RAPPORT

Nr 80/2018

Skredrapport Sukkertoppen

DIMENSJONERENDE SKRED FRA SUKKERTOPPEN OG FARESONER

Jeanette Gundersen, Odd-Arne Mikkelsen,
Ingeborg Johnsen, Reidun Ursin Nikolaisen

Rapport nr 80-2018

Skredrapport Sukkertoppen

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat
Redaktør: Jeanette Gundersen
Forfatter: Jeanette Gundersen, Odd-Arne Mikkelsen, Ingeborg Johnsen, Reidun Ursin Nikolaisen

Trykk: NVEs hustrykkeri
ISBN: 978-82-410-1747-6
ISSN: 1501-2832

Sammendrag: I forbindelse med behov for nytt underlag for utredning og prosjektering av sikringstiltak for bebyggelsen under Sukkertoppen er dimensjonerende skred identifisert. Som del av dette prosjektet er det også utarbeidet reviderte faresoner som viser seg å ha større utstrekning sammenliknet med tidligere faresonekartlegging.

Emneord: Sukkertoppen, Longyearbyen, Svalbard, snøskred, skredsimulering, faresone, kartlegging, vindtransportert snø, utløsningsområde, klimaanalyse, bruddkanthøyde, RAMMS, SAMOS

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Epost: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

15.03.2018

Norges vassdrags- og energidirektorat

NVE

Skredrapport Sukkertoppen

Dimensjonerende skred fra Sukkertoppen og faresoner for Lia under Sukkertoppen

Dato:	15.03.2018	Saksnr.:	201708556-27
Revidert:			
Kommune:	**Longyearbyen**	**NVE Region Nord**	
Fylke:	**Svalbard**	Postboks 394, 8505 NARVIK	
Inngrepsnr.:		Tlf.: 095 75	Faks:

		Skredrapport Sukkertoppen	
Saksbehandler og medforfattere:	Jeanette Gundersen. Odd-Arne Mikkelsen, Ingeborg Johnsen Reidun Ursin Nikolaisen	Adm.enhet: RN	Sign.:
Ansvarlig:	Knut Aune Hoseth	Adm.enhet: RN	Sign.:
Saksnr: 201708556	**Arkiv:**	**Kommune:** Longyearbyen	**Fylke:** Svalbard

Sammendrag:

NVE bistår Longyearbyen Lokalstyre (LL) med vurdering av skredutsatt bebyggelse under Sukkertoppen i Longyearbyen, Svalbard. Eksisterende faresonekartlegging ble utført i 2016 (NVE, 2016). Snøskred fra Sukkertoppen i 2017 gikk lengre enn faresonen for 1000-års skredet. Kunnskap fra snøskredhendelsen og erfaring med lokal snøskredvarsling i området viser at det er nødvendig å se på flere og større utløsningsområder i øvre del av Sukkertoppen, samt effekten av vindtransportert snø inn i utløsningsområdene.

I forbindelse med behov for nytt underlag for utredning og prosjektering av mulige sikringstiltak for bebyggelsen under Sukkertoppen er det nødvendig å identifisere dimensjonerende skred, og herunder inngår utarbeidelse av reviderte faresoner. I dette prosjektet har NVE satt sammen en faggruppe med representanter fra ulike skredfaglige miljøer, og alle aktørene har utført individuelle simuleringer og beregninger av skred med gjentaksintervall 1/100, 1/1000 og 1/5000. Resultatet er omforente faresoner og grense for dimensjonerende skred.

På Svalbard er pågående klimaendringer godt synlig, og for å ivareta usikkerheten i klima er det valgt et tillegg på nedbøren med 30 %. Resultatet fra arbeidet viser at den viktigste faktoren for omfang og rekkevidde av skred er i hovedsak nye utløsningsområder i øvre del av Sukkertoppen, samt vindpåvirkning med pålagring av snø i utløsningsområdene.

Faresonene som er utarbeidet i dette prosjektet er forskjøvet sammenlignet med tidligere kartlegging, noe som får konsekvenser for framtidig arealbruk og beredskap i området.

Rapportens hensikt:
Identifisere dimensjonerende skred fra Sukkertoppen og reviderte faresoner for bebyggelsen Lia under Sukkertoppen.

