllie and Mah 2004). In a stereonet, the pole of the discontinuity must fall in the zone formed by the lateral tolerance on the dip angle and the constraint on the dip angle of the discontinuity (red area in Figure 2).

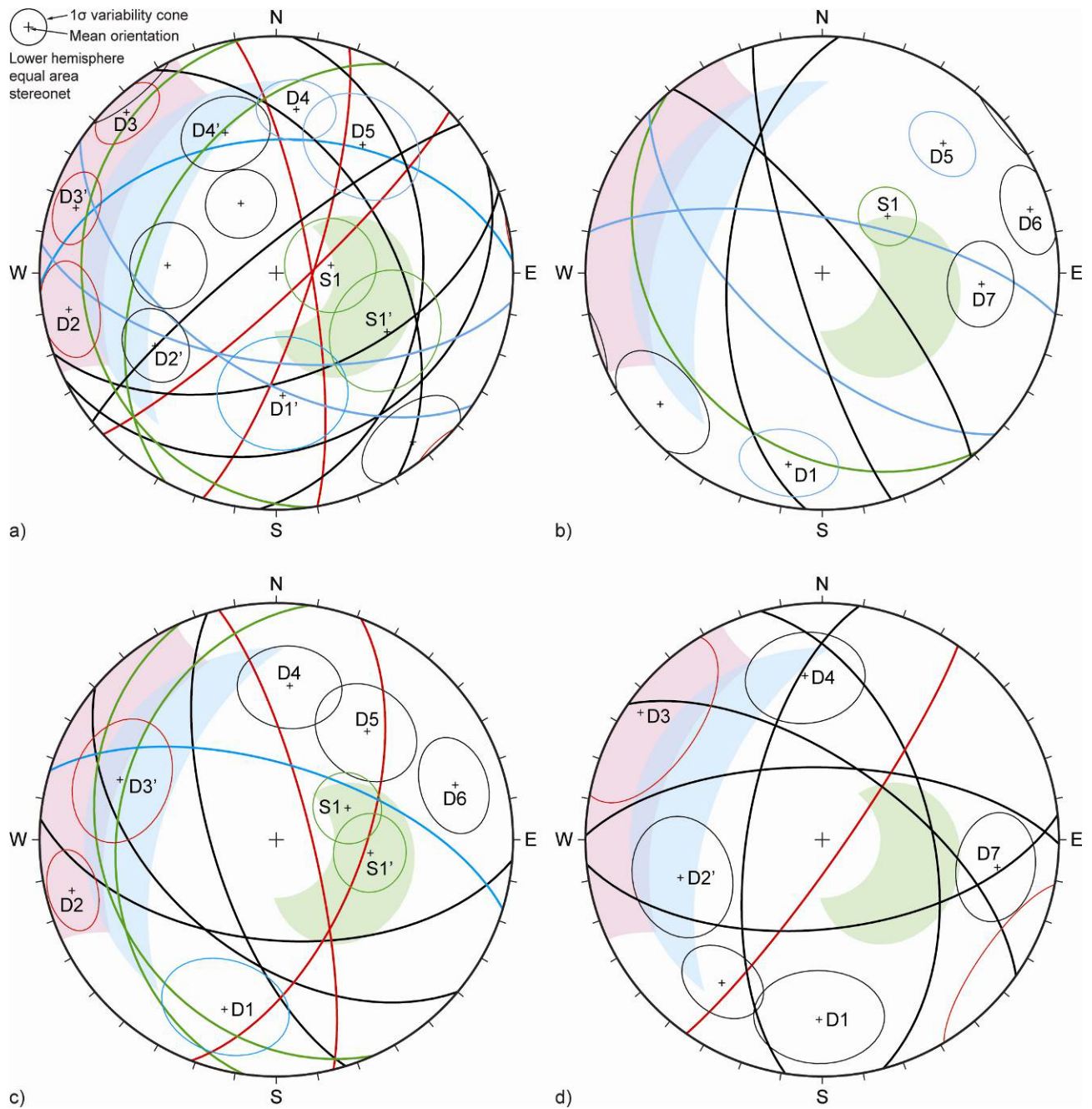


Figure 2: Stereonets of the discontinuity sets for the different parts at Flåm block B: a) back-crack; b) northern ridge; c) SW-facing cliff on unstable block; d) SE-facing counter scarp on unstable block.

