



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Evaluering av tiltak mot skred langs fv. 337 til Veitastrond,
Vestland

Evaluation of avalanche mitigation measures along fv. 337
at Veitastrond, Vestland

**Ådne Einarsson Hommedal (314), Anders Kleiven (313) og Anniken
Helene Aalerud (308)**

Geologi og Geofare

Fakultet for ingeniør- og naturvitskap (FIN) - HVL

Veileder: Denise Christina Rüter

Innleveringsdato 03.06.20

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

Evaluering av tiltak mot skred langs fv. 337 til Veitastrond, Vestland



Veileder:

Denise Christina Rüther

Skrevet av:

Ådne Einarsson Hommedal

Anders Kleiven

Anniken Helene Aalerud

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet som en avslutning på det treårige studieløpet Geologi og geofare ved Høgskulen på Vestlandet i Sogndal. Vi har gjennom denne oppgaven tilegnet oss mye kunnskap og hatt en bratt læringskurve. Arbeidet har vært interessant og lærerikt, men også tidkrevende og utfordrende.

Vi vil rette en stor takk til vår veileder Denise Rüther. Gjennom denne oppgaven har du vært en uunnværlig støttespiller som har gitt oss hjelp når vi har trengt det. Du har alltid gode innspill å komme med, og vi har satt stor pris på at kontordøren din alltid har vært åpen for oss. I tillegg vil vi takke dronепilot Sigurd Nerhus som hjalp oss med datainnsamling. Vi vil også takke Simon de Villiers som ga oss god grunnleggende forståelse for numerisk snøskredsimulering gjennom faget Snø- og skredvitenskap.

Stor takk også til Høgskulen på Vestlandet for at vi i disse koronatider har hatt tilgang til datalabben og nødvendig programvare. Uten dette hadde ikke oppgaven kommet i havn. Heldigvis har ikke datalabben vinduer, slik at fristelsen for skikjøring har vært lettere å motstå denne historisk snørike vinteren.

Avslutningsvis vil vi også takke resten av faglærerne ved fakultetet, som har lært oss at ikke all stein er gråstein.

Sammendrag

Veien mellom Veitastrond og Hafslo i Vestland fylke er en av mange skredutsatte veier i Norge hvor trafikanter utsettes for risiko hver gang de ferdes. I løpet av de siste ti årene er det gjennomført omfattende sikringstiltak langs veistrekket for å minimere risiko og stengning grunnet skred. Slike tiltak er svært kostbare, og viktigheten av riktig dimensjonering og plassering er stor.

Denne oppgaven har som hovedmål å evaluere skredsikringstiltak langs fv. 337 til Veitastrond. Evalueringen omfatter tre skredvoller: en plogvoll ved Vetle Buskreda og Store Buskreda samt en ledevoll og en fangvoll ved Linnskreda. Disse vurderes ved hjelp av to ulike målemetoder, dronefotogrammetri og differensial GPS, som også bedømmes mot hverandre. Til slutt vurderes vollenes beskyttelse mot tørre snøskred.

Dataene ble samlet inn i felt med drone og differensial GPS høsten 2019. Videre ble de prosessert i ArcMap og Metashape for å konstruere oppdaterte terrengmodeller over feltlokaliteten. Deretter ble terrengmodellene brukt i skredsimuleringsverktøyet RAMMS::Avalanche. Simuleringene ble tolket for å besvare problemstillingene.

Resultatene viser at dronefotogrammetri gir den mest presise gjengivelsen av skredvollene i terrengmodellene. I tillegg er drone mest fordelaktig med tanke på egensikkerhet, kostnad og tidsbruk. Videre viser simuleringene i RAMMS at vollenes plassering og dimensjonering ikke gir tilstrekkelig beskyttelse av fylkesveien mot store, tørre snøskred.

Abstract

The road between Veitastrom and Hafslo in Vestland county is one of many avalanche affected roads in Norway where commuters are exposed to risk every time they travel. Over the past ten years comprehensive avalanche mitigation measures have been implemented to minimize road closure and risk due to avalanches. Such measures are very costly, and the importance of correct sizing and placement can not be understated.

The main purpose of this assignment is to evaluate the avalanche mitigation measures along county road 337. The evaluation cover three avalanche protection dams: a plow-shaped dam at Vetle Buskreda and Store Buskreda as well as a diversion dam and a catching dam at Linnskreda. These are assessed using two different measuring methods, drone photogrammetry and differential GPS, which are also compared against each other. Finally, the protection provided by the avalanche mitigation dams against dry snow avalanches are considered.

Data was collected with drone and differential GPS during fieldwork in the fall of 2019. Furthermore, they were processed in ArcMap and Agisoft Metashape to construct updated terrain models of the field area. The terrain models were then implemented into the numerical avalanche simulation tool RAMMS::Avalanche. The simulations were then interpreted and used to answer the research questions.

Results show that drone photogrammetry provides the most accurate representation of the avalanche protection dams in the terrain models. The drone is also the most appropriate measuring method in terms of user safety, cost and time spent. Furthermore, the simulations in RAMMS show that the placement and dimensions of the dams do not provide adequate protection of the county road against large, dry snow avalanches.

Innholdsfortegnelse

1.	Innledning.....	1
1.1.	Problemstillinger	2
2.	Områdebeskrivelse	3
2.1.	Geografisk beliggenhet.....	3
2.2.	Topografi	5
2.3.	Geologi og vegetasjon	5
2.4.	Klima og værforhold	7
2.5.	Tidligere skredhendelser og bakgrunn	9
3.	Teori	10
3.1.	Snøskred	10
3.1.1.	Snøskredterrenget.....	10
3.1.2.	Snødekket	12
3.1.3.	Snøskredtyper.....	12
3.1.4.	Skredbevegelse.....	14
3.1.5.	Utløpsdistanse	15
3.1.6.	Skredtrykk	16
3.2.	Skredvoller.....	17
3.2.1.	Ledevoll.....	17
3.2.2.	Fangvoll.....	20
3.2.3.	Aktuelle voller og dimensjonering.....	21
3.3.	Differensial GPS.....	24
3.4.	RAMMS::Avalanche – Dynamisk modellering	27
4.	Metode.....	30
4.1.	Innsamling av data – Differensial GPS	31
4.2.	Innsamling av data – Drone	34
4.3.	Fotogrammetri og 3D-modellering i Metashape	35
4.3.1.	Tilføy bilder.....	36
4.3.2.	Tilpass bilder	36
4.3.3.	Bygge punktsky.....	37
4.3.4.	Punktreferering	37
4.3.5.	Konstruere overflate.....	39

4.3.6.	Eksportere modell	40
4.4.	Terrengmodellkonstruksjon i ArcMap	40
4.4.1.	Kombinere raster i ArcMap.....	40
4.4.2.	Konstruksjon av $DTM_{\text{grunnkart}}$	41
4.4.3.	DTM_{dGPS} – Terrengmodell basert på punktmålinger med differensial GPS	42
4.4.4.	DTM_{drone} – Terrengmodell basert på dronefotogrammetri.....	45
4.4.5.	DTM_{utenvoll} – Terrengmodell basert på pre-situasjonen.....	47
4.5.	Beregning av tilført massevolum i ArcMap	50
4.6.	RAMMS::Avalanche – Dynamisk modellering	52
4.6.1.	Oppsett av RAMMS::Avalanche	52
4.6.2.	Terrengmodell	52
4.6.3.	Løsneområde	52
4.6.4.	Bruddhøyde	53
4.6.5.	Friksjonsparametere	55
4.6.6.	Kohesjon og tetthet.....	56
5.	Resultater.....	57
5.1.	Metashape	57
5.2.	DTM_{dGPS} og DTM_{drone}	57
5.3.	Vollvolum.....	58
5.4.	DTM_{utenvoll}	59
5.5.	RAMMS::Avalanche	60
5.5.1.	Resultat pre-situasjon	61
5.5.2.	Resultat Store Buskreda	63
5.5.3.	Resultat Vetle Buskreda	65
5.5.4.	Resultat Linnskreda.....	67
5.5.5.	1000-årsskred	69
6.	Diskusjon.....	71
6.1.	Terrengmodeller og målemetoder	71
6.1.1.	<i>1.i. Gir differensial GPS eller dronefotogrammetri den mest presise gjengivelsen av skredvollene i terrengmodellen?</i>	71
6.1.2.	<i>1.ii. Hvilken målemetode er mest fordelaktig med tanke på sin kost-nytte-verdi?</i>	73
6.2.	Simuleringer og volldimensjonering	74

6.2.1	2.i. Gir parametervalgene i RAMMS realistiske og troverdige resultater for tørre snøskred?.....	74
6.2.1.	2.ii. Gir vollene tilstrekkelig sikring av veien med hensyn til vollhøyde, magasin størrelse, utforming og plassering?	79
6.3.	Refleksjoner.....	82
7.	Konklusjon	83
8.	Referanser.....	84
9.	Vedlegg	90
	Vedlegg 1 – Parameterinnstillinger.....	90
	Vedlegg 2 – 21 simuleringer	91
	Vedlegg 3 – RAMMS Advanced Avalanche	112

Tabelliste

Tabell 1 – Skredtrykk.....	16
Tabell 2 – Vollenes dimensjoner.....	22
Tabell 3 – Feilmarginene i CPOS.	26
Tabell 4 – Grunnlagsmateriale	30
Tabell 5 – Returperiode for nedbør i Veitastrond	54
Tabell 6 – Vollvolum.	58
Tabell 7 – Verdier fra simuleringer med $DTM_{utenvoll}$	61
Tabell 8 – Verdier fra simulering av Store Buskreda.....	63
Tabell 9 – Verdier fra simuleringer av Vetle Buskreda.	65
Tabell 10 – Verdier fra simuleringer av Linnskreda.	67

Figurliste

Figur 1 – Oversiktskart.....	4
Figur 2 – Helningskart over feltområdet.....	5
Figur 3 – Løsmassekart over feltområde.....	6
Figur 4 – Sammenligning av skogdekke.....	6
Figur 5 – Normalnedbør for Veitastrond 1961-1990.....	7
Figur 6 – Normal årsmaksimum snødybde 1971-2000.....	8
Figur 7 – Vindrose for værstasjonen Spørteggbu.....	8
Figur 8 – Skred fra Linnskreda.....	9
Figur 9 – Skredterreng.....	11
Figur 10 – Tredelt oppbygging av flakskred.....	13
Figur 11 – Flakskred.....	14
Figur 12 – Forholdet mellom skredfrekvens og returperiode.....	15
Figur 13 – α - β metoden.....	16
Figur 14 – Plogvoll/ledevoll.....	18
Figur 15 – Avbøyingsvinkelen mellom voll og skred.....	19
Figur 16 – Fangvoll.....	20
Figur 17 – De tre aktuelle vollene.....	21
Figur 18 – Dimensjonering av Buskreda-plogvoll.....	23
Figur 19 – Trilaterasjon.....	24
Figur 20 – Kommunikasjon mellom dGPS, referansestasjon og satellitter.....	25
Figur 21 – RTK-mottaker.....	26
Figur 22 – Skjærspenning med og uten kohesjon.....	29
Figur 23 – Differensial GPS.....	31
Figur 24 – Avvik ved brukerfeil dGPS.....	32
Figur 25 – Målepunkt Buskreda-plogvoll.....	33
Figur 26 – Målepunkt Linnskreda-ledevoll.....	33
Figur 27 – Målepunkt Linnskreda-fangvoll.....	34
Figur 28 – Datainnsamling med drone.....	34
Figur 29 – Spredt punktsky.....	37
Figur 30 – Tett punktsky.....	37
Figur 31 – Punktsky med feil høydeverdier.....	38
Figur 32 – Punktreferering.....	38

Figur 33 – Georeferert punktsky	39
Figur 34 – 3D-modell fra Metashape	39
Figur 35 – LiDAR-data fra 2012.....	40
Figur 36 – LiDAR-data brukt i oppgaven	41
Figur 37 – DTM _{grunnkart}	42
Figur 38 – Målepunkt og avgrensinger på vollene.....	43
Figur 39 – TIN-modell	44
Figur 40 – Raster-modell.....	45
Figur 41 – Høydefeil i dronemodell.....	46
Figur 42 – Avgrensingspolygon.....	47
Figur 43 – Konstruksjon av DTM _{utenvoll}	48
Figur 44 – Erosjonsproblem.....	48
Figur 45 – Rasteruthenting	49
Figur 46 – Rasterutklipp.....	50
Figur 47 – Terrengmodeller brukt i beregning av vollvolum.....	50
Figur 48 – Arbeidsflyt vollvolum.....	51
Figur 49 – Returperioder for 72-timers nedbør for Veitastrond.....	54
Figur 50 – Modeller konstruert i Metashape	57
Figur 51 – DTM _{drone} og DTM _{dGPS}	58
Figur 52 – DTM _{utenvoll}	59
Figur 53 – Løsneområdene brukt i RAMMS.	60
Figur 54 – Simuleringer av 20-årsskred med DTM _{utenvoll}	62
Figur 55 – Simuleringer av 100-årsskred med DTM _{utenvoll}	62
Figur 56 – Simuleringer av 20-årsskred i Store Buskreda	63
Figur 57 – Simuleringer av 100-årsskred i Store Buskreda	64
Figur 58 – Simuleringer av 20-årsskred i Vetle Buskreda.....	66
Figur 59 – Simuleringer av 100-årsskred i Vetle Buskreda.....	67
Figur 60 – Simuleringer av 20-årsskred i Linnskreda.....	68
Figur 61 – Simuleringer av 100-årsskred i Linnskreda.....	69
Figur 62 – Forskjell i detaljnivå	72
Figur 63 – Sammenligning mellom observert og simulert skred.....	79
Figur 64 – Forslag til ny plassering av Buskreda-plogvollen	80

1. Innledning

I tidsrommet 1998-2008 ble det registrert omtrent 22 000 skredhendelser på norske fylkes- og riksveier, hvorav 6 500 er snøskredhendelser (Norem, 2014). Dette hindrer trafikken, i tillegg til at fare for skred holder veier stengt i kortere eller lengre tid (Høeg, Karlsand & Lied, 2014). Et eksempel er ekstremværet Synne som inntraff i desember 2015 og medførte flom, skred og utglidninger som stengte vegnettet i betraktelige deler av Hordaland, Agder og Rogaland (Selseng, Handberg, Hveem, Bruvoll & Aall, 2019). Enda tyngre veier tap av menneskeliv, eksempelvis omkom tre personer i løpet av 2019 som følge av skred på norske veier (Aasen, 2019; Agersten et al., 2019).

Fremtidens klima forventes å øke antall skredhendelser grunnet større nedbørsmengder (Hanssen-Bauer et al., 2015). Med økt hyppighet av skred vil betydningen av sikringstiltak også være sentral i fremtiden. Slike tiltak kan for eksempel være voller som enten fanger opp eller leder vekk skredet. Å bygge skredvoller regnes å koste 10-20 % av kostnaden for tunneller og overbygg, og vil derfor være gunstig der de er egnet (Norem, 2014). Ifølge Nasjonal vegdatabank er det nærmere 700 voller som beskytter vegnettet mot skred i Norge (Statens Vegvesen, 2020a).

Veitastrond i Vestland fylke er en av mange plasser i landet der innbyggerne risikerer sin egen sikkerhet hver gang de ferdes til og fra bygden. Eneste forbindelse til omverden er fylkesvei 337, og veien er svært skredutsatt (NVE, 2020a). Syv km fra Veitastrond ble det i perioden 2012-2016 bygd fang- og ledevoller som skal beskytte fylkesveien mot snø- og sørpeskred (NRK, 2013; Statens Vegvesen, 2020b). Slike tiltak er store samfunnsøkonomiske investeringer, og det er derfor viktig at disse plasseres best mulig og at utforming og dimensjonering er riktig (Norem, 2014). Dimensjonering av skredvoller må være tilpasset aktuelle skredtyper.

Fra 1970 til 2012 er det registrert rundt 48 snøskred som har gått over veistrekningen disse skredvollene i dag beskytter (NVE, 2020a). Siden vollene ble bygget, har det vært registrert en hendelse der skred har nådd fylkesvei 337. Dette var på grunn av at snø løsnet fra fjellsiden over Vetle Buskreda. Det er ingen andre registrerte snøskred som har nådd veien, kun at skredmassene har stoppet før veien (NVE, 2020a).

For å sikre at vollene plasseres optimalt er det nyttig å bruke skredsimuleringsverktøy. Slike verktøy kombinert med presise og detaljerte terrengmodeller gir god informasjon til de som har ansvar for utforming og planlegging av skredvoller.

I denne oppgaven skal vi konstruere oppdaterte terrengmodeller av feltlokaliteten i Veitastrond ved hjelp av dronefotogrammetri og differensial GPS, sammenligne disse og se hvilken metode som gir best resultater. Disse terrengmodellene vil vi deretter bruke i RAMMS::Avalanche for å vurdere om de bygde vollene ved Linnskreda, Store Buskreda og Vetle Buskreda er riktig plassert og dimensjonert mot tørre snøskred. Da vil vi få en grafisk framstilling av flyte høyde, hastighet og trykk gjennom skredløpet og idet et skred treffer vollene og veien.

1.1. Problemstillinger

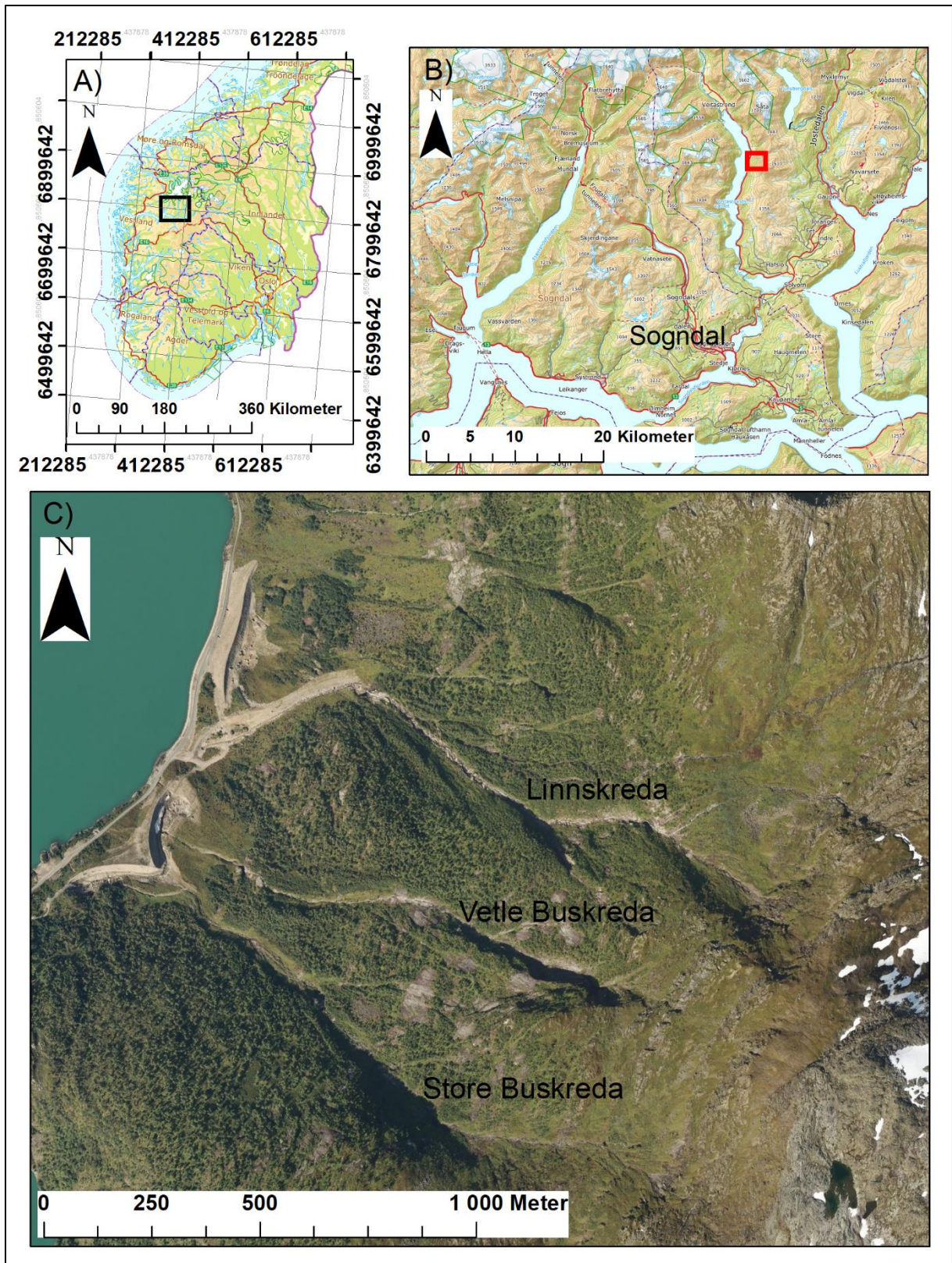
1. Vurdere hvilken målemetode som gir best terrengmodell.
 - i. Gir differensial GPS eller dronefotogrammetri den mest presise gjengivelsen av skredvollene i terrengmodellen?
 - ii. Hvilken målemetode er mest fordelaktig med tanke på sin kost-nytte-verdi?
2. Vurdere ved hjelp av RAMMS::Avalanche om fangvollen ved Linnskreda og plogvollen ved Buskreda langs fylkesvei 337 til Veitastrond er tilstrekkelig dimensjonert mot snøskred som truer veinettet.
 - i. Gir parametervalgene i RAMMS realistiske og troverdige resultater for tørre snøskred?
 - ii. Gir vollene tilstrekkelig sikring av veien med hensyn til vollhøyde, magasininstørrelse, utforming og plassering?

2. Områdebeskrivelse

2.1. Geografisk beliggenhet

Feltlokaliteten ligger langs Veitastrondsvatnet i Luster kommune, Vestland fylke (Figur 1A og B). Området omfatter løsneområdene til skredløpene Linnskreda, Vetle Buskreda og Store Buskreda, samt skredløpene og utløpsområdene som ender i tre skredvoller langs fylkesvei 337, Veitastrondsvegen, se Figur 1C. De tre vollene er en fangvoll og en ledevoll nedenfor Linnskreda og en plogvoll nedenfor Vetle Buskreda og Store Buskreda. Plogvollen ble ferdigstilt i 2013 (NRK, 2013), ledevollen i 2015 og fangvollen i 2016 (Statens Vegvesen, 2020b). Feltlokaliteten spenner seg fra 170 m over havet til omtrent 1500 m over havet og lokaliteten er vendt i en vestlig himmelretning (Kartverket, 2020a).

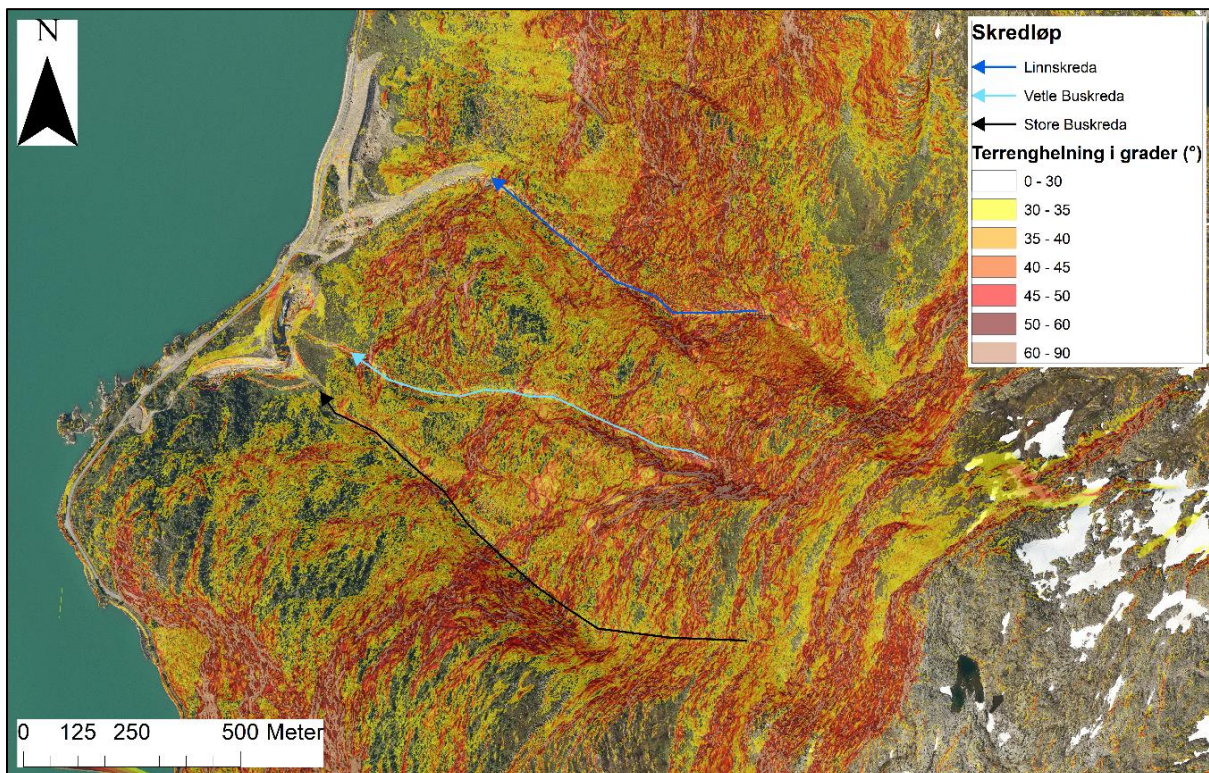
I nordenden av Veitastrondsvatnet ligger Veitastrond. Fylkesveien tar av fra riksvei 55 på Hafslø og er 34 km lang inn til Veitastrond. Bygden hadde 123 innbyggere per 2018 (Askheim, 2020) og årsdøgnetrafikken (ÅDT) på strekningen langs vannet er 150 biler i døgnet (Statens Vegvesen, 2020c). Aktsomhetskart viser at veistrekket langs Veitastrondsvannet ligger innenfor utløpsområdene for snøskred, flomskred og steinsprang (NVE, 2020a).



Figur 1 - Figur A) viser oversiktskart over Sør-Norge. Svart rektangel viser hvor feltområdet befinner seg. Figur B) Viser Sognefjorden hvor rødt polygon rammer inn feltområdet. Figur C) er et oversiktsbilde over feltområde.

2.2. Topografi

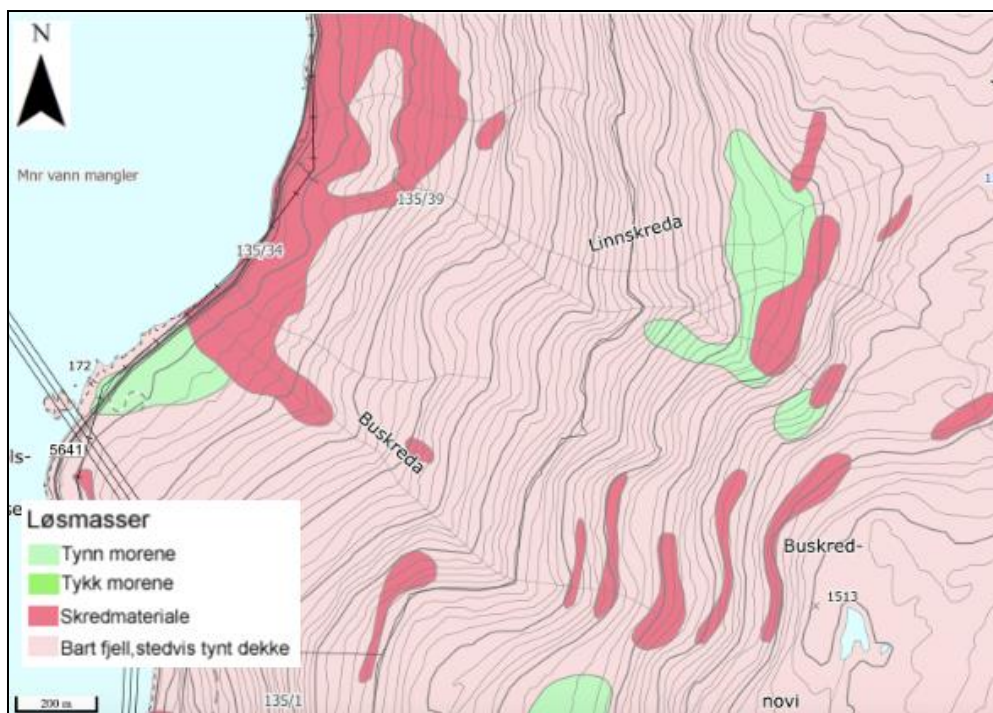
Feltområdet består blant annet av tre skålformasjoner i terrenget som strekker seg fra 1000 m over havet til 1500 m over havet. Disse danner oppsamlingsområder for snø og er typiske løснеområder for store snøskred (Kristensen, Domaas, Høydal, Ekseth & Gauer, 2015). Skålformasjonene innsnevres til kanaliserte dalfører nedover i terrenget, og munner ut i et slakere område hvor de tre skredvollene er. Som Figur 2 viser er helningen i området preget av terreng over 30 grader. Skredløpene kanalisierer skredene og vil føre skredmassene fra løснеområdet til utløpsområdet (se Figur 2).



Figur 2 - Helningskart over feltområdet.

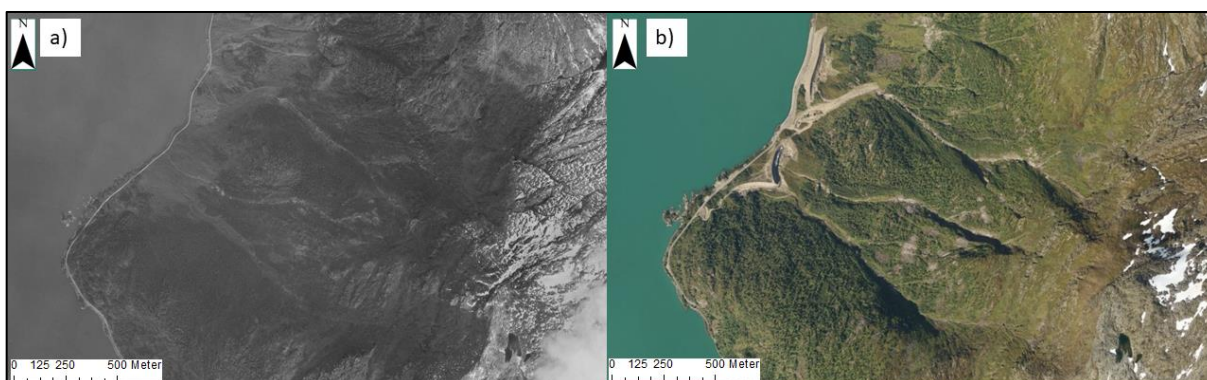
2.3. Geologi og vegetasjon

Figur 3 viser løsmassekart fra NGU som er kartlagt i 1:50 000 i området. Kartet viser skredmateriale og tynn morene nederst i Buskreda og skredmateriale nederst i Linnskreda. Skredløpene består i dominerende grad av fjell i dagen, med forekommende tynt dekke av løsmasser. I de øverste delene av løpene er det i hovedsak bart fjell, med stedvis tynt løsmassedekke, i tillegg til skredmateriale og tynn morene enkelte steder (NGU, 2020a).



Figur 3 - Løsmassekart over feltområde (NGU, 2020a).

Vegetasjonen i området er kjennetegnet av løvskog (Nibio, 2020). Der terrenget er tilpasset på grunn av utbyggingen av vollene er det tynnere vegetasjon. Løvskogen har ikke forandret seg i utbredelse merkverdig siden 1964-1965 (se Figur 4) (Kartverket, 2020b).



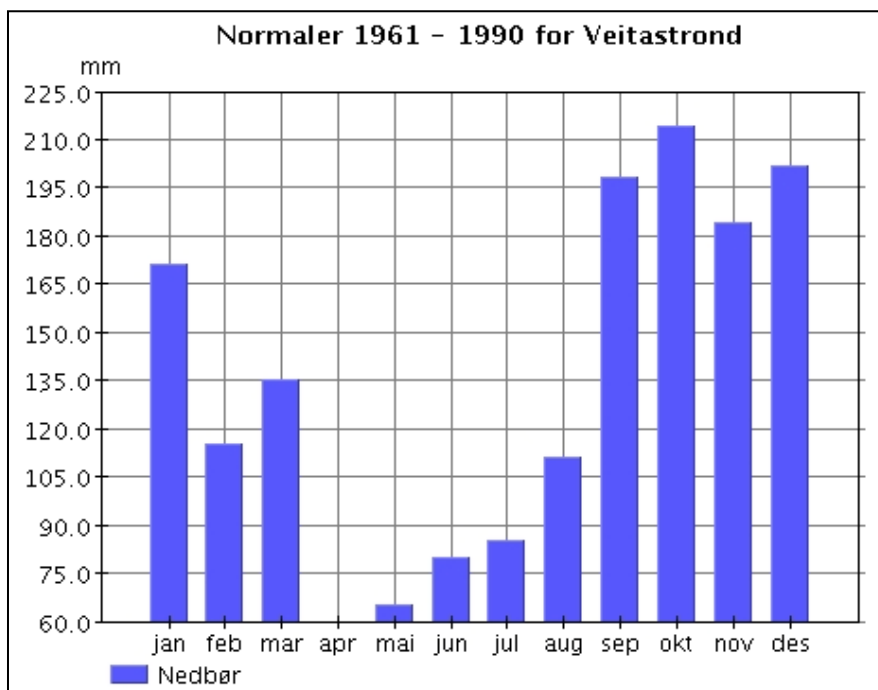
Figur 4 - Sammenligning av skogdekke. Bilde A) er fra 1964-1965 og bilde B) fra 2019 (Kartverket, 2020b).

Tregrensen er på omtrent 900 m over havet rundt feltlokaliteten (Lome, 2017). Vegetasjon er avgjørende for om snøskred løsner, siden tett skog vil kunne holde på snøen. I tillegg vil skog føre til mindre vindpåvirkning og et annet mikroklima. I studieområdet ligger løsneområdene over tregrensen i tillegg til at skredløpene er uten trær, slik at skogens stabiliserende og bremsende effekt er fraværende (Kristensen et al., 2015).

2.4. Klima og værforhold

Området er preget av et noe tørrere vestlandsklima enn kyststrøkene på grunn av beliggenheten i indre del av Sognefjorden. Klima er derfor svakt kontinentalt med kaldere vintre og mindre nedbør (Kristensen et al., 2015; Puschmann, 2005).

Nærmeste operative meteorologiske målestasjon er i Veitastrond og ligger 172 meter over havet i nordenden av Veitastrondsvatnet, omtrent 8 km i luftlinje fra løснеområdene (Kartverket, 2020a). Den måler nedbør og eies av Meteorologisk institutt (Senorge, 2020). Stasjonen har målt nedbørsmengde kontinuerlig siden 1. september 1972. Normalnedbøren per år er omtrent 1 565 mm og mesteparten av nedbøren kommer fra september til januar, men det kommer og betydelig nedbør i februar og mars (se Figur 5).

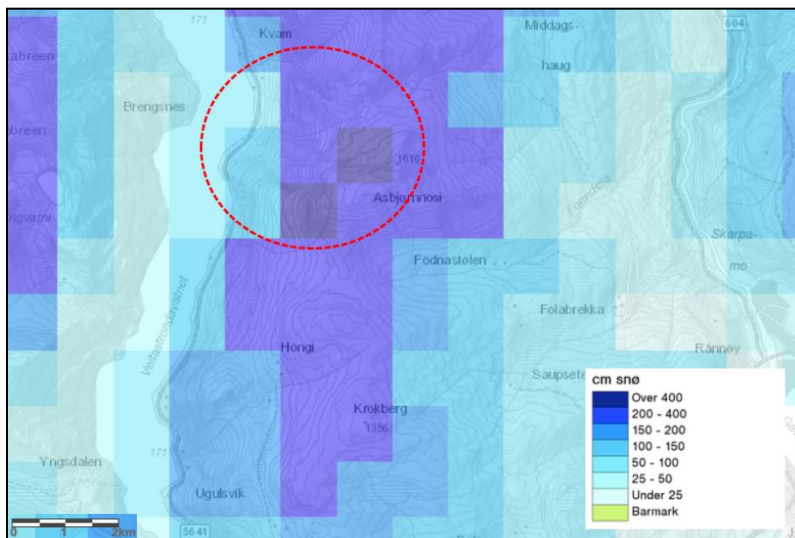


Figur 5 - Normalnedbør for 1961-1990 for nedbørstasjonen Veitastrond i Luster (55670). Stasjonen måler ikke temperatur (Meteorologisk institutt, 2020).

I NVEs database NEVINA er beregnet årsnedbør for nedbørsfeltet til Linnskreda og Buskreda omtrent 1 300 mm per år, hvorav rundt 870 mm regnes som vinternedbør (oktober-april) og gjennomsnittstemperaturen fra oktober til april er -3 grader i nedbørsfeltet. Dette betyr at i vinterhalvåret vil nedbør generelt komme som snø og problematikk knyttet til tørre snøskred vil kunne oppstå. I overgangen vinter til vår hvor snøsmeltingen er stor, vil problematikken kunne knyttes opp mot våte snøskred (NVE, 2020b). I NEVINA er nedbørsfeltgrenser og feltparametere automatisk generert basert på naturlige feltgrenser (NVE, 2019).

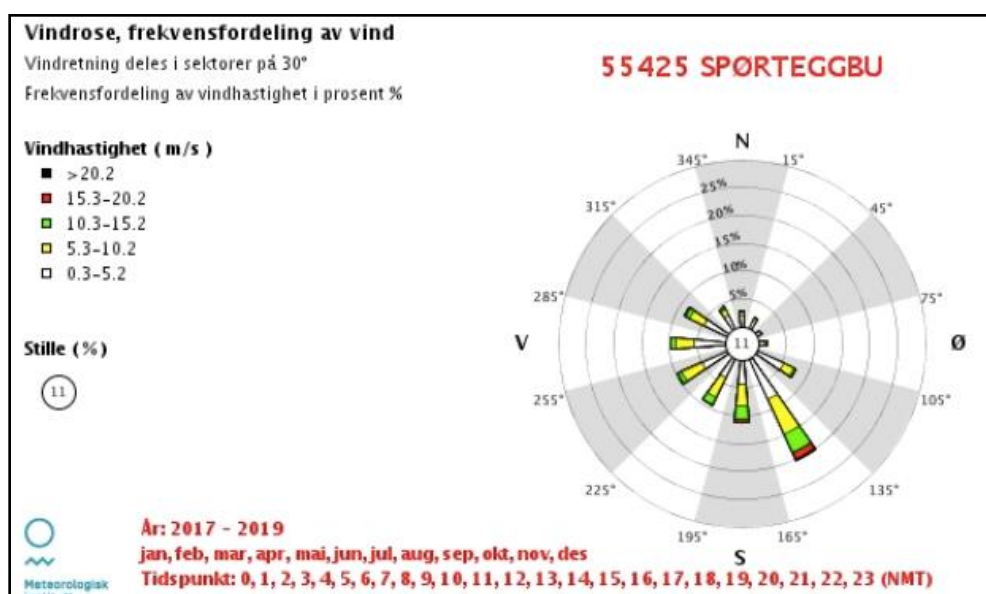
Interpolert data viser at normal årsmaksimum for snødybde i perioden 1971-2000 er mellom

200 cm og opp til over 400 cm i området (se Figur 6) (Senorge, 2020). Det kommer mest nedbør i området når vindretningen er fra sør-vest til vest. Dette er altså den nedbørsførende vindretningen for feltlokaliteten og Vestlandet sør for Stadt generelt (NVE, 2017).



Figur 6 - Viser normal årsmaksimum av snødybde (i cm) for normalperioden 1971-2000. Rød stiptet sirkel markerer feltlokaliteten (Senorge, 2020)

Figur 7 (Meteorologisk institutt, 2020) viser vinddata for målestasjonen Spørteggbu som ligger 1 566 m over havet på en fjellrygg og er den værstasjonen med måling av vindretning og -hastighet som ligger nærmest feltlokaliteten. Værstasjonen Spørteggbu ligger 23 km i luftlinje, på omtrent samme høyde som løснеområdene og gir et godt estimat for vindretning og -styrke for feltlokaliteten (Kartverket, 2020a). Utfra Figur 7 kommer det fram at den dominerende vindretningen er fra sørøst, sørvest og nordvest. Flankene i løснеområdene som ligger i le for disse vindretningene vil samle mest snø.



Figur 7 – Vindrose med frekvensfordeling av vind for værstasjonen Spørteggbu (55425) (Meteorologisk institutt, 2020).

2.5. Tidligere skredhendelser og bakgrunn

Gjennom årene har fylkesveien inn til Veitastrond vært stengt flere ganger grunnet skred og skredfare. Fra 1979 til i dag har det blitt registret omtrent 53 skred i skredløpene Linnskreda, Vetle Buskreda og Store Buskreda til sammen, hvorav 50 har truffet veien og 48 er snøskred (NVE, 2020a).

For Store Buskreda og Vetle Buskreda er skredfrekvensen i snitt to skred per år, samt en stengingsfrekvens på to ganger per år grunnet skred, og antall stengingsdøgn er tre per år grunnet skredfare (Statens Vegvesen, 2020b). Den dimensjonerende skredtypen i disse to skredløpene er tørre snøskred (Håland, 2011). For Linnskreda er skredfrekvensen ett per år, stengingsfrekvensen annethvert år og antall stengningsdøgn på grunn av skredfare tre i året (Statens Vegvesen, 2020b). Her er det flere skredtyper som forekommer: jord- og steinskred, sørpeskred og tørre snøskred (Frækaland, 2007). Det er ingen omkjøringsmuligheter inn til Veitastrond. Figur 8 viser skred fra Linnskreda.



Figur 8 - Viser skred som gikk i 2011 fra Linnskreda. Bildet er hentet fra NRK (Løset, 2011).

3. Teori

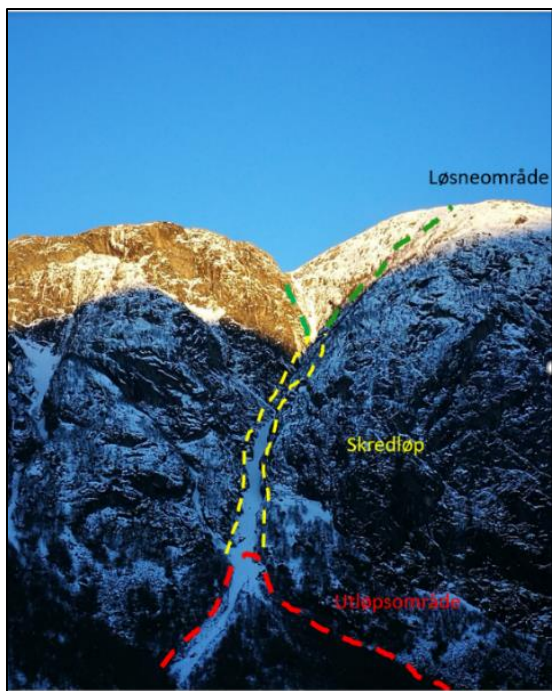
3.1. Snøskred

Definisjonen på skred er når snø, berggrunn, tidligere avsatte løsmasser eller en kombinasjon av disse blir utsatt for en brå forflyttelse. Denne prosessen er gravitasjonsdrevet (Hardeng & Linge, 2019). Skred er den naturhendelsen som gjør størst skade i Norge og fører hvert år til store materielle skader og tap av menneskeliv (NGU, 2020b). I Norge klassifiseres skred vanligvis etter hvilke materialer som raser ut: fast fjell, snø eller løsmasser. Skred kan også oppstå som en blanding av disse overordnede typene (Lied & Kristensen, 2003).

I et land som Norge med lange vintre og store snømengder er vi spesielt utsatt for snøskred. Hvert år går det tusenvis av snøskred i norske fjell og langs norske veier (Statens Vegvesen, 2019). I Norge tar snøskred hvert år menneskeliv; mellom 1836 og 2003 har minst 1 510 menneskeliv gått tapt i snøskred (Lied & Kristensen, 2003).

3.1.1. Snøskredterrenget

Snøskredterrenget kan deles inn i tre deler: løsneområde, skredløp og utløpsområde (Lied & Kristensen, 2003). Løsneområdet er området hvor skredet starter (se Figur 9). Dette kan være forskjellige terrengformasjoner som fanger snø ved vindtransport, slik som botner, skålformasjoner eller skar. Vinden vil avsette snø på le-siden og erodere bort fra lo-siden til terrengformasjonene (McClung & Schaerer, 2006). I løsneområder er helningen vanligvis mellom 30°- 60° (Jaedicke, 2019).



Figur 9 - Typisk skredterreng med løsningsområde, skredløp og utløpsområde. Her fra Skei i Jølster (Foto: privat).

Det er vanskelig å anslå nedre grense for utløsning av snøskred, men man kan ved svært ustabile forhold få naturlig utløste, tørre flakskred helt ned mot 28° helning (Hardeng & Linge, 2019). I områder brattere enn 60° vil snøen gli ut kontinuerlig, slik at man heller får mange små utglidninger enn store skred (Norem, 2014). Likevel bør alt terreng brattere enn 30° som ikke er dekket av tett skog anslås som mulig snøskredterreng (Lied & Kristensen, 2003).

Skredløpet er området mellom løsningsområdet og utløpsområdet (se Figur 9). Skredløpet har vanligvis en helning på 15° - 30° , men dette variere ut ifra hvilke typer snøskred man har i området (Hardeng & Linge, 2019). Skredløpet vil normalt følge terrengformasjoner, slik som bekkedaler og forsenkninger, men kan gå over sidekantene ved store skred og svingete skredløp (Høeg et al., 2014).

Utløpsområdet er området hvor skredet stopper og det meste av massene ender opp (se Figur 9). Hvor bratt utløpsområdet er avhenger først og fremst av egenskapene til snøskredet. Våte skred vil stoppe ved brattere helning enn tørre skred, og små skred vil stoppe før store. Våte skred stopper vanligvis ved en helning på 15° - 25° , mens tørre skred stopper ved 10° - 20° (Høeg et al., 2014). Hvor stort utløpsområdet er avhenger også av snøskredtype. Våte skred vil normalt ikke gå lengre enn dalbunnen, mens store, tørre snøskred kan nå langt utover dalbunnen, og i ekstreme tilfeller nå 50-100 meter opp motsatt dalside (Lied & Kristensen, 2003).

3.1.2. Snødekket

Snø dannes når vanndamp kondenserer og fryser på frysekjerner i atmosfæren (Lied & Kristensen, 2003). Tettheten til snøen vil variere med vind og temperatur, med lavest tetthet i kaldt, rolig vær og økende tetthet med økende temperatur og vind. Det er vanlig å anslå en tetthet på 100 kg/m^3 for nysnø, og med denne tettheten vil 1 mm nedbør målt som vann tilsvare 1 cm snø (Høeg et al., 2014).

Snødekket vil alltid ha en form for lagdeling, da hvert snøfall kommer ved forskjellige værforhold, og dette vil gi fastere og løsere lag om hverandre (Høeg et al., 2014; McClung & Schaerer, 2006). Disse lagene vil være avgjørende for skredfaren.

Så snart snøen har lagt seg på bakken vil den omdannes. Dette skjer på grunn av tyngdekraftens virkning på snømassen og metamorfose av snøkrystallene (Lied & Kristensen, 2003). Når snøen faller, vil forgreiningene på krystallene binde snøen. Etter hvert vil omdanningen bryte ned forgreiningene, slik at skredfaren øker (Lied & Kristensen, 2003; McClung & Schaerer, 2006). Videre vil snømetamorfose føre til at skredfaren avtar etter hvert som snøen synker sammen og stabiliseres. Omdanningen fører til at tettheten øker til ca. 300 kg/m^3 , samtidig som at porevolumet minker (Lied & Kristensen, 2003).

3.1.3. Snøskredtyper

For at et snøskred skal kunne løsne, må skjærkreftene være større enn de motsettende kreftene til snømassene. Dette kan skje enten ved at belastningen på snølaget øker eller at snølaget svekkes (Lome, 2017). Økende belastning kan oppstå ved mye nysnø og snøakkumulasjon, eller av en skikjører. Svekkelse av snølaget kan forekomme ved økende temperatur og smelting av bånd mellom krystaller (Jamieson, Schneebeli & Schweizer, 2003). Skjærkreftene avhenger av gravitasjonskraften snømassen utsettes for, altså vekten til snømassene og helningen til skråningen. De motsettende kreftene avhenger av friksjon og kohesjon (Hardeng & Linge, 2019).

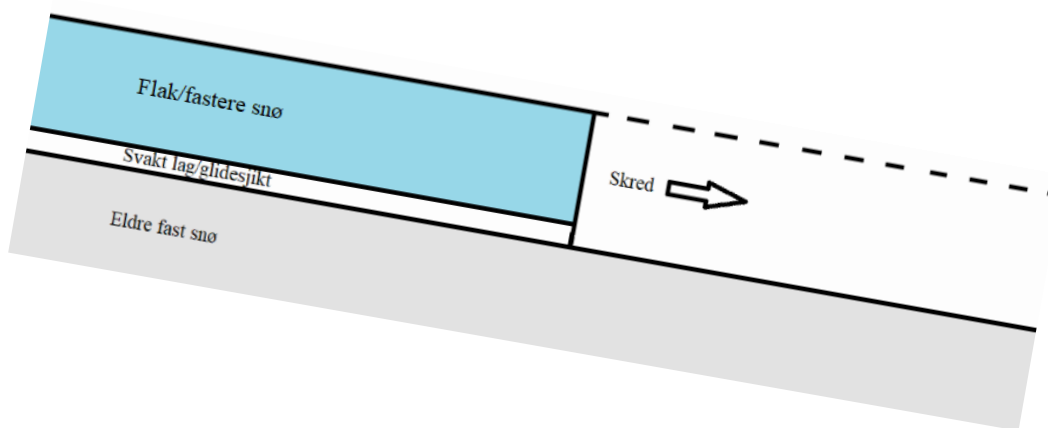
Snøskred deles gjerne i to hovedtyper: løssnøskred og flakskred. I tillegg kan sørpeskred nevnes som en tredje snøskredtype. Både flakskred og løssnøskred kan ha varierende vanninnhold, slik at de kan være både tørre og våte (McClung & Schaerer, 2006).

Løssnøskred er når ubunden snø settes i bevegelse. Disse skredene starter i ett punkt, før de brer seg utover til sidene nedover i skråningen (Lied & Kristensen, 2003; McClung & Schaerer, 2006). Snøen settes i bevegelse når gravitasjonskreftene overvinner bindingene

mellom snøkrystallene, og for tørre løssnøskred må det vanligvis være brattere enn 45° for at dette skal skje (Lied & Kristensen, 2003).

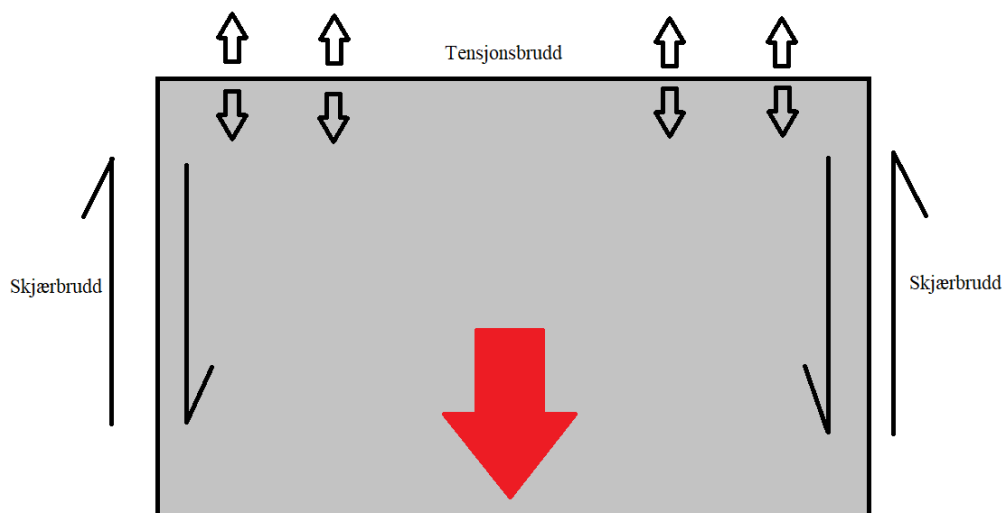
Flakskred er som navnet tilsier et snøskred bestående av ett flak. De aller fleste store skred som gjør skade på liv og infrastruktur tilhører denne typen skred (Lied & Kristensen, 2003). Derfor benyttes flakskred vanligvis som dimensjonerende skredtype ved utregning av utløpsdistanse og planlegging av eventuelle sikringstiltak. De største og hyppigste flakskredene løsner mellom 35° - 50° (Norem, 2014).

Den grunnleggende oppbyggingen er i prinsippet lik for alle flakskred, og den består av tre lag (se Figur 10). Nederst har man et fast lag som fungerer som et glideplan. Dette kan være eldre, fast snø eller i noen tilfeller bakken. Om flaket løsner ved bakken er det gjerne i områder med lav ruhet, slik som bart fjell eller gress (McClung & Schaerer, 2006; NVE, 2020c). Oppå dette har man et tynt, svakt lag med liten fasthet som vil virke som et glidesjikt. Disse svake lagene består vanligvis av rimkrystaller, upåvirket nysnø, kantkorn, begerkrystaller eller sprøhagl. Øverst har man et fastere lag, for eksempel fokksnø, som vil utgjøre selve flaket (Lied & Kristensen, 2003).



Figur 10 - Tredelt oppbygging av flakskred. Bruddet oppstår og forplantes i det svake laget.

Flakskredet utløses når et spontant skjærbrudd oppstår i det svake laget (Avalanche.org, 2020; Lied & Kristensen, 2003). Bruddet forplanter seg raskt i dette laget, slik at man får et større flak som er frigitt fra underlaget (Lied & Kristensen, 2003). I bakkant av flaket oppstår et tensjonsbrudd med en markant bruddkant 90° på terrenget, mens man på sidene av flaket vil få skjærbrudd (se Figur 11).



Figur 11 – Grå rektangel forestiller et flakskred. Rød pil viser bevegelsesretning til skredet. I bakkant av flaket vil man få tensjonsbrudd normalt på terrenget, mens man på sidene vil få skjærbrudd.

Bruddkantlengden til flakskred varierer fra alt mellom 10 meter til over 1 kilometer. Høyden på bruddkanten vil variere langs bruddkantens utstrekning, men den er vanligvis fra ca. 20 centimeter til 2-3 meter høy (Høeg et al., 2014; Norem, 2014). De store forskjellene i utstrekning og tykkelse gir store volumvariasjoner for flakskred. Volumet ligger normalt mellom 100-100 000 m³, og sjeldent over 1 000 000 m³ (Norem, 2014).

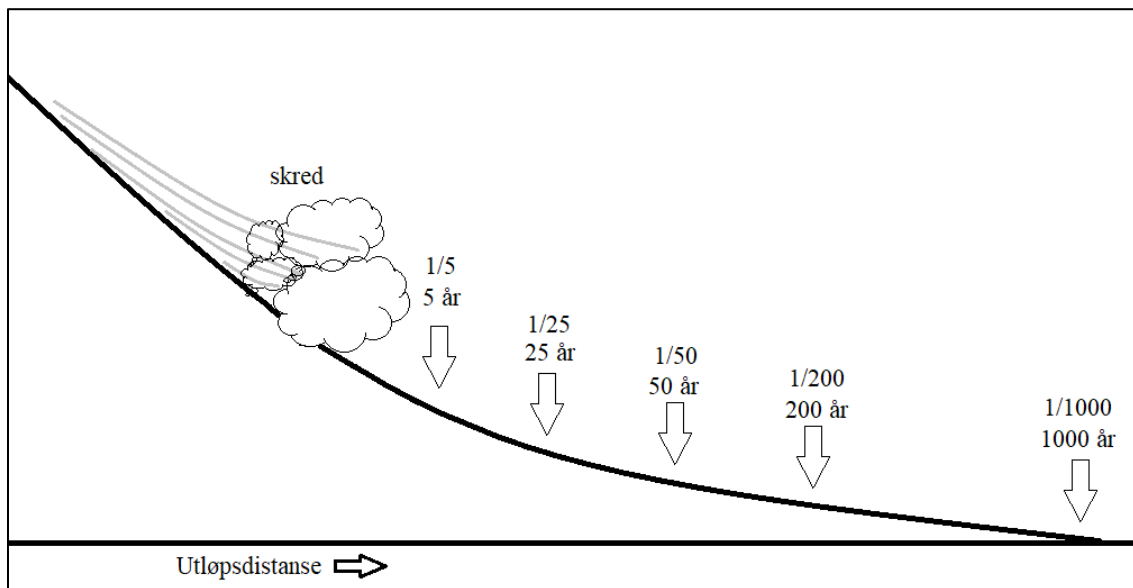
Sørpeskred kan nevnes som en tredje skredtype. Dette er snøskred hvor porerommet er fylt med vann. Sørpeskred er i motsetning til våte snøskred fullstendig vannmettet (McClung & Schaerer, 2006). Disse skredene kan løsne ved lavere helning enn tørre skred, og løsneområdet finnes gjerne nær bekker eller områder hvor vann samles. På grunn av det store vanninnholdet beveger sørpeskred seg nesten flytende, og de kan dermed ha svært lange utløp (Lied & Kristensen, 2003).

3.1.4. Skredbevegelse

Å forstå skredets bevegelse er viktig for å kunne vurdere faren skredet utgjør. Etter utløsning av et tørt flakskred vil flaket gå i oppløsning på grunn av terrengruheten og kollisjoner mellom partikler i skredet (McClung & Schaerer, 2006). Slik brytes det ned til mindre partikler som ruller, hopper og glir. Hvis hastigheten går over ca. 10 m/s vil skredet bestå av et flytelag, et saltasjonslag og et suspensjonslag/snøsky (Lied & Kristensen, 2003; McClung & Schaerer, 2006). Snøskya har liten kontakt med bakken, og dermed liten friksjon, og kan fortsette flere hundre meter etter at de tunge massene til skredet har stoppet opp (Norem, 2014).

3.1.5. Utløpsdistanse

Utløpsdistansen til skredet er sterkt knyttet til faren skredet utgjør, og dette er dermed et svært viktig tema (Lied & Kristensen, 2003; Norem, 2014). Det er mange faktorer som spiller inn på utløpsdistansen, blant annet skredstørrelse og terreng, slik at å beregne dette nøyaktig er en nær umulig oppgave. Hyppigere skredfrekvens har kortere returperiode og mindre skred vil gå oftere enn skred med større returperiode (se Figur 12) (Lied & Kristiansen, 2003; Norem, 2014).

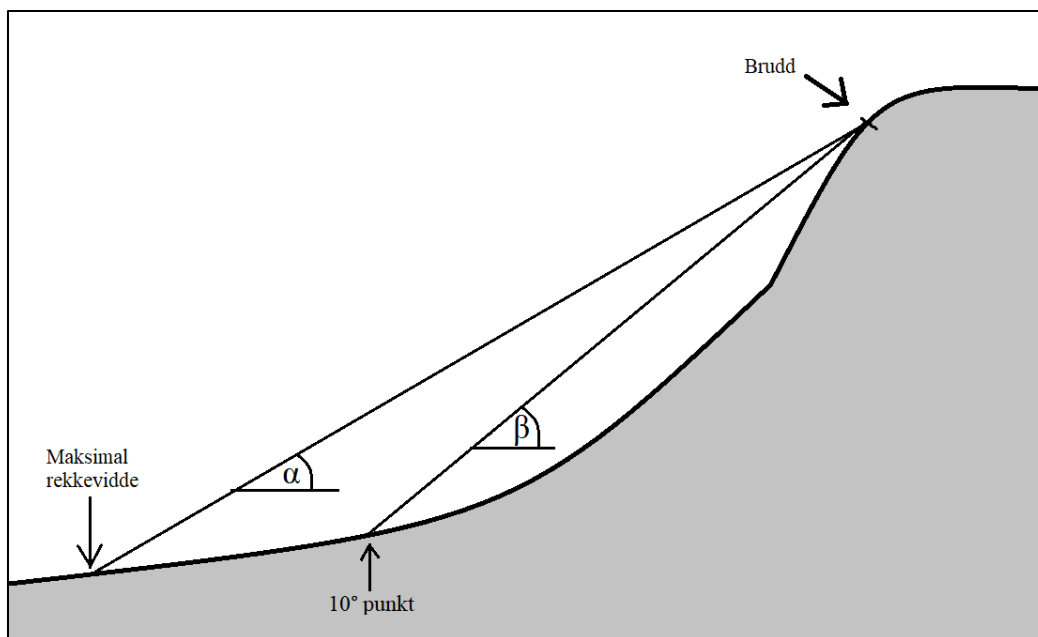


Figur 12 - Forholdet mellom skredfrekvens og returperiode. Sannsynligheten for at et skred når et punkt minsker utover skredløpet.

Det er lagd en rekke modeller som skal hjelpe oss med å kalkulere rekkevidden til et skred. En av de mest brukte modellene er den norske topografiske α - β modellen for snøskred (Lied & Kristensen, 2003). Her ser man på maksimalt utløp for en gitt skredbane på grunnlag av dens topografiske egenskaper (Lied & Kristensen, 2003; Norem, 2014).

α - β metoden brukes ved at man først finner 10° -punktet i skredbanen (se Figur 13). Herfra måler man vinkelen, β , for siktelinjen opp til løsneområdet. Med denne vinkelen kan man finne α -vinkelen ved hjelp av formelen (formel 3.1) under (Lied & Kristensen, 2003). α -vinkelen vil da gi maksimal rekkevidde til et snøskred i denne skredbanen.

$$\alpha = 0,96\beta - 1,4^\circ \text{ med standardavvik, } S = 2,3^\circ \quad (3.1)$$



Figur 13 – Figuren viser α - β metoden for snøskred.

En annen type modeller er dynamiske beregningsmodeller. Disse modellene har sitt grunnlag i hydrauliske teorier for åpne kanalstrømmer. Ved hjelp av matematiske ligninger vil man finne ut rekkevidden til snøskredene (Lied & Kristensen, 2003). En av disse modellene vil bli nærmere forklart i 3.4.

3.1.6. Skredtrykk

Et skred vil utøve trykk mot alt det treffer. Trykket skredet utøver avhenger av skredets hastighet og tetthet, samt skredlagets tykkelse (Norem, 2014). Trykk oppgis i Pascal (Pa), og er gitt av kraft per kvadratmeter (N/m^2) (Trykk - fysikk, 2019). En oversikt over ødeleggelser av skredtrykk gis i Tabell 1 (Walberg, 2019). Eksempelvis tåler en bil omkring 10 kPa, mens det trengs ca. 20 kPa for å velte et tog av skinnene (Alexander, 1993).

Tabell 1 - Tabellen viser trykk og forventet skadeomfang etter snøskred (Walberg, 2019).

Trykk (kPa)	Forventede skader
<1	Skader ikke sannsynlig
1-3	Vinduer og dører kan slås inn
3-10	Skader på trehus
10-20	Skader på murhus
20-30	Skader på betonghus
30-60	Skader på forsterket betonghus
>60	Store ødeleggelser

3.2. Skredvoller

Terrengformasjoner, som bekkedaler og renner, styrer skredmassenes bevegelsesmønster. Dette hjelper oss i plasseringen av sikringstiltak mot skred. Terrengtiltak som fang- og ledevoller vil kunne øke trafikksikkerheten og er rimeligere enn tunnel og overbygg (Norem, 2014). Slike tiltak må planlegges grundig for ideell utforming og for å holde kostnadene nede (Lied & Kristensen, 2003).

Sentralt i utformingen av en voll er dens plassering, form og dimensjonering. Vegvesenets *Håndbok VI38 - Veger og snøskred* fra 2014, skrevet av Norem, vektlegger flere faktorer, blant annet vinkelen mellom vollen og skredet i treffpunktet (avbøyingsvinkelen), graden av retningsendring for buede voller, vollens høyde, drenering i området, magasinutforming og brattheten til støtsiden. Hastigheten, flyteøyden og størrelsen til skredet, i tillegg til skredtype: sørpe, vått eller tørrsnøskred er også sentralt (Norem, 2014).

Når det gjelder plassering av vollene er det viktig at de bygges lengst mulig ut i skredløpet og så nærme veien som mulig for best beskyttelse, grunnet at hastigheten til skredmassene avtar med økende avstand fra løsneområdet. I tillegg vil skredvolumet være mindre lengre ut i skredbanen (Norem, 2014).

En forutsetning for plassering av ledevoller er at de kan lede skredmateriale et sted uten å øke skredfaren for annen infrastruktur og bygninger (Høeg et al., 2014). På skredsiden av den fremtidige vollen tas masser ut og brukes i konstruksjonen. I tillegg lages det et magasin i forkant av vollen og vollhøyden økes (Norem, 2014). Ved utgraving er det viktig at magasinet blir stort nok til å romme forventet skredvolum. Rommer ikke magasinet nok er det sannsynlig at skredet vil fylle det opp og deretter gå over vollen (Høeg et al., 2014; Lied & Kristensen, 2003; Norem, 2014).

Når tørre snøskred treffer vollveggen vil det dannes en snøsky. Snøskya kan treffe, svekke sikten til og feie biler av veien (Lied & Kristensen, 2003). En løsning er å bygge vollen så nært veien som mulig, fordi man får en sone i le nærme vollen. Det er viktig at vollen er høyere enn kjøretøy som passerer, slik at trykket fra snøskya heves over kjøretøyene (Norem, 2014).

3.2.1. Ledevoll

En ledevoll brukes til å føre skredet vekk fra dets naturlige skredbane og hindre ødeleggelse, ofte parallelt med veien, mot broer, over skredoverbygg eller tunneller (Norem, 2014).

Ledevoller kan være rette, buede eller gis en plogform (se Figur 14) og kan både lede og fange opp skredmateriale (Lied & Kristensen, 2003).

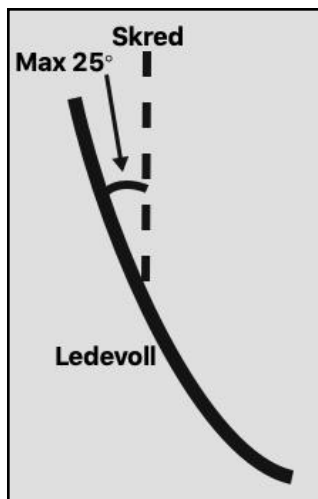


Figur 14 - Avbildet er Buskreda-plogvollen med vullkrone og vullfot markert med svart stiptet linje, magasin og støtside/vollside. Bakgrunnskart fra www.norgebilder.no.

Ledevoller vil ha ulik ledeevne avhengig av snøtype. Våte snøskred er skredtypen som lar seg lettest lede, mens tørre snøskred og sørpeskred er vanskeligere å håndtere med en ledevoll. En ledevoll i brattere helning fungerer bedre enn en på flat mark (Høeg et al., 2014; Lied & Kristensen, 2003; Norem, 2014).

Retningsendring vil si hvor mye skredets retning endrer seg fra skredbanen før vollen til dens ende (Orset, 2017). I en buet voll vil massene lengre bak i skredet enklere ta igjen massene foran når de fremre skredmassene bremses. Slik går de bakre delene lettere over vollen når retningsendringen blir for brå. Det er derfor viktig med en gradvis retningsendring for buede voller (Norem, 2014).

En økt avbøyingsvinkel, vinkelen mellom vollen og skredet i treffpunktet, fører til at en større andel skredmasser går over støtsiden. Brateng (2005) fant ut at en avbøyingsvinkel på 15° og en vertikal vollvegg gir best effekt. Denne avbøyingsvinkelen burde ikke overskride 25° (Brateng, 2005), se Figur 15.



Figur 15 - Illustrerer avbøyingsvinkelen mellom voll og skred, som ikke bør overskride 25° for å opprettholde vollens ledende effekt.

Skredets hastighet og flyte høyde er viktig i planleggingen av vollens høyde (Høeg et al., 2014). Flyte høyde vil si hvor høyt skredet er over bakken når det renner nedover skredløpet (Lied & Kristensen, 2003). Vollens høyde bør være konstant (Norem, 2014).

For å beregne høyden på ledevollen trenger man informasjon om skredets stighøyde, altså hvor høyt skredet vil “klatre” på vollveggen. Denne høyden kan anslås ved å regne ut skredets hastighetsenergi i sammenstøtet, som tilsvarer stighøyden (Norem, 2014), vist i formel 3.2:

$$H_{ka} = \frac{v \cdot \sin^2 \alpha}{2g} \quad (3.2)$$

Hvorav v = skredets hastighet, α = avbøyingsvinkelen, g = tyngdeakselerasjon og hastighetskomponenten vinkelrett på ledevollen er $\sin \alpha$. I treffpunktet går noe energi tapt (Norem, 2014). I tillegg til energitap må man ta skredets flyte høyde og snøtykkelse på bakken i betraktning. Formelen for ledevoller sin høyde blir derfor som vist i formel 3.3 (Norem, 2014):

$$H_{ledevoll} = k \cdot H_{ka} + H_{skred} + H_{snø} \quad (3.3)$$

Der H_{skred} er flyte høyden til skredet, som typisk er 1-2 meter for snøskred. $H_{snø}$ er snøtykkelsen på bakken, vanligvis 1-2 meter. k er en faktor som sier noe om hvor mye av hastighetsenergien som er igjen etter sammenstøt til å drive skredet opp vollen, og vil være mellom 0,8-1,0 (Norem, 2014).

3.2.2. Fangvoll

I motsetning til ledevoller, er fangvoller plassert med en 90° vinkel på skredbanen. Det er mer krefter i treffpunktet og skredet vil gå høyere opp på støtsiden (Aas, 2012). Fangvollen skal stoppe skredmassene uten å lede de til siden (Norem, 2014). En fangvoll er vist i Figur 16.



Figur 16 - Avbildet er Linnskreda-fangvollen (Kartverket, 2020b) med inntegnet vollkroner og vollfot i svart stiplede linje og magasin og støtside/vollside markert.

Viktigst i utformingen av en fangvoll er vollens høyde. Vollen må være høy nok til å absorbere bevegelsesenergien til skredet. H_v er høyden skredet har klatret opp vollveggen (Høeg et al., 2014; Lied & Kristensen, 2003). Hastighetshøyden, H_v , til skredet blir som vist i formel 3.4 (Lied & Kristensen, 2003):

$$H_v = \frac{v^2}{2g} \quad (3.4)$$

I formelen er v hastighet og g tyngdeakselerasjonen. I tillegg til hastighetshøyden må skredets flyte høyde, H_{skred} , og snø som allerede ligger på bakken, $H_{snø}$, tas med for å finne nødvendig vollhøyde, $H_{fangvoll}$ (Høeg et al., 2014; Lied & Kristensen, 2003; Norem, 2014). For fangvoller varierer k -verdien mellom 0,6 og 1,0 (Høeg et al., 2014; Norem, 2014; Aas, 2012).

Dess brattere vollveggen er, jo mer energi vil gå tapt i sammenstøtet og vollen vil fungere mer effektivt (Høeg et al., 2014). Vollkronen bør være like høy hele veien, slik at skredet ikke finner en passasje forbi (Aas, 2012). Formelen for nødvendig vollhøyde blir som vist i formel 3.5 (Norem, 2014):

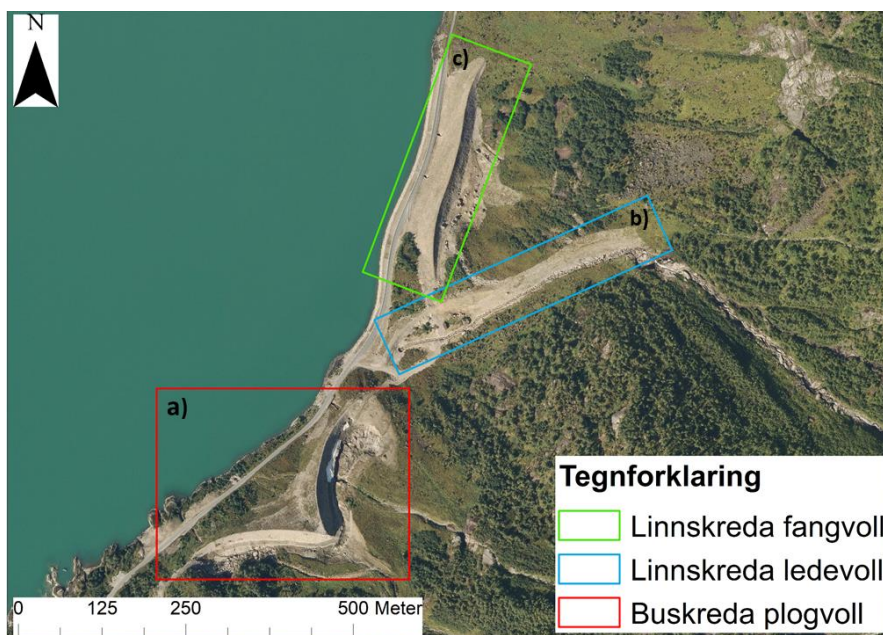
$$H_{fangvoll} = k \cdot H_v + H_{skred} + H_{snø} \quad (3.5)$$

Tørre snøskred vil avsettes med et buet tverrsnitt i magasinet, mens våt snø kan fylle magasinet fullt ut. Tørre snøskred taper også mindre energi i sammenstøtet enn våte snøskred. Mengden snø som stoppes for tørre snøskred blir derfor mindre enn for våte snøskred (Høeg et al., 2014; Lied & Kristensen, 2003).

3.2.3. Aktuelle voller og dimensjonering

Ulik aktører har vært med i utformingen og konstruksjonen av de tre vollene innenfor vårt feltområde. Vi har fått tak i beregninger og bakgrunnen for dimensjonering av plogvollen under Store og Vetle Buskreda, men ikke for vollene under Linnskreda. I tillegg mangler det dokumentasjon om trykket vollene er dimensjonert for å tåle.

Figur 17a viser plogvollen under Buskreda. Vollen skal sikre og lede skred fra løpene Vetle og Store Buskreda mot magasinet (Frækaland, 2011), i tillegg til å dele skred fra Store Buskreda i to (Finstad, 2016). Ledevollen ved Linnskreda (se Figur 17b) er en påbygning av en naturlig ledevoll og skal lede skred fra Linnskreda (Dyngen, 2017).



Figur 17 - Viser de tre aktuelle vollene. a) Buskreda-vollen, b) Linnskreda-ledevollen og c) Linnskreda-fangvoll.

Fangvollen, Figur 17c, ved Linnskreda skal stoppe skred som går over ledevollen (Dyngen, 2017). For å få plass til fangvollen er veien flyttet ca. 25 meter og lagt på fylling i Veitastrondsvatnet (Finstad, 2016). Vollenes dimensjoner er vist i Tabell 2.

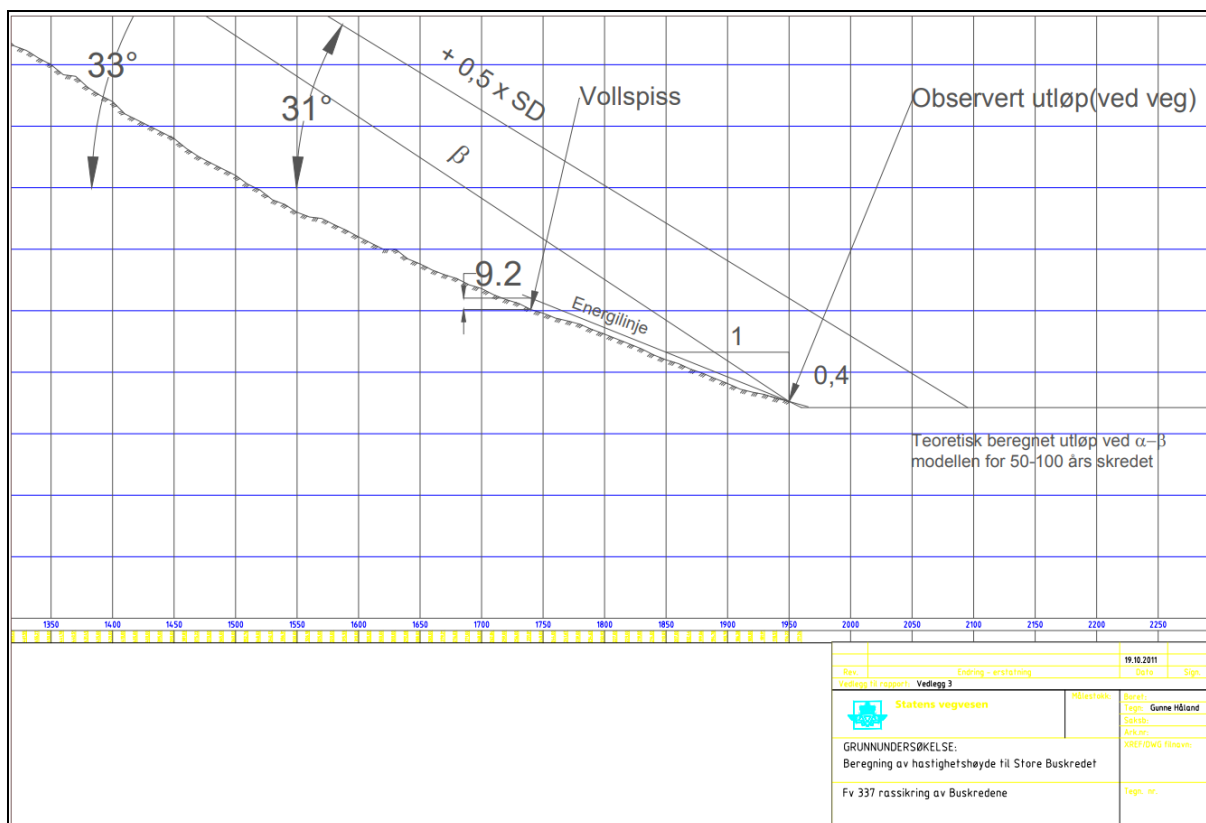
Tabell 2 – Viser vollenes dimensjoner (Statens Vegvesen, 2020b).

	Retnings- endring	Gjennomsnittlig helning	Maksimal helning	Gjennomsnittlig høyde	Maksimal høyde	Lengde
Plogvoll Buskreda	90°	40°	55°	12 meter	15 meter	400 meter
Ledevoll Linnskreda	55°	35°	40°	5 meter	6 meter	342 meter
Fangvoll Linnskreda	-	37°	38°	7,5 meter	12,5 meter	343 meter

For å dimensjonere vollhøyde på Buskredavollen ble en grafisk metode brukt som er hentet fra Statens Vegvesens *Håndbok VI38 - Veger og snøskred* fra 2014. Metoden brukes når man har observert utløpsdistanse for skred (Norem, 2014).

Dette ble gjort ved å bruke plasseringen av vollspissen fra reguleringsplanen som utgangspunkt (Statens Vegvesen, 2011). Modellen baserer seg på at en energilinje fra observert utløp konstrueres oppover i skredløpet. En energilinje viser hvor raskt skredet mister energi. Ved en slakere energilinje vil energitapet være mindre per lengdeenhet og skredet får lengre utløpsdistanse. En middelvei for helningen på energilinjen er 0,4:1 (21,8 grader). Energilinje brukes til å beregne hastighet og hastighetshøyde til skredet i alle punkt (Norem, 2014).

Figur 18 viser hvordan hastighetshøyden til skred i Vetle og Store Buskreda ble beregnet (Håland, 2011) utfra energilinjen. Der hvor energilinjen krysser vollspissens plassering fra reguleringsplanen er hastighetshøyden avstanden vertikalt mellom terrengprofilen og energilinjen. Beregnet hastighetshøyde er omtrent 9 meter over vollspissen basert på et utløp til veien (Håland, 2011) (se Figur 18).



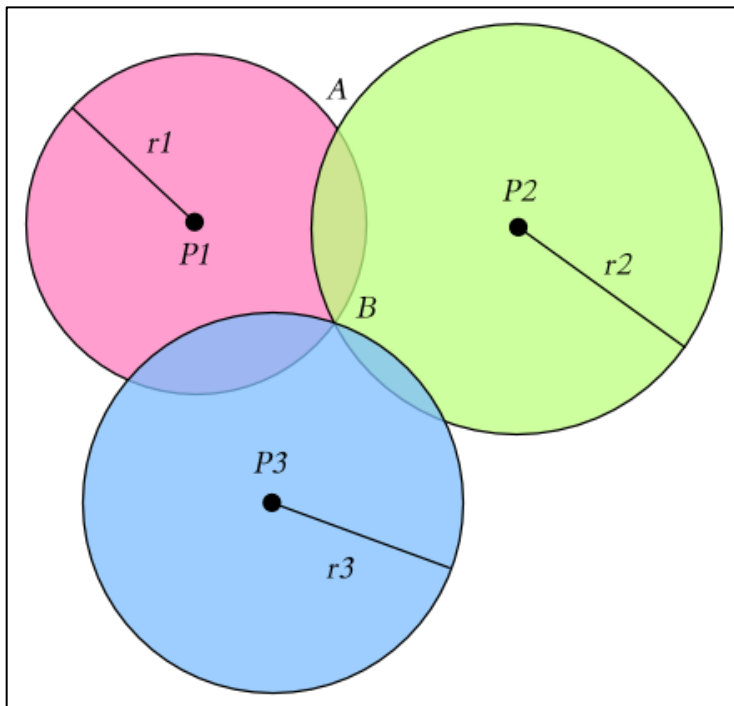
Figur 18 - Beregning av hastighetshøyde til skred der vollspissen skal bygges basert på kjent skredutløp til veien (Håland, 2011).

Håland (2011) nevner at hastighetshøyden kan underestimeres ved bruk av en energilinje med helning 21,8 grader når utløpsområdet er bratt. Derfor estimeres vollhøyde utfra formelen for fangvollers høyde, fordi man får en høyere verdi. I formelen for fangvollens høyde er $H_v = 9$ meter, $k = 1$ (for tørrsnø), $H_{skred} = 3$ meter og $H_{snø} = 2$ meter. $H_{fangvoll}$ blir da $= 1 \times 9 + 3 + 2 = 14$ meter (Håland, 2011).

Med utgangspunkt i vollhøyden over antar Håland (2011) at vollen vil sikre 90% av tilfellene til skred som ville hatt utløp til veien. For større skred, for eksempel 100-årsskred sier Håland (2011) at vollen muligens er for lav og særlig for skred fra Store Buskreda. Dette baseres på α - β metoden, hvor utløp er tegnet i Figur 18. Vanlig for eksisterende veier er å bygge sikringstiltak som beskytter mot 20- og 50-årsskred (Norem, 2014). Håland (2011) presiserer også viktigheten av at magasinet er stort nok til å samle opp skredvolumet i tillegg til at vollveggen på skredsiden er bratt nok.

3.3. Differensial GPS

En differensial GPS (dGPS) baserer seg på avstandsmåling fra minst tre satellitter til en mottaker for å bestemme posisjon, også kalt trilaterasjon, som en vanlig GPS (se Figur 19), men har i tillegg en uavhengig referansestasjon for økt nøyaktighet. GPS (Global Positioning System) kan gi posisjoner med stor nøyaktighet over hele verden. Satellitter i bane gir radiosignal til mottakeren (Kartverket, 2019).



Figur 19 - Prinsippet for trilaterasjon. Punktet i midten, B, vil være posisjonen til GPS-mottakeren. Avstanden «r» er den målte avstanden fra satellitten til mottakeren. Man må ha minst tre satellitter for å få kun et krysningspunkt, som vil være posisjonen til mottakeren. Kilde: Triangulering, av Jleedev (<https://sv.wikipedia.org/wiki/Triangulering>).

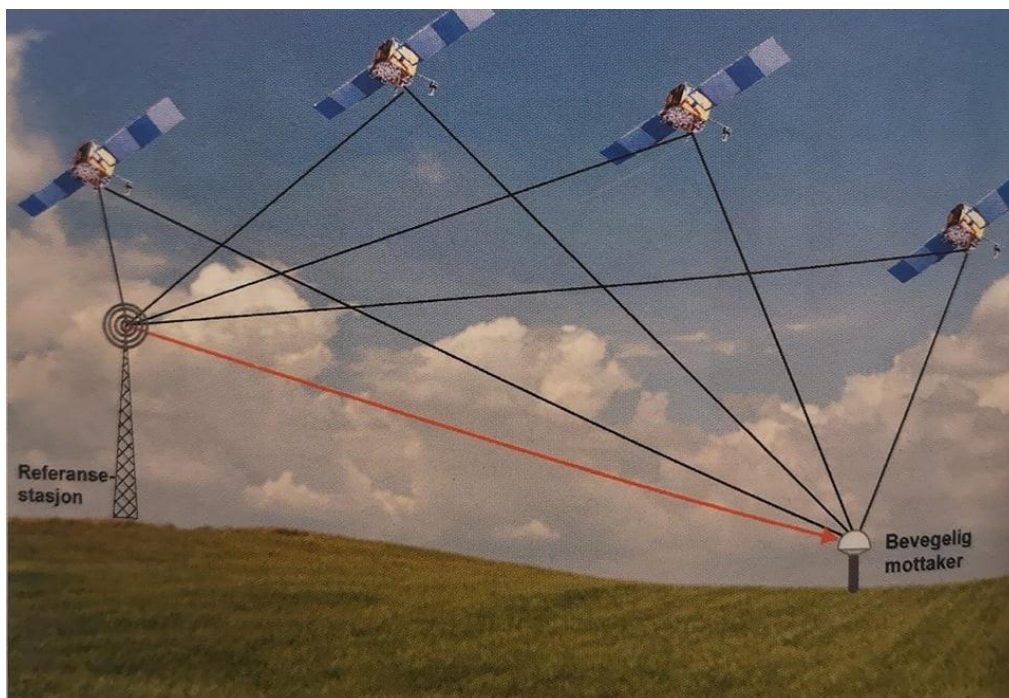
Referansestasjonen kan være en fysisk basestasjon på et fast punkt med kjente koordinater, eller en virtuell basestasjon som blir generert basert på data fra permanente geodetiske stasjoner og brukerens posisjon. Målemetoden er også kalt RTK (Real Time Kinematic) (Kartverket, 2019).

Man bruker en håndholdt modul, også kallet en *rover*, som mottar korreksjoner fra referansestasjonen for en høyere nøyaktighet (Rød, 2015). På toppen av roveren står en GNSS-modul (Global Navigation Satellite System) som mottar og bearbejder signal fra satellittene og referansestasjonen (Kartverket, 2019).

Det er flere punkter som vil påvirke nøyaktigheten til målinger utført med dGPS (Kartverket, 2019; Rød, 2015):

- Forstyrrelser som fører til refleksjon av signalene fra satellittene, for eksempel fra vollvegger.
- Mottakeren sin evne til å eliminere reflekterte signaler og skille de fra direkte signal.
- Synligheten til satellitter og deres plassering i forhold til roveren.
- Mottakeren sin evne til å beregne posisjoner.
- Solstormer i den ytre delen av atmosfæren, ionosfæren, kan forårsake turbulens som vil påvirke signalene og føre til forsinkelse. Turbulens er variasjoner i elektrontettheten i ionosfæren. Frekvensene som GPS kommuniserer med, er derfor valgt nøye for å interferere minst mulig med den tidvis høyere elektrontettheten.

Virtuelle referansestasjoner her i landet går under navnet CPOS og DPOS, hvor referansestasjonen er en mobilmast i nærheten som bruker mobilnett, for eksempel GSM og GPRS, se Figur 20. Disse tjenestene er navngitt etter nøyaktigheten på målingene. CPOS har målinger med feilmargin på centimeternivå og DPOS har feilmargin på desimeternivå (Rød, 2015).



Figur 20 - Satellittene kommuniserer både med referansestasjonen og den bevegelige mottakeren for å regne ut korreksjonen. Dette viser oppsettet med en mobilmast som fast basestasjon (Rød, 2015).

Under feltarbeidet ble den virtuelle referansestasjonen CPOS brukt (se Figur 21). Denne tjenesten dekker kun Fastlands-Norge (Kartverket, 2019).



Figur 21 – Viser RTK-mottaker som er koblet mot CPOS-nettet og GPS (Foto: privat).

Korreksjoner av posisjonen baserer seg på prinsippet at den totale feilen er nokså lik innenfor en avstand på 10-20 km (Forssell, 2009). Ved bruk av en fysisk referansestasjon, vil korrigering skje i sanntid om det er radiosamband mellom referansestasjon og bevegelig mottaker. Dette kan også utføres i ettertid.

Tabell 3 viser nøyaktigheten til målingene innenfor forskjellige kartreferansesystem (kolonne til venstre) og avstand mellom CPOS-basestasjoner. Når det er større avstand mellom disse stasjonene, vil nøyaktigheten på målingene bli dårligere (Kartverket, 2019).

Tabell 3 - Feilmarginene er basert på Kartverkets analyser av målinger utført med CPOS. Tallene i tabellen er oppgitt for ett standardavvik (66% av tilfellene) (Kartverket, 2019).

	I områder med ca. 35 km mellom SATREF PGS	I områder med ca. 70 km mellom SATREF PGS
Grunnriss EUREF 89	8 mm	14 mm
Høyde EUREF89 (over ellipsoiden)	17 mm	30 mm
Høyde NN2000	20 mm	36 mm

3.4. RAMMS::Avalanche – Dynamisk modellering

RAMMS::Avalanche (RAMMS – Rapid Mass Movements) er et numerisk skredsimuleringsprogram som ble utviklet som et enkelt verktøy for oppgaver som ikke kan løses i endimensjonale modeller. Dette gjøres i tredimensjonale terrengmodeller. Programmet er utviklet av WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF og Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL (SLF/WSL, 2010a).

RAMMS bruker numeriske simuleringer som i tillegg til utløpslengde viser hvordan et skred forandrer seg nedover skredløpet med hensyn til flyte høyde, farten til skredet og skredtrykk. Man kan variere friksjonsparameterne, bruddhøyde, løsningsområde, tetthet og kohesjon når man skal gjennomføre en simulering (SLF/WSL, 2010a).

Numerisk snøskredmodelleringer ble utviklet i Alpene etter en ødeleggende snøskredvinter i 1951. Målet var å kunne beregne utløpslengden til snøskred. Modellen som ble utviklet tok utgangspunkt i at skredet bevegde seg som en blokk ned en fjellside drevet av gravitasjonskraften. Denne modellen tar ikke hensyn til at skredet plukker med seg masser på vei ned (Perla, Cheng & McClung, 1980).

Moderne snøskredmodelleringer baserer seg på snø som en ikke-newtonsk væske som beveger seg i en åpen kanal og ikke som en blokk. En ikke-newtonsk væske er en væske der viskositeten er avhengig av skjærhastigheten, eller flyte hastigheten (Lome, 2017). Det er igjen en forenkling fra virkeligheten da snøskred ikke beveger seg totalt som et hydraulisk materiale, men som et fast stoff, væske og gass samtidig. Numeriske modelleringer har med tiden blitt mer og mer avanserte, og RAMMS er basert på Voellmy-Salm-væske-friksjonsmodellen (Lome, 2017).

Friksjonsdelen i denne modellen er delt i to. Den første delen har en Coulomb tørr friksjon som øker med normalkraften, symbolisert med μ . Den andre har en viskøs-turbulent friksjon som er avhengig av farten i kvadrat, symbolisert med ξ . Friksjonen er derfor gitt av S , se formel 3.6 (SLF/WSL, 2010b):

$$S = \mu p h g \cos \varphi + \frac{p g u^2}{\xi} \quad (3.6)$$

Her er h flyte høyde, g er gravitasjonskonstanten, p er tettheten til skredet, φ er helningen på underlaget og u er farten til skredet.

Friksjonsparameterne μ og ξ sine verdier baserer seg på punktene under (Perla et al., 1980):

- Gjentakelsesintervall for skred: 300 år, 100 år, 30 år og 10 år.
- Størrelsen på skredet: Stort ($>60\ 000\text{m}^3$), medium ($25\text{-}60\ 000\text{m}^3$), lite ($5\text{-}25\ 000\text{m}^3$) og veldig lite ($<5\ 000\text{m}^3$).
- Terrengutforming: Kanalisert, ukanalisert, renneformasjon eller flat.
- Høyde over havet: Over 1500 moh., 1000-1500 moh. og under 1000 moh.

Verdiene for μ ligger mellom 0.14 og 0.47, og er mindre i flate områder og større i kanaliserte løp på grunn av mer friksjon mot sidene av kanalen/rennen. ξ ligger mellom 900 og 4 000, og er større for større skred i flate og åpne områder da mer av skredmassen blir påvirket av luftmotstanden (Perla et al., 1980).

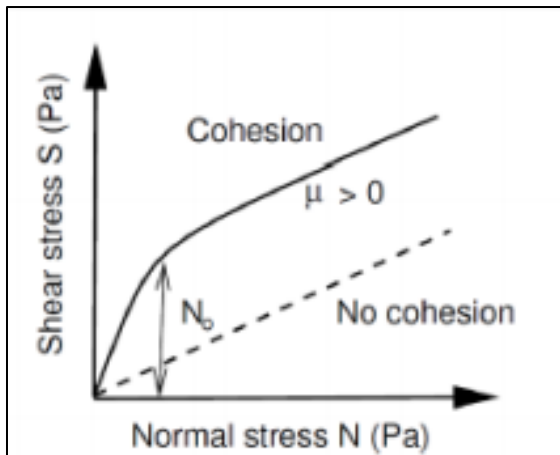
Hvilket friksjonsledd som dominerer, kommer an på farten til skredet. Leddet $\mu phg \cos \varphi$ blir dominant når skredet har lav fart, det vil si i startfasen og når det stopper. Leddet med $\frac{pgu^2}{\xi}$ dominerer når farten blir stor, fordi den er i kvadrat (Lome, 2017).

RAMMS tar også hensyn til hvordan kohesjonen mellom snøpartiklene vil påvirke skredet. Økt kohesjon vil føre til et større energitap når skredet når et utløpsområde. Dette vil føre til et skred med lavere hastighet og kortere utløp. Siden kohesjonen øker med temperatur, er dette viktigere når det gjelder våtere skredmasser (McClung & Schaerer, 2006). Dette implementeres i friksjonsformelen som vist i formel 3.7 (SLF/WSL, 2010b):

$$S = \mu N + \frac{pgu^2}{\xi} + (1 - \mu)N_0 - (1 - \mu)N_0 e^{-\frac{N}{N_0}} \quad (3.7)$$

Her er N_0 kohesjonen og N er normalkraften. Målet med formelen er å få en mer korrekt utløpslengde som er avhengig av kohesjonen. Våte snøskred har høyere verdier og tørre snøskred har lavere kohesjonsverdier. Kohesjonen er målt i Pascal og standardverdier for N_0 kan være 0 til 100 Pa for tørrsnøskred og 100 til 300 Pa for våte snøskred (SLF/WSL, 2010b).

Figur 22 viser hvordan skjærspenningen ikke lenger øker lineært med normalspenning når kohesjon tas med. Denne økte skjærspenningen vil føre til at skredet stopper tidligere enn hvis ingen kohesjon hadde forekommet.



Figur 22 - Graf som viser skjærspenning under økt normalspenning med og uten kohesjon (Bartelt et al., 2017).

RAMMS er utviklet i Alpene hvor det er andre forhold enn i Norge. Norge har et generelt kaldere klima og vil derfor har tørrere snø lenger ned i skredløpene. Dette vil føre til en lavere intern friksjon. Det er vanskelig å sette faste verdier for friksjonsparametere, da dette endrer seg over hele landet, men å sette tregrensen som referansepunkt for høydejustering har gitt gode resultater (Lome, 2017).

I tillegg gir RAMMS muligheten til å sette konstante friksjonsparametere eller variable friksjonsparametere. Ved å sette de konstant vil de holde seg på samme verdien overalt og ikke ta hensyn til hvordan terrenget forandrer seg. Den variable muligheten vil ta for seg hvordan terrenget varierer og for eksempel beregne høyere friksjonsverdier i en renne enn for en flanke (Lome, 2017).

I versjon 1.6.20 ble det lagt til sentrifugalkraft i friksjonsleddet med normalkraft. Den tar for seg hvordan friksjonen forandrer seg med kurvaturen til skredbanen, i alle retninger. Konkave terrengformasjoner og svingete skredbaner vil øke friksjonen, mens konvekst terreng vil redusere friksjonen (SLF/WSL, 2010b).

4. Metode

I dette kapittelet beskrives fremgangsmåten for datainnsamling i felt med drone og differensial GPS, konstruksjoner av terrenngmodeller i Metashape og ArcMap, samt oppsett av skredsimuleringer i RAMMS. Tabell 4 inneholder grunnlagsmateriale som er brukt i oppgaven.

Tabell 4 – Viser grunnlagsmateriale brukt i oppgaven.

Data	Beskrivelse
Meteorologiske data	<ul style="list-style-type: none">• Eklima (www.eklima.met.no): Inneholder værstasjoner som Meteorologisk institutt har i drift og som har vært i drift• Senorge (www.senorge.no): Inneholder daglig oppdatert informasjon om snø-, vær-, vannforhold og klima
NVEs nasjonale skreddatabase	<ul style="list-style-type: none">• NVE Atlas: NVE Skredhendelser
Nasjonal vegdatabank (Statens Vegvesen)	<ul style="list-style-type: none">• Søkord: voll, skred og trafikkmengde
Kartdata fra Kartverket	<ul style="list-style-type: none">• Topografisk norgeskart• Flybilder fra Norge i bilder (www.norgebilder.no)<ul style="list-style-type: none">○ Luster 1964-1965 (svart/hvitt)○ Sogn 2017• LiDAR-kart:<ul style="list-style-type: none">○ NDH Luster 2016○ Luster Stryn 2012○ Sogn og Fjordane 2007

4.1. Innsamling av data – Differensial GPS

Siden vollene ikke eksisterte eller var ufullstendige på de offentlige LiDAR-dataene, måtte det lages virtuelle terrengmodeller av disse vollene. Den ene metoden var manuell kartlegging med differensial GPS. Dette ble gjennomført i felt 23.oktober 2019.

Før målingene kan begynne må RTK-mottakeren monteres (se Figur 23a). Mottakeren festes på stangen med en passende høyde over bakken. Den anbefalte høyden er rundt 2 meter. Mottakeren på toppen vil være den delen som kommuniserer med CPOS-nettet og satellittene. Høyden mellom mottakeren og bakken må derfor korrigeres for at de korrekte høydedataene ved bakken skal kunne brukes. Mottakeren som ble brukt heter Topcon HiPer V.

Måleboken (se Figur 23b) som brukes for å kontrollere systemet må festes i en høyde som gir en god arbeidsstilling. I datainnsamlingen ble det brukt en målebok av typen Topcon FC336 som kjører programmet Magnet-field. Måleboken må kobles opp mot mottakeren. Disse må deretter kobles opp mot en server som henter inn GPS- og GLONASS-signaler (Blinken a.s, 2015).

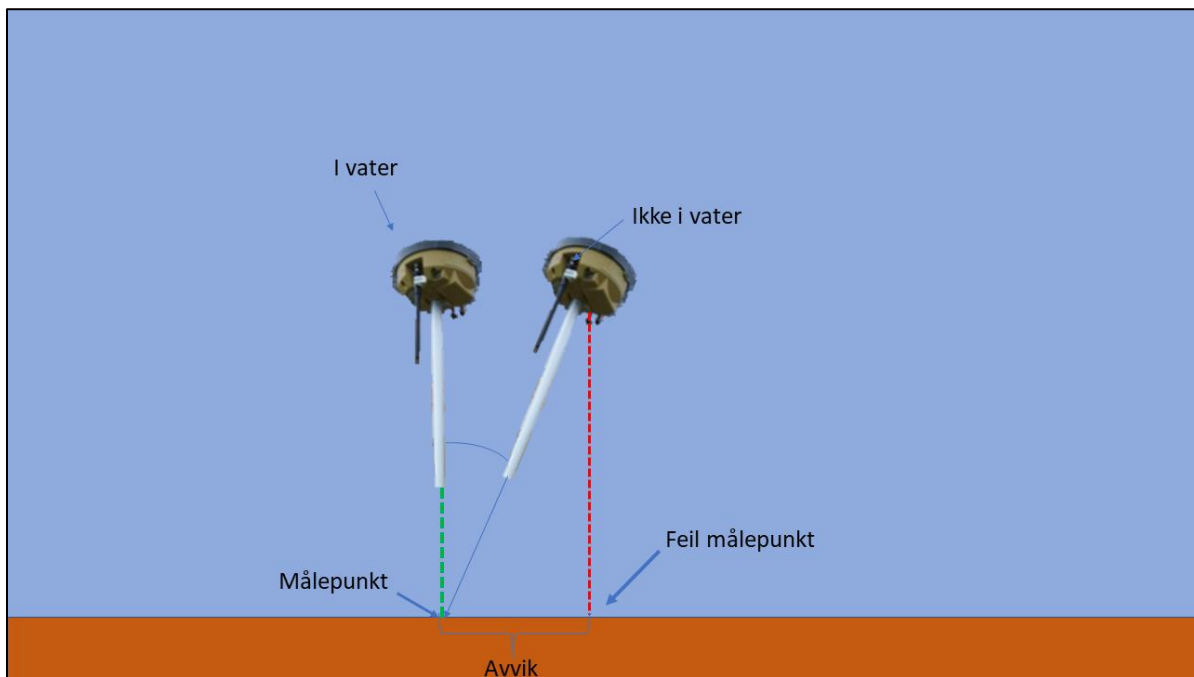


Figur 23 – Bilde a) viser mottakeren Topcon HiPer V på toppen av stangen. Bilde b) viser målebok av typen Topcon FC336 som brukes til å justere innstillinger og foreta målinger (Foto: privat).

Man får de mest nøyaktige målingene ved å trykke på piktogrammet av en person med en rover. Disse målingene tar et par sekunder der man må holde stangen helt i ro, men målingen har høy nøyaktighet. Ved siden av piktogrammet med en person, er det et piktogram av en diskett. Den vil ta øyeblikkelige målinger, men med lavere nøyaktighet, da systemet kun

bruker GPS-signalene og ikke CPOS-nettet. Når dekningen ikke er god nok, må sistnevnte brukes (Blinken a.s, 2015).

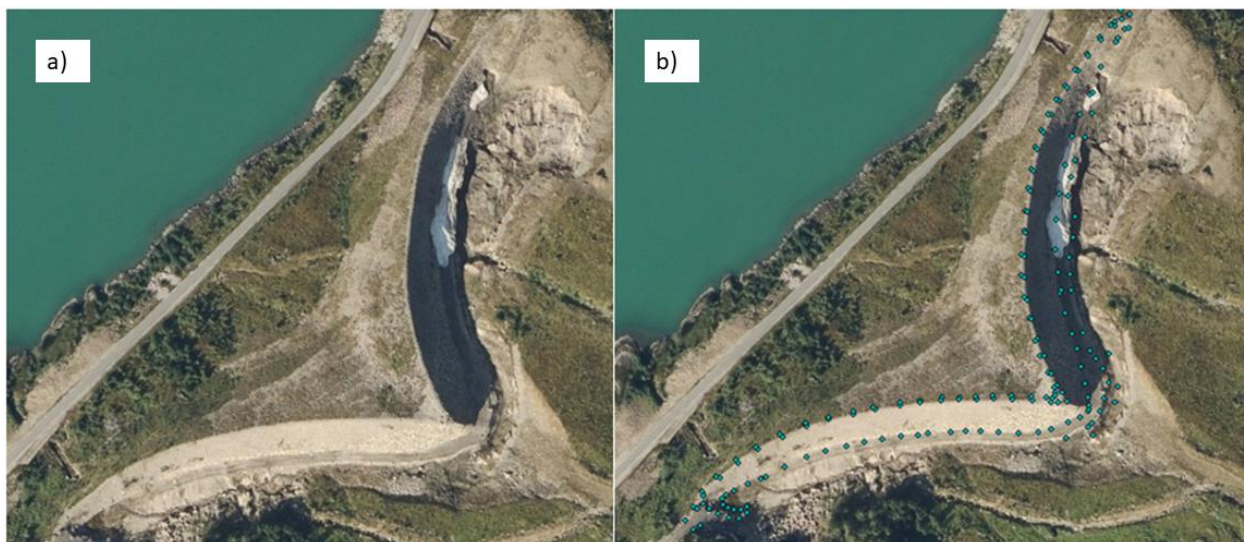
Når man skal gjøre en måling er det viktig at den håndholdte modulen er vertikal. Ved siden av måleboken er det et vater som man bruker for å justere. Siden nøyaktigheten er helt nede på centimeternivå i CPOS-målinger, vil et lite avvik i vinkelen ha utslag på den endelige posisjonsmålingen. Posisjonen til mottakeren i forhold til bakken er det som blir den endelige målingen (se Figur 24), og man kan derfor bomme med flere centimeter.



Figur 24 - Grafisk framstilling av avviket som forekommer når stativet ikke er i vater. Avviket blir større når vinkelen øker.

Det ble målt med jevne avstander mellom punktene på strategiske plasseringer. Vollene er relativt enkle å gjengi i en modell på grunn av store flater med få retningsendringer. Det er allikevel viktig å få med alle retningsendringer og følge kantene så godt som mulig. Dette vil føre til en mer presis modell.

Toppen av Buskreda-plogvollen er flat med en vollkrone på rundt en meter bredde. Her ble det gjort parallelle målinger langs hele vollkronen. Deretter ble det gjort målinger langs hele vollfoten og avgrensingene til nordre del av magasinet (se Figur 25). Den sørlige delen av magasinet ble ikke målt da det allerede var dekket av LiDAR-målingene fra 2012.



Figur 25 – a) er flyfoto av Buskreda-plogvollen uten målepunkt og b) er vollen med målepunkt (blå punkt) (Kartverket, 2020b).

Den øvre delen av Linnskreda-ledevollen er en naturlig avsetning som etter erosjon på innsiden fungerer som en ledevoll. Overskuddsmasser fra Buskreda-plogvollen ble brukt til utvidelse av den naturlige vollen ved Linnskreda slik at den går nesten helt ned til veien og vil lede skredet i en stor bue mot sør. Her ble det igjen gjort parallelle målinger langs vollkronen og vollfoten (se Figur 26).



Figur 26 – a) Flyfoto av ledevollen ved Linnskreda, bilde b) viser med målepunkt i blå (Kartverket, 2020b).

Linnskreda-fangvollen var ikke til stede på LiDAR-dataene fra 2012. Her måtte vi derfor rekonstruere hele vollen. Det ble målt rundt hele vollen og langs vollkronen. Vollmagasinet er et flatt område, og det ble målt punkt langs hele kanten til der terrenget blir brattere oppover mot øst (se Figur 27).



Figur 27 – a) Flyfoto av Linnskreda-fangvollen, bilde b) viser med målepunkt i blå (Kartverket, 2020b).

4.2. Innsamling av data – Drone

Bildene til dronefotogrammetrien ble hentet inn den 10. desember 2019. Det var overskyet oppholdsvær med lite vind, ca. 5 minusgrader og tynt snødekke på omkring 25 centimeter (se Figur 28). Dronen som ble brukt til bildeinnhenting var en Mavic Pro fra DJI. Flyrutene var programmert på forhånd i programmet Litchi Mission Hub med flyhøyde, hastighet, plassering og fotograferingsvinkel.



Figur 28 - Viser datainnsamling av snødekte skredvoller med drone (Foto: privat).

Flyhøyde ble satt til 55 meter over bakken for å unngå at dronen krasjet i terrenget. Vi la inn stopp langs flyrutene, og ved hvert stopp ble det tatt tre bilder av vollen. Ett bilde med -80° vinkel, ett bilde i -45° vinkel og ett bilde i -20° vinkel. Fotograferingsvinkel må angis med minus, siden bildene tas nedover. For å forsøke og unngå at endringen i kameravinkel skulle gi uklare bilder, la vi inn at dronen skulle stå stille i luften i to sekunder før hvert bilde ble tatt.

Ved første overflygning ble noen av bildene uklare. Dette skyldtes at dronen umiddelbart endret kameravinkel når bildene ble tatt. Dette ble korrigert i Litchi ved også å legge til to sekunders pause etter hvert bilde. Dermed fikk vi stort sett gode og klare bilder ved andre overflygning. Noen av bildene som ble tatt med -80° vinkel av Linnskreda-fangvollen ble noe utydelig, og her valgte vi å ta noen ekstra bilder manuelt, i tillegg til de som ble hentet inn automatisk via Litchi. Det ble tatt totalt 123 bilder av vollene med drone.

4.3. Fotogrammetri og 3D-modellering i Metashape

Fotogrammetri handler om å tilegne seg geometrisk informasjon fra bilder, for å kunne bestemme fotograferte objekters egenskaper slik som form, størrelse og beliggenhet (Ikeuchi, 2014). Fotogrammetri deles i nærfotogrammetri og flyfotogrammetri, hvor den sistnevnte gjelder både satellittbilder, flybilder og dronebilder.

Nærfotogrammetri brukes for eksempel til dimensjonsmålinger i industrien eller formdokumentasjon, mens flyfotogrammetri i størst grad brukes til kartlegging (Dick, 2018) og er det mest benyttede bruksområdet til fotogrammetri (Ikeuchi, 2014). Fotogrammetri kan utføres både analogt og digitalt.

Digital fotogrammetri er i dag den mest brukte metoden for fotogrammetri. Her blir bilder analysert, og avanserte programvarer finner punkter som opptrer på flere bilder, såkalt matching. Punkter som opptrer på flere bilder fungerer som referansepunkter for programvaren (Larsen, 2007). I tillegg må kameraposisjonen og -retningen i fotograferingsøyeblikket orienteres i henhold til rommet eller terrenget. Dette kalles ytre orientering, og gjøres i dag direkte i en perspektivisk avbildning med formler for koblingen mellom punktets målte bildekoordinater og gitte terrengkoordinater (Dick, 2018; Ikeuchi, 2014).

Dronebildene vi har tatt i felt har vi prosessert med programmet Metashape fra Agisoft. Dette er et program hvor man kan gjøre fotogrammetrisk prosessering av bilder og videoer, og

deretter konstruere 3D-modeller av det man har fotografert (Agisoft LLC, 2019).

Programvaren virker ved at man laster inn en rekke overlappende bilder av objektet, i vårt tilfelle skredvollene, som det skal konstrueres terrengmodeller av. I Metashape fulgte vi en anbefalt arbeidsflyt:

- i. Tilføy bilder (Add photo)
- ii. Tilpass bilder (Align photo)
- iii. Bygge punktsky (Build dense cloud)
- iv. Punktreferering (Ground control points)
- v. Konstruere overflate (Build mesh)
- vi. Eksportere modell (Export)

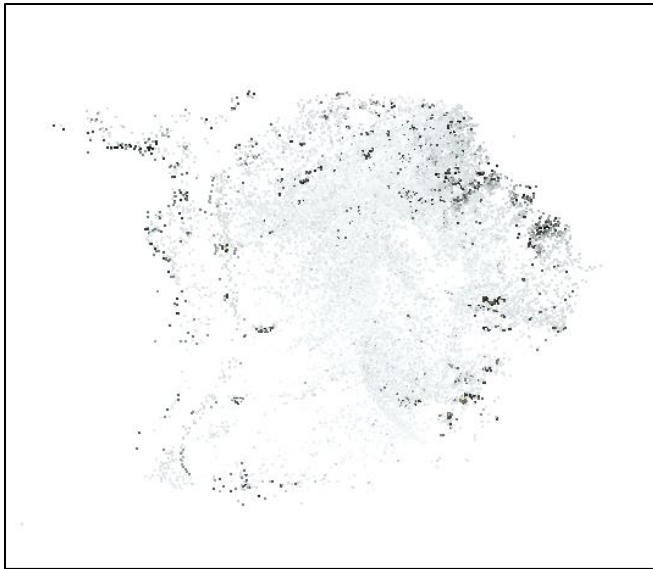
4.3.1. Tilføy bilder

Det første man gjør i Metashape er å legge til bildene man vil basere modellen på. Posisjonen bildene er tatt ved vil komme opp i visningsvinduet i Metashape når de er importert.

Kameraets posisjon og orientering ble stilt inn på forhånd i appen Litchi, og Metashape leser denne informasjonen direkte ut ifra bildefilene (Agisoft LLC, 2019).

4.3.2. Tilpass bilder

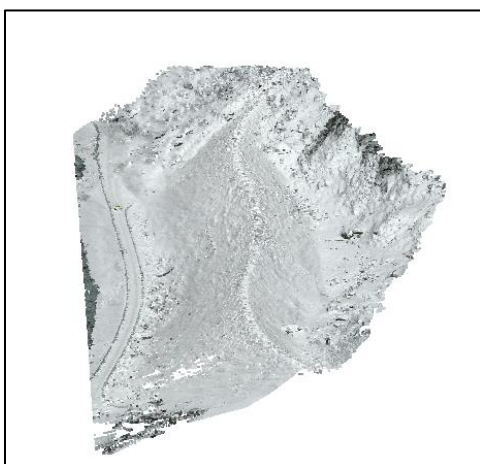
Videre må vi tilpasse bildene og deres posisjon til hverandre. Dette gjøres med funksjonen «align photos». Her bruker Metashape fotogrammetri til å orientere bildene ved hjelp av «key points», «tie points» og kameraets posisjon og orientering i fotograferingsøyeblikket. «Key points» er punkter med stor kontrast til omgivelsene som programvaren identifiserer på hvert bilde. Hvis Metashape gjenkjenner samme punkt på to forskjellige bilder, brukes dette punktet til å koble sammen de to bildene. Dette punktet kalles da et «tie point» (Agisoft LLC, 2019). Når dette steget er fullført, står man igjen med en spredt punktsky («sparse point cloud») (se Figur 29) bestående av alle «tie points». Denne spredte punktskyen består bare av punkter som programvaren har gjenkjent på flere bilder (Agisoft LLC, 2019).



Figur 29 - Viser den spredte punktskyen til Linnskreda-fangvollen etter at «align photo» funksjonen har blitt kjørt.

4.3.3. Bygge punktsky

For å få bedre oppløsning og nøyaktighet kan man videre opprette en tett punktsky. Funksjonen «build dense cloud» kalkulerer dybdeinformasjon til hvert bilde og punkt basert på kameraposisjonen, og setter dette sammen til en komplett og tett punktsky (se Figur 30). Her setter vi kvaliteten til lav, da dette gir en modell med tilstrekkelig nøyaktighet. «Depth filtering» settes til «mild», og dette gjør at de fleste punkter blir tatt med i modellen og færre blir markert som «outliers» og filtrert bort (Agisoft LLC, 2019).

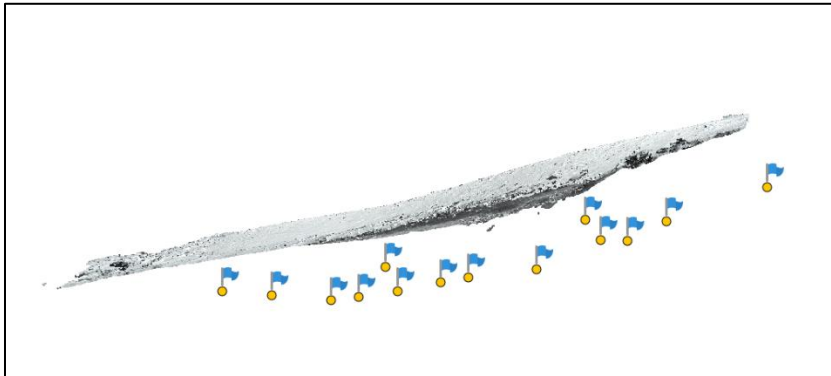


Figur 30 – Viser Linnskreda-fangvollen etter at «build dense cloud» funksjonen har blitt brukt.

4.3.4. Punktreferering

For å være sikker på at modellen blir riktig plassert i terrenget, kan det være lurt å bruke kontrollpunkt (ground control points eller GCP). I vårt tilfelle fikk punktskyen riktig

koordinater, men høydeverdiene ble feil (se Figur 31). For å tvinge modellen til riktig høyde brukte vi dGPS-punkt fra vollene som kontrollpunkter.



Figur 31 - Her vises punktskyen for Linnskreda-fangvollen. Som man kan se ligger dGPS-punktene fra vollen lavere.

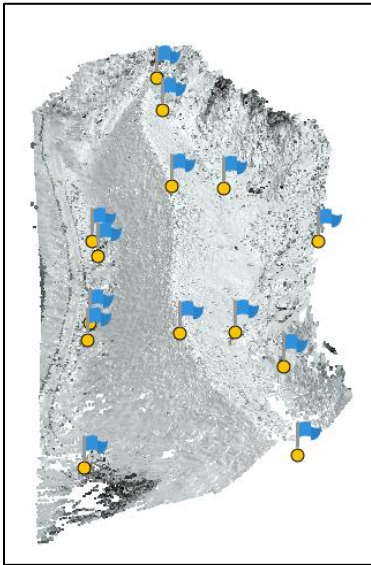
Vi valgte 11 dGPS-punkt fra Buskreda-plogvollen og 14 dGPS-punkt for Linnskreda-fangvollen. Alle disse punktene representerte objekter som er enkle å se på bildene, slik at feil ved plasseringen av punktene på bildene ble minst mulig. Dette kan for eksempel være store steiner, trær, avløpsrør eller andre objekter som identifiseres lett og entydig på bildene. Disse punktene må føres inn i et tekstdokument med navn, koordinater og høyde, før de kan importeres med funksjonen «import references» i Metashape. Deretter må punktene markeres manuelt på bildene de opptrer på. Punktene vises som flagg, og når punktet er justert vil flagget bli grønt (se Figur 32).



Figur 32 - Viser markering av punkt i Metashape. De grønne flaggene viser punkter som er festet til dGPS-punktet på dette bildet, mens de hvite viser punkt som ikke er festet.

Når man har markert alle synlige punkt, må all informasjon i bildefilene fjernes slik at punktskyene kun blir justert etter de markerte punktene på hvert bilde. Det siste steget er å bruke «align photo» funksjonen på nytt. Nå vil punktskyen bli «tvunget» til å justere seg etter

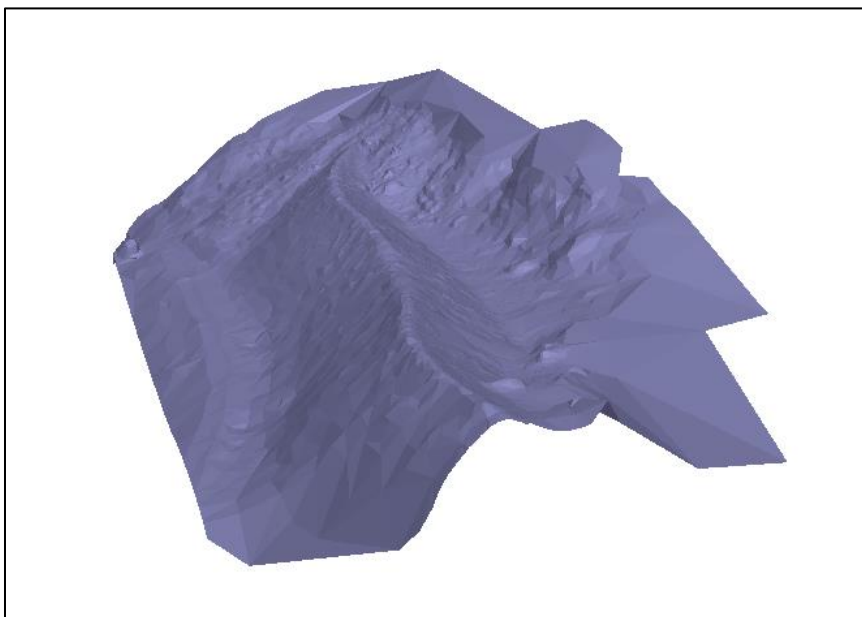
dGPS-punktene man har markert på hvert bilde, og hvis kontrollpunkt er valgt med omhu så er modellen georeferert riktig (se Figur 33).



Figur 33 – Viser punktskyen etter at den er justert etter dGPS-punktene. Som man kan se ligger nå punktskyen og punktene ved samme høyde.

4.3.5. Konstruere overflate

Videre kan man opprette selve modellen ved å fylle alle rom mellom punktene med konstruerte polygoner slik at man får en fullstendig overflate (se Figur 34). Dette gjøres med funksjonen «build mesh». Ulempen med «build mesh» er at interpolasjonsmetoden som benyttes forblir ukjent for oss.



Figur 34 – Viser ferdig 3D-modell i Metashape av Linnskreda-fangvollen med konstruert overflate. Denne modellen består av rundt 150 000 polygoner.

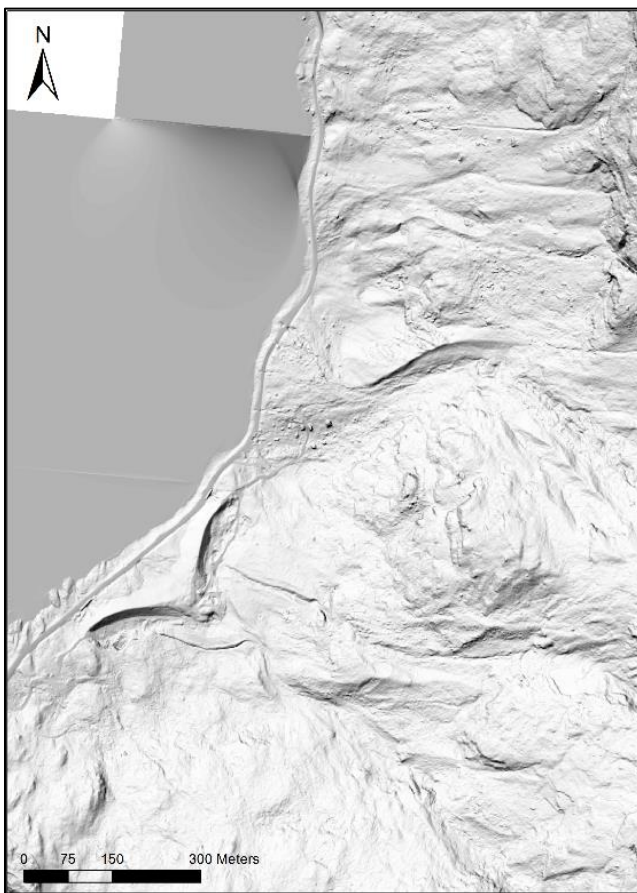
4.3.6. Eksportere modell

I Metashape har man mulighet til å eksportere modellen i en rekke filformat. Vi fant ut at å eksportere filene som geotiff i .tif filformat var det som fungerte best når vi ville jobbe videre med modellen i ArcMap. Her er det viktig å velge samme koordinatsystem som brukes i ArcMap.

4.4. Terrengmodellkonstruksjon i ArcMap

4.4.1. Kombinere raster i ArcMap

Et av målene med oppgaven er å lage terrengmodeller av området som er tilstrekkelig for bruk i skredsimulasjon. Tidligere LiDAR-data var ufullstendige da overflygingen fant sted under konstruksjonen av Buskreda-plogvollen i 2012 (se Figur 35).



Figur 35 – LiDAR-data fra 2012 viser en Buskreda-plogvoll under konstruksjon og ingen voller ved Linnskreda (Kartverket, 2020c).

LiDAR-teknologi baserer seg på å se fase-differanse på lyset fra en laser ved å måle tidsforskjell mellom emittert og mottatt lasersignal. Moderne LiDAR-utstyr kan måle opp mot en million punkt per sekund. Man vil da kunne projisere et nøyaktig bilde av terrenget som man kan bruke til modellering (NGI, u.å.).

Opgaven var derfor å bruke programmet ArcMap fra Esri for å binde sammen eksisterende LiDAR-data med egne målinger av vollene. To målemetoder ble brukt:

- i. 436 punkt ble målt manuelt med differensial GPS som dekker Buskreda-plogvollen og Linnskreda-fangvollen samt den utvidede ledevollen for Linnskreda-løpet.
- ii. Terrenghøyde for Buskreda-plogvollen og Linnskreda-fangvollen ble målt inn ved hjelp av dronefotogrammetri.

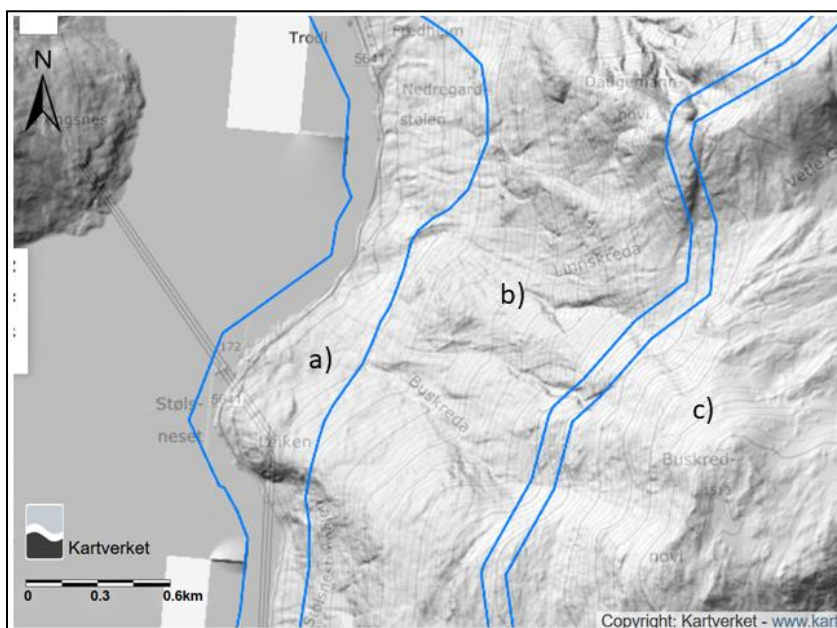
I tillegg ble det konstruert en terrengmodell som gjenspeiler situasjonen før vollene var konstruert. Denne oppgaven ble løst ved hjelp av to forskjellige steg:

- iii. Kombinasjon av LiDAR-datasett fra 2012 med tynn stripe av LiDAR-data langs Veitastrondsvatnet tatt i 2007.
- iiii. Løsning av et erosjonsproblem i skredrennene ved overføring av raster fra LiDAR-datasett fra 2012.

4.4.2. Konstruksjon av $DTM_{\text{grunnkart}}$

I begynnelsen av bachelorperioden eksisterte det tre LiDAR-datasett i studieområdet som ble lastet ned (se Figur 36):

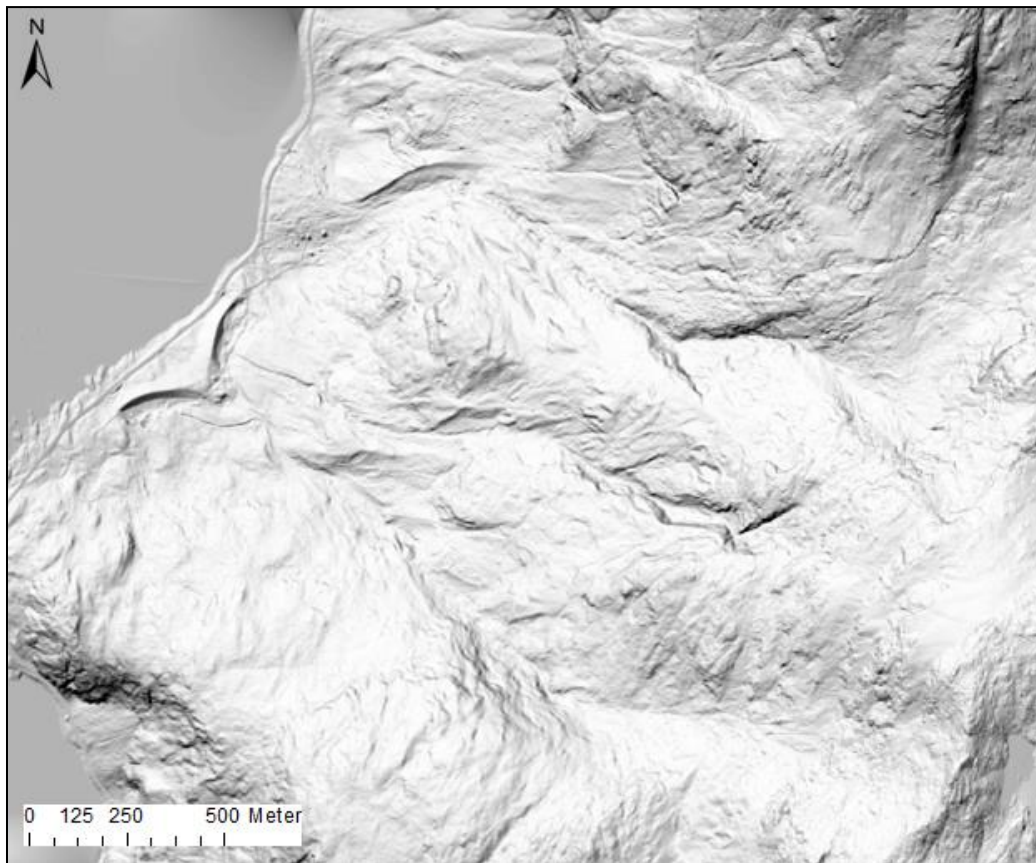
- a. Sogn og Fjordane 2007
- b. Luster-Stryn 2012
- c. NDH Luster 2016



Figur 36 – Viser de tre eksisterende datasettene som ble lastet ned. Datasett a) overlapper datasett b), og datasett b) og c) overlapper hverandre.

For å få et sammenhengende terrengraster over hele området basert på datasett b) og c), brukes verktøyet «Mosaic to new Raster». Datasettet b) inkluderer også området som ligger under datasett a). Dette verktøyet vil ta to eller flere raster-datasett og flette dem sammen ved interpoleringsmetoden «Blend». «Blend» gir en flytende overgang mellom rasterene (Esri, 2016a).

For at dette verktøyet skal fungere på rett måte, må raster-datasettene være i samme referansesystem, ha samme pikselstørrelse og samme pikseloppløsning (bit) (Esri, 2016b). Dette nye datasettet skal være utgangspunktet for all videre modellering. Høydedataene som ble samlet inn med drone og differensial GPS under feltarbeidet skal kombineres med dette rasteret, som vi herifra kaller $DTM_{grunnkart}$ (se Figur 37). DTM står for «Digital Terrain Model».

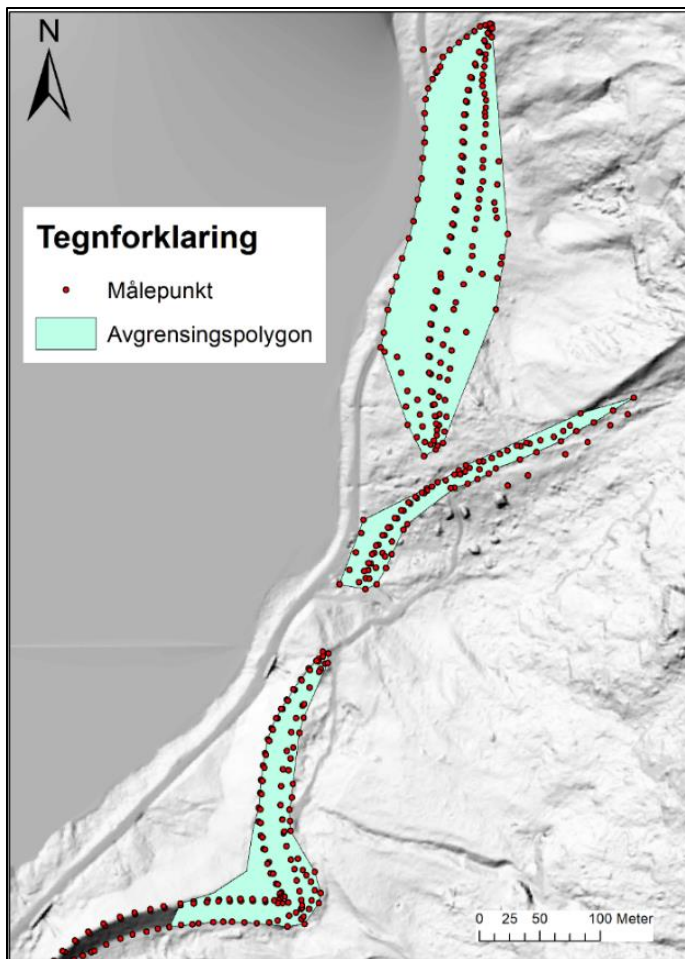


Figur 37 – Viser $DTM_{grunnkart}$ som skal brukes videre i modellering.

4.4.3. DTM_{GPS} – Terrenngmodell basert på punktmålinger med differensial GPS

436 punkt ble målt manuelt med differensial GPS. Punktene gir oss xyz-data. For å få et best mulig resultat er strategien å ivareta så mye av de eksisterende LiDAR-dataene som mulig. For plogvollen ved Buskreda ble området som ikke var ferdigstilt avgrenset med en polygon.

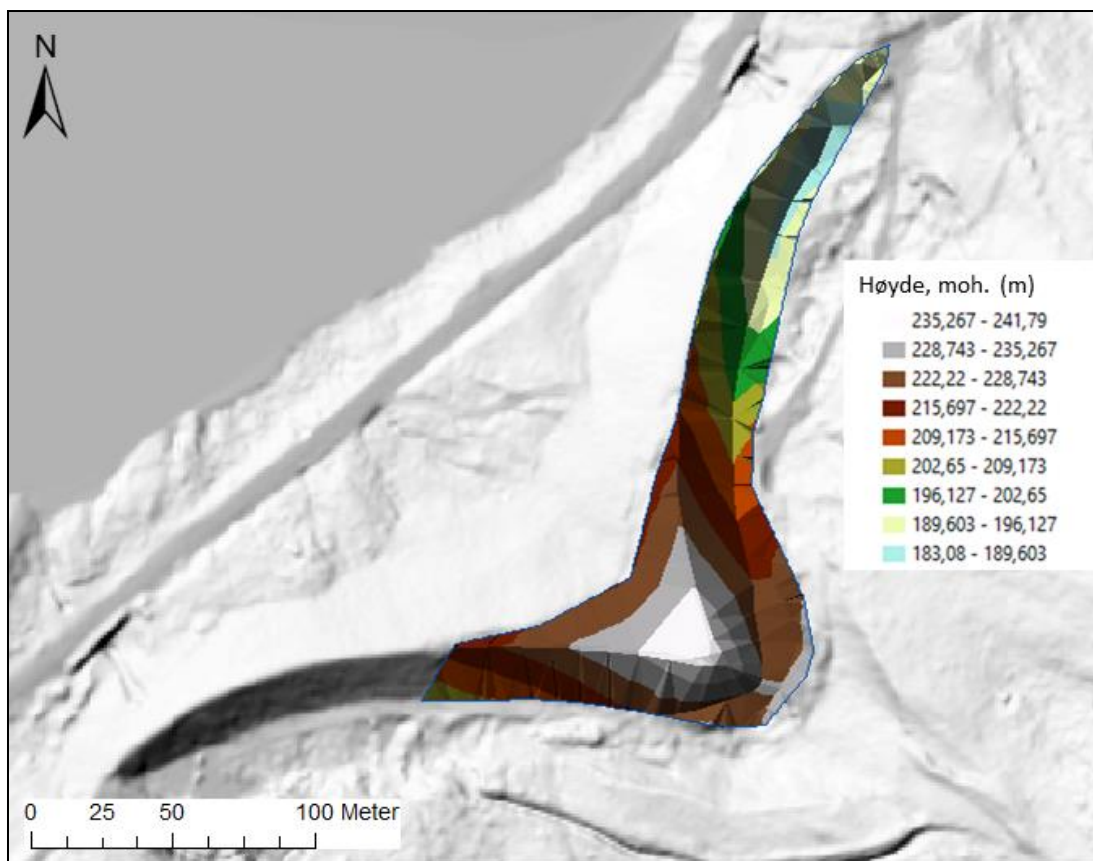
For Linnskreda-fangvollen og utvidelsen av den naturlige ledevollen ble hele vollen avgrenset med polygon (se Figur 38). Konstruksjon av Buskreda-plogvollen blir heretter brukt som eksempel, men fremgangsmåten er lik for alle vollene.



Figur 38 - Målepunkt og avgrensinger på alle vollene. Kun de målepunktene som ligger innenfor polygonene vil bli brukt i modelleringen.

Polygonene har i utgangspunktet ingen høydeverdier, men ved hjelp av verktøyet «Interpolate Shape», er det mulig å hente z-verdier fra det underliggende terrengrasteret, altså «Luster-Stryn 2012». Dette gjøres for at modellene skal få en best mulig overgang til terrenget under når polygonene brukes senere (Esri, 2016c).

Neste steg var å bruke verktøyet «Create TIN» for å lage en TIN-modell (Triangulated Irregular Network) av dGPS-punktene (se Figur 39). Her kan man bruke linjer, polygon og punkt med eller uten høydeinformasjon som input for å lage en lukket overflate bestående av Delauney-trekanter (Esri, 2016d). TIN-modellen ble interpolert med hjelp av «Linear interpolation».

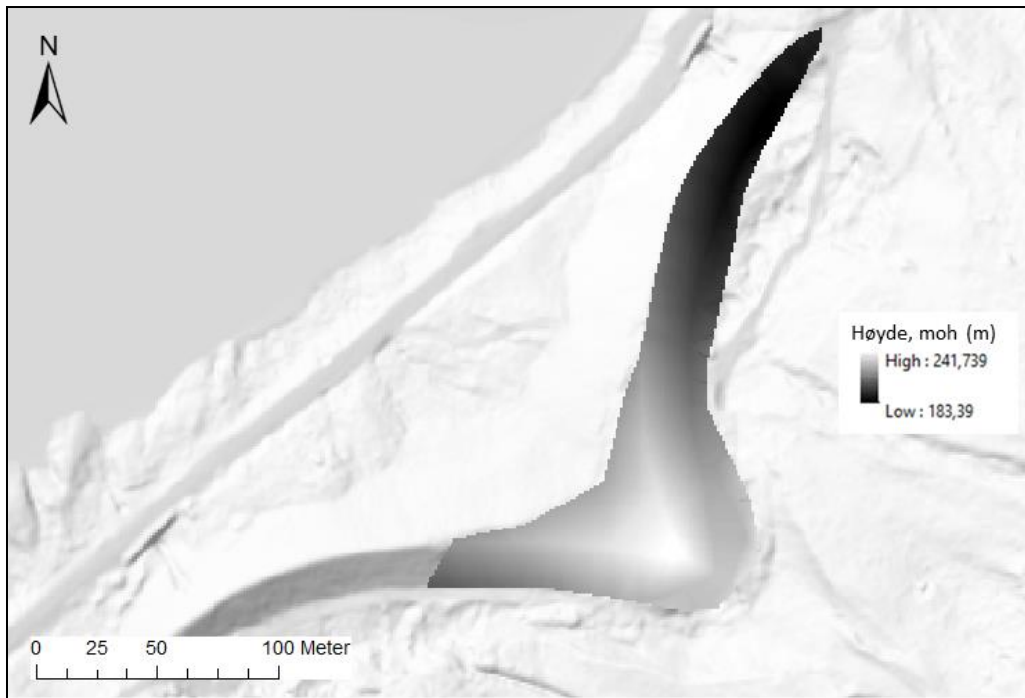


Figur 39 - TIN-modell av Buskreda-plogvollen innenfor den definerte polygonen på Buskreda-plogvollen (se Figur 38).

Lineær interpolasjon er den enkleste formen for interpolasjon. Her blir ukjente verdier bestemt basert på lineære trender mellom omliggende kjente punkt (Rød, 2015). Hvis et punkt for eksempel ligger på 150 moh. og et annet ligger på 160 moh., vil det interpolerte punktet imellom være på 155 moh. Det vil derfor fungere godt på strukturer som skredvoller med rette kanter og få retningsendringer.

I «Create TIN» ble dGPS-punktene brukt som «mass points» og vi brukte avgrensingspolygonene (se Figur 38) med z-geometri som «hard clip», det vil si klippepolygon. I dette verktøyet velges også «Snap Raster» under «Environments» med $DTM_{grunnkart}$ for å legge TIN-modellen kant-i-kant med dette rasteret.

Det neste steget for å få integrert modellen i $DTM_{grunnkart}$, vil være å konvertere modellen fra TIN til et raster med verktøyet «TIN to raster». Resultatet er en raster-modell som ligger kant-i-kant med $DTM_{grunnkart}$ (se Figur 40). Ved hjelp av det samme verktøyet som ble brukt i 4.4.2 for å kombinere LiDAR-dataene, «Mosaic to new raster», skal vi kombinere raster-modellene med $DTM_{grunnkart}$.



Figur 40 – Raster-modellen som er laget ut av TIN-modellen. Fargeskalaen viser hva høydeverdien i det nye rasteret er i meter over havet.

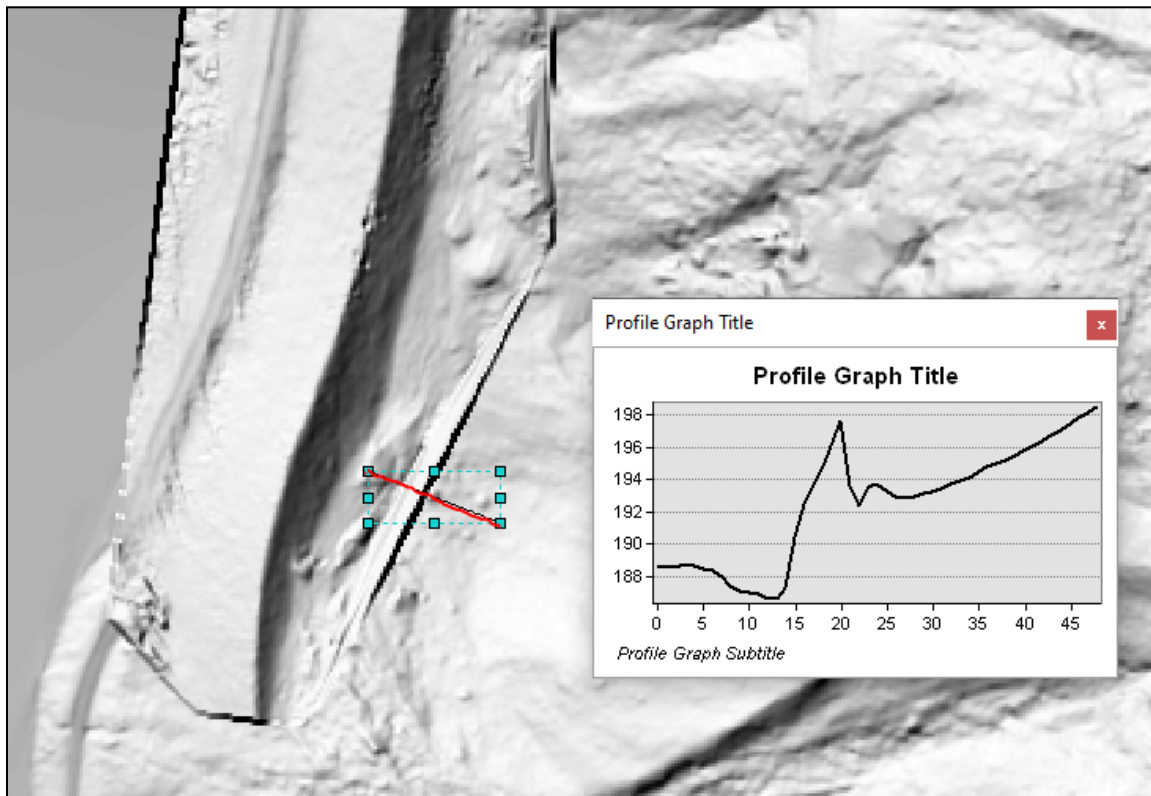
I menyen for «Mosaic to new raster», under fanen «Pixel type», kan man velge oppløsningen til det nye datasettet. Det varierer fra 1 bit til 64 bit. $DTM_{grunnkart}$ og våre modeller er i 32-bit formatet. Man må i tillegg velge 32-bit FLOAT for å få med desimalverdier (Esri, 2016b). Dette er viktig da vi har opptil tre desimalers nøyaktighet på høydemålingene. Våre datasett har cellestørrelse $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Det gir en nøyaktig gjengivelse, da hver celle representerer 1 kvadratmeter.

I «Mosaic to new raster» velger vi «FIRST» for å prioritere fra øverst til nederst i listen. Man legger da $DTM_{grunnkart}$ nederst og raster-modellene over i prioriteringslisten. Modellene sine høydeverdier vil erstatte $DTM_{grunnkart}$ sine verdier der de overlapper. Resultatet blir en terrengmodell, hvor vollene er inkludert, som er konstruert med dGPS-punktene. Denne modellen vil videre kalles DTM_{dGPS} .

4.4.4. DTM_{drone} – Terrengmodell basert på dronefotogrammetri

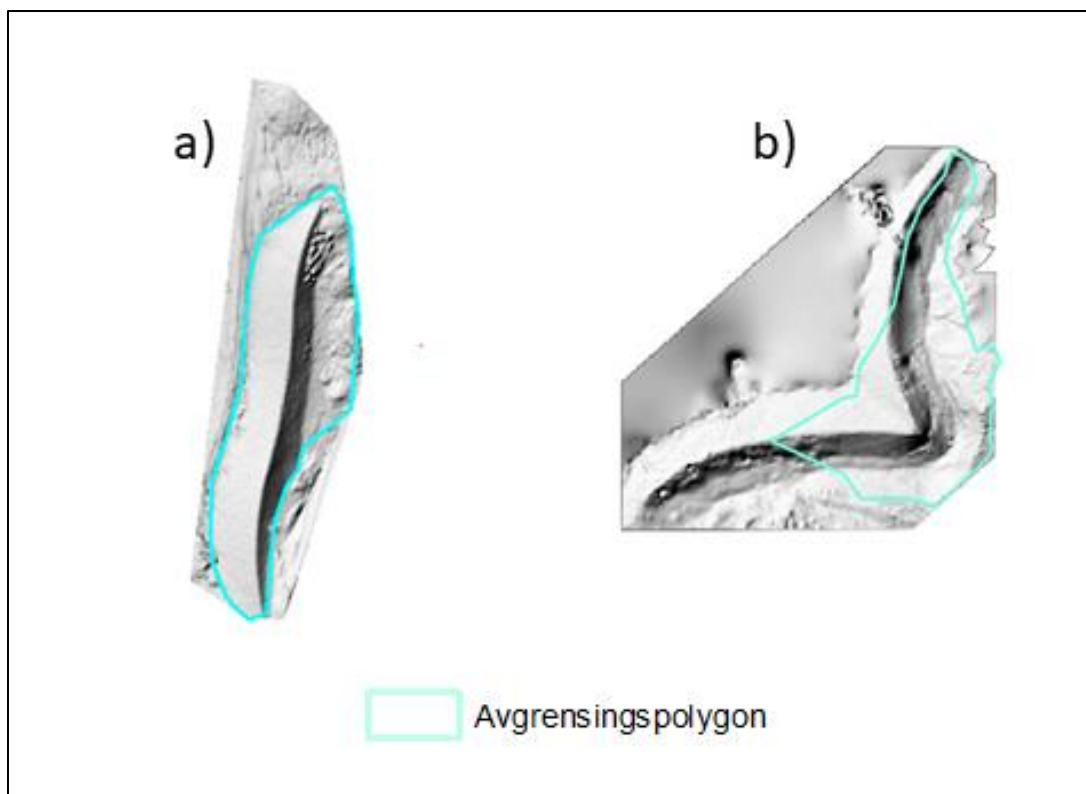
Det neste steget er å bruke 3D-modellene som ble produsert i Metashape til å konstruere en terrengmodell basert på dronefotogrammetri (se 4.3). Modellene ble eksportert som DTM (med filtypen .tif), slik at de kan legges direkte inn i $DTM_{grunnkart}$ i ArcMap. Det ble ikke utført dronefotogrammetri av utvidelsen til Linnskreda-ledevollen, og den er derfor ikke med i denne metodedelen. Den ble bygget inn i ettertid med data fra dGPS-målingene.

Etter prosessering av dronemodellen i Metashape er det feil i høydedataene i ytterkantene av modellen, og vi fikk derfor opp en tydelig og bratt høydeforskjell mellom datasettene på visse punkt (se Figur 41). For å løse problemet må vi bruke de delene av høydemodellen som ikke har feil data, men vi vil allikevel ta vare på så mye som mulig for å bevare alle detaljer. Kanten mellom datasettene i Figur 41 vil være en unaturlig hindring for skredene og modellen vil derfor føre til urealistiske simuleringer.



Figur 41 – Den røde linjen viser hvor høydeprofilen er tatt. Det svarte området under den røde linjen viser feilen i dataene. Grafen viser den tydelige høydeforskjellen mellom høydemodellen og grunnrasteret.

Problemet ble løst ved å bruke verktøyet «Extract by mask» som vil ta et raster og hente ut de delene av rasteret som er innenfor et forhåndsbestemt område. Dette kan være et annet raster eller polygon (Esri, 2019a). Figur 42 viser de avgrensede områdene som ble brukt for å eliminere høydeforskjellene. Verktøyet vil lage to nye output-raster som kombineres videre med $DTM_{grunnkart}$.



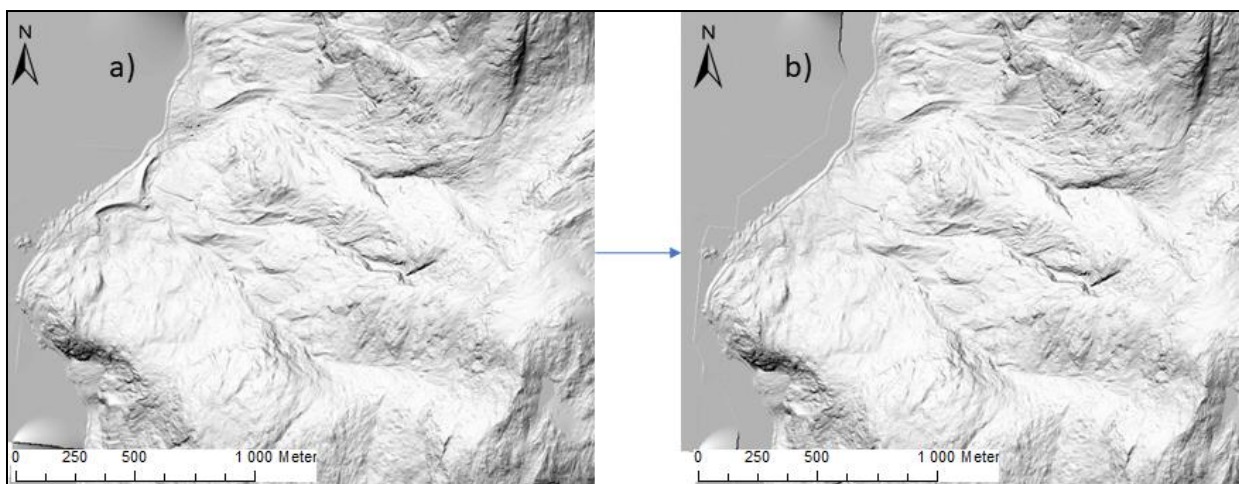
Figur 42 – Viser de markerte områdene som vi vil bruke i den endelige modellen. Rasteret utenfor avgrensingene vil derfor bli forkastet og ikke bli brukt videre. a) er Linnskreda-fangvollen og b) er Buskreda-vollen.

Videre brukes «Mosaic to new Raster» for å kombinere modellene med $DTM_{grunnkart}$, der modellene av Linnskreda og Buskreda blir prioritert. I verktøyet er det viktig at det under «Enviroments» og «Processing extents» velges $DTM_{grunnkart}$ i «Snap to raster» for å få en jevn overgang mellom modellene og $DTM_{grunnkart}$. Resultatet ble en terrengmodell som videre refereres til som DTM_{drone} .

4.4.5. $DTM_{utenvoll}$ – Terrengmodell basert på pre-situasjonen

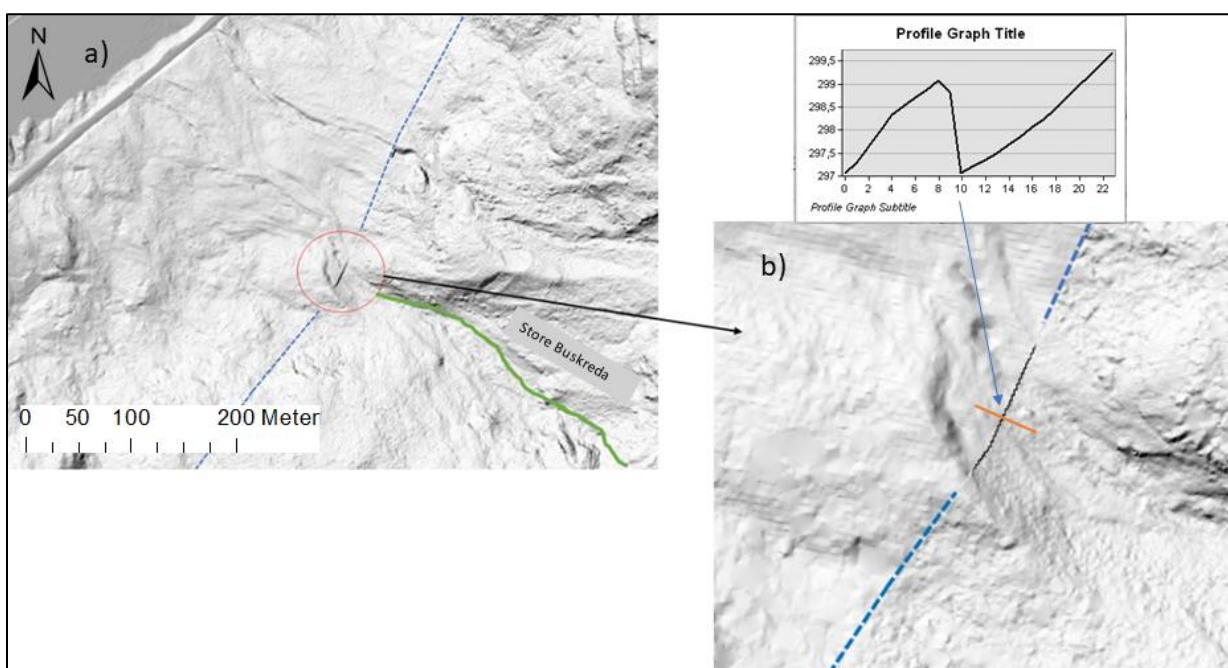
For å undersøke vollenes funksjon mot tørre snøskred, vil vi gjennomføre simuleringer av pre-situasjonen fra før vollene ble konstruert. Det ble gjort en LiDAR-måling av vollområdet i 2007. Datasettet heter «Sogn og Fjordane 2007», og vi vil bruke dette datasettet når vi skal konstruere en terrengmodell av området fra før vollene ble konstruert. LiDAR-dataene fra 2007 overlapper dataene fra 2012 (se Figur 36).

Vi vil igjen bruke verktøyet «Mosaic to new raster» for å kombinere LiDAR-dataene fra 2007 med $DTM_{grunnkart}$. Dataene fra 2007 må prioriteres over $DTM_{grunnkart}$ for å få et nytt raster som viser området før konstruksjonen av vollene startet. Figur 43b viser resultatet.



Figur 43 - Bilde a) viser området fra 2012 med Buskreda-plogvollen under konstruksjon ($DTM_{grunnkart}$) og bilde b) viser området før vollene.

I det neste steget måtte vi løse et geologisk problem. Siden datasettet fra 2007 er fem år eldre enn rasteret ved siden (Luster-Stryn 2012), vil erosjon i skredrennen føre til en høydeforskjell. I overlappen med 2007-datasettet, forekommer det en «vegg», da 2007-datasettet vil ligge høyere i dette punktet (se Figur 44). En skredsimulering vil være urealistisk da skredet vil treffe denne kanten og miste fart og bevegelsesenergi.

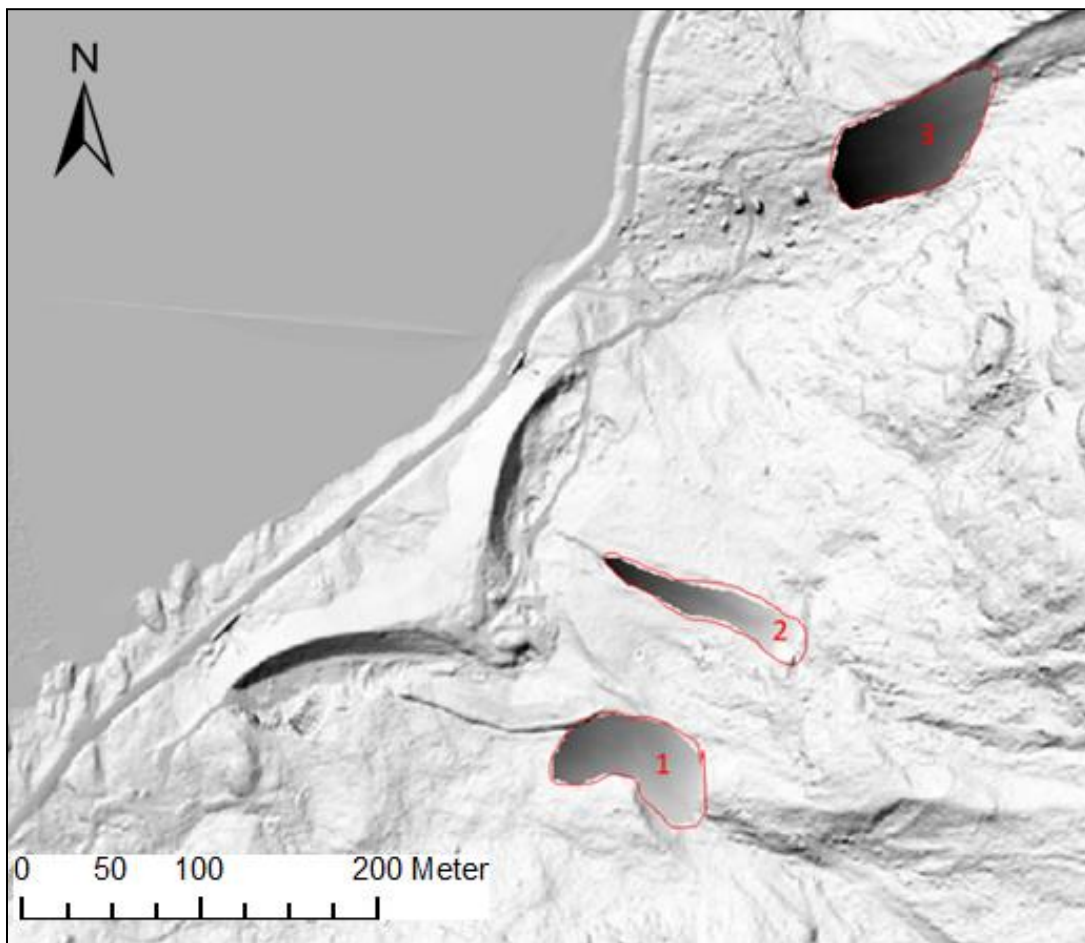


Figur 44 – I figur a) viser rød sirkel hvor ett av erosjonsproblemene ligger. Figur b) viser samme område forstørret. Den svarte linjen i bildet b) er kanten som viser høydeforskjellen mellom datasettene, med andre ord, erosjonen etter fem år. Den blå stiplede linjen viser overlappen mellom 2007-datasettet og 2012-datasettet. Oransje linje som er vinkelrett på høydeforskjellen er et profil som er vist over bilde b). Høydeforskjellen, «veggen», er 2 meter.

For å løse dette problemet må høydeforskjellen korrigeres. Vi valgte å overføre rasterdata fra Luster-Stryn 2012-datasettet, men kun av selve områdene hvor erosjonsproblemene ligger, og

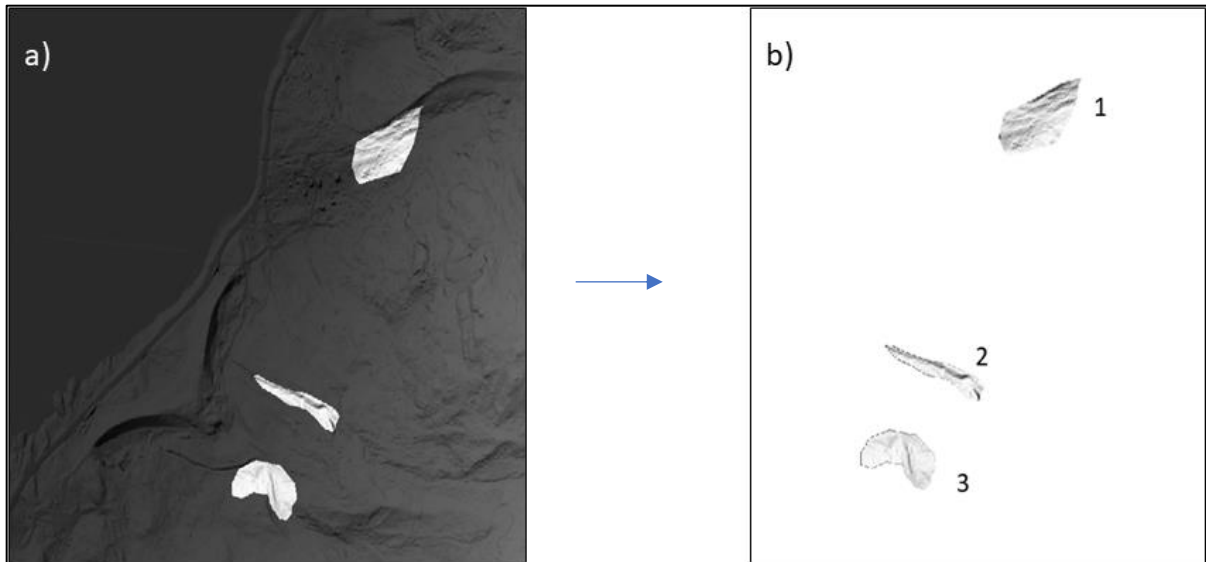
legge det over datasettet for pre-situasjonen (se Figur 43b). Deler av rasteret i skredløpene vil derfor være fra Luster-Stryn 2012-datasettet og være uten hindringer som påvirker skredsimuleringen.

Dette problemet er størst i Store Buskreda-løpet, men forekommer også i Linnskreda og Vetle Buskreda, og vi må derfor korrigere alle tre. Vi definerte utsnittene som skal skiftes ut ved hjelp av å tegne polygoner. Polygonene skal dekke erosjonsproblemene, men også et større område rundt (se Figur 45).



Figur 45 - De tre områdene hvor vi hentet ut rasterdata fra datasett «Luster-Stryn 2012» er markert med rødt omriss. 1) er Store Buskreda, 2) er Vetle Buskreda og 3) er Linnskreda.

Ved hjelp av verktøyet «Extract by mask», kan vi derfor hente ut rasteret som befinner seg innenfor de definerte polygonene (se Figur 46a). Her vil «input-raster» være fra Luster-Stryn 2012, og «output extent» vil være polygon-laget som avgrensner områdene vi er ute etter. Vi vil da få en «output-raster» som har tre individuelle områder med rasterdata fra Luster-Stryn 2012 (se Figur 46b).

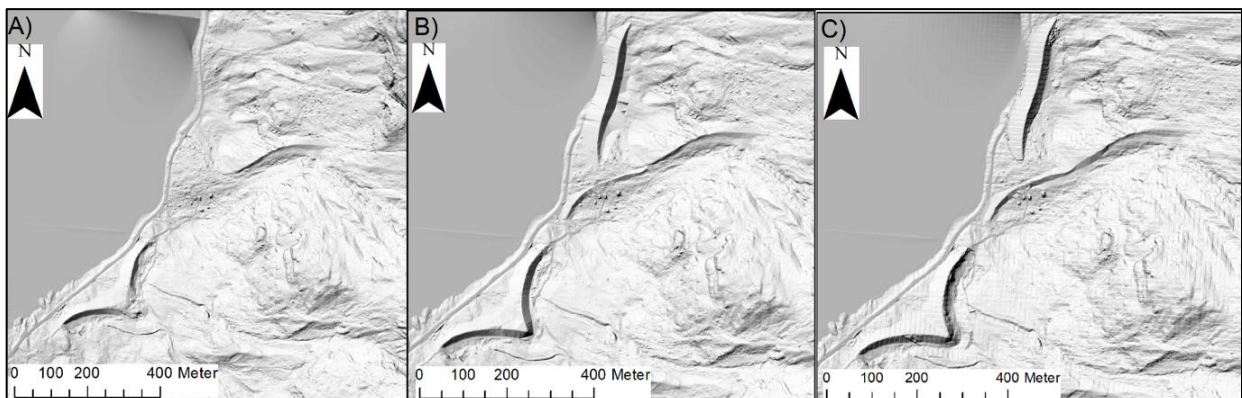


Figur 46 – a) Rasterutklippene fra Luster-Stryn 2012-datasettet. Figur b) nr.1 viser Linnskreda, nr.2 viser Vetle Buskreda og nr.3 viser Store Buskreda.

Rasterutklippene skal igjen kombineres med datasettet for pre-situasjonen som vi lagde først (se Figur 43b), og vi vil igjen bruke «Mosaic to new raster». Vi får da et nytt raster uten vollene og erosjonsproblemene i skredløpene som videre omtales som $DTM_{utenvoll}$.

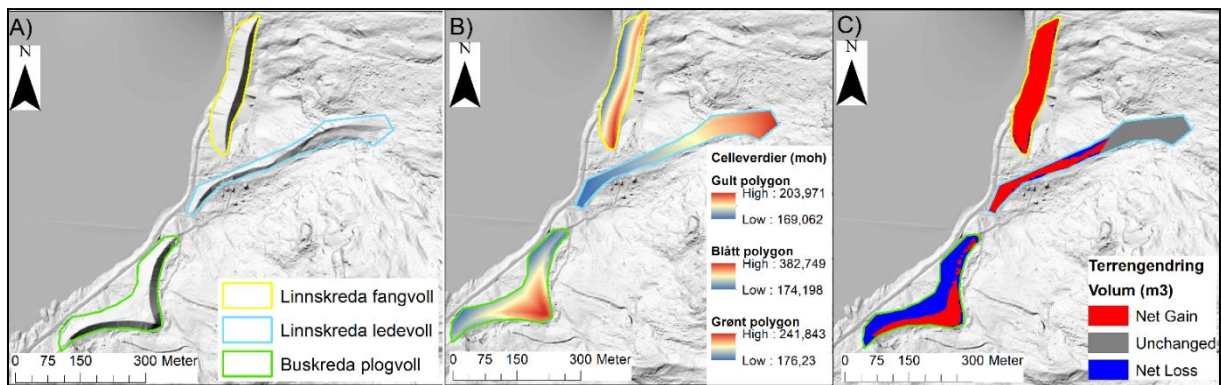
4.5. Beregning av tilført massevolum i ArcMap

I ArcMap ble tilført massevolum for de tre vollene, fang- og ledevoll ved Linnskreda og plogvollen ved Buskreda, beregnet for både terrenngmodellen lagd med dronefotogrammetri og med differensial GPS. Med tilført massevolum menes forskjellen i masse mellom $DTM_{grunnkart}$ og de konstruerte terrenngmodellene (se Figur 47). Dette gjør vi for å kunne sammenligne vollene i DTM_{drone} og DTM_{dGPS} og se om det er store avvik i volum, noe som kan ha betydning for resultatene fra simuleringene i RAMMS.



Figur 47 - A) Lidarutsnitt fra 2012 ($DTM_{grunnkart}$), B) terrenngmodell basert på dGPS punktmålinger (DTM_{dGPS}) og C) terrenngmodell basert på dronefotogrammetri (DTM_{drone}). Et artefakt kan ha blitt introdusert på DTM_{drone} når datasettet ble reprojisert.

Fremgangsmåten som ble fulgt var å først avgrense områdene vi ønsket å sammenligne med polygoner. Polygonene omringer de tre vollene og inkluderer ikke magasinområdet (se Figur 48A). Deretter ble verktøyet «Extract by Mask» brukt for alle tre polygonene både for $DTM_{grunnkart}$ (se Figur 47A), DTM_{dGPS} (Figur 47B) og DTM_{drone} (Figur 47C). Avgrensningen trenger ikke være rektangulær. Rasteren består av hele rader og kolonner, men cellene utenfor polygonet får verdien 0 (Esri, 2019a). Figur 48B viser rasterdataen basert på dGPS-punktmålinger etter at verktøyet ble brukt og vollene avgrenset, tilsvarende ble også lagt for DTM_{drone} og $DTM_{grunnkart}$.



Figur 48 - Viser arbeidsflyt, steg A, B og C, for å finne tilført massevolum i de ulike scenarioene. Figur A) viser avgrensede områder. B) viser rasterdata for avgrensede områder i DTM_{dGPS} . Dette ble gjort for alle tre terrengmodellene. C) viser tilført og fjernet massevolum mellom $DTM_{grunnkart}$ og DTM_{dGPS} . Det ble også gjort mellom $DTM_{grunnkart}$ og DTM_{drone} .

Videre ble verktøyet «Cut Fill (3D Analyst)» brukt for å kalkulere volumendringen mellom to overflater, altså $DTM_{grunnkart}$ (se Figur 47A) og dagens situasjon både for DTM_{dGPS} (se Figur 47B) og DTM_{drone} (Figur 47C). Resultatet blir et raster som viser områdene hvor overflatemateriale har blitt tilført eller fjernet (Esri, 2019b), se Figur 48C. Positive verdier i rasteren er «net loss» og markert med rød farge og negative verdier er «net gain» som er markert i blå farge (se Figur 48C).

Verktøyet ble brukt fem ganger: to ganger for plogvollen, to ganger for fangvollen under Linnskreda og en gang for ledevollen ved Linnskreda. Grunnen til at det kun ble gjort en gang for Linnskreda-ledevollen er at denne vollen kun er lagt inn i terrengmodellene gjennom data fra differensial GPS og vil derfor være lik i både DTM_{dGPS} og DTM_{drone} .

4.6. RAMMS::Avalanche – Dynamisk modellering

4.6.1. Oppsett av RAMMS::Avalanche

Det ble gjennomført 21 simuleringer i RAMMS::Avalanche 1.7.20. Syv i Linnskreda, syv i Vetle Buskreda og syv i Store Buskreda. Alle modelleringene er av tørre flakskred, da dette er skredtypen oppgaven fokuserer på. I tillegg vil tørre snøskred ha lengre utløp enn våte snøskred, med unntak av sørpeskred, fordi de beveger seg med en høyere hastighet (Norem, 2014). Samtidig er det flakskred som påfører mest skade på liv og infrastruktur (se 3.1.3). Det er derfor mest hensiktsmessig å modellere for tørre flakskred.

Input i RAMMS er en digital terrengmodell, løsneområde, bruddhøyde til skredlaget, friksjonsparametere for indre friksjon og friksjon mot underlaget, kohesjon og tetthet til snøen. Output er en raster-fil med romlig fordeling av flyte høydeverdier, hastigheten til skredet og trykk ved ulike tidspunkter for skredscenarioet (Bartelt et al., 2017).

4.6.2. Terrengmodell

RAMMS må ha en terrengmodell for å kunne gjennomføre modelleringer. I oppgaven ble DTM_{dGPS} og DTM_{drone} brukt, i tillegg til en terrengmodell for situasjonen uten voller ($DTM_{utenvoll}$).

For å kunne laste inn terrengmodellene i RAMMS, må de først omgjøres fra en raster-fil til en ASCII-fil i ArcMap. Dette ble gjort ved å bruke verktøyet “Raster to ASCII”. Ortofoto over området og «Topografisk norgeskart» ble også hentet via ArcMap over til RAMMS ved å eksportere kartene som geotiff-filer. For å få med den romlige plasseringen til kartene ble “write world file” huket av og oppløsning ble satt til 300 dpi. Dette for å bedre visualiseringen av terrengmodellen i RAMMS.

Videre ble stien til arbeidsområdet, terrengmodellene, ortofoto og topografisk kart bestemt i RAMMS. Dette er utgangspunktet man har i programmet, før selve prosjektene skal lages. Når prosjektene opprettes legges ASCII-filen til, og oppløsningen er på 1,0 m for alle terrengmodellene. Simuleringene ble gjennomført med oppløsning på 3,0 m for å spare prosesseringstid, men likevel ivareta nok detaljer.

4.6.3. Løsneområde

Neste steg er å bestemme løsneområde for skredløpene ved å digitalisere polygon-shapefiler. Vi fokuserer på tre løsneområder: Vetle Buskreda, Store Buskreda og Linnskreda. Shapefilene

tegnes i RAMMS og baseres på terrenghelning, 3D-bilder, flyfoto og himmelretning til fjellsiden, sammen med NVEs veileder for vurdering av løснеområder (NVE, 2020c).

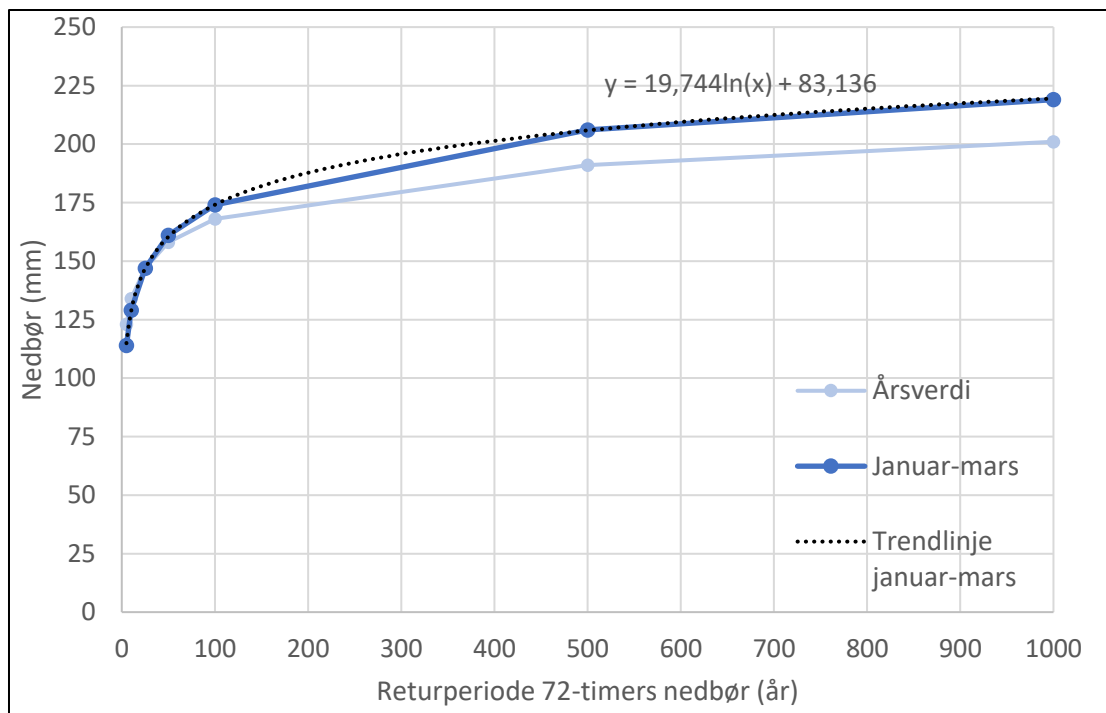
Det er lite informasjon tilgjengelig om størrelse på løснеområder fra tidligere hendelser. For å definere løснеområder har vi valgt områder med helning mellom 35-50 grader innenfor skålformasjonene, som er terrenghelningen hvor man får store og hyppige flakskred (Norem, 2014).

Brukermanualen til RAMMS::Avalanche tilrår at løснеområdet defineres noe større enn hva som er forventet, fordi RAMMS ikke inkluderer medrivning av masser på vei ned skredløpet i modelleringene (Bartelt et al., 2017). Dette ble medregnet i utformingen av løснеområdene og de ble definert større for å kompensere for dette. Terrengunderlaget ble lagt noe vekt på, da bart fjell vil øke sjansen for snøskred på grunn av mindre friksjon mot underlaget, i motsetning til skredmateriale og morene (NVE, 2020c). Flakskred løsner i områder med jevnt terreng (Lome, 2017), derfor ble dette tatt med i vurderingen til plasseringen av løснеområdene.

Bredden til skredet ble vurdert utfra de nevnte faktorene. For å avgrense løснеområdets lengde ble det i tillegg antatt at den vertikale høydeforskjellen på skredlaget er på 100 meter (Håland, Orset, Frekhaug & Norem, 2015; Lome, 2017). Samme løснеområde i hvert skredløp ble brukt for alle skred i modelleringene.

4.6.4. Bruddhøyde

For å fastsette bruddhøyden til løснеområdene ble det lagt vekt på klimadata. Først ble akkumulert snø for 72-timer hentet for nedbørstasjonen i Veitastrand fra eklima.met.no som en funksjon av returperiode, se Figur 49 og Tabell 5. Verdiene i millimeter er utgangspunkt for beregningen av bruddhøyden til de tre løснеområdene og vises i Vedlegg 1 for alle simuleringene. 1 mm nedbør omregnes til 1 cm snø (se 3.1.2).



Figur 49 - Returperioder for 72-timers nedbør for nedbørstasjonen Veitastrond i Luster basert på nedbørsmålinger fra 1972 til 2020. Kurvene baseres på en Gumbel fordeling og dataene er hentet fra Eklima (Meteorologisk institutt, 2020).

Tabell 5 viser nedbørsverdier for ulike returperioder, som ble brukt som grunnlag i beregningen av bruddhøyde. Nedbørsverdi for vinternedbør med returperiode 20 år ble funnet ved å regne ut y-verdien for trendlinjen, se Figur 49, når $x = 20$. Nedbørsverdien ble da 142 mm, og det er denne verdien som brukes videre i utregningen av 20-årsskredet sin bruddhøyde.

Tabell 5 - Viser returperiode for millimeter nedbør i årsverdi og for perioden januar-mars for nedbørstasjonen i Veitastrond. Januar-mars verdiene brukes i beregning av bruddhøyde (Meteorologisk institutt, 2020).

Returperiode (år)	Nedbør (mm) årsverdi	Nedbør (mm) januar, februar og mars
5	123	114
10	134	129
25	147	147
50	158	161
100	168	174
500	191	206
1 000	201	219

Deretter ble mm nedbør korrigert for høyden over havet (Håland et al., 2015; NVE, 2020c). Dette ble gjort ved å justere nedbøren med + 5 cm snø per 100 høydemeter forskjell mellom

værstasjonen og løснеområdene. Løснеområdene ligger på omtrent 1100 m over havet, mens værstasjonen på 172 m over havet. For en høydeforskjell på omtrent 900 meter ble korreksjonen satt til 45 cm. Da fikk vi nye verdier for bruddhøyde som er vist i Vedlegg 1 for alle simuleringene.

Videre ble bruddhøydene justert basert på helningsvinkelen til løśnieområdene (Håland et al., 2015; NVE, 2020c). Dette ble gjort fordi bruddkanten til flakskred er omtrent 90 grader på terrenget (se 3.1.3), som vil si at tykkelsen på bruddkanten er mindre enn antall mm nedbør som faller vertikalt på terrenget. Korrigeringen ble gjort basert på trigonometri ved å gange bruddhøyden (etter høydekorreksjon) med cosinus av gjennomsnittsvinkelen i løøgneområdet (Issler, 2018). Formelen som ble brukt var:

$$\cos(a^\circ) = \frac{\text{endelig bruddhøyde (m)}}{\text{bruddhøyde m/høydekorreksjon (m)}} \quad (4.1)$$

Hvor a er terrenghelning i grader. Ved å omforme formelen til å få endelig bruddhøyde alene på den ene siden av formelen, blir eksempelvis bruddhøyden for et 20-årsskred i Store Buskreda:

$$\text{endelig bruddhøyde (m)} = 1,87 \text{ m} \times \cos(39^\circ) = 1,45 \text{ m}$$

Gjennomsnittlig terrenghelning og endelig bruddhøyde er vist i Vedlegg 1, hvor det både er korrigert for høydeforskjell og helningsvinkel i løøgneområde.

Snødrift som fører til pålagring av snø vil lede til høyere bruddkant, og i Sveits er det vanlig å legge til 30-50 cm snø for le-områder (NVE, 2020c). Deler av de tre løøgneområdene ligger i le for fremherskende vind med nedbør, men mesteparten ligger i lo. Siden det ikke er utpregete le-områder velges det å ikke korrigere for vindtransportert snø i vårt tilfelle da disse tenkes å utjevne hverandre. Bruddhøyden vi har kommet fram til med stegene for 20-, 100- og 1000-årsskred er i Vedlegg 1. Når bruddhøyden er bestemt, regner RAMMS ut løøgnevolumet (se Vedlegg 1). Deretter tegnes et domene rundt løøgneområdet med skredbanen som en avgrensing for å redusere prosesseringstiden.

4.6.5. Friksjonsparametere

Parametere for μ (Mu) og ξ (Xi) må bestemmes for input i simuleringen. Verdiene kan enten settes til konstant eller variabel modus for skredbanen. RAMMS råder å bruke variabel modus, hvor standard friksjonsparametere beregnes automatisk utfra terrenget i modellen. Disse parameterne velges ut fra skredstørrelse, terrengform, høydenivå og returperioden til

skredet (Håland et al., 2015). Variabel modus ble valgt for å inkludere terrengformasjonene mest mulig.

For å muliggjøre variabel modus lages en MuXi-fil i RAMMS. I filen velger man skredstørrelse og returperiode i tillegg til at man kan justere høydenivået etter norske verdier. Norsk høydejustering ble gjort ved å ta utgangspunkt i tregrensen for området som er 900 m over havet, da blir lim 1: 1150 og lim 2: 650 i MuXi-filen. RAMMS foretar en terrenganalyse, og man får verdier for Mu og Xi som varierer med terrenget i terrengmodellen. Det ble lagd ulike MuXi-filer avhengig av skredstørrelse (areal av løsningsområde \times bruddhøyden) og gjentaksintervall for simuleringene. For 20-årsskred ble 30-årsskreds gjentaksintervall brukt, da RAMMS ikke har egne innstillinger for 20-årsskred.

Det er mulig å legge inn skog som bremsende områder i RAMMS (Håland et al., 2015). Siden skredløpene har lite eller ingen skog ble dette ikke tatt med i simuleringene.

4.6.6. Kohesjon og tetthet

Det er lite fagkunnskap om bruk av kohesjonsparameteren for tørre snøskred i Norge (Håland et al., 2015). Denne verdien sees derfor bort fra i simuleringene. Tettheten av snømassene ble satt til 300 kg/m^3 for simuleringene. Dette er med bakgrunn i masteroppgaven til Lome (2017) som simulerte snøskred i skredløpet Utledøla som ligger under 1 km lengre nord langs fylkesveien.

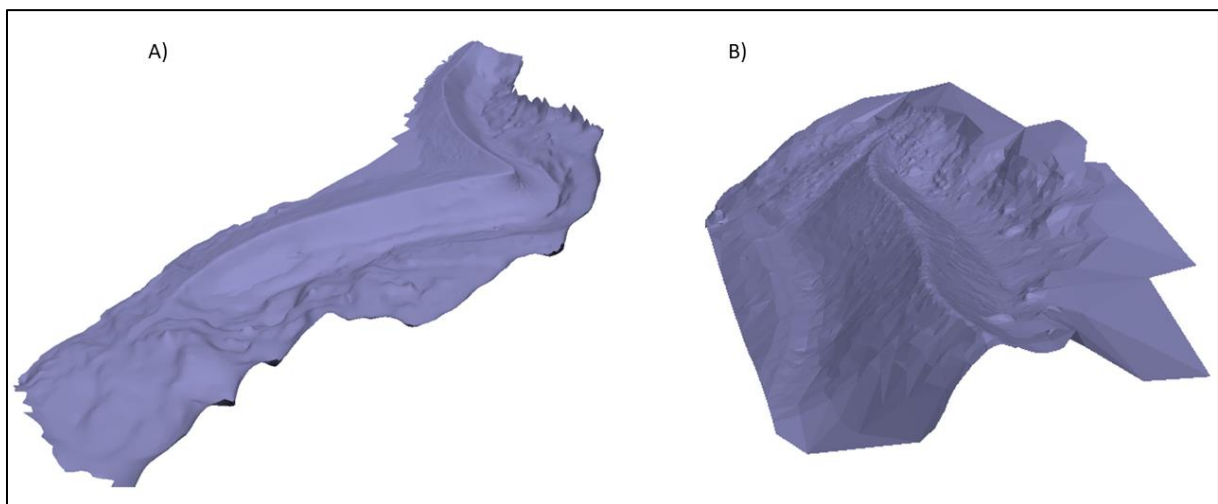
Parametere som ble justert for hver simulering var bruddhøyden og for ulike gjentaksintervall ble det lagd forskjellige MuXi-filer slik at friksjonsparameterne varierte. Det ble modellert for 20-årsskred, 100-årsskred og 1000-årsskred i denne oppgaven.

5. Resultater

I denne delen legger vi fram resultater fra Metashape, ArcMap og RAMMS::Avalanche. Resultatene i RAMMS::Avalanche er basert på terrengmodellene konstruert ved hjelp av dronefotogrammetri og differensial GPS.

5.1. Metashape

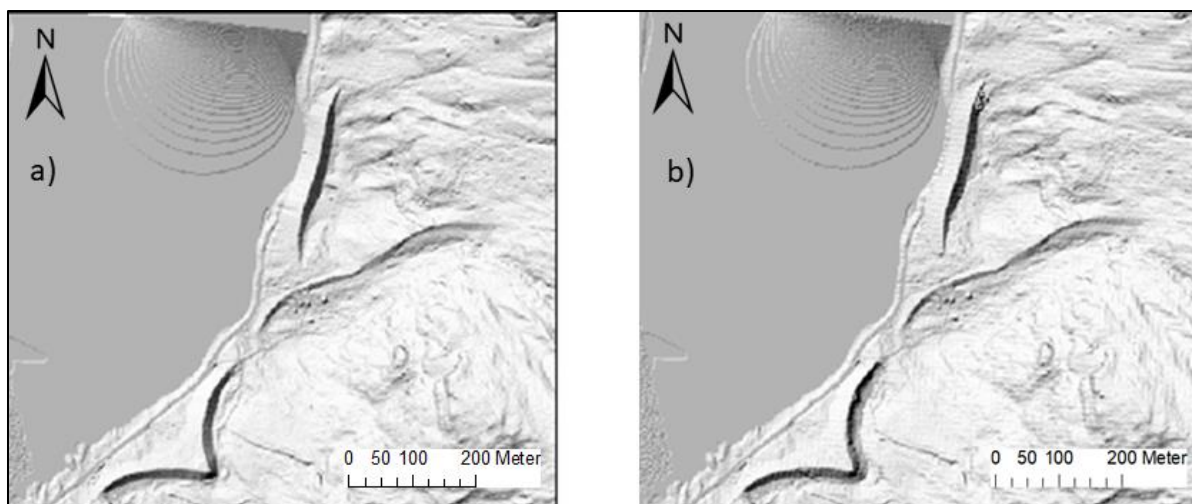
Terrengmodellene konstruert i Metashape ble eksportert og brukt videre i ArcMap for å produsere DTM_{drone} . Selv om modellene ble konstruert med lav oppløsning for å spare prosesseringstid, ble resultatet detaljert og naturtro. Figur 50 viser de to ferdige modellene for Buskreda og Linnskreda.



Figur 50 - Ferdige modeller konstruert i Metashape. A) er Buskreda-plogvollen, B) Linnskreda-fangvollen til høyre.

5.2. DTM_{dGPS} og DTM_{drone}

DTM_{drone} er basert på omtrent tre millioner datapunkt samlet for de to vollene og DTM_{dGPS} har 374 dGPS-punkt som er interpolert til en TIN-modell (se Figur 51). Utvidelsen av den naturlige ledevollen i Linnskreda er modellert med dGPS-punkt da det ikke ble gjort overflyging med drone der. Et artefakt kan ha blitt introdusert på DTM_{drone} når datasettet ble reprojisert, men det har ingenting å si for nøyaktigheten til modellen.



Figur 51 - a) viser datasettet DTM_{dGPS} og b) viser datasettet DTM_{drone} . Artefaktet gjør at DTM_{drone} ser ut til å ha lavere oppløsning enn DTM_{dGPS} , men dette er ikke tilfelle.

5.3. Vollvolum

For å kunne sammenligne DTM_{dGPS} mot DTM_{drone} ble prosentvis forskjell i tilført massevolum for de ulike vollene beregnet. Positive verdier i egenskapstabellen i ArcMap for volumforskjell representerer områder hvor materiale har blitt fjernet sammenlignet med $DTM_{grunnkart}$. Negative verdier indikerer områder som har blitt fylt, altså materiale lagt til (Esri, 2019b), og det er denne verdien vi sammenligner vollenes volumforskjell utfra, se Figur 48C.

For å finne tilført masse for vollene ble alle negative verdier for volum summert sammen for alle fem situasjonene i Tabell 6. Deretter ble prosentvis forskjell mellom rad 1 og 2 samt mellom rad 3 og 4 beregnet. Da vi kun har «tilført masse»-verdi for DTM_{dGPS} for Linnskredaledevollen, ble ikke denne sammenlignet med DTM_{drone} .

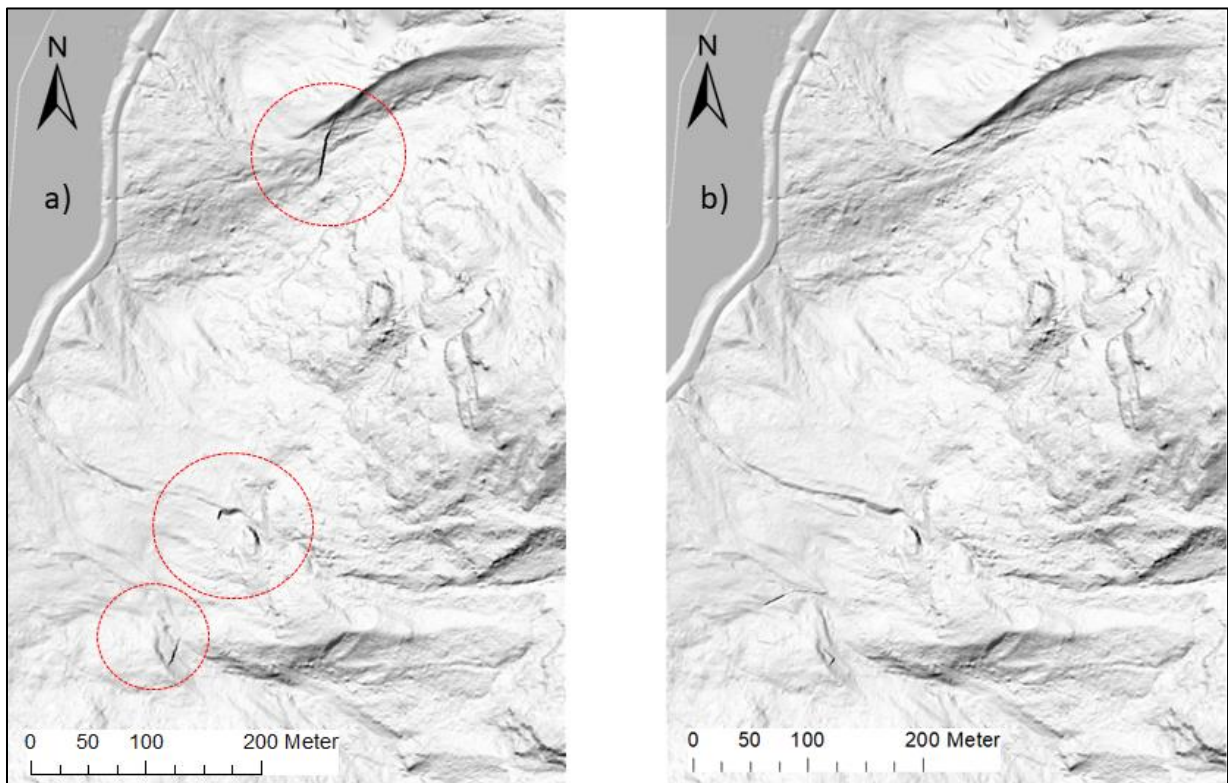
Tabell 6 - Viser input for «før-overflaten» og «etter-overflaten». Output er en raster som viser områder som har fått tilført masse og områder som har fått fjernet masse. Tilført masse er summert opp og prosentvis forskjell mellom masse ved bruk av drone og dGPS er beregnet. Se 4.5 for grafisk fremstilling.

	Input før-overflate	Input etter-overflate	Skredvoll	Tilført masse (m³)	Prosentvis forskjell
1	$DTM_{grunnkart}$ gul polygon	DTM_{drone} gul polygon	Fangvoll Linnskreda	134 274 m ³	17 % mellom DTM_{drone} og DTM_{dGPS}
2	$DTM_{grunnkart}$ gul polygon	DTM_{dGPS} gul polygon	Fangvoll Linnskreda	111 738 m ³	

3	DTM _{grunnkart} grønn polygon	DTM _{drone} grønn polygon	Plogvoll Buskreda	25 685 m ³	26 % mellom DTM _{drone} og DTM _{dGPS}
4	DTM _{grunnkart} grønn polygon	DTM _{dGPS} grønn polygon	Plogvoll Buskreda	18 956 m ³	
5	DTM _{grunnkart} blå polygon	DTM _{dGPS} blå polygon	Ledevoll Linnskreda	13 373 m ³	

5.4. DTM_{utenvoll}

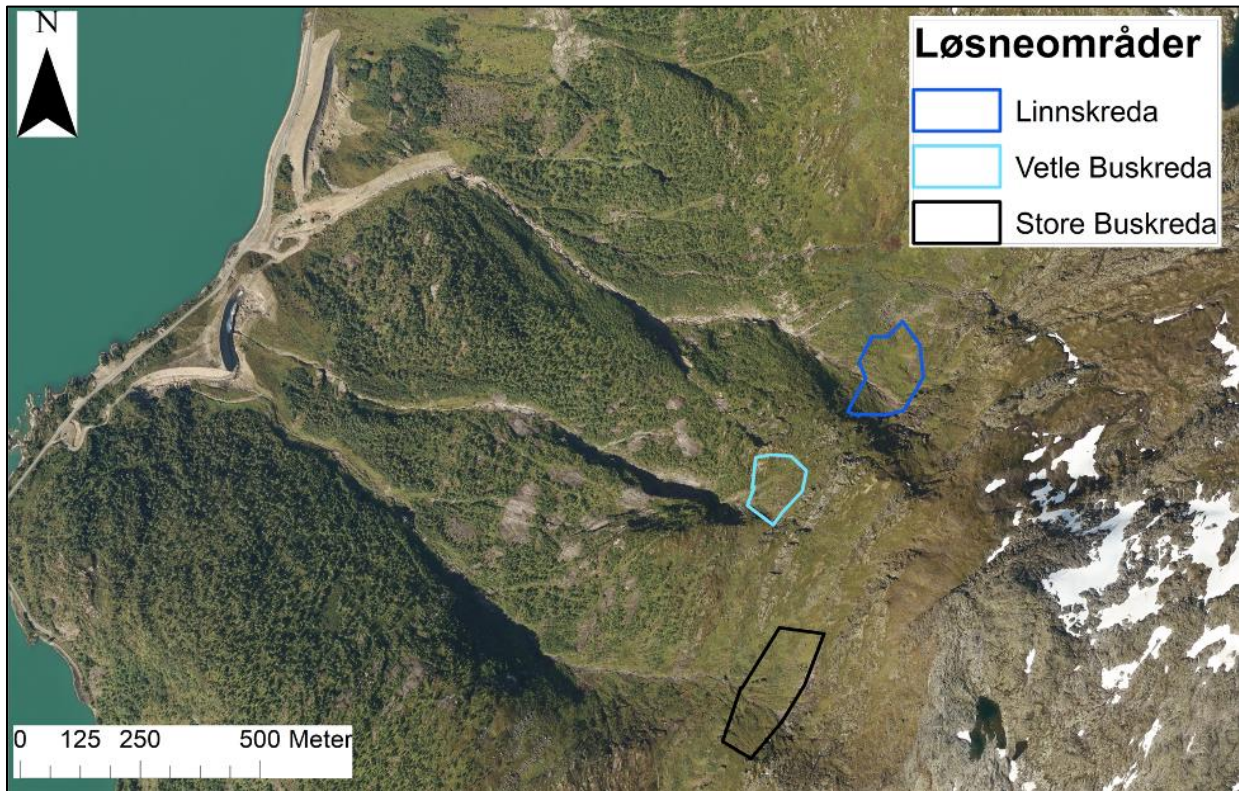
I DTM_{utenvoll} kombinerte vi terrengmodellen Sogn og Fjordane 2007 med DTM_{grunnkart} (se Figur 37). Dette er en nær tilnærming til området som det var før vollene ble konstruert. Erosjonsproblemet i skredrennene ble løst med overføring av rasterdata fra Luster Stryn 2012 (se Figur 52). For å undersøke om problemet var løst, sjekket vi simuleringresultatene i disse områdene for endring i flyte høyde og trykk. Økning i både flyte høyde og trykk ville være å forvente om skredet møtte en brå forhøyning. Dette ble ikke observert og denne terrengmodellen kan derfor brukes i simuleringer for å finne ut flyte høyden, utbredelsen og trykket skredet utøver på veien før vollene ble bygget. Figur 52b viser endelig terrengmodell som brukes i simuleringer av pre-situasjonen.



Figur 52 - Terrengmodell a) er før DTM_{utenvoll}-rasteret sine overlapper er fikset. De røde ringene viser hvor erosjonsproblemene er. Terrengmodell b) er det endelige datasettet som skal brukes i simuleringer av pre-situasjonen.

5.5. RAMMS::Avalanche

Det har blitt gjort i alt 21 simuleringer i RAMMS::Avalanche 1.7.20 etter metoden beskrevet i 4.6. Det ble gjennomført syv simuleringer for hvert skredløp. Tre for 20-årsskred, tre for 100-årsskred samt en simulering av 1000-årsskred. Figur 53 er et oversiktskart som viser hvor de tre valgte løsneområdene ligger. Samme løsneområdene er brukt gjennom alle simuleringene, men med ulike parametere og bruddhøyder. Parameterne brukt i RAMMS er presentert i 4.6 og Vedlegg 1.



Figur 53 - Viser løsneområdene som er brukt i RAMMS.

Simulerte verdier for trykk, flyte høyde og utstrekning er lest av i RAMMS. Man kan også lese av hastigheten til skredet, men vi valgte å fokusere på trykk og flyte høyde for å kunne besvare våre problemstillinger, da trykket blant annet avhenger av hastigheten (se 3.1.6).

Vi har ikke bakgrunnsinformasjon om hvor mye trykk hver enkelt voll tåler, da dette ikke er spesifisert i konstruksjonsrapportene. De er derimot store og tunge konstruksjoner som mest sannsynlig er overdimensjonert for å kunne tåle stort trykk. Vi fokuserer derfor heller på trykket skredet utøver på veien, da vi har verdier for forventet skadeomfang på kjøretøy (se 3.1.6).

Simuleringene for samme scenarier med DTM_{GPS} og DTM_{drone} har identiske inputparametere i RAMMS, men forskjellige terrengmodeller. Disse sammenlignes med dataene

fra simuleringene med $DTM_{utenvoll}$, som presenteres i 5.5.1. Dataene fra simuleringene med DTM_{drone} og DTM_{dGPS} presenteres i del 5.5.2, 5.5.3 og 5.5.4.

5.5.1. Resultat pre-situasjon

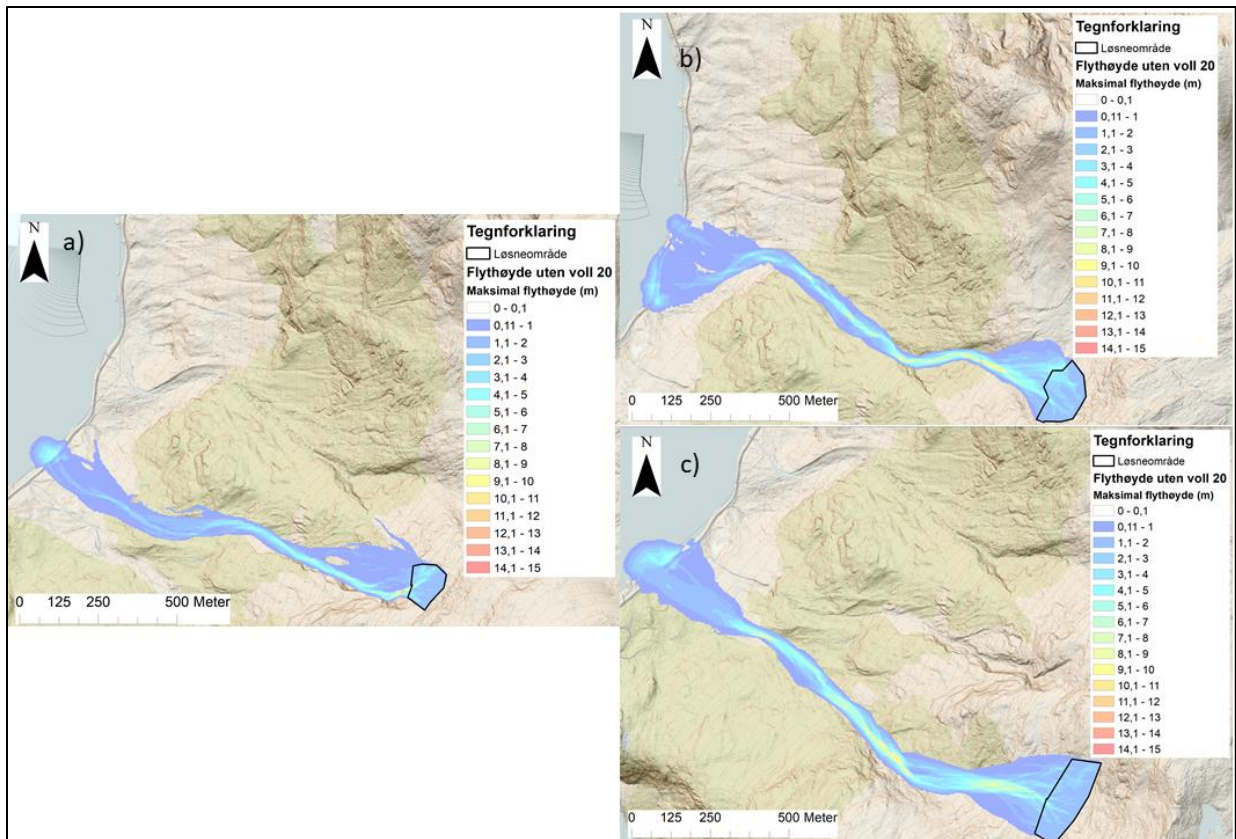
Simuleringer med $DTM_{utenvoll}$ ble gjennomført for å ha sammenligningsgrunnlag. Dermed kunne vi se i hvor stor grad vollene i DTM_{drone} og DTM_{dGPS} beskyttet mot snøskred, både for trykkpåvirkning og snøfordeling i forhold til en situasjon uten voller. Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 7, Figur 54 og Figur 55 under. Større figurer av simuleringene med trykk og flyte høyde vises i Vedlegg 2 – simulering 1, 4, 7, 10, 13 og 16.

Tabell 7 - Viser verdier fra simuleringer med $DTM_{utenvoll}$.

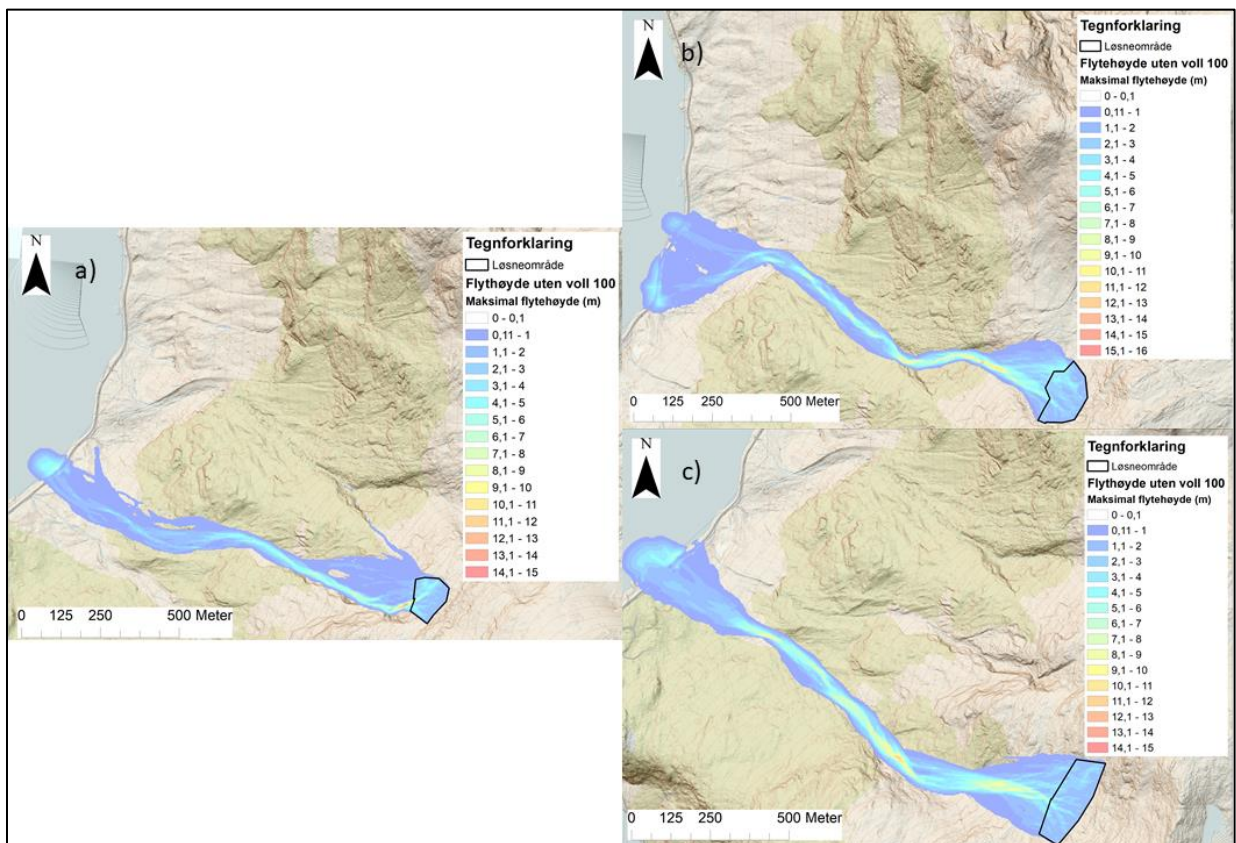
	Skredløp	Meter vei truffet av skred	Maksimal flyte høyde på veien i meter	Maksimalt trykk utøvd på veien i kPa
20-årsskred	Store Buskreda	250	3,5	110
	Vetle Buskreda	120	2,5	80
	Linnskreda	330	4	70
100-årsskred	Store Buskreda	250	3,5	160
	Vetle Buskreda	120	3	110
	Linnskreda	350	4,5	80

Som Figur 54 og Figur 55 viser vil alle snøskred simulert med $DTM_{utenvoll}$ ha utløp lengre enn veien. Snøskred fra Store Buskreda vil treffe veien med høyest trykk, både for 20- og 100-årsskred, mens skredene fra Linnskreda vil ha størst utbredelse og flyte høyde (se Tabell 7).

Det er små forskjeller mellom 20- og 100-årsskred med hensyn til flyte høyde og utbredelsen av skredet på veien (se Figur 54 og Figur 55). For Linnskreda ser man heller ikke stor forskjell i trykket, men for Store Buskreda og Vetle Buskreda er trykkforskjellen mellom 20- og 100-årsskred betydelig (se Tabell 7).



Figur 54 – Viser simuleringer av 20-årsskred med $DTM_{utenvoll}$. a) er Vetle Buskreda, b) er Linnskreda og c) er Store Buskreda.



Figur 55 – Viser simuleringer av 100-årsskred med $DTM_{utenvoll}$. a) er Vetle Buskreda, b) er Linnskreda og c) er Store Buskreda.

5.5.2. Resultat Store Buskreda

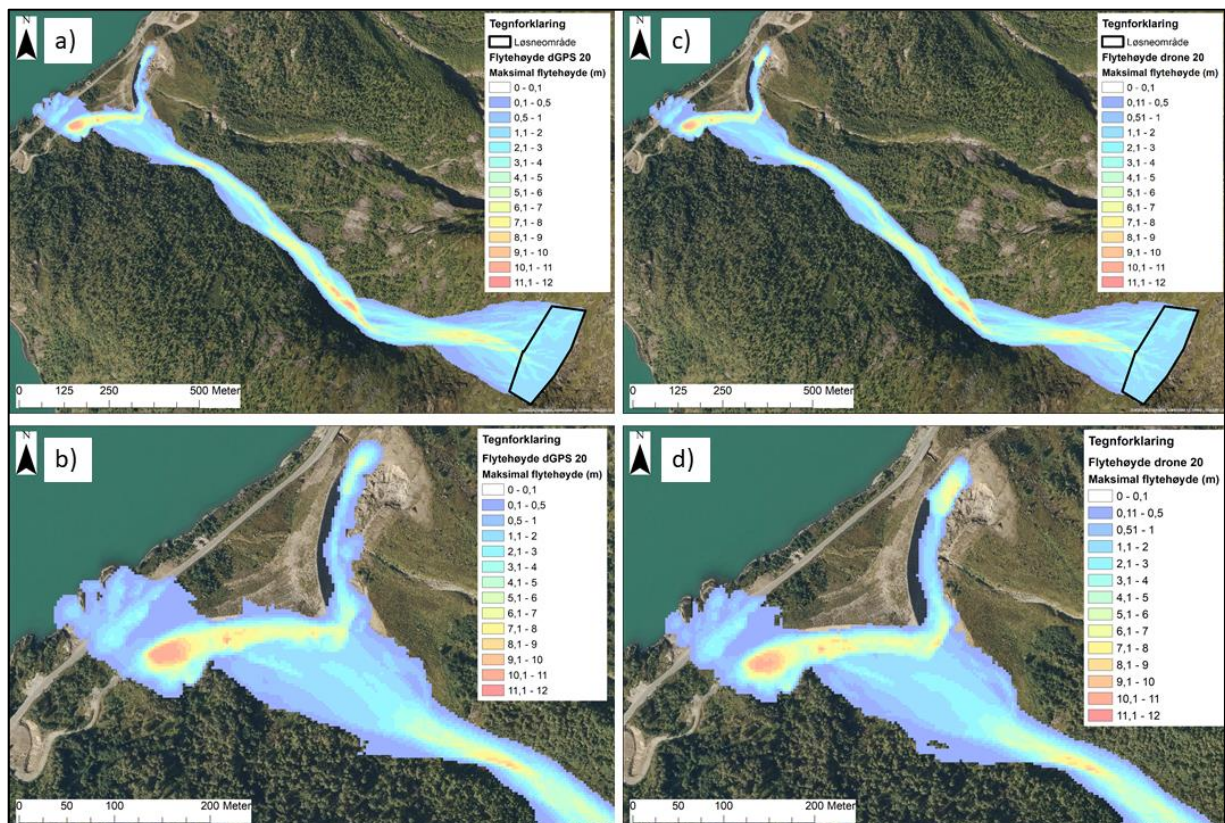
Verdiene fra simuleringene av snøskred i Store Buskreda er presentert i Tabell 8.

Tabell 8 - Verdier fra simuleringer av Store Buskreda.

Store Buskreda	DTM	Meter vei truffet av skred	Maksimal flyte høyde på veien i meter	Maksimalt trykk utøvd på veien i kPa	Maksimalt trykk utøvd på vollen i kPa
20-årsskred	Drone	100	1	5	190
	dGPS	100	1,5	10	180
100-årsskred	Drone	150	1,9	40	190
	dGPS	160	2	40	190

20-årsskred Store Buskreda

Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 8 og Figur 56. Større figurer av simuleringene med trykk og flyte høyde vises i Vedlegg 2 – simulering 2 og 3.



Figur 56 - Simuleringer av 20-årsskred i Store Buskreda. a) viser DTM_{dGPS} , b) viser DTM_{dGPS} med fokus på vollområdet, c) viser DTM_{drone} og d) viser DTM_{drone} med fokus på vollområdet.

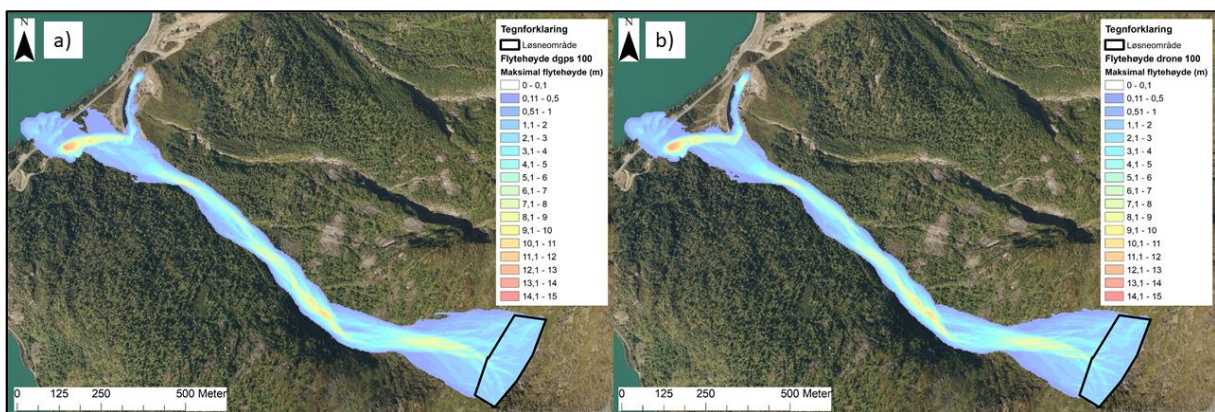
Simuleringene våre av 20-årsskred i Store Buskreda viser at skredet i stor grad vil treffe den sørlige delen av plogvollen med begrenset avsetning langs den nordlige delen. For både DTM_{drone} og DTM_{dGPS} er snøen som går over vollen begrenset til nedre del av vollmagasinets sørlige del (se Figur 56a og c). Skredet treffer vollen med liten avbøyingsvinkel.

Det er små forskjeller mellom DTM_{dGPS} og DTM_{drone} , men som man ser på Figur 56a og c går noe mer snø over vollen for DTM_{dGPS} . I tillegg har DTM_{dGPS} høyere verdier for flyte høyde og trykk på veien, henholdsvis 0,5 meter og 5 kPa (se Tabell 8).

Plogvollen demper skredet sin påvirkning på veien sammenlignet med pre-situasjonen uten voller. Antall meter vei som treffes av skred reduseres fra 250 meter til 100 meter, flyte høyden på veien reduseres fra 3,5 meter til 1-1,5 meter og trykket på veien reduseres fra 160 kPa til 5-10 kPa (se Tabell 7 og Tabell 8).

100-årsskred Store Buskreda

Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 8 og Figur 57. Større figurer av simuleringene med trykk og flyte høyde vises i Vedlegg 2 – simulering 5 og 6.



Figur 57 - Simuleringer av 100-årsskred i Store Buskreda. a) DTM_{dGPS} og b) DTM_{drone} til høyre.

Simuleringene våre av et 100-årsskred i Store Buskreda viser at skredet i stor grad vil treffe den sørlige delen av plogvollen med begrenset avsetning langs den nordlige delen. Mer snø går over plogvollen i treffpunktet enn på 20-årsskredene, men mesteparten går fremdeles over i nedre del av vollmagasinets sørlige del. Også et 100-årsskred treffer plogvollen med liten avbøyingsvinkel.

Det er større forskjell mellom DTM_{dGPS} og DTM_{drone} for 100-årsskred. Som man ser på Figur 57a og b går mer snø over vollen for DTM_{dGPS} . Dette kommer tydeligst fram langs den sørlige

delen av vollkronen ved skredets treffpunkt. Snøen som går over her vil ha liten innvirkning på våre resultater, siden snøen ikke når veien i simuleringen. Videre er det minimal forskjell på de to modellene med hensyn til trykk og flyte høyde på veien, bortsett fra at veistrekningen truffet av skred for DTM_{dGPS} er noe lengre enn for DTM_{drone} .

Sammenlignet med $DTM_{utenvoll}$ vil antall meter vei som blir truffet av skred reduseres fra 250 meter til 150-160 meter, flyte høyden på veien reduseres fra 3,5 meter til ~2 meter og trykket på veien reduseres fra 110 kPa til 40 kPa (se Tabell 7 og Tabell 8).

5.5.3. Resultat Vetle Buskreda

Verdiene fra simuleringene av snøskred i Vetle Buskreda er presentert i Tabell 9.

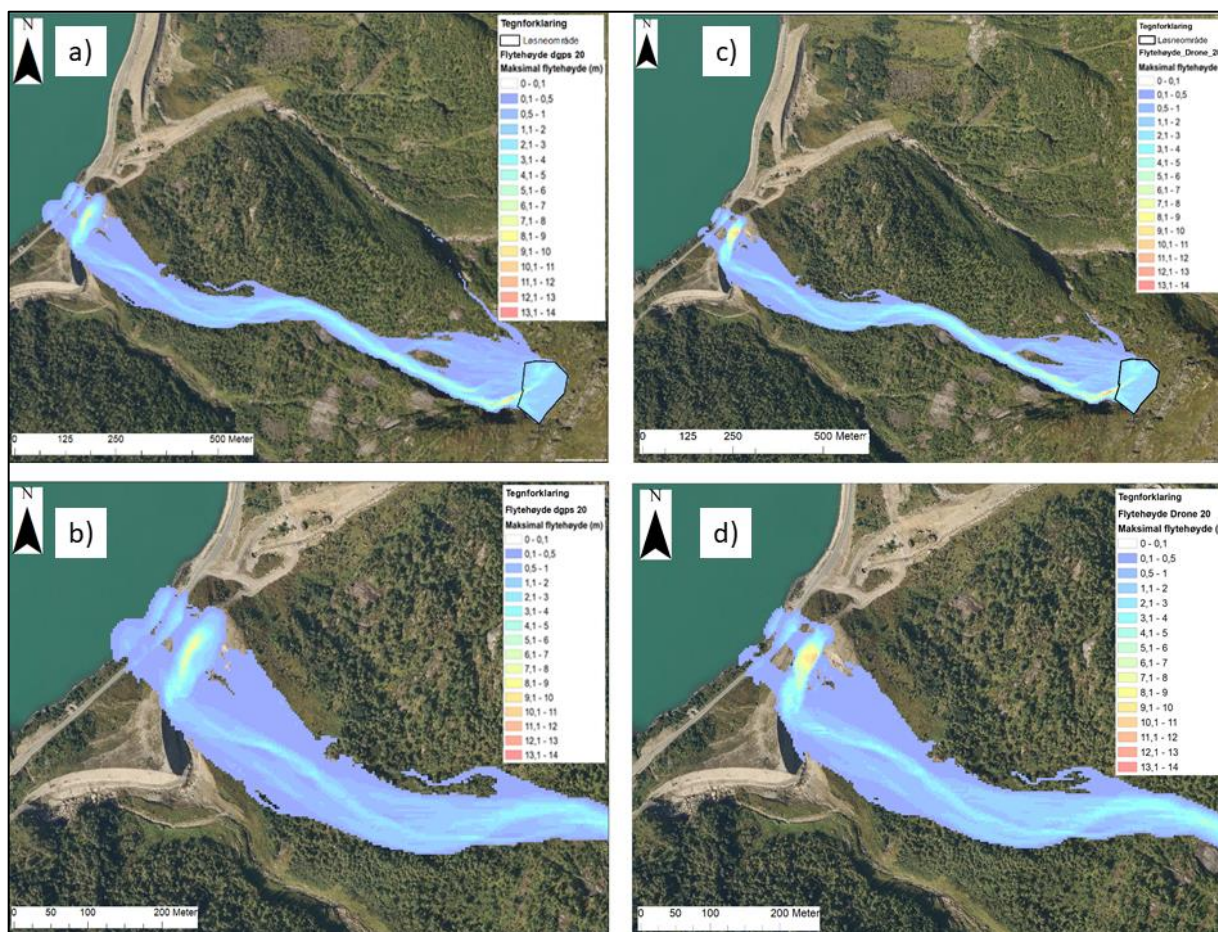
Tabell 9 - Verdier fra simuleringer av Vetle Buskreda.

Vetle Buskreda	DTM	Meter vei truffet av skred	Maksimal flyte høyde på veien i meter	Maksimalt trykk utøvd på veien i kPa	Maksimalt trykk utøvd på vollen i kPa
20-årsskred	Drone	120	2	10	90
	dGPS	125	2	40	110
100-årsskred	Drone	120	2	30	130
	dGPS	130	3	50	120

20-årsskred Vetle Buskreda

Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 9 og Figur 58. Større figurer av simuleringene med trykk og flyte høyde vises i Vedlegg 2 – Simulering 8 og 9.

I simuleringene for 20-årsskred i Vetle Buskreda treffer skredene den nordlige delen av plogvollen med stor avbøgingsvinkel (se Figur 58). I begge modellene deles skredet i to når det treffer vollen, hvor en del går over ved treffpunktet og en del går over i magasinets nordlige ende (se Figur 58b og d). Det er liten forskjell mellom DTM_{dGPS} og DTM_{drone} i hvor mye av veien som blir truffet av skred og flyte høyden på veien (se Tabell 9). Trykkforskjellen utøvd på veien mellom de to er allikevel stor, med 10 kPa for DTM_{drone} og 40 kPa for DTM_{dGPS} .



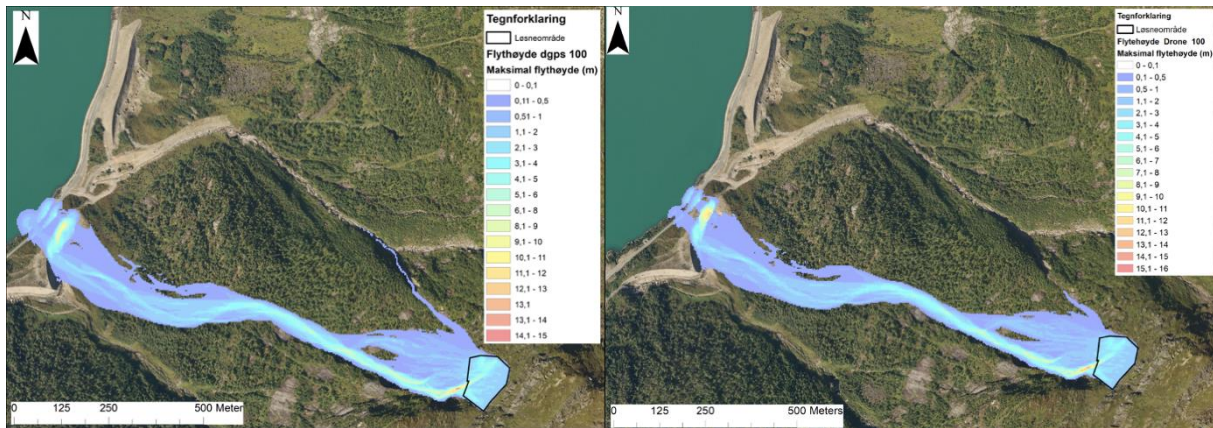
Figur 58 - Simuleringer av 20-årsskred i Vetle Buskreda. a) viser DTM_{dGPS} , b) viser DTM_{dGPS} med fokus på vollområdet, c) viser DTM_{drone} og d) viser DTM_{drone} med fokus på vollområdet.

Både i DTM_{drone} og DTM_{dGPS} er det redusert flytehyde og trykk på veien sammenlignet med $DTM_{utenvoll}$. Flytehyden reduseres fra 2,5 meter for $DTM_{utenvoll}$ til 2 meter for DTM_{drone} og DTM_{dGPS} . Trykket som utøves på veien reduseres fra maksimalt 80 kPa til 10 kPa for DTM_{drone} og 40 kPa for DTM_{dGPS} (se Tabell 7 og Tabell 9).

100-årsskred Vetle Buskreda

Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 9 og Figur 59. Større figurer av simuleringene med trykk og flytehyde vises i Vedlegg 2 – Simulering 11 og 12.

For DTM_{drone} og DTM_{dGPS} vil et 100-årsskred treffe midt på den nordlige delen av vollen, med stor avbøyingsvinkel (se Figur 59). Her deles skredet, som for 20-årsskredene i to, med en del som går over vollkronen i treffpunktet og en del som ledes av vollen og går over i enden av det nordlige magasinet.



Figur 59 – Simuleringer av 100-årsskred i Vetle Buskreda. a) viser DTM_{dGPS} og b) viser DTM_{drone} .

Det er noe forskjell mellom simuleringene. I simuleringen med DTM_{drone} vil 120 meter av veien være dekket av snø, med en flyte høyde på maksimalt 2 meter og veien treffes med et trykk på opptil 30 kPa. For simuleringen med DTM_{dGPS} vil 130 meter av veien være dekket av snø. Maksimal flyte høyde vil være 3 meter, og skredet vil treffe veien med et trykk på opptil 50 kPa (se Tabell 9).

I både DTM_{drone} og DTM_{dGPS} er antall meter vei truffet av skred omtrent det samme som i simuleringen med $DTM_{utenvoll}$. Men trykket utøvd på veien reduseres betraktelig, fra 110 kPa for $DTM_{utenvoll}$ til 30 kPa for DTM_{drone} og 50 kPa for DTM_{dGPS} . For DTM_{drone} reduseres flyte høyden med 1 meter og for DTM_{dGPS} er flyte høyden på veien den samme som i $DTM_{utenvoll}$.

5.5.4. Resultat Linnskreda

Verdiene fra simuleringene av snøskred i Linnskreda er presentert i Tabell 10.

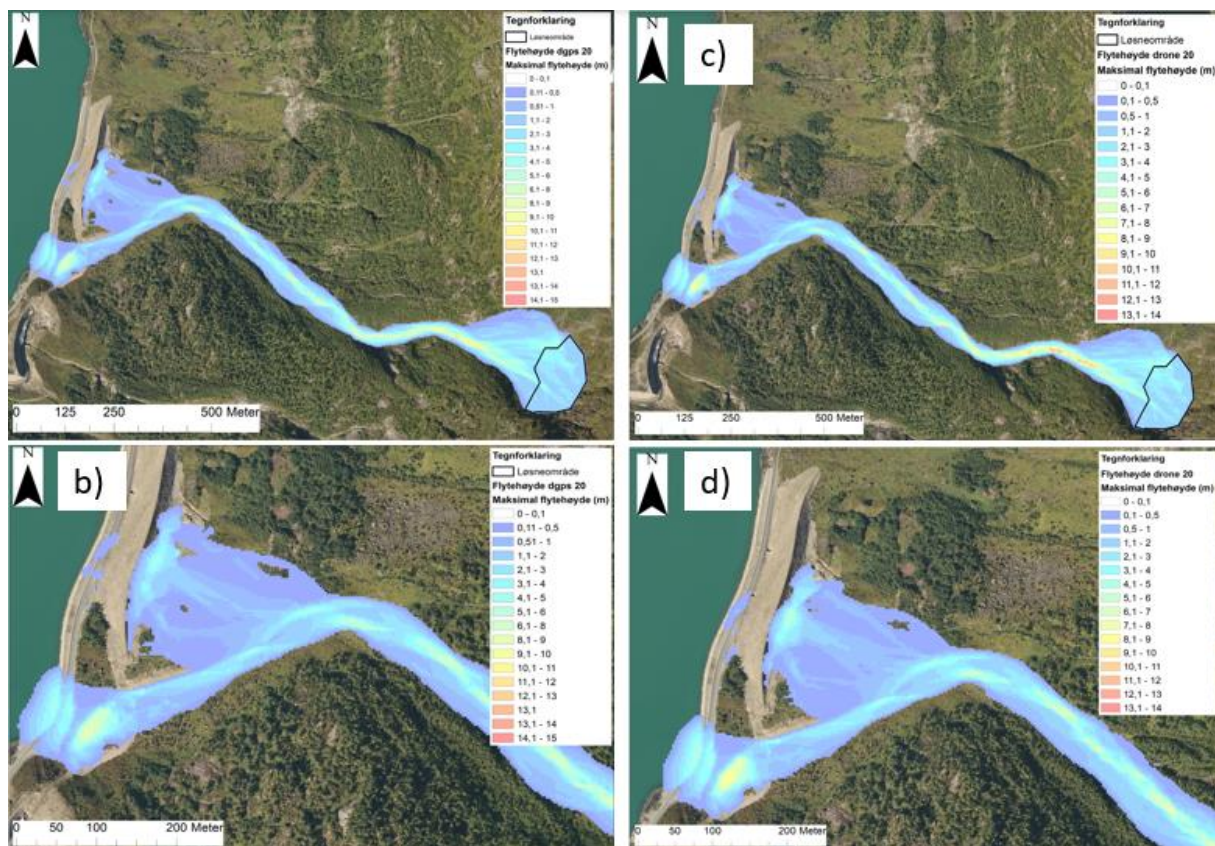
Tabell 10 - Verdier fra simuleringer av Linnskreda.

Linnskreda	DTM	Meter vei truffet av skred	Maksimal flyte høyde på veien i meter	Maksimalt trykk utøvd på veien i kPa	Maksimalt trykk utøvd på fang-/ledevollen i kPa
20-årsskred	Drone	100	3,7	20	50 150
	dGPS	110	3,5	25	60 160
100-årsskred	Drone	200	4,5	20	75 190
	dGPS	240	4,5	30	70 180

20-årsskred Linnskreda

Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 10 og Figur 60. Større figurer av simuleringene med trykk og flytehode vises i Vedlegg 2 – Simulering 14 og 15.

Simuleringene av 20-årsskred i Linnskreda viser at deler av skredet vil ledes langsmed ledevollen og avsettes i magasinet (se Figur 60). Veien blir i hovedsak truffet av skredmasser som går over enden av ledevollen. Noe av skredmassene vil også gå over vollkronen på ledevollen, slik at snøen treffer fangvollen. Det meste av snøen som treffer fangvollen avsettes i magasinet og små mengder treffer veien.



Figur 60 – Simuleringer av 20-årsskred i Linnskreda. a) viser DTM_{dGPS} , b) viser DTM_{dGPS} med fokus på vollområdet, c) viser DTM_{drone} og d) viser DTM_{drone} med fokus på vollområdet.

For 20-årsskred i Linnskreda er det minimal forskjell i flytehode og trykk på veien for DTM_{dGPS} og DTM_{drone} (se Figur 60b og d og Tabell 10). I tillegg er det liten forskjell i antall meter av veien som er truffet av skred for de to terrengmodellene.

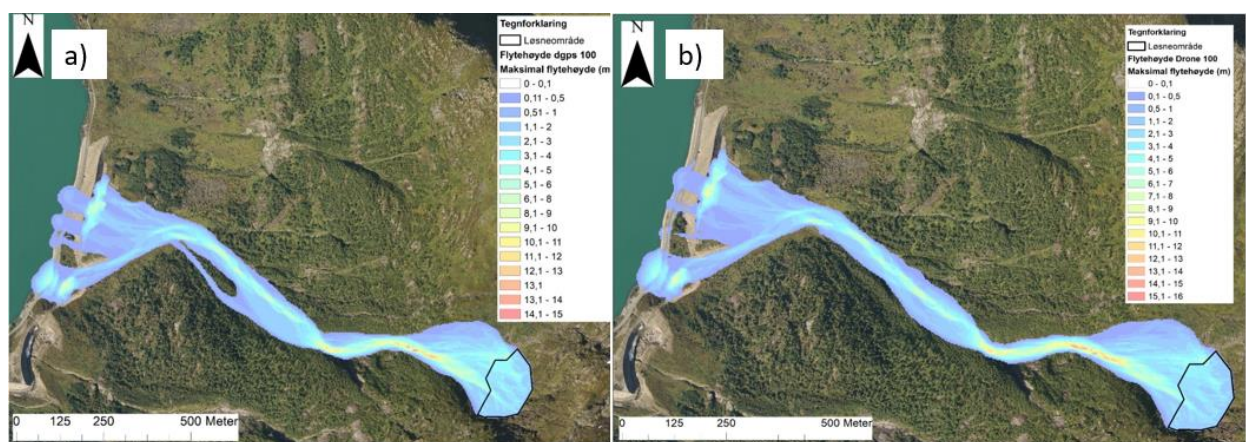
I simuleringene reduseres skredtrykket som treffer veien 70 kPa for $DTM_{utenvoll}$ til henholdsvis 20 kPa for DTM_{drone} og 25 kPa for DTM_{dGPS} . Antall meter vei som blir truffet av skred

reduseres fra 330 meter til 100-110 meter, samtidig som maksimal flyte høyde på veien reduseres fra 4 meter til 3,5-3,7 meter (se Tabell 7 og Tabell 10).

100-årsskred Linnskreda

Dataene fra disse simuleringene presenteres i Tabell 10 og Figur 61. Større figurer av simuleringene med trykk og flyte høyde vises i Vedlegg 2 – Simulering 17 og 18.

Simuleringene våre av 100-årsskred i Linnskreda viser at store deler av skredet vil gå over ledevollen mot fangvollen. En del skredmasser vil også gå over vollkronen til fangvollen og avsettes i veien. Det er størst flyte høyde og høyest trykk på veien ved enden av ledevollen (se Figur 61 og Tabell 10).



Figur 61 - Simuleringer av 100-årsskred i Linnskreda. a) er DTM_{dGPS} og b) er DTM_{drone} .

Det er større forskjell mellom DTM_{dGPS} og DTM_{drone} for 100-årsskred enn for 20-årsskred. For DTM_{dGPS} vil en større del av skredmassen gå over fangvollen, slik at mer av veien blir truffet av snø (se Figur 61a).

Flyte høyden på veien reduseres ikke for DTM_{drone} og DTM_{dGPS} i forhold til $DTM_{utenvoll}$ (se Tabell 7 og Tabell 10). Som for 20-årsskredet reduseres trykket betraktelig fra maksimalt 80 kPa for $DTM_{utenvoll}$, til 20 kPa for DTM_{drone} og 30 kPa for DTM_{dGPS} . Antall meter med vei som blir truffet av skred reduseres fra 330 meter til 200 meter for DTM_{drone} og 240 meter for DTM_{dGPS} .

5.5.5. 1000-årsskred

I tillegg til å gjennomføre 20- og 100-årsskredsimuleringer ble det også gjennomført en 1000-årsskredsimulering for hver terrengmodell for å virkelig teste vollene, se Vedlegg 2 – simulering 19, 20 og 21. Siden RAMMS ikke har variable friksjonsverdier for skred med

returperiode 1000 år, ble det brukt friksjonsparametere for 300-årsskred. Bruddkanten er basert på 1000-års returperiode for mm nedbør i Veitastrond.

Her ser man at vollene kommer til kort for å stoppe skredmassene, men at de både leder skredene og reduserer trykket betraktelig også for 1000-årsskred. For $DTM_{utenvoll}$ er trykket i veibanen opptil 200 kPa, mens det for både DTM_{drone} og DTM_{dGPS} maksimalt er 100 kPa.

6. Diskusjon

Oppgavens mål er å vurdere hvilken målemetode av dronefotogrammetri og differensial GPS som gir best terrengmodell for bruk i skredsimuleringsverktøyet RAMMS::Avalanche. I tillegg skal vi vurdere om fangvollen og ledevollen ved Linnskreda og plogvollen ved Buskreda langs fylkesvei 337 til Veitastrand er korrekt dimensjonert med tanke på beskyttelse mot skred som truer veinettet.

6.1. Terrengmodeller og målemetoder

6.1.1. *1.i. Gir differensial GPS eller dronefotogrammetri den mest presise gjengivelsen av skredvollene i terrengmodellen?*

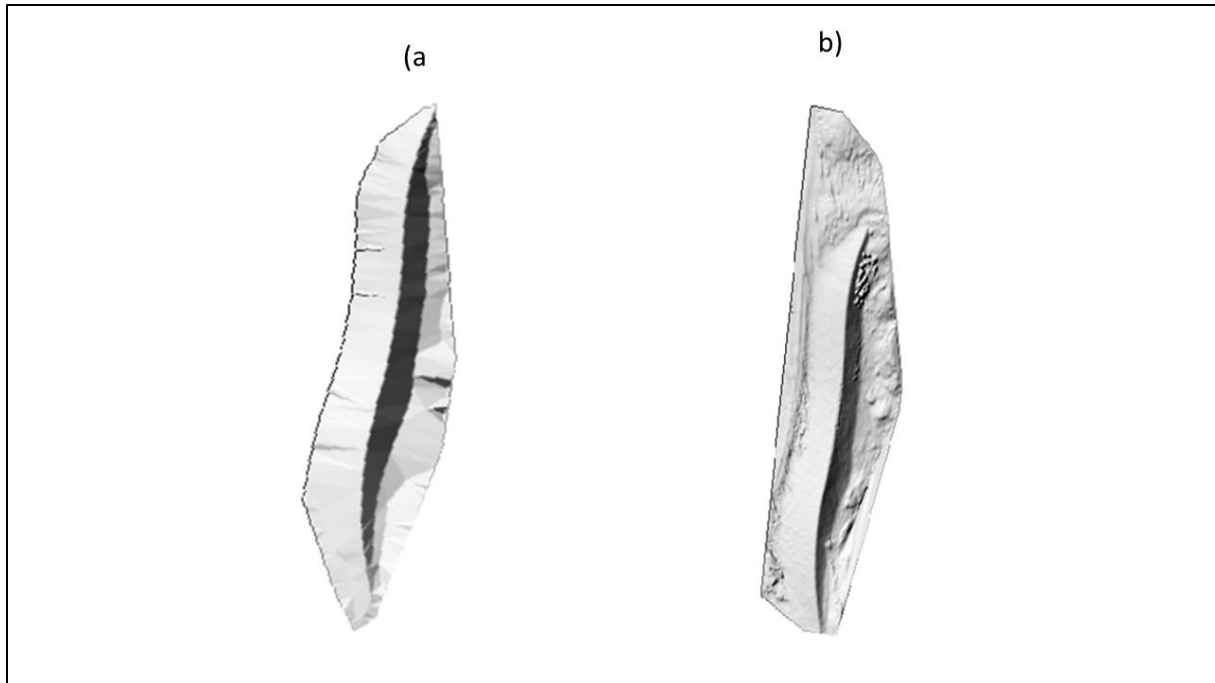
For å vurdere problemstilling *1.i.* trekkes først volumforskjellen mellom dGPS- og drone-modellene inn. Forskjellen ble utregnet fra $DTM_{\text{grunnkart}}$ (se 4.5) for å gi oss en konkret sammenligning av tilført massevolum mellom vollene i DTM_{drone} og DTM_{dGPS} . Det kommer fram at det er forskjell mellom vollene i Tabell 6 (se 5.3). Linnskreda-fangvollen har omtrent 20 000 m³ større tilført massevolum basert på DTM_{drone} sammenlignet med DTM_{dGPS} . For Buskreda-plogvollen gir DTM_{drone} omtrent 7000 m³ større tilført massevolum enn DTM_{dGPS} . Denne forskjellen kan ha ulike årsaker.

Snø kan ha gitt utslag i volumet til DTM_{drone} , siden det lå ca. 25 cm snø over terrenget da datainnsamlingen ble gjennomført. Målt i ArcMap er omtrentlig overflateareal til Linnskreda-fangvollen 15 800 m², noe som grovt regnet gir 4 000 m³ snø på vollen. Dette gir utslag i totalvolum til vollene, da snødekket vil bli inkludert i terrengmodellen til dronefotogrammetrien. Det forklarer allikevel ikke hele volumforskjellen (se Tabell 6).

Vegetasjon kan også gjøre at vollvolumet for DTM_{drone} overestimeres, da den vil inkluderes i terrengmodellen laget i Metashape. Dette gjelder særlig større elementer, slik som trær. Vollene er forholdsvis nylig bygget, slik at det er lite vegetasjon på dem, men noe busker og småskog er til stede. Dette kan være med å forklare deler av forskjellene i volumet til DTM_{drone} og DTM_{dGPS} , men det er vanskelig å estimere hvor mye det utgjør.

På den andre siden, blir volumet sannsynligvis underestimert i DTM_{dGPS} , siden den er konstruert utfra rette linjer mellom målepunktene ved interpolasjon. Dette resulterer i Delauney-trekanter (se 4.4.3) som gjør at terrenget gattes ut. For å minimere denne feilen og

få detaljnivå nærmere DTM_{drone} for DTM_{dGPS} , måtte vi hatt en høyere tetthet av målepunkt. DTM_{drone} har betydelig større punkttetthet, noe som gir utslag i overflatens detaljnivå, som videre kan påvirke volumet. Se Figur 62 for detaljforskjell.



Figur 62 – Viser Linnskreda-fangvollen. a) dGPS-modell til venstre og b) dronefotogrammetri-modell til høyre. Forskjellen i detaljnivå skyldes en høyere tetthet av datapunkter i dronefotogrammetri-modellen. Det er forskjellig målestokk på figurene.

Det å miste dekningen mellom CPOS-nettverket og dGPS-apparatet vil påvirke presisjonsnivået. Blant annet ved vollfoten i nordre del av magasinet på Buskreda-plogvollen, mistet vi dekningen og gikk kun på GPS. Dette kan ha forårsaket en større unøyaktighet i målingene på Buskreda-plogvollen (se 3.3), og kan forklare noe av den prosentvis høyere forskjellen mellom terrengmodellen for Buskreda enn for Linnskreda.

Høydeverdiene til dronemodellen stemte ikke etter konstruksjonen av modellen i Metashape (se 4.3.4). Denne feilen kan komme av at dronen måler høyden sin med ultralydsensor og GPS. I brukermanualen til dronen fra DJI er det listet opp flere grunner som kan føre til unøyaktigheter i høydemålingene (DJI, 2017). Blant annet er ultralyd sårbar mot overflater som er lydabsorberende, monokrome og reflekterende, slik som snø. Dagen vi var i felt var det snø på bakken, overskyet og litt snø i luften, noe som kan ha vært med å påvirke høydeverdiene slik at de ble feil.

Videre førte dette til at vi måtte georeferere 3D-modellen fra Metashape (se 4.3.4) med dGPS-målepunktene. Dette kan ha ført til deformering av modellene. Dermed kan en endring i

totalvolum oppstå når vollene tvinges til å passe de 25 dGPS-punktene som ble brukt som kontrollpunkter. Med tanke på størrelsen til vollene er nok dette litt få punkter, men på grunn av snøen på bakken var det vanskelig å finne mange tydelige punkt som gikk igjen på flere bilder.

Ved senere anledninger ville det derfor vært lurt å legge ut kontrollpunkter i terrenget ved overflyging med drone, slik at det blir lettere å gjenkjenne riktige punkter og man får økt nøyaktighet (Omland, 2017). I tillegg bør dronebildene tas uten snødekke, da snøen kan glatte ut terrenget, innføre ekstra volum til modellen, samt gjøre fotogrammetri vanskeligere da det vil være færre framtrepende punkter. For øvrig står det i sluttrapporten for utbyggingen av Linnskreda-fangvollen at vollen består anslagsvis av 120 000 m³ tilførte masser (Dyngen, 2017). Derfor er ikke våre estimeringer fra tabell (se Tabell 6) på 134 274 m³ for DTM_{drone} og 111 738 m³ for DTM_{dGPS} usannsynlige estimeringer.

Ved å trekke fra volumet som snødekket og vegetasjonen utgjør i DTM_{drone}, kan det konkluderes med at denne modellen vil være nærmere det reelle volumet til vollene enn DTM_{dGPS}. Under ideelle forhold uten snø og med forbedrede kontrollpunkt vil målemetoden med drone klart vært å foretrekke. Man kan også argumentere for at etter høydekorreksjonene er gjort for DTM_{drone} (se 4.3.4), vil denne modellen være mer nøyaktig enn volumet i sluttrapporten på 120 000 m³.

6.1.2. 1.ii. Hvilken målemetode er mest fordelaktig med tanke på sin kost-nytte-verdi?

Skredvoller har ofte en enkel utforming som krever få målepunkt for å kunne gjengi en god modell med en differensial GPS. På den andre siden er tidsbruken ofte problematisk, da man må gå via hvert punkt. Dette kan også være risikofyllt med tanke på å bevege seg inn i skredfarlig og uframkommelig terreng. Med drone får man dekket store områder på relativt kort tid, og man kan i tillegg plassere seg på trygg avstand og ikke risikere egen sikkerhet under datainnsamling.

Prosesseringen av modellen med differensial GPS gikk fortere i ArcMap enn modellen som ble lagd med dronefotogrammetri. I ArcMap kan man legge inn målepunktene med differensial GPS og kun bruke verktøy i dette programmet fram til en ferdig modell er framstilt. Med dronefotogrammetri må bildene først prosesseres i Metashape, og deretter eksporteres over i ArcMap for videre prosessering. Dette var en mer tidkrevende prosess, men med den rette kompetansen om dronefotogrammetri vil nok tidsbruken reduseres betraktelig.

Etter et raskt internettsøk har vi undersøkt markedsverdien til drone og differensial GPS. Prisen på en drone har gått veldig ned de siste ti årene, og dronen brukt i dette prosjektet har en markedspris på rundt ti tusen norske kroner. Teknologien og brukervennligheten har også blitt betraktelig forbedret på denne tiden. I motsetning koster en profesjonell differensial GPS i dag opp mot hundre tusen norske kroner. Programmene brukt i modelleringen må også kjøpes og de koster en betydelig sum. For dronefotogrammetri må man i tillegg til ArcMap kjøpe Metashape for bildeprosessering. Dette programmet koster i seg selv opp mot ti tusen norske kroner for en lisens.

Med bakgrunn i tidsbruk, samlet kostnad og egensikkerhet vil drone være den målemetoden som er mest fordelaktig til denne typen arbeid.

6.2. Simuleringer og volldimensjonering

6.2.1 2.i. Gir parametervalgene i RAMMS realistiske og troverdige resultater for tørre snøskred?

For å besvare problemstilling 2.i. velger vi å gå igjennom parametervalgene våre steg for steg.

Oppløsningen på terrenngmodellene i RAMMS kan føre til feil i simuleringene da de ikke tar hensyn til hvordan snødekket vil fjerne ujevnheter i terrenget. I våre modeller er det ikke snø på bakken i løsnemrådene og skredbanene. Dette kan løses ved å bruke en terrenngmodell med en lavere oppløsning, da ujevnheter vil forsvinne og terrenget vil ligne et snødekt terrenng. Men dette er igjen problematisk, da vollene vil kunne miste sin opprinnelige dimensjon. Viktige detaljer vil kunne forsvinne og dette kan påvirke resultatet. Vi valgte derfor å bruke en oppløsning på 3 meter som et kompromiss for å bevare dimensjonene til vollene og tilnærmingen til et snødekket terrenng.

RAMMS bruker automatisk innstilte parametere for 10-, 30-, 100- og 300-årsskred (se 3.4). Vi brukte variable friksjonsparametere, noe som er anbefalt av RAMMS, og valgte i den sammenheng størrelsen på skredet og returperiode. Når vi skulle gjennomføre simuleringer for 20-årsskred valgte vi derfor å bruke innstillingene for 30-årsskred i opprettelsen av MuXi-filen (se 4.6.5). Slik får vi et større skredscenario enn hvis vi hadde valgt for 10-årsskred. Vi vurderte det som den beste løsningen da vi på den måten fikk inn en fornuftig margin og kunne være sikre på at vi ikke underestimerte skredene.

Løsneområdene er definerte med bakgrunn i teori og ulike veiledninger (se 4.6.3).

Avgrensingen ble i stor grad valgt utfra terrenghelning mellom 35-50 grader, hvor de største og mest hyppige skredene går (se 3.1.3). Her er områdets evne til å samle snø større enn for brattere områder (se 3.1.1).

Det er mange områder i skredløpene som ligger i gunstig terrenghelning for utløsning av snøskred, og løsneområdene kunne vært plassert flere steder (se Figur 2). McClung & Schaerer (2006) skriver at et lengre skredløp gir større skredhastighet, og siden skredtrykket er avhengig av hastigheten, vil en høyere hastighet gi større skredtrykk (se 3.1.6). Vi har derfor valgt å legge løsneområdene høyt i terrenget.

Noe som kunne styrket og kvalitetssikret vårt valg av løsneområder er mer detaljert informasjon om tidligere skredhendelser innenfor vårt feltområde, og da særlig flakets bredde og bruddhøyde. Siden det blir anbefalt å sette flakets lengde til omtrent 100 høydemeter ned i terrenget, er bredden det vi må vurdere subjektivt. I tillegg kan feil vurdering av snødekkets evne til bruddforplantning gi oss uriktig størrelse på løsneområdet.

Det finnes noe informasjon om utløpslengden til snøskred i området. I 2011 sperret et snøskred i Linnskreda 150 meter av veien. Skredet hadde en snødybde i veien på 5-6 meter, og utløpet gikk langt utover Veitastrondsvatnet (Løset, 2011). I våre simuleringer for 20-årsskred av pre-situasjonen sperret skredet en større lengde av veien, mens flyteøyden var noe mindre (se Tabell 7). Dette viser at valget av løsneområdet for Linnskreda kan være innenfor realistiske grenser.

I et notat fra Statens Vegvesen fra før vollene ble bygget, bekrefter brøytebilsjåføren at skred fra Buskredene som oftest stoppet i veiområdet, og at lite skredmasser gikk i Veitastrondsvatnet (Frækaland, 2011). I våre simuleringer for 20-årsskred av pre-situasjonen går snøskredene noe utover vannet, men ikke langt, slik at størrelsen vurderes som realistisk også for Buskredene (se Figur 54).

Medrivning av snø inkluderes ikke i simuleringer i RAMMS (se 4.6.3), noe som kan føre til kortere utløp enn i realiteten. Skredstørrelsen øker vanligvis på grunn av medrivning av snø (Håland et al., 2015). Derfor ble løsneområdet definert større enn hva som ble ansett som sannsynlig, se 4.6.3. Dette fører til en usikkerhet for løsneområdene våre, da vi kan ha tilført for stort eller for lite areal.

RAMMS klarer ikke nøyaktig å forutse avsetningen av skredmasser på vei ned skredløpet. Målinger viser at massene som er bak skredfronten får en økning i friksjon og derfor en hurtig reduksjon i hastighet. Massene bak vil derfor strekke seg ut og danne en “hale” bak fronten på skredet som avsettes når friksjonen blir høy nok. Dette gjør at høyden på skredet i bunnen muligens blir for stor i forhold til realiteten på grunn av for liten avsetning i skredløpet (SLF/WSL, 2010).

Bruddhøyden ble bestemt ved å analysere klimadata. Prosedyren innebærer flere steg, og er en omfattende prosess som innfører flere usikkerheter (se 4.6.4). Problemet er at det ofte er et begrenset antall meteorologiske målestasjoner, slik at verdiene for feltområdet kan avvike fra målte verdier på værstasjonene, da avstanden mellom dem kan være stor. I tillegg har ikke alle de samme funksjonene og måleinstrumentene, slik at å sammenligne og kvalitetssikre klimadata mellom målestasjonene kan være vanskelig.

Vi brukte to meteorologiske målestasjoner i innhenting av klimadata. Den ene er i Veitastrond og måler nedbør (se 2.4). Dette er nært nok området vårt til at vi vurderer det som sikkert å bruke nedbørsdataene. Den andre værstasjonen er plassert på Spørteggbu i Jostedalen (se 2.4) og måler vindretning og -hastighet. Stasjonen måler dominerende vindretning til å være fra sør-øst mot nord-vest (se Figur 7).

Vind er påvirket av topografi, og spesielt dalfører og ryggformasjoner (McClung & Schaerer, 2006). Det kan derfor være problematisk å bruke en værstasjon som er plassert langt i fra området for å bestemme generell vindretning da topografi fører til en lokal variasjon. Vi vet i tillegg at hovedretningen for nedbørsførende vind er fra sør-vest til vest på Vestlandet sør for Stadt (se 2.4), noe som fører til at store deler av løснеområdene våre ligger i lo.

Egne observasjoner av ryggformasjoner nær vårt område, på Hesten og i Leirdalen, har vist at det dannes skavler i østvendt retning. Dette støtter oppunder vår vurdering av å se bort ifra pålagring av snø ved utregning av bruddhøyde (se 4.6.4). Det å se vekk fra pålagring kan føre til en underestimert av bruddhøyde hvis den lokale vindretningen i perioder gjør at større deler av løśnieområdene ligger i le. Dette kunne vært undersøkt med egne vindmålinger fra løśnieområdene eller direkte observasjon av snøavsetning og skavldannelse. Det ville være naturlig å ta med pålagring hvis dette var tilfellet.

Vi brukte også metoden, som nevnt i veilederen fra NVE, med å legge til høydekorreksjon med 5 cm snø per 100 m høyere beliggenhet (NVE, 2020c). Denne er bestemt etter forhold i Sveits, og vi kan nok stille spørsmål om det er riktig å bruke de samme verdiene i Norge.

En annen og enklere metode for å beregne maksimal bruddhøyde er å bruke skjærstyrken til snøen og gjennomsnittlig terrenghelning i løснеområdet (se 3.1.3; Håland et al., 2015). Dette kunne gitt oss andre simulasjonsresultater. Men denne metoden er veldig forenklet og basert på ren fysikk med få variabler. Man får heller ikke forskjell på 20-årsskred og 100-årsskred i bruddhøyde på denne måten.

En tredje metode for justering av bruddhøyde ble introdusert på RAMMS workshop i 2012 (Nes, V., personlig kommunikasjon, 13. mai 2020; Vedlegg 3). Her beregnes bruddhøyde utfra akkumulert snømengde over tre dager og det legges til høydekorrigering. I tillegg justeres alltid snødybden utfra en terrenghelning på 28 grader. Dette gjøres ved å gange cosinus 28 grader med akkumulert snømengde etter høydekorrigering. Deretter legges pålagring som følge av vindtransport til.

Videre korrigeres snømengden utfra terrenghelningen i området ved å lese av på en graf hvor 28 grader er 1 og brattere helning er tall som går mot 0. Så ganges verdien tilsvarende helningen med snømengden. For eksempel vil en helning på 35 grader gi mindre snømengde enn 28 grader. Hadde vi brukt denne metoden ville bruddhøyden vært lavere, og vi hadde fått andre utfall av simuleringene våre i RAMMS. Sammenlignet med denne metoden ser vi på våre simuleringer som konservative.

I simuleringene ble kohesjonen satt til 0. Desto høyere kohesjonsverdi man har, jo kortere blir utløpet og i tillegg vil høyere kohesjonsverdier gi mindre lateral spredning (Bartelt et al., 2015). Parametervalget ble forsterket da vi kjørte simuleringer med 100 for kohesjon og resultatet var et snøskred som hadde kortere utløp. Dette underbygger vårt valg av kohesjonsverdi, siden vi er interessert i å se verst tenkelig scenario. På den andre siden er det usikkerhet rundt valget, siden det er liten kunnskap innenfor fagområdet for norsk klima (Håland et al., 2015).

Som forventet er det stor forskjell mellom pre-situasjonen og dagens situasjon med voller, men hvilken av terrengmodellene for dagens situasjon som gir det mest troverdige resultatet er et annet spørsmål. Generelt er det lite forskjell mellom simuleringene i RAMMS med DTM_{drone} og DTM_{dGPS} . Forskjellene som forekommer, kan forklares med at vollene i DTM_{drone}

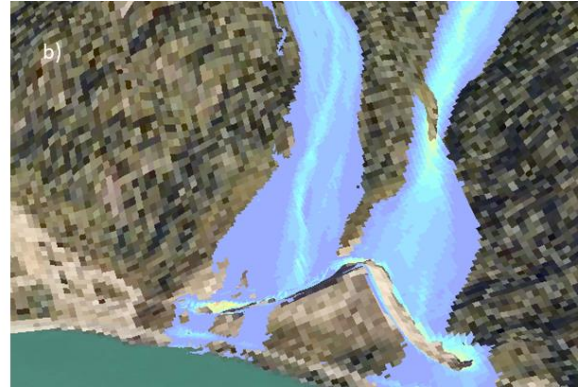
har større volum enn DTM_{dGPS} og at de dermed må være større. Dette kan gjøre at mer snø går over på simuleringene med DTM_{dGPS} enn på DTM_{drone} , og vi ser en gjennomgående trend for dette. I tillegg kan forskjellen i detaljnivå forsterke ulikhetene i resultatet.

En ting som kan trekkes fram er forskjellen for Vetle Buskreda hvor mer masse går over vollen for DTM_{dGPS} enn DTM_{drone} (se Figur 58 og Vedlegg 2 – simulering 8 og 9). Dette kan skyldes at vi mistet dekningen i det nordlige magasinet av plogvollen under innsamlingen av målepunkt. Det kan ha ført til at støtsiden er slakere i DTM_{dGPS} , noe som gjør at skredmassene bremses mindre og mer vil gå over vollkronen.

Simuleringene ble utført med tomme magasiner i RAMMS. I realiteten kan tidligere snøskred ligge i magasinene og redusere magasinvolumet betraktelig. Resultatene kunne derfor blitt annerledes, og mer snø ville trolig ha gått over vollene om vi hadde simulert snøskred med skredmasser fra tidligere skred i magasinene.

I RAMMS har vi også observert forskjeller i skredvolum for simuleringene selv om de har samme løsneområde og bruddhøyde. Det er en gjennomgående trend at DTM_{drone} har større volum enn $DTM_{utenvoll}$ og DTM_{dGPS} (se Vedlegg 1, kolonne 9). Volumforskjellene er vanskelig å forklare siden alle terrengmodellene som blir brukt i simuleringene har samme rasterdata i løsneområdene. Derfor burde skredvolumet vært likt for samme scenario, og hvorfor dette avviket oppstår forblir ukjent for oss. Likevel vurderes det at utslaget på simuleringene er uvesentlig, da avviket utgjør en liten del av det totale skredvolumet.

Oppsummert er det vanskelig å vurdere om våre parametervalg gir reelle resultater i RAMMS for tørre snøskred. Det er utfordrende å gjenskape naturlige forhold uten konkrete sammenligninger fra virkeligheten. Observasjoner i felt 25. mai 2020 gav oss likevel en indikasjon på at skredene følger samme bevegelsesmønster som sett i våre simuleringer, selv om skredene var mindre, hadde kortere utløpsdistanse og stoppet i magasinene (se Figur 63).



Figur 63 - a) er bilde tatt av Buskreda-plogvollen med drone 25. mai 2020, b) er simuleringene av 20-årsskred i Vette Buskreda og Store Buskreda lagt oppå hverandre. Som man ser på figurene, følger særlig skredmassene fra Store Buskreda lignende bevegelsesmønster i simuleringen og i virkeligheten.

6.2.1. 2.ii. Gir vollene tilstrekkelig sikring av veien med hensyn til vollhøyde, magasin størrelse, utforming og plassering?

For å besvare problemstilling 2.ii. brukes bakgrunnskunnskap fra teori om skredvoller sammen med resultatene fra hvert skredløp i RAMMS.

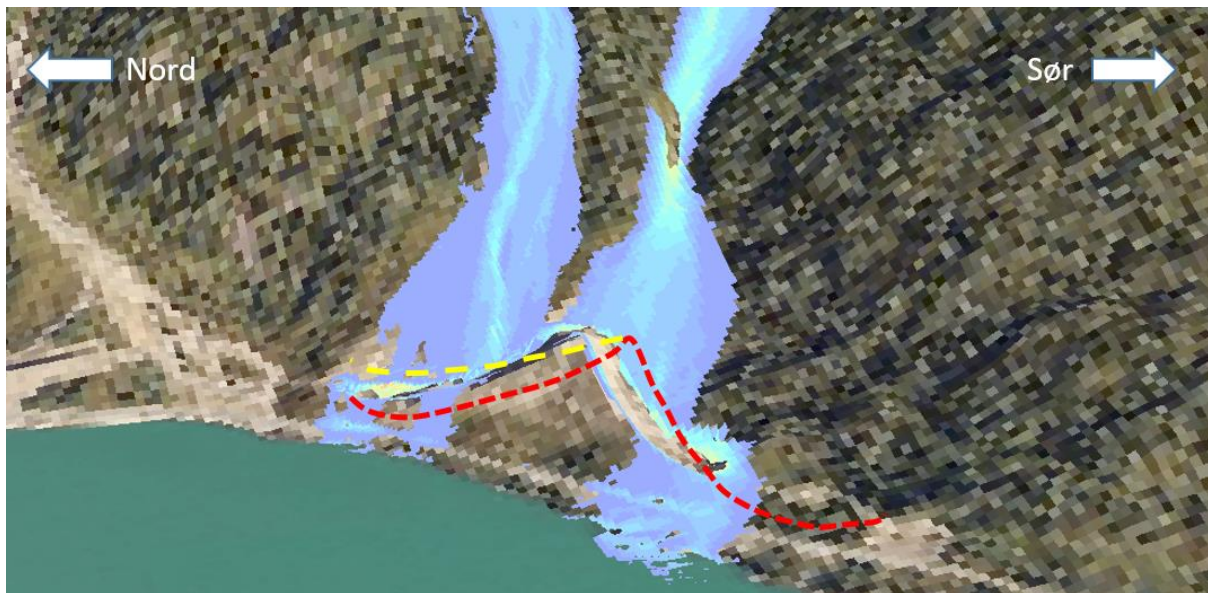
Store Buskreda

I Store Buskreda vil 20- og 100-årsskredene treffe plogvollen med liten avbøyingvinkel (se Figur 56 og Figur 57), slik at vollens evne til å lede skredene videre er god. Dette støttes også av at det i simuleringene for både DTM_{drone} og DTM_{dGPS} omtrent ikke går snø over vollkronen før i nedre del av det sørlige magasinet. Her treffer snømassene fylkesveien for begge terrengmodellene. Siden dette er noe som går igjen både for 20- og 100-årsskred kan det tenktes at dimensjoneringen av vollen her burde vært annerledes. Utløpsdistansen til skred øker når det kanaliseres, slik at en ledevoll vil føre skredet lengre enn om den ikke hadde vært der (Norem, 2014). Dette kan ha bidratt til at snøen går over i enden av vollen.

På den andre siden presiserer Håland (2011) (se 3.2.3) viktigheten av magasinets størrelse og kommenterer at for skred fra Store Buskreda kan vollen være for lav. Denne antagelsen ser ut til å stemme i nedre del av sørlige vollmagasin, og dette er et kritisk punkt på vollen som kommer fram av simuleringene.

Finstad (2016) nevner at plogvollens hensikt er å dele skred fra Store Buskreda i to, for så å lede de videre langsmed vollen. Simulering 2, 3, 5 og 6 (se Vedlegg 2) viser at store deler av skredene vil treffe og ledes langs den sørlige delen av plogspissen, slik at vollen i liten grad deler skredene i to. En løsning kunne vært å flytte vollen sør i terrenget så den bedre deler

skred fra Store Buskreda i to. Om skredmassene deles i to ville muligens magasinene vært store nok til å håndtere skredene fra Store Buskreda. På den andre siden ville magasinet for Vetle Buskreda blitt mindre om ikke vollhøyden justeres sammen med flyttingen av vollen. En forhøyning av nordre ende kunne ha løst dette problemet (se Figur 64).



Figur 64 – Forslag til ny plassering av Buskreda-plogvollen mot sør skissert med rød stiplet linje. Forhøyning av nordre vollende er indikert med gul stiplet linje. Simuleringsdata for flyte høyde av Vetle Buskreda til venstre og Store Buskreda til høyre.

Da vi ikke har grunnlag for å vurdere hvor mye trykk plogvollen tåler, må vi heller vurdere i hvilken grad vollen beskytter fylkesveien. I resultatene for Store Buskreda kan vi se at trykket på veien er redusert til rundt 5-10 kPa for 20-årsskred og 40 kPa for 100-årsskred (se Tabell 8). Dermed vil plogvollen redusere trykket skredet utøver på veien betraktelig for begge scenarier, men det vil likevel bli store skader på kjøretøy (se 3.1.6).

Vetle Buskreda

Skred fra Vetle Buskreda treffer med stor avbøyingsvinkel (50-60°) på den nordre delen av Buskreda-plogvollen (se Figur 58). Vollen mister dermed noe av sin ledefunksjon, og snømasser føres over vollen istedenfor å bli ledet langsmed den. Dette gjør at ledevollen virker mer som en fangvoll. Siden massene går over støtsiden i treffpunktet burde vollen vært høyere for å unngå at skredet finner en passasje forbi. Massene går over støtsiden i samtlige simuleringer fra Vetle Buskreda, både for DTM_{drone} og DTM_{dGPS} . Vollhøyden i dette punktet blir også påpekt som kritisk av Håland (2011).

I tillegg til at skredet går over vollen i treffpunktet, går også snø over i enden av plogvollens nordlige magasin. En faktor kan være at vi har modellert for tørre snøskred, hvorav mindre masse avsettes i magasinet (se 3.2.2). For å forhindre at tørre snøskred går over vollen, burde magasinet vært større her.

Det maksimale trykket et 20-årsskred i Vetle Buskreda utøver på veien er 10 kPa for DTM_{drone} og 40 kPa for DTM_{dGPS} . Trykkforskjellen kan sammenkobles med problemet nevnt tidligere, da vi mistet dekningen med differensial GPS under datainnsamlingen. Om støtsiden for DTM_{dGPS} har blitt slakere i det nordlige magasinet vil skredet miste mindre energi når det går over vollkronen og trykket skredet utøver på veien vil være større.

Med utgangspunkt i simuleringene med DTM_{dGPS} vil stedet der skredet treffer veien være et kritisk punkt for all type trafikk som ferdes, til og med tungtrafikk, da det til sammenligning krever 20 kPa for å velte et tog av skinnene (se 3.1.6). Verdiene for trykk i DTM_{drone} er lavere og vil representere et mer realistisk scenario da modellen anslås som mer presis enn DTM_{dGPS} .

Linnskreda

Ved Linnskreda treffer snøskred øvre del av ledevollen med stor avbøyingsvinkel, rundt 50 grader. Resultatet (se 5.5.4) fra simuleringene 14, 15, 17 og 18 (se Vedlegg 2) viser at massene føres langs støtsiden ned til fylkesveien. I tillegg går masser over vollkronen og ned i magasinet til fangvollen. Det at masser går over støtsiden kan forklares med at vinkelen mellom vollen og skredet er for stor (se 3.2.1). I tillegg kan det begrunnes med at de bakre massene tar igjen de fremre når massene bremses av vollen. De fremre massene vil fungere som en rampe for de bakre massene (se 3.2.1). Dette indikerer at retningsendringen til ledevollen er for brå.

Som følge av at masser ledes langs støtsiden, treffer snø fylkesveien for 20- og 100-årsskred i Linnskreda (se Figur 60 og Figur 61). For et 20-årsskred vil det ligge 3,5-3,7 m med snø på veien (se Tabell 10). Gjennom samtlige simuleringer for Linnskreda kommer det fram at ledevollen ikke klarer å fange opp massene på en tilstrekkelig måte i nedre del. Det kan tenkes at magasinet burde vært større eller at vollhøyden er for lav mot nedre del. Trykket fra snømassene som går over ledevollen er som vist i Tabell 10 høye nok til å forårsake store skader på alle typer kjøretøy (se 3.1.6). Enden av Linnskreda-ledevollen er altså et kritisk punkt når det kommer til snøskred på veien.

For Linnskreda-fangvollen samles det meste av snøen som går over ledevollen opp i magasinet, og plasseringen til fangvollen ansees som god. For 20-årsskred går minimalt med snø over fangvollen, mens for 100-årsskred går opp mot 1 meter snø ned på veien (se Figur 60 og Figur 61). Enten burde denne vollen vært bygd høyere for å sikre mot 100-årsskred eller hatt et større magasin for oppsamling av skredmasser.

6.3. Refleksjoner

Etter arbeid med denne oppgaven har vi kommet inn på diskusjoner om simulering av sørpeskred i Linnskreda burde vært gjennomført i RAMMS::DEBRIS FLOW. I øvre del av Linnskreda er det et vann som kan fungere som startpunkt for sørpeskred. For å ytterligere kvalitetssikre Linnskreda-vollenes dimensjonering burde man i tillegg simulert sørpeskred i dette skredløpet. Dette kan undersøkes nærmere om videre studier av vollenes dimensjonering skulle bli aktuelle.

13.mai 2020 ble vi gjort oppmerksom på at det ble utført en LiDAR-skanning av området i 2019, der terrengmodellen ble publisert 16.april 2020. Prosjektet heter «Delområder Indre Sogn». Denne modellen var ikke tilgjengelig da vi begynte å arbeide med oppgaven. Om modellen hadde vært tilgjengelig tidligere kunne vi ha sammenlignet våre resultater med denne og fått testet DTM_{drone} og DTM_{dGPS} mot en enda mer pålitelig fasit. Dermed ville det vært lettere å finne ut hvilken modell som er nærmest realiteten og vi kunne med større sikkerhet ha vurdert vollenes effekt mot snøskred med en terrengmodell med færre feilkilder.

Konstruksjon av våre terrengmodeller har vært tidkrevende. Om vi hadde hatt tilgang til LiDAR-skanningen fra 2019 ved starten av bachelorperioden kunne fokuset for oppgaven ha vært mer rettet mot bruk av RAMMS og simuleringer av ulike scenarioer. For eksempel kunne det blitt lagt større vekt på at det allerede lå skredmasser i magasinene og at flere løsneområder løsnet samtidig. Mer tid kunne også gått til å teste ulike løsneområder og parameterinnstillinger opp mot hverandre.

For å få den meste presise gjengivelsen av ledevollen i Linnskreda burde vi også her brukt dronefotogrammetri og ikke kun målepunkt fra differensial GPS. Dette ble ikke gjort fordi værforholdene ble for dårlige for dronetryvning utover dagen vi var i felt. I tillegg hadde vi begrenset batterikapasitet, noe som gjorde at vi valgte å prioritere dronefotogrammetri av fangvollen ved Linnskreda og plogvollen ved Buskredene. Vi planla å fullføre dronetryvningen på et senere tidspunkt, men økende snømengder i terrenget utover vinteren ville gjort det vanskelig å få gode nok data.

7. Konklusjon

Målet for denne oppgaven har vært å evaluere tiltak mot skred langs fv. 337 til Veitastrond. Gjennom feltarbeid, konstruksjon av terrengmodeller med differensial GPS og dronefotogrammetri, etterfulgt av simuleringer i RAMMS::Avalanche har vi kommet fram til følgende konklusjoner:

- Dronefotogrammetri gir den mest presise gjengivelsen av skredvollene. Den er mer detaljert, og vil gi den mest naturtro terrengmodellen.
- Ved datainnsamling i felt er drone klart fordelaktig. Drone er mer effektiv, og man slipper å utsette seg for unødvendig risiko ved ferdsel i skredterreng. I tillegg er de samlede kostnadene lavere enn for differensial GPS, noe som gir drone en bedre kost-nytte-verdi.
- Målemetoden har ikke så mye å si for simuleringer i RAMMS, og vi ser ikke tydelige forskjeller mellom terrengmodellene i resultatene. Dette skyldes at vollene er konstruksjoner med store flater som kan gjengis godt med få punkt.
- Det å bestemme realistiske parametere for tørre snøskred i RAMMS er krevende, og det trengs detaljer om lignende skredhendelser fra området, erfaring og mer fagkunnskap for å bestemme dette sikkert. Samtidig viser den begrensede informasjonen vi har at våre parameterinnstillinger gir konservative, men troverdige resultater.
- Utfra våre resultater gir ikke vollene tilstrekkelig sikring mot 20-årsskred på fylkesveien, da snømasser når veien for Store Buskreda, Vetle Buskreda og Linnskreda i samtlige simuleringer for 20-årsskred. Allikevel må disse resultatene i RAMMS sees på som veiledende, og ikke en fasit, da RAMMS ikke er en eksakt gjengivelse av virkeligheten.
- Med utgangspunkt i våre resultater burde Buskreda-plogvollen vært plassert lengre mot sør samt hatt en høyere støtside i nordre del av plogvollen. Linnskreda-ledevollen burde vært høyere i nedre del.

8. Referanser

- Aas, P. (2012). *Vurdering av sikringstiltak mot snøskred*. (Mastergradsavhandling, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet). Hentet fra <http://hdl.handle.net/11250/232215>
- Aasen, J. (2019). *Snøskredulykker vinteren 2018-2019* (Nr. 45/2019). Hentet fra http://publikasjoner.nve.no/rapport/2019/rapport2019_45.pdf
- Agersten, S., Andersen, A. S. H., Berger, A. C., Dyrddal, A. V., Køltzow, M., Tunheim, K. (2019). *Metinfo - Intense byger med store konsekvenser i Sogn og Fjordane 30.juli 2019* (No. 25/2019). Bergen: Meteorologisk institutt.
- Agisoft LLC. (2019). *Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition* (Version 1.5). Hentet 5. Februar 2020 fra https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf.
- Alexander, D. C. (1993). *Natural Disasters* (1. utg.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- American Avalanche Association & National Avalanche Center. (2020). Weak Layer. Hentet fra <https://avalanche.org/avalanche-encyclopedia/weak-layer/>
- Askheim, S. (2020). Veitastrond. *Store norske leksikon*. Hentet 12. mai 2020 fra <https://snl.no/Veitastrond>
- Bartelt, P., Bühler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Salz, M., Schneider, M. & Schumacher, L. (2017). *RAMMS::AVALANCHE User Manual* (v1.7.0). Hentet fra https://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_AVAL_Manual.pdf
- Bartelt, P., Valero, C. V., Feistl, T., Christen, M., Bühler, Y. & Buser, O. (2015). Modelling cohesion in snow avalanche flow. *Journal of Glaciology*, 61(229), 837-850. https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/7AF643C88572BF5F75BC3969A5C87B5D/S0022143000201937a.pdf/modelling_cohesion_in_snow_avalanche_flow.pdf
- Blinken a.s. (2015). GNSS måling i Magnet – Brukerveiledning.
- Brateng, L.E. (2005) *Laboratorieforsøk for utforming av terrengtiltak mot snøskred*. (Mastergradsavhandling). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim.
- Dick, Ø. B. (2018). Fotogrammetri. *Store norske leksikon*. Hentet 5. februar 2020 fra <https://snl.no/fotogrammetri>
- DJI. (2017). Mavic pro: User manual V2.0. Hentet fra <https://dl.djicdn.com/downloads/mavic/20171219/Mavic%20Pro%20User%20Manual%20V2.0.pdf>
- Dyngen, S. (2017). *Sluttrapport: Fv.337 Skredsikring Bjørnabakkane og Lindeskreda*. Leikanger: Statens Vegvesen Region vest

- Esri. (2016a). Mosaic To New Raster. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/data-management-toolbox/mosaic-to-new-raster.htm>
- Esri. (2016b). Bit depth capacity for raster dataset cells. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/bit-depth-capacity-for-raster-dataset-cells.htm>
- Esri. (2016c). Interpolate Shape. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/interpolate-shape.htm>
- Esri. (2016d). Create TIN. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/create-tin.htm>
- Esri. (2016e). Raster bands. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/raster-bands.htm>
- Esri. (2019a). Extract by Mask. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.7/tools/spatial-analyst-toolbox/extract-by-mask.htm>
- Esri. (2019b). Cut Fill. Hentet fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.7/tools/spatial-analyst-toolbox/cut-fill.htm>
- Finstad, B. J. F. (2016, 13. desember). Opnar Veitastrondsvegen. Hentet fra <https://www.moy.vgs.no/opnar-veitastrondsvegen.5916249-336473.html?showtipform=2>
- Forssell, B. (2009). The dangers of GPS/GNSS. *Coordinates*.5(2). 6-8. Hentet fra <https://mycoordinates.org/pdf/feb09.pdf>
- Frækaland, S. H. (2007). *Notat: Fv.337 Veitastrondsvegen, rassikring, forprosjekt, sikringsteknisk og geologisk vurdering*. Leikanger: Statens Vegvesen Region vest
- Frækaland, S. H. (2011) *Notat: Fv337 Buskredene, Veitastrond i Luster, rassikring, reguleringsplan, dimensjon på ledevollar, berekning og geologisk vurdering 36040-460*. Leikanger: Statens Vegvesen Region vest
- Håland, G. (2011). *Notat: Fv337 skredsikring av Buskredene – Vurdering av nødvendig vollhøyde*. Vegdirektoratet
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayr, S., Nesje, A. ... Ådlandsvik, B. (2015). *Klima i Norge 2100: Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015* (No. 2/2015). Hentet fra <https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/klima-i-norge-2100/attachment/10990?ts=159d5ffcfd>
- Hardeng, J & Linge, H. (2019). skred. *Store norske leksikon*. Hentet 4.mai 2020 fra <https://snl.no/skred>

- Høeg, K., Karlsand, K., og Lied, K. (2014). *Skred, skredfare og sikringstiltak*, Oslo: Norges Geotekniske Institutt.
- Issler, D. (2018). *Teknisk notat: Field Survey of the 2017 Rigopiano Avalanche*. Oslo: NGI
- Jaedicke, Christian. (2019). snøskred. *Store norske leksikon*. Hentet 22.mai 2020 fra <https://snl.no/sn%C3%B8skred>
- Jamieson, J.B., Schneebeli, M. & Schweizer, J. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4). <https://doi.org/10.1029/2002RG000123>
- Kartverket. (2020a). Norgeskart. Hentet fra <https://www.norgeskart.no/#!?project=norgeskart&layers=1002&zoom=12&lat=6836131.44&lon=80189.50>
- Kartverket. (2020b). Norge i bilder. Hentet fra <https://www.norgeibilder.no/>
- Kartverket. (2020c). Høydedata. Hentet fra <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/>
- Kartverket. (2019). CPOS. Hentet 14.februar fra <http://kartverket.no/Posisjonstjenester/CPOS/>
- Kristensen, K., Domaas, U., Høydal, Ø., Ekseth K. & Gauer, P. (2015). *Skredfarekartlegging i Luster kommune* (32). Hentet fra http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_32.pdf
- Larsen, B. (2007). *Overflatedeformasjon*. (Mastergradsavhandling, Universitetet i Oslo). Hentet fra <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/12495/forsidesluttbok.pdf?sequence=1>.
- Lied, K. & Kristensen, K. (2003). *Snøskred* (1. utg.). Nesbro: Vett & Viten AS.
- Lome, K. B. (2017). *Evaluering av automatiske snøskredvarslingsanlegg*. (Mastergradsavhandling, Norges arktiske universitet). Hentet fra https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2479261/Masteroppgave_2017_Kristin_Lome.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Løset, O. (2011, 11. februar). Møtt av nytt skred i Veitastrand. *NRK*. Hentet fra <https://www.nrk.no/vestland/mott-av-nytt-skred-i-veitastrand-1.7502977>
- McClung, D. & Schaerer, P. (2006). *The Avalanche Handbook* (3. utg.). Seattle: Mountaineers Books.
- Meteorologisk institutt. (2020). klima. Hentet fra http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39080&_dad=portal&_schema=PORTAL
- NGI. (u.å.). Geofysikk, fjernmåling og GIS - LiDAR. Hentet 16. mai 2020 fra <https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Geofysikk-fjernmaaling-og-GIS/LiDAR>

- NGU. (2020a). Løsmasser: Nasjonal løsmassedatabase. Hentet fra <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>
- NGU. (2020b, 29. januar). Skred. Hentet fra <https://www.ngu.no/emne/skred-0>
- NIBIO. (2020, 13.januar). Kilden: Skogportalen. Hentet fra https://kilden.nibio.no/?lang=nb&topic=skogportal&X=6835800.74&Y=80154.55&zom=9.784895811887125&bgLayer=graatone_cache&layers=veg_naturtypar,ar5_treslag&layers_opacity=0.75,0.75
- NIFS: Håland, G., Orset, I. K., Frekhaug, M. H. & Norem, H. (2015). *Sammenligning av modelleringsverktøy for norske snøskred* (107). Hentet fra http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_107.pdf
- Norem, H. (2014). *Håndbok V138 - Veger og snøskred*. (SSV håndbok Nr. 283). Hentet fra https://www.vegvesen.no/attachment/740624/binary/1003961?fast_title=H%C3%A5ndbok+V138+Veger+og+sn%C3%B8skred.pdf
- NRK. (2013, 26. november). Skredsikring til 17 millionar er ferdig – no kan du køyre tryggare til Veitastrond. *NRK*. Hentet fra <https://www.nrk.no/vestland/skredsikringa-er-ferdig-1.11379327>
- NVE (2020a). NVE Atlas. Hentet fra <https://atlas.nve.no/Html5Viewer/index.html?viewer=nveatlas#>
- NVE. (2020b). NEVINA Nedbørsfelt-Vannføring-Indeks-Analyse. Hentet fra <http://nevina.nve.no/>
- NVE. (2020c, 16. mars). Veileder – Sikkerhet mot skred i bratt terreng – Fase 2: Vurdering av løsneområder og løsnesannsynlighet. Hentet fra <https://www.nve.no/skredfarekartlegging/hvordan-utfore-en-skredfarevurdering/fase-2-utfore-oppdrag/prosedyre-snoskred/fase-2-vurdering-av-losneomrader-og-losnesannsynlighet/>
- NVE. (2017). *Faktaark Skredvær* (06). Hentet fra http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2017/faktaark2017_06.pdf
- NVE. (2019). NEVINA Brukerveiledning. Hentet fra https://nevina.nve.no/help/Brukerveiledning_NEVINA.pdf
- Omland, I. (2017). *Bruk av droneteknologi og fotogrammetri til landmåling for bygge- og anleggsprosjekter*. (Mastergradsavhandling, Universitetet i Stavanger). Hentet fra https://buildingsmart.no/sites/buildingsmart.no/files/2017_uis_master_ingrid_omland.pdf
- Orset, K. I (2017, 15. desember). Produktspesifikasjon for Statens Vegvesen. Hentet fra <http://tfprod1.sintef.no:8080/datakatalog/eksport/produktspesifikasjon-2.14/234.htm>
- Ikeuchi, K. (Red.). (2014). *Photogrammetry: Computer vision* (1. utg.). Tokyo: Springer US.

- Perla, R., Cheng, T. T. & McClung, D. M. (1980). A Two parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26(94), 197-207
- Puschmann, O. (2005). *Nasjonalt referansesystem for landskap: Beskrivelse av Norges 45 landskapsregioner* (10). Ås: Norsk institutt for jord- og skogkartlegging.
- RAMMS User Workshop. (2012). *Application of RAMMS in practice I*. Switzerland: Davos.
- Rød, J.K. (2015). *GIS: Verktøy for å forstå verden*. (1. utg.). Bergen: Fagbokforlaget.
- Selseng, T., Handberg, Ø. N., Hveem, E. B., Bruvoll, A. og Aall, C. (2019). *Morgondagens klimarisiko og kost-nyttevurderingar for veg – testing av to verktøy for Statens vegvesen* (Vestlandsforskningsrapport nr. 12/2019). Hentet fra <https://www.vestforsk.no/sites/default/files/2020-01/Rapport%20RoadAdapt%20VF%20%26%20Menon%20endeleg.pdf> Om klimaendringer og vei
- Senorge. (2020). Klima. Hentet fra <http://www.senorge.no/index.html?p=klima>
- SLF/WSL, (2010a). About RAMMS. Hentet fra: https://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=53
- SLF/WSL, (2010b). What friction models are used in RAMMS? Hentet fra: https://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=74#friction%20models
- Statens Vegvesen. (2019). Skred og nedfall på veg. Hentet 20. januar 2019 fra https://www.vegvesen.no/attachment/1110343/binary/1337825?fast_title=Skredstatistikk+2000%E2%80%932019.pdf Skred og nedfall på veg, registrert per januar 2019
- Statens Vegvesen, Region vest. (2011). *Reguleringsplan: Rassikring av Buskredene*. Hentet fra <https://docplayer.me/8347121-Forord-reguleringsplan-for-rassikring-av-buskredene-langs-fv-337-i-luster-kommune-kart-over-planområdet.html>
- Statens Vegvesen. (2020a). Vegkart. Hentet fra [https://vegkart-2019.atlas.vegvesen.no/#kartlag:geodata/vegreferanse:79029.82513321796:6835477.8578860555/hva:\(~\(farge:'0_1,id:445\)\)/@79151,6835607,17/vegobjekt:121892268:40a744:445](https://vegkart-2019.atlas.vegvesen.no/#kartlag:geodata/vegreferanse:79029.82513321796:6835477.8578860555/hva:(~(farge:'0_1,id:445))/@79151,6835607,17/vegobjekt:121892268:40a744:445)
- Statens vegvesen. (2020b). Vegkart. Hentet fra [https://www.vegvesen.no/nvdb/vegkart/v2/#kartlag:geodata/hva:\(~\(category:\(type:'enum,id:1286\),farge:'0_0,id:234\)\)/@908503,7076781,3](https://www.vegvesen.no/nvdb/vegkart/v2/#kartlag:geodata/hva:(~(category:(type:'enum,id:1286),farge:'0_0,id:234))/@908503,7076781,3) (21.01.2020)
- Statens Vegvesen. (2020c). Vegkart. Hentet fra [https://vegkart-2019.atlas.vegvesen.no/#kartlag:geodata/hva:\(~\(farge:'1_1,id:540\)\)/@79392,6836223,12](https://vegkart-2019.atlas.vegvesen.no/#kartlag:geodata/hva:(~(farge:'1_1,id:540))/@79392,6836223,12)
- Trykk – fysikk. (2019, 31. oktober). I *Store norske leksikon*. Hentet fra https://snl.no/trykk_-_fysikk

Walberg, N. A. K. (2019). *Skredfarevurdering for sjølageret til Sysselemanden* (19224-01-3).

Hentet fra

<https://www.lokalstyre.no/getfile.php/4657424.2046.zztzbbputwjmlj/Beredskapslager+for+Sysselemanden.pdf?fbclid=IwAR23SP8hEXMZMa3wijdt2VcxBESJbDPTMIJRToxkQVQUXxzkr--mS7DlhZ4>

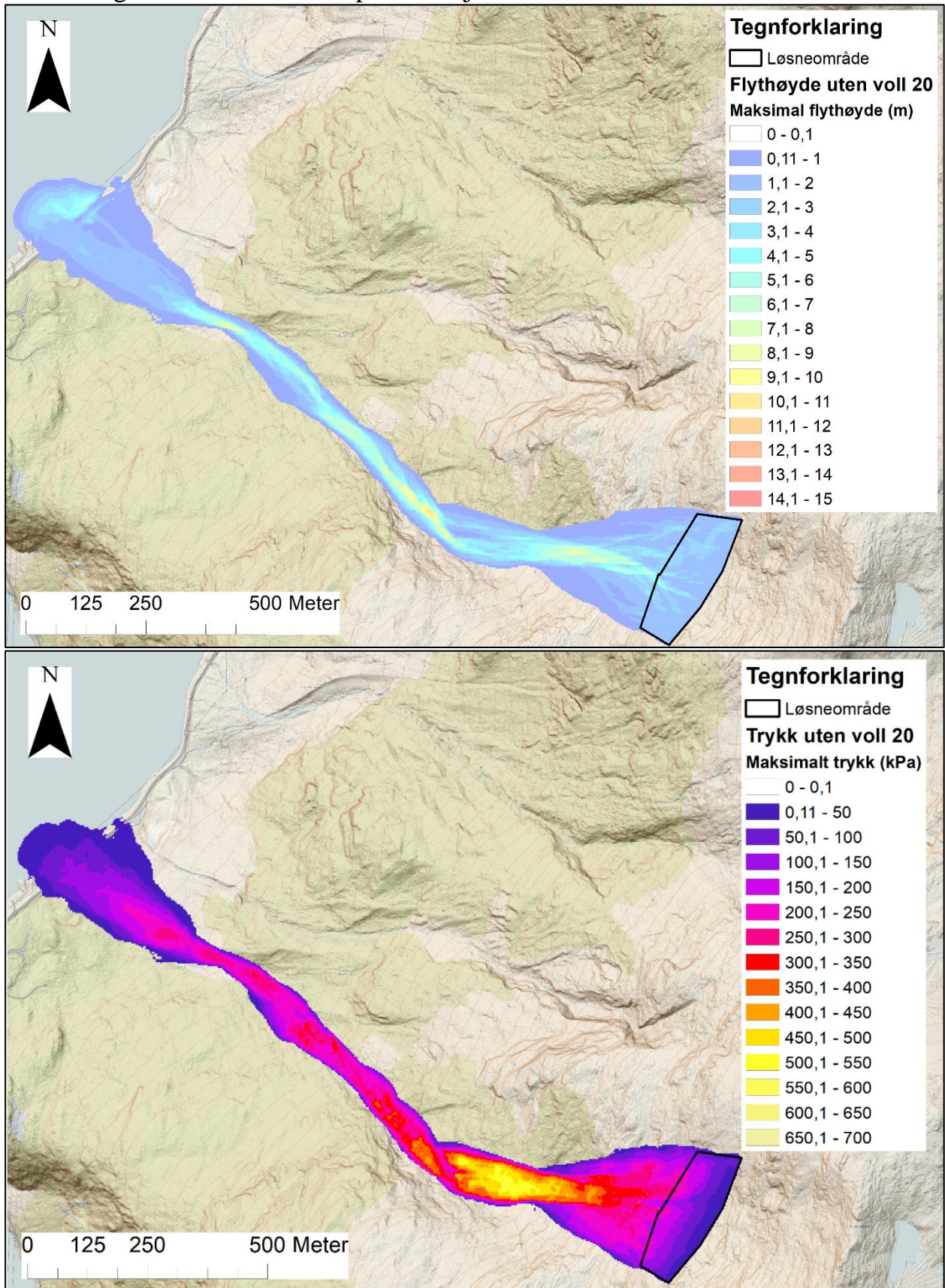
9. Vedlegg

Vedlegg 1 – Parameterinnstillinger

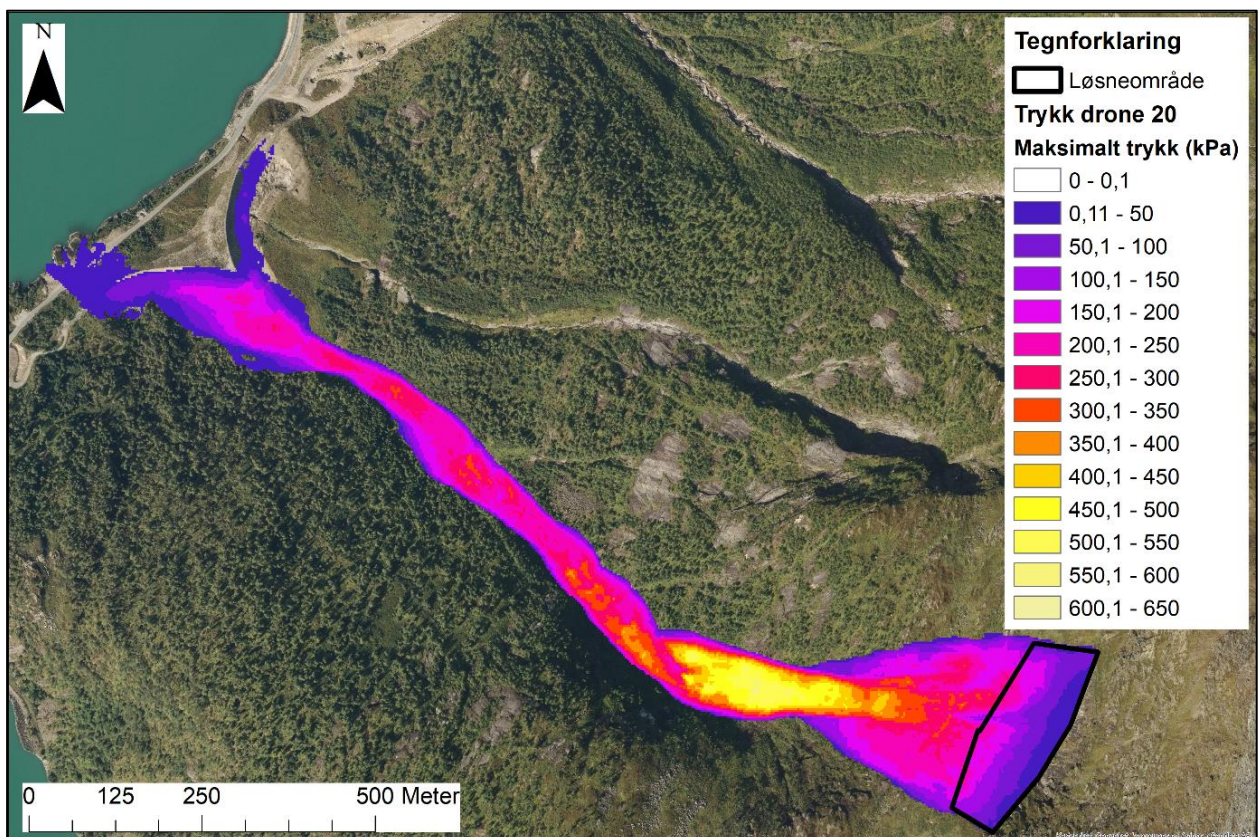
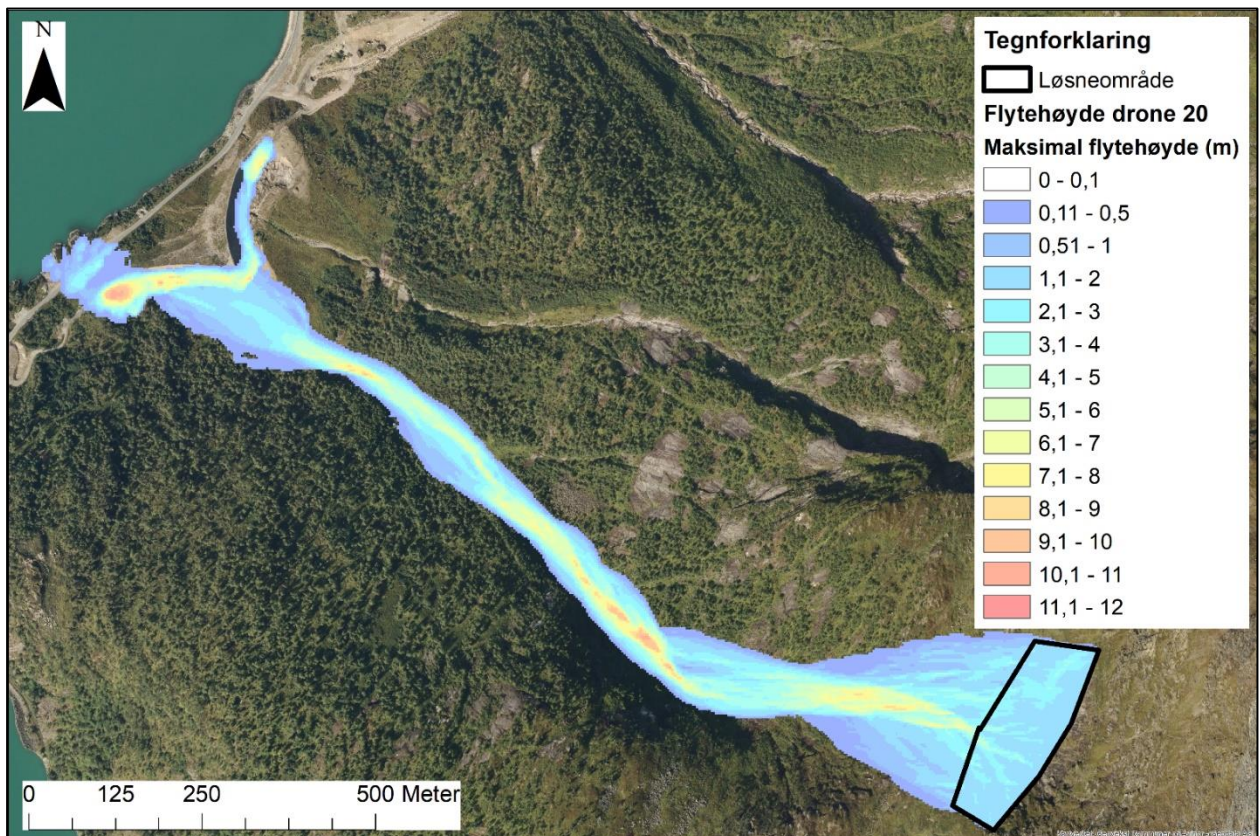
Simulering	Skredløp	Terrengmodell	Helning løsne- område (grader)	Bruddhøyde (m)	Bruddhøyde m/høydejustering (m)	Bruddkanthøyde korrigert for terrenghelning og høydejustering (m)	Returperiode (år)	Volum (m ³)	Størrelse	Lim1, Lim2 (moh.)	Samlet volum (m ³)
1	Store Buskreda	DTM _{utenvoll}	39	1,42	1,87	1,45	20	52952	Medium	1150, 650	
2	Store Buskreda	DTM _{drone}	39	1,42	1,87	1,45	20	53069	Medium	1150, 650	
3	Store Buskreda	DTM _{dGPS}	39	1,42	1,87	1,45	20	52642	Medium	1150, 650	
4	Store Buskreda	DTM _{utenvoll}	39	1,74	2,19	1,7	100	62082	Large	1150, 650	
5	Store Buskreda	DTM _{drone}	39	1,74	2,19	1,7	100	63329	Large	1150, 650	
6	Store Buskreda	DTM _{dGPS}	39	1,74	2,19	1,7	100	62083	Large	1150, 650	
7	Vetle Buskreda	DTM _{utenvoll}	42	1,42	1,87	1,38	20	23903	Small	1150, 650	
8	Vetle Buskreda	DTM _{drone}	42	1,42	1,87	1,38	20	24159	Small	1150, 650	
9	Vetle Buskreda	DTM _{dGPS}	42	1,42	1,87	1,38	20	23906	Small	1150, 650	
10	Vetle Buskreda	DTM _{utenvoll}	42	1,74	2,19	1,62	100	28060	Medium	1150, 650	
11	Vetle Buskreda	DTM _{drone}	42	1,74	2,19	1,62	100	28361	Medium	1150, 650	
12	Vetle Buskreda	DTM _{dGPS}	42	1,74	2,19	1,62	100	27665	Medium	1150, 650	
13	Linnskreda	DTM _{utenvoll}	36	1,42	1,87	1,51	20	37874	Medium	1150, 650	
14	Linnskreda	DTM _{drone}	36	1,42	1,87	1,51	20	38206	Medium	1150, 650	
15	Linnskreda	DTM _{dGPS}	36	1,42	1,87	1,51	20	37586	Medium	1150, 650	
16	Linnskreda	DTM _{utenvoll}	36	1,74	2,19	1,77	100	44395	Medium	1150, 650	
17	Linnskreda	DTM _{drone}	36	1,74	2,19	1,77	100	44784	Medium	1150, 650	
18	Linnskreda	DTM _{dGPS}	36	1,74	2,19	1,77	100	44373	Medium	1150, 650	
19	Store Buskreda	DTM _{dGPS}	39	2,19	2,64	2,05	1000	75549	Large	1150, 650	162900
	Vetle Buskreda		42	2,19	2,64	1,96		33953	Medium		
	Linnskreda		36	2,19	2,64	2,13		53398	Medium		
20	Store Buskreda	DTM _{drone}	39	2,19	2,64	2,05	1000	76367	Large	1150, 650	164573
	Vetle Buskreda		42	2,19	2,64	1,96		34313	Medium		
	Linnskreda		36	2,19	2,64	2,13		53893	Medium		
21	Store Buskreda	DTM _{utenvoll}	39	2,19	2,64	2,05	1000	75557	Large	1150, 650	162931
	Vetle Buskreda		42	2,19	2,64	1,96		33949	Medium		
	Linnskreda		36	2,19	2,64	2,13		53425	Medium		

Vedlegg 2 – 21 simuleringer

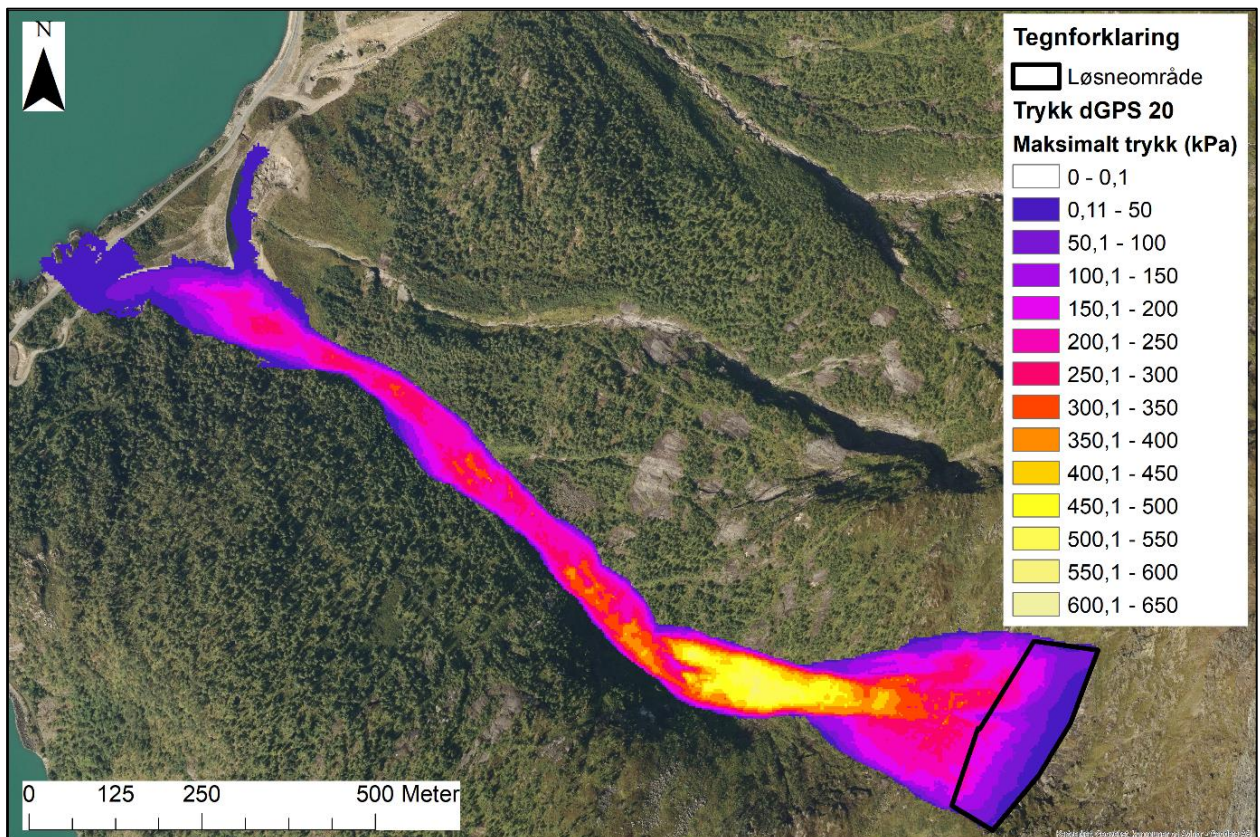
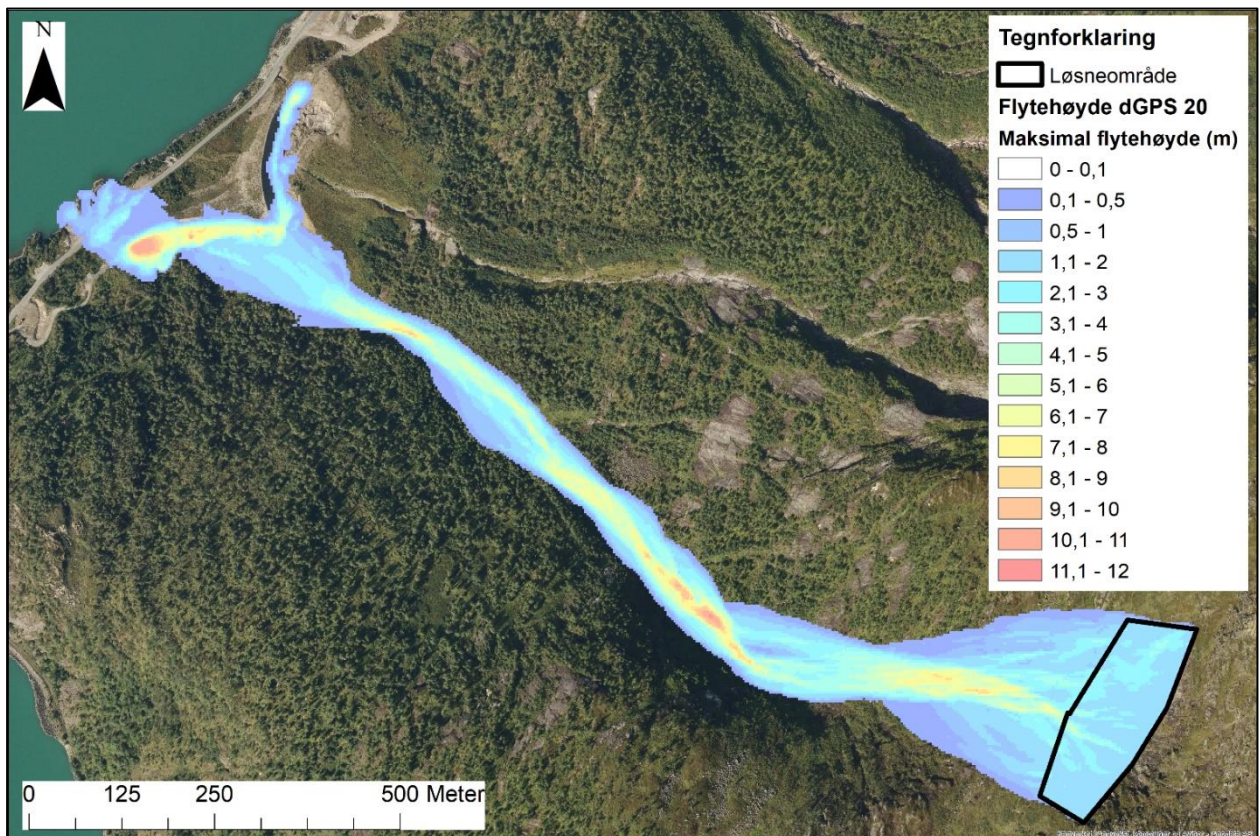
Simulering 1 – Store Buskreda pre-situasjon 20-årsskred



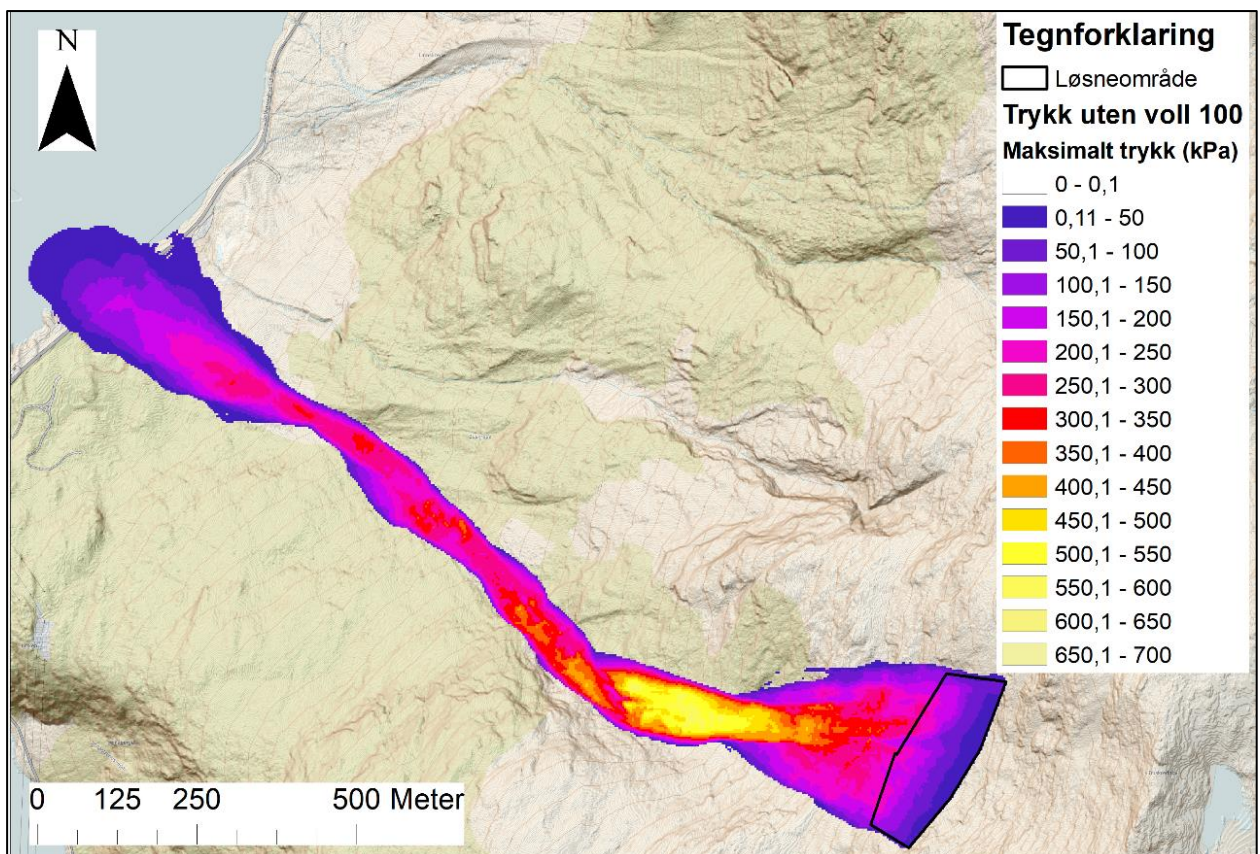
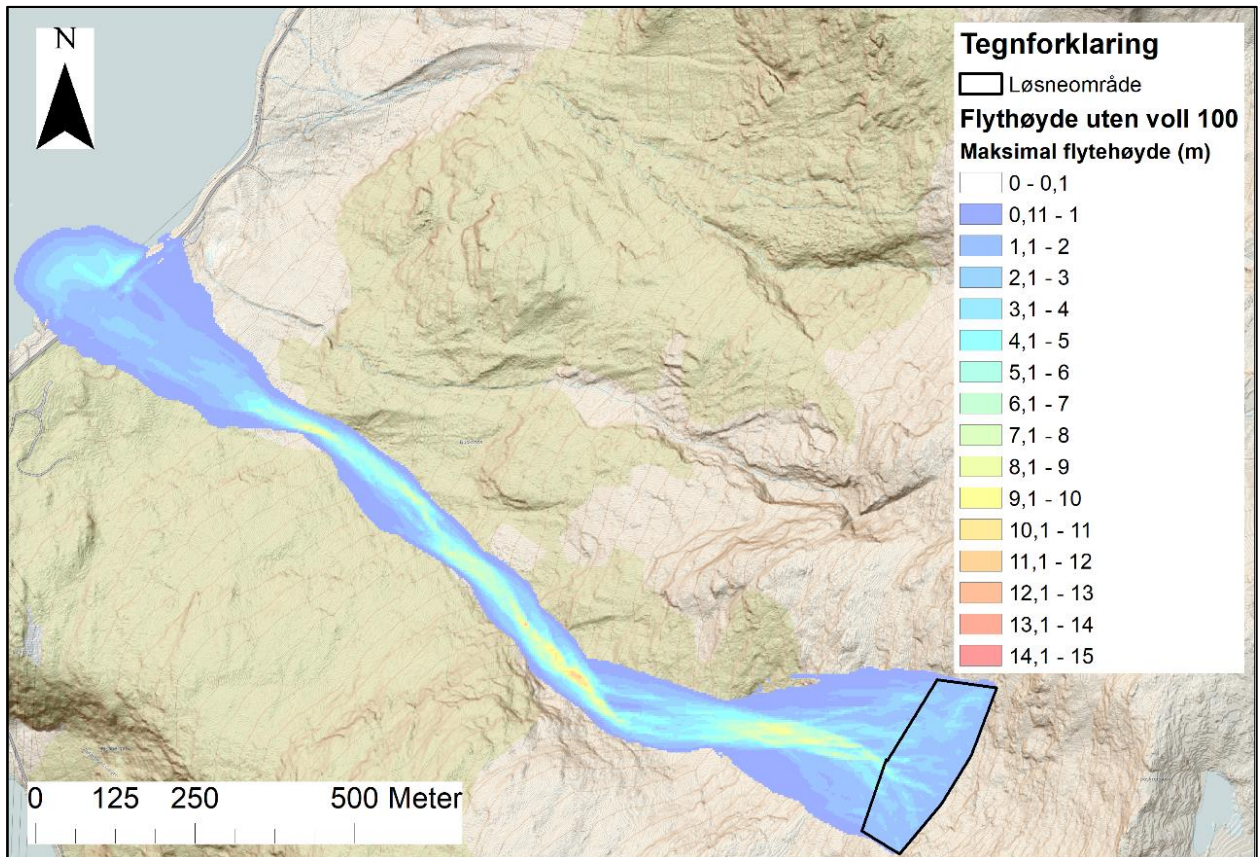
Simulering 2 – Store Buskreda drone 20-årsskred



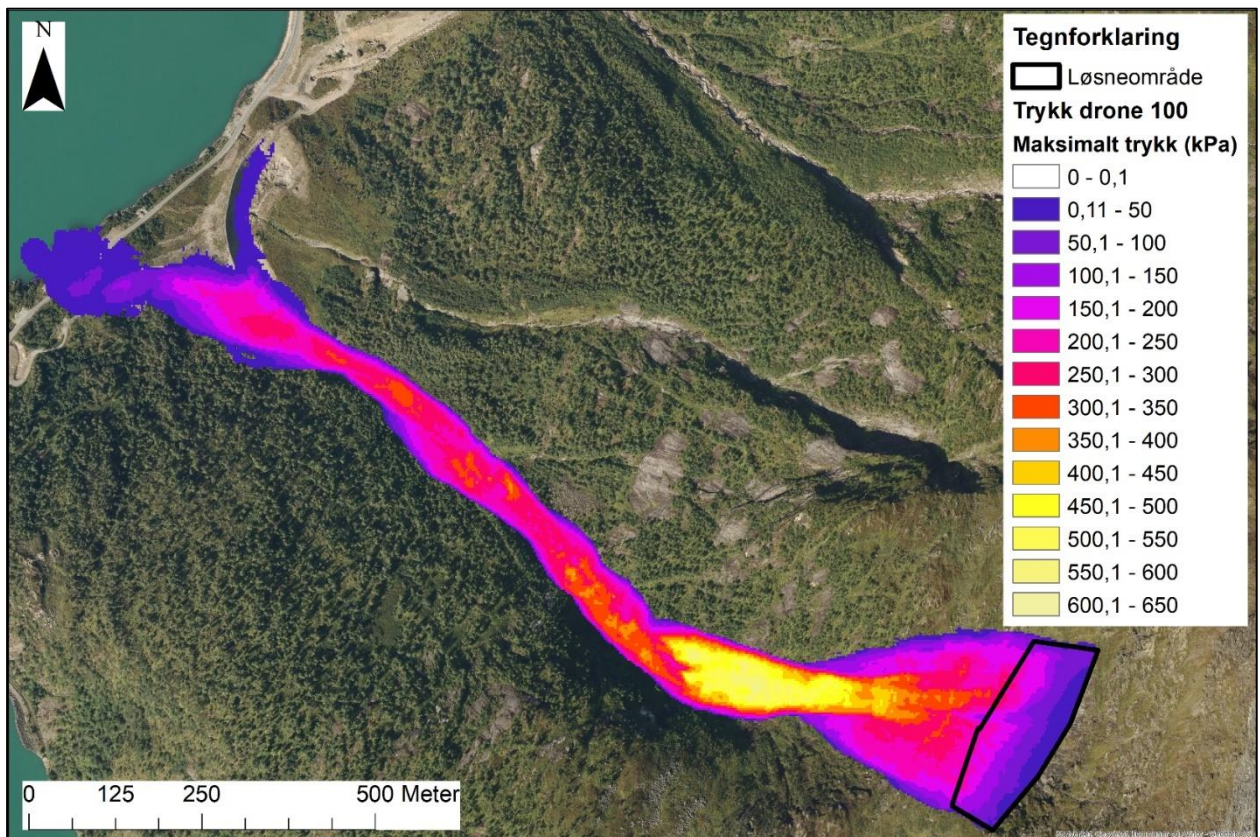
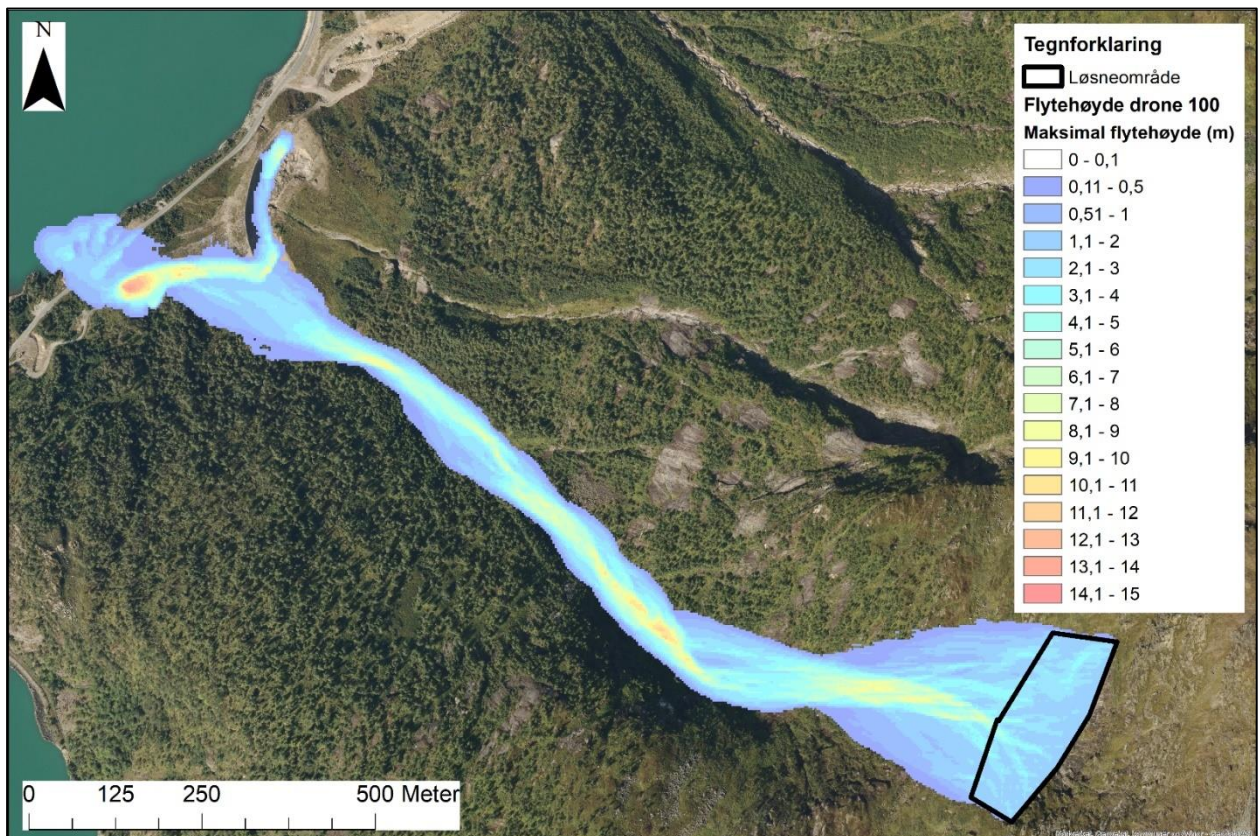
Simulering 3 – Store Buskreda dGPS 20-årsskred



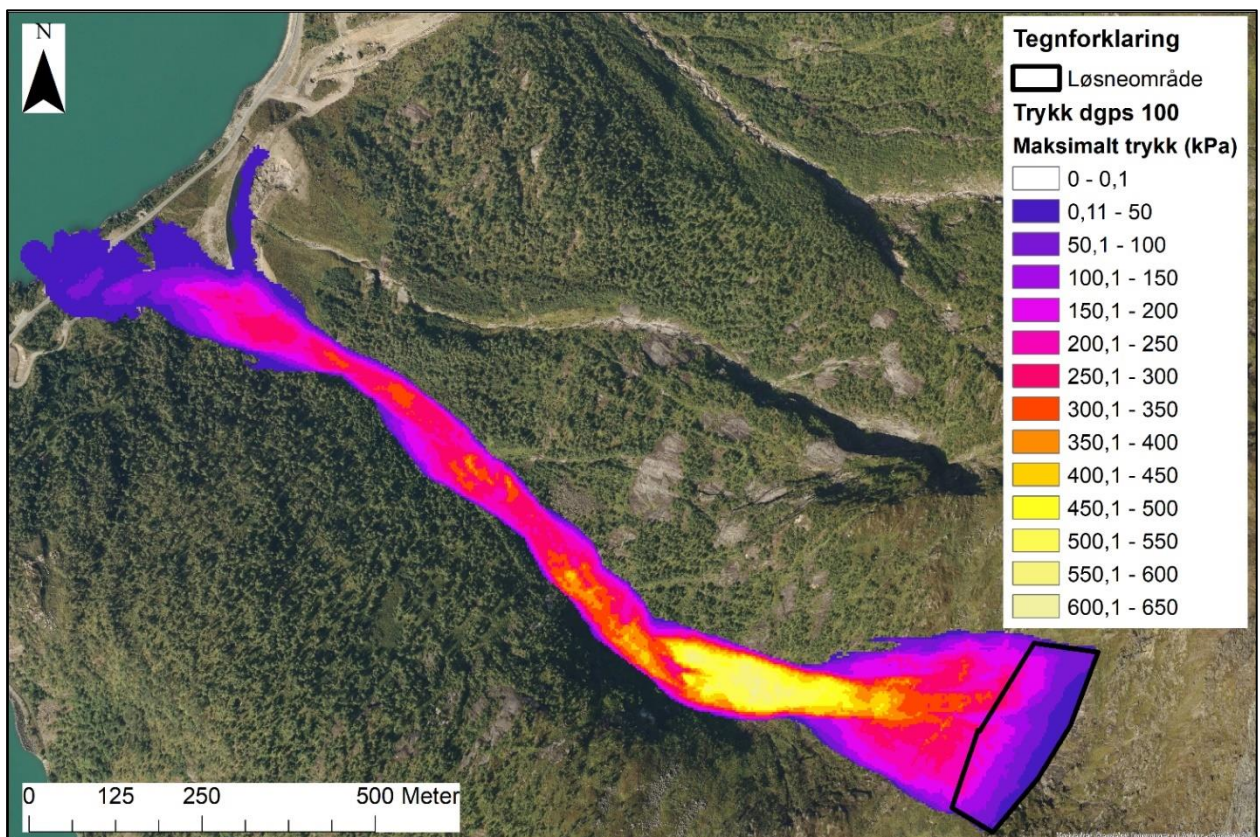
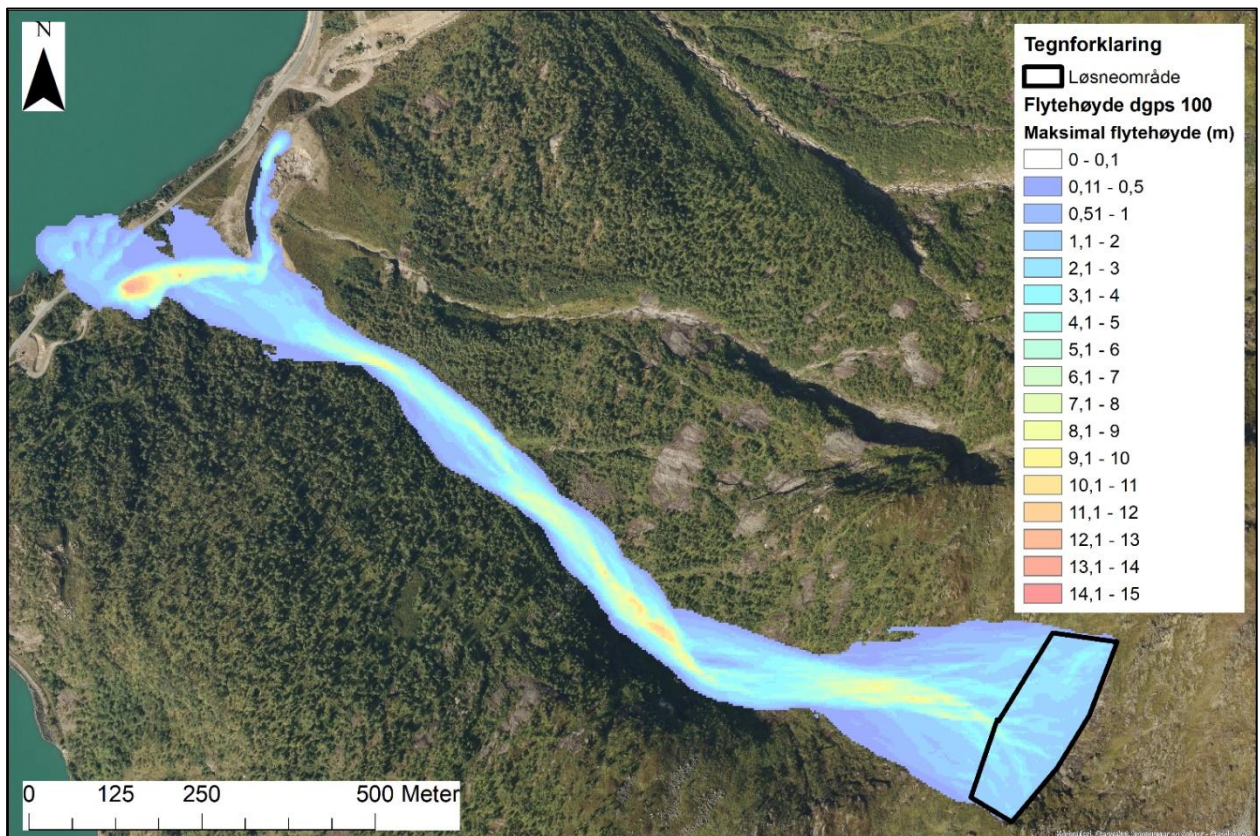
Simulering 4 – Store Buskreda pre-situasjon 100-årsskred



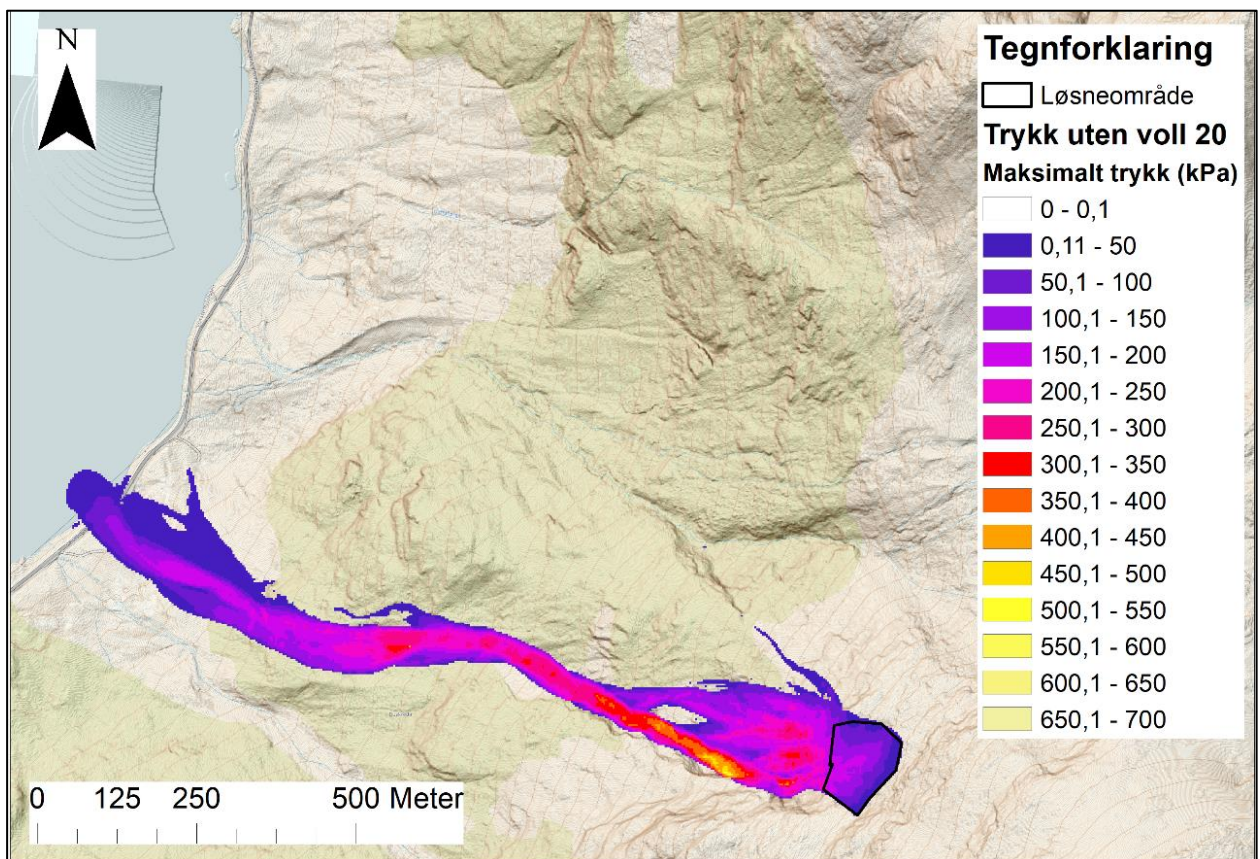
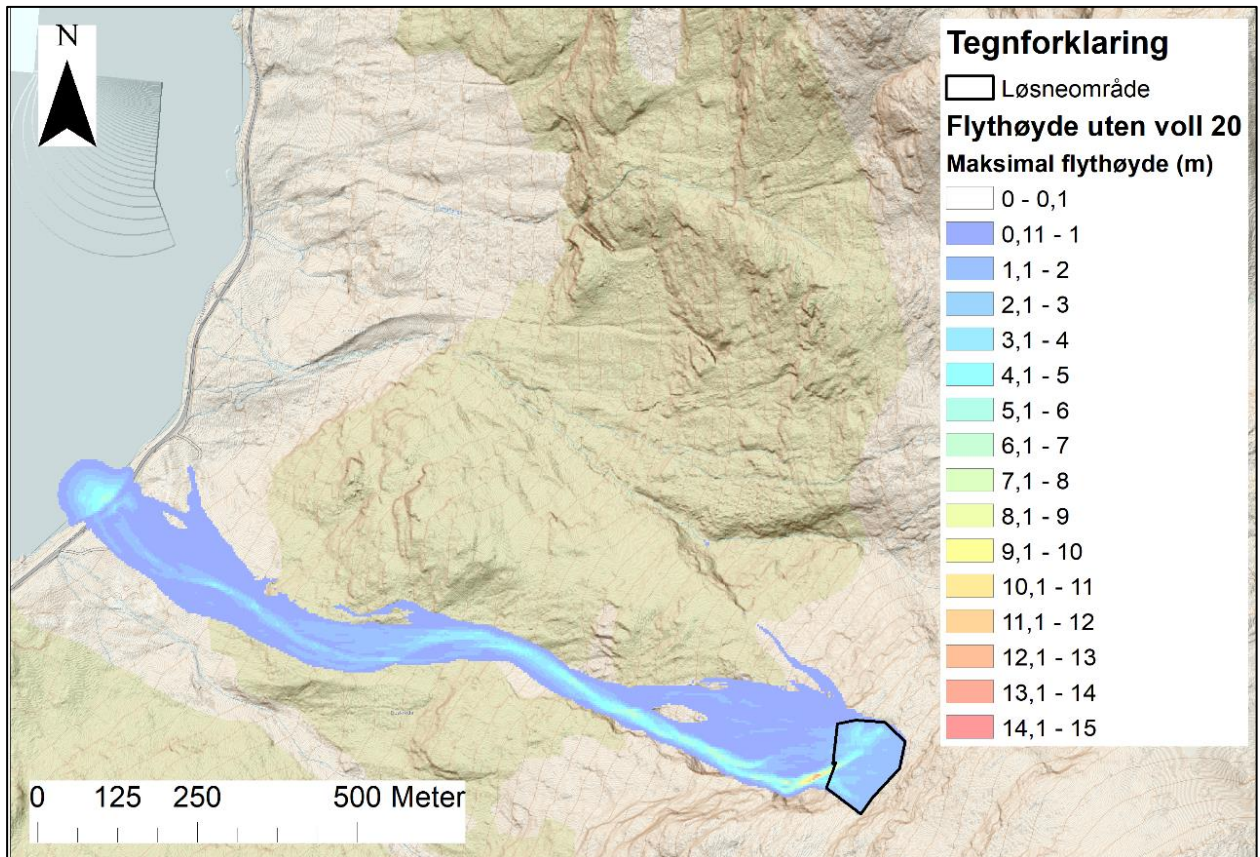
Simulering 5 – Store Buskreda drone 100-årsskred



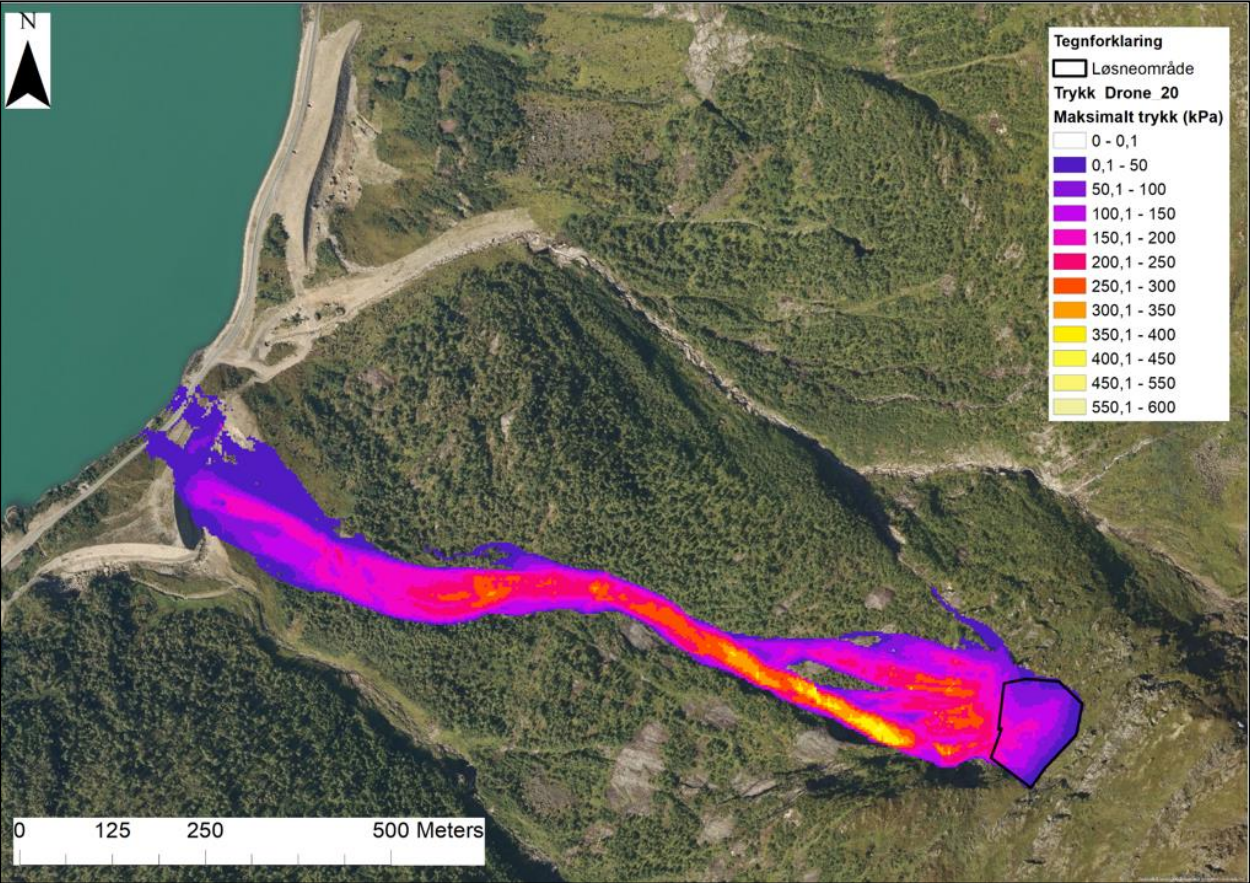
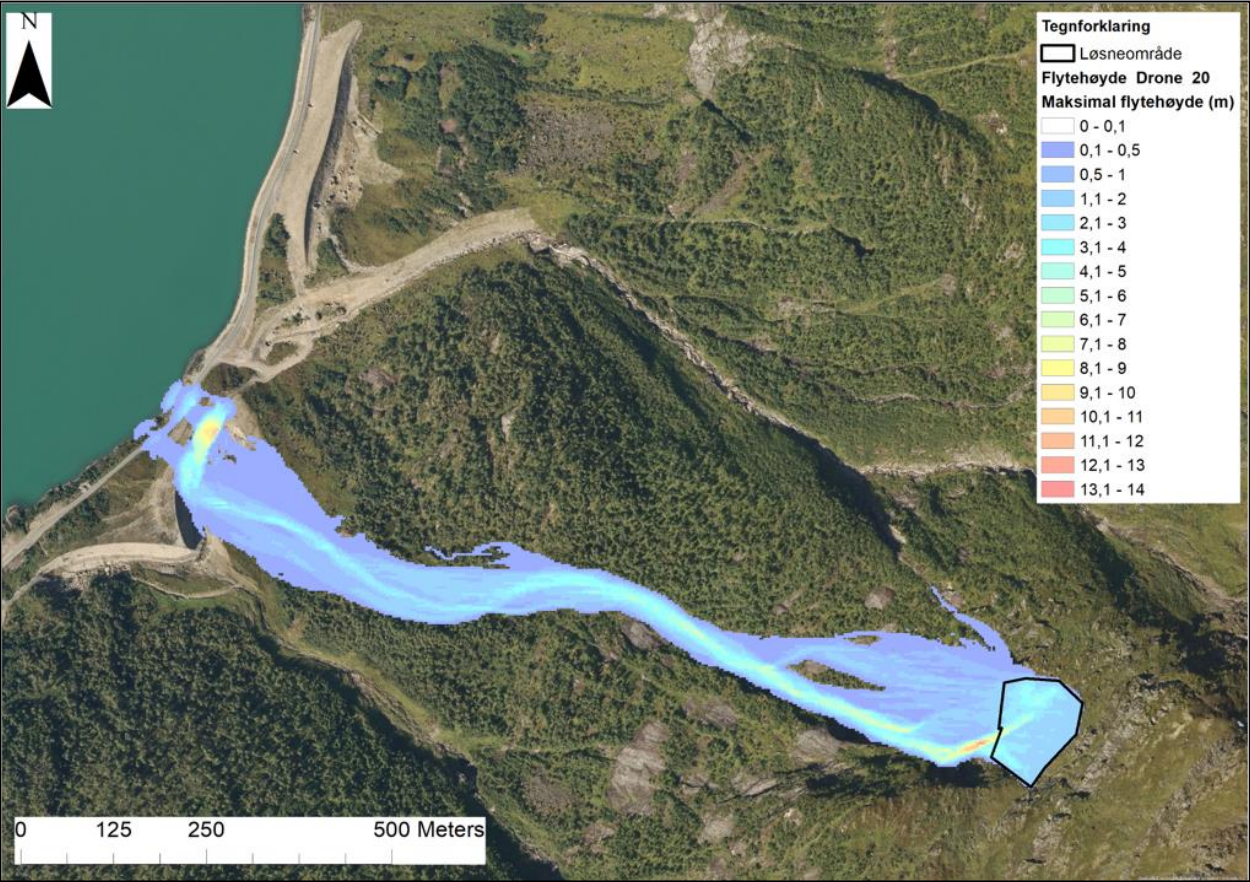
Simulering 6 – Store Buskreda dGPS 100-årsskred



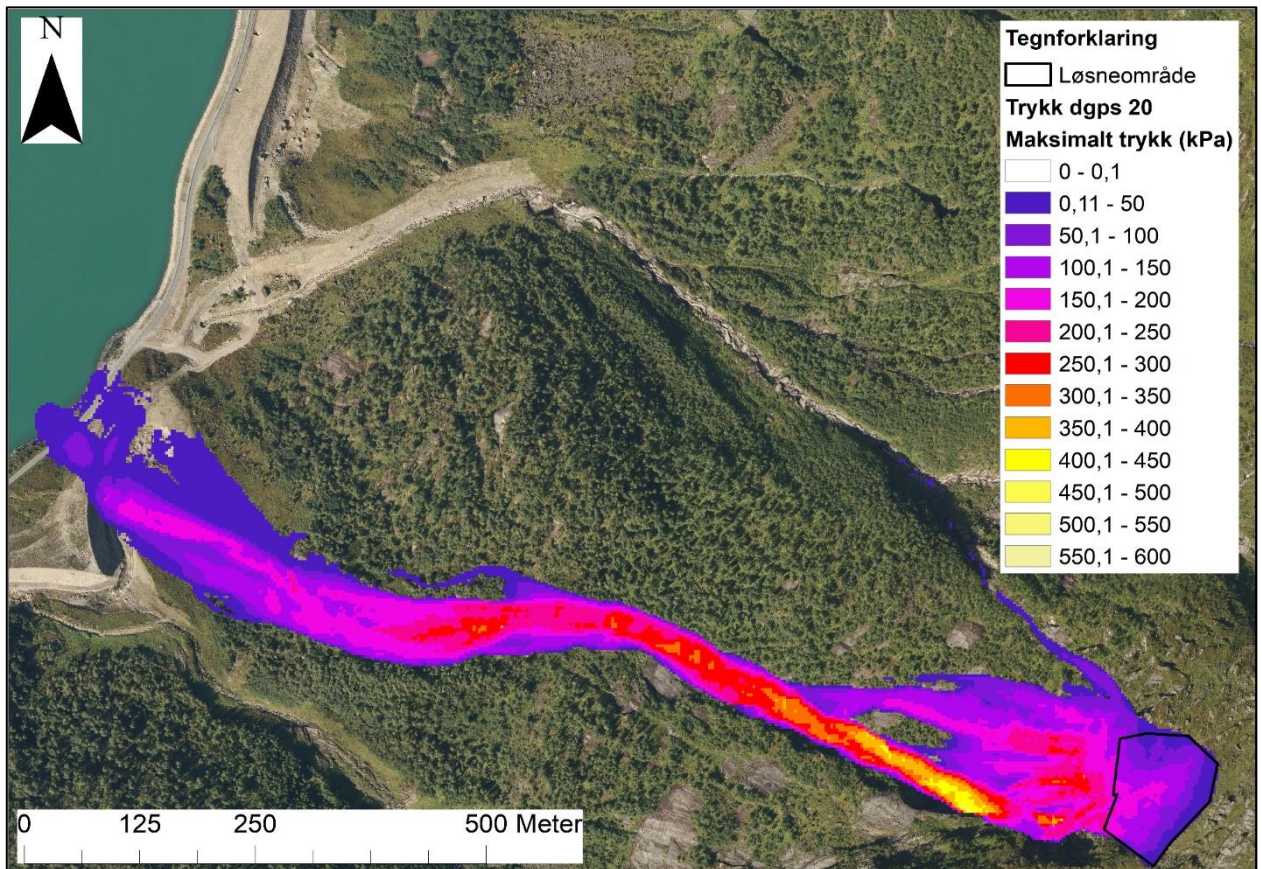
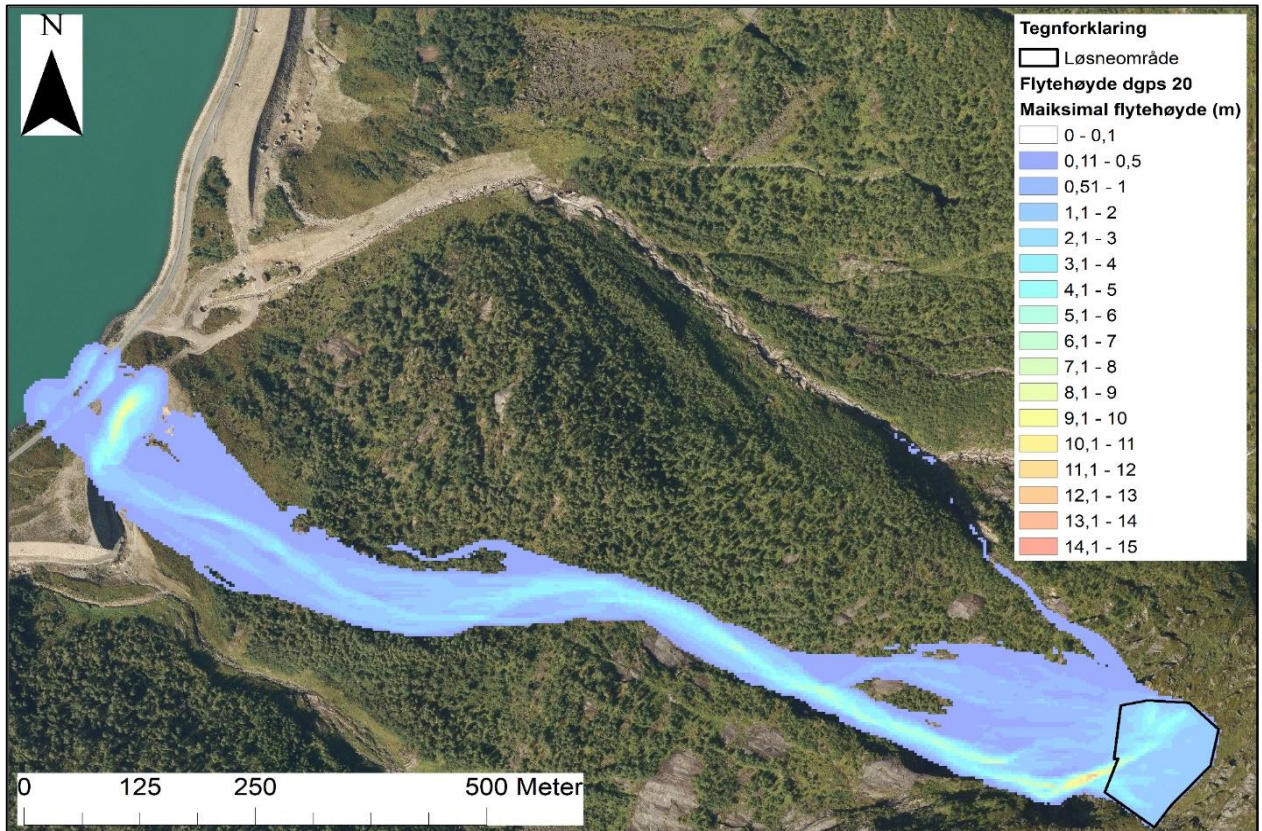
Simulering 7 – Vetle Buskreda pre-situasjon 20-årsskred



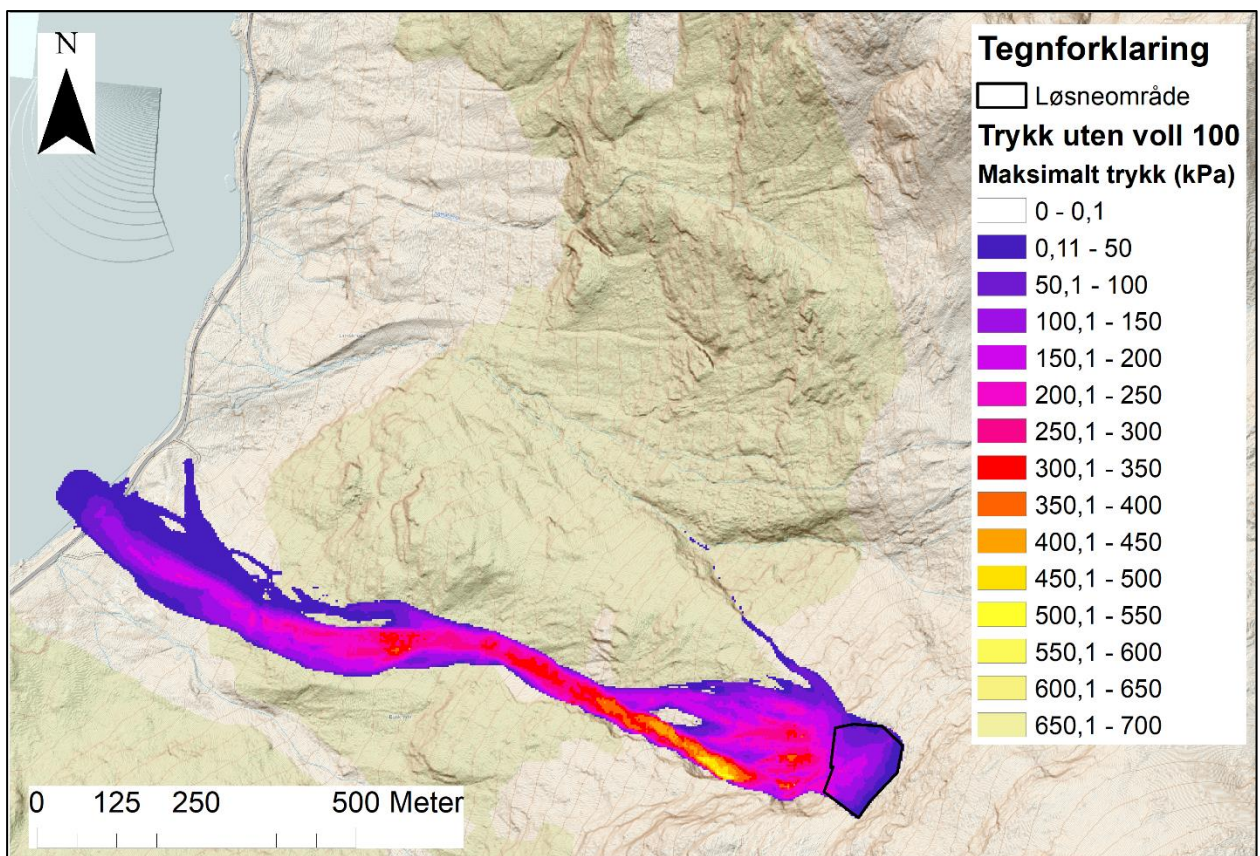
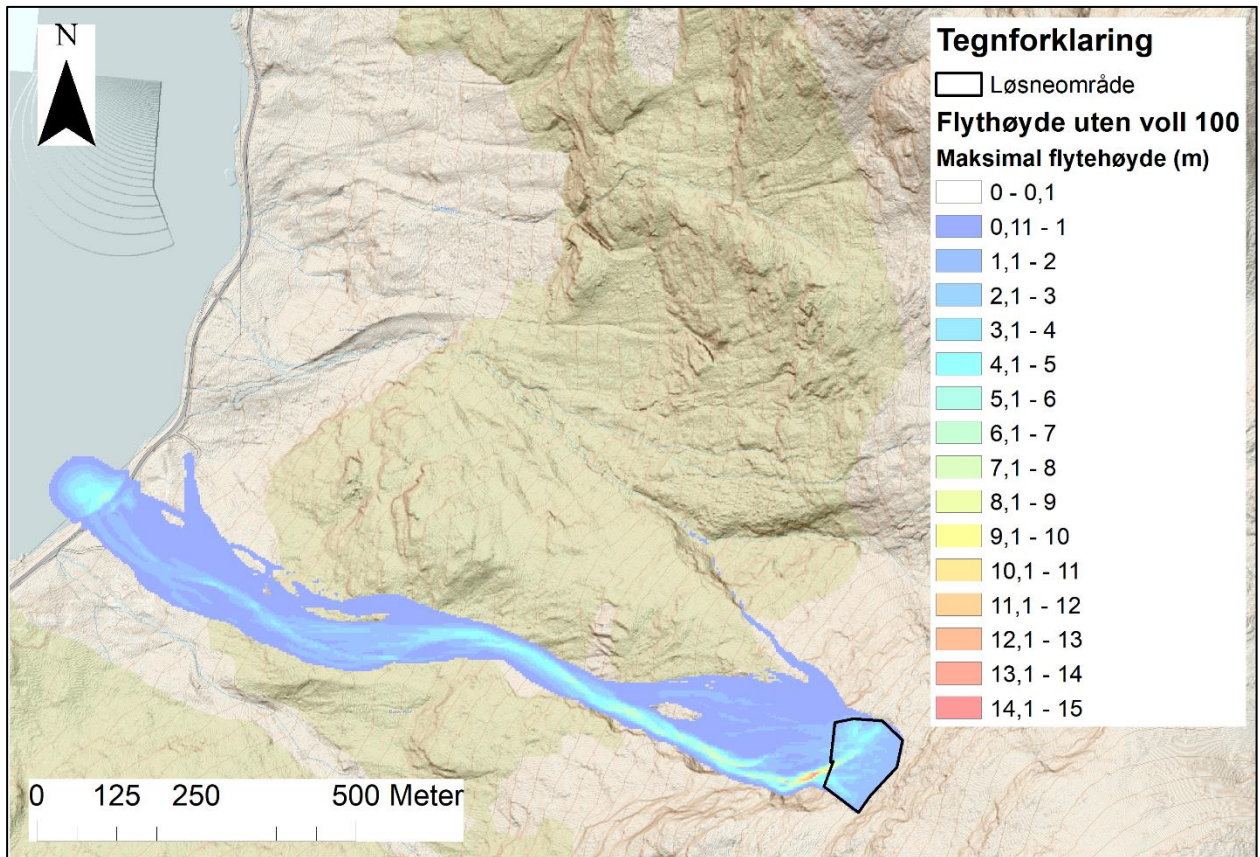
Simulering 8 – Vetle Buskreda drone 20-årsskred



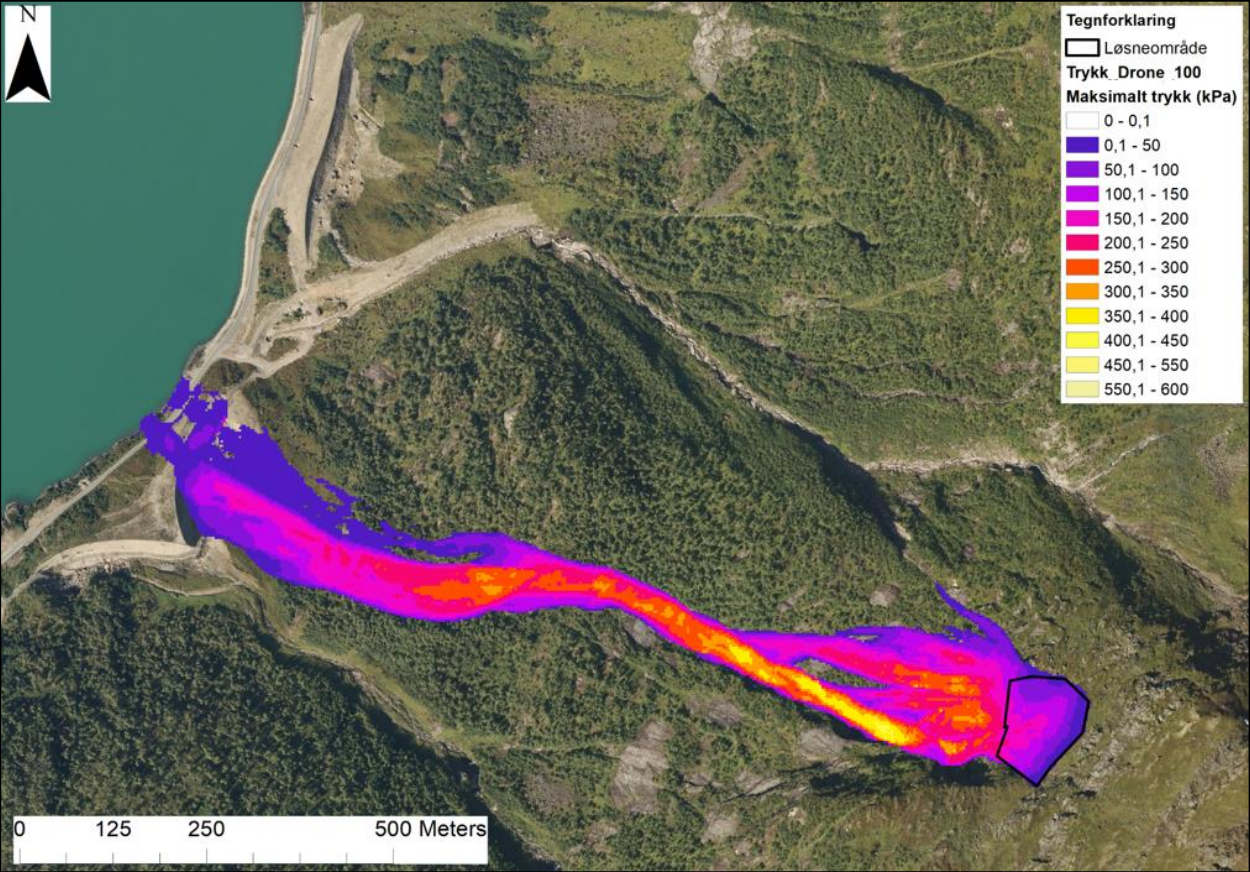
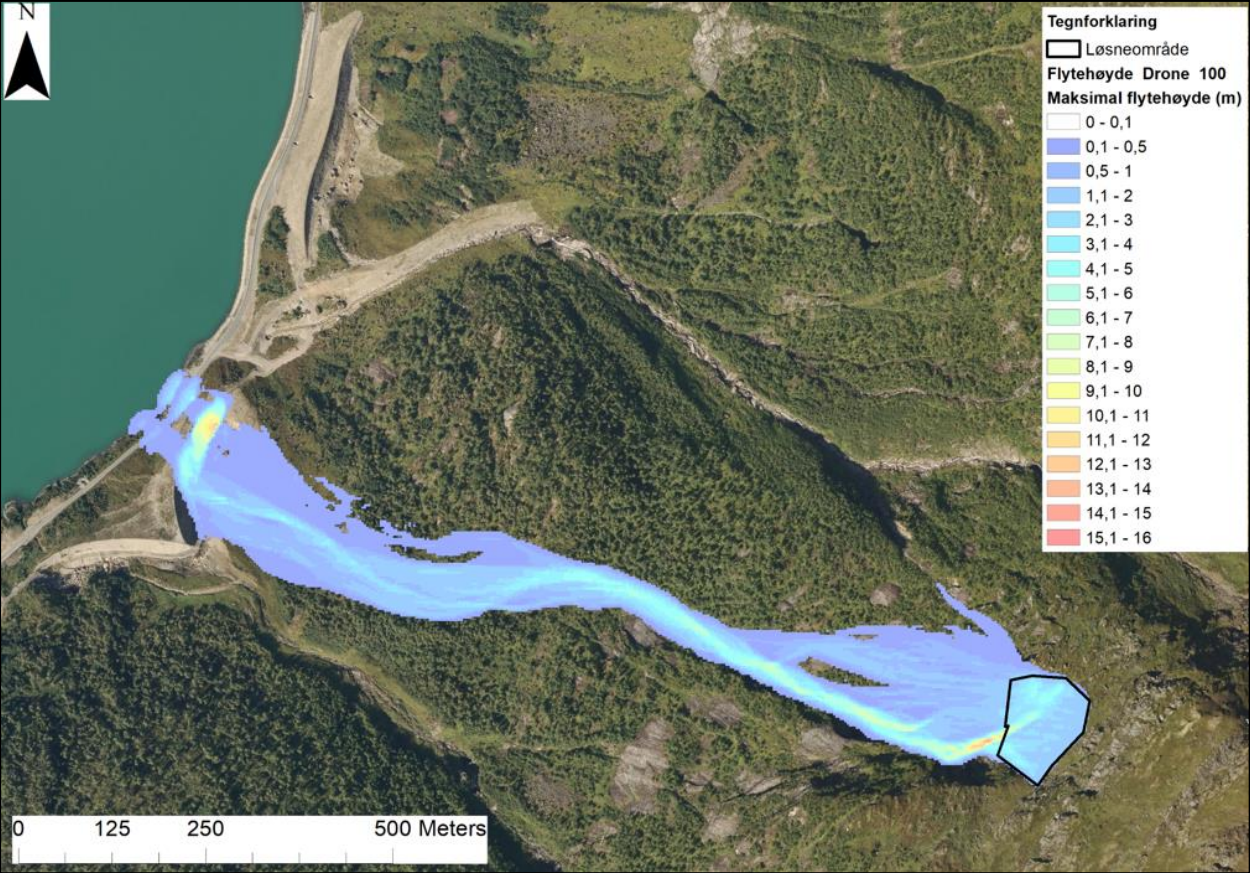
Simulering 9 – Vetle Buskreda dGPS 20-årsskred



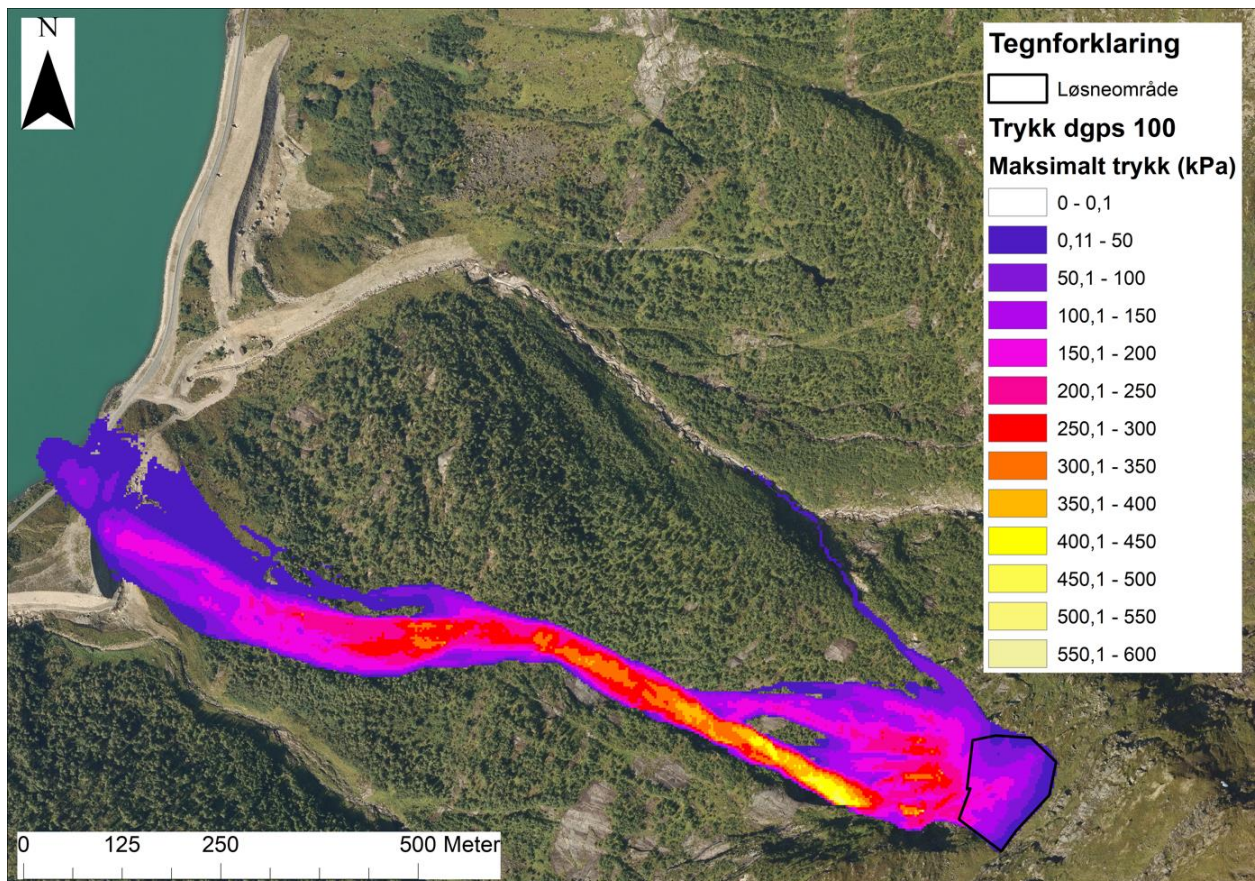
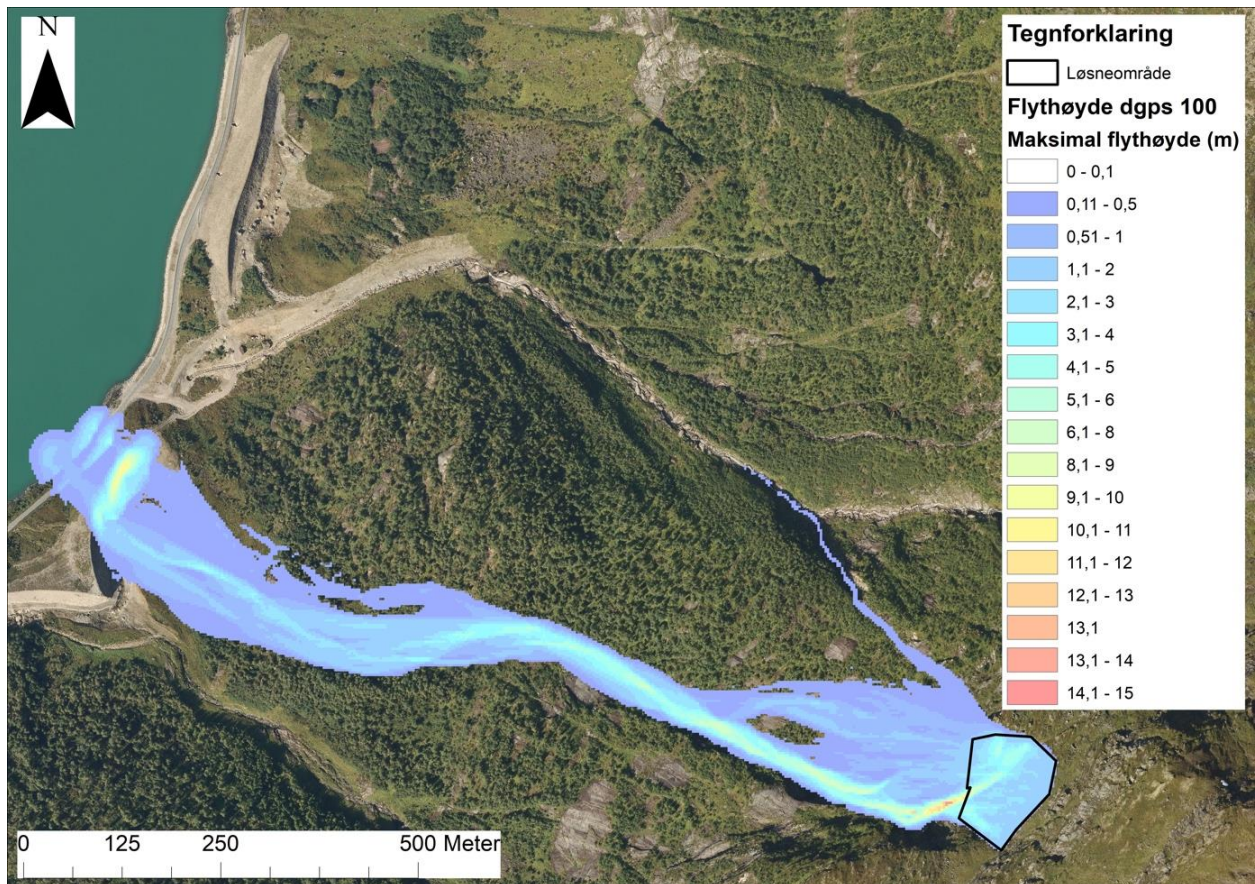
Simulering 10 – Vetle Buskreda pre-situasjon 100-årsskred



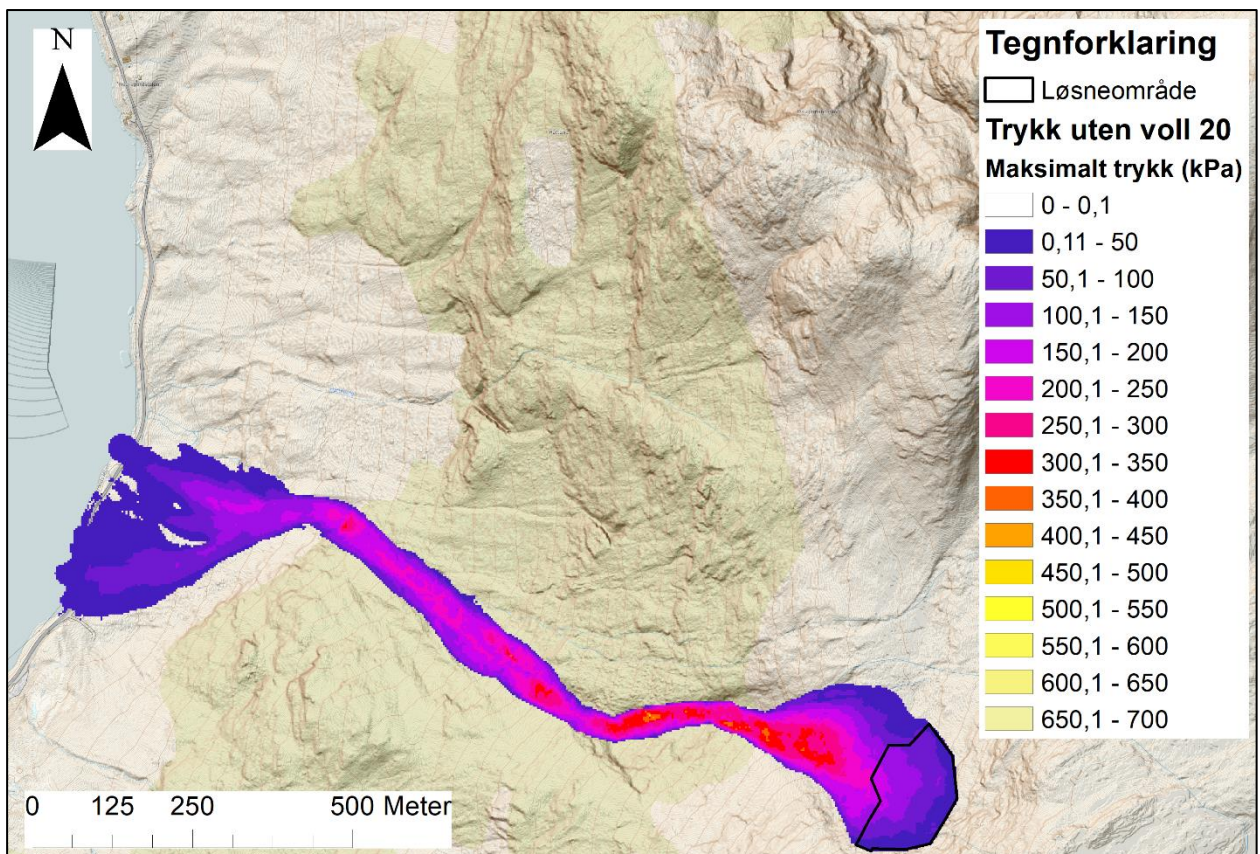
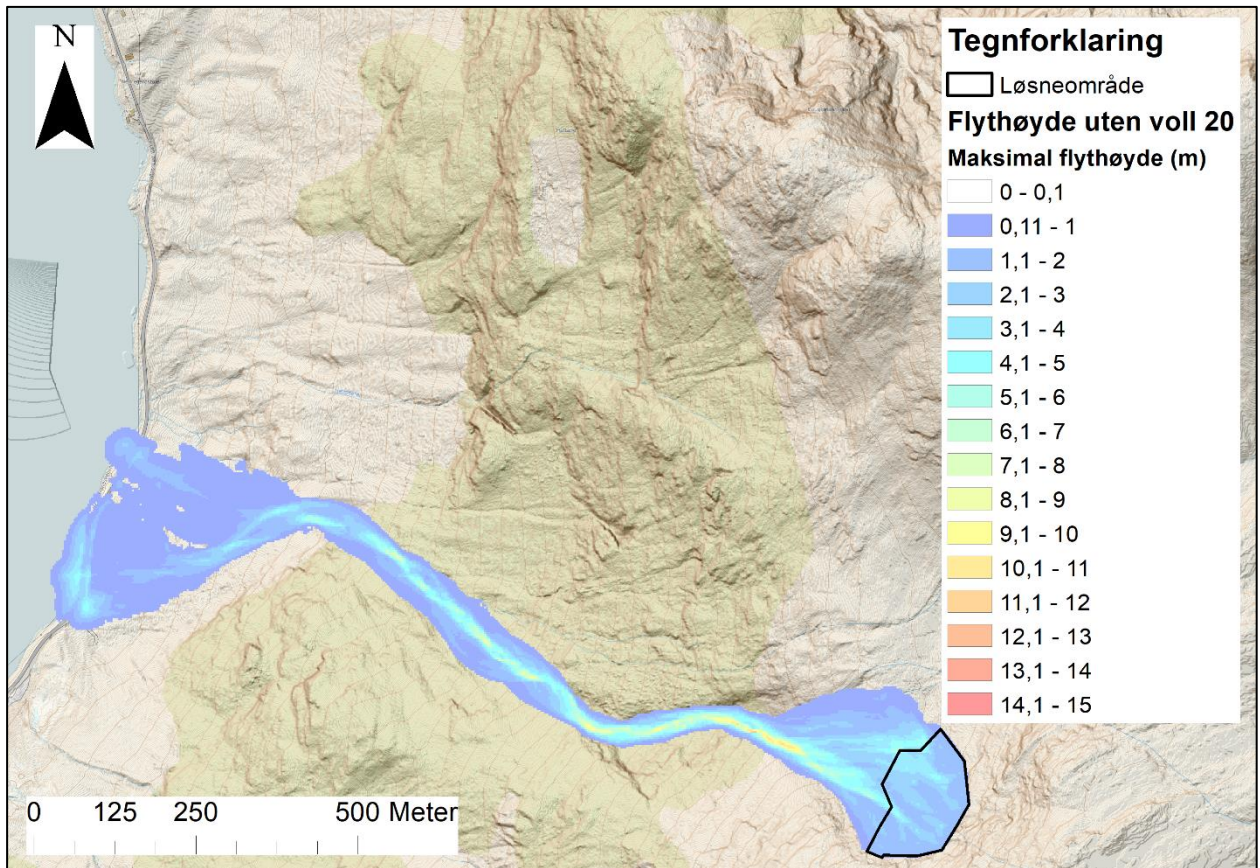
Simulering 11 – Vetle Buskreda drone 100-årsskred



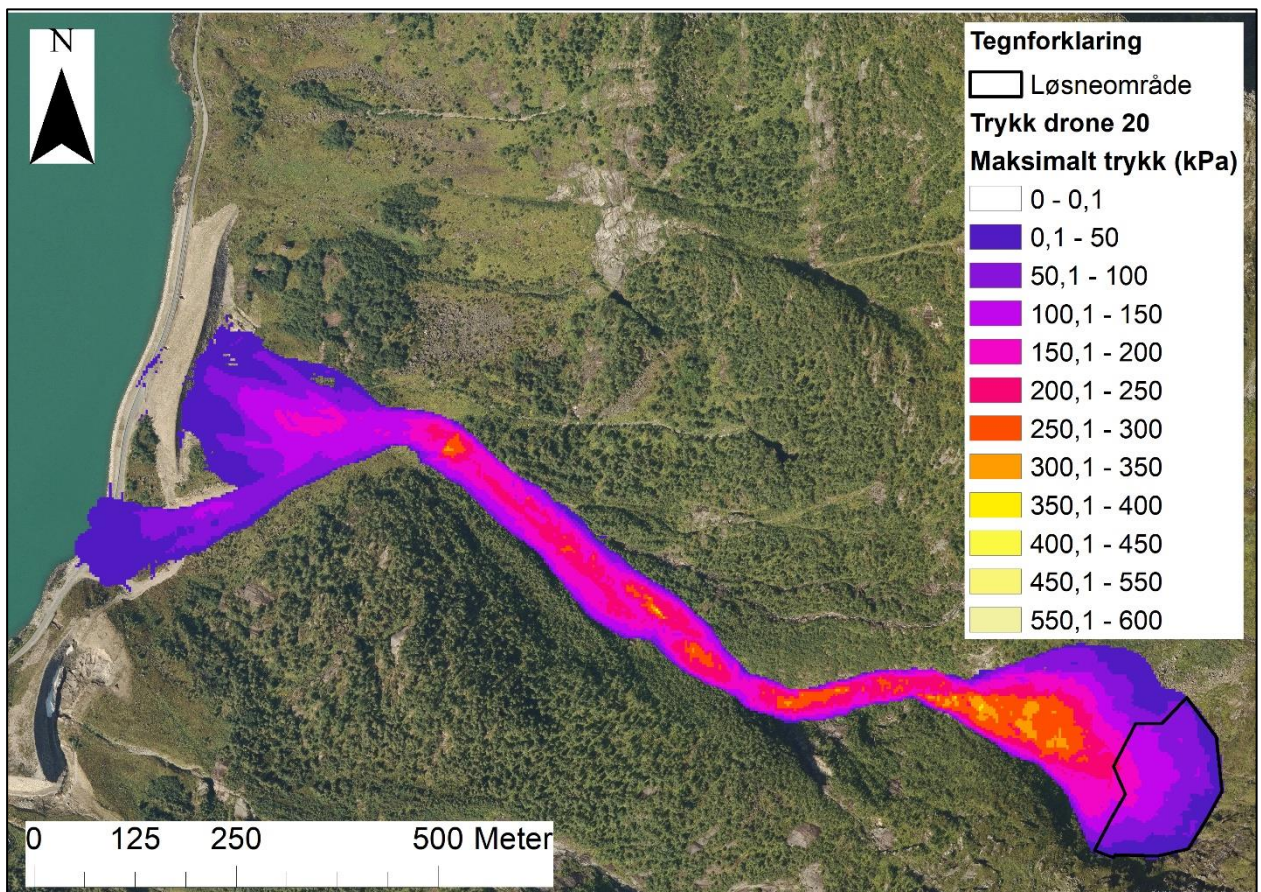
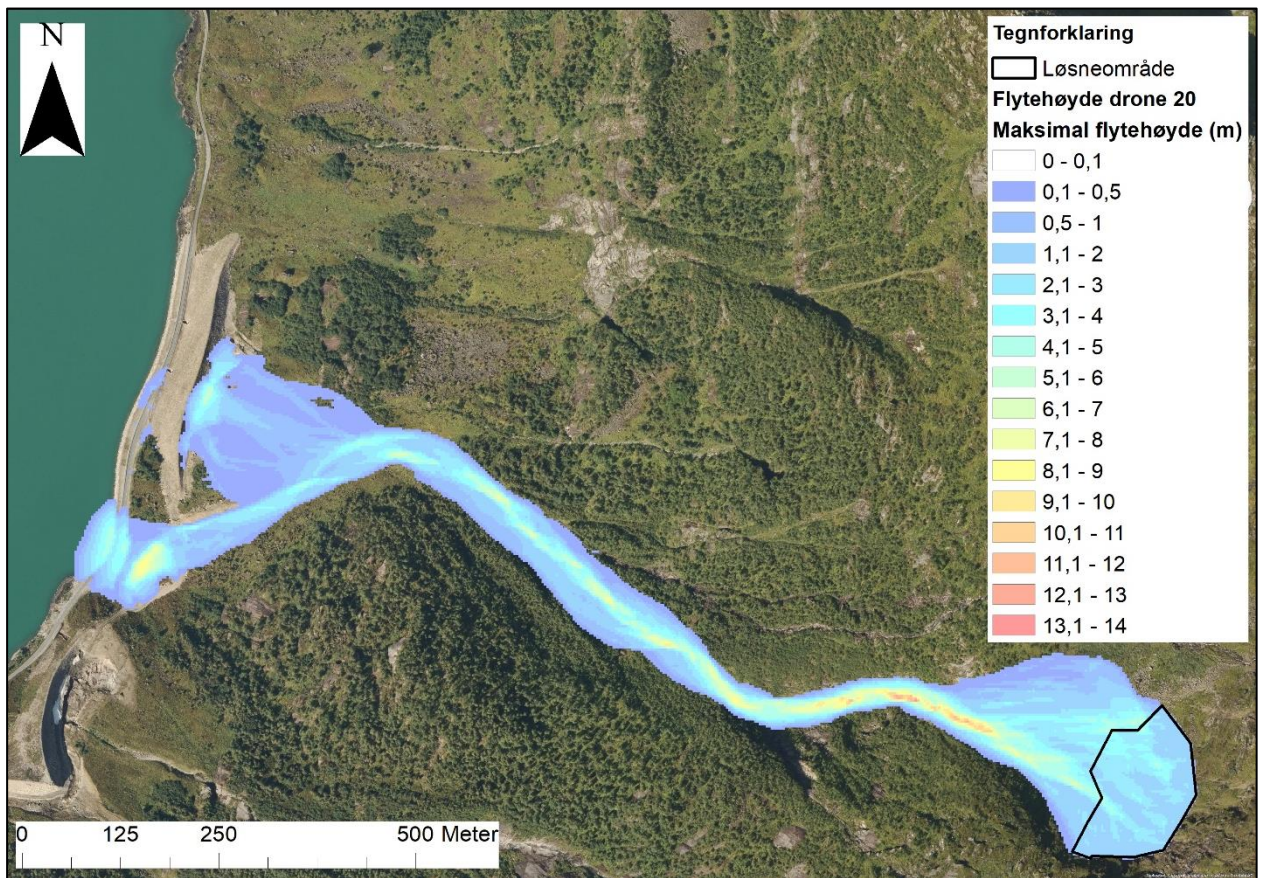
Simulering 12 – Vetle Buskreda dGPS 100-årsskred



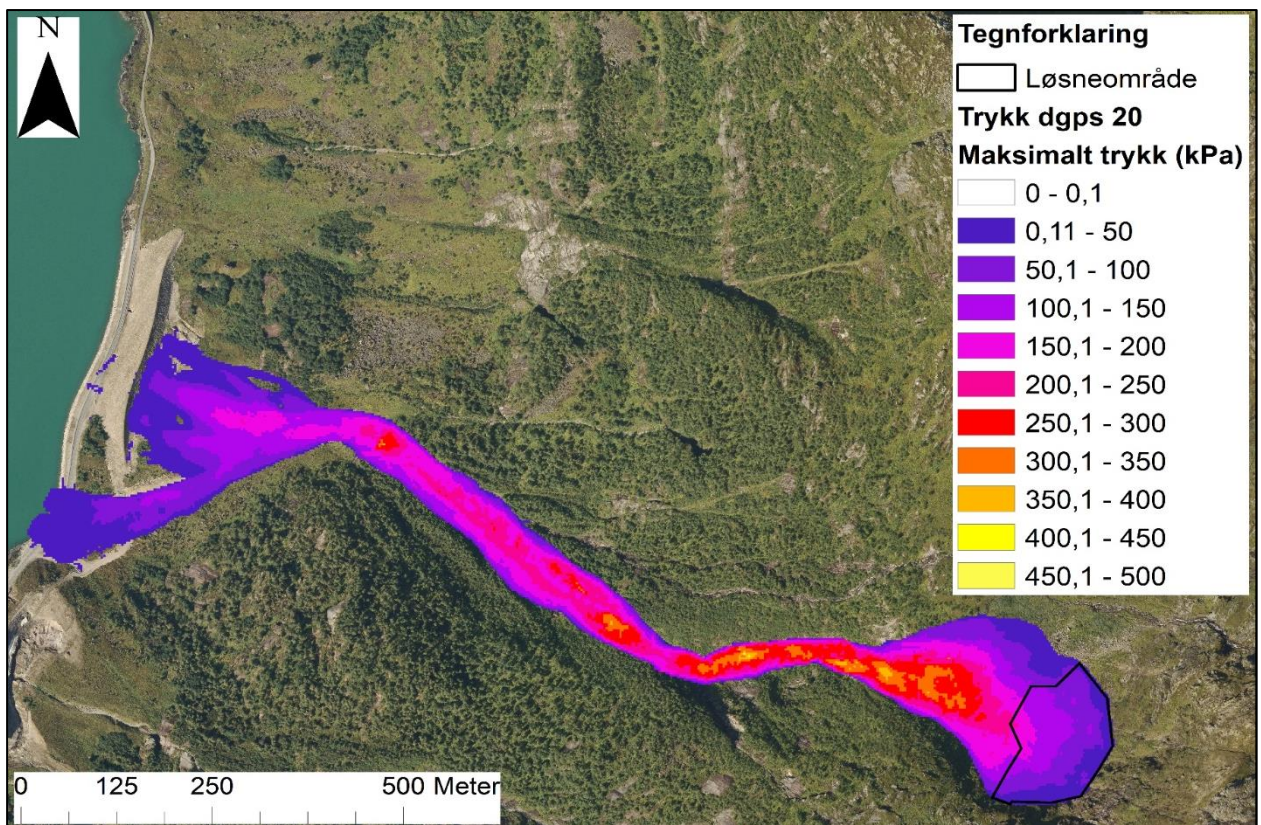
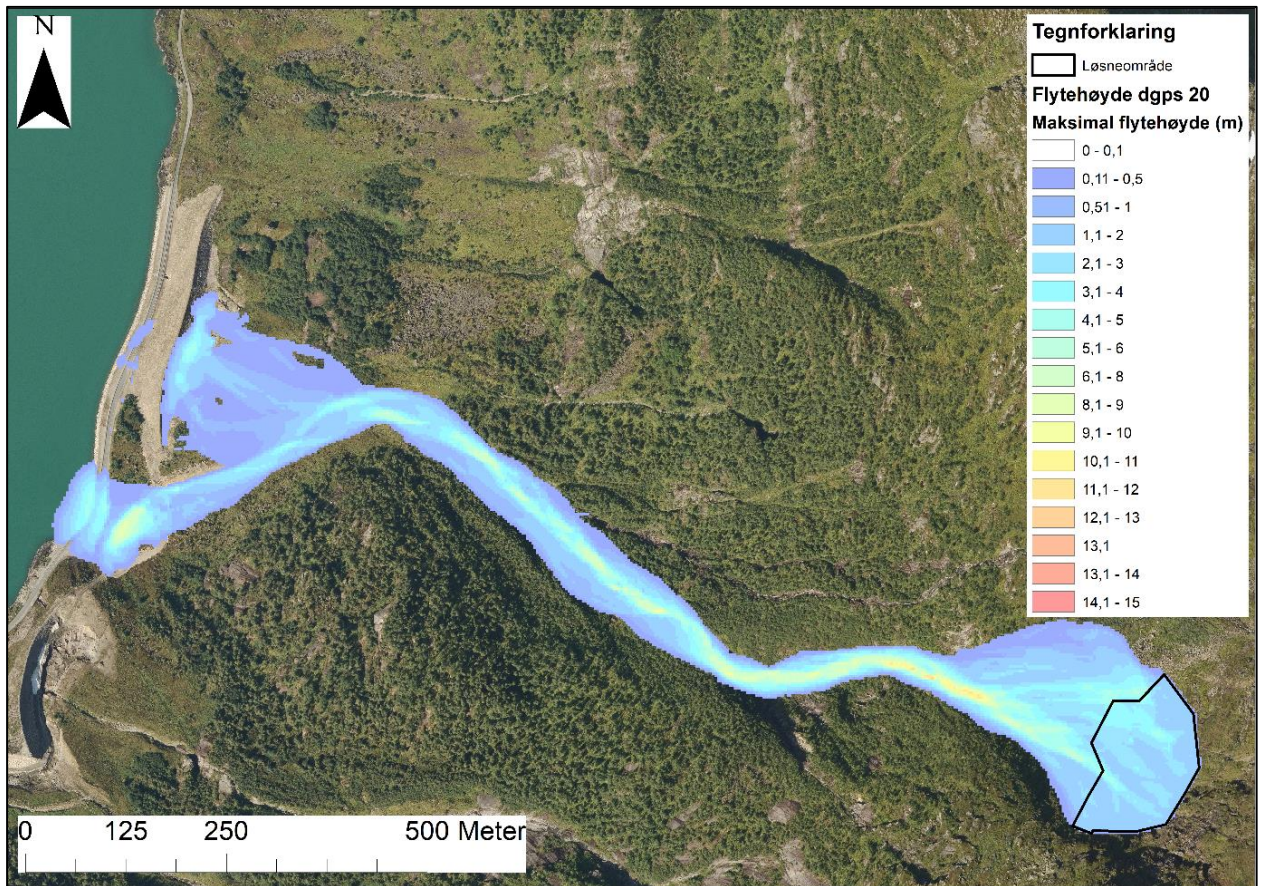
Simulering 13 – Linnskreda pre-situasjon 20-årsskred



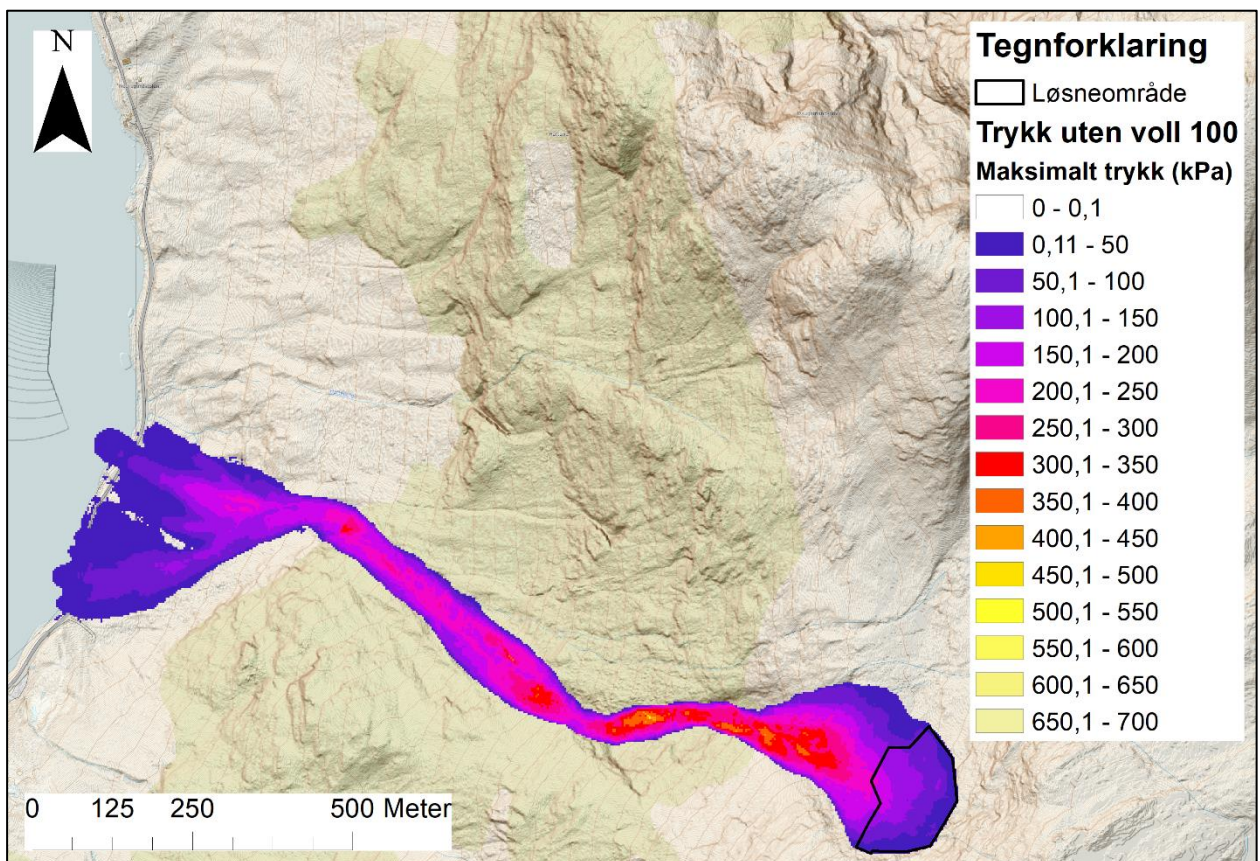
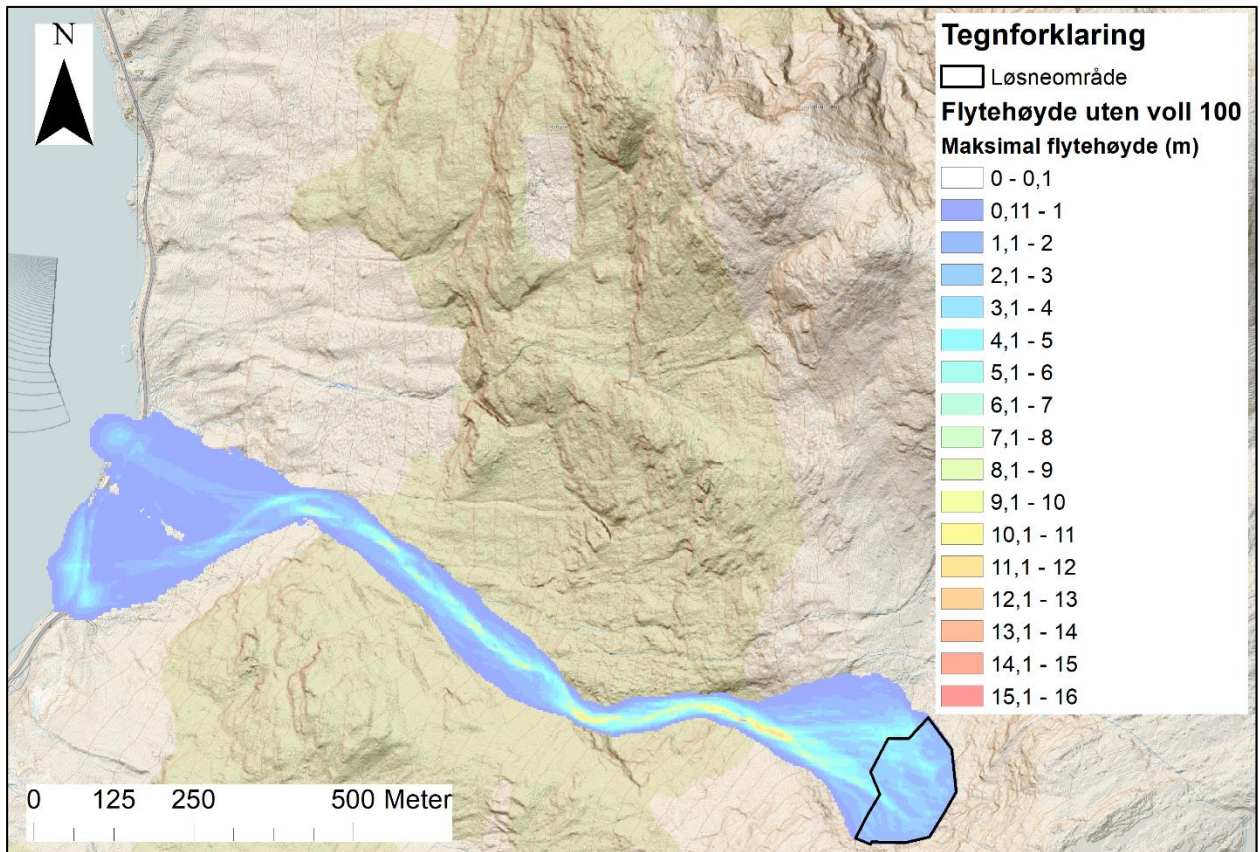
Simulering 14 – Linnskreda drone 20-årsskred



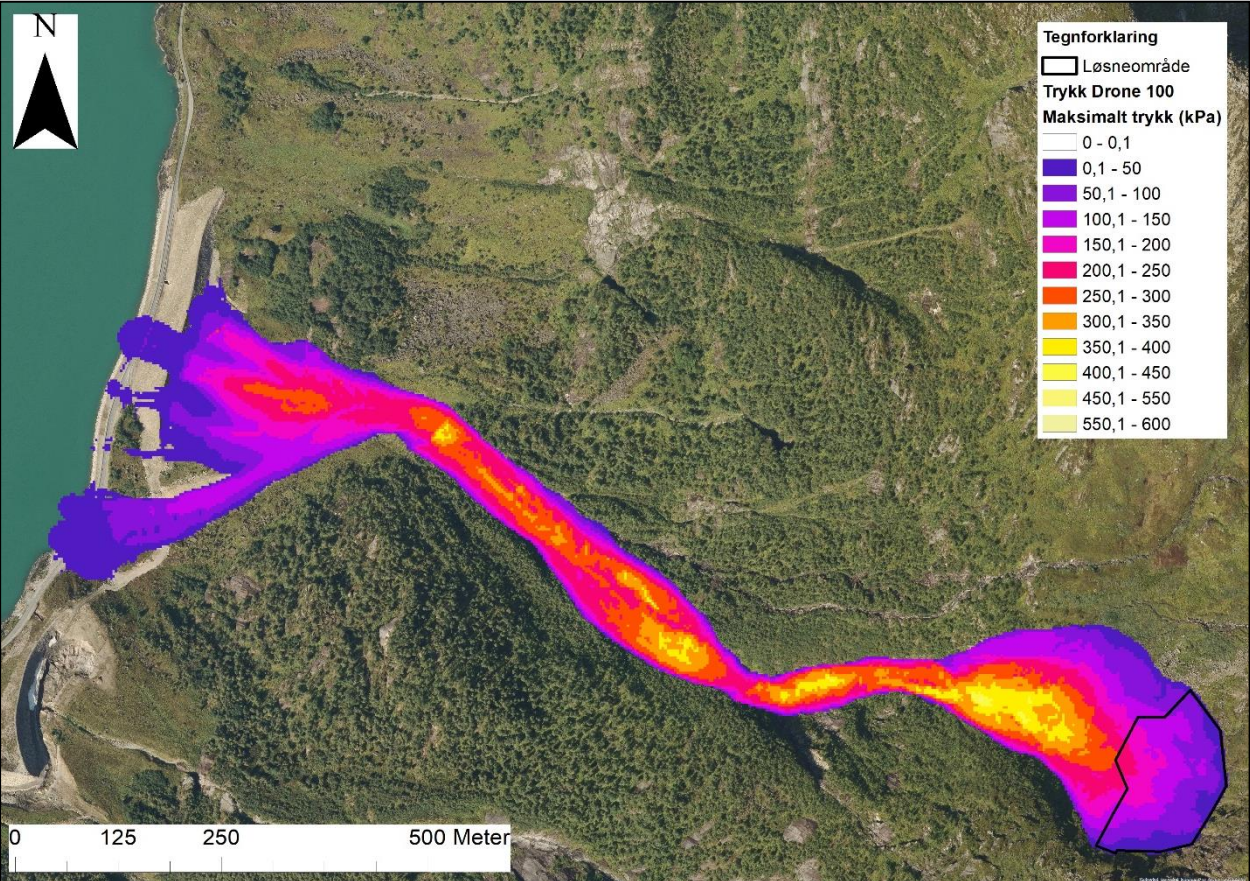
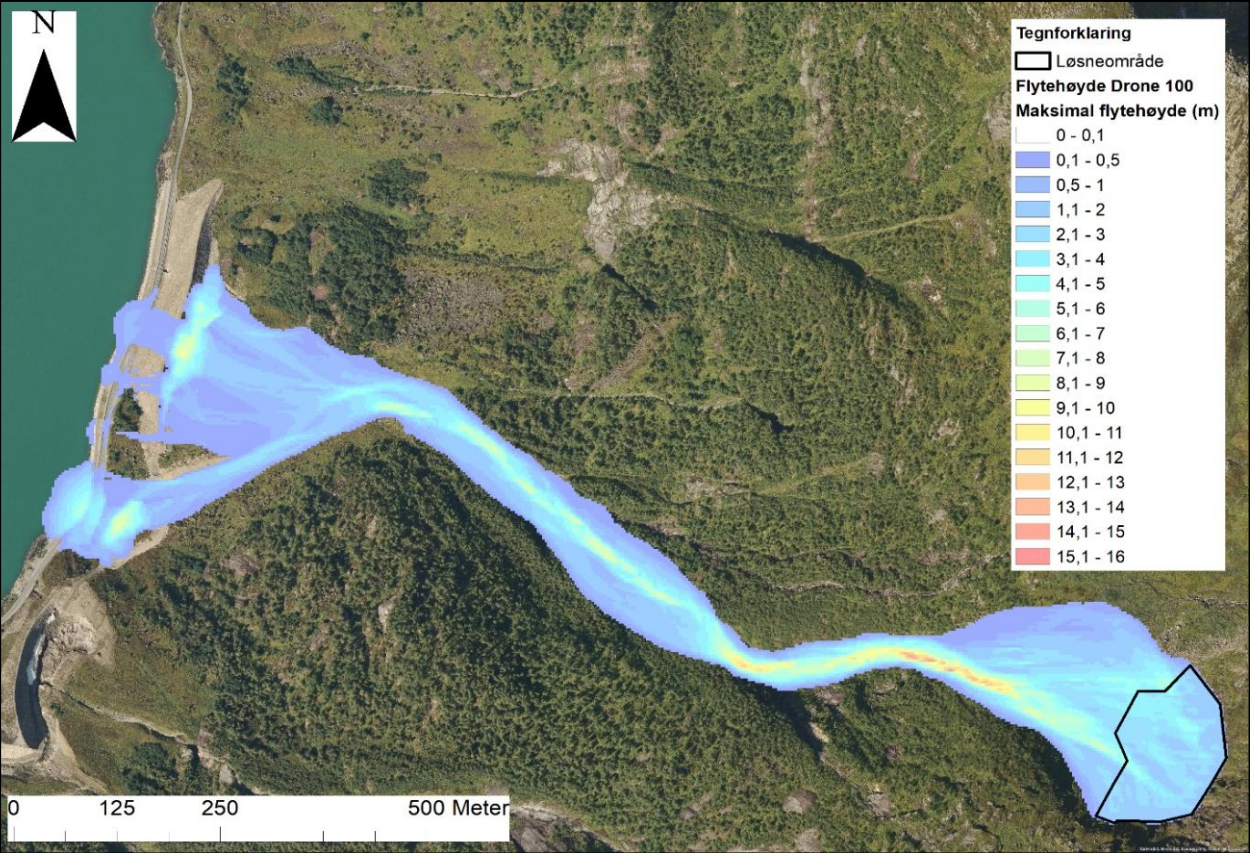
Simulering 15 – Linnskreda dGPS 20-årsskred



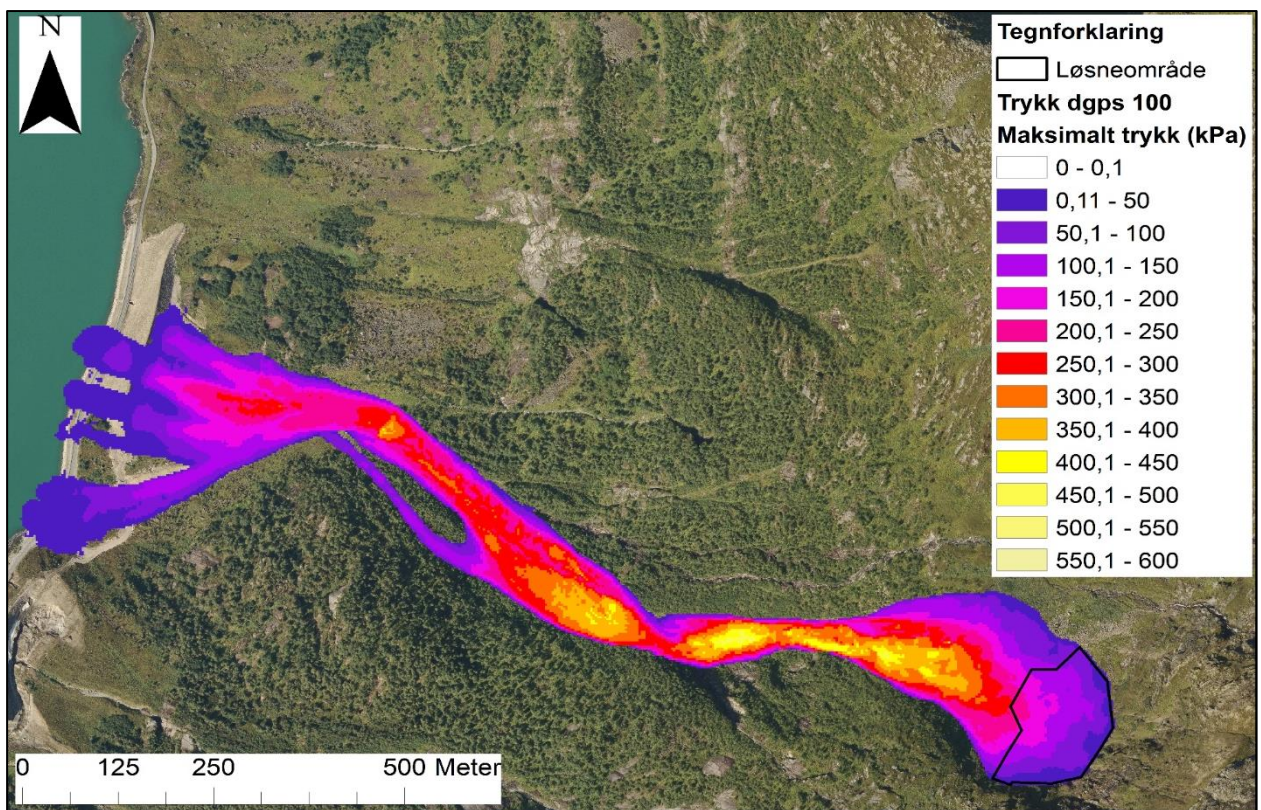
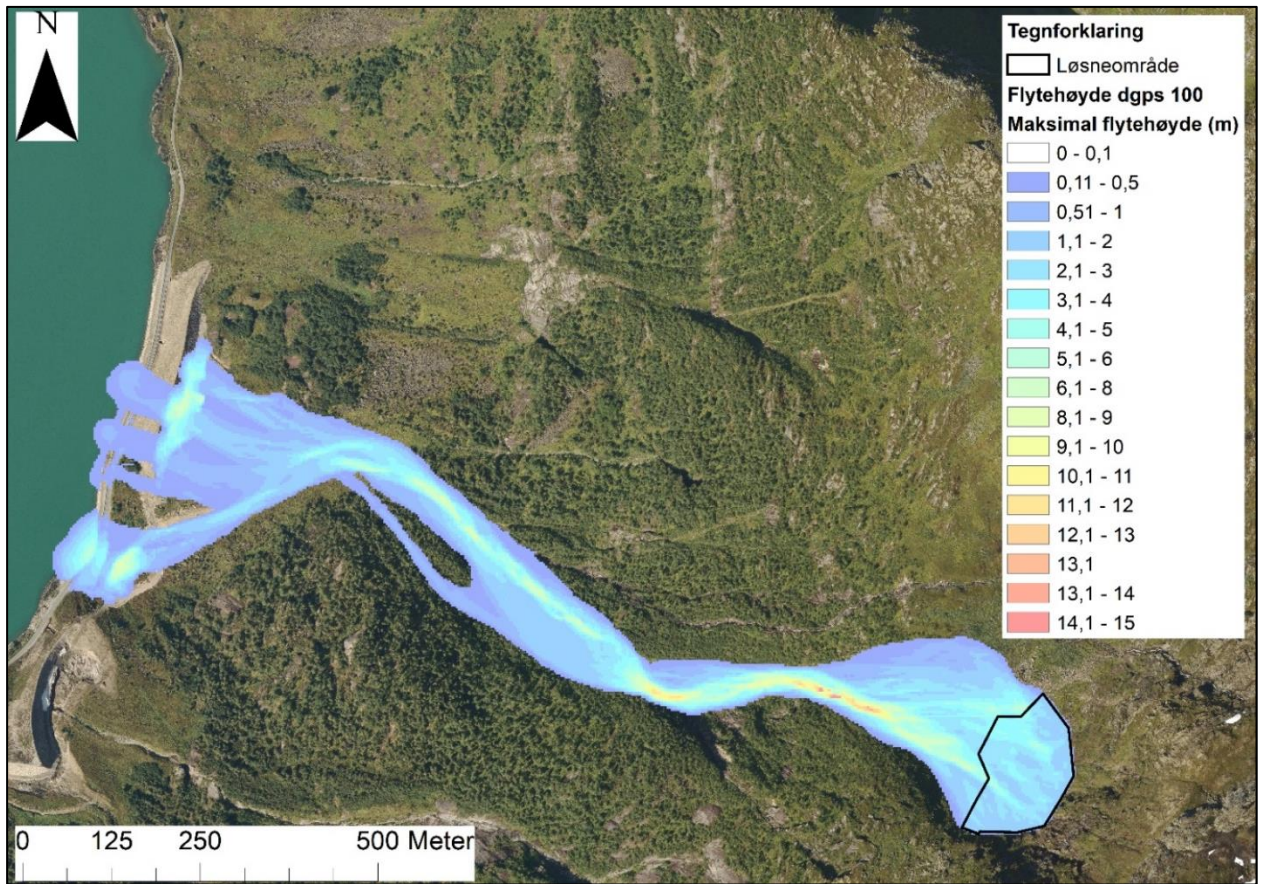
Simulering 16 – Linnskreda pre-situasjon 100-årsskred



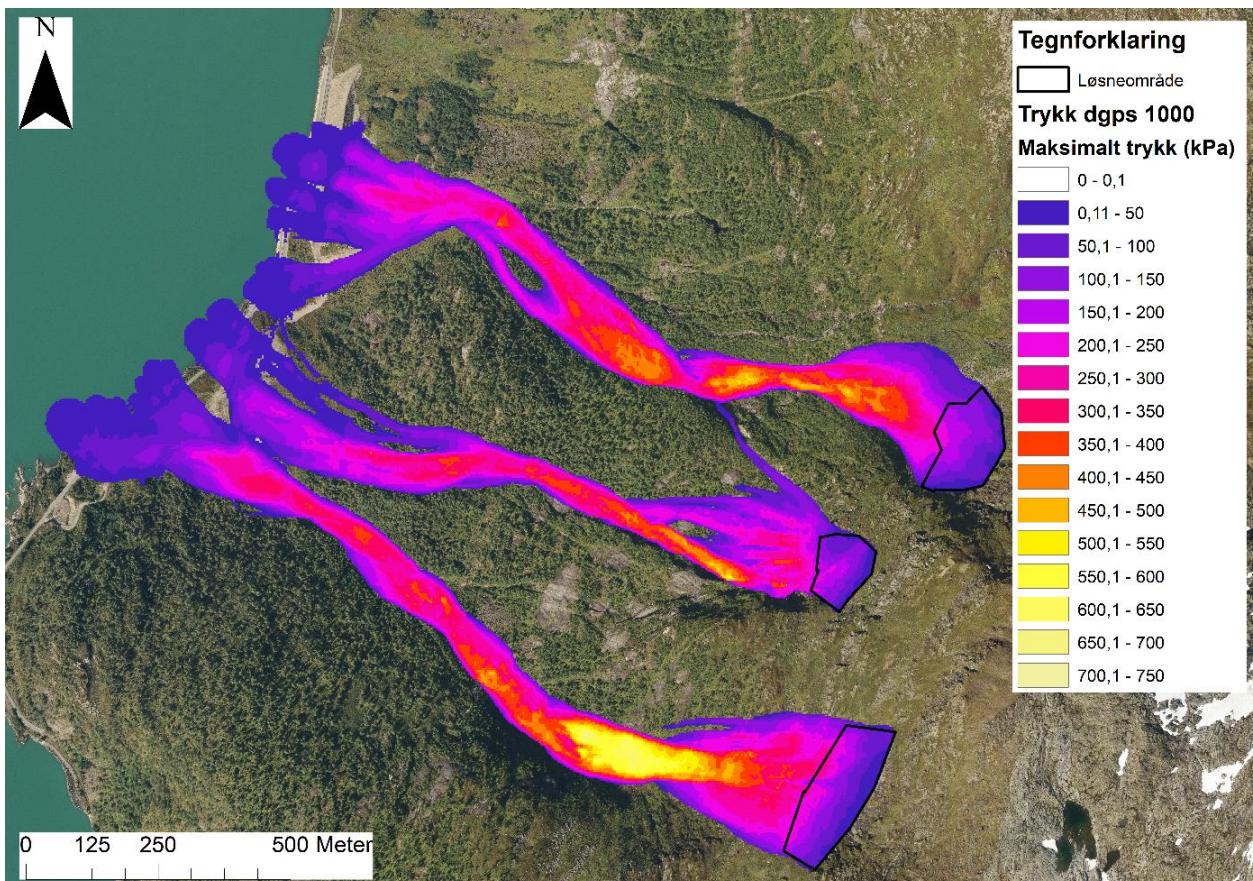
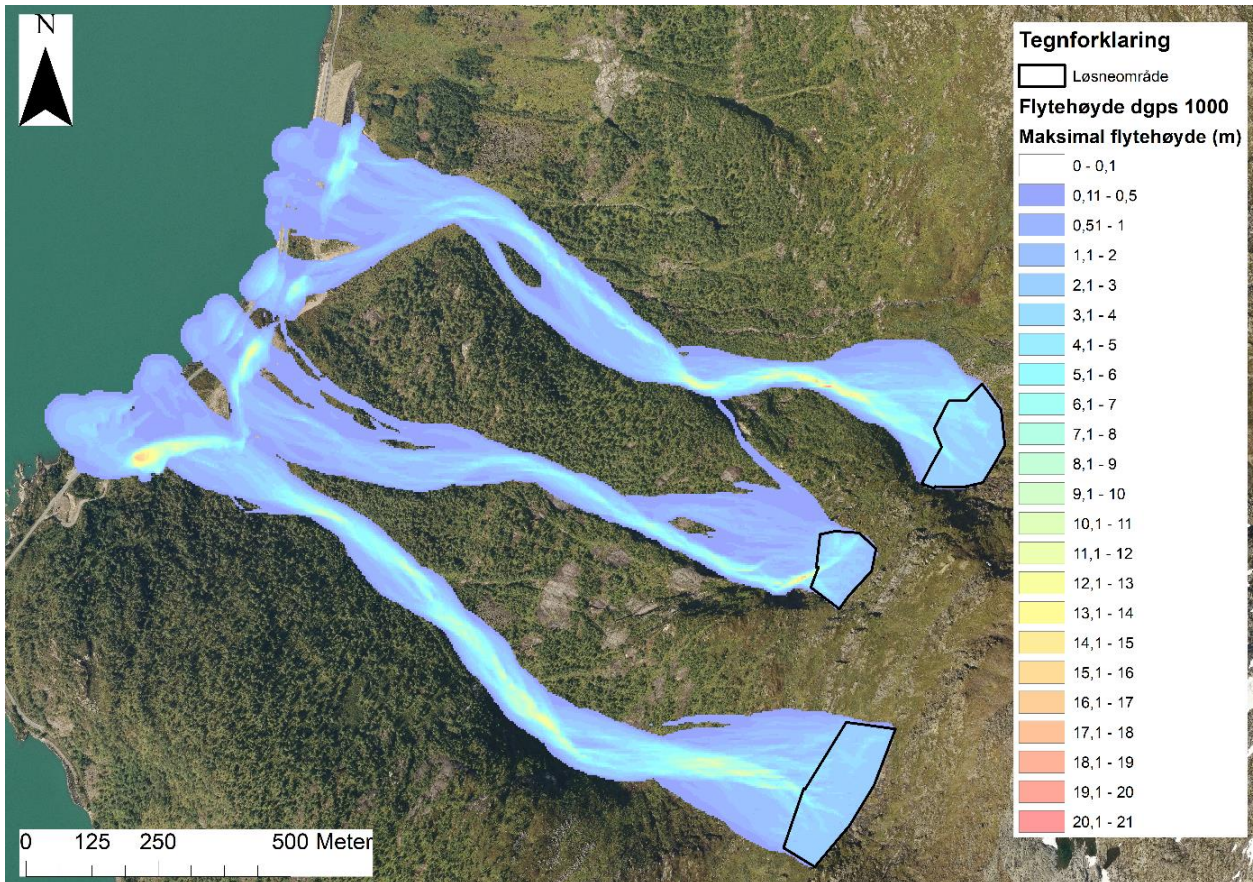
Simulering 17 – Linnskreda drone 100-årsskred



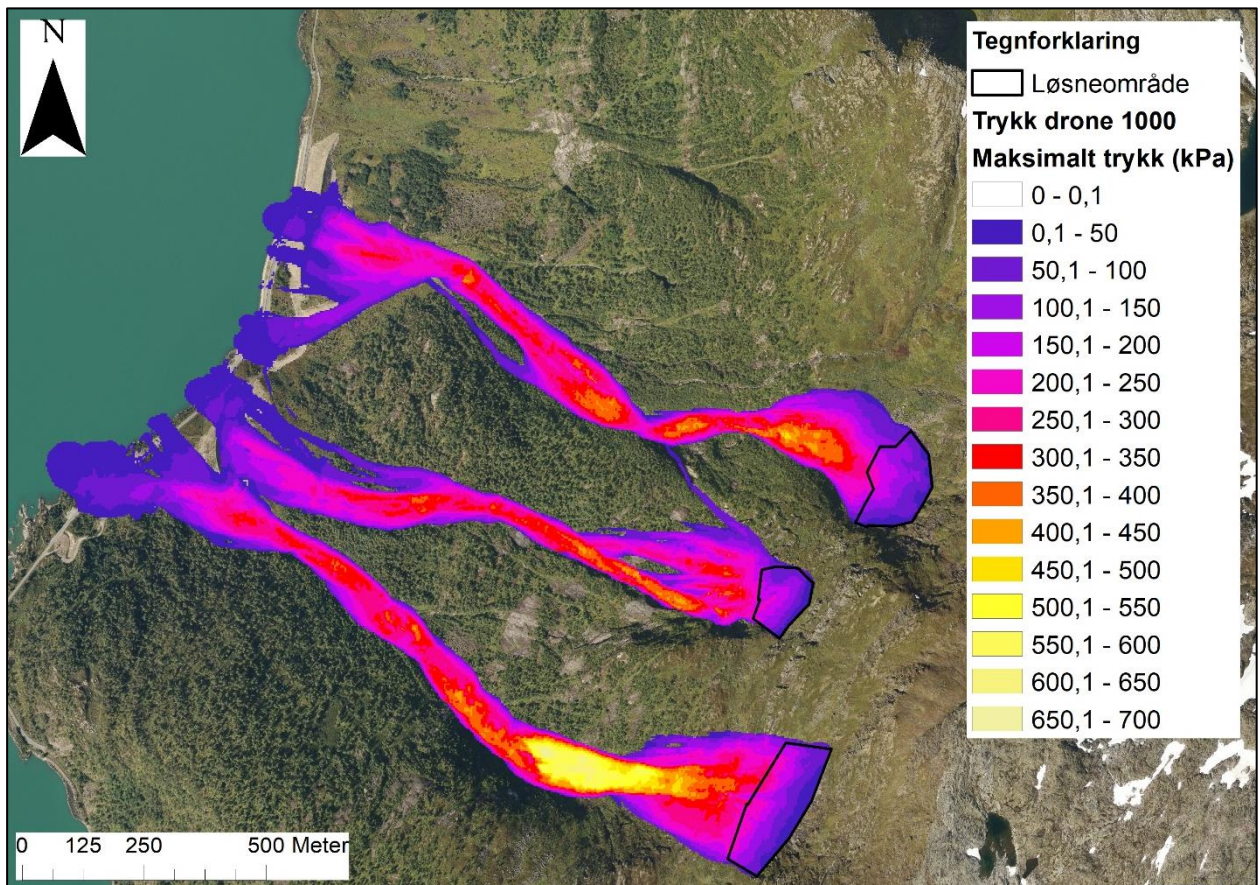
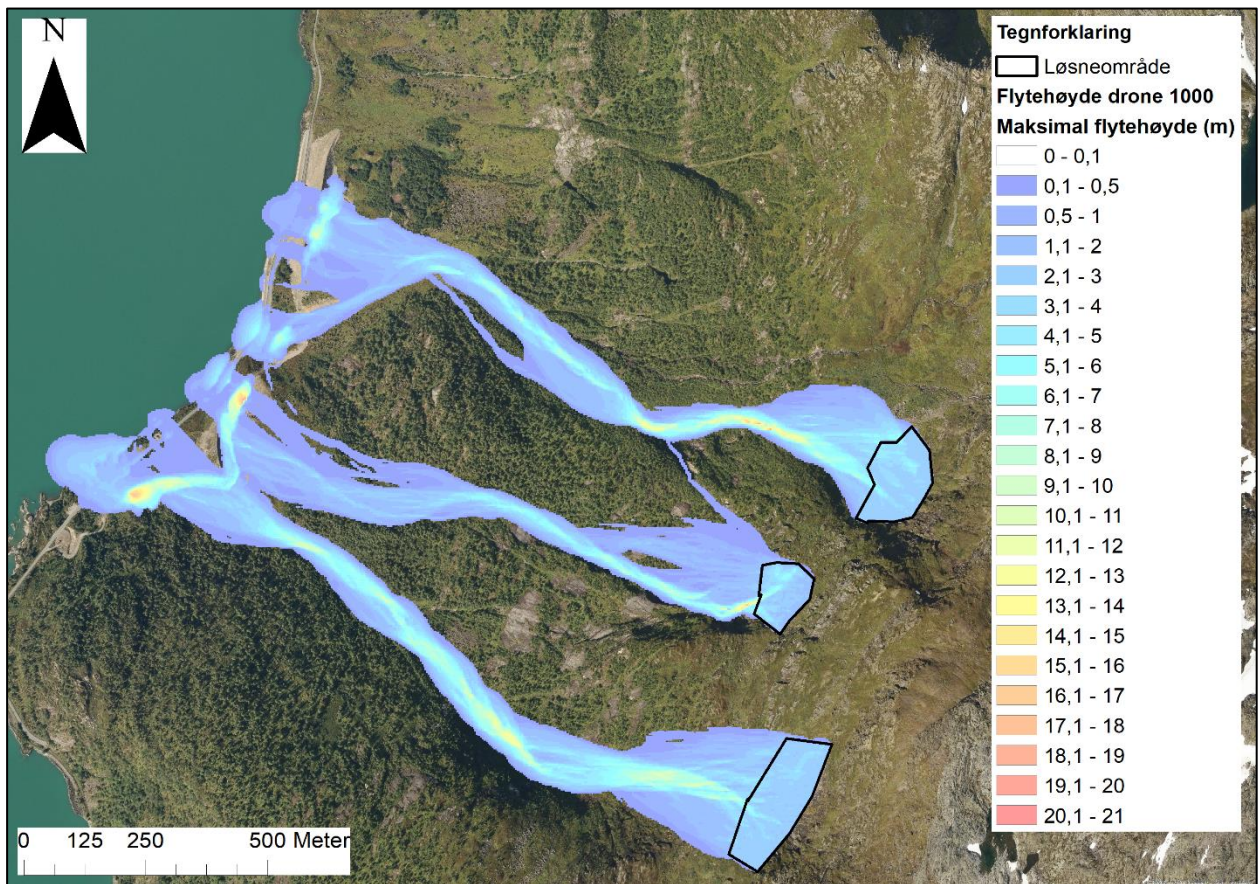
Simulering 18 – Linnskreda dGPS 100-årsskred



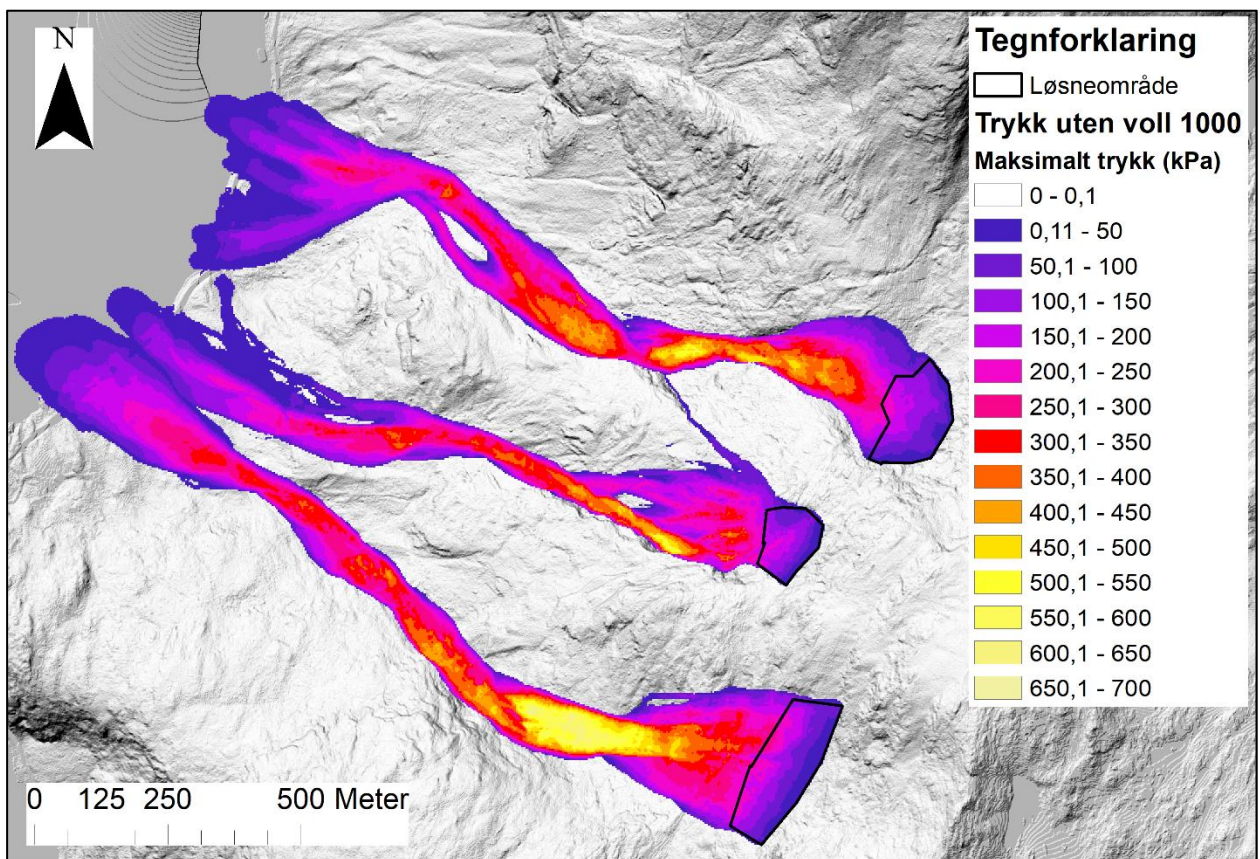
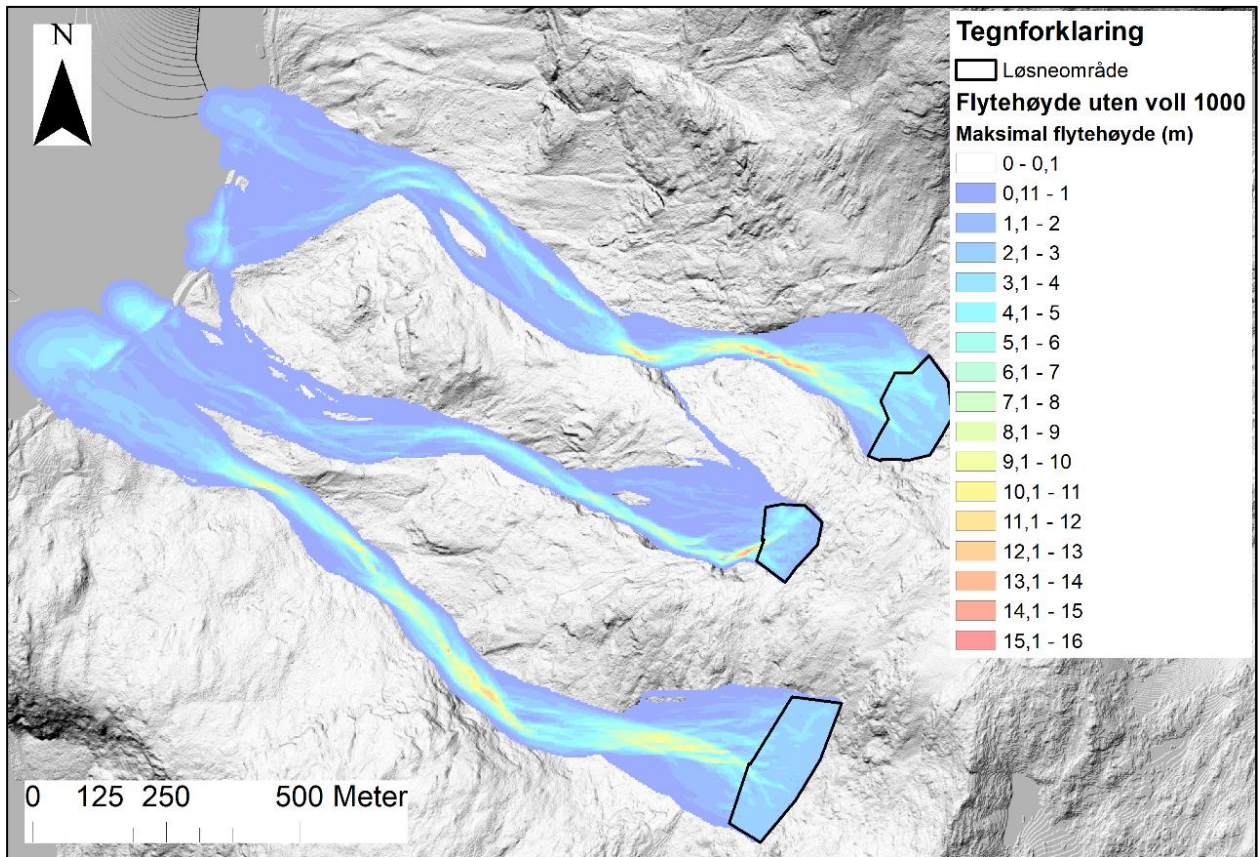
Simulering 19 – 1000-årsskred dGPS



Simulering 20 – 1000-årsskred drone

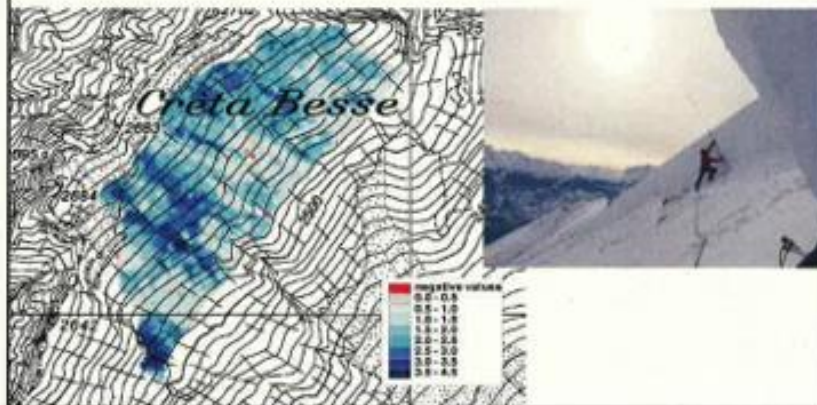


Simulering 21 – 1000-årsskred pre-situasjon



Determination procedure for fracture depth

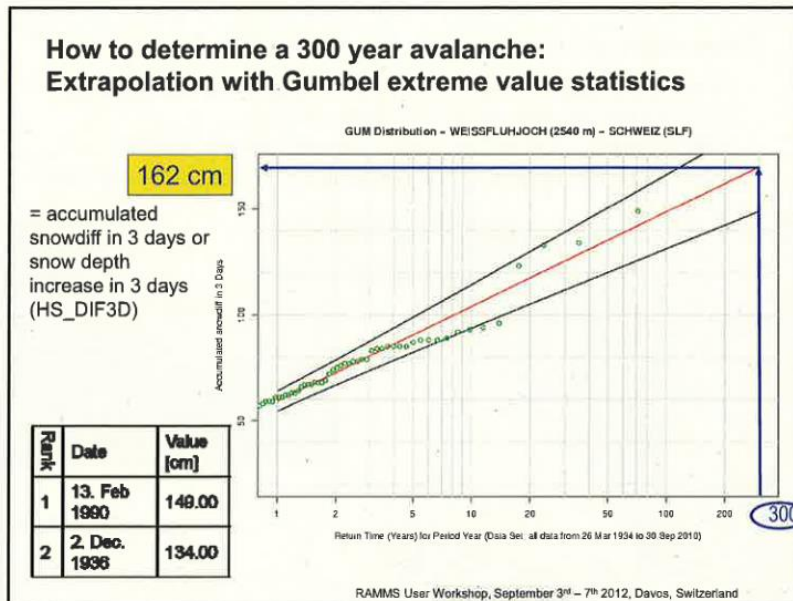
- Fracture depth d_0 is a mean value over the total fracture area. Mean fracture depth along crown line > fracture depth d_0 .
- Natural fracture depth will vary very much over release area.
- Calculation fracture depth = model assumptions \neq natural fracture depth.



Determination procedure for fracture depth

1. Choice of representative snow observations stations:
 - Length of observation period, altitude, similar climate as starting zone.
2. Determination of ΔHS_3 (accumulated snowdiff in 3 day; HS_DIF3D) for the considered return period:
 - Gumbel-diagram (available at SLF, Meteo-Schweiz)

How to determine a 300 year avalanche: Extrapolation with Gumbel extreme value statistics



Determination procedure for fracture depth

1. Choice of representative snow observations stations:
 - Length of observation period, altitude, similar climate as starting zone.
2. Determination of ΔHS_3 (accumulated snowdiff in 3 day; HS_DIF3D) for the considered return period:
 - Gumbel-diagram (available at SLF, Meteo-Schweiz)
3. Elevation correction for fracture area: +/- 5cm pro 100m
 - Gradient depends on climatic region: 3 - 7cm/100m
 - Consideration of the mean elevation of fracture area
 - For 2200m: $HS_DIF3D_{2200m} = 162 \text{ cm} - 3.4 \cdot 5 \text{ cm} = 145 \text{ cm}$
4. Determination of the basis value d^*_0 for a slope inclination of 28° (unified – not slope specific!)
 - Study plot snow observations (WFJ 2540m) = horizontal
 - $d^*_0 = HS_DIF3D \cdot \cos 28^\circ = 145 \cdot (\cos 28^\circ) = 128 \text{ cm}$

RAMMS User Workshop, September 3rd - 7th 2012, Davos, Switzerland

↙ for a nullshille

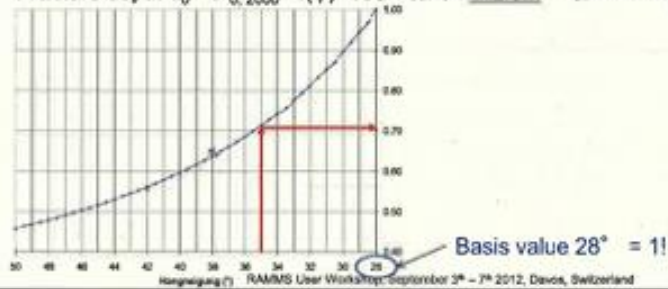
Determination procedure for fracture depth

5. Evtl. addition because of snow drift: 30-50cm

- $d_{0,2000}^* = 128 + 30 = 158$ cm
- Depends on local situation

6. Correction according to slope inclination of the starting zone $f(\psi)$

- Mean slope inclination of starting zone: 35°
- $f(\psi) = 0.291 / (\sin \psi - 0.202 \cdot \cos \psi) = 0.71$
- Fracture depth $d_0 = d_{0,2000}^* \cdot f(\psi) = 158 \cdot 0.71 = 112$ cm = **RAMMS**



**Increase of the fracture depth because of snow drift :
generally + 30....50 cm, along ridge, terrain bowl....**



Determination procedure for fracture depth

Relation between different fracture depth:

- $d_{0(300)}^* / d_{0(30)}^* = \text{ca. } 1.4$
- $d_{0(100)}^* / d_{0(30)}^* = \text{ca. } 1.2$
- $d_{0(300)}^* / d_{0(100)}^* = \text{ca. } 1.16$

Fracture depths depends strongly on the climatic region:

- Prättigau > Nordbünden > Südbünden > Mittelbünden > Engadin
- An avalanche has for the same return period and the same topography in the Prättigau a longer runout than in the Engadine valley.

RAMMS User Workshop, September 3rd – 7th 2012, Davos, Switzerland