Innholdsfortegnelse

Innholdsfortegnelse *3*
1. Innledning *4*
2. Bakgrunn *5*
2.1 Etablering av faggruppe skred **5**
3. Grunnlag for skredsimulering *6*
3.1 Meteorologiske data **6**
3.2 Utløsningsområder og bruddkanthøyde **6**
3.3 Effekten av vindtransportert snø i utløsningsområdene **6**
3.4 Klimaendringer **7**
3.5 Laserscanning av fjellsiden Sukkertoppen **7**
3.6 Tidligere hendelser **8**
4. Metoder *9*
4.1 Simuleringsverktøy **9**
RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) 9
SAMOS (Snow Avalanche MOdelling and Simulation) 9
ALFA-BETA 9
4.2 Faresonekartlegging **10**
4.3 Faresoner og byggteknisk forskrift TEK17 ..... **10**
5. Resultater *12*
5.1 Faktorer med innvirkning på faresonen **12**
5.2 Endringer i faresoner under Sukkertoppen **12**
5.3 Dimensjonerende skred **13**
6. Videre oppfølging *15*
Referanser *16*
Vedlegg *17*

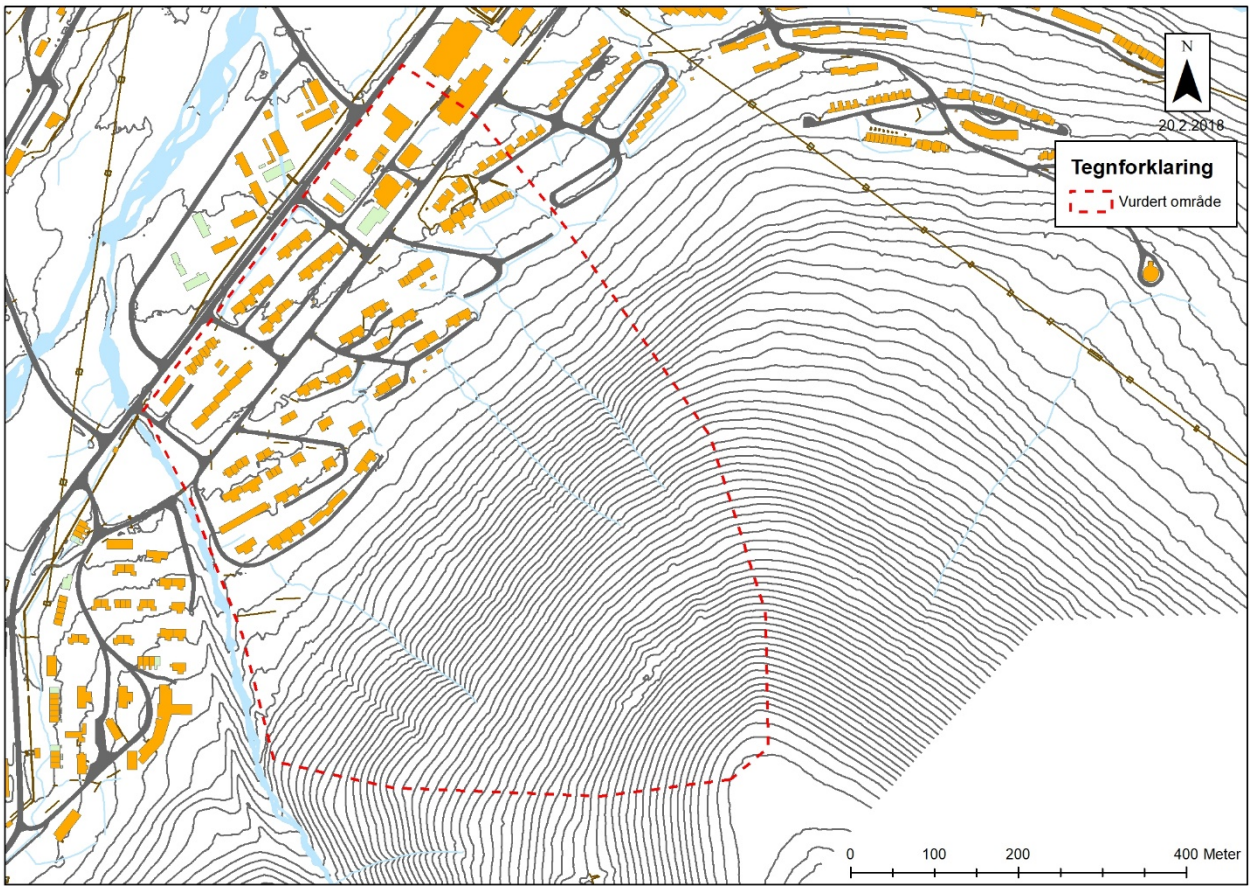
1. Innledning

NVE bistår Longyearbyen Lokalstyre (LL) med kartlegging og vurdering av skredutsatt bebyggelse i Longyearbyen, Svalbard. Bebyggelsen i Lia under Sukkertoppen er utsatt for snøskred og sist hendelse var i 2017. Snøskredet gikk lengre enn faresonen for 1000-års skred som var tilgjengelig for dette området. I forbindelse med prosjektering av sikringstiltak er det behov for utarbeidelse av dimensjonerende skred fra Sukkertoppen, og dette er bakgrunn for at dette prosjektet ble iverksatt. Revisjon av eksisterende faresoner for Lia under Sukkertoppen inngår som en del av arbeidet. For å bistå i prosjektet har NVE satt sammen en faggruppe bestående av representanter fra NVE, NGI, Skred AS og UNIS.

Denne rapporten beskriver arbeidet utført av faggruppen og presenterer reviderte faresoner, samt dimensjonerende skred som underlag for videre prosjektering av sikringstiltak. Faresonene og vurdering av dimensjonerende skred vil påvirke fremtidig arealutnyttelse, og vil kunne anvendes som deler av beslutningsgrunnlaget i beredskapssituasjoner.

Områdets avgrensning er vist i figur 1.

I tillegg til dette dokumentet er det utarbeidet et konseptstudie (NVE, 2018) som omhandler aktuelle sikringstiltak for Sukkertoppen og Vannledningsdalen



Figur 1: Kartet viser omriss av området som er farevurdert.

.

2. Bakgrunn