This kinematic tests show that planar sliding on S1 or S1' is a possible instability mechanism (Figure 2). However the isoclinal folding of the phyllites makes it unlikely to have a continuous basal sliding surface formed by S1 or S1'. Nonetheless, the breaking of rock bridges may lead to a through going sliding surface that is roughly parallel to S1 or S1'. On unstable blocks that already have undergone significant deformation, such as block B, the existence of a continuous sliding surface at the base of the block is likely (Figure 3).

This basal sliding surface can also be involved in a wedge sliding mechanism with discontinuities that steeply dip towards the south (D4, D5) or the north (D1) (Figure 2). The subvertical, east to southeast dipping discontinuities (D2, D3, D3') enable toppling failure (Figure 2). Furthermore, D2 and D4 discontinuities divide block B in several compartments (Figure 3), which suggests that a massive slope failure of the entire block B is less likely than the failure of smaller volumes in several events. This finding also reduces the probability of the failed rock mass to travel far, reach the fjord and cause a tsunami. More site investigation and run-out modelling is however necessary to assert this hypothesis.

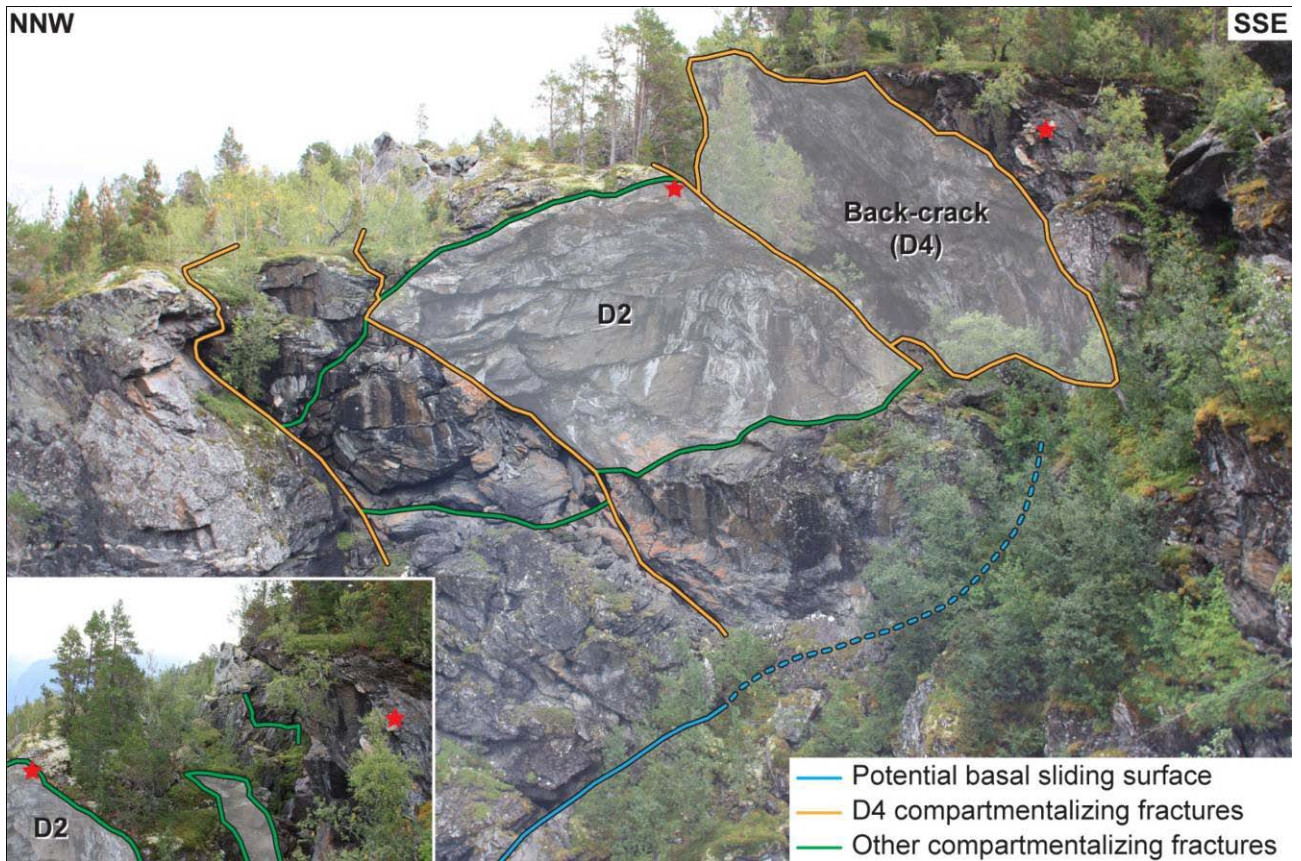


Figure 3: Photographs of block B showing the compartmentalization by discontinuities D2 and D4. Red stars indicate common points in both photographs. Compartments delimited by D2 may topple towards the west.

Rotation analysis

According to Viero et al. (2010), the differences in orientation of the discontinuity sets between the relatively stable back-crack and the unstable block B can be used to compute the total rotational movement of block B. This analysis assumes that the orientation of the discontinuities in block B matched those of the back-crack before the displacement (Figure 4a) and that differences are directly related to rotational movement (Figure 4b).

The main goal is to identify pairs of discontinuities that are found both on block B and at the back-crack and to compute the rotation angles leading from the initial orientation to the final orientation of the discontinuity. This is achieved by minimizing the angular differences between the initial and final orientations of each pair. The match would be excellent in an ideal case, such as the sketch in Figure 4. In reality however, the best-fit is not perfect due to local heterogeneities in the discontinuity orientation and to measurement errors.

A total of 11 discontinuity pairs between the back-crack and block B are found, but some may not co-exist. For example, each initial orientation can only go to one final orientation ($S1$ or $S1_2$; $D4$ or $D4_2$) and each final orientation may only have one initial orientation ($S1'$ or $S1_2$) (Figure 5). Taking into account these constraints only 9 pairs can be jointly present. All possible combinations of discontinuity pairs (from 3 pairs up to 9 pairs) were tested and the rotational parameters computed.

Between the back-crack and block G3 only two common discontinuities are found, which is not sufficient for this rotation analysis (min. 3 pairs). Six possible discontinuity pairs exist between blocks B and G3, but since both blocks have moved or likely moved, a detailed rotation analysis is not meaningful.

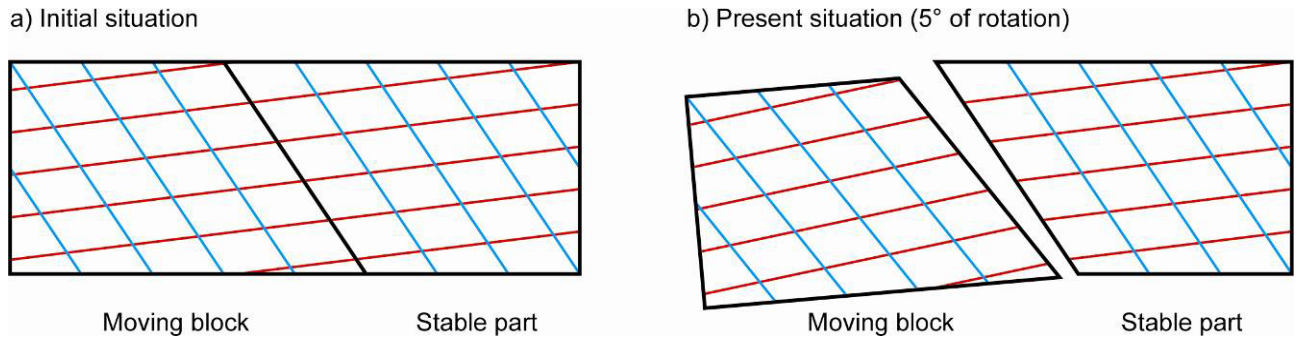


Figure 4: Scheme of the rotation analysis based on the orientation changes of discontinuities (red and blue lines) due to the rotation of the moving block: a) Initial situation with continuous discontinuity sets; b) present state with 5° of rotation of the moving block with respect to the stable part.

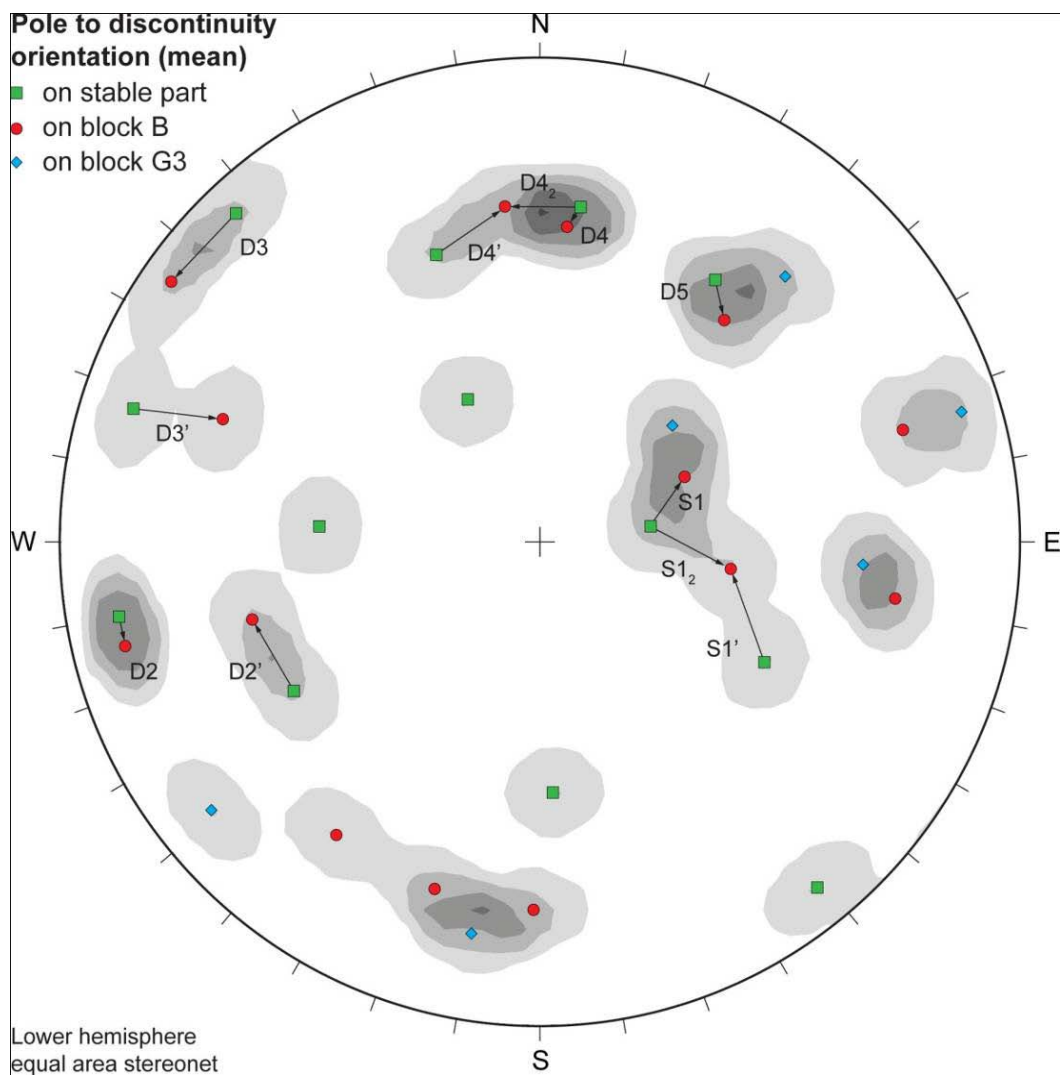


Figure 5: Stereonet of the discontinuity sets identified on block B and its surroundings and the 11 discontinuity pairs used for the analysis of the rotation of block B.

Method

The computation is made in an Excel spreadsheet that minimizes the differences between the used point pairs by varying the rotation angles α , β , and γ around the three axes of the coordinate system. These angles are used to compute a 3x3 rotation matrix M_{rot} (Eq. 1) and to obtain the orientation of each discontinuity set after rotation. Therefore the normal vector of the initial orientation \vec{v}_i is multiplied with the matrix M_{rot} to obtain the rotated normal vector \vec{v}_r (Eq. 2):

$$M_{rot} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{v}_r = M_{rot} \cdot \vec{v}_i \quad (2)$$

Finally the angular difference α between the rotated orientation \vec{v}_r and the target orientation \vec{v}_f is computed by the dot product (Eq. 3) and the average of the differences of all used pairs $\bar{\varepsilon}_{used}$ is minimized in an iterative procedure:

$$\cos \varepsilon = \frac{\vec{v}_r \cdot \vec{v}_f}{|\vec{v}_r| |\vec{v}_f|} \quad (3)$$

For ease of understanding the best-fitted rotation matrix M_{rot} is transformed into a toppling component (toppling azimuth φ and toppling angle ϕ), as well as a tilt angle ψ , being the rotation angle around the toppled vector (Figure 6). See Oppikofer et al. (2009) for details on the computation of the toppling and tilt angles. This tilt angle is necessary to fully describe the 3D of the block, but the interpretation of this angle in terms of landslide mechanism or movement remains open (Oppikofer et al. 2009).

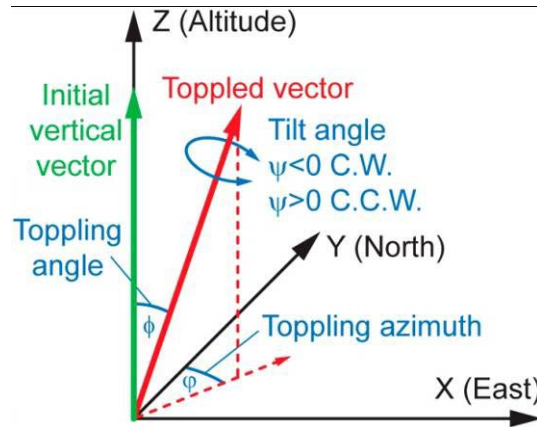


Figure 6: Scheme of the rotational components in the 3D displacement of a block. The rotation is described by the toppling azimuth and angle of an initially vertical vector and the tilt rotation around the toppled vector. Note: due to the application of the right-hand-rule, negative and positive tilt angles stand for clockwise (C.W.) and counter-clockwise (C.C.W.) rotations, respectively (from Oppikofer et al. 2009).

Results

The results of the rotation analysis of block B are summarized in Table 2. In the initial situation the average differences between all 11 discontinuity pairs $\bar{\varepsilon}_{all}$ equals 11.3°. In total there are 737 possible combinations of these 11 pairs, taking into account that minimum three pairs are necessary and that some pairs may not co-exist. Many of these combinations are not appropriate since $\bar{\varepsilon}_{all}$ is higher than in the initial situation, even though the error on the used pairs $\bar{\varepsilon}_{used}$ may be small. Therefore several criteria are applied to select the best combinations:

- Criteria 1: the mean difference of all pairs must be smaller than in the initial situation and the mean error on the used pairs must be smaller or equal to the error on all pairs (Eq. 4):

$$\bar{\varepsilon}_{used} \leq \bar{\varepsilon}_{all} < 11.3^\circ \quad (4)$$

- Criteria 2: the mean error on the used pairs has to be significantly lower than on all pairs; an average difference of 6° has been chosen upper limit (Eq. 5):

$$\bar{\epsilon}_{used} \leq 6^\circ \quad (5)$$

- Criteria 3: due to the limited meaning of the tilt angle in terms of landslide mechanisms and displacements, tilt angles above 7.5° are not realistic, especially when comparing with toppling angles, which in 95% are smaller than 7.5° (Eq. 6):

$$\psi \leq 7.5^\circ \quad (6)$$

The application of these selection criteria lead to a reduction of the number of combinations from 737 to 277, 30 and finally 21 for criteria 1, 2, and 3, respectively (Table 2). The computed rotations become relevant and consistent with criteria 2, with a toppling angle of 2.4° towards 344° (NNW). The final result after selection criteria 3 gives a toppling movement of 4.1° towards 338° and a tilt rotation of 3.7° in counter-clockwise direction (Table 2). Yet, the mean errors on the fitted discontinuity pairs $\bar{\epsilon}_{used}$ and on all pairs $\bar{\epsilon}_{all}$ remain relatively high and are likely caused by local heterogeneities in the discontinuity orientation and by measurement errors.

Table 2: Results of the rotation analysis of block B.

Selection	n	Toppling			Tilt		Mean error	
		Azimuth [°]	Angle [°]	Variability [°]	Angle [°]	All pairs [°]	Fitted pairs [°]	
Initial situation	-	-	-	-	-	11.3	-	
All combinations	737	241.1	2.7	8.9	1.9	12.0	8.9	
Criteria 1	277	289.5	0.8	5.3	5.1	10.4	8.2	
Criteria 2	30	343.8	2.4	4.8	5.9	10.5	4.9	
Criteria 3	21	337.6	4.1	4.0	3.7	10.3	5.0	

This computed toppling direction fits with a toppling mechanism along D4 and D4' discontinuities, which form the major part of the back-crack (Figure 3). With the slope orientation of the NW facing cliff of block B (340°/75°), D4 and D4' discontinuity sets satisfy the kinematic feasibility criteria for toppling failure. Even though toppling is important for the global movement of block B, it cannot fully explain the total displacement of block B. To open a 20 to 30 m wide graben between the back-crack and the unstable block by 4.1° of toppling necessitates a 280 to 420 m high block, which is not realistic! The height of block B is only 30 to 55 m and thus the displacement due to toppling can be estimated 2 to 4 m. The remaining part of the total observed displacement has to be caused by a sliding mechanism. This detailed rotation analysis thus supports the hypothesis of a slide-topple mechanism (Brideau and Stead 2009).

References for V.3

- Brideau, M. and Stead, D. 2009. The role of rear release surfaces, block size and lateral confinement on rock slope failure mechanisms. *In* 62nd Canadian Geotechnical Conference, Halifax, Canada, pp. 489-496.
- Hoek, E. and Bray, J. 1981. Rock slope engineering. E & FN Spon, London, 3rd edition.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M., Locat, J., and Turmel, D. 2007. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. *In* Rock mechanics: Meeting Society's challenges and demands. Proceedings of the 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27-31 May 2007 Edited by E. Eberhardt, D. Stead and T. Morrison. Taylor & Francis, London, pp. 61-68.
- Markland, J.T. 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected, Imperial College Rock Mechanics Research Report Nr. 19, 10 p.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L.H., and Derron, M. 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(3): 1003-1019.
- Wyllie, D.C. and Mah, C.W. 2004. Rock slope engineering: Civil and mining. Spon Press/Taylor & Francis Group, London and New York, 4th edition, 431 p.