

Gine Myhra

GIS-analyse av terrengendringer i kvikkleirefarlige områder

med eksempler fra Trøndelag

Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Ola Fredin

Medveileder: Jean-Sébastien L'Heureux

Juni 2023

Gine Myhra

GIS-analyse av terrengendringer i kvikkleirefarlige områder

med eksempler fra Trøndelag

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Ola Fredin
Medveileder: Jean-Sébastien L'Heureux
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden

Sammendrag

I Norge har det gått en rekke kvikkleireskred gjennom historien. Noen av disse har knapt vært merkbare, mens andre har fått katastrofale følger. Gjerdrumskredet i 2020 er et eksempel på det siste, da det resulterte i store ødeleggelser og tap av flere menneskeliv. I etterkant av dette fikk kvikkleireproblematikk økt fokus, da det ble tydelig at kartlegging og sikring av slike områder er noe som må tas på største alvor. Problemstillingen i denne oppgaven har som formål å komme nærmere en løsning på denne problematikken ved å undersøke bruken av detaljerte høydemodeller (LiDAR) fra forskjellige år, og GIS-analyser for deteksjon av kritiske terrengendringer, i områder preget av marine avsetninger og kvikkleire.

For å gjennomføre terrengendringsanalysene ble programvaren *ArcGIS Pro* brukt til å sammenligne LiDAR-data fra ulike år. Dette ble gjort for de to studieområdene Byneset og Småvika i Flatanger, begge to i Trøndelag der det er kjente forekomster av kvikkleire. Terrengendringene som ble funnet i *ArcGIS Pro* baserte seg på høydeendringer som hadde oppstått i terrenget i tidsintervallet mellom LiDAR-målingene. For å sortere høydeendringene etter størrelse, samt skille ut støy og endringer som ikke var relevante for denne konteksten, ble det valgt grenseverdier med tilhørende symbolisering. Terrengendringene som hadde størst høydeforskjell og utstrekning i overflateareal ble deretter videre undersøkt ved hjelp av flyfoto. Noen av endringene som ble oppdaget på Byneset ble også befart i felt, i tillegg ble det foretatt volumberegninger og 3D-modellering i programvaren *Cloud Compare* for et utvalg av disse.

Resultatene viste at det er mulig å detektere terrengendringer i marine avsetninger, men at ikke alle er like relevante. Mye støy viste seg å være områdespesifikk, der jordbruk sto for det meste av dette på Byneset. Innføring av grenseverdier bidro til å fjerne en del støy, samt rette fokus mot de største og mest relevante terrengendringene. LiDAR-data har begrensninger i områder med tett vegetasjon. Dette ble tydelig i noen områder som fikk lav punkttetthet og usikre resultater i terrengendringsanalysene. Flyfoto og feltundersøkelser kunne i mange tilfeller bekrefte det som ble funnet i analysene i *ArcGIS Pro*, men avdekket også enkelte falskt positive og falskt negative resultater. Noen av disse kunne blitt unngått dersom det ble utført hyppigere innsamling av LiDAR-data, som deretter ble brukt i terrengendringsanalyse. I forbindelse med kartlegging av kvikkleirefaresoner, lokalt, regionalt og i hele Norge, kan slike analyser være et nyttig supplement, da de kan bidra til å avdekke kritiske områder der det er behov for videre undersøkelser.

Abstract

Norway has experienced a number of quick clay landslides throughout history. Some of these have passed unnoticed, while others have resulted in catastrophic consequences. The Gjerdrum landslide in 2020 is an example of the latter, as it caused extensive infrastructure destruction and tragic loss of several lives. In the aftermath of this event, the issue of quick clay became a focal point, highlighting the need for thorough mapping and securing of such areas. The aim of this thesis is to address this issue by investigating the potential of terrain change analysis in GIS for detecting critical terrain changes in areas characterized by marine deposits and quick clay.

To conduct the terrain change analyses, the software *ArcGIS Pro* was used to compare LiDAR data (high resolution elevation models) from different years. This was done for two study areas, Byneset and Småvika in Flatanger, both in Trøndelag and known for presence of quick clay. The terrain changes identified in *ArcGIS Pro* were based on height differences that occurred within the time interval between the LiDAR data measurements done at different years. To rank the height changes by magnitude and filter out noise and irrelevant changes, threshold values with corresponding map symbolisation were chosen. The terrain changes with the greatest height difference and surface area were further examined using aerial photographs. For some of the identified changes from Byneset field investigations were carried out, and volume calculations and 3D modeling were conducted in the *Cloud Compare* software for a selection of these.

The results of the analyses demonstrate that it is possible to detect terrain changes in marine deposits, although not all of them are relevant. Much of the noise was found to be area-specific, primarily related to agriculture practices in Byneset. The introduction of threshold values helped remove some of the noise and focus on the most significant terrain changes. Limitations of LiDAR data in areas with dense vegetation were also evident, as this resulted in low point density and uncertain results in the terrain change analysis. Aerial photographs and field investigations often confirmed the findings in *ArcGIS Pro* analyses, but also revealed some false positives and false negatives. Some of these could have been avoided by more frequent collection of LiDAR data, which could then be used for higher quality terrain change analysis. In the context of mapping quick clay hazard zones, locally, regionally and across Norway, the described analyses can be a useful supplement, as they can help identify critical areas that require further investigation.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i løpet av vårsemesteret 2023 og markerer slutten på fem år med studier ved NTNU. Oppgaven er skrevet som en del av det integrerte masterstudiet tekniske geofag ved institutt for geovitenskap og petroleum, og tilsvarer 30 studiepoeng.

Takk til hovedveileder Ola Fredin for hjelp med utforming av en spennende oppgave som har vært inspirerende og lærerrik å jobbe med. Takk også for all veiledning underveis, både i skriveprosessen, GIS-analysene og i forbindelse med feltarbeidet. Vil også rette en stor takk til medveileder Jean-Sébastien L'Heureux ved NGI, som har bidratt til vinklingen av oppgaven, og som har kommet med gode innspill og nyttig litteratur. Takk også til Lene Pallesen for all hjelp med GIS.

Helt til slutt vil jeg takke mine medstudenter for fem fine år sammen.

Trondheim, 11. juni 2023.

Gine Myhra

Innhold

Figurliste	VI
Tabelliste	VII
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål med oppgaven: Problemstilling og forskningsspørsmål	2
1.3 Oppgavens oppbygging	3
1.4 Oppgavens omfang og begrensninger	3
2 Teori	4
2.1 Kvikkleire	4
2.1.1 Dannelse og utbredelse av kvikkleire	4
2.1.2 Geotekniske parametre og egenskaper	6
2.2 Skredmekanismer i kvikkleire	8
2.3 Utløsende årsaker til kvikkleireskred	10
2.4 Sikringstiltak	11
2.5 Kartlegging av kvikkleire	13
2.5.1 Geofysiske metoder	14
2.5.2 Geotekniske undersøkelser	15
2.6 Fjernanalyse for overvåking av terrengendringer på jordoverflaten	16
2.6.1 Aktiv fjernanalyse	17
2.6.2 Passiv fjernanalyse	19
2.6.3 Oppløsning og filformat	20
3 Metode	22
3.1 Innledende analyse i <i>ArcGIS Pro</i>	22
3.2 Cloud compare	25
3.3 Feltarbeid	26
4 Beskrivelse av studieområdene: Byneset og Flatanger	28
4.1 Byneset	28
4.1.1 Bergrunnsgeologi	28
4.1.2 Løsmassefordeling	30
4.1.3 Skredhistorikk og sikringstiltak	31
4.2 Flatanger	32
4.2.1 Bergrunnsgeologi	33
4.2.2 Løsmassefordeling	34
4.2.3 Skredhistorikk og sikringstiltak	34
5 Resultater	36
5.1 Byneset	36
5.1.1 Lokalitet A	40
5.1.2 Lokalitet B	43
5.1.3 Lokalitet C	47
5.1.4 Lokalitet D	52
5.1.5 Lokalitet E	58

5.1.6	Lokalitet H	61
5.1.7	Lokalitet M	64
5.2	Flatanger	68
6	Diskusjon	72
6.1	Deteksjon av kritiske terrengendringer	72
6.1.1	Kritiske terrengendringer	72
6.2	Skille støy fra relevante terrengendringer	73
6.2.1	Støy og mangler fra innsamling, overføring og lagring av LiDAR-data . .	73
6.2.2	Grenseverdier for å skille ut terrengendringer som ikke har innvirkning på grunnstabilitet	76
6.3	Kartlegging av faresoner for kvikkleireskred	80
6.4	Samfunnsøkonomisk perspektiv	83
6.5	Erfaringer fra analysene	85
6.5.1	Metodenes muligheter	85
6.5.2	Metodenes utfordringer og feilkilder	86
6.6	Anbefalinger til videre arbeid	87
7	Konklusjon	89
	Referanser	96
	Vedlegg	97
A	Vedlegg: Teori	97
B	Vedlegg: Diskusjon	100

Figurer

2.1	Marin grense i Norge	4
2.2	Korthusstruktur	5
2.3	Infiltrasjon av vann og dannelse av kvikkleirelommer	6
2.4	Skjærfasthet i sprøbruddmaterialer	7
2.5	Retrogressiv skredutvikling i kvikkleire	9
2.6	Flakskred	9
2.7	Tosbotnskredet	10
2.8	Resistivitetsverdier hos sedimenter	15
2.9	Geofysiske- og geotekniske undersøkelser fra Byneset	15
2.10	LiDAR-skanning fra lufta	18
3.1	Hillshade	24
4.1	Kart over Byneset	28
4.2	Berggrunnskart Byneset	29
4.3	Løsmassefordelingen på Byneset	30
4.4	Sikring utført på Byneset	31
4.5	Marin grense Småvika	32
4.6	Bergartsfordeling Flatanger	33
4.7	Løsmassekart Flatanger	34

5.1	Terrengendringer på Byneset fra 2010-2017	38
5.2	Lokalitet A: GIS	40
5.3	A: flyfoto	41
5.4	A: felt	42
5.5	Lokalitet B: GIS	43
5.6	B: flyfoto	44
5.7	B: cloud compare	45
5.8	B: felt	46
5.9	Lokalitet C: GIS	47
5.10	C: flyfoto	48
5.11	C: cloud compare	49
5.12	C: felt 1	50
5.13	C: felt 2	51
5.14	Lokalitet D: GIS	52
5.15	D: flyfoto	53
5.16	C: cloud compare	54
5.17	C: felt 1	55
5.18	Lokalitet D: Erosjon	56
5.19	Lokalitet D: Dreneringsrør	56
5.20	D: tverrsnittprofil	57
5.21	Lokalitet E: GIS	58
5.22	E: flyfoto	59
5.23	E: felt	60
5.24	Lokalitet H: GIS	61
5.25	H: flyfoto	62
5.26	H: felt	63
5.27	Lokalitet M: GIS	64
5.28	M: flyfoto	65
5.29	M: cloud compare	66
5.30	M: felt 1	67
5.31	M: felt 2	67
5.32	Høydeendringer Flatanger	68
5.33	Flatanger: flyfoto	69
5.34	Falskt negativt resultat fra lokalitet B	71
5.35	7.C falskt negative resultater	71
6.1	Manglende datagrunnlag Byneset	74
6.2	Punkttetthet	75
6.3	Fargeskala Byneset GIS	77
6.4	GIS-analyse fra Byneset (NIFS)	78
6.5	GIS-analyse fra Gjerdrum	79
6.6	Fargeskala Flatanger GIS	79
6.7	GIS-analyse utført i følge NVEs metode for oversiktskartlegging	81
A.1	Skredhendelser på Byneset	97
A.2	Raviner og skredgroper på Byneset	98
B.1	Punkttetthet fra LiDAR-målinger, lokalitet I-L	100
B.2	Punkttetthet fra LiDAR-målinger, lokalitet O og P	101

Tabeller

2.1	Utløsende årsaker til kvikkleireskred	11
3.1	Informasjon om LiDAR-dataene som har blitt brukt til å utføre analyser i programvarene <i>ArcGIS Pro</i> og <i>Cloud Compare</i> (Kartverket 2023b).	22
5.1	Volum beregnet i <i>Cloud Compare</i>	37
5.2	Oversikt over detekterte terrengendringer på Byneset	39
6.1	Utløsende årsaker kvikkleireskred i fargeinndeling	73

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Den omfattende kvikkleireproblematikken i Norge har ført til store ødeleggelser og tap av flere liv. Et av de mest kjente skredene i nyere tid er Gjerdrumskredet som gikk 30. desember 2020. Skredet resulterte i tap av 11 menneskeliv inkludert et ufødt barn, samt enorme ødeleggelser på bebyggelse, infrastruktur, natur og materielle skader for øvrig (Bruvoll mfl. 2021). Dette er langt ifra den eneste skredhendelsen her til lands, og det er anslått at minst 1150 mennesker har mistet livet på grunn av skred i marine avsetninger og særlig kvikkleire (L'Heureux og Solberg 2013). En sekundær konsekvens av slike skred er de høye kostnadene de påfører samfunnet. Et foreløpig kostnadsestimert i etterkant av Gjerdrumskredet ble satt til en pris på over 1,8 milliarder norske kroner (Bruvoll mfl. 2022). Trolig vil kostnadene overskride dette estimatet, og etterarbeidet med gjenoppbygging og sikring vil ta mange år.

Da kvikkleireskred medfører en rekke alvorlige konsekvenser, er det ønskelig å forhindre de i den grad det er mulig. I etterkant av et større kvikkleireskred i Rissa i 1978 ble det satt igang et program for å kartlegge marine avsetninger og potensiell kvikkleire, som et tiltak for å identifisere områder som kunne være utsatt for skred. Skredkartleggingen har siden den gang blitt videreutviklet, og det har blitt utarbeidet kart som tar hensyn til risiko, fare og skadekonsekvens i områder med kvikkleire (L'Heureux og Solberg 2013). Disse kartene er utarbeidet med utgangspunkt i de samme kriteriene, og erfaringene fra tidligere skred, men en slik generell inndeling vil nødvendigvis ikke fange opp alle kritiske områder (Gregersen 2008). Utvikling i landskapet fra naturlige og antropogene faktorer kan gjøre at grunnstabiliteten endrer seg over tid, og kan resultere i økt risiko for kvikkleireskred. Overvåking av terrengendringer i områder med marin leire kan i den forbindelse være nyttig for å avdekke endringer som potensielt kan utvikle seg til utglidninger og skred. Terrengendringsanalyse basert på LiDAR-data ("Light Detection And Ranging") i geografiske informasjonssystemer (GIS), kan være en mulig framgangsmåte for å avdekke utglidninger og terrengendringer i slike områder. Denne masteroppgaven vil undersøke hvordan dette kan gjøres, og hvilket utbytte det kan gi.

1.2 Formål med oppgaven: Problemstilling og forskningsspørsmål

Problemstillingen i denne masteroppgaven er som følgende:

Kan GIS-analyse av LiDAR-data fra ulike år brukes til deteksjon av kritiske terrengendringer i områder preget av marine avsetninger og kvikkleire?

Dette skal forsøkt å bli besvart ved hjelp av forskningsspørsmålene under:

- *Hvordan kan støy skilles fra reelle terrengendringer som kan være kritiske for stabiliteten i grunnen?*
- *Kan terrengendringsanalyse i GIS bidra til å kartlegge faresoner for kvikkleireskred?*

1.3 Oppgavens oppbygging

For å sette problemstillingen i kontekst og gi nødvendig bakgrunnskunnskap, vil teoretiske begreper og prinsipper relatert til kvikkleire, kartlegging og overvåkning først bli forklart. Videre vil metodene og verktøyene som har blitt tatt i bruk beskrives. Oppgaven vil deretter ta for seg de aktuelle studieområdene og gå nærmere inn på geografiske og geologiske forhold. Dette omfatter også isavsmeltingshistorien for disse områdene, da det har betydning for forekomsten av marin leire og potensiell kvikkleire. Resultatene vil så bli presentert og deretter diskutert opp mot problemstillingen og et samfunnsmessig perspektiv. Til slutt vil det komme anbefalinger til videre arbeid, før hovedpunktene i oppgaven sammenfattes i konklusjonen.

1.4 Oppgavens omfang og begrensninger

Ved oppstart omfattet oppgaven kun Byneset som studieområde, og hensikten var å undersøke terrengendringer som muligens kunne føre til utvikling av ustabile grunnforhold og trigge skredutløsning i marine avsetninger. Da det 10. mars 2023 ble utløst et kvikkleireskred ved Småvika i Flatanger kommune, ble også dette området vurdert til å være relevant for oppgaven. Perspektivet ble derimot et litt annet for dette området, da formålet var å undersøke terrengendringer som kan ha påvirket skredutløsning. Oppgaven har derfor tatt for seg både terrengendringer som kan føre til framtidig skredutløsning (Byneset), og terrengendringer som har oppstått i forkant av et skred (Småvika). Da kvikkleireskredet ved Småvika skjedde et par måneder etter at oppgaven ble påbegynt har dette begrenset hvor stort fokus denne delen av oppgaven har fått. Studieområdet Byneset har derfor vært hovedfokuset i oppgaven.

2 Teori

2.1 Kvikkleire

Deler av det som er skrevet i de neste to delkapittelene (2.1 og 2.2) er omformuleringer basert på prosjektoppgaven skrevet høsten 2022 (Myhra 2022).

2.1.1 Dannelse og utbredelse av kvikkleire

Norge er et land som har blitt formet av en rekke istider gjennom de siste 2.6 millioner årene, i den geologiske perioden som kalles Kvartær (Ramberg mfl. 2013). Weichsel er navnet på den siste istiden, som varte i omtrent 100 000 år og ble avsluttet for ca. 10 000 år siden. Denne perioden har satt stort preg på det norske landskapet, og har ført til utforming av landformer som fjorder og daler, samt dannelse og avsetning av en rekke sedimenter. For omtrent 18 000 år siden begynte isen å smelte, og Weichsel nærmet seg slutten (Ramberg mfl. 2013). Dette førte til at ulike materialer ble transportet og avsatt med smeltevannet, deriblant leirpartikler. Da disse partiklene har en korndiameter som er mindre enn 0,002 mm og relativt lav egenvekt, kan de holde seg flytende i lang tid (NGU U.å.). En del av leirpartiklene ble derfor fraktet helt til havet før de sank til bunnen og ble avsatt som marin leire.

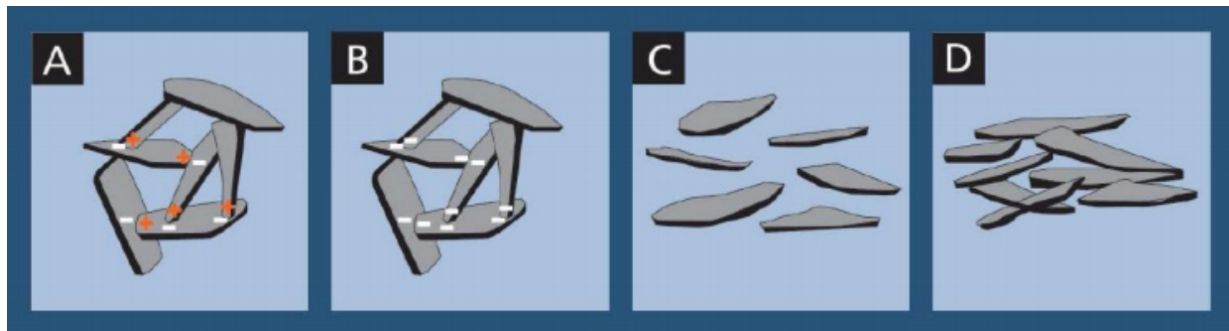
Saltet i havvannet førte til at det oppsto positive og negative elektriske ladninger på leirpartiklene. Motsatte elektriske ladninger tiltrekkes hverandre, og på grunn av dette ble leirpartiklene bundet eller “fnokket” sammen i en helt spesiell kornstruktur, ofte kalt korthusstruktur. Den forekommer under marin grense, som er det høyeste nivået havet har hatt etter siste istid. I Norge varierer marin grense fra 0-220



Figur 2.1: Områdene i Norge som befinner seg under marin grense og hvor det er mulig å finne marin leire er markert i lyseblå (Høgaas 2021).

meter over dagens havnivå (NVE 2019). På figur 2.1 er alle områder under marin grense markert i lyseblå.

Da Weichsel gikk mot slutten ble Norge og Skandinavia deglasiert, og landhevingen begynte. Dette førte til at noen områder som tidligere lå under havnivå gradvis kom på land. Dette inkluderte områder med marin leire, som i dag kan finnes både over og under dagens havnivå. Kornstrukturen i marin leire holder seg stabil og åpen så lenge den inneholder porevann med en viss mengde salt. Dersom saltet vaskes ut ved for eksempel nedbør eller grunnvannsstrømning, vil de elektriske ladningene svekkes og kornstrukturen blir mindre stabil. Dersom utvasket leire deretter blir utsatt for overbelastning kan kornstrukturen kollapse, og en leire som tidligere var fast kan raskt gå over til nærmest flytende tilstand (NVE 2022). Hvordan dette foregår er illustrert i figur 2.2 under.

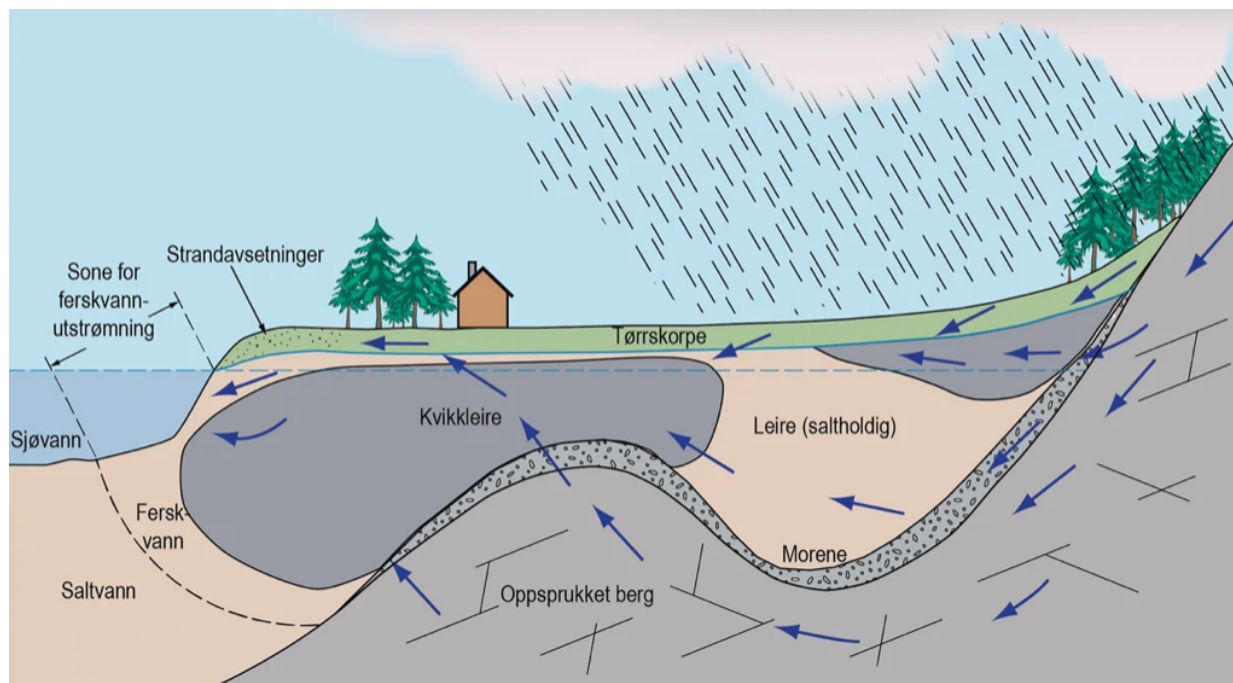


Figur 2.2: Ulike stadier av kornstrukturen til en marin leire som går fra å være stabil (A), før den deretter blir utvasket og får svakere bindinger mellom partiklene (B). Så utsettes kornstrukturen for belastning som fører til kollaps (C), og leirpartikler som blir liggende flatt oppå hverandre (D)(NVE 2022).

Bilde A til venstre i figur 2.2 viser positive og negative elektriske ladninger som tiltrekkes hverandre og som holder leirkornene sammen i en stabil kornstruktur. Dette forutsetter at porene inneholder vann med tilstrekkelig mengde salt. Dette er ikke tilfellet i bilde B der saltmengden har blitt redusert, noe som resulterer i svakere bindinger mellom leirpartiklene og en mindre stabil struktur. I bilde C har leira blitt utsatt for belastning eller omrøring som har ført til kollaps. Dette fører til at porevannet frigjøres og leirpartiklene flyter i et overskudd av vann. Bilde D viser hvordan leira blir liggende etter kollapsen og store deler av porevannet har forlatt leiren. Da ligger leirpartiklene tettere sammen og flatt oppå hverandre, noe som igjen gjør leira mer stabil og uten fare for at en ny kollaps av kornstrukturen skal oppstå (NVE 2022). Figur 2.2 er ikke representativ for all leire, men er typiske kjennetegn på kvikkleire. Kvikkleire kan derfor betegnes

som marin leire som har en ustabil kornstruktur, og som derfor kan kollapse og bli flytende ved overbelastning.

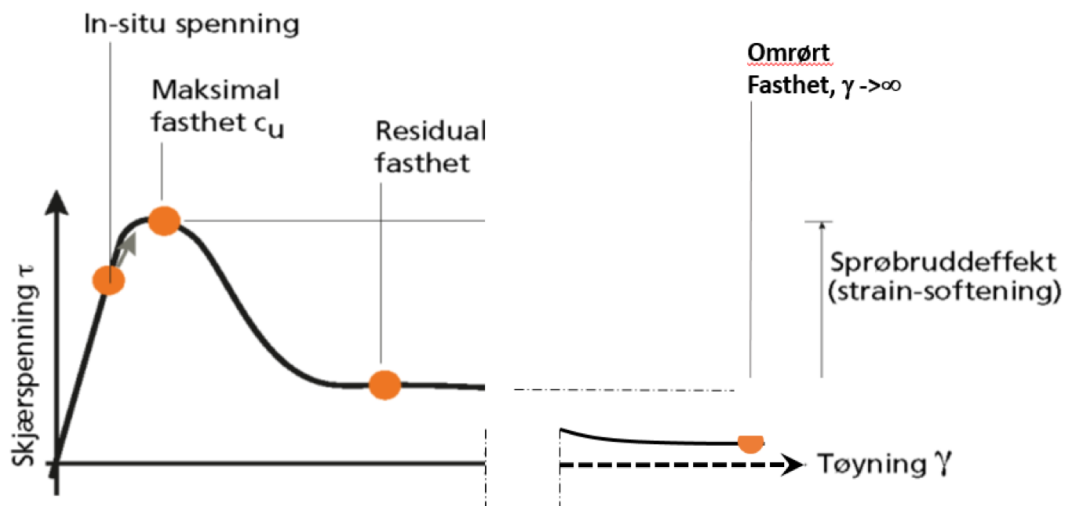
I de fleste tilfeller er det slik at det utvikler seg lag eller lommer av kvikkleire i den marin leira. Hvor disse oppstår kommer an på strømningsveiene til ferskvannet som infiltrerer leira, og da vasker ut saltet i porevannet. Grunnforholdene er avgjørende for dette, da ferskvann ofte trenger inn via sprekker i berg, permeable lag eller via overflaten (NGU 2021b). Dette vises også i figur 2.3. Her har det blitt dannet to lommer med kvikkleire i den marine (saltholdige) leira, etter inntrengning av ferskvann fra overflaten og sprekker i berg. Ut i fra pilene som viser ferskvannets strømning er både tørrskorpelaget over leira og morenelaget under leira, permeable lag som gjør det mulig for ferskvannet å strømme igjennom.



Figur 2.3: Infiltrasjon av vann og dannelse av kvikkleirelommer (NGU 2021a).

2.1.2 Geotekniske parametre og egenskaper

Kvikkleiras “kvikke” egenskaper gjør at den kan gå fra fast til tilnærmet flytende tilstand på kort tid, noe som er et typisk kjennetegn på sprøbruddmaterialer. Dette er materialer (jordarter) som opptrer i relativt fast tilstand inntil de overbelastes, da vil de miste store deler av sin styrke og bli mer flytende. Dette skyldes hurtig tap av skjærfasthet, som kan sies å være materialets fasthet i udrenert tilstand (NVE 2019). Hvordan denne utviklingen foregår vises grafisk i figur 2.4.



Figur 2.4: Skjærfasthet i sprøbruddmaterialer (NVE 2019).

Grafen på figur 2.4 viser hvordan skjærspenningen (τ) på y-aksen utvikler seg i forhold til tøyningen (γ) på x-aksen når et sprøbruddmateriale blir utsatt for belastning over sin tålegrense. Hvis materialet påføres en viss mengde spenning, oppnår det til slutt sin maksimale fasthet (c_u), og dersom belastningen overgår dette vil tøyningen øke, og skjærfastheten vil da reduseres betraktelig på kort tid. Til slutt vil kun residual fasthet være igjen, og dersom tøyningen fortsetter å øke vil denne gå mot omrørt fasthet ($c_{u,r}$). På dette stadiet har sprøbruddmaterialet nådd en relativt flytende tilstand, der tøyningen går mot uendelig. For å kunne definere et materiale som sprøbruddmateriale må det ha omrørt skjærfasthet ($c_{u,r}$) ≤ 2 kPa. Kvikkleire befinner seg innenfor dette sjiktet, og blir i Norge definert som leire med omrørt skjærfasthet ($c_{u,r}$) ≤ 0.5 kPa (NVE 2019). I andre deler av verden er det andre verdier for skjærfasthet som gjelder, noe som skyldes lokale forskjeller i grunnforholdene. I Sverige for eksempel, operer de med en skjærfasthet som er 0.1 kPa lavere enn i Norge (Lundström mfl. 2009).

En annen geoteknisk parameter som også brukes for å definere sprøbruddmaterialer ut ifra en konkret verdi, er sensitivitet (St). Denne bestemmes ut ifra forholdet mellom uomrørt skjærfasthet (c_u) og omrørt skjærfasthet ($c_{u,r}$) (NGF 1975):

$$St = \frac{c_u}{c_{u,r}} \quad (2.1)$$

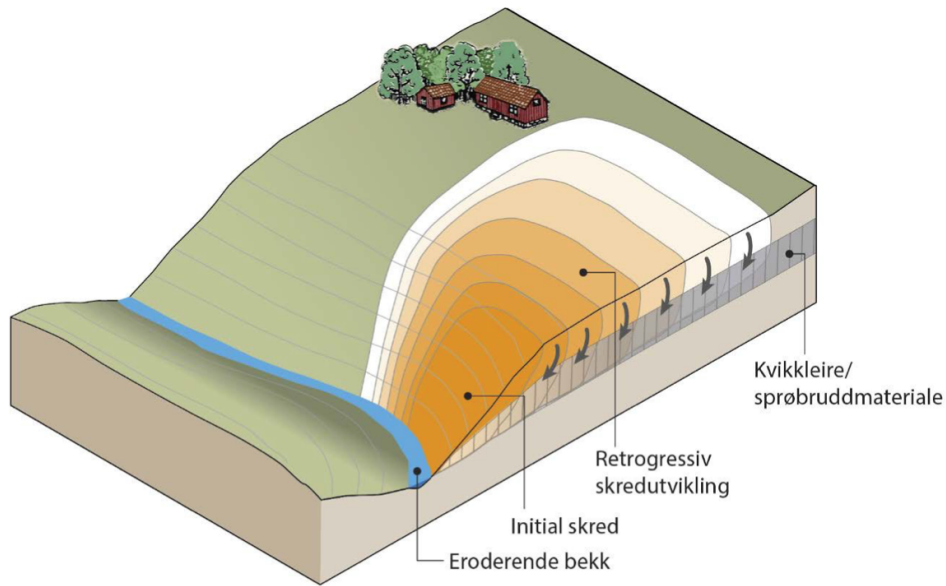
For kvikkleire og sprøbruddmaterialer for øvrig er $St > 15$. Både kriteriene for omrørt skjærfasthet (Cu,r) og sensitivitet (St) må være oppfylt for at et materiale skal kunne klassifiseres som sprøbruddmateriale (Sandven mfl. 2015). For å finne disse verdiene må det utføres laboratorietester på uforstyrrede prøver av det aktuelle materialet. Det er kun tester utført på lab som kan gi sikker identifikasjon av kvikkleire, metoder i felt kan kun gi en indikasjon.

2.2 Skredmekanismer i kvikkleire

Utløsning av kvikkleireskred skjer som regel raskt og uten forvarsel. Når et slikt skred først har oppstått vil det utvikle seg inntil det ikke er mer kvikkleire tilstede, eller til skredkanten er stabil nok til å ikke rase videre ut (NGU 2021b). Ingen skred er helt like og ulike skredmekanismer har innvirkning på hvordan utviklingen foregår. Utforming av terrenget, helningsvinkel, utvikling av stabil tørrskorpeleire, kvikkleiras omfang og sensitivitet, er noen av de sentrale faktorene som har betydning for skredutviklingen. Basert på tidligere skredhendelser i kvikkleire er det noen kjennetegn som går igjen, og som gjør det mulig å definere ulike typer skred. Det skilles gjerne mellom tre hovedtyper; rotasjonsskred, retrogressive skred og flakskred, i tillegg kan det forekomme skred som er hybrider av disse (NGI 2014; NVE 2019). Felles for alle skredtypene er at det oppstår en forflytning av masser fra et område til et annet. Dette gjør at noen områder får økt volum, mens andre områder får redusert jordvolum. Med utgangspunkt i dette kan skredområdet deles inn i løsneområdet der jordvolumet avtar, og utløpsområdet der masser blir avsatt og volumet øker (Grimstad mfl. 2022).

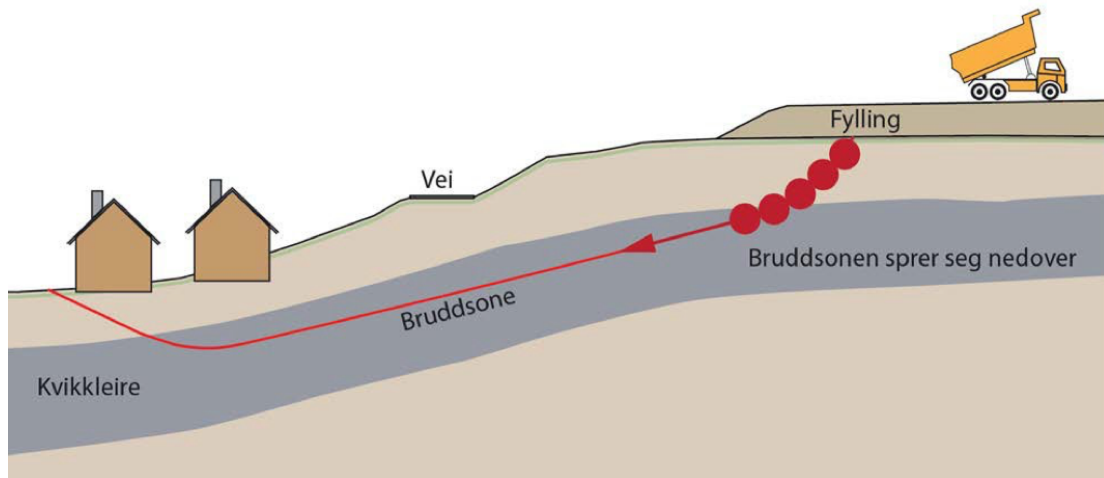
Skredtyper i kvikkleire

Et av de største kvikkleireskredene som har rammet Norge skjedde i Rissa i 1978, dette førte til tap av ett menneskeliv og store ødeleggelser. Skredet begynte med et retrogressivt (bakovergripende) initialscred utløst av menneskelig aktivitet i form av graving og utbygging, som etter hvert utviklet seg til et flakskred (Gregersen 1981). Retrogressive skred utvikler seg gjerne fra en ustabil skredkant der massene fortsetter å gli ut i en rotasjonsbevegelse inntil skredet stopper opp i møte med jordarter eller fjell, som har lavere sensitivitet og høyere stabilitet enn kvikkleire. Bakgrunnen for at slike skred oppstår kan skyldes en rekke faktorer, der erosjon, økt poretrykk og menneskelig aktivitet er de vanligste (L'heureux 2012). Disse faktorene gjelder forøvrig utløsning av alle typer kvikkleireskred. Figur 2.5 viser utviklingen av et retrogressivt skred utløst av en eroderende bekk, der den bakovergripende skredutviklingen kommer tydelig fram.



Figur 2.5: Retrogressiv skredutvikling i kvikkleire (NVE 2019).

Flakskred er en annen skredtype, som i mange tilfeller også kalles progressive skred grunnet skredutviklingen (Grimstad mfl. 2022). Når slike skred utløses er det gjerne et større område eller flak som sklir ut på en gang. Disse kan forekomme relativt plutselig, og oppstår ofte i terreng som ikke er særlig bratt. Avhengig av hvilken retningen bruddsonen utvikler i, er det mulig å skille mellom framoverrettede- og bakoverrettede flakskred. De framoverrettede skredene utløses ofte av overbelastning på toppen av skråningen, mens de bakoverrettede gjerne skyldes et initialscred (L'Heureux og Solberg 2013; NVE 2019). Figur 2.6 viser hvordan skredutviklingen foregår for et framoverrettet flakskred som utløses av pålastning på toppen av en skråning.



Figur 2.6: Illustrasjon av utviklingen til et framoverrettet flakskred (NVE 2019).

Rotasjonsskred er den tredje skredtypen som kan forekomme i kvikkleire, samt i alle andre leirjordarter. Skredmassene sklir da ut i en rotasjonsbevegelse, og gjerne i en mer eller mindre sammenhengende skredmasse. I skråningen der massene sklir ut, vil bunnen ofte heves mens toppen senkes. Dette skyldes at skredmassene som sklir ut fra toppen av skråningen da har forflyttet seg til bunnen (NVE 2019). Dersom skredkanten er ustabil kan den begynne å skli ut og utvikle seg til et retrogressivt skred. Ofte kan rotasjonsskred være initialskredet som utløser større retrogressive skred (Grimstad mfl. 2022). Bildet i figur 2.7 er tatt like etter at det gikk et rotasjonsskred i Tosbotn i 2016, der den røde pila er lagt inn i for å vise rotasjonsbevegelsen. I dette tilfellet var økt poretrykk den utløsende årsaken til skredet (Nordal mfl. 2019).



Figur 2.7: Skredet som gikk i Tosbotn i 2016 var et rotasjonsskred (Lorentsen 2016, foto: Ole-Christian Olsen).

2.3 Utløsende årsaker til kvikkleireskred

Det er en rekke faktorer som kan føre til at kvikkleireskred utvikler seg, og det skiller gjerne mellom de som oppstår som følge av naturlige prosesser, de som kommer av antropogene forhold, og de som skyldes en kombinasjon av disse. I de tilfellene der det er en kombinasjon som utløser skred, kan det for eksempel dreie seg om naturlige prosesser som nedbør eller snøsmelting, som har ført til mindre stabile grunnforhold i forkant av menneskelig aktivitet. I tabell 2.1 vises

noen av de vanligste årsakene til kvikkleireskred i Norge, delt inn etter “Naturlige prosesser” og “Menneskelig påvirkning”(Sokalska mfl. 2015).

Tabell 2.1: De vanligste årsakene til kvikkleireskred inndelt etter naturlige prosesser og menneskelig påvirkning (Sokalska mfl. 2015; Torrance 2012).

UTLØSENDE ÅRSAKER KVIKKLEIRESKRED	
Naturlige prosesser	Menneskelig påvirkning
Erosjon	Utbygging og gravingsarbeid
Andre skredhendelser	Boring
Jordskjelv	Fyllingsarbeid, planering av jord
Hydrometeorologiske forhold (nedbør, snøsmelting, økt poretrykk, flom osv.)	Sprengning Dreneringsinngrep

Mange av de utløsende årsakene er det mulig å gjøre noe med, slik at risikoen for kvikkleireskred minsker eller unngås. For å kunne gjøre det er det nødvendig å ha nok informasjon og god oversikt over grunnforholdene, dette gjelder spesielt for årsakene som gjelder menneskelig påvirkning da slike forhold må undersøkes før det gjøres inngrep i terrenget.

2.4 Sikringstiltak

I områder der det er gjort funn av kvikkleire bør eventuelle sikringstiltak vurderes. Noen områder er mer kritiske enn andre, og sikringen som utføres må tilpasses hver enkelt situasjon slik at risikoen for skredutløsning minsker. I skråninger kan både tilførsel og fjerning av masser bidra til å øke stabiliteten. På toppen av skråninger vil fjerning av masser bidra til lavere vekt og mindre trykk på underliggende masser, mens tilførsel av masser i bunnen av skråninger vil gjøre skråningen mindre bratt og fungere som støtte (NVE 2023a). Begge disse er tiltak som bidrar til å redusere skjærspenningen og øke stabiliteten i grunnen. Tilførsel av masser i bunnen av en skråning vil også kunne ha effekt som erosjonssikring da vannet vil erodere fyllmassene framfor leira. Ved innføring av slike topografiske tiltak er det viktig å at det blir tatt hensyn til vannstrømning og dreneringsforhold, da endringer i terrengoverflaten kan føre til at nye områder blir utsatt for erosjon som kan utløse skred (NVE 2019).

Erosjon i elve- og bekkeløp er en av de vanligste årsakene til utløsning av kvikkleireskred, og erosjonssikring er derfor svært viktig. Sprengstein er det materialet som er vanligst å bruke til

dette, og avhengig av elva eller bekkens størrelse vil plasseringen av sikringen variere. For større elver eller bekker kan det ofte være nok å plassere sikringen på den siden der erosjonen pågår, mens for de litt mindre er det vanlig å demme opp hele bunnen slik at elve- eller bekkeprofilen ikke graves dypere. I noen områder kan det være gunstig å endre vannløpet for å minske erosjonen, men i de fleste tilfeller er det likevel ønskelig å la vannet strømme i sitt naturlige løp. Dette kommer av at hastigheten på vannstrømmen ofte øker dersom løpet kanaliseres eller gjøres rettere, og dette kan føre til økt erosjon. I tillegg vil endring av løpet i mindre bekker ha stor innvirkning på biologiske faktorer som dyre- og planteliv. Det er derfor viktig at endringene og sikringene som utføres tar hensyn til disse forholdene i den grad det er mulig, uten at det går på bekostning av sikkerhet (NVE 2019).

Bruk av grunnforsterkningsmetoder er et annet alternativ som kan brukes for å sikre områder med leire. Implementering av kalk/sementpeler, etablering av saltbrønner, elektrosmose og vakuumbesettelse er eksempler på slike tiltak, men disse kommer ofte til en høy pris og kan påvirke stabiliteten i grunnen når de installeres. Det kan derfor være nødvendig å utføre sikringstiltak i forkant av disse, noe som øker kostnadene enda mer (NGI 2014). Kalksementstabilisering er trolig den metoden av disse som brukes mest, og er vanlig å bruke ved samferdselsprosjekter i leiområder. Etablering av saltbrønner er en relativt ny metode, som det fortsatt forskes på. Prinsippet bak saltstabilisering er at konsentrasjonsforskjellen mellom saltbrønnene og leirgrunnen de er installert i, er så stor at saltet vil forsøke å jevne ut denne forskjellen ved å migrere fra brønnene over til leira. Når leira får tilført salt vil skjærfastheten øke, og etter hvert vil ikke leira være kvikk lengre. Dette tar i midlertid lang tid, og en rekke forhold må ligge til rette for at metoden skal fungere optimalt. Når forholdene er optimale kan i midlertid metoden hindre at initialskred utvikler seg videre til større skred (Helle 2017; NVE 2019). Elektrosmose og vakuumbesettelse er metoder som ikke brukes i like stor grad, men som kan ha positiv effekt på stabiliteten i kvikkeleireområder. Elektrosmose brukes hovedsaklig som en måte å akselerere saltstabiliseringsprosessen, men kan ha uheldig påvirkning i form av at saltet etter hvert kan vaskes ut av leira som fikk det tilført i første omgang, og dermed kan leira igjen bli kvikk (Rambøll 2018).

2.5 Kartlegging av kvikkleire

Som følge av kvikkleireskredet i Rissa i 1978 ble det startet en nasjonal kartlegging av områder utsatt for større kvikkleireskred i Norge. Dette ble gjort som et tiltak for å redusere skredrisiko, sikre tryggere grunnforhold og gjøre planleggingen av ny bebyggelse sikrere. En del områder har fortsatt ikke blitt kartlagt, noe det er essensielt å ta hensyn til, spesielt i områder under marin grense (opptil 220 moh. i Norge) (NVE 2021a). Oversiktskartleggingen som har som formål å identifisere faresoner for kvikkleireskred, er en prosess som kan deles inn i tre steg; kartstudier, befaring og grunnundersøkelser. Kartstudier er det første steget som utføres, og både topografiske- og kvartærgeologiske forhold tas i betraktning. Topografiske kart kan brukes til å avgrense soner som kan være utsatte for skred dersom det viser seg å være kvikkleire der. Disse sonene er funnet på bakgrunn av topografiske forhold som oppfyller kriterier som baserer seg på erfaringer fra tidligere skred og beregninger. Mer informasjon om hva disse kriteriene går ut på finnes i kapittel 3 i NVE-rapport nr. 9/2020 (Moholdt 2020). I denne rapporten nevnes det også at bruk av GIS-programvare kan være et nyttig supplement som kan brukes til avgrensning av slike områder. I tillegg til de topografiske kartene, brukes også kvartærgeologiske kart som viser løsmassefordeling, og temakart utarbeidet av NGU. For å kartlegge kvikkleire er spesielt temakart som viser hvor marin grense går og hvor det er mulig å finne marin leire av interesse. Generelt er det viktig at kartene som brukes i forbindelse med områdekartlegging har målestokk 1 :50 000 eller mindre, slik at resultatene blir så nøyaktige som mulig (Moholdt 2020).

Kartstudiene danner grunnlaget for befaringene som gjøres i etterkant. Befaring kan svekke eller styrke mistanker fra kartstudiene, i tillegg til å oppdage nye forhold som tidligere ikke har vært synlig. Terrengendringer fra for eksempel erosjon eller menneskelige inngrep kan være vanskelig å oppdage på kart, og befaring er da helt nødvendig. Faresonene som på forhånd som har blitt identifisert på kart må befares for å avgjøre faregrad, konsekvens og risikoklasse. Da det kan være store forskjeller mellom kart og virkelighet, kan faresonenes utstrekning og alvorlighetsgrad endres mye etter befaring. I noen tilfeller er det nødvendig å befare et område flere ganger for å få tilstrekkelig med informasjon, dette gjelder for eksempel dersom det skal utføres videre grunnundersøkelser og plasseringen av disse skal bestemmes (Moholdt 2020).

Grunnundersøkelser blir utført i områder der det er mistanke om kvikkleire og sprøbruddmaterialer. Å utføre grunnundersøkelser kan være både tidkrevende og kostbart, og det er derfor ikke

mulig å dekke hele området som skal kartlegges. Hvor undersøkelsene skal utføres må derfor evalueres under befaringen, og det er da viktig at de undersøkelsene som faktisk blir utført gir god dekning for et større område (Moholdt 2020). Det er i midlertid kun ved laboratorietesting at kvikkleire kan påvises helt sikkert, selv om grunnundersøkelsene kan gi en god indikasjon (Sauvin mfl. 2013). Resultater fra utførte grunnundersøkelser meldes inn til Nasjonal database for grunnundersøkelser (NADAG), som er en karttjeneste der det er mulig å finne informasjon om tidligere geotekniske grunnundersøkelser som har blitt utført. Geotekniske sonderboringer brukes mye som grunnundersøkelsesmetode, og kombineres ofte med geofysiske metoder for å få så god oversikt over grunnforholdene som mulig. Disse metodene er altså svært relevante for kvikkleirekartlegging, og vil derfor beskrives ytterligere.

2.5.1 Geofysiske metoder

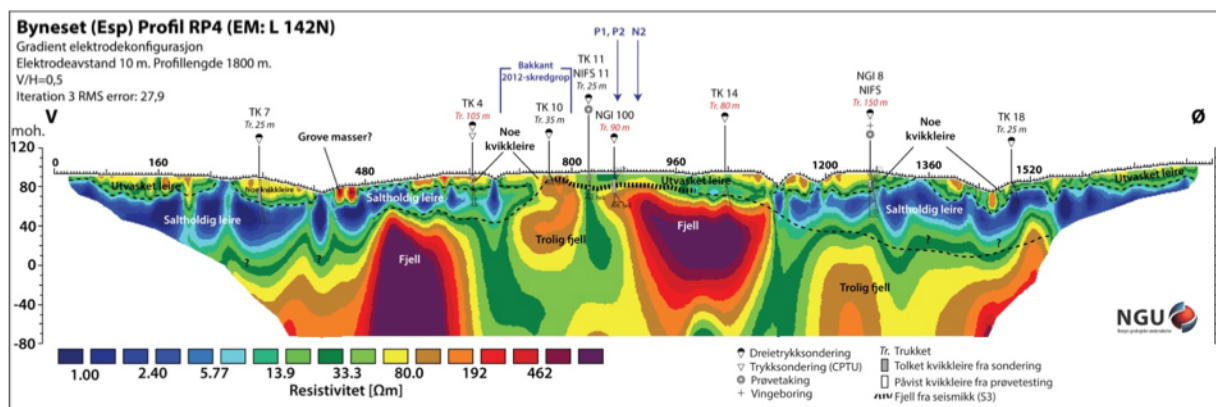
Det finnes flere geofysiske metoder som kan tas i bruk for kartlegging av kvikkleire. Disse metodene tar utgangspunkt i ulike egenskaper hos materialene i bakken, og gir en indikasjon på grunnens lagdeling og hvilke materialer som befinner seg der. Refraksjonsseismik, Ground Penetrating Radar (GPR), og Indusert Polarisering (IP) noen eksempler på geofysiske metoder som kan brukes i denne sammenheng (Sauvin mfl. 2013). En annen metode som også er av de mest brukte, er 2D-resistivetsmålinger. Dette er målinger som tar utgangspunkt i jordarter og bergarters elektriske ledningsevne (resistivitet), der faktorer som mineral-, vann-, og saltinnhold spiller en viktig rolle. På bakgrunn av dette egner metoden seg godt for å undersøke marine avsetningers innhold av porevann og hvor salt det er. For utvasket marin leire og potensiell kvikkleire vil porevannet bli mindre salt ettersom det utsettes for utvasking, noe som igjen fører til høyere resistivitet enn for marin leire som ikke er utvasket. Elektrisk Resistivets-tomografi (ERT) er en variant av 2D resistivetsmålinger som er mye brukt, og som har gitt bakgrunn for en inndeling av materialer (figur 2.8) ut ifra deres resistivetsverdier. Slik figur 2.8 viser har potensiell kvikkleire og utvaskede marine leiravsetning resistivetsveerdier mellom 10-100 ohm-meter. Denne inndelingen er basert på norske målinger, men det kan også være lokale forskjeller som avviker fra denne (Bazin og Pfaffhuber 2013; Lundström mfl. 2009).



Figur 2.8: Resistivitetsverdier hos ulike sedimenter (NGU 2021a).

2.5.2 Geotekniske undersøkelser

Sonderboring er en geotekniske metode som er en form for grunnboring der motstanden registreres underveis, og kan gi en indikasjon på hvilket materiale som befinner seg i grunnen. Dersom boremotstanden holdes relativt konstant eller synker, kan dette være en indikasjon på at det er kvikkleire til stedet. Dett skiller seg fra leire med høyere fasthet, der motstanden gjerne vil øke mot dypet. Det finnes flere ulike typer sonderboringer, der dreietrykkssondering og totalsondering er de vanligste, i tillegg finnes også trykksondering og trykksondering med poretrykksregistrering (CPTU) (NGU 2019). Sonderboringer gir kun en indikasjon på hvilke materialer som befinner seg på det eksakte punktet der boringer foregår, og det kreves mange boringer for å undersøke et større område. Geofysiske metoder kan derfor brukes som et supplement til sonderboringer for å få informasjon om forholdene mellom borehullene (Sauvin mfl. 2013). Dette er figur 2.9 et eksempel på.



Figur 2.9: Geofysiske- og geotekniske undersøkelser Esp på Byneset, som er området der det i 2012 ble utløst et kvikkleireskred (Solberg mfl. 2015).

Figur 2.9 viser et område på Esp på Byneset der det har blitt gjennomført ulike typer grunnundersøkelser. Resultatene fra 2D-resistivitetmålingene er framstilt ved hjelp av fargeinndeling som avgrensner de ulike materialene i grunnen. Sonderboringene kan ikke si noe om lagdelingen utenfor borehullet, men kan bekrefte eller avkrefte resultatene fra resistivitetmålingene. Bruk av begge metodene gir en god indikasjon av grunnens lagdeling, og kan være nyttig tilleggsinformasjon til oversiktskartleggingen.

2.6 Fjernanalyse for overvåkning av terrengendringer på jordoverflaten

Oversiktskartleggingen som inkluderer kartstudier, befarings og grunnundersøkelser har blitt utført mange steder i Norge, men det er fortsatt flere områder som gjenstår. De mest kritiske områdene har blitt prioritert først i kartleggingen, og dette gjelder i hovedsak områder i Trøndelag og på Østlandet, der skredhistorikk har vist at det forekommer kvikkleire (NVE 2021b). Etter hvert som nye områder kartlegges oppdateres aktsomhetskart og kvikkleirefaresoner som kan finnes på NVE sine nettsider (NVE 2023b). Nye metoder har også blitt utviklet siden kartleggingsarbeidet først startet, og i dag gjør teknologien det mulig å samle inn data på mange ulike måter. Fjernanalyse er et eksempel på dette.

Deler av det som er skrevet i dette delkapittelet er omformuleringer basert på prosjektoppgaven skrevet høsten 2022 (Myhra 2022).

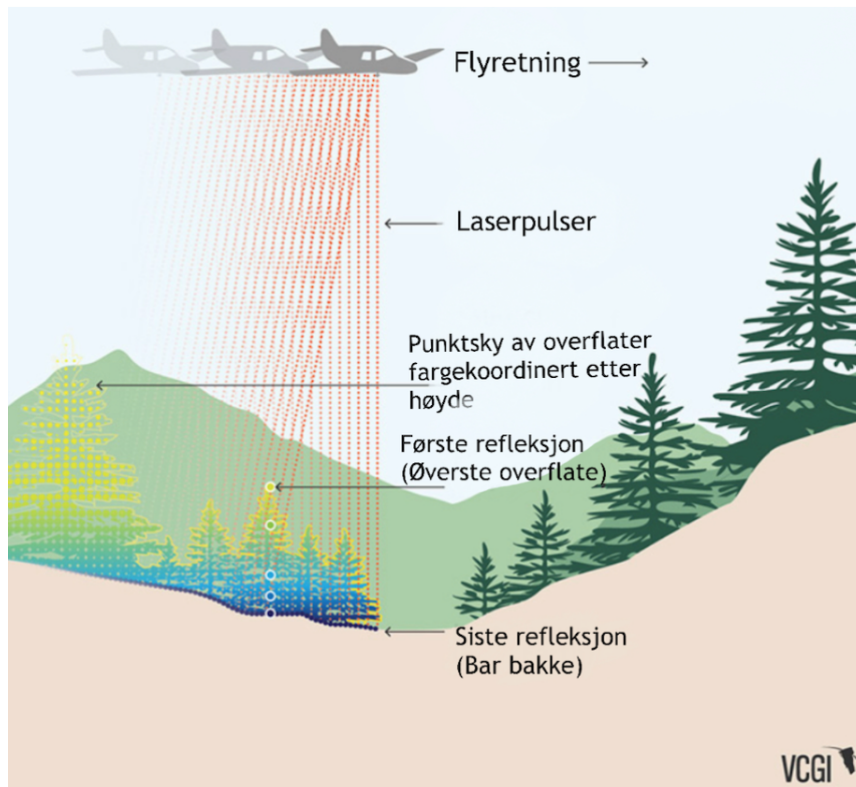
Fjernanalyse kan defineres som datainnsamling av objekter eller områder uten å være i direkte kontakt med de (Chipman mfl. 2004). Dette kan være til stor nytte i tilfeller der framkommelighet og sikkerhet er en utfordring, slik det ofte er i områder med skredfare eller ustabile grunnforhold. Datainnsamling kan gjøres med utstyr fra bakkenivå eller fra for eksempel båt, droner, fly eller satellitter. Hva som benyttes er avhengig av formålet med analysen og hva som skal observeres. Teknologiske framskritt har ført til at analysemetodene har gjennomgått en stor utvikling siden begrepet fjernanalyse først ble tatt i bruk på midten av 60-tallet (Lied og Birkeland 2022). Allerede før dette fantes det metoder som kan klassifiseres som fjernanalyse, der fotografi og flyfoto regnes blant de aller første (Campbell og Wynne 2011; Gupta 2017). Dette er aktuelle metoder også den dag i dag, i tillegg til at nye metoder som utnytter diverse former for akustisk og elektromagnetisk energi er vanlig å bruke.

2.6.1 Aktiv fjernanalyse

Det kan skilles mellom passive og aktive fjernanalysemetoder. Aktive metoder har en egen energikilde som sender ut stråling/energi mot analyseområdet for deretter å fange opp den reflekterte strålingen/energien ved hjelp av sensorer (Schultz 1988). Radar og laser er to typer elektromagnetisk stråling som er vanlig å benytte i forbindelse med aktiv fjernanalyse, og kan brukes til blant annet å måle avstander og kartlegge terreng. En slik metode er “Light Detection and Ranging”, LiDAR, som har vært viktig for datagrunnlaget og analysen i denne oppgaven, metoden vil derfor beskrives nærmere.

LiDAR

LiDAR er en aktiv fjernanalysemetode der strålingskilden er en laser som sender ut pulser av lysstråling mot området eller objektet som undersøkes. Optiske sensorer fanger deretter opp de reflekterte lyssignalene, og ut i fra tidsforskjell og endring i frekvens på lyset som sendes ut og lyset som reflekteres, er det mulig å beregne avstanden og bevegelsen til analyseområdet (Andersen mfl. 2006). Det er også koblet en GPS til de optiske sensorene slik at de reflekterte signalene kan stedsfestes med koordinater i tre dimensjoner. Lyspulsene som sendes ut kan reflekteres i flere omganger dersom målet ikke reflekterer lyset fullstendig, men lar det passere til det har nådd lavere nivåer. Dette gjelder blant annet vegetasjon der det kan forekomme åpenrom, noe som gjør det mulig å fange opp refleksjon også fra bakken under. LiDAR-målinger kan gjøres fra bakken, men i forbindelse med måling av større landområder er det vanlig å utføre målingene fra luften og da gjerne fra fly (Liu 2008). Refleksjonene som fanges opp av sensorene registreres og lagres som tredimensjonale punkter som til sammen danner punktskyer, og som gir informasjon om det aktuelle objektet eller området. Dette vises i figur 2.10.



Figur 2.10: LiDAR-skanning fra fly som viser laserpulserne som sendes ut og reflekteres fra ulike overflater. Modifisert bilde hentet fra: VermontGovernment U.å.

I Norge har regjeringen satt av store summer for å kartlegge landet og utarbeide en nasjonal detaljert høydemodell (NDH), der LiDAR-skanning fra fly har blitt brukt til en del av dette (Ringlund og Lusæter 2020). Dette inngikk i et prosjekt som varte fra 2016 til 2022, der 230 000 km^2 av Norges landområder ble skannet. Punktskyene som ble dannet på grunnlag av LiDAR-skanningene har blitt brukt til å konstruere tredimensjonale modeller av terrenget kalt DTM (digital terrain model), som har en romlig oppløsning fra 1 til 50 meter (Kartverket 2022). Terrenghmodellene kan anvendes til en rekke formål, og har høy nytteverdi i forbindelse med vurdering av skredfare og identifisering av landformer (NGU 2015). Resultatet av LiDAR-skanningene som ble utført fra 2016 - 2022 finnes på hoydedata.no. Her finnes det også data fra tidligere LiDAR-målinger utført i Norge, der de eldste er fra 2007. Det er data herfra som er blitt brukt som grunnlag for å utføre analyser i programvarene *ArcGIS Pro* og *Cloud Compare* i denne masteroppgaven.

2.6.2 Passiv fjernanalyse

Passive metoder har i motsetning til aktive metoder ikke en egen strålingskilde, men har likevel sensorer som fanger opp stråling som enten sendes ut eller reflekteres fra objektet eller området som skal analyseres (Chipman mfl. 2004). Dette medfører at passive metoder er avhengig av eksterne strålingskilder for å innhente data. Sollys og termisk varme er to eksempler på stråling som forekommer naturlig, og som kan utnyttes ved passiv fjernanalyse. Dette gjelder blant annet når det tas bilder med et vanlig kamera, og elektromagnetisk stråling i form av lys fra sola treffer områder eller objekter som reflekterer lyset som deretter fanges opp av sensorene i kameraet (Hausberg 2008). Akkurat denne metoden er begrenset til de timene av døgnet når det er dagslys. Generelt er de passive metodene mer begrenset enn de aktive, nettopp på grunn av tilgjengeligheten av strålingskilder. Flyfoto er en passiv fjernanalysemetode som går langt tilbake i tid, og som fortsatt er aktuell. Flyfoto fra studieområdene Byneset og Flatanger ble brukt i denne oppgaven, og metoden vil derfor beskrives ytterligere i påfølgende avsnitt.

Flyfoto og ortofoto

Flyfoto er en form for optisk fjernanalyse som går langt tilbake i tid og som har blitt brukt til diverse formål opp igjennom. På starten av 1900-tallet ble flyfoto mye brukt til militære formål i forbindelse med 1. verdenskrig, og resultatene de ga førte til forbedringer og videreutvikling av nye overvåkningsmetoder (Wong mfl. 2021). Ortofoto er en variant av flyfoto der bildene har ortogonal projeksjon, tilsvarende vertikale flyfoto. Ortofoto konstrueres vanligvis ved bruk av fotogrammetri, der flyfoto brukes som utgangspunkt. Dette innebærer triangulering mellom overlappende flyfoto fra samme område, for å danne en høydemodell som så kalibreres til et ortofoto. Dette gir fotoene geometriske egenskaper i likhet med kart, og kan derfor gi betydelig informasjon om forholdene på jordoverflaten (Chipman mfl. 2004).

Kartverket har digitalisert og publisert en rekke flybilder og ortofoto som er tatt i Norge, helt siden 1935 og til i dag. Disse er publisert på norgebilder.no, og her er det mulig å se på bilder for ønsket år og område (Kartverket 2021). Dette har blitt brukt for å se på terrengendringer i denne oppgaven, da fly- og ortofoto fra ulike år har blitt sammenlignet.

2.6.3 Oppløsning og filformat

Dataene som samles inn ved fjernanalyse har ulike egenskaper ved seg som har betydning for hvordan informasjonen fra dataene formidles og tolkes. Oppløsning og filformat er relevant i denne forbindelse da disse har betydning for dataenes videre bruk for eksempel ved analyse i ulike programvarer.

Oppløsning

Kvaliteten på fjernanalyse-dataene har stor betydning for informasjonen som skal formidles, og er i stor grad avhengig av romlig og temporær oppløsning. Romlig oppløsning baserer seg på hvor høyt detaljnivået er, altså hvor stor avstand det kan være mellom ulike objekter for at det er mulig å oppfatte de hver for seg. På engelsk omtales ofte romlig oppløsning som “ground sampling distance” (GSD), hvilket indikerer at romlig oppløsning er avstanden mellom hvert datapunkt (pixel) på bakken (Chipman mfl. 2004).

Temporær oppløsning er knyttet til tidsaspektet ved datainnsamling, og hvor ofte det samles inn data fra samme sted. Flyfoto hentet fra norgebilder.no som er brukt i denne oppgaven har romlig oppløsning ned til 20 cm, mens LiDAR fra hoydedata.no har oppløsning fra 25-50 cm. Den temporære oppløsningen for flyfoto fra både Byneset og Flatanger er 1 år, mens den varierer fra 1 til 4 år for LiDAR-data fra de samme områdene.

Geografisk informasjonssystem og dataformater (raster- og vektordata)

I denne masteroppgaven brukes programvaren *ArcGIS Pro* til å representere geologiske forhold i kartformat. Dette inngår i prinsippet til geografiske informasjonssystemer (GIS), som er en type programvare som kan brukes til å samle inn, lagre og analysere romlige data som så kan brukes til formidling av romlig informasjon i form av (digitale) kart (Rød 2015). Innenfor GIS er det to ulike datatyper/filformat som primært blir brukt, dette er raster- og vektordata. Vektordata representeres som regel i form av linjer, punkter eller polygoner, og er best egnet i tilfeller med diskret data med bestemte objektgrenser. Disse representeres med tredimensjonale koordinater, og objektene som dannes av enten punkter, linjer eller polygoner, har gjerne tilknyttede egenskaper kalt attributter. Dette kan for eksempel dreie seg om punkter på et kart som representerer ulike fjelltopper, der hver fjelltopp har høyde som sin attributt. For data som er kontinuerlig og innehar flere attributter som varierer over et område er det rasterdata som gjelder. Her deles området som skal undersøkes inn i et rutenett/raster der hver rute kalles en piksel. I motsetning til vektordata

der hvert punkt har en attributtverdi, har ikke hver piksel en verdi, men her brukes interpolering for å gi pikslene som mangler verdier. Hver piksel kan inneholde mange verdier for ulike attributter, men kun en verdi per attributt (Roalkvam 2014; Rød 2015). LiDAR-dataene og flyfotoene som er brukt i denne oppgaven er i rasterformat.

3 Metode

Oppgavens formål er knyttet til analyse av terrengendringer i områder med marin leire, og i denne delen vil metodene som har blitt brukt for å besvare spørsmålene i problemstillingen bli presentert. LiDAR-data fra ulike år har blitt sammenlignet og analysert i programvarene *ArcGIS Pro* og *Cloud Compare*. Dette har blitt gjort for begge studieområdene; Byneset og Småvika i Flatanger, der det har blitt tatt utgangspunkt i tilgjengelig LiDAR-data fra `hoydedata.no`. For analysene utført i *ArcGIS Pro* ble høydemodeller i rasterformat (tif) brukt, mens punktskyformat ble brukt i *Cloud Compare*. For Byneset var det tilgjengelig LiDAR-data fra 2010, 2012, 2013 og 2017, men da 2012-dataene kun omfattet et begrenset område ble ikke disse inkludert i analysegrunnlaget. For Flatanger var det tilgjengelig LiDAR-data fra 2010 og 2016, hvorav begge ble brukt i videre analyse. Nærmere informasjon om datainnsamling og oppløsning finnes i tabell 3.1 under.

Tabell 3.1: Informasjon om LiDAR-dataene som har blitt brukt til å utføre analyser i programvarene *ArcGIS Pro* og *Cloud Compare* (Kartverket 2023b).

LiDAR-data (Sted og år)	Romlig oppløsning [m]	Koordinatsystem	Dato for datainnsamling
Trondheim 2017	0,25	EUREF89 UTM32	10. oktober 2017
Trondheim 2013	0,25	EUREF89 UTM32	11-13. juni 2013
Trondheim 2010	0,5	EUREF89 UTM32	10-17. juni 2010
Flatanger 2016	0,5	EUREF89 UTM32	29. juli - 12. september 2016
Flatanger 2010	0,5	EUREF89 UTM32	19. mai - 17. juli 2010

I første omgang ble *ArcGIS Pro* brukt for å avdekke eventuelle terrengendringer, og deretter ble potensielle funn sammenlignet med flyfoto fra `norgebilder.no`, fra det samme området. I noen tilfeller bekreftet flyfoto funnene, og kunne i tillegg fastslå hvilket år endringene skjedde. I andre tilfeller ble funnene avkreftet, eller så var usikkerheten for stor til å kunne konkludere med noe helt sikkert. Funnene som ble bekreftet og som ikke hadde for mye støy i form av vegetasjon, ble analysert videre i programvaren *Cloud Compare*. Framgangsmåten i programvarene, og feltundersøkelsene vil bli beskrevet i nærmere detalj i den neste delen.

3.1 Innledende analyse i *ArcGIS Pro*

ArcGIS Pro er en programvare utviklet av Esri (Environmental Systems Research Institute), som gjør det mulig å utforske, analysere og visualisere data i både 2D, 3D og 4D. Dette er et Geogra-

fisk Informasjons System (GIS) der data kan stedfestes ved å bruke geodetisk datum og projeksjon, og dermed formidle ulike typer informasjon i en romlig kontekst. Digital GIS ble utviklet på starten av 60-tallet, og ble da brukt til å samle data om naturressurser fra ulike provinser i Canada, og kartlegge bruk av landområder. Dette er fortsatt vanlige bruksområder, men det er i dag enda flere muligheter og mange ulike bransjer, forsknings- og utviklingsmiljøer som bruker GIS (Esri U.å.(b)).

I denne oppgaven ble *ArcGIS Pro* versjon 3.0.3 brukt i forbindelse med forandringsanalyse for å detektere terrengendringer og utglidninger på Byneset og i Småvika i Flatanger. Terrengendringer og mindre utglidninger kan påvirke stabiliteten i bakken, og kan være tegn på at et kvikkleireskred er i ferd med å utvikle seg. Dersom slike tegn blir fanget opp før et eventuelt skred utvikler seg, kan det være mulig å innføre tiltak som kan begrense skadene eller hindre skredutvikling. For å kunne detektere terrengendringer og utglidninger i *ArcGIS Pro* ble LiDAR-data fra det samme området fra ulike tidspunkt brukt som input data. Deretter ble ulike verktøy og funksjoner i programvaren tatt i bruk for å sammenligne terrengendringer mellom LiDAR-målinger fra ulike år. *ArcGIS Pro* ble deretter brukt til å fremstille funnene i kartformat. Funksjonen til verktøyene som ble brukt i denne analysen vil bli beskrevet nærmere, uten at framgangsmåten beskrives trinnvis da dette lett kan finnes i ESRI's ArcGIS-manual på nett.

LiDAR-dataene som ble brukt hadde koordinatsystem ETRS 1989 UTM zone 32, og bakgrunnskart og all data som ble lastet inn i *ArcGIS Pro* ble derfor også satt til dette koordinatsystemet før analysene startet.

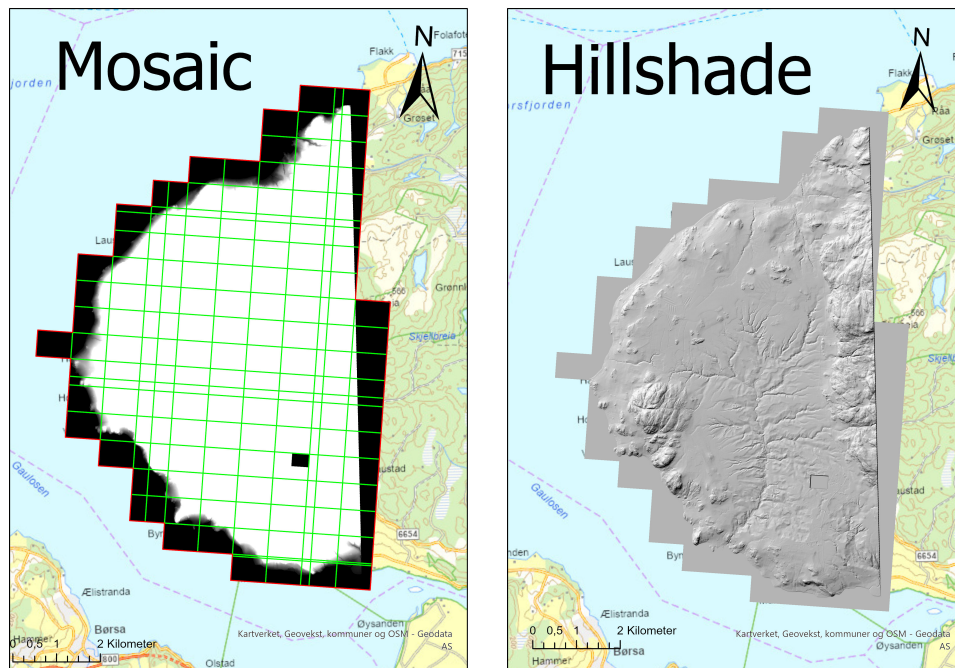
Mosaic

Før selve forandringsanalysen ble gjennomført i *ArcGIS Pro* måtte LiDAR-dataene klargjøres, og i den forbindelse ble mosaikk-funksjonen brukt. Denne brukes for å kombinere ulike rasterdata til et sammenhengende datasett. Dataene som skal kombineres må ligge ved siden av hverandre, og selv om noe av dataene overlapper vil ikke dette vises på det endelige datasettet (Esri U.å.(d)).

LiDAR-dataene som ble levert fra statens kartverk inneholder høydeverdier og er med andre ord høydemodeller delt opp i mindre områder. Etter at mosaikk-funksjonen ble brukt resulterte dette i en sammenhengende høydemodell over de respektive undersøkelseområdene. En høydemodell fremvist i GIS viser kun en grå- eller fargeskala fra laveste piksel til høyeste, og kan være vanskelig å tolke. For å bedre vise terrengoverflatene ble funksjonen "hillshade" brukt.

“Hillshade”

For å gi et lettolket bilde av terrenget kan “hillshade” funksjonen tas i bruk. Den produserer en nærmest tredimensjonal presentasjon av terrenget i gråtoner, med et skyggerelieff som bestemmes ut i fra en syntetisk lyskilde. Det kan velges mellom “traditional” eller “multidirectional” lyskilde, der den første lager skyggerelieff med utgangspunkt i en lyskilde fra én retning, mens den andre kombinerer lys fra flere lyskilder (Esri U.å.(a)). I denne analysen er det “traditional” som er brukt, da dette er standardinstillingen. Dette er en raster funksjon, noe som betyr at den kun fungerer på rasterdata. Figur 3.1 viser til venstre et mosaic datasett som inkluderer de opprinnelige rutene i de forskjellige små høydemodellene som deretter ble satt sammen i en mosaikk. Til høyre vises det samme området etter at hillshade funksjonen har blitt brukt og terrenget kommer tydelig fram. Dette er omtrent slik LiDAR-dataene ser ut på `hoydedata.no`.



Figur 3.1: Slik ser dataene ut før (venstre) og etter (høyre) hillshade-funksjonen har blitt tatt i bruk på et mosaic-datasett fra Byneset. Til venstre vises hvordan dataene ser ut etter at kun mosaic-funksjonen har blitt tatt i bruk, og her er også rutenettet tydeliggjort for å vise rasterfilene er satt sammen i en mosaikk som dekker Byneset.

Figur 3.1 viser også at det er et område det mangler data fra, dette vises som et svart firkantet område til venstre på figuren, mens det ser ut som en firkantet innsynkning til høyre på figuren. Hva datamangelen kommer av er uvisst, da det kan skyldes ulike faktorer i forbindelse med innsamlingen, overføringen eller lagringen av dataene. Uansett må dette tas hensyn til da det

ikke vil være mulig å analysere dette området.

Terrengendringsanalyse ved å bruke “Minus” i 3D-analyst)

Terrengendringsanalysen i denne GIS-analysen har blitt utført ved å bruke minus-verktøyet i 3D-analyst. Dette er et verktøy der verdiene fra et rasterdatasett subtraheres fra et annet, piksel for piksel. Resultat av dette blir et nytt datasett som representerer endringene som har skjedd mellom dem (Esri U.å.(c)). I analysene som ble utført i denne oppgaven ble dette verktøyet brukt på data fra 2013-2010 og 2017-2013 for Byneset, og 2016-2010 for Småvika, der det siste årstallet ble valgt som referansedata. Resultatene dette gir er høydeendring i meter, og framstilles ved hjelp av fargeskala som symboliserer hvor mye masse som har blitt tilført eller fjernet mellom de to datalagene (målingene fra forskjellige årstall). I dette tilellet ble det lagd en fargeskala med egendefinerte grenseverdier i et forsøk på å skille støy og faktiske terrengendringer, samt sortere endringene etter størrelse. Da dette inngår i et av forskningsspørsmålene i problemstillingen, vil valg av grenseverdier omtales nærmere i diskusjonen.

Etter dette ble resultatene analysert manuelt for å finne terrengendringer som skilte seg ut. Da terrengendringene vises i en fargeskala med flytende overgang fra rød til grønn ble det valgt et bakgrunnskart i gråtoner slik at fargene skulle komme tydelig fram og terrengendringene skulle være lette å oppdage. Det ble deretter laget en oversikt over de tydeligste terrengendringene, som blir presentert i resultatene i kapittel 7. Da de utvalgte terrengendringene er basert på manuell analyse og avlesning fra fargeskalaen med grenseverdier for høydeendringer, er det mulig at det har oppstått feil som har ført til at noen terrengendringer har blitt oversett eller blitt feilvurdert. Dette er noe som tas til betraktning i diskusjonen av resultatene.

3.2 Cloud compare

Dette er en programvare som gjør det mulig å redigere og framstille punktsky-data og trekantede masker (mesh) i tre dimensjoner. Det ble originalt utviklet for å sammenligne to punktskyer med høy punkttetthet fra for eksempel laserskanning som LiDAR, eller mellom punktskyer og trekantede masker. Bruksområdene for programvaren har etter hvert utvidet seg til å brukes til mer generisk behandling av punktskyer, og inkluderer et bredt utvalg av algoritmer som kan brukes til dette. Statistikkberegning, fargehåndtering, håndtering av normaler og skalarfelt, segmentering og sensorstyring er blant disse algoritmene, i tillegg til enda flere (CloudCompare U.å.).

I forbindelse med denne oppgaven har *Cloud Compare* versjon v2.13 alpha blitt brukt til å sammenligne punktskyer fra områder med terrengendringer fra ulike år, for så å beregne omtrentlig volum og gi en visuell framstilling av disse. Dette ble gjort ved å ta i bruk ulike algoritmer som programvaren inneholder. I forkant av dette ble LiDAR-data i punktskyformat lastet ned fra `hoydedata.no`, der områdene og tidsperioden for de aktuelle endringene på forhånd hadde blitt identifisert ved analyser gjort i *ArcGIS Pro*.

For å få et mest mulig representativt volumestimat av endringene som ble oppdaget i *ArcGIS Pro* og fra flyfoto, ble i første omgang segment-verktøyet brukt til å avgrense det aktuelle området av punktskyene som viste terrenget før og etter eventuelle endringer oppsto. Dette verktøyet ble også brukt til å fjerne eventuelt støy fra vegetasjon eller lignende. I noen tilfeller var det for mye vegetasjon til å skille mellom støy og faktiske terrengendringer, og det ble derfor ikke utført volumberegninger av disse da det var for stor grad av usikkerhet. I de tilfellene der det var mulig å utføre volumberegninger ble “compute 2.5D volume” algoritmen brukt. Her ble punktskyene fra de aktuelle årstallene (etter og før endringene) brukt som input parametre, og det ble huket av for interpolering av punkter der det manglet datagrunnlag. Resultatet av disse ble deretter beregnet med meter som enhet. For å få en tydeligere framstilling av volumendringene ble det konstruert et mesh (maskenettverk) av punktskyene som viste terrenget før og etter endringene oppsto. Dette ble gjort ved først å bruke algoritmen som konstruerer normaler “compute normals”, og deretter konstruere mesh ved å ta i bruk “PoissonRecon” under “Plugins”-fanen.

3.3 Feltarbeid

Feltarbeidet ble utført på Byneset, med formål om å undersøke terrengendringene som ble oppdaget i *ArcGIS Pro* og flyfoto. Da LiDAR-dataene som ble brukt noen ganger var mer enn 10 år gamle var det på forhånd antatt at noen av endringene kunne ha vokst igjen av vegetasjon eller at forhold ville gjøre det vanskelig å observere endringene. De nyeste tilgjengelige flyfotoene (fra 2022) fra `norgeibilder.no` ble derfor studert som en del av forberedelsene til feltarbeidet. For noen av terrengendringene som ble oppdaget i *ArcGIS Pro* kunne ikke flyfoto bekrefte at det faktisk hadde skjedd endringer, det var derfor ønskelig å undersøke disse for å se om det hadde skjedd noen reelle endringer.

Feltarbeidet ble utført 10. Mai 2023, og det var 7 lokaliteter på Byneset som ble undersøkt.

Grunnet begrensninger i forbindelse med tid og framkommelighet ble ikke de andre lokalitetene befart. I forkant av feltarbeidet var koordinatene til de utvalgte lokalitetene lagt inn på et kart slik at det skulle være enkelt å finne frem til riktig sted. 5 av de 7 lokalitetene (A, B, C, D og M) viste tydelige terrengendringer i form av utglidninger på flyfoto, men da de fleste av disse hadde skjedd mellom 2010 og 2013, var det usikkert hvor tydelige de ville være 10 år senere. En av lokalitetene (E) så ut som et masseuttak fra flyfoto og ble derfor undersøkt for å se om dette stemte. Dersom det stemte ville denne lokaliteten kunne klassifiseres som et falskt positivt resultat, da det ikke er denne typen terrengendringer som analysen har som formål å identifisere da dette er et planlagt menneskelig inngrep. Den siste lokaliteten som ble undersøkt var lokalitet H, som viste tydelige utslag på GIS-analysen, men vegetasjon hindret informasjon fra flyfoto. Det var derfor usikkert rundt hva som kom til å bli funnet her.

4 Beskrivelse av studieområdene: Byneset og Flatanger

Denne oppgaven har fokusert på to studieområder i Trøndelag, sentrale Norge, der det forekommer marin leire, og skred tidligere har blitt utløst. Disse områdene er utgangspunkt for terrengeendringsanalysene som har blitt gjennomført, og i den anledning vil geografiske og geologiske forhold bli beskrevet nærmere.

4.1 Byneset

Byneset ligger i Trøndelag og befinner seg vest i Trondheim kommune. Landskapet varierer mellom rolig undulerende jordbruksområder som dominerer i den vestre delen mot havet, mens skog og fjell dominerer i den østre delen som ligger nært Bymarka i Trondheim. Nærmere beliggenhet og oversikt over Byneset vises på kartene i figur 4.1.

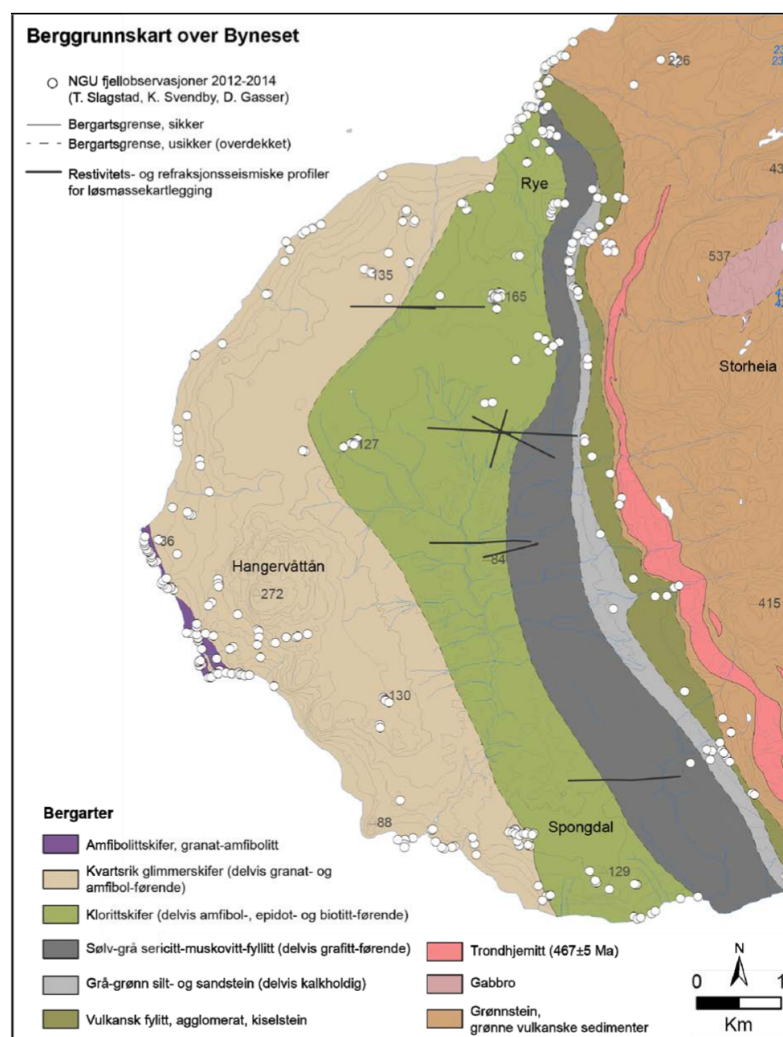


Figur 4.1: Kart over Byneset

4.1.1 Bergrunnsgeologi

Det har blitt gjort flere observasjoner av fjellblotninger i felt og fra LiDAR-data som har dannet grunnlaget for kartet i figur 4.2. Fra observasjonene ble det funnet ni forskjellige bergarter som ligger mer eller mindre langstrakt fra vest til øst. De tre vestligste bergartssonene består av ulike

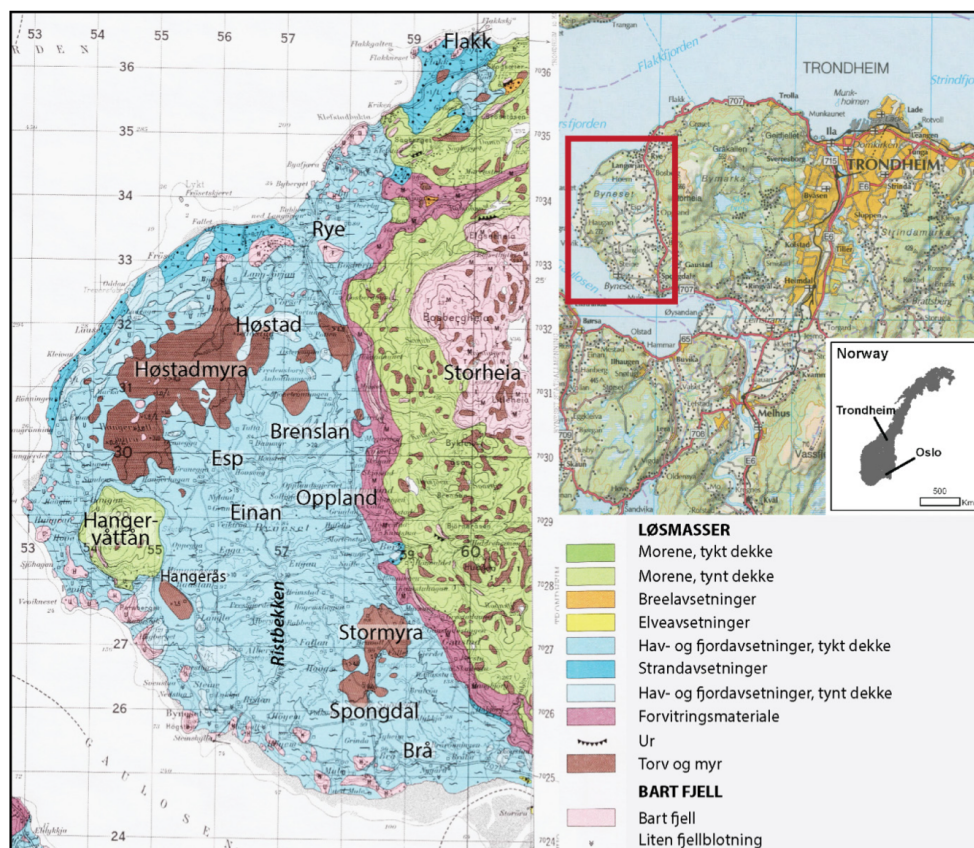
skifre, og deretter går det over i sandstein og diverse andre bergarter. Helt vest på Byneset er det en sone med amfibolittskifer og granat-amfibolitt. Øst for denne sonen er det kvartsrik glimmerskifer som er delvis granat- og amfibol-førende. Dette er som vist i kartet en bred sone som dominerer en stor del av Byneset. Øst for denne sonen er det nok en skifertype, men denne gangen er det klorittskifer som er delvis amfibol-, epidot-, og biotittførende. Dette er en mykere skifer enn de andre to, da disse regnes for å være relativt harde bergarter. I klorittskifer-sonen ble det også observert amfibolittlag og agglomerat, men kun i liten skala. Videre befinner det flere myke bergarter i form av sericitt-muskovitt-fyllitt som er delvis grafittførende og som har sølv-grå farge, og delvis kalkholdig silt- og sandstein med grå-grønn farge. Sandsteinen befinner seg øst for fyllittsonen, og ligger under lag med magnetisk kiselstein, agglomerat og fyllitt. Øst for dette er det hardere bergarter som dominerer i form av grønnstein, med innslag av trondhemitt og gabbro (Solberg mfl. 2015).



Figur 4.2: Berggrunnskart over Byneset, der ulike farger representerer ulike bergarter (Rosvold 2022)

4.1.2 Løsmassefordeling

Isen som dekket Byneset under siste istid har satt sine spor på landskapet. Skuringsstriper tyder på at isen har beveget seg i nordvest retning, og en fordypning i de myke bergartene tyder på at det har foregått kraftig erosjon av disse. Etter at isen gradvis trakk seg tilbake for omtrent 10 000 år siden har fordypningen blitt fylt med løsmasser, og da i hovedsak marine avsetninger. Det finnes også spor av grovere sedimenter som trolig er resultat av at isbreen i en periode av avsmeltingen har rykket framover for så å trekke seg tilbake. Etter at isen forsvant begynte landhevingen, og nye områder kom til syne. Elver og bekker har siden den gang erodert landskapet, og Byneset er i dag et område med mange raviner. Utvasking av marin leire har også ført til at det forekommer kvikkleire flere steder under marin grense (ca. 160 meter over havet) på Byneset. Andre løsmasser som er identifisert og kartlagt på Byneset er morene, breelavsetning, elveavsetning, strandavsetning og forvittringsmateriale (Solberg mfl. 2015). Hvordan disse løsmassene er fordelt vises på kartet i figur 4.3, der de ulike løsmassene er representert med ulike farger. Dette kartet er hentet fra NGU sin rapport i etterkant av skredet i 2012.

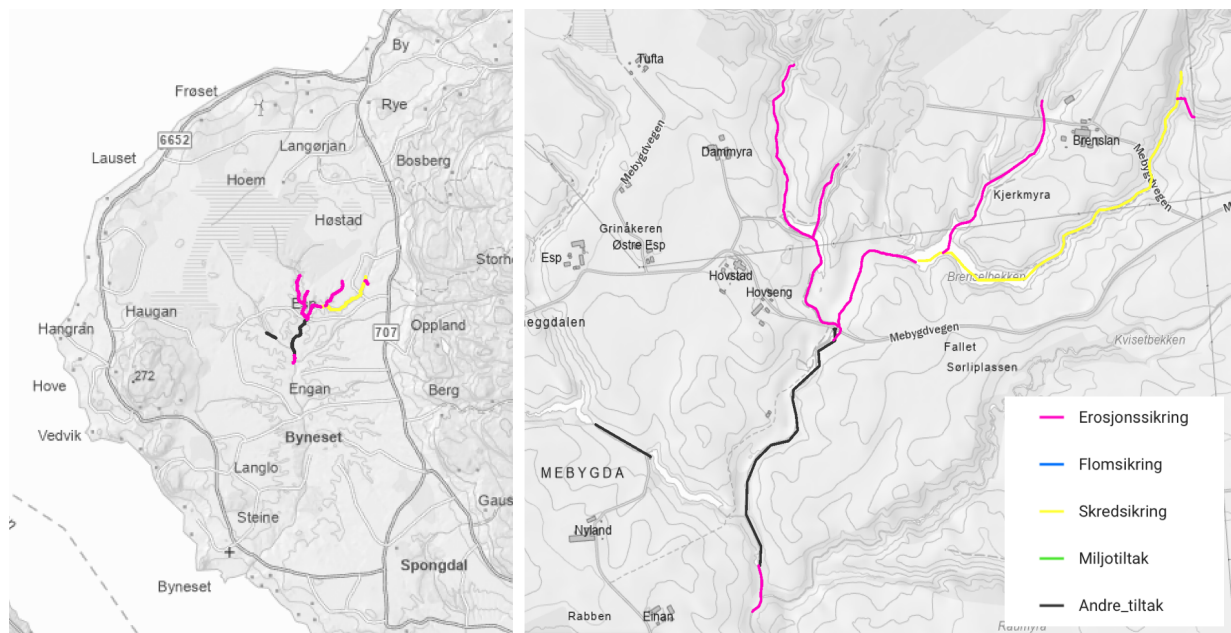


Figur 4.3: Løsmassefordelingen på Byneset. Fra Solberg mfl. 2015

4.1.3 Skredhistorikk og sikringstiltak

Byneset er et område som har vært utsatt for mange leirskred gjennom historien. En del av skredhendelsene har blitt dokumentert, noen har blitt registrert i senere tid etter at det har blitt oppdaget skredgroper eller andre spor, og noen skred er muligens fortsatt uoppdaget. En oversikt over registrerte leirskred på Byneset vises i vedlegg A.1. Her er den tidligste skredhendelsen registrert i 1825, og det nyeste i 2012. Etter at det i senere år har blitt gjennomført LiDAR-målinger i området har skredgroper og raviner blitt grundig kartlagt slik det vises i vedlegg A.2(Solberg mfl. 2015).

Grunnet Bynesets skredhistorikk har det blitt gjennomført omfattende grunnundersøkelser, og ulike sikringstiltak har blitt innført. Det har blitt gjennomført erosjonssikring og skredsikring i tillegg til andre tiltak i området rundt Esp, der det i 2012 ble utløst et kvikkleireskred. Hvilke tiltak som er gjennomført hvor er illustrert i figur 4.4 som er et temakart hentet fra NVE sine nettsider(NVE 2023c). Det finnes også en nasjonal database for grunnundersøkelser (NADAG) som er utviklet av NGU, der informasjon om geotekniske undersøkelser og grunnforhold publiseres. NADAG sine nettsider viser at det er høy tetthet av gjennomførte geotekniske grunnundersøkelser på Byneset, og at det er påvist kvikkleire flere steder (NGU 2023d).

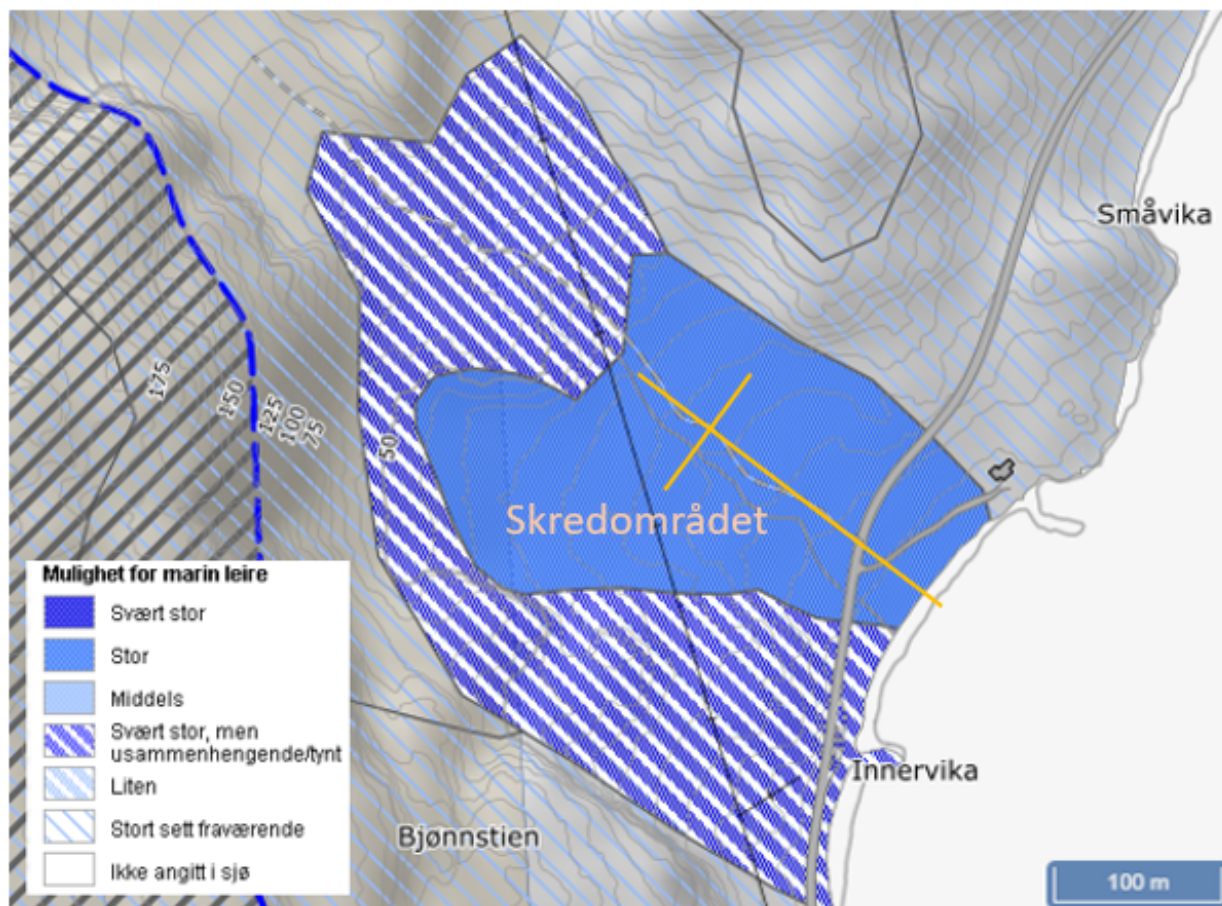


Figur 4.4: NVE temakart som viser sikringstiltak som er gjennomført på Byneset (NVE 2023c). Formålet til alle sikringstypene er i dette tilfellet å sikre mot erosjon som kan utløse kvikkleireskred.

4.2 Flatanger

Flatanger er en kommune langs kysten i Tøndelag, som består av mange øyer og holmer. Den marine grensa i Flatanger ligger på omtrent 125 meter over havet i følge NGU sitt kart over marin grense i Norge (NGU 2023c). Isen forsvant fra Flatanger for ca. 10 000 år siden, og det ble da avsatt marine sedimenter på samme måte som beskrevet under Byneset (Aune 2022).

Flatanger er et relevant område i forbindelse med denne oppgaven da det gikk et kvikkleireskred her 10. Mars 2023 (Zeiner 2023). Området der skredet gikk heter Småvika og befinner seg under marin grense, med stor mulighet for forekomst av marin leire i følge kart fra NGU som vises på figur 4.5. Det har derfor blitt gjennomført analyser på bakgrunn av LiDAR-data og flyfoto fra området, for å undersøke om det er mulig å oppdage terrengendringer som kan ha skjedd i forkant av skredet og som dermed kan ha hatt innvirkning på skredutløsningen.



Figur 4.5: Småvika i Flatanger der det ble utløst et skred 10. mars 2023. Kartet viser skredområdet, og at det er stor mulighet for forekomst av marin leire i dette området. Den blå stiplede linjen viser marin grense, som ligger over skredområdet(NGU 2023c).





4.2.1 Bergrunnsgeologi

I Flatanger er det granittisk gneis som dominerer området, med innslag av glimmerskifer, amfibolitt, gabbro og enkelte årer av marmor. Dette er bergartene som kommer fram på kartet (Figur 4.6), men dersom det zoomes ytterligere inn på kartet kan det også finnes små partier med migmatittgneis, glimmergneis, granitt, kalkglimmerskifer, kvartsmonzonittisk gneis og kalkspatmarmor.



Bergrunnskart over Flatanger

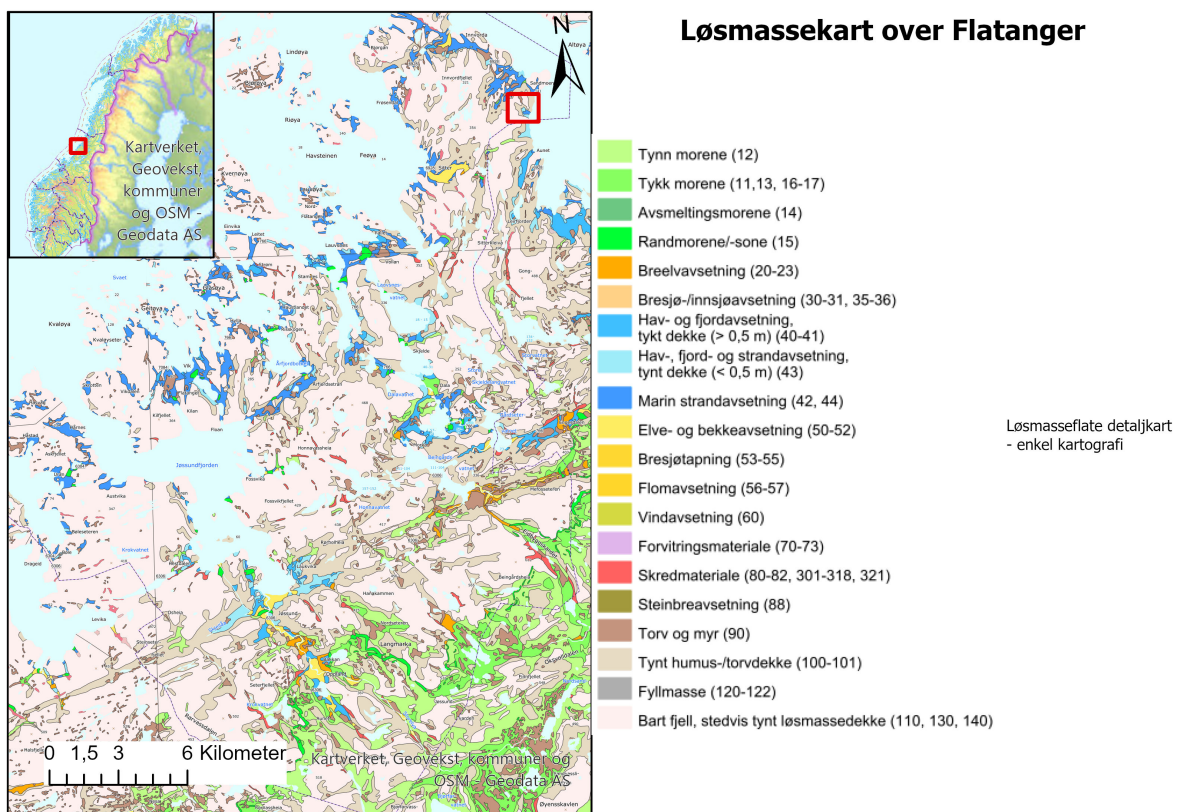
Bergarter

 Granittisk gneis	 Glimmerskifer
 Amfibolitt	 Marmor
 Gabbro	

Figur 4.6: Bergartsfordeling i Flatanger, med tydelig markert kommunegrense(NGU 2023a).

4.2.2 Løsmassefordeling

Dette er et område med mye bart fjell, men det forekommer også ulike løsmasseavsetninger. Helt ytterst langs kysten er det mest marine strandavsetninger, i tillegg til flekkvise partier med hav-, fjord-, og strandavsetning, morene, torv og myr, vindavsetning, og noe skredmateriale. Lenger inn i landet blir det gradvis mindre av de marine avsetningene, mens forekomsten av morene øker. Mengden torv og myr, samt skredmateriale øker også i disse områdene. Det dukker også opp andre løsmassetyper som breelvavsetning og elve- og bekkeavsetning.



Figur 4.7: Løsmassekart over Flatanger, der skredområdet i Småvika er markert i rødt øverst i høyre hjørnet (NGU 2023b).

4.2.3 Skredhistorikk og sikringstiltak

Det er ikke mange kjente skredhendelser fra Flatanger, men senest i 2014 ble det utløst et undersjøisk kvikkleireskred i Namsos kommune i et område kalt Nord-Statland som ikke ligger langt unna skredområdet i Småvika. Volumet som gled ut i 2014 var mellom 350 000 og 400 000 m³, og førte til at en flodbølge oppsto. Ingen menneskeliv gikk tapt i skredet eller som resultat av flodbølgen, men betydelig materielle skader oppsto. Trolig var anleggsarbeid den utløsende

årsaken i dette tilfellet (Moholdt mfl. 2014). Etter 2014 er det ingen kjente skredhendelser før kvikkleireskredet som ble utløst 10. mars 2023. Dette skredet resulterte heller ikke i tap av menneskeliv, men hindret framkommeligheten i en veistrekning da skredet ble utløst på oversiden av Fylkesvei 6928 ved Småvika i Flatanger. Den utløsende årsaken til dette skredet antas å være naturlige årsaker knyttet til bekkeerosjon eller økt vannstrømning etter at en ispropp smeltet (Zeiner 2023). Det var ikke utført sikringstiltak i noen av skredområdene, og i kommunen har det totalt blitt gjennomført sikringstiltak i tre områder, der alle er knyttet til flomsikring og erosjonssikring i elver. Kart fra NADAG viser at det er utført under gjennomsnittet geotekniske grunnundersøkelser, og det er ikke gjennomført noen slike undersøkelser i området rundt Småvika i forkant av skredet (NGU 2023d).

5 Resultater

Resultatene som presenteres i denne delen er basert på analyser utført i *ArcGIS Pro*, volumberegninger og 3D-modellering gjort i *Cloud Compare*, studier av kvartærgeologiske kart fra NGU, flyfoto fra ulike år og feltarbeid på Byneset som ble utført 10. mai 2023. Hovedfokuset for denne oppgaven er deteksjon av terrengendringer på Byneset, men da skredet i Småvika i Flatanger ble utløst 10. mars 2023 ble dette også aktuelt for å se om metoden kunne bidra til å finne skredutløsende årsak i dette området. Formålet med analysene for de to områdene er derfor litt ulike, og resultatene vil derfor bli presentert hver for seg.

5.1 Byneset

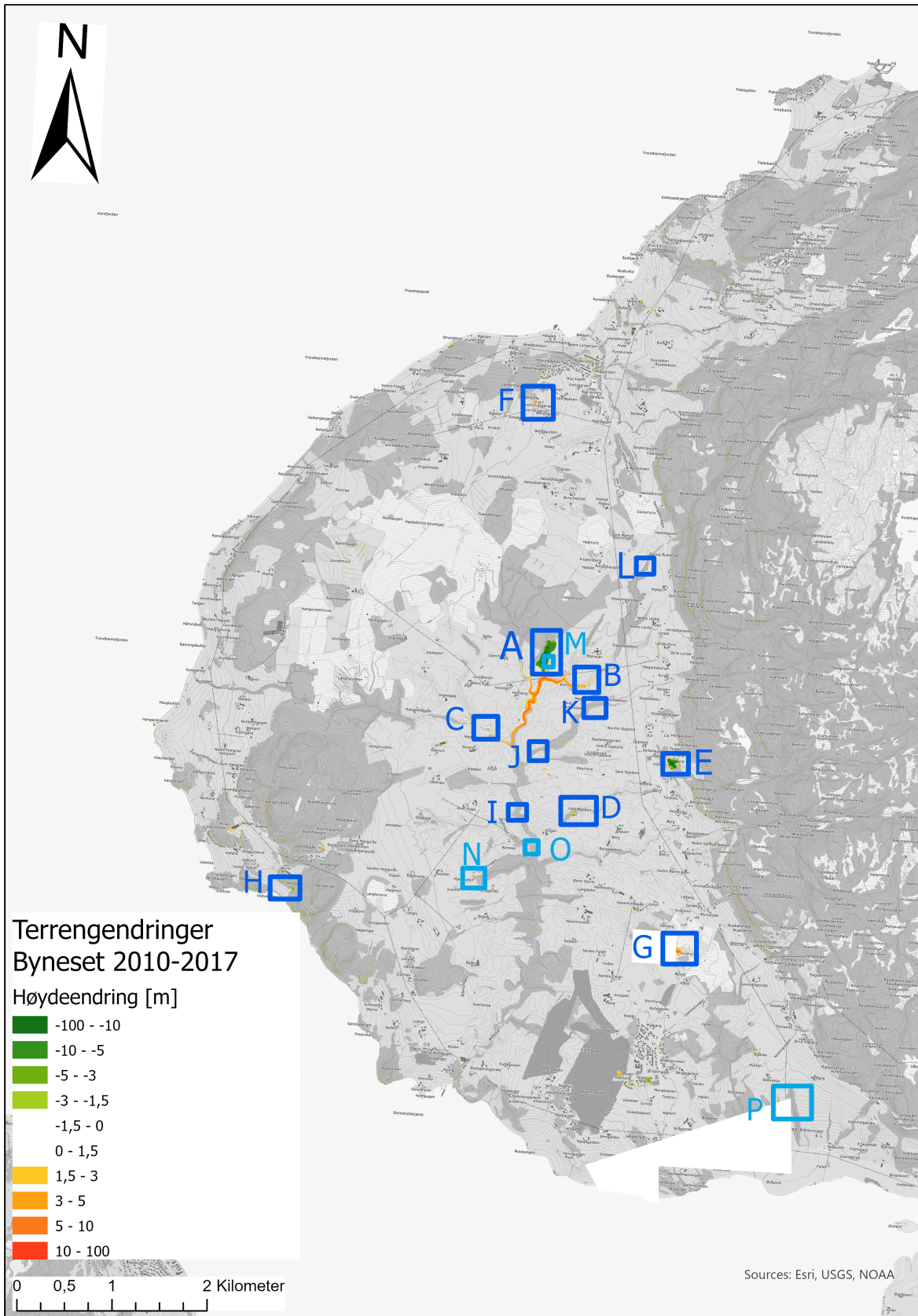
For analyse av terrengendringer på Byneset ble det gjennomført forandringsanalyse i *ArcGIS Pro* fra to tidsintervaller, det ene fra 2010 til 2013 og det andre fra 2013 til 2017. Det ble funnet flere terrengendringer i hver av disse, og i tidsperioden 2010-2013 ble det også dokumentert et kvikkleireskred som gikk på Esp på Byneset i 2012. Blant alle terrengendringene som ble funnet i GIS-analysen ble til slutt 16 lokaliteter valgt ut, fire av disse fra tidsintervallet 2013-2017 og de resterende fra 2010-2013. Disse 16 ble valgt ut på bakgrunn av størrelsen på høydeendringene, samt overflateareal og hvor tydelig de var i terrenget. Da dette ble gjort manuelt basert på observasjoner er det mulig at noen lokaliteter kan ha blitt oversett eller misoppfattet. Kartet i figur 5.1 viser beliggenheten til de 16 lokalitetene på Byneset, der hver lokalitet har blitt tildelt en bokstav for identifikasjon. Bokstavene som er markert i mørkeblå representerer terrengendringer som har skjedd mellom 2010-2013, mens lyseblå farge representerer de som har skjedd mellom 2013-2017. Nærmere beskrivelse av hver av disse finnes i tabell 5.2, der vises det også hvilke av lokalitetene som ble undersøkt i felt. Denne tabellen er basert på informasjon fra analysen i *ArcGIS Pro*.

Det ble også utført volumberegninger og konstruert tredimensjonale modeller i *Cloud Compare*, for noen av lokalitetene. Vegetasjon førte til at det ikke var mulig å utføre dette for alle lokaliteter, da den i mange tilfeller hindret tydelige bakkepunkter slik at det ble vanskelig å skille bakke fra vegetasjon. Volumberegningene for disse lokalitetene hadde dermed ført til høy grad av usikkerhet, og det ble derfor bestemt å utelukke disse. De lokalitetene det derimot var mulig å beregne et mer sikkert volum for, er gitt i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Volum beregnet i *Cloud Compare*.

Lokalitet	Volum beregnet i Cloud Compare
B	Ca. 343 m ³
C	Ca. 951 m ³
D	Ca. 1570 m ³
M	Ca. 759 m ³

Grunnet dårlig framkommelighet og begrenset mengde med tid, ble kun syv av seksten lokaliteter undersøkt i felt. Fem av disse (lokalitet A, B, C, D og M) ble valgt på grunn av at de viste tydelige terrengendringer på flyfoto og at det derfor var sannsynlig at ville være mulig å oppdage de i felt. Lokalisasjon E ble valgt fordi den ga tydelig utslag i GIS-analysen, men flyfoto viste at dette dreide seg om et masseuttak i berg, helt på grensen mellom berg og løsmasser. Denne ble derfor inkludert for å vise et annet mulig utfall av analysen. Lokalitet H viste også tydelig utslag i GIS-analysen, men var ikke mulig å undersøke på flyfoto grunnet tett vegetasjon. Dette var tilfellet for flere andre lokaliteter og H ble derfor brukt som referanse for disse grunnet god framkommelighet, og at dette var den største registrerte høydeendringen (opptil 4,6m) av disse. De syv lokalitetene undersøkt i felt er beskrevet nærmere i de neste delene.



Figur 5.1: Terrengendringer på Byneset fra 2010-2017. Bokstavene og områdene i mørkeblå er endringer som har skjedd mellom 2010-2013, og lyseblå er for endringer som har skjedd mellom 2013-2017. Bokstavene er brukt for å skille de fra hverandre, og nærmere beskrivelse av disse vises i tabell 5.2.

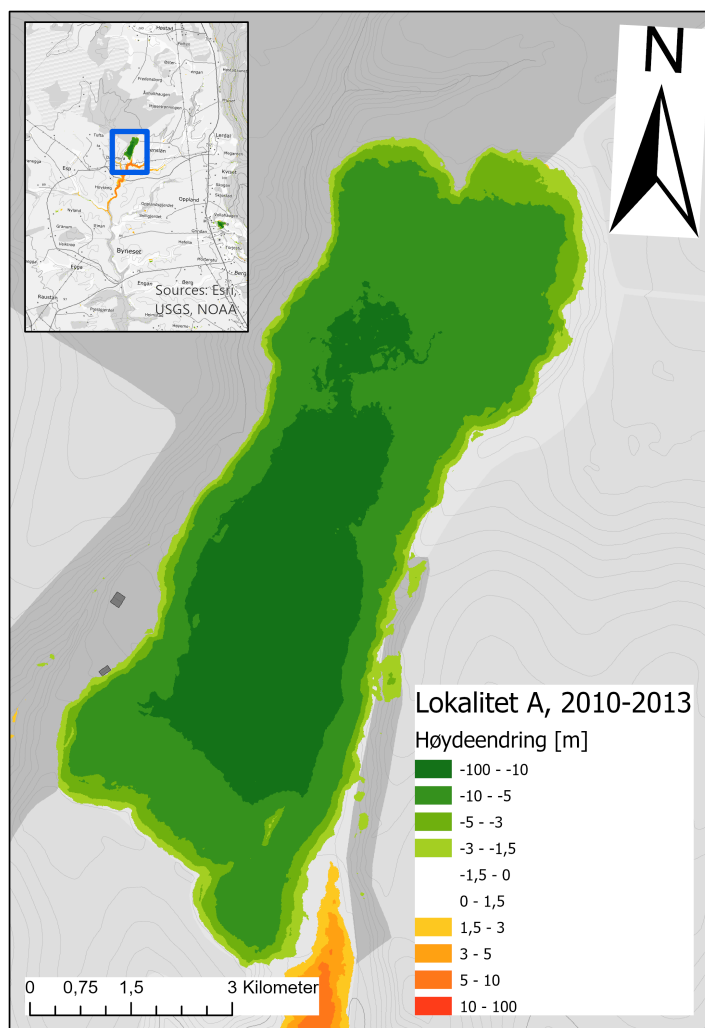
Tabell 5.2: Oversikt over detekterte terrengendringer på Byneset mellom 2010-2013 og 2013-2017

	Område	Koordinater	LiDAR-data fra	Maks høydeendring	Info fra flyfoto	Felt
A	Esp	63.3942185, 10.1377549	2010-2013	Ca. -14m	Skred i 2012	X
B	Brenselbekken	63.3917390, 10.1473028	2010-2013	Ca. -3,7m	Utglidning i 2012	X
C	Mebygda	63.3870977, 10.1264802	2010-2013	Ca. -4m	Utglidning i 2010/2011	X
D	Hafellabekken	63.3795687, 10.1454706	2010-2013	Ca. -4,8m, +3,5m	Utglidning trolig i 2012	X
E	Vollahaugan	63.3847848, 10.1655954	2010-2013	Ca. -14m, +4m	Masseuttak	X
F	Gudmundsgarden	63.4182127, 10.1329091	2010-2013	Ca. +/- 3,2m	Bygging 2010	
G	Stormyra	63.3671992, 10.1685261	2010-2013	Ca. +9m	Veiutbygging	
H	Skoldalen	63.3710913, 10.0871909	2010-2013	Ca.4,6m	Vegetasjon	X
I	Østegga (Brenselbekken)	63.3797513, 10.1340457	2010-2013	Ca. -3,2m	Vegetasjon	
J	Kvisetbekken	63.3855672, 10.1377825	2010-2013	Ca. -3,3m	Vegetasjon	
K	Kvisetbekken (Sørli plass)	63.3900111, 10.1483378	2010-2013	Ca. -2,7m	Vegetasjon	
L	Trødalsbekken (Skirna)	63.4030366, 10.1582089	2010-2013	Ca. -4,3m	Vegetasjon	
M	Esp	63.3938550, 10.1386131	2013-2017	Ca. -5m	Utrasing i skredkant	X
N	Langlovegen (Mjølkvollen)	63.3732361, 10.1251808	2013-2017	Ca. -2,7m, +3,7m	Veiutbygging	
O	Engan	63.3762992, 10.1372028	2013-2017	Ca. -3,4m	Vegetasjon	
P	Stordalsbekken	63.3515947, 10.1896611	2013-2017	Ca. -3,7m	Vegetasjon	

5.1.1 Lokalitet A

Denne lokaliteten viser skredropen fra Esp-skredet i 2012. Slik flyfoto (figur 5.3) viser var dette et jordbruksområde før skredet, det er det også i dag (per 2023) slik bilder fra felt viser (figur 5.4 (a)).

Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.2: Kart over lokalitet A, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

Ut i fra fargeskalaen vises det at i sentrale deler av skredområdet har det sklidet ut masser i en høyde på over 10 meter. På det meste var høydeendringen omtrent 13 meter, noe som ble funnet ut ved å justere verdiene på grenseverdiintervallet som går fra -100 m til -10 m.

Flyfoto:



(a) Flyfoto fra 2010

(b) Flyfoto fra 2013



(c) Flyfoto fra 2022

Figur 5.3: Flyfoto fra lokalitet A (Kartverket 2023a).

Flyfotoene i figur 5.3 viser det samme området før og etter at det ble utløst kvikkleireskred i 2012. I 2013 var skredgropen fortsatt svært tydelig, og det var fortsatt spor etter skredmassene. Også i 2022 var skredgropen tydelig, men det hadde grodd mer vegetasjon og området var i større grad bearbeidet.

Feltobservasjoner:

(a) Oversiktsbilde av skredgropen slik den så ut 10. mai 2023



(b) Skredkanten med vegetasjon

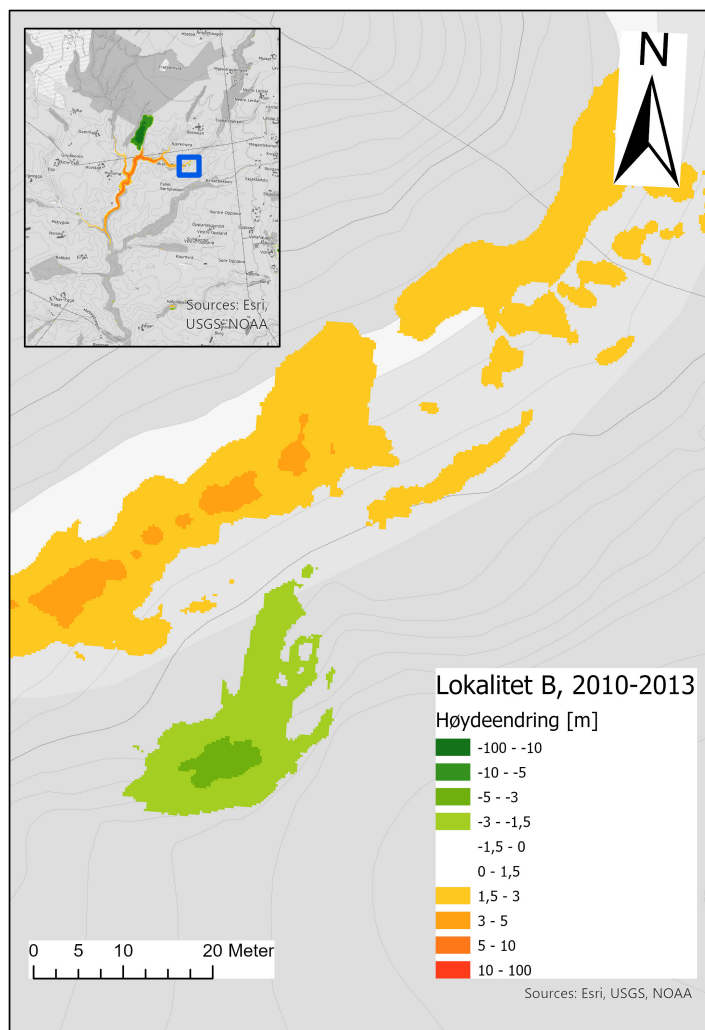
Figur 5.4: Feltobservasjoner fra lokalitet A.

Figur 5.4 (a) viser at store deler av skredgropen har blitt fylt igjen og planert, mens (b) viser skredkanten i et område der skredgropen ikke har blitt fylt igjen. Bilde (b) viser også tydelig forekomst av leire, samt at det har vokst en del vegetasjon i de tidligere utrase områdene. En del av denne vegetasjonen er blomsten Leirfivel (Hestehov: *Tussilago farfara* sp.) som vokser godt i leirjord, derav navnet.

5.1.2 Lokalitet B

Denne lokaliteten ligger ikke så langt unna den store skredgropen fra 2012 (lokalitet A), og befinner seg i en skråning ned mot Brenselbekken.

Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.5: Kart over lokalitet B, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

De grønne områdene på figur 5.5 viser en terrengendring i form av en utglidning ned mot bekken der høydeendringen på det meste ligger på mellom 3-5m ut ifra fargeskalaen. De oransje områdene viser tilførte masser i en høyde opp til 3-5m. Dette kan skyldes utglidningen i skråningen, men også tilførte masser etter skredet i 2012.

Flyfoto:



(a) Flyfoto 2010

(b) Flyfoto 2013

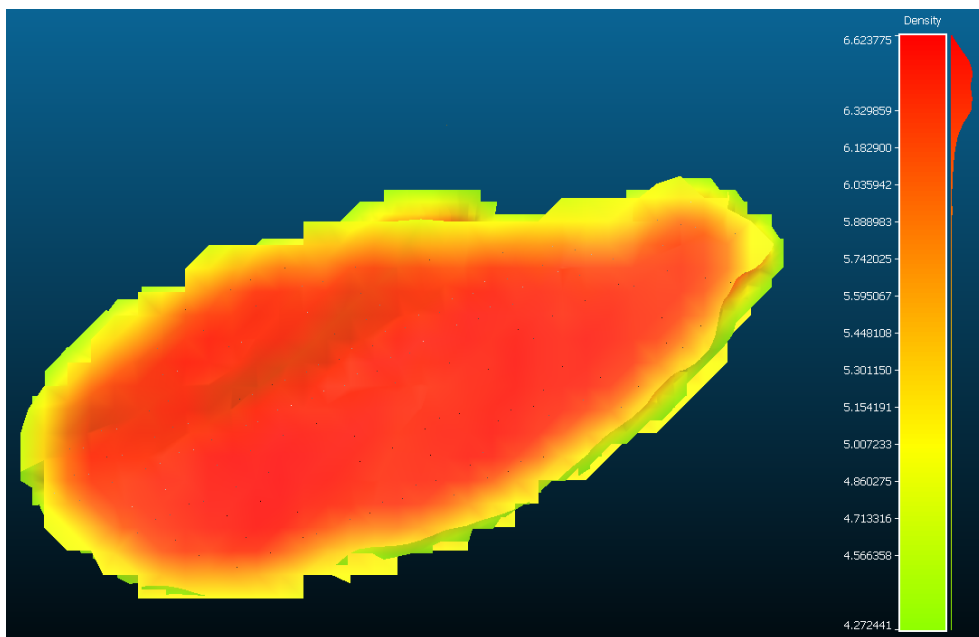


(c) Flyfoto 2022

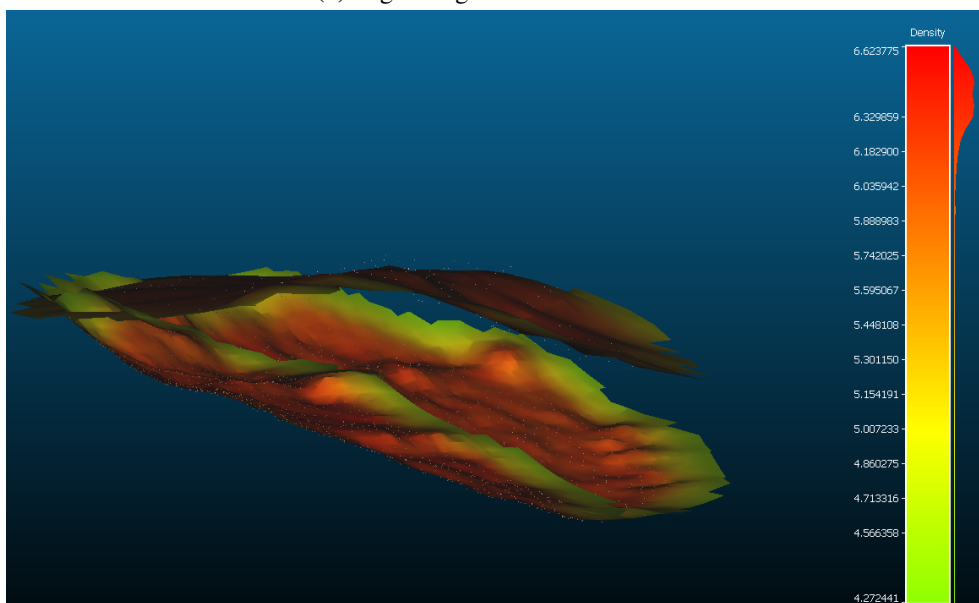
Figur 5.6: Flyfoto fra lokalitet B (Kartverket 2023a).

Flyfoto viser tydelige endringer i terrenget som har oppstått i tidsintervallet mellom 2010-2013. En del av vegetasjonen har forsvunnet i løpet av disse årene, noe som gjør det mulig å se hvor bekkeløpet går. På flyfoto fra 2013 kommer utglidningen tydelig fram, det gjør også massene som antagelig stammer fra kvikkleireskredet i 2012. I 2022 har ny vegetasjon vokst fram slik at utglidningen og skredmassene ikke lenger er synlig.

Cloud compare:



(a) Utglidningsvolum sett ovenfra



(b) Utglidningsvolum sett fra siden

Figur 5.7: Framstilling av volumendring for lokalitet B i *Cloud Compare*, der skalaen til høyre viser punkttetthet.

Cloud compare ble brukt for å få en visuell framstilling av utglidningens volum. Figur 5.7 (a) viser utglidningen sett ovenfra, mens (b) viser den sett fra siden der de to flatene representerer hvordan terrengoverflaten så ut i 2010 (øverst) og 2013 (nederst), og tomrommet i mellom er volumet som har glidd ut. For lokalitet B ble volumet av utglidningen beregnet til å være ca. 343 m^3 .

Feltobservasjoner:

(a) Oversikt over utglidningsområdet der rød stiplelinje er brukt for å vise hvor utglidningen startet



(b) Sprengstein brukt til erosjonssikring langs bekken

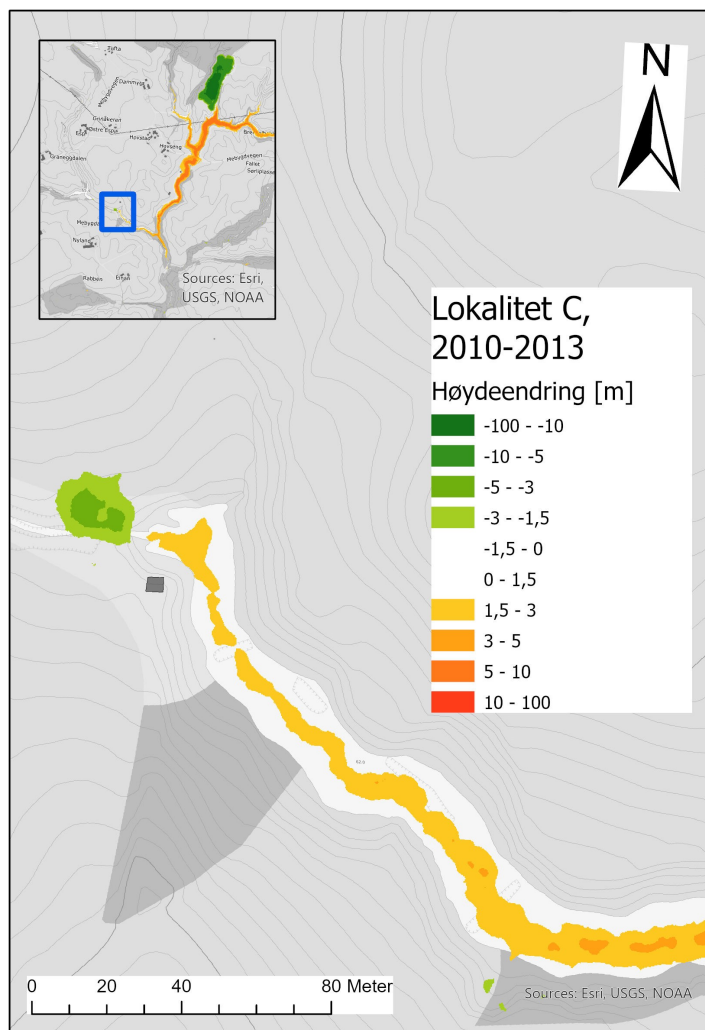
Figur 5.8: Feltobservasjoner fra lokalitet B.

Her viser bilde (a) kanten på utglidningen og skråningen som massene har beveget seg nedover. I bunnen av skråningen er det en bekk, og det er der bilde (b) er tatt fra. Her har det blitt erosjonssikret med bruk av sprengstein rundt kantene av bekken.

5.1.3 Lokalitet C

Denne lokaliteten befinner seg langs et bekkeløp som skiller to jorder. Etter kvikkleireskredet i 2012 ble det avsatt skredmasser i dette området.

Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.9: Kart over lokalitet C, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

Her viser det grønne området at masser i en høyde opptil 5m har forflyttet seg, samt at det har blitt tilført masser i en tarm som strekker seg fra skredområdet lengre nord. Det er sannsynlig at også denne terrengendringen i hovedsak har oppstått som resultat av kvikkleireskredet i 2012.

Flyfoto:



(a) Flyfoto 2010

(b) Flyfoto 2013

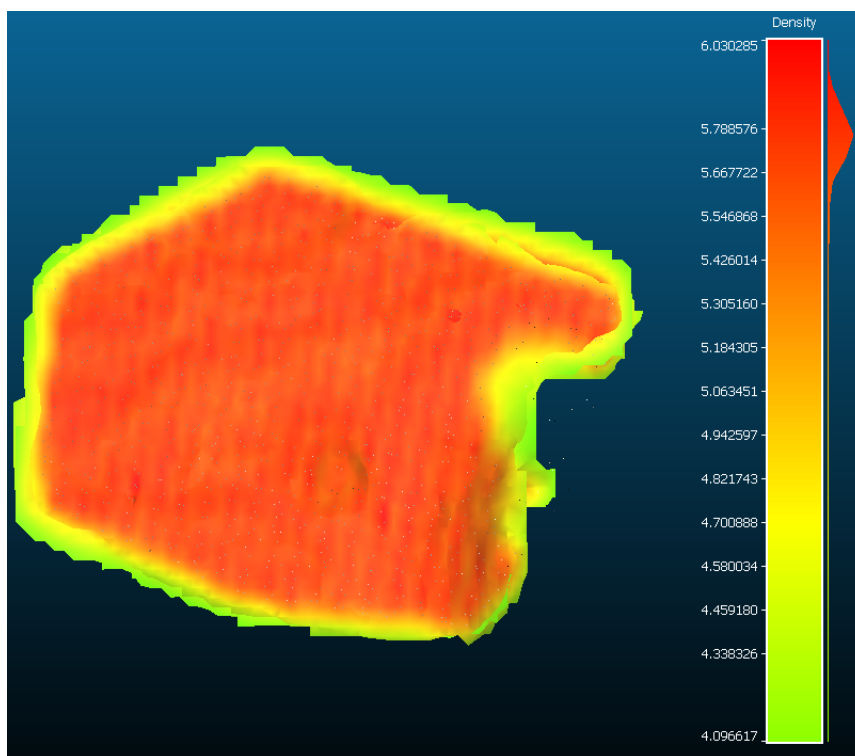


(c) Flyfoto 2022

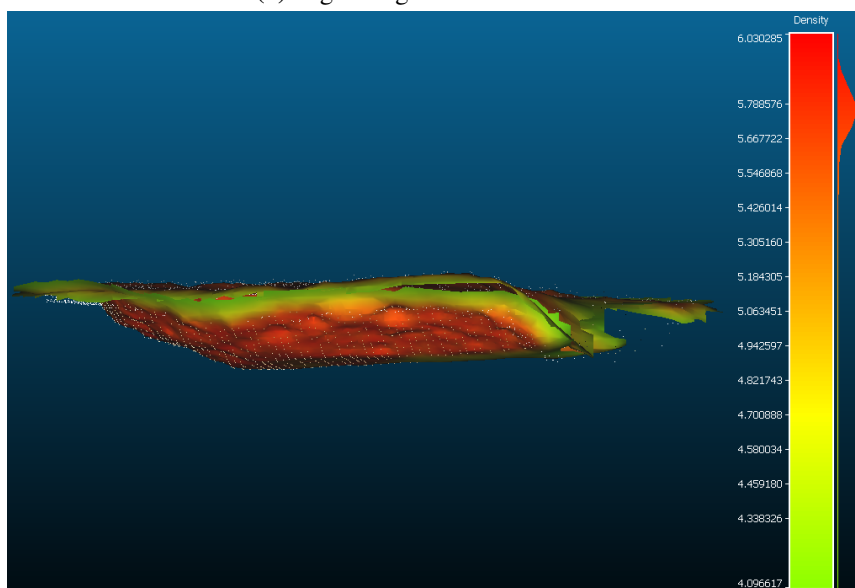
Figur 5.10: Flyfoto fra lokalitet C (Kartverket 2023a).

Flyfoto viser at det har skjedd store endringer i dette området. I 2010 var dette et flatt område i tilknytning til et jorde, mens det i 2013 vises en stor nedsynkning i terrenget, samt tilførsel av vann. Noe av vegetasjonen har også blitt borte i dette tidsrommet. Fra 2013 til 2022 ser det ikke ut til at det her skjedd noen store endringer.

Cloud compare:



(a) Utglidningsvolum sett ovenfra



(b) Utglidningsvolum sett fra siden

Figur 5.11: Framstilling av volumendring for lokalitet C i *Cloud Compare*, der skalaen til høyre viser punkttetthet.

Figur 5.11 (a) viser overflatearealet av utglidningen, mens (b) viser utglidningssvolumet mellom terrengoverflatene fra 2010 (over) og 2013 (under). I dette tilfellet ble volumet mellom disse beregnet til å være 951 m^3 .

Feltobservasjoner:

Figur 5.12: Feltobservasjoner fra lokalitet C: Sekundær utglidning som har oppstått i nedsynkningen som er lokalitet C.

Bildet i figur 5.12 viser en sekundær utglidning som har skjedd ned mot lokalitet C. Denne utglidningen dro med seg vegetasjonen nedover, noe som kan ses på trestammenes “alpehorn” form. I front av bildet vises også tydelig forekomst av leire. Bildene under viser andre funn som ble gjort i felt i nærheten av denne lokaliteten.



(a) Erosjon fra dreneringsrør som er lagt i forbindelse med jordbruk, like ved nedsynkningen.



(b) Sprengstein brukt som erosjonssikring langs bekken ved utglidningsområdet

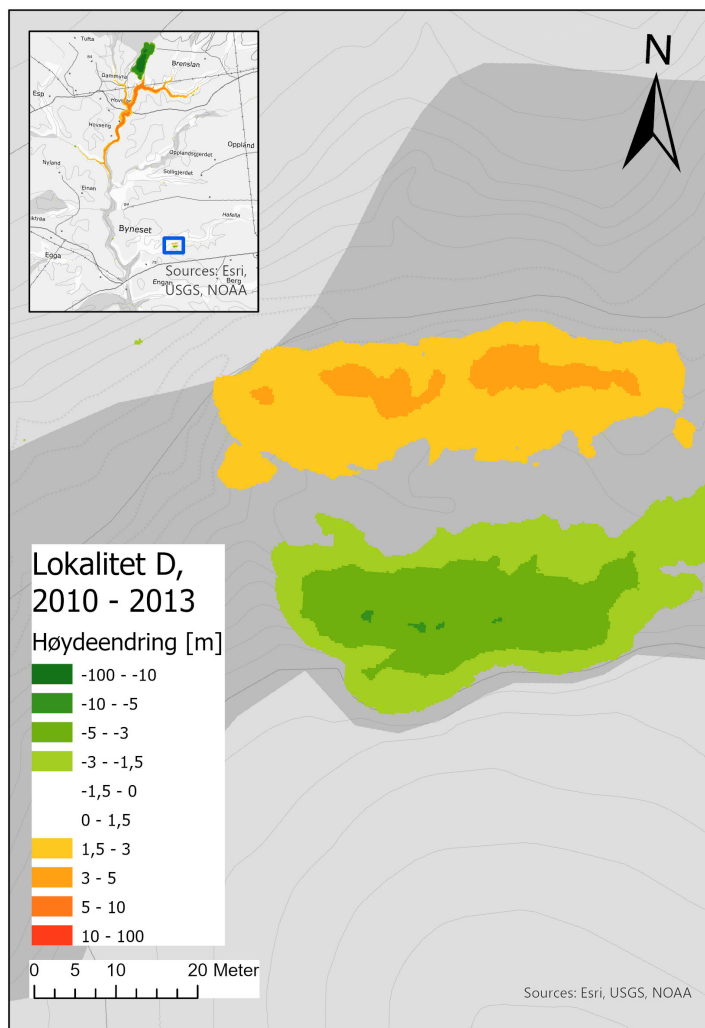
Figur 5.13: Feltobservasjoner i tilknytning til lokalitet C.

I figur 5.13 (a) vises et dreneringsrør som er lagt i forbindelse med jordbruk, der vannet strømmer ut mot lokalitet C. Her har vannet som kommer ut av røret ført til erosjon, og gravd seg ned i leirjorda som røret munner ut i. Bilde (b) viser en bekk som ligger i tilknytning til lokalitet C, her er det innført sprengstein for å hindre erosjon langs kanten av bekken.

5.1.4 Lokaltet D

Denne lokaliteten befinner seg langs en bekk i et område med mye vegetasjon. Selve utglidningen oppsto i kanten av et jorde, og utviklet seg ned mot bekken. Ut i fra volumberegningene i tabell 5.1 var dette lokaliteten som hadde hatt størst volumendring.

Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.14: Kart over lokalitet D, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

Kartet i figur 5.14 viser at det har skjedd en utglidning i det grønne området, og at massene har forflyttet seg til det gul/oransje området som er lengre ned i samme skråning. Ut ifra fargeskalaen ser det ut til at den største høydeendringen var i en størrelsesorden på -10 m - -5 m, dette var masse som gled ut og ble avsatt lengre ned i skråningen.

Flyfoto:



(a) Flyfoto 2010

(b) Flyfoto 2013

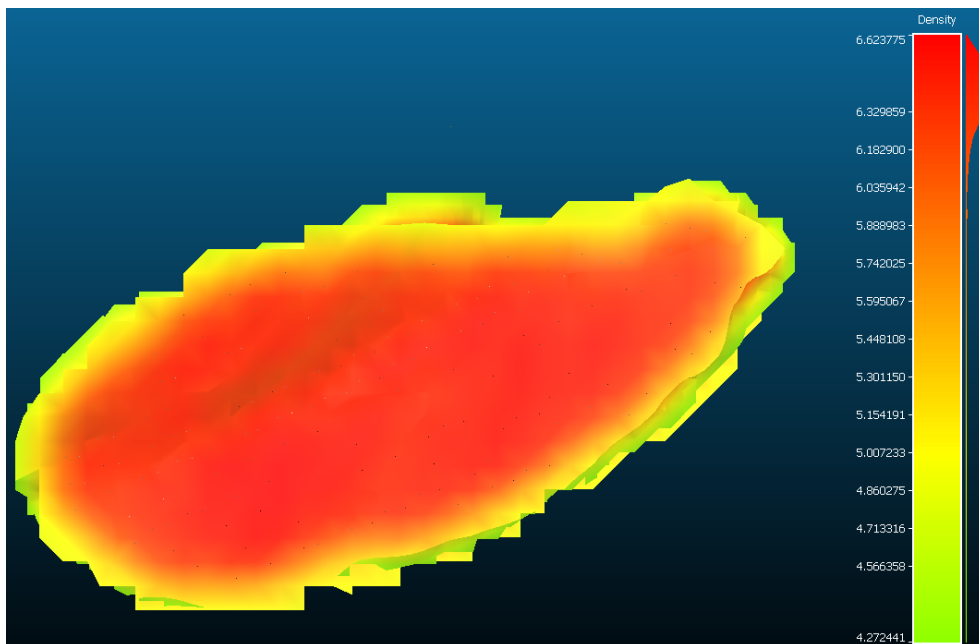


(c) Flyfoto 2022

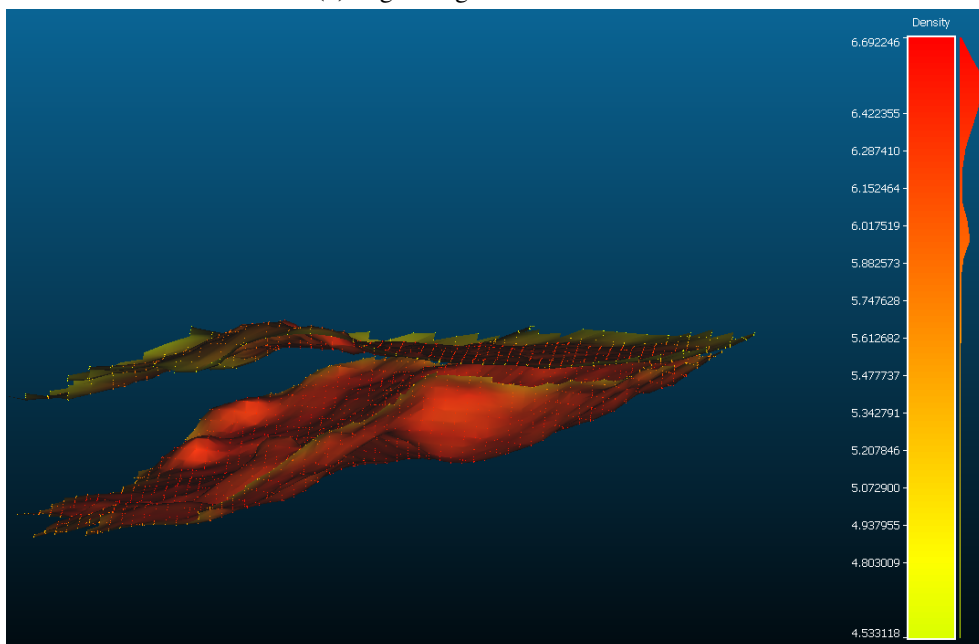
Figur 5.15: Flyfoto fra lokalitet D (Kartverket 2023a).

Sammenligning av flyfoto fra 2010 og 2013 viser at det har skjedd en utglidning, og at noe av vegetasjonen har forsvunnet. Det ser også ut til at det har skjedd en omlegging av jordet, og dette kan muligens være årsaken til at noe av vegetasjonen er borte. På flyfoto fra 2022 er ikke utglidningen lengre like tydelig, da det har vokst en del vegetasjon der.

Cloud compare:



(a) Utglidningsvolum sett ovenfra



(b) Utglidningsvolum sett fra siden

Figur 5.16: Framstilling av volumendring for lokalitet D i *Cloud Compare*, der skalaen til høyre viser punkttetthet.

Figur 5.16 (a) viser overflatearealet av utglidningen, mens (b) viser utglidningsvolumet mellom terrengoverflatene fra 2010 (over) og 2013 (under). I dette tilfellet ble volumet mellom disse beregnet til å være 1570 m^3 .

Feltobservasjoner:

(a) Rød stipletlinje viser hvor utglidningen begynner, og pilene viser hvilken retning massene beveget seg i



(b) Utglidningsområdet sett fra bunnen av skråningen. Rød stipletlinje viser hvor utglidningen startet og pilene viser bevegelsesretningen til massene

Figur 5.17: Feltobservasjoner fra lokalitet D.

Figur 5.17 (a) viser utglidningsområdet sett fra siden, mens (b) viser det samme området sett fra bunnen av skråningen. På begge bildene er utglidningskanten markert med rød stiplelinje, og piler som viser utglidningens bevegelsesretning. Denne lokaliteten var gjemt bak vegetasjon, og var derfor ikke så lett å oppdage i felt. Figur 5.18 og 5.19 viser andre oppdagelser som ble gjort i nærheten av lokalitet D.



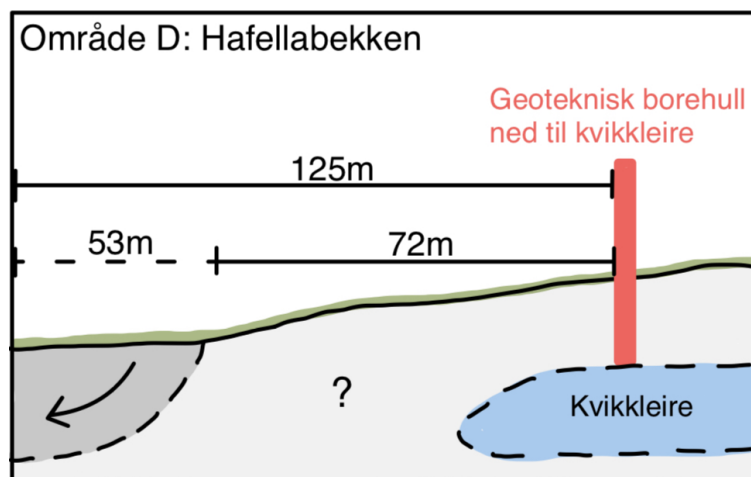
Figur 5.18: Erosjon i en liten ravine like ved utglidningsområdet. Ravinen utfolder seg fra dreneringsrør som er vist i figur 5.19.



Figur 5.19: Dreneringsrør ved lokalitet D, lagt i forbindelse med jordbrukvirksomhet.

Bilde i figur 5.18 viser en ravine der det foregår aktiv erosjon. Dette er sannsynligvis et resultat av vannet som strømmer ut av dreneringsrørene i bilde i figur 5.19, da ravinen begynner ved disse rørene og utfolder seg ned mot bekken i bunnen av skråningen.

Tverrsnittprofil:



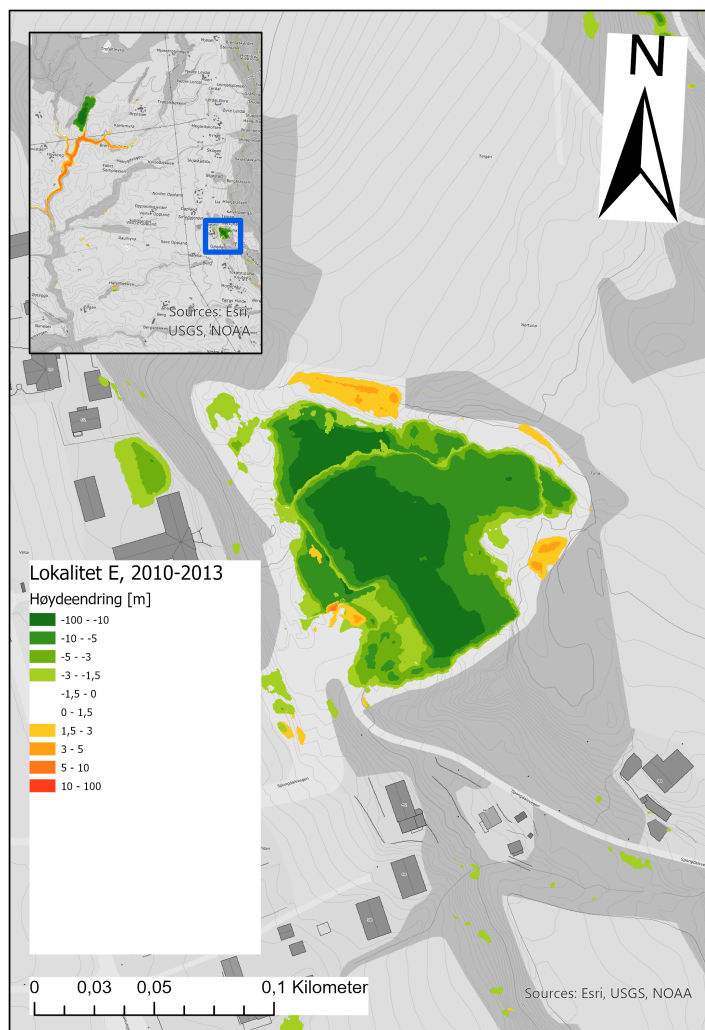
Figur 5.20: Tverrsnittprofil ved lokalitet D som viser at utglidningen som må ha skjedd mellom 2010 og 2013 har gjort at den bratte skråningen ned mot bekken nå er nærmere påvist kvikkleire. Spørsmålstegnet symboliserer at det er usikkert om massene rundt også er kvikkleire, da det ikke gjort undersøkelser der.

Undersøkelser av kart fra NADAG viser at det er gjennomført geotekniske boringer i nærheten av denne lokaliteten, som en del av prosjekt R.0558-2, der Trondheim kommune er oppdragsgiver (NGU 2023d). Undersøkelser i form av stempelprøver og dreiesondering førte til deteksjon av kvikkleire i ett av borehullene. Avstandsmålinger utført i *ArcGIS Pro* viser at det var omtrent 125m mellom borehullet som detekterte kvikkleire og skredkanten lengst unna, samt at det var ca. 72m mellom borehullet og den nærmeste skredkanten. Denne utglidningen resulterte med andre ord i at avstanden inn til et eventuelt kvikkleirelag har blitt 53 m kortere. Geotekniske boringen kan kun si noe om grunnforholdene akkurat der boringen utføres, og nøyaktiv utbredelse av kvikkleirelaget er derfor ikke kjent. Kvikkleirelaget som vises i figur 5.20 er derfor kun et hypotetisk lag.

5.1.5 Lokalitet E

Denne lokaliteten ligger i nærheten av bebyggelse, og er helt i grensen mellom berg og løsmasser på NGUs kvartærgeologiske kart.

Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.21: Kart over lokalitet E, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

Kartet i figur 5.21 viser at det har skjedd relativt store terrengendringer i et større område, der masser har blitt fjernet. GIS-analysen viste også at det ikke var noen andre liknende terrengendringer i området, og flyfoto måtte derfor undersøkes for å finne ut hva disse endringene kom av.

Flyfoto:



(a) Flyfoto fra 2010

(b) Flyfoto fra 2013



(c) Flyfoto fra 2022

Figur 5.22: Flyfoto fra lokalitet E (Kartverket 2023a).

Flyfoto fra 2010 og 2013 viser i begge tilfellene at denne terrengendringen kommer av masseuttak i berg. Dette området befinner seg i grenseområdet mellom berg og løsmasser i følge kart fra NGU, og det var derfor ikke mulig å se at det var masseuttak fra berg som skyldtes utslaget på GIS-analysen.

Feltobservasjoner:



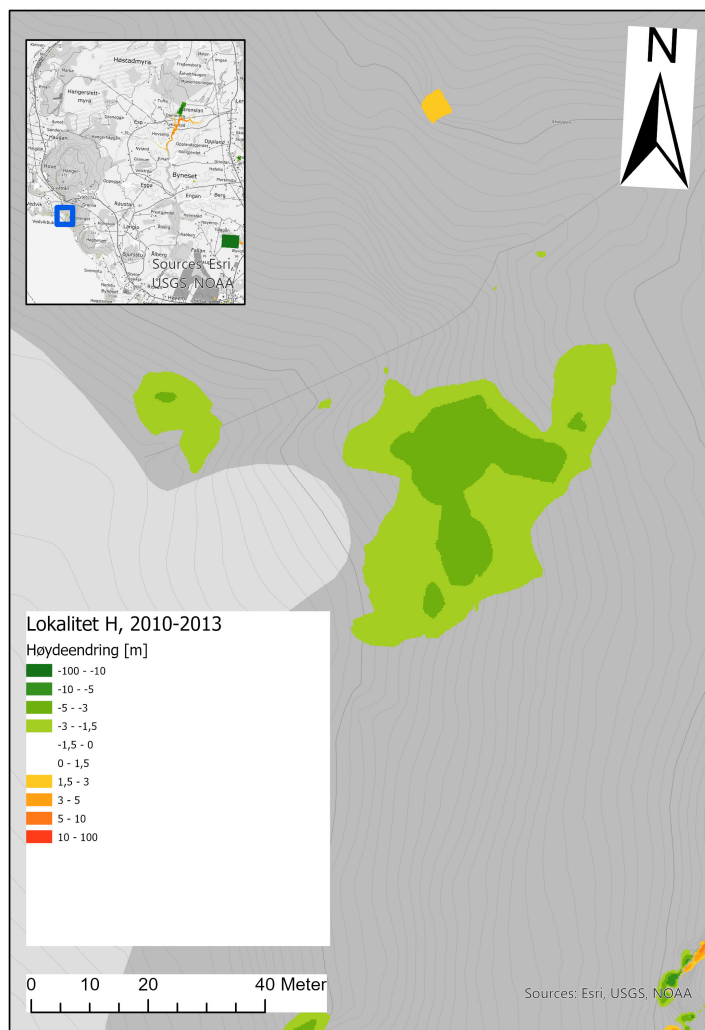
Figur 5.23: Feltobservasjonene fra lokalitet E: Masseuttak i berg.

Feltobservasjonene bekreftet at det var et masseuttak i berg som var årsaken til de store høydeendringene i dette området.

5.1.6 Lokalitet H

Denne lokaliteten befinner seg lengst unna de andre, og er lokalisert i et skogsområde med mye vegetasjon.

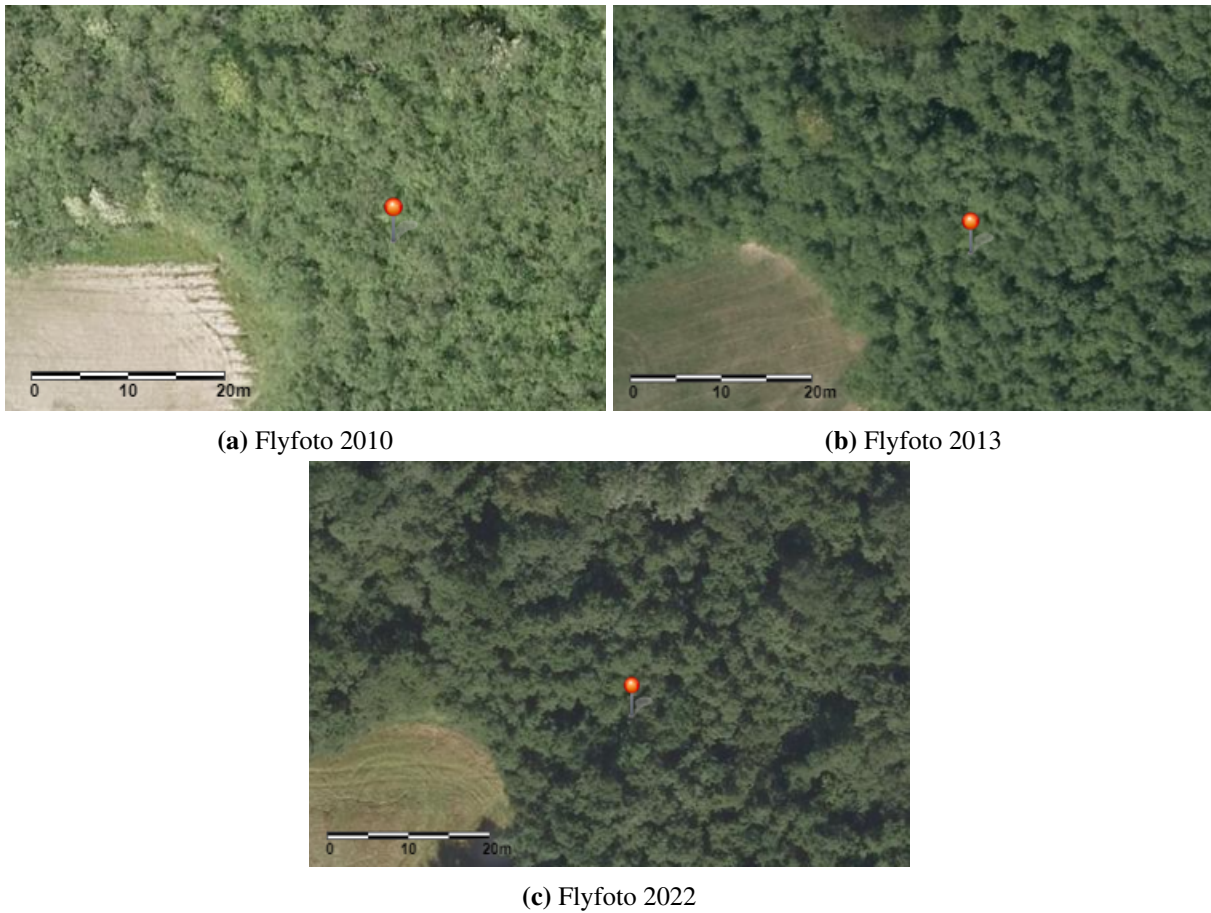
Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.24: Kart over lokalitet H, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

I følge kartet på figur 5.24 har det skjedd høydeendringer på 3 - 5 m i negativ retning på det meste. Rundt dette området har det skjedd mindre høydeendringer på 1,5 - 3 m, også i negativ retning.

Flyfoto:



Figur 5.25: Flyfoto fra lokalitet H (Kartverket 2023a).

Alle tre flyfotoene viser at området med terrengendringer er dekket av vegetasjon og det er derfor ikke mulig å se hva som har skjedd der.

Feltobservasjoner:

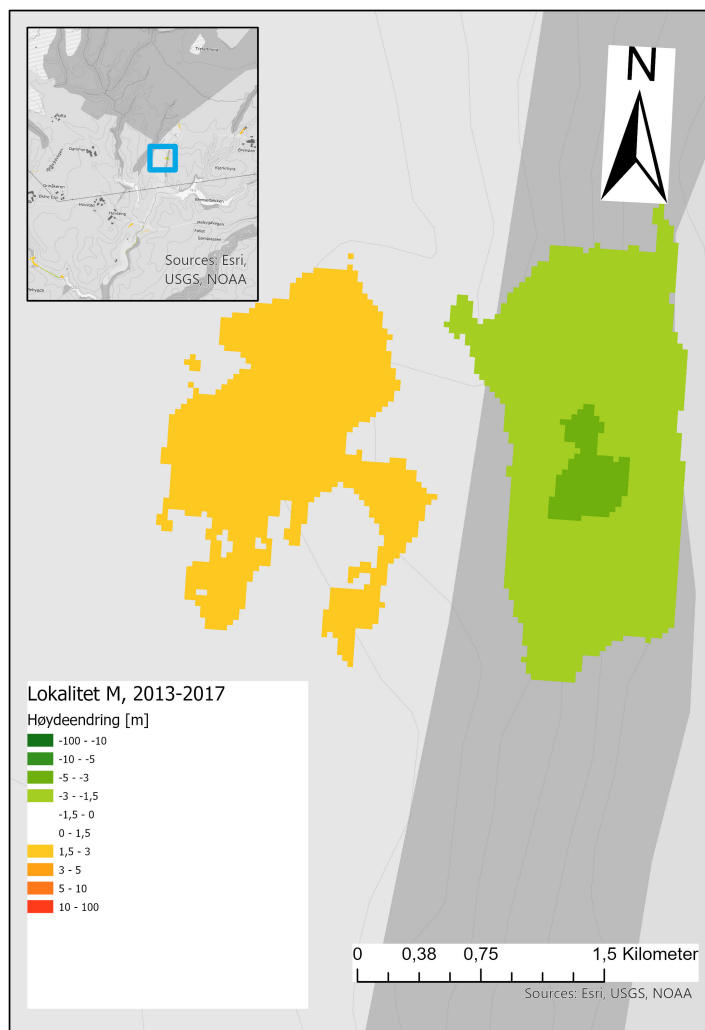
Figur 5.26: Feltobservasjoner fra lokalitet H. Mye vegetasjon, samt “alpehorn”-form på noen av trærne som tyder på jordsig.

Det ble ikke funnet noen tydelige terrengendringer under feltobservasjonen. Området var preget av vegetasjon, noen bergblotninger og generelt relativt tynt jordartsdekke. Det har vært noe jordsig i området, slik det vises på “alpehorneformen” til trærne i bildet til høyre. At det ikke ble funnet noen større terrengendringer tilsier at dette er et falskt positivt resultat i terrengendringsanalysen.

5.1.7 Lokalitet M

Denne lokaliteten ligger i skredkanten etter kvikkleireskredet i 2012. Her har det skjedd en utglidning i et område med vegetasjon.

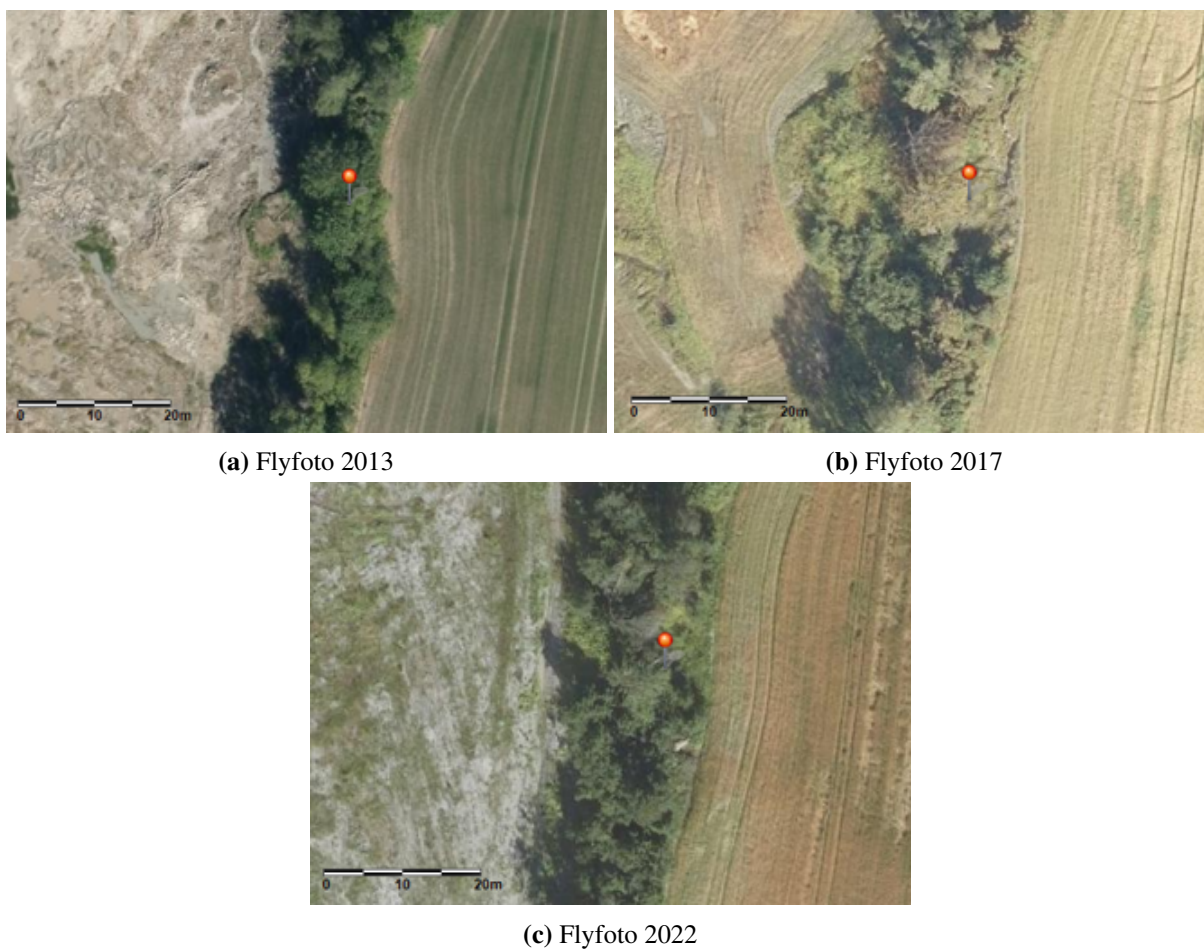
Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.27: Kart over lokalitet M, som viser beliggenhet og hvor store høydeendringene er for den aktuelle terrengendringen.

Kartet i figur 5.27 viser at det har skjedd en masseforflytning fra det grønne til det oransje området. Denne terrengendringen oppsto i skredkanten til kvikkleireskredet i 2012, og skjedde i tidsperioden 2013-2017. På det lille oversiktskartet øverst til venstre i figur 5.27 er ikke skredområdet fra 2012 like tydelig som det er på kartene for noen av de andre lokalitetene. Dette skyldes at dette kartet kun viser endringer som har skjedd mellom 2013 og 2017.

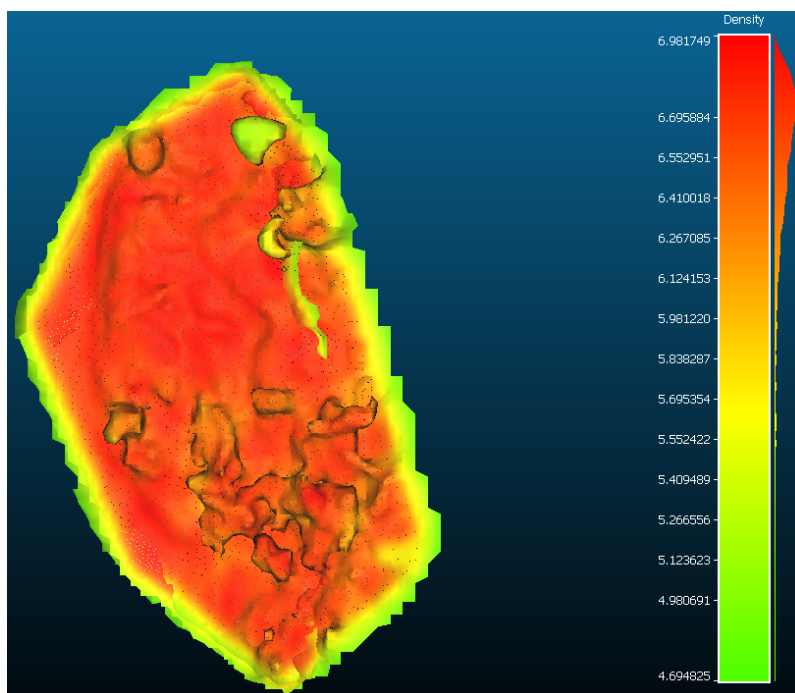
Flyfoto:



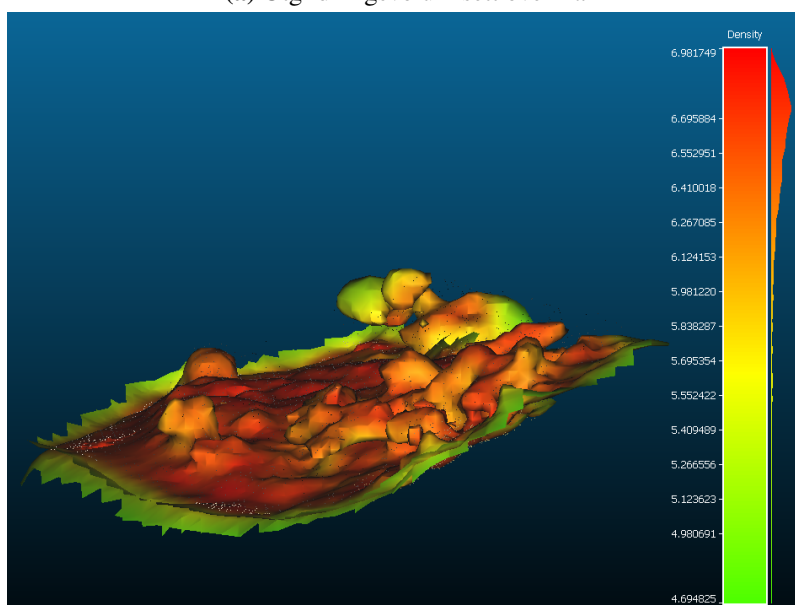
Figur 5.28: Flyfoto fra lokalitet M (Kartverket 2023a).

I 2013 er området dekket av vegetasjon, mens i 2017 er vegetasjonen borte og det er mulig å se en masseansamling til venstre for det røde punktet som ikke var der i 2013. I 2022 har det vokst enda mer vegetasjon i området og det kan se ut som at masseansamlingen har blitt mindre og at området i større grad har blitt bearbeidet.

Cloud compare:



(a) Utglidningsvolum sett ovenfra



(b) Utglidningsvolum sett fra siden

Figur 5.29: Framstilling av volumendring for lokalitet M i *Cloud Compare*, der skalaen til høyre viser punkttetthet.

Figur 5.29 (a) viser utglidningsvolumet mellom terrengoverflatene fra 2013 (over) og 2017 (under). I dette tilfellet var det mye vegetasjon som førte til at det ble dannet en modell med mange forstyrrelser. Volumberegningen som ble gjort relatert til denne modellen er på grunn av dette ikke så nøyaktig. Volumet ble beregnet til 759 m^3 .

Feltobservasjoner:



Figur 5.30: Utglidning sett fra siden.



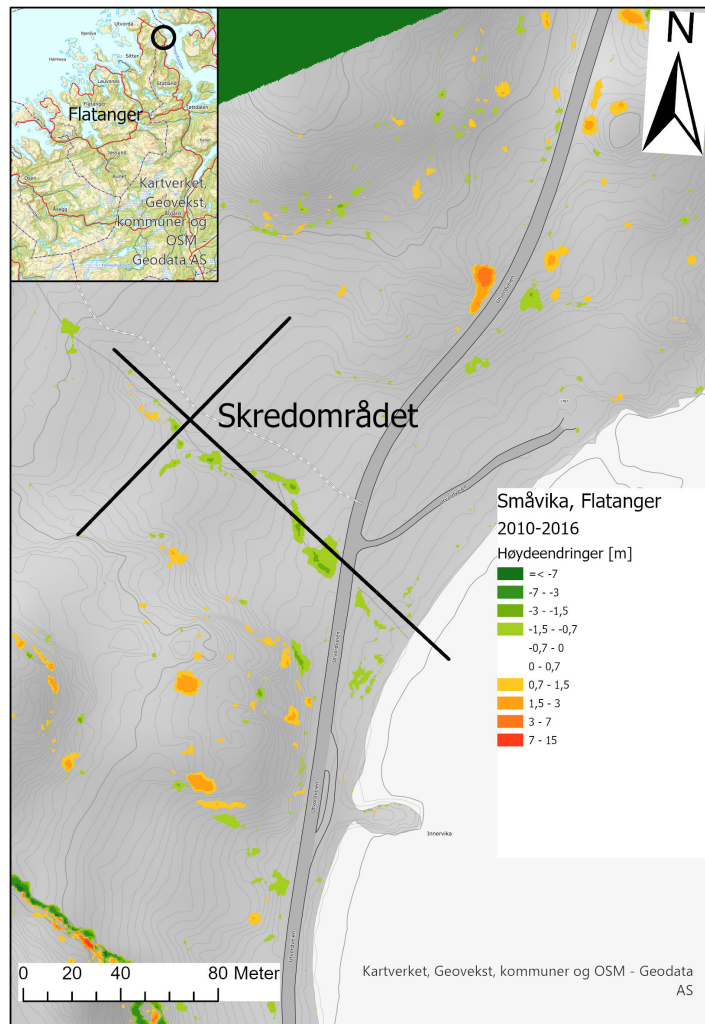
Figur 5.31: Utglidning sett forfra med person som referanse for størrelse.

Feltobservasjonene viste en tydelig utglidning i skredkanten, og det hadde vokst lite vegetasjon foruten leirfivel, noe som tyder på at utglidningen har skjedd relativt nylig.

5.2 Flatanger

10. Mars 2023 ble det utløst et kvikkleireskred ved Småvika i Flatanger. Skredet utfoldet seg i nærheten av en bekk som gikk ned mot vannet. Totalt raste et volum på ca. 300 000 m³ ut (Zeiner 2023).

Analyse i ArcGIS Pro:



Figur 5.32: Kart over Småvika i Flatanger, der skredet gikk. Profilet markerer skredets bredde (ca.150 m) og utstrekning.

Skredområdets beliggenhet og utstrekning er markert på figur 5.32, der det vises hvor skredområdet er bredest (ca. 150 m utstrekning) og at skredmassene forplantet seg ut i havet (Zeiner 2023). Her har det skjedd høydeendringer i negativ retning i tilknytning til bekken som ligger sentralt i skredområdet.

Flyfoto:



Figur 5.33: Flyfoto fra Småvika, Flatanger (Kartverket 2023a).

Da det ikke var tilgjengelige flyfoto fra de samme tidspunktene som det ble hentet LiDAR-data fra (2010 og 2016) på norgebilder.no, ble flyfoto fra 2008, 2013 og 2020 brukt i stedet. Den røde nålen er plassert ca. midt i skredområdet, og alle tre flyfoto viser at dette er et område med mye vegetasjon. Det framkommer ingen tydelige terrengendringer på disse flyfotoene, men de gir et inntrykk av hvordan området så ut før skredet inntraff.

Falskt positive og falskt negative resultater

GIS-analysene som ble gjennomført i denne oppgaven har resultert i noen interessante funn av leirutglidninger og avdekker forhold som analysen hadde som formål å undersøke. Der er også funn som ikke er relaterte til leirutglidninger som viser at resultatene ikke alltid er til å stole på. Falskt positive eller falskt negative resultater er to begreper som ofte brukes i denne sammenheng. Funn som viser seg å være falskt positive er resultater som avdekker noe som ikke er der, eller som er utenfor interesseområdet for analysen. I denne analysen kan dette dreie seg om terrengendringer som viser seg å skyldes menneskelige inngrep, eller endringer som ikke er reelle og for eksempel skyldes feil ved datainnsamlingen. Motsetningen til slike funn er falskt negative resultater, som er funn som har blitt oversett eller ikke har blitt avdekket selv om de er av interesse for det som analyseres. Dette kan i denne sammenheng dreie seg om terrengendringer som på GIS-analysen ser mindre ut enn de i virkeligheten er, eller endringer som er der, men som ikke blir oppdaget i det hele tatt. Å avdekke falskt positive eller falskt negative resultater kan være utfordrende, og eventuelle funn bør derfor vurderes nøye og gjerne sammenlignes med data fra andre kilder dersom det er mulig. I denne oppgaven ble flyfoto og feltundersøkelser brukt for å bekrefte eller avkrefte eventuelle funn av terrengendringer i GIS-analysen, dette førte også til at falskt positive resultater ble avdekket, slik som for lokalitet E og H.

Figur 5.34 og 5.35 viser tre falskt negative resultater som ble oppdaget på vei til lokalitet B og C. Disse terrengendringene ble ikke avdekket i GIS-analysene eller på flyfoto, men var godt synlige i felt. Erosjonen som vises i figur 5.34 ser relativt fersk ut, noe som kan være årsaken til at den ikke ble registrert i terrenganalysen som bruker noen år gammel LiDAR-data.



Figur 5.34: Erosjon i en skråning som ble oppdaget på vei til lokalitet B. Dette ble ikke oppdaget i GIS-analysen og det klassifiseres derfor som et falskt negativt resultat.



(a) Utglidning ved lokalitet C

(b) Utglidning ved lokalitet C

Figur 5.35: Utglidninger oppdaget på vei til lokalitet C. Disse ble ikke oppdaget i GIS-analysen og kan derfor betraktes som falskt negative resultater. Person brukt som referanse for størrelse.

6 Diskusjon

I dette kapittelet vil resultatene drøftes opp mot relevant litteratur og følgende spørsmål fra problemstillingen:

Kan GIS-analyse av LiDAR-data fra ulike år brukes til deteksjon av kritiske terrengendringer i områder preget av marine avsetninger og kvikkleire?

- *Hvordan kan støy skilles fra reelle terrengendringer som kan være kritiske for stabiliteten i grunnen?*
- *Kan terrengendringsanalyse i GIS bidra til å kartlegge faresoner for kvikkleireskred?*

Dette vil også drøftes opp mot et samfunnsøkonomisk perspektiv angående kostnadene som brukes på overvåkning og sikringstiltak, sammenlignet med kostnadene et kvikkleireskred kan medføre. I tillegg vil erfaringer fra analysene, og forslag til videre arbeid diskuteres.

6.1 Deteksjon av kritiske terrengendringer

6.1.1 Kritiske terrengendringer

Analysene som er brukt i denne oppgaven har vist at det er mulig å detektere terrengendringer i *ArcGIS Pro* ved bruk av LiDAR-data fra ulike år. Ikke alle terrengendringer er relevante, og det er i hovedsak kritiske terrengendringer i områder preget av marine avsetninger og kvikkleire, som er av interesse i denne konteksten. Dette innebærer endringer som kan påvirke og utløse et initialskred, samt endringer som kan bidra til at initialskred videreutvikler seg til et farlig kvikkleireskred. I den anledning er det nødvendig å evaluere skredutløsende årsaker for kvikkleireskred. Tabell 2.1 fra teorikapittelet viser de vanligste årsakene til kvikkleireskred. Ikke alle årsaker er mulig å oppdage ved terrengendringsanalyse i GIS da ikke alle er relatert til terrengendringer som skjer over tid. Jordskjelv og sprengning er forhold som ofte skjer i løpet av veldig kort tid, og som derfor ikke vil rekke å bli registrert før et eventuelt skred utløses som følge av dette. Dreneringsinngrep og hydrometeorologiske forhold påvirker gjerne ikke terrenget umiddelbart, men kan over tid resultere i graving og erosjon, og dette kan da oppdages i terrengendringsanalysen. Tabell 6.1 under, er en redigert utgave av 2.1 med fargeinndeling der grønn viser utløsende årsaker som det er mulig å registrere ved GIS-analyse slik det har blitt gjort i

denne oppgaven, og rød de som ikke er det.

Tabell 6.1: Utløsende årsaker til kvikkleireskred delt inn i farger som viser om det er mulig å oppdage de på GIS-terrengendringsanalyse slik de er utført i denne oppgaven. Grønn = mulig å oppdage, rød = vanskelig/ikke mulig å oppdage.

UTLØSENDE ÅRSAKER KVIKKLEIRESKRED	
Naturlige prosesser	Menneskelig påvirkning
Erosjon	Utbygging og gravingsarbeid
Andre skredhendelser	Boring
Jordskjelv	Fyllingsarbeid, planering av jord
Hydrometeorologiske forhold	Sprengning
(nedbør, snøsmelting, økt poretrykk, flom osv.)	Dreneringsinngrep

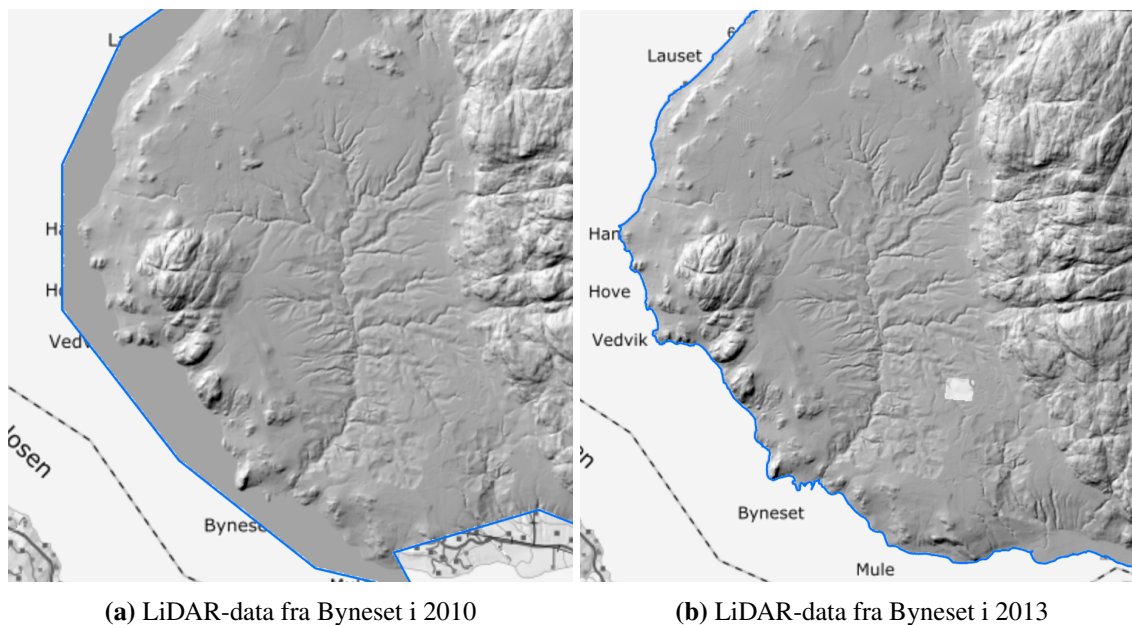
I mange tilfeller endrer sannsynligheten for skred seg over tid, som følge av for eksempel klima- og terrengendringer. Dette var tilfellet på Gjerdrum der mange år med erosjon i “Tistilbekken”, viste seg å være en sentral årsak til utløsning av kvikkleireskredet i 2020 (Bruvoll mfl. 2021). Terrengendringsanalyse kan i slike tilfeller være et nyttig verktøy, da det gjør det mulig å overvåke utviklingen av slike endringer. Dette kan forhåpentligvis bidra til at videre undersøkelser utføres, og eventuelle sikringstiltak blir vurdert.

6.2 Skille støy fra relevante terrengendringer

6.2.1 Støy og mangler fra innsamling, overføring og lagring av LiDAR-data

Det har nå blitt presisert hvilke type terrengendringer som er relevante for analysene i denne oppgaven, men det er i midlertid ikke alltid like lett å skille disse fra andre terrengendringer og støy i analysene i *ArcGIS Pro*. Støy kan i denne sammenheng relateres til forstyrrelser som har oppstått i forbindelse med innsamling, overføring og lagring av LiDAR-data. Dette kan for eksempel dreie seg om manglende datagrunnlag fra et område, eller feilaktige resultater som viser andre verdier enn det som er reelt. Et eksempel på det først vises på figur 6.1, som er skygge-relieff av LiDAR-data fra Byneset fra 2010 og 2013. Begge disse har blitt brukt som inputdata i GIS-analysen for å finne endringene som har skjedd mellom dem. På figur 6.1 (a) er det et område nederst til høyre som ikke er inkludert i det markerte området som viser hvor det har blitt utført LiDAR-målinger, mens på figur (b) er det en lysegrå firkant til høyre på nedre halvdel som

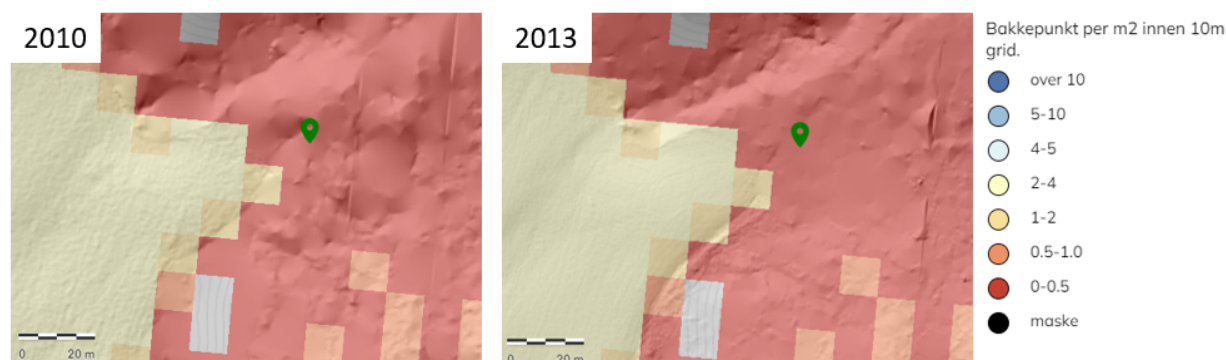
det mangler data fra. Dette gjenspeiles også i GIS-analysen, der pikslene i rasteren som manglet data ble interpolert. I dette tilfellet ble resultatet at områdene som manglet datagrunnlag fikk høydeendringer på ca. 100 meter, noe som virket svært usannsynlig da det var i stor kontrast til høydeendringene i rundtliggende områder. Det ble derfor besluttet å se bort i fra disse områdene, og de er derfor markert i hvitt på kartet i figur 5.1.



Figur 6.1: LiDAR-data fra Byneset fra to ulike år. Noen av områdene mangler datagrunnlag og gjør det derfor ikke mulig å utføre terrengendringsanalyse på de stedene. Dette gjelder nederst til høyre på bilde (a), og den lysegrå firkanten til høyre i bilde (b) (Kartverket 2023b).

Tett vegetasjon har vist seg også å være en utfordring relatert til LiDAR-målinger da det hindrer lasermålingene å nå bakkeoverflaten, noe forskning utført av (Wedajo 2017) også kan bekrefte. I GIS-analysene som ble utført i denne oppgaven var det flere lokaliteter som ble registrert i områder med tett vegetasjon, og da dette også hindret vurdering av bakken fra flyfoto ble det knyttet større usikkerhet til disse resultatene. En av disse var lokalitet, H, som ble undersøkt som en del av feltarbeidet. I GIS-analysen ble høydeendringer opptil 4,6 m registrert, men ved befaring i felt viste det seg at dette ikke var reelt. Feltundersøkelsene ble gjennomført over 10 år etter at LiDAR-dataene ble samlet inn (2010-2013), og det er mange faktorer som kan ha ført til at vertikale høydeendringer ikke lengre var synlig i felt. Slik bildene som ble tatt i felt 10. mai 2023 viser (figur 5.26) er det tett vegetasjon i området ved lokalitet H, og “alpehorn”-formen på noen av trærne tyder på at det har forekommet jordsig. Foruten dette var det ingen tydelige tegn på at det hadde forekommet større terrengendringer. Det kan være mange mulige forklaringer til

dette, blant annet kan det ha blitt utført inngrep i terrenget i senere tid som har ført til utjevning av høydeforskjellene. I dette tilfellet var det i midlertid ingen antydninger til at det hadde blitt utført noen slike inngrep, og det rettes derfor en sterk mistanke mot at tett vegetasjon har ført til at det ble registrert feil høyde på denne lokaliteten. For å undersøke dette nærmere har tettheten av punktskyene fra LiDAR-målingene i dette området blitt studert. Dersom det er lav punkttetthet betyr det at flere piksler i rasterdataene i forandringanalysen må interpoleres og det vil være knyttet en større usikkerhet til disse verdiene. Slik figur 6.2 viser, befinner lokalitet H seg i et rødt område med punkttetthet 0 - 0,5 bakkepunkt per kvadratmeter.



Figur 6.2: Punkttettheten for lokalitet H på Byneset fra 2010 og 2013 LiDAR-data. Grønt punkt viser lokalitetens beliggenhet, og fargeskalaen til høyre viser hvor mange punkter det er per kvadratmeter (Kartverket 2023b)

Ut i fra fargeinndelingen på figur 6.2 kan det tyde på at vegetasjonen har hatt innvirkning på punkttettheten da de røde områdene er skogsområder med mye trær, mens det gule området som har høyere punkttetthet er et jorde uten særlig vegetasjon. Denne arealbruken kommer tydelig fram ved sammenligning av flyfoto fra området som vises i figur 5.25. Figur 6.2 viser også visuelt at røde områder fremstår som “glatte og triangulerte”, som tyder på lav datatetthet og omfattende interpolasjon. Et annet forhold som må tas i betraktning er at LiDAR-målingene ble utført i juni og juli (oppgitt i tabell 3.1), som er den tiden på året da vegetasjonen er tettest. Det kan derfor antydes at lav punkttetthet grunnet tett vegetasjon kan ha ført til feil i registreringen av høydeendringer på denne lokaliteten. Om dette var tilfellet for de andre lokalitetene som befant seg i områder med mye vegetasjon er usikkert da de ikke ble undersøkt i felt. Punkttettheten for disse ble likevel undersøkt, og er gitt i vedlegg B.1 og B.2. Ut ifra de vises det at punkttettheten er lav også for disse lokalitetene, og det er sannsynlig at dette har hatt innvirkning på hvor mange punkter som har blitt interpolert og dermed påvirket resultatene i GIS-analysen.

I NGU rapport 2021.023 av Penna og Solberg 2021, har det blitt gjennomført lignende terrengeanalyser for Gjerdrum i etterkant av skredet. Også her kommer det fram at tett vegetasjon førte til lavere punkttetthet, og at interpolasjon var mer nødvendig jo tettere vegetasjonen og færre bakkepunkter som ble registrert. Lignende funn angående LiDAR-datas begrensninger i tett vegetasjon har også blitt gjort i studier av Skjærpe mfl. 2017 og Risbøl mfl. 2011. Disse understreker at dette er mest problematisk på sommerhalvåret og medfører at punkttettheten for terrengoverflaten derfor blir lavere i slike områder. På bakgrunn av alt dette kan det fastslås at tett vegetasjon er en generell utfordring ved innsamling av LiDAR-data, og at denne utfordringen kan videreføres til terrengeanalyser. Dette er noe å være klar over til framtidige analyser og bruk av LiDAR-data.

6.2.2 Grenseverdier for å skille ut terrengendringer som ikke har innvirkning på grunnstabilitet

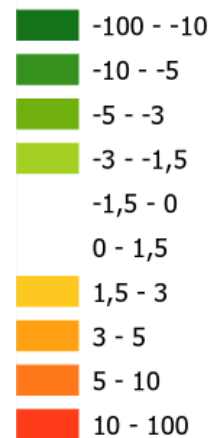
De variantene av støy som til nå har blitt presentert representerer utfordringer eller mangler ved LiDAR-dataene. Det finnes også andre typer støy, og i denne sammenheng er det knyttet til terrengendringer som ikke har betydning for grunnstabiliteten. Dette inkluderer et vidt spekter av terrengendringer og støykilder, og i mange tilfeller er disse områdespesifikke. Det gjelder også for Byneset som er et jordbruksområde med mye dyrket mark, noe som påvirker terrengoverflaten i stor grad. Marin leire er kjent for å være godt egnet for jordbruksformål da dette er næringsrik og finkornet jord som legger til rette for gode vekstforhold. Dette fører til at jorder pløyes og dyrkes, noe som også kommer tydelig fram på GIS-analysene der pløyingsmønster på åkrene kommer tydelig fram. Dette er en type støy som det er lett å kjenne igjen, og som det er ønskelig å skille ut fra analysen. Det er riktig nok ingen metode som kan skille ut kun jordbruksaktivitet i *ArcGIS Pro*, og andre egenskaper må derfor legges til grunne. I dette tilfellet ble det løst ved å velge grenseverdier basert på størrelsene på terrengendringene som ble observert i området. Typiske verdier for pløying og jordsmonnutvikling ble undersøkt, samt at ulike verdier ble prøvd ut i analysen for å se hvordan de fungerte i praksis. Pløying er en prosess som vanligvis utføres to ganger i løpet av året, på høsten og om våren. Det varierer hvor dypt ned i jorda pløgen pløyer, men vanlig dybde er 15-25 cm og sjeldent dypere enn dette (Johannessen 2022). Samtidig viser andre kilder at åkerproduksjon gjerne skjer i en dybde ned til 100 cm (Arnoldussen og Olsen 2016), og at jordsmonnutvikling i marin leire kan skje ned til 150 cm dybde (Nyborg 2008). Det er sjeldent at det gjøres inngrep som går dypere enn dette i forbindelse med jordbruk, og det ble

derfor utprøvd grenseverdier fra 0,25 m til 1,5 m i både høyde og dybde for å undersøke hvilke verdier som fjerner mest mulig støy. Dette ble gjort ved å farge høydeendringene innenfor det valgte grenseverdiintervallet i samme farge som bakgrunnskartet, slik at de ikke ble synlige. Til slutt ble grenseverdiene for fjerning av støy satt til -1,5 m - 1,5 m, da verdier lavere enn dette fortsatt viste synlige tegn på jordbruksvirksomhet. Det kan ikke utelukkes at andre terrengendringer også ble filtrert bort som en del av støyen, men på grunn av mengden støy ble det prioritert å filtrere bort så mye som mulig av denne framfor å detektere alle mulige terrengendringer. I tillegg ville det vært vanskelig å skille disse fra hverandre da filtreringen kun baserer seg på høydeendringer.

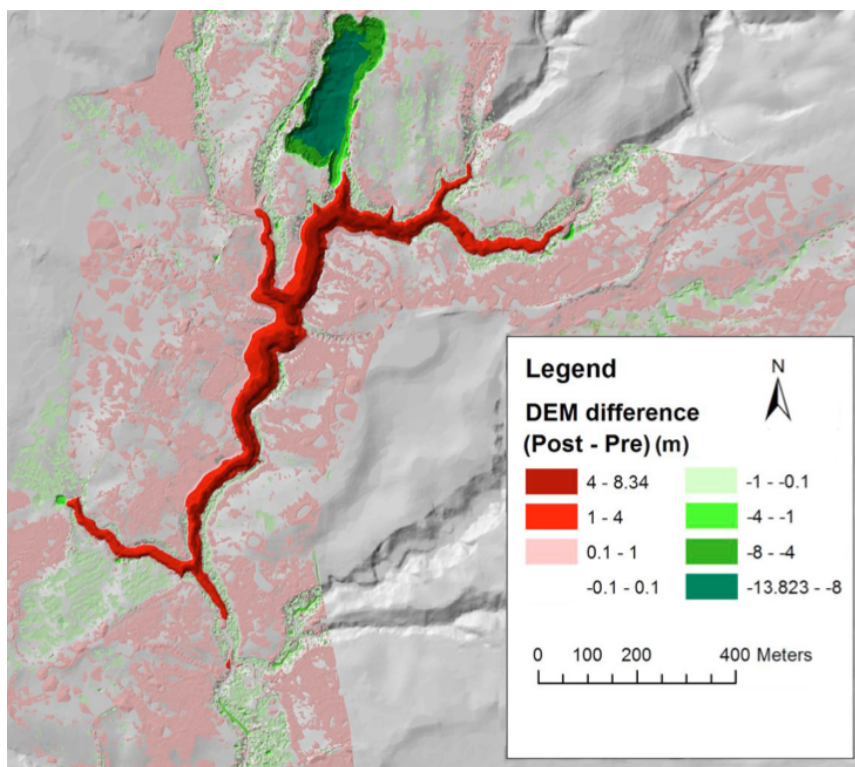
For å skille terrengendringene som var større enn -1,5 m - 1,5 m fra hverandre, ble det valgt ulike grenseverdier med tilhørende fargeinndeling for disse også, slik det vises i figur 6.3 til høyre. Her tilsvarer mer intens farge større høydeendring, gitt i meter. Terrengendringer i høydeintervallene som strekker seg fra -100 - -10 meter og 10 - 100 meter er heller sjeldne, men kan forekomme for eksempel i forbindelse med store skred. Dette vises på kartet i figur 5.2 der sentrale deler av skredgruppa etter kvikkleireskredet på Byneset i 2012 er farget i den mørkeste grønnfargen.

NIFS rapport nr. 46/2013 (Issler mfl. 2013) har også utført en terrenganalyse for Byneset som vises i figur 6.4. Fargeinndelingen som er valgt ligner på den som er brukt i denne oppgaven, men med litt andre verdier. Høydeintervallet som er valgt for støyfjerning er betraktelig lavere, da det går fra -0,1 - 0,1 m. Det er ingen begrunnelse for valg av dette høydeintervallet i rapporten, men da formålet er å avgrense utløpsområdet (mørk grønnfarge) og avsetningsområdet (mørk rødfarge) etter kvikkleireskredet i 2012, er ikke behovet for fjerning av støy like stort. Ved å ha et så lite høydeintervall for støyfjerning vil mye støy fortsatt vises i analysen, slik terrengendringene markert i lys rød (0,1 - 1 m) og lys grønn (-1 - -0,1 m) i figur 6.4 er eksempel på. Slik bakgrunnsstøy er ikke inkludert i denne oppgaven da det kan føre til at større terrengendringer som gjerne er mer kritiske, ikke vises like godt.

Høydeendring [m]

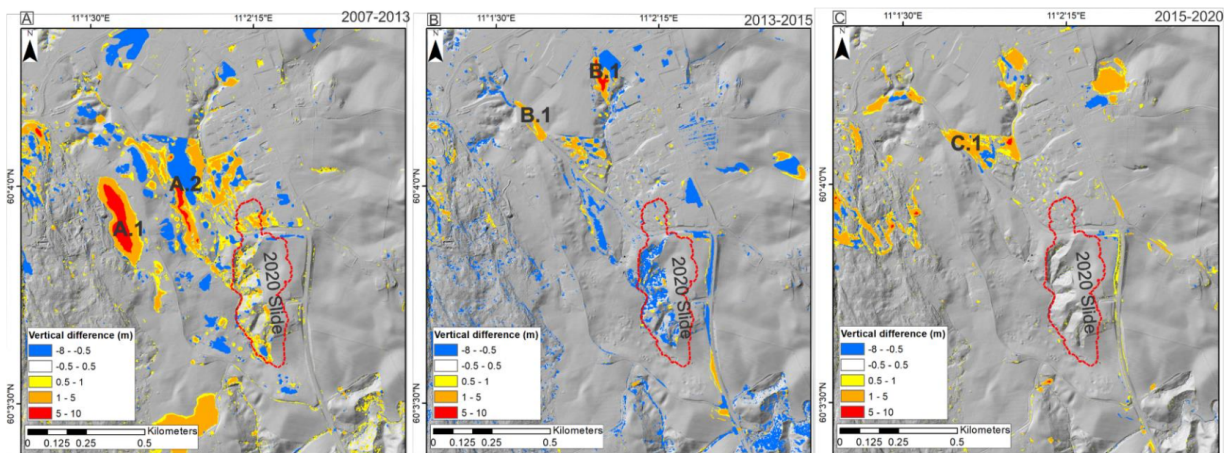


Figur 6.3: Fargeskala basert på grenseverdiene som ble brukt i GIS-analysen på Byneset.



Figur 6.4: Terrenganalyse utført etter kvikkleireskredet på Byneset i 2012. Her vises avsatte masser i rød og fjerning av masser i grønt (Issler mfl. 2013).

I NGU rapport 2021.023 (Penna og Solberg 2021) angående landskapsendringer i Gjerdrum etter skredet i 2020, er både fargeinndeling og grenseverdier for støyfjerning ulikt det som til nå ha blitt presentert. Figur 6.5 viser terrengendringsanalyse utført for tre ulike tidsperioder i forkant av skredet. Skredgropa fra 2020 er markert med rødt, og de største endringene i hver periode er markert med bokstav og tall. Her er det valgt $-0,5 \text{ m} - 0,5 \text{ m}$ som intervall for støyfjerning, noe som fortsatt er betraktelig lavere enn det som er brukt for Byneset i denne oppgaven. Igjen kan dette ha sammenheng med analysens formål, som i dette tilfellet er relatert til deteksjon av landskapsendringer i forkant av kvikkleireskredet på Gjerdrum. I tillegg kan enkelte forhold ved terrenget være områdespesifikke, slik som jordbruket er for Byneset, og dette kan ha innvirkning på hvilke høydeverdier som er valgt. Det kan imidlertid se ut til at det er mindre bakgrunnsstøy i denne analysen enn det var for figur 6.4, noe som er resultat av høyere støyfjerningsintervall.



Figur 6.5: Terrengendringsanalyse utført i programvaren *ArcMap* i etterkant av Gjerdrumskredet i 2020. LiDAR-data fra tre tidsperioder for det samme området ble brukt som input, der formålet var å detektere terrengendringer som oppsto i forkant av skredet. De største terrengendringene som har skjedd i hver av tidsperiodene er markert med en bokstav og et tall på hvert av bildene (Penna og Solberg 2021).

For Småvika i Flatanger ble andre grenseverdier valgt, da dette er et område med andre forutsetninger enn på Byneset. Dette er først og fremst ikke et jordbruksområde, men et område med mye vegetasjon som befinner seg rett ved havet. I tillegg er dette et mye mindre område enn Byneset, noe som gjorde lettere å få oversikt over terrengendringene der. Da formålet for GIS-analysen i dette området var å avdekke terrengendringer som kan ha bidratt til skredutløsning, var det i dette tilfellet nødvendig å undersøke endringer av ulike størrelser. Den laveste terskelverdien ble derfor satt til $\pm 0,7$ m, slik at også mindre endringer ble vurdert som mulig påvirkning til skredutvikling. Hele fargeskalaen som ble brukt vises i figur 6.6. Analysene fra Flatanger har et formål som i større grad ligner på det som ble gjort i NGU rapporten av Penna og Solberg 2021, enn for analysene fra Byneset utført i denne oppgaven. Dette kan også være noe av grunnen til at grenseverdiene for støy er mer like for Flatanger og Gjerdrum.

Høydeendringer [m]



Figur 6.6: Fargeskala basert på grenseverdiene som ble brukt i GIS-analysen ved Småvika i Flatanger

På GIS-analysene for Flatanger (figur 5.32) kan det se ut til at grenseverdiene for støyfjerning

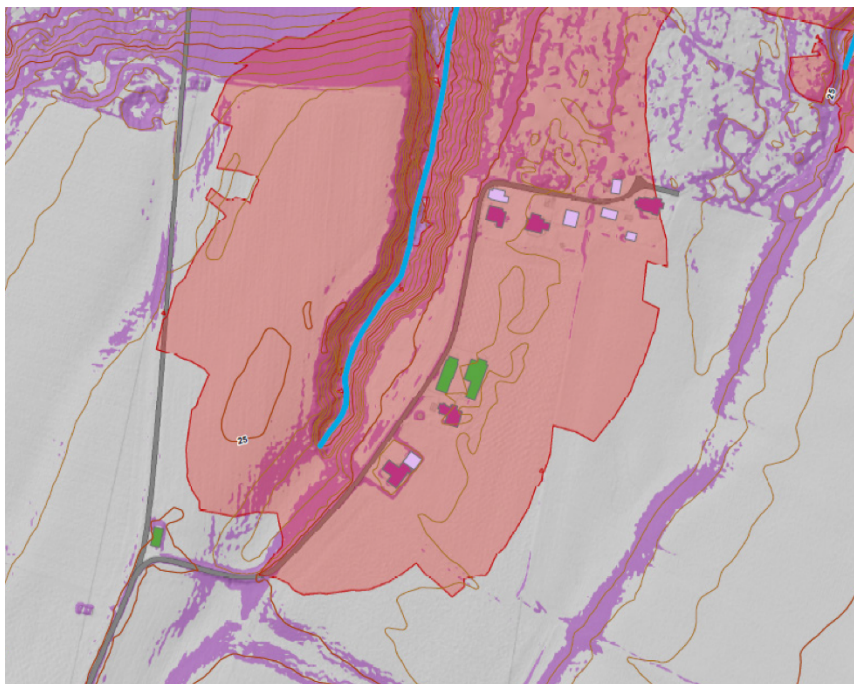
har fjernet det meste av bakgrunnsstøyen, og framhevet de resterende terrengendringene. Det ser ut til at det har vært betydelig erosjon i bekken som ligger sentralt i skredområdet, der utløpsområdet i stor grad følger bekkeleiet. Ut ifra fargeskalaen på figur 5.32 har erosjonen ført til høydeendringer i intervallet -0,7 m til -3 m. Med utgangspunkt i disse opplysningene er det ikke usannsynlig at erosjon som har foregått over tid har ført til dårligere stabilitet som til slutt endte i et kvikkleireskred 10. mars 2023. Ingeniørgeologer som har vært på befaring i skredområdet hadde per mars 2023, kommet fram til liknende teorier der det ble rettet mistanke om at bekkeerosjon som førte til ustabile kanter var en mulig årsak til skredutløsning. En annen mulig årsak som ble presentert var at en ispropp i bekken hadde smeltet og ført til at store vannmengder ble frigjort i løpet av kort tid (Zeiner 2023). Uavhengig av hva den utløsende årsaken faktisk var, har GIS-analysen avdekket at det over tid har foregått erosjon i sentrale deler av der skredet gikk.

I mange tilfeller kan terrengendringer som viser seg å være kritiske for grunnstabiliteten utvikle seg over år. Dersom de samme grenseverdiene som her anvendes for årlig forandringanalyse i GIS, er det ikke sikkert at de vil bli oppdaget grunnet at det kun skjer små endringer for hvert år og disse da filtreres bort som støy. Det kan derfor være nyttig å gjennomføre terrengendringsanalyser for hvert år, samt for litt lengre tidsintervaller slik det er gjort her. Dette kan bidra til at store terrengendringer som skjer i løpet av relativt kort tid (1 år) oppdages, i tillegg til endringer som utvikler seg gradvis over flere år. Dette må også sees i sammenheng med hvor ofte LiDAR-data samles inn, noe som vil diskuteres nærmere senere i dette kapittelet.

6.3 Kartlegging av faresoner for kvikkleireskred

Faresoner for kvikkleire kartlegges som regel som en del av oversiktkartleggingen som har til formål å avdekke områder utsatt for større kvikkleireskred. Kartleggingen tar utgangspunkt i områder under marin grense og er delt inn i tre stadier; kartstudier, befaring og grunnundersøkelser, og resultatet av dette bidrar til å oppdatere NVEs aktsomhetskart. Nærmere prosedyre for hvordan dette gjøres er beskrevet i teoridelen i oppgaven, som har tatt utgangspunkt i NVEs eksterne rapport nr.9/2020; *Oversiktskartlegging og klassifisering av faregrad, konsekvens og risiko for kvikkleireskred* (Moholdt 2020). Det nevnes i denne rapporten at bruk av GIS som verktøy kan være nyttig som en del av kartstudiene for å avdekke potensielle faresoner i forkant av befaring og utførelse av grunnundersøkelser. Da rapporten har en geoteknisk tilnærming er det tatt sikte mot GIS-analyser som belyser topografiske kriterier for skred som inkluderer skråningsge-

ometri og skredutvikling med hensyn på utstrekning. Et eksempel på en slik GIS-analyse er den som vises i figur 6.7. Her er områdene markert i rosa de som oppfyller de topografiske kriteriene for skred.



Figur 6.7: GIS-analyse som belyser de topografiske kriteriene for skred hentet fra NVE ekstern rapport 9/2020. Områdene markert i rosa er de som oppfyller kriteriene (Moholdt 2020).

Et av kriteriene som nevnes i rapporten og som undersøkes ved hjelp av GIS-analyse slik som den i figur 6.7, er at oversiktskartleggingen avgrenses til områder som har terrenghøydeforskjell på minimum 10 meter (Moholdt 2020). Områder som har høydeforskjell mindre enn dette vil da ikke bli prioritert for videre kartlegging, selv om det kan være kritiske grunnforhold der. Det samme gjelder også for områder som ikke oppfyller de andre topografiske kriteriene som nevnes i rapporten, men som fortsatt er kritiske. Rapporten vektlegger at det finnes potensielle faresoner som ikke dekkes av kravene, men har ingen videre tiltak for hvordan disse kan behandles. I den forbindelse kan metoden for GIS-analyse som har blitt brukt i denne oppgaven være et nyttig verktøy. Denne metoden gjør det mulig å overvåke utviklingen av høydeforskjeller i terrenget, slik at områder som utvikler en terrenghøydeforskjell på 10 meter eller mer, raskt blir detektert og da kan varsle om at en videre oversiktskartlegging bør utføres. I tillegg detekteres endringer som skjer utenfor de avgrensede områdene, slik at det er mulig å oppdage kritiske grunnforhold som ellers ikke vil blitt oppdaget. Dersom slik GIS-analyse utføres som en del av kartstudiene kan det føre til mer effektiv og målrettet befarings i ettertid, da ressurser kan settes inn på områder der

det er registrert endringer. Å kun basere befaringsarbeidet på det som registreres ved denne GIS-analyse metoden er derimot ikke til å anbefale, da det kan forekomme falskt positive eller falskt negative resultater, slik det ble erfart under feltarbeidet 10. mai 2023. Et falskt positivt resultat ble oppdaget ved befarings av lokalitet H, der analyser i *ArcGIS Pro* viste høydeendring på opptil 4,6 meter fra 2010-2013, mens feltundersøkelsene ikke viste noen tegn til slike endringer. Det må tas til betraktning at befaringsen skjedde over 10 år etter at endringene skal ha oppstått, og slik det har blitt diskutert tidligere i dette kapittelet er det er mye som kan ha skjedd i mellomtiden. Resultatet tolkes uansett som et falskt positivt resultat, da det ble registrert endringer som ikke kunne bekreftes i felt. Lokalitet E kan også betraktes som et falskt positivt resultat da GIS-analysen registrerte store høydeendringer som viste seg å være resultat av et masseuttak. Da dette er et kontrollert menneskelig terrenginngrep ligger det utenfor interesseområdet for det som analysen har til formål å avdekke, og kan derfor kategoriseres som et falskt positivt resultat.

Det ble også funnet eksempler på falskt negative resultater, et av dem ble funnet på veien til lokalitet B slik det vises i figur 5.34. Her har erosjon ført til graving i en skråning ned mot Brenselbekken, noe som antageligvis ikke hadde blitt oppdaget dersom det ikke var på vei til lokalitet B. Det var ingen tegn til denne erosjonen i GIS-analysen, noe som kan ha skyldtes at høydeendringen var mindre enn 1,5 meter og derfor har blitt filtrert bort. En annen mulighet er at erosjonen nylig har oppstått, noe som kan forklare mangelen på vegetasjon der. Liknende tilfeller ble også observert i nærheten av lokalitet C og D, der dreneringsrør i forbindelse med jordbruket har ført til konsentrasjon av vannstrømmen som har resultert i erosjon og graving slik det vises i figur 5.13 (a), figur 5.18 og figur 5.19 som ble tatt i felt. Antageligvis ble nok disse også filtrert bort som støy på grunn av størrelsen eller at de har oppstått relativt nylig. To falskt negative resultater som derimot er av slik størrelsesorden at de burde ha blitt oppdaget i GIS-analysen er de som vises på figur 5.35. Hvorfor disse ikke har blitt oppdaget ved GIS-analyse er ikke kjent, men en mulig forklaring kan være at terrenget har endret seg etter at analysene ble gjennomført eller at det har endret seg over tid slik at det kun har skjedd mindre endringer av gangen. Eventuelt kan endringene ha oppstått i et tidsrom som ikke dekkes av analysene.

Volumberegninger av terrengendringene kan også være et nyttig supplement til GIS-analysene i forbindelse med kartlegging av faresoner. Programvaren *Cloud Compare* har i denne oppgaven blitt brukt til å utføre slike beregninger, i tillegg til å konstruere tredimensjonale modeller av terrengoverflatene før og etter endringene har oppstått/utviklet seg. Ved å gjøre dette er det mulig

å få et inntrykk av terrengendringenes størrelsesorden, noe som kan bidra til å avgjøre hvor kritiske og omfattende de er. *Cloud Compare* ble også benyttet i NGU rapport 2021.023 (Penna og Solberg 2021) for å beregne volumet av masser som ble avsatt i tidsperioden 2007-2020 i et området i Gjerdrum. Også her var formålet å undersøke størrelsen på terrengendringene som hadde oppstått.

Et forhold det må tas hensyn til ved disse volumberegningene er at de kan være noe unøyaktige da punktskyenes overflateareal ble manuelt avgrenset. En annen begrensning som går igjen er LiDAR-målingers utfordringer i områder med tett vegetasjon. Manglende bakkepunkter fører til mer interpolasjon av punkter, som igjen skaper større usikkerhet rundt volumberegningene. Vegetasjon kan også gjøre det vanskelig å avgrense terrengoverflatene, slik den tredimensjonale modellen av lokalitet M viser (5.29). Volumet som ble beregnet ut i fra dette må derfor vurderes med et kritisk blikk, da det også inkluderer volum fra vegetasjonen. Grunnet disse utfordringene er det viktig å understreke at volumberegningene utført i *Cloud Compare* kun gir et estimat, og ikke nøyaktig verdi. Likevel kan det brukes som et nyttig tilskudd til undersøkelser som utføres i forkant av befaring, da det kan brukes til å prioritere hvilke områder som bør undersøkes først ut ifra hvor store volumendringene har vært. Kombinasjonen av GIS-analyse og volumberegninger kan på denne måten avgrense mulige faresoner i forkant av befaring, samt at det gir et større vurderingsgrunnlag for å avgjøre hvilke områder som skal prioriteres ved videre undersøkelser. Dette kan også bidra til at sikringstiltak innføres før kritiske terrengendringer utvikler seg ytterligere.

6.4 Samfunnsøkonomisk perspektiv

Etter å ha sett hvilke muligheter GIS-analyse av LiDAR-data har i forbindelse med deteksjon av terrengendringer og kartlegging av kvikkleirefaresoner, er det nå på tide å sette dette i et samfunnmessig perspektiv. Som følge av kvikkleireskredet på Gjerdrum i 2020 fikk problematikk relatert til kvikkleire økt oppmerksomhet, spesielt med tanke på overvåkning og innføring av sikringstiltak. Analysemetodene som har blitt presentert i denne oppgaven er et forsøk på å komme nærmere en løsning på denne problematikken, og i størst mulig grad hindre at noe lignende som på Gjerdrum skjer igjen.

Utgangspunktet for GIS-analysene utført i denne oppgaven er LiDAR-data som har gjort det

mulig å sammenligne terrengoverflatene for ulike år, og på denne måten overvåke hvilke endringer som har oppstått. Tidsperiodene som ble overvåket for de to studieområdene var 2010-2013 og 2013-2017 for Byneset, mens det var 2010-2016 for Småvika i Flatanger. Årsaken til at det var nettopp disse periodene som ble brukt, har sammenheng med hvilke år det var tilgjengelig LiDAR-data fra. Da LiDAR-data har vist seg å gi gode resultater i forbindelse med overvåkning av landformer og terrengendringer (Penna og Solberg 2021; Sokalska mfl. 2015) er innsamling av denne type data noe som bør prioriteres. Dette ble gjort i et prosjekt fra 2016-2022 med formål om å samle inn høydedata fra tilnærmet hele Norge for å lage en nasjonal detaljert høydemodell (NDH). 230 000 kvadratkilometer ble kartlagt til en kostnad på ca. 420 millioner kroner, finansiert av regjeringen. Dette kan virke som et høyt beløp, men til gjengjeld har beløpet fra private forsikringsselskap i forbindelse med erstatning fra naturskader som flom, skred og storm, vært på over 700 millioner kroner hvert år siden 2011 (Grubbmo mfl. 2017). Til sammenligning ble naturskadeerstatningen av forsikringsselskap estimert til ca. 875 millioner kroner i etterkant av Gjerdrumskredet (Bruvoll mfl. 2022). Disse kostnadene kan i midlertid ikke erstatte livene som gikk tapt og ødeleggelsene som ble påført i forbindelse med skredet. Sett i et slikt perspektiv kan kostnader som bidrar til økt overvåkning og mer detaljert kartlegging betraktes som forsvarelig bruk av finansieringsmidler. Dette kan underbygges av at LiDAR-dataene kan brukes til en rekke formål innen diverse fagfelt, blant annet for planlegging av arealbruk, byggeprosjekter og infrastruktur, beredskap, og overvåkning av klima, landbruk og kulturminner. Med så mange bruksområder kan det også argumenteres for hyppigere datainnsamling. Dette vil naturligvis føre til økte kostnader, men da den samfunnsøkonomiske nytteverdien av NDH grovt estimert ligger på 1,3 milliarder kroner, er det tydelig at samfunnsnyten er stor (Grubbmo mfl. 2017).

Det er imidlertid ikke sikkert at samfunnsnyten vil være like betydelig for alle bruksområder og fagfelt dersom det utføres hyppigere datainnsamling, selv om dette med høy sannsynlighet vil være tilfellet for overvåkning og kartlegging av kvikkleire. Det er dog mulig å begrense kostnadene ved innsamling av data til kvikkleireformål, da det kun er nødvendig i områder under marin grense. For å overvåke terrengendringer i slike områder kan det være fordelaktig å sammenligne data med ulike tidsintervall, slik at både endringer som oppstår raskt og de som gradvis utvikler seg kan fanges opp. Årlig (eller tilnærmet årlig) datainnsamling vil da være å anbefale slik at mulighetene for å overvåke både kortsiktige og langsiktige endringer er tilstede.

Bruk av GIS-terrengendringsanalyse for overvåkning av terrengendringer slik det er beskrevet i

denne oppgaven, har stort potensiale dersom det implementeres som en del av oversiktskartlegging av kvikkleire. I perioden 2016-2020 brukte NVE årlig et beløp mellom 5 og 12 millioner kroner på denne typen kartlegging (Bruvoll mfl. 2022). Ved innføring av GIS-terrengendringsanalyse vil antagelig dette beløpet øke uavhengig av om hyppigere datainnsamling av høydedata innføres eller ei, da det krever ressurser i form av økonomiske midler og fagpersoner. På en annen side vil et slikt bidrag i kartleggingsarbeidet kunne føre til effektivisering av befarings- og grunnundersøkelser, og på denne måten sørge for bedre utnyttelse av de samme ressursene. Dette kommer av at endringer lettere vil kunne oppdages, slik at befaringsarbeidet kan fokuseres på de mest kritiske områdene og at grunnundersøkelsene utføres i områder med sterk mistanke om vanskelige kvikkleireforhold. En annen fordel med terrengendringsanalysen er at den vil fange opp endringer som ikke nødvendigvis ligger innenfor de topografiske kriteriene som legges til grunn for inndeling av faresoner i følge NVEs metoderapport angående oversiktskartlegging (Moholdt 2020). Dette vil igjen kunne bidra til vurdering av sikringstiltak som kan forhindre skredutvikling, da det vil bli lettere å identifisere de mest kritiske områdene og dermed prioritere hvor det må sikres først.

6.5 Erfaringer fra analysene

Etter å ha utført terrengendringsanalyse i *ArcGIS Pro* og volumberegninger i *Cloud Compare* har disse gitt erfaringer som belyser metodenes muligheter, begrensninger og feilkilder.

6.5.1 Metodenes muligheter

Det har gjennom analysene i denne oppgaven og studier av litteratur, blitt bekreftet at terrengendringsanalyse i GIS-programvare kan utnyttes for å detektere terrengendringer ut i fra høydeendringer som skyldes tilførsel og fjerning av masser på ulike vis. Dette fører med seg en rekke muligheter da informasjonen som kommer ut av dette kan utnyttes til mange ulike formål, som i denne forbindelse er relatert til områder dekket med marin leire. En stor fordel med metoden som har blitt utviklet i *ArcGIS Pro* er at den gjør det mulig å overvåke terrengendringer i alle områder under marin grense som det finnes tilgjengelig LiDAR-data fra. Metodebeskrivelsen for oversiktskartlegging publisert av NVE bruker allerede GIS-analyse for å avgrense faresonene med utgangspunkt i topografiske kriterier, som en del av kartstudie-prosessen. Dette avgrenser imidlertid hvilke områder som blir videre kartlagt, til tross for at det kan være kritiske forhold utenfor disse. Dette kommer av at oversiktskartleggingen har som formål å kartlegge områder der

det potensielt kan oppstå større kvikkleireskred (Moholdt 2020). Ved å kombinere de to metodene for GIS-analyse er det mulig å overvåke et større område og dermed utforme kvikkleirefaresoner som tar hensyn til topografiske kriterier og kritiske terrengendringer. Denne kombinasjonen fører til en større sikkerhet om at endringer som kan påvirke utløsning av kvikkleireskred blir oppdaget slik at sikringstiltak kan innføres. I dette inngår det at befaringsarbeidet blir mer målrettet og effektivt da områder som skiller seg ut som kritiske kan prioriteres.

Cloud Compare kan i denne forbindelse brukes for å se på terrengendringenes størrelsesorden ved å utføre volumberegninger, samt danne en tredimensjonal modell av terrengoverflaten før og etter endringene oppsto. Dette gir en bedre forståelse for hva som har skjedd og hvor alvorlig det er.

6.5.2 Metodenes utfordringer og feilkilder

Metodene presentert i denne oppgaven har stort potensiale for overvåkning og kartlegging av kvikkleire, men begrenses også av ulike utfordringer og feilkilder. Tilgjengelighet av LiDAR-data har vist seg å være en av de mest problematiske begrensningene i dette tilfellet. Dette inkluderer “hull” i datasett, dårlig dekning av noen områder og lang tid mellom hver datainnsamling. De to siste var spesielt en begrensning ved LiDAR-dataene fra Småvika, der det kun var tilgjengelig data fra to år (2010 og 2016), og disse dekket kun et avgrenset område. Som følge av dette var det vanskelig å si noe om terrengendringene som ble detektert hadde påvirkning på skredet som ble utløst i mars 2023, da de nyeste LiDAR-målingene fra området ble samlet inn 7 år før. Mye kan derfor ha skjedd i løpet av disse årene, uten at det kan dokumenteres. For Byneset var det også utfordringer knyttet til LiDAR-dataene, da det var “hull” og dårlig dekning i noen av de. Selv om det var hyppigere datainnsamling fra dette området, fantes det ikke tilgjengelig data etter 2017 på tidspunktet analysene ble gjennomført. Dette førte også til at det gikk minimum 6 år fra terrengendringene oppsto til de ble undersøkt i felt, og forandringer kan ha skjedd fra de først ble oppdaget.

Tett vegetasjon som resulterte i lav punkttetthet viste seg å være en annen utfordring ved innsamling av LiDAR-data. Dette førte til økt usikkerhet ved noen av lokalitetene som ble funnet i analysene. For lokalitet H ble dette ansett som en mulig årsak til hvorfor det ikke ble funnet noen tegn til endringer i felt, selv om GIS-analysene viste stor høydeforskjell. Dette ble derfor tolket som et falskt positivt resultat, og er en annen svakhet ved analysemetodene. Falskt negative re-

sultater forekom også, da analysene ikke detekterte terrengendringer som ble funnet i felt. Dette kan ha hatt sammenheng med grenseverdiene som ble valgt for fjerning av støy. For Byneset ble disse valgt på bakgrunn av jordbruksaktivitet, men da verdiene kun baserer seg på høydeendringer innenfor et intervall, kan også andre betydelige terrengendringer ha blitt fjernet som et resultat av dette. Å bestemme grenseverdier var en utfordring i seg selv da det var vanskelig å finne relevante kriterier å basere de på.

En av de kanskje største kildene til feil ved GIS-terrengendringsanalysene var selve deteksjonen av terrengendringene, da den ble basert på visuell observasjon. Størrelsen på høydeendringene bestemte hvilken farge de fikk på analysekartet, og de sterkeste fargene representerte de største endringene. Dette førte til at oppmerksomheten ble dratt mot de områdene der det var store høydeendringer over et større areal. Dette kan ha ført til at noen terrengendringer ble oversett, mens andre ble prioritert i større grad enn nødvendig.

For volumberegninger utført i *Cloud Compare* ble de samme LiDAR-dataene som i GIS-analysene brukt. Også i denne programvaren var vegetasjon en utfordring da det ikke var mulig å beregne volum eller konstruere en tredimensjonal modell av terrengendringene i slike områder. Dette er figur 5.29 et eksempel på da det er tydelige forstyrrelser i den tredimensjonale modellen. Disse forstyrrelsene stammer fra vegetasjon, og førte til at videre volumberegninger ikke ble utført da det ville ført til for stor usikkerhet i resultatene. I forkant av volumberegningene måtte det aktuelle området for terrengendringen avgrenset, og dette ble utført manuelt ved bruk av utklippingsverktøy i programvaren. På bakgrunn av dette er volumberegningene sannsynligvis ikke helt nøyaktige, men gir et omtrentlig estimat. Det må også tas i betraktning av noen områder i punktskyene som ble brukt til volumberegningene, ble interpolert og dermed kan ha ført til en viss grad av usikkerhet.

6.6 Anbefalinger til videre arbeid

Hensikten med det som har blitt gjort i denne masteroppgaven er deteksjon av kritiske terrengendringer i områder preget av marine avsetninger og kvikkleire. Dette har blitt gjort i et forsøk på å finne nye rasjonelle metoder som kan bidra til overvåkning og kartlegging av kvikkleireterreng, og dermed øke sikkerheten i slike områder. Arbeidet som har blitt utført har avdekket muligheter og begrensninger med metodene, samt gitt mange erfaringer som kan brukes i vide-

re arbeid innenfor dette fagfeltet. Med utgangspunkt i disse erfaringene vil punktene under gi anbefalinger til videre arbeid:

- Ta i bruk kunstig intelligens i form av maskinlæring og dyplæring for å gjenkjenne og identifisere reelle terrengendringer automatisk. Dette vil forhåpentligvis føre til færre falskt positive resultater, samt at behovet for grenseverdier og støyfjerning vil bli mindre/helt borte. Det vil også spare mye tid ved at mindre manuelt arbeid med å indentifisere relevante terrengendringer er nødvendig.
- Kombinere GIS-analyser som tar hensyn til topografiske kriterier og GIS-terrengendringsanalyse som kan overvåke terrengendringer i alle områder med marine avsetninger og kvikkleire.
- GIS-terrengendringsanalyse ved bruk av LiDAR-data bør utføres jevnlig, helst årlig, for å kunne oppdatere faresoner og innføre eventuelle sikringstiltak.
- Det bør innføres retningslinjer for dreneringsinngrep i forbindelse med jordbruk i områder med marine avsetninger, da dette kan forhindre erosjon.
- Finne en løsning på hvordan LiDAR-målinger kan unngå lav punkttetthet i områder med tett vegetasjon. Det kan dreie seg om å optimalisere årstid for målinger, etter at vårsnøen er borte, men før løvsprett. Nye LiDAR-systemer måler også med svært høy punkttetthet sammenlignet med eldre systemer, noe som vil bidra til tettere punktsky og flere bakkepunkter.

7 Konklusjon

Den overordnede problemstillingen i denne masteroppgaven er: *Kan GIS-analyse av LiDAR-data fra ulike år brukes til deteksjon av kritiske terrengendringer i områder preget med marine avsetninger og kvikkleire?* Med kritiske terrengendringer menes for eksempel små utglidninger, bekkerosjon og andre forandringer i landskapet som kan utløse større, og i verste fall katastrofale kvikkleirskred. For å besvare dette har følgende to forskningsspørsmål blitt undersøkt:

- *Hvordan kan støy skilles fra reelle terrengendringer som kan være kritiske for stabiliteten i grunnen?*

I denne masteroppgaven har støy blitt definert som forstyrrelser som har oppstått i forbindelse med innsamling, overføring og lagring av LiDAR-data, i tillegg til terrengendringer som ikke har betydning for grunnstabiliteten i områder under marin grense. For å skille ut denne typen støy fra terrengendringsanalyser i *ArcGIS Pro* har innføring av grenseverdier basert på høydeendringers størrelse blitt utprøvd. Da dette ble utprøvd i analyser for to ulike studieområder (Småvika i Flatanger og Byneset), ble det tydelig at noe støy er områdespesifikt, og at formålet for analysene har betydning for hvilke grenseverdier som velges. For Byneset viste det seg at jordbrukvirksomhet førte til mye støy i et høydeintervall på -1,5 m til 1,5 m, disse verdiene ble derfor valgt som grenseverdier for støyfjerning i dette området. For Småvika i Flatanger ble grenseverdiene satt til -0,7 m - 0,7 m, som er betydelig lavere enn for Byneset. Dette skyldes at formålet her var å undersøke terrengendringer som kan ha ført til utløsning av kvikkleireskredet som gikk 10. mars 2023. I den forbindelse var det nødvendig å evaluere også mindre terrengendringer, i motsetning til det som var tilfellet for Byneset der analysene hadde som formål å avdekke de største og mest kritiske terrengendringene. Grenseverdiene for begge områder har fungert til sitt formål, men det kan ikke utelukkes at noen kritiske terrengendringer har blitt filtrert ut som støy. Da terrengendringer utvikler seg i ulikt tempo anbefales det at det utføres terrengendringsanalyser årlig og med noen års mellomrom, for å detektere så mange som mulig av disse.

- *Kan terrengendringsanalyse i GIS bidra til å kartlegge faresoner for kvikkleireskred?*
Analysene som har blitt utført i *ArcGIS Pro* i denne masteroppgaven har ført til deteksjon av en rekke terrengendringer i områder preget av marine avsetninger og kvikkleire. Dette

gjør at det rettes et søkelys på områder der det har skjedd store terrengendringer, som kan være kritisk for grunnstabiliteten. Feltundersøkelsene som ble gjennomført viste at det ikke alltid var lett å oppdage de utvalgte lokalitetene i felt, selv om de hadde gitt store utslag i GIS-analysen. Dette viser viktigheten av å utføre slike analyser i forkant av befaring, da den kan gjøre dette arbeidet mer effektivt og målrettet. Endringene som oppdages kan også brukes som grunnlag for å prioritere i hvilke områder det bør utføres videre undersøkelser først. I denne oppgaven foreslås det at slike analyser kan inngå som en del av kartstudiene som utføres før befaring og utførelse av grunnundersøkelser, som er de tre leddene i oversiktskartleggingen der kvikkleirefaresoner avgrenses.

Denne oppgave bekrefter at det er mulig å detektere kritiske terrengendringer i områder preget med marine avsetninger og kvikkleire ved hjelp av GIS-analyse og LiDAR-data fra ulike år. Dersom støy skilles fra de reelle terrengendringene er det mulig å utnytte disse funnene til å avgjøre hvor videre undersøkelser skal utføres først. Dette vil være fordelaktig ved kartlegging av faresoner da det fører til en bedre utnyttelse av ressurser i form av fagpersoner og finansieringsmidler. Å innføre hyppig terrengendringsanalyse som en del av oversiktskartleggingen av kvikkleire vil kreve kostbare flybåren LiDAR-målinger, imidlertid kan dette også vesentlige øke sikkerheten i utsatte områder. Norge er et land med omfattende kvikkleireproblematikk og en rekke skredhendelser har vist hvor store ødeleggelser som potensielt kan oppstå som følge av dette. Da skred også medfører høye kostnader og i noen tilfelle tap av liv, kan det med god grunn argumenteres for at bruk av ekstra kostnader på kartlegging for å øke sikkerheten mot skred vil være til samfunnets beste.

Referanser

- Andersen, H.-E., S. E. Reutebuch og R. J. McGaughey (2006). «Active remote sensing». I: *Computer Applications in Sustainable Forest Management: Including Perspectives on Collaboration and Integration*. Hentet 04.04.2023, s. 43–66. URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4020-4387-1_3.pdf.
- Arnoldussen, A. og H. Olsen (2016). «Jordflytting». I: *Norsk Institutt for Bioøkonomi (NIBIO)*. Hentet 24.05.2023. URL: <https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/miljoenheten/jordbruk-og-skogbruk/jordflytting-nibio.pdf>.
- Aune, T. M. (2022). «Om Flatanger». I: *Flatanger kommune*. Hentet 22.04.2023. URL: <https://www.flatanger.kommune.no/fakta-om-flatanger.465359.no.html>.
- Bazin, S. og A. Pfaffhuber (2013). «Mapping of quick clay by electrical resistivity tomography under structural constraint». I: *Journal of Applied Geophysics* 98. Hentet 28.02.2023, s. 280–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.09.002>.
- Bruvoll, A., T. M. Muthanna, H. B. Ottesen, K. M. Foldal, S. Nordal, I.-L. Solberg og G. O. Hæreid (2022). «NOU 2022: 3 På trygg grunn — Bedre håndtering av kvikkleirerisiko». I: *Regjeringen.no*. Hentet 07.04.2023. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/a65c53c3028443fea787bf0c331035c8/no/pdfs/nou202220220003000dddpdfs.pdf>.
- Bruvoll, A., K. M. Foldal, G. O. Hæreid, T. M. Muthanna, S. Nordal, H. B. Ottesen, I.-L. Solberg og I. Ryan (2021). «Årsakene til kvikkleireskredet i Gjerdrum 2020». I: *Regjeringen.no*. Hentet 07.04.2023. URL: <https://www.regjeringen.no/contentassets/3dad8f7fad94608861163fa524023c0/no/pdfs/arsakene-til-kvikkleireskredet-i-gjerdrum-2020.pdf>.
- Campbell, J. B. og R. H. Wynne (2011). *Introduction to remote sensing*. Hentet 04.04.2023. Guilford Press. ISBN: 978-1-60918-176-5.
- Chipman, J. W., R. W. Kiefer og T. M. Lillesand (2004). *Remote sensing and image interpretation*. Hentet 04.04.2023. ISBN: 9780198520115.
- CloudCompare (U.å.). «CloudCompare Presentation». I: *Cloudcompare.org*. Hentet 27.04.2023. URL: <http://cloudcompare-org.danielgm.net/presentation.html>.
- Esri (U.å.[a]). «Hillshade function». I: *esri*. Hentet 07.03.2023. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/hillshade-function.htm>.
- (U.å.[b]). «History of GIS». I: *esri*. Hentet 26.04.2023. URL: <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis>.
- (U.å.[c]). «Minus (3D Analyst)». I: *pro.arcgis.com*. Hentet 27.04.2023. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.9/tool-reference/3d-analyst/minus.htm>.

- Esri (U.å.[d]). «Mosaic (Data Management)». I: *esri*. Hentet 07.03.2023. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/data-management/mosaic.htm>.
- Gregersen, O. (1981). «The Quick Clay Landslide in Rissa, Norway». I: *NGI*. Hentet 07.03.2023. URL: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/35/1981_03_0080.pdf.
- Gregersen, O. (2008). «Program for økt sikkerhet mot leirskred». I: *NGI*. Hentet 07.04.2023. URL: <https://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/201600907/1766559>.
- Grimstad, G., S. Nordal, I.-L. Solberg og H. B. Ottesen (2022). «Om kvikkleire og skredet den 30. desember 2020 i Gjerdrum». I: *Naturen nr. 2-3*. Hentet 16.03.2023. URL: <https://www.idunn.no/doi/abs/10.18261/naturen.146.2-3.2>.
- Grubbmo, E., O. Andersen, I. Hagen og J. E. Gaarud (2017). «SAMFUNNSØKONOMISK ANALYSE AV NASJONAL DETALJERT HØYDEMODELL». I: *Kartverket*. Hentet 30.05.2023. URL: <https://www.kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/hoydemodell/samfunnsokonomisk-analyse-nasjonal-detaljert-hoydemodell.pdf>.
- Gupta, R. P. (2017). «Remote sensing geology». I: Hentet 04.04.2023.
- Hausberg, J. E. (2008). «Satellittbasert fjernanalyse for vurdering av skred fra bratte breer i Sør-Norge». Hentet 04.04.2023. Masteroppg. UiO. URL: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-19274>.
- Helle, T. E. (2017). «Quick-clay landslide mitigation using potassium chloride». Hentet 08.03.2023. Ph.d.-avh. NTNU. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2483374>.
- Høgaas, F. (2021). «SÅ HØYT STO HAVET ETTER SISTE ISTID». I: *NGU*. Hentet 03.03.2023. URL: <https://www.ngu.no/nyheter/sa-hoyt-sto-havet-etter-siste-istid>.
- Issler, D., J. M. Cepeda, B. Q. Luna og V. Venditti (2013). «Back-analyses of run-out for Norwegian quick-clay landslides». I: *Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS)*. Hentet 22.05.2023. URL: <http://hdl.handle.net/11250/189760>.
- Johannessen, H. M. (2022). «Pløying». I: *ndla*. Hentet 09.05.2023. URL: <https://ndla.no/nb/subject:169ba831-b3cd-4207-b9b8-7d06bf03328b/topic:a82f6884-61da-47b3-a17f-18042391103a/topic:d66428a4-8990-47e4-85c9-27d5121e1ce1/resource:c34cf6e8-b66e-49c3-9f11-a9c5587c8859>.
- Kartverket (2021). «Flyfoto og ortofoto». I: *Kartverket*. Hentet 04.04.2023. URL: <https://www.kartverket.no/til-lands/flyfoto>.
- (2022). «Høgdedata og djupnedata». I: *Kartverket*. Hentet 04.04.2023. URL: <https://www.kartverket.no/api-og-data/terrengdata>.
- (2023a). I: Hentet 27.04.2023. URL: <https://norgebilder.no>.

- Kartverket (2023b). «Hoydedata». I: *hoydedata.no*. Hentet 24.05.2023. URL: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/>.
- L'heureux, J. (2012). «A study of the retrogressive behaviour and mobility of Norwegian quick clay landslides». I: *Landslide and engineered slopes: protecting society through improved understanding*. Taylor & Francis Group, London. Hentet 07.03.2023, s. 981–988. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jean-Sebastien-Lheureux/publication/236008671_A_study_of_the_retrogressive_behavior_and_mobility_of_Norwegian_quick_clay_landslides/links/00b4951f92c5cbeda4000000/A-study-of-the-retrogressive-behavior-and-mobility-of-Norwegian-quick-clay-landslides.pdf.
- L'Heureux, J.-S. og I.-L. Solberg (2013). «Utstrekning og utløpsdistanse for kvikkleireskred basert på katalog over skredhendelser i Norge». I: *Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS)*. Hentet 16.03.2023. URL: <https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/handle/11250/2497289>.
- Lied, F. og R. Birkeland (2022). «Fjernmåling». I: *Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 04.04.2023. URL: <https://snl.no/fjernm%C3%A5ling>.
- Liu, X. (2008). «Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues». I: *Progress in physical geography* 32.1. Hentet 04.04.2023, s. 31–49. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0309133308089496>.
- Lorentsen, H. M. (2016). «Her er ekspertenes åtte teorier om hva som kan ha gått galt». I: *NRK*. Hentet 15.03.2023. URL: <https://www.nrk.no/nordland/har-undersokt-ulike-teorier-om-hva-som-utloste-rasene-1.12893010>.
- Lundström, K., R. Larsson og T. Dahlin (2009). «Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods». I: *Landslides* 6. Hentet 14.03.2023, s. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0144-9>.
- Moholdt, R. (2020). «Oversiktskartlegging og klassifisering av faregrad, konsekvens og risiko for kvikkleireskred». I: *NVE*. Hentet 03.05.2023. URL: https://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2020/eksternrapport2020_09.pdf.
- Moholdt, R., S. Nordal, V. Thakur, F. Oset, M. Viklund, E. Lyche og S.-A. Strand (2014). «Skredet ved Nord-Statland». I: *Trøndelag fylkeskommune*. Hentet 20.05.2023. URL: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2014/rapport2014_93.pdf.
- Myhra, G. (2022). «Bruk av GIS og fjernanalyse til overvåkning av skredprosesser i løsmasser». Hentet 07.03.2023. NTNU.
- NGF (1975). «Retningslinjer for presentasjon av geotekniske undersøkelser». I: Hentet 30.01.2023.
- NGI (2014). «SKRED skredfare og sikringstiltak». I: *NGI*. Hentet 07.03.2023.
- NGU (2015). «EN NY VERDEN FOR GEOKARTLEGGING». I: *NGU*. Hentet 04.04.2023. URL: <https://www.ngu.no/nyheter/en-ny-verden-geokartlegging>.

- NGU (2019). «Geoteknikk». I: *NGU*. Hentet 21.03.2023. URL: <https://www.ngu.no/emne/geoteknikk>.
- (2021a). «2D RESISTIVITET FOR KVIKKLEIREKARTLEGGING». I: *NGU*. Hentet 28.02.2023. URL: <https://www.ngu.no/emne/2d-resistivitet-kvikkleirekartlegging>.
 - (2021b). «KVIKKLEIRE OG KVIKKLEIRESKRED». I: *NGU*. Hentet 03.03.2023. URL: <https://www.ngu.no/emne/kvikkleire-og-kvikkleireskred>.
 - (2023a). «Bergrunn - Nasjonal berggrunnsdatabase». I: *NGU*. Hentet 22.05.2023. URL: https://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/.
 - (2023b). «Løsmasser - Nasjonal løsmassedatabase». I: *NGU*. Hentet 22.05.2023. URL: https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/.
 - (2023c). «Marin grense og mulighet for marin leire». I: *NGU*. Hentet 22.05.2023. URL: https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/?lang=nor&map=9.
 - (2023d). «NADAG». I: *NADAG*. Hentet 05.04.2023. URL: <https://geo.ngu.no/kart/nadag-avansert/>.
 - (U.å.). «Siste istid». I: *NGU*. Hentet 30.01.2023. URL: <https://www.ngu.no/Mareano/Kornstorrelse.html>.
- Nordal, S., J. S. L'Heureux, A. Emdal og E. Grøv (2019). «The cause of the landslides of 1st and 2nd April 2016 in Tosbotn, Norway». I: *Geotechnical Engineering foundation of the future*. Hentet 08.03.2023. DOI: 10.32075/17ECSMGE-2019-0290. URL: http://www.ecsmge-2019.com/uploads/2/1/7/9/21790806/0290-ecsmge-2019_nordal.pdf.
- NVE (2019). «Veileder Nr.1/2019 Sikkerhet mot kvikkleireskred». I: *NVE*. Hentet 03.02.2023. URL: https://publikasjoner.nve.no/veileder/2019/veileder2019_01.pdf.
- (2021a). «Kartlegging av fareområder». I: *NVE*. Hentet 18.03.2023. URL: <https://www.nve.no/om-nve/spoer-nve/om-kvikkleire/kartlegging-av-fareomrader/>.
 - (2021b). «Om kartlegging av fare for kvikkleireskred». I: *NVE*. Hentet 04.05.2023. URL: <https://www.nve.no/naturfare/utredning-av-naturfare/om-kart-og-kartlegging-av-naturfare/om-kartlegging-av-fare-for-kvikkleireskred/>.
 - (2022). «Hva er kvikkleire og kvikkleireskred?» I: *NVE*. Hentet 30.01.2023. URL: <https://www.nve.no/naturfare/laer-om-naturfare/om-skred/kva-er-kvikkleire-og-kvikkleireskred/>.
 - (2023a). «Hvordan sikrer man mot kvikkleireskred?» I: *NVE*. Hentet 29.04.2023. URL: <https://www.nve.no/om-nve/spoer-nve/om-kvikkleire/hvordan-sikrer-man-mot-kvikkleireskred/>.
 - (2023b). «Kvikkleiresoner - NVE temakart». I: *NVE*. Hentet 30.03.2023. URL: <https://temakart.nve.no/link/?link=kvikkleire>.

- NVE (2023c). «NVE Sikringstiltak». I: *NVE*. Hentet 20.05.2023. URL: <https://temakart.nve.no/link/?link=sikringstiltak>.
- Nyborg, Å. A. (2008). «JORDSMONN UTVIKLET I MARIN LEIRE I ØSTFOLD – EGENSKAPER, OPPTREDEN OG UTBREDELSE». I: *Skog og landskap*. Hentet 09.05.2023. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/285992327.pdf>.
- Penna, I. og I.-L. Solberg (2021). «Landscape changes and bedrock reconstruction in Gjerdrum area. Methodological approach and main results». I: *NGU*. Hentet 21.05.2023. URL: https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2021/2021_023.pdf3.
- Ramberg, I., I. B. Bryhni, A. Nøttvedt og R. K. (2013). «Landet blir til - Norges geologi». I: Hentet 20.05.2023. URL: <https://www.geologi.no/faglitteratur-boker/lbt>.
- Rambøll (2018). «Kommune delplan Sluppen, geoteknisk vurdering». I: *Trondheim kommune*. Hentet 01.05.2023. URL: https://www.trondheim.kommune.no/globalassets/10-bilder-og-filer/10-byutvikling/byplankontoret/lb_off-ettersyn/2019/kommundelplan-for-sluppen-k20180033/vedlegg-12.-geoteknisk-rapport-1350030092.pdf.
- Ringlund, O. M. og E. Lusåter (2020). «Kartlegger hele Norge på nytt». I: *Nrk.no*. Hentet 04.04.2023. URL: <https://www.nrk.no/innlandet/kartlegger-hele-norge-pa-nytt-1.14896847>.
- Risbøl, O., H. R. Amundsen, O. M. Bollandsås og A. Nesbakken (2011). «Flybåren laserskanning til bruk i forskning og til forvaltning av kulturminner og kulturmiljøer. Dokumentasjon og overvåking av kulturminner». I: Hentet 24.05.2023. URL: https://ra.brage.unit.no/ra-xmlui/bitstream/handle/11250/175814/hoeyteknologi_flybaaren_laserskanning.pdf?sequence=1.
- Roalkvam, J. (2014). «Identifisering av skredfarlige elver og bekker i Trondheim kommune med moderne fjernanalyse - En GIS studie». Hentet 19.05.2023. Masteroppg. NTNU. URL: <http://hdl.handle.net/11250/2448459>.
- Rosvold, K. A. (2022). «Byneset». I: *Store norske leksikon på snl.no*. Hentet 07.04.2023. URL: <https://snl.no/Byneset>.
- Rød, J. K. (2015). *GIS - verktøy for å forstå verden*. Hentet 04.04.2023. Fagbokforlaget. ISBN: 9788245018813.
- Sandven, R., A. Montafia, A. Gylland, K. Kåsin, A. A. Pfaffhuber og M. Long (2015). «NIFS, delprosjekt 6 Kvikkleire». I: *Norsk geoteknisk forening (ngf.no)*. For Statens Vegvesen, Jernbaneverket, NVE. Hentet 03.02.2023. URL: <https://ngf.no/wp-content/uploads/2016/02/NIFS-NGF-Detektering-av-sproebruddmateriale-sluttrapport-med-anbefalinger.pdf>.
- Sauvin, G., I. Lecomte, S. Bazin, J.-S. L'Heureux, M. Vanneste, I.-L. Solberg og E. Dalsegg (2013). «Towards geophysical and geotechnical integration for quick-clay mapping in Nor-

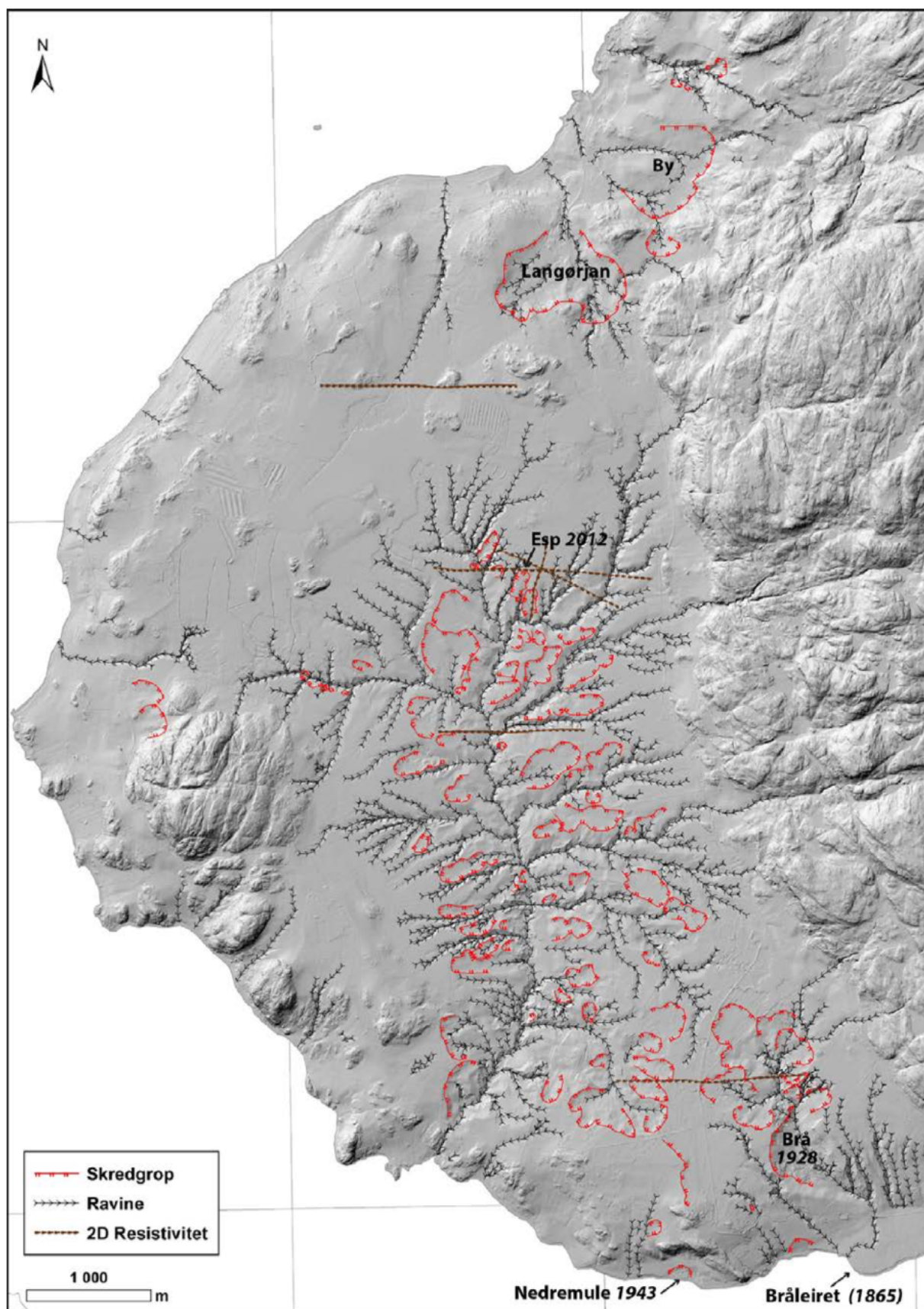
- way». I: *Near Surface Geophysics* 11.6. Hentet 21.03.2023, s. 613–624. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012064>.
- Schultz, G. A. (1988). «Remote sensing in hydrology». I: *Journal of Hydrology* 100.1-3. Hentet 04.04.2023, s. 239–265. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90187-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90187-4).
- Skjærpe, G., C. Hyllestad og T. C. Storhaug (2017). «Kvalitetsundersøkelse av laserdata til digitale terrengmodeller». I: Hentet 24.05.2023. URL: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2464657%22>.
- Sokalska, E., G. Devoli, I.-L. Solberg, L. Hansen og V. Thakur (2015). «Kvalitetskontroll, analyse og forslag til oppdatering av historiske kvikkleireskred og andre leirskred registrert i Nasjonal skredhendelsesdatabase (NSDB)». I: *Naturfare - Infrastruktur, Flom og Skred (NIFS)*. Hentet 16.03.2023. URL: https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/bitstream/handle/11250/2498058/rapport2015_65.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Solberg, I.-L., V. C. Baranwal, E. Dalsegg, H. Dretvik, D. Gasser, J. S. Rønning og J. F. Tønnesen (2015). «Geologi på Byneset: en sammenstilling av geologiske, geofysiske og geotekniske data». I: *NGU*. Hentet 07.04.2023. URL: https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2015/2015_002.pdf.
- Torrance, J. K. (2012). «Landslides in quick clay». I: *Landslides: types, mechanisms and modeling*. Cambridge University Press, Cambridge. Hentet 18.03.2023, s. 83–94. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.188301>.
- VermontGovernment (U.å.). «What is (airborne) lidar?» I: *Agency of Digital Services, Vermont Center for Geographic Information*. Hentet 04.04.2023. URL: <https://vcgi.vermont.gov/resources/frequently-asked-questions/lidar-program-faqs>.
- Wedajo, G. (2017). «LiDAR DEM Data for flood mapping and assessment; opportunities and challenges: A Review». I: *J. Remote Sens. Gis* 6. Hentet 29.05.2023, s. 2015–2018. DOI: [10.4172/2469-4134.1000211](https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000211).
- Wong, M. S., X. Zhu, S. Abbas, C. Y. T. Kwok og M. Wang (2021). «Optical remote sensing». I: *Urban informatics*. Hentet 07.04.2023, s. 315–344. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_20.
- Zeiner, H. (2023). «Et enormt skred». I: *Trøndelag fylkeskommune*. Hentet 20.05.2023. URL: <https://www.trondelagfylke.no/vare-tjenester/veg/nyheter-fylkesveg/et-enormt-skred/>.

A Vedlegg: Teori

Tabell 1. Oversikt over kjente leirskred på Byneset. Der referansen står i kursiv, er det utdypende beskrivelser av hendelsen og evt. tilknyttede undersøkelser.

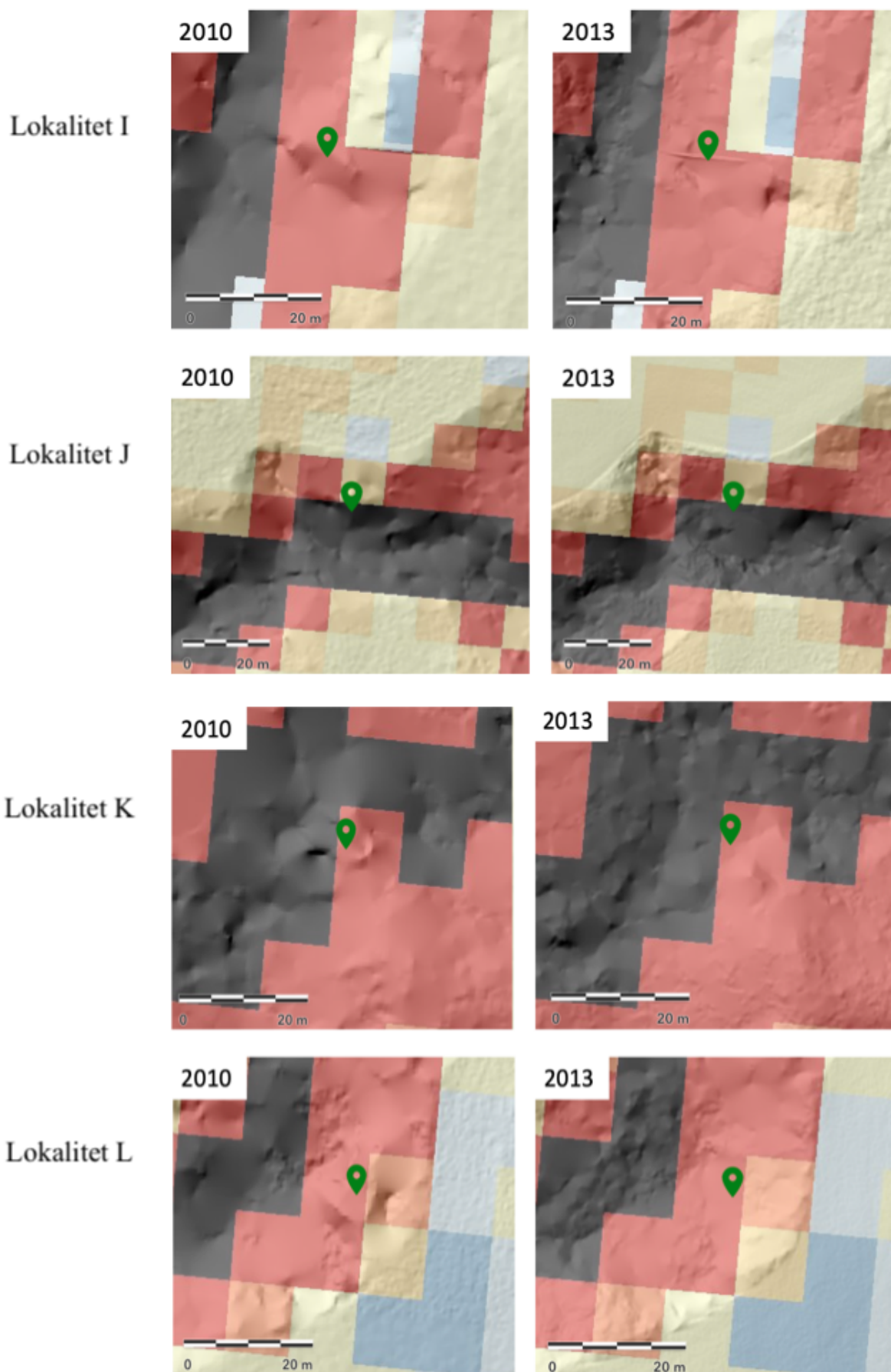
Dato eller årstall	Hvor	Beskrivelse	Referanse
Ukjent	Langørjan/Rye	Avmerket på løsmassekart.	Reite et al. (1999)
Ukjent	By/Rye	Avmerket på løsmassekart.	Reite et al. (1999)
Våren 1825	Eggen	Mellom Eggja og Røstum.	Helland (1896); Helland (1898)
Våren 1831	Brå	Skred fra Gustadmyren (Stormyra), 100 mål.	Helland (1896); Helland (1898)
Høsten 1848	Brå	Skred fra Gustadmyren (Stormyra), tok en husmannsplass og en mann omkom.	Helland (1896); Helland (1898)
1852	Eggen		Helland (1896); Helland (1898)
1858 (eller 1860)	Brå		Helland (1896); Helland (1898)
29.11.1865	Brå	Skred fra Gustadmyren (Stormyra), 150 mål. Mer enn 100 mål land lagt opp ved stranden. Mer ble fylt ut i fjorden (Braaleire, se bl.a.fig. 5), men dette ble tatt av fjorden.	Helland (1896); Helland (1898);
Våren 1928	Brå	Tre runder: 24.04 (60-70 mål), 01.05. (ca. 150 mål), 16.05. (ca. 2 mål). Geotekniske undersøkelser utført i etterkant av hendelsen. Hard/tørr leire over kvikkleire. Blokker av fast masse i skredgropa. Artesiske forhold, og skredet trolig utløst av poreovertrykk. Avmerket på løsmassekart.	<i>Holmsen (1929);</i> Reite et al. (1999)
Ca. 100 år før 1943	Nedremule	Et mindre skred enn det i 1943 skal ha gått på samme del av eiendommen. Fjøsbygningen ble etter det flyttet lengre øst.	Holmsen & Holmsen (1946)
18.05.1943	Nedremule	20 mål dyrket mark gled ut. Flere hundre meter bredt, 70-80 m langt. 8-10 m høy bratt bakkant. Hard leire over, kvikkleirelag under. Skredmassene for ut i fjorden. Skredet gikk ca. 150 fra gårdsbebyggelsen.	<i>Holmsen & Holmsen (1946)</i>
Ca. 1975	Hangerhaugen	1-2 mål raste ut ca. 200 m vest for gården Hangerhaugen.	NGI (1988)
Høsten 1989	Frøset	Grunnen under et naust gled ut i en bredde på ca. 20 m. Fylling mot bølgeerosjon lagt ut året før. Kvikkleire og poreovertrykk.	<i>TK (1989)</i>
01.01.2012	Esp	Skredet var ca. 100 m bredt og 400 m langt, og trolig utløst som følge av erosjon i et bekkefar ned mot Ristbekken. Erosjonen utløste et initialskred og skredet utviklet seg deretter retrogressivt. Geotekniske og geofysiske undersøkelser utført i etterkant av hendelsen. Fig. 15.	<i>NVE (2012a); Solberg et al. (2012a); L'Heureux & Solberg (2012)</i>

Figur A.1: Registrerte skredhendelser på Byneset (Solberg mfl. 2015)

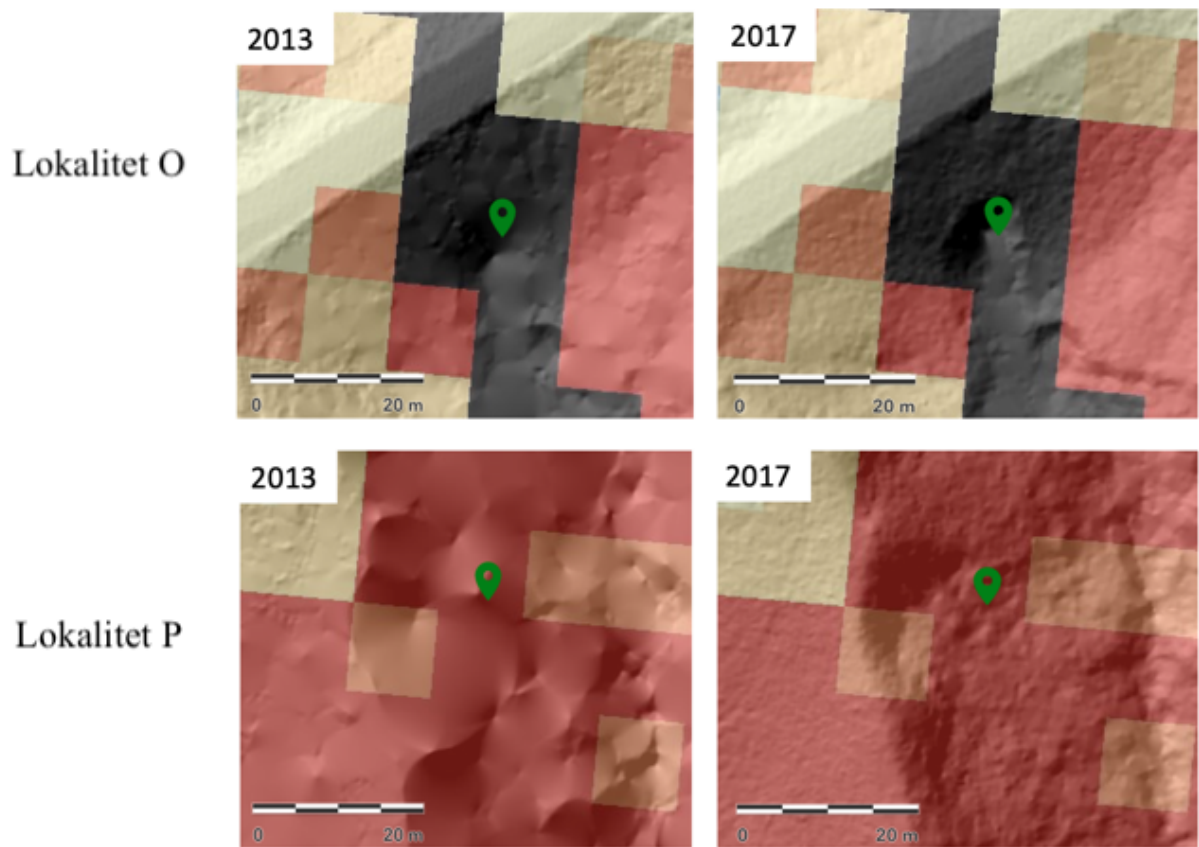


Figur A.2: Raviner og skregroper på Byneset som er kartlagt ved hjelp av LiDAR-målinger (Solberg mfl. 2015)

B Vedlegg: Diskusjon



Figur B.1: Punkttetthet Lokalitet I-L
(Kartverket 2023b)



Figur B.2: Punkttetthet lokalitet O og P
(Kartverket 2023b)