Prosjektet er initiert på bakgrunn av behov for identifisering av dimensjonerende skred og nye faresoner for bebyggelsen i Lia under Sukkertoppen. Dette vil videre være grunnlag for videre prosjektering av sikringstiltak. Skredhendelsen i 2017 viste at snøskredet som ble utløst i øvre del av Sukkertoppen gikk lengre enn eksisterende faresone for 1000-årsskredet i kartleggingen fra 2016. NVE har i tillegg tilegnet seg ny kunnskap om området i forbindelse med den lokale snøskredvarslingen som har vært operativ siden 2016.

I 2015 og 2017 gikk det snøskred fra Sukkertoppen med alvorlige konsekvenser. Det har gjennom tiden blitt utført ulike skredfarekartlegginger i området. Senest av NVE i 2016 (NVE, rapport 91/2016). Skredhendelsen i 2017 viste imidlertid at det på Svalbard kan forventes større skred enn tidligere antatt. Hendelsen er analysert i NVE-rapporten «Gjennomgang og evaluering av skredhendelsen i Longyearbyen 21.02.2017» (NVE, 2017) og konkluderer med at det er nødvendig å se på større, og flere utløsningsområder. Rapporten konkluderer i tillegg med at det ikke kan legges stor vekt på historiske hendelser før snøskredet i desember 2015, på grunn av endringer i værmønsteret de senere år. Det legges vekt på at man både i varsling og kartlegging må ta større hensyn til at snøskred kan løsne i deler av terrenget der det ikke er dokumenterte tidligere hendelser, så lenge det er skredterreng.

2.1 Etablering av faggruppe skred

Høsten 2017 kontaktet NVE NGI, Skred AS og UNIS med invitasjon til å være med på et prosjekt der det skulle utføres individuelle vurderinger av dimensjonerende skred og sammen utarbeide faresoner under Sukkertoppensom et omforent resultat. I prosessen har det vært flere møter, samt felles befaring av Sukkertoppen og området nedenfor. Før arbeidet med simuleringer ble iverksatt har det vært tett dialog i gruppen for å enes om hvordan prosjektet best bør gjennomføres, og avklaring av eventuelle felles kriterier og parametere for simuleringene. Alle partene har produsert arbeidsrapporter (vedlegg 1-4) som beskriver selve arbeidsprosessen, samt relevante inngangsparametere brukt i simuleringene. NVE har ikke satt krav til detaljeringsnivået i arbeidsdokumentene, men det inngår beskrivelser for valg av utløsningsområder, klimaanalyse, tilbakekalkulering av tidligere skredhendelser og skredsimuleringer av de ulike scenarioene. Analyse av snøskredet fra 2017 er utført i hendelsesrapporten (NGI, 2017) og gir grunnlag for kalibrering av datamodellene til snøforholdene på Svalbard.

Dette arbeidet vil være grunnlagsdata for videre prosjektering av sikringstiltak. Resultatet fra arbeidsrapportene er benyttet i fastsetting av omforente skredfaregrenser for skred med årlig gjentaksintervall 1/100, 1/1000 og 1/5000.

3. Grunnlag for skredsimulering

3.1 Meteorologiske data

I prosjektet er det benyttet meteorologiske data fra Svalbard lufthavn 99840 (1975 - 2017) og Longyearbyen 99860 (1911 – 1977). Som input i simuleringer av skred med årlig gjentaksintervall 1/1000 og 1/5000 er dette korte måleserier, og det bemerkes at det er stor usikkerhet for omfang av disse gjentaksintervallene.

Nedbørsmålingene for Longyearbyen er i dag basert på målestasjonen på Svalbard lufthavn, og vil ikke alltid være representativt for nedbøren i Longyearbyen. Ved østavær vil det normalt falle mer nedbør i Longyearbyen enn ved flyplassen.

3.2 Utløsningsområder og bruddkanthøyde

Utløsning av snøskred krever at terrenget er tilstrekkelig bratt, terrenghelning omkring 28-55 grader gir typisk potensiale for store snøskred. Er det brattere vil snøen kontinuerlig skli ut og ikke akkumuleres i fjellsiden. Snøskred fra Sukkertoppen utløses i hovedsak som flakskred, og bruddkanten markerer øvre/bakre del av utløsningsområdet. De øvre utløsningsområdene ligger på ca. 320 moh, og de nedre på ca. 180 moh. Det er flere markerte renner og søkk i fjellsiden som vil være med på å styre retningen på skred, avhengig av fordelingen av snø i terrenget. Generelt kan man si at de faktorene som har størst betydning for snømengde i utløsningsområdet og høyden på bruddkant er nedbør, vindforhold og terrengformasjon.

Meteorologiske data gir grunnlag for snømengden som defineres i utløsningsområdet og videre høyden på bruddkanten. Dette gir også indikasjoner på snømengden i skredbanen som kan rives med og tas opp av skredet. Formen på terrenget spiller en viktig rolle for hvor mye snø som kan samles, en skålformasjon vil samle mer snø enn en ryggformasjon. Store flate arealer i tilgrensning til utløsningsområdet gjør at vinden får tilgang på snø som kan avsettes i utløsningsområdet.

I arbeidet med å bestemme bruddkanthøyde i utløsningsområder anvendes ofte en ekstremverdianalyse av nedbørsmengde over tre døgn som basis for lokale tilpasninger, vurderinger og beregninger. Det eksisterer ikke norske retningslinjer hvordan beregne bruddkanthøyde i et snøskred. Det er valgt å benytte eksisterende metode benyttet i Sveits som utgangspunkt for å angi inngangsverdi i dimensjonerende bruddkanthøyde.

3.3 Effekten av vindtransportert snø i utløsningsområdene

Vind kan ha stor innvirkning på snømengde i utløsningsområdet og herunder bruddkanten. For kartleggingsområdet understreker alle deltakerne i faggruppen viktigheten av vind for skredfaren fra Sukkertoppen. Den dominerende vindretningen i Longyearbyen-området er fra østlig sektor. Øst for Sukkertoppen er det store flate platåer og områder som samler løs snø, som blir tilgjengelig for vindtransport mot vest og inn i utløsningsområdene. Det krever ikke mange centimeter løssnø på flatene før det utgjør en betydelig mengde i utløsningsområdet dersom dette transporteres inn. Ved snøskredhendelsene i desember 2015 og februar 2017 var det kraftig vind fra øst og stor vindtransport av snø inn i utløsningsområdene.

De aktuelle utløsningsområdene i øvre del av fjellsiden ligger i le for hovedvindretningen. Generelt vil østre del av fjellsiden påvirkes mest av vindtransport, imens området mot Vannledningsdalen påvirkes i mindre grad. Det er i tillegg et flatt parti mellom toppunktet på Sukkertoppen og de øvre utløsningsområdene, hvor det legger seg opp snø tilgjengelig for transport. Dette området er ca. 200m x 300 m. Deltakerne i faggruppen har i sine simuleringer tatt hensyn til pålagring av vindtransportert snø i utløsningsområdene ved å bruke ulike påslag i bruddhøyden.

3.4 Klimaendringer

Svalbard har hatt et tørt og kaldt klima med lite nedbør, noe som gir gode forhold for dannelse av svake lag i snødekket, men med begrensede snømengder generelt.

Eksisterende skredfarekartlegging (NVE, 2016), er basert på historisk informasjon om klimaendringer basert på meteorologiske data fra målestasjoner, som for ordinær skredfarekartlegging.

Effekten av pågående klimaendringer er godt synlig på Svalbard, blant annet gjennom en merkbar økning av temperatur de siste årene. Ifølge Vikhamar-Schuler et. al (2016) har temperaturen på Svalbard steget vesentlig mer enn på fastlandet siden 1900, ca. 3 °C vs. ca. 1 °C. Det er vintertemperaturen som har steget mest, totalt ca. 10 °C. Årsnedbøren har økt med 20-30% i Longyearbyen-området fra 1900 til i dag, og trenden forventes å fortsette mot slutten av århundret. Det er videre forventet at mye av nedbøren vil falle som regn i stedet for snø om vinteren. Økte temperaturer og nedbør i framtiden kan medføre en mer gunstig oppbygging av snødekket, slik at det kreves betraktelig større snømengder før naturlige skred utløses.

Det er viktig å poengtere at det er store usikkerheter i klimaframskrivning. Dette er knyttet til ufullstendig kunnskap om klimasystemets følsomhet, framtidig naturlig klimavariasjon og begrensninger i klimamodellene.

Det er i prosjektet valgt et tillegg med å legge til økt nedbør (30%) for å ivareta usikkerhetsfaktor for klima.

3.5 Laserscanning av fjellsiden Sukkertoppen

UNIS etablerte laserscanning av Sukkertoppen vintersesongen 2016/2017, og har innhentet data om fordelingen av snødekket i fjellsiden. Skredbanen fra 2017 er grundig analysert ved å sammenligne endringer i snøoverflaten før og etter skredet. Laserscanningen gir god indikasjon på effekten av vindtransportert snø, en tilleggsbelastning og faktor som er vanskelig å fange opp kun basert på data fra målestasjoner. Fjellsiden er også scannet på barmark, slik at snømengden i terrengformasjoner fanges opp. Ved pålagring av snø endres helningsgradienten og analyser av oppbyggingen gir indikasjon på potensielle utløsningsområder. Informasjon om utløsningsområde, høyde på bruddkant, areal på medrivning av snø langs skredbanen og utløspdistansen tilfører prosjektet viktig data for farekartleggingen og vurderingen av dimensjonerende skred. I tillegg gir informasjonen viktig grunnlag for kalibrering av simuleringsverktøyene RAMMS og Samos. Dataene er prosessert i ArcGIS og er gjort tilgjengelig for deltakerne i faggruppa.

3.6 Tidligere hendelser

I dette prosjektet er det på oppdrag fra NVE utarbeidet en rapport (NGI, 2017) som beskriver tidligere skredhendelser og tidligere skredfarekartlegginger i området. NGI var på stedet kort tid etter skredhendelsene i 2015 og 2017 og har gjort egne analyser av hendelsene som gir relevante opplysninger for simuleringene. Det er i rapporten utarbeidet en analyse av værforhold i forkant av skredhendelsene. Analysene viser at mange av skredene er utløst i perioder med lite nedbør, noe som viser at nedbør alene ikke er utløsende faktor for skred fra Sukkertoppen. Arbeidet ble ferdigstilt høsten 2017 og er gjort tilgjengelig for alle aktørene i arbeidsgruppa.

Skredene fra Sukkertoppen har lang rekkevidde før de stopper, dette gjelder særlig skredhendelsen i 2015. Snøskredet februar 2017 løsnet i en del av fjellsiden hvor det ikke er kjent at det tidligere har løsnet skred. Snøskredet i seg selv var av begrenset størrelse, men gjorde stor skade på bebyggelsen. Terrenget ligger til rette for å samle mye mer snø enn ved denne hendelsen, og det er potensiale for at det kan gå større skred. Forholdene på Svalbard med lange kuldeperioder og relativt tynt snødekke gir potensiale for dannelse av svake lag i snødekket. De siste to skredhendelsen har vært preget av kald og tørr løssnø i skredbanen som gir gunstige forhold for lange utløp.

Bebyggelsen under Sukkertoppen ble etablert rundt 1970-tallet, i forbindelse med åpningen av gruvevirksomhet. I et skredperspektiv er dette en relativ ny bosetting, og dokumenterte skredhendelser er begrenset til det tidspunktet de første husene ble bygd, om hendelser i det hele tatt ble rapportert. Beboerne var i hovedsak gruvearbeidere og det kan tenkes at alle farene i forbindelse med gruvedrift opplevdes som mer truende enn snøskred fra Sukkertoppen.

4. Metoder

I dette avsnittet beskrives de viktigste metoder og verktøy benyttet i arbeidet med utarbeidelse av faresoner og dimensjonerende skred fra Sukkertoppen.

Det som skiller ordinær kartlegging av skredfare på fastlandet sammenlignet med Sukkertoppen er i hovedsak NVEs forsøk med å legge til 30 % økning av nedbør. I tillegg er arbeidet organisert ulikt ved at det totalt er 4 uavhengige vurderinger som er satt sammen til omforente faresoner og grense for dimensjonerende skred.

4.1 Simuleringsverktøy

Det fins flere modeller for simulering av snøskred, både empiriske og numeriske. I dette prosjektet brukes de numeriske modellene RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation), SAMOS (Snow avalanche modelling and simulation), i tillegg til den statistiske metoden Alfa-Beta. Simulering er utført av høyt kvalifiserte og erfarne fagpersoner. Bruken av flere verktøy er med på å styrke validiteten på arbeidet.

RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation)

RAMMS er et todimensjonalt simuleringsverktøy basert på Voellmy-modellen, som beregner hastighet og flytehøyde over et tredimensjonalt terreng. Modellen beregner skredbane basert på topografi i form av en terrengmodell. Utløsningsområdet og snødybden i utløsningsområdet defineres, og verdier for friksjonsparametere justeres i programmet. Modellen tar ikke hensyn til medriving/erosjon av snø i skredbanen og det anbefales i brukermanualen at man angir et større utløsningsområde for å kompensere for dette. Stopp-kriteriet er basert på bevegelsesmengde, som videre er et produkt av masse og fart.

SAMOS (Snow Avalanche MOdelling and Simulation)

Samos er et tredimensjonalt simuleringsverktøy som på samme måte som RAMMS er basert på Voellmy-modellen. Samos beskriver både den faste delen av skredet og snøskyen som dannes (partikler i suspensjon), samt overgangen mellom disse lagene i tørre flakskred. Verktøyet er utviklet i Østerrike og har vært i bruk siden 1999. Samos beregner hastighet, tetthet og trykkforskjeller langs hele skredløpet, basert på topografi i form av en terrengmodell. Skred utløses som flakskred og suspensjon av partikler (snøskyen i øvre del av skredet) starter når skredmassene når en hastighet på 20 m/s. Modellen tar hensyn til medrivning og identifiserer på denne måten også sekundære utløsningsområder. I tillegg tar den hensyn til avsetning langs skredløpet, noe som kan gi noe kortere utløpsdistanse på grunn av reduksjon av hastighet.

ALFA-BETA

Alfa-Beta modellen er en statistisk topografisk modell utviklet på 1980-tallet for å estimere maksimum utløpsdistanse for snøskred. Den tar utgangspunkt i over 200 store snøskred som har forekommet i Norge, og utfra analyser av hvor skredet startet og stoppet har man utarbeidet en matematisk formel for å estimere utløpslengden på et skred.

4.2 Faresonekartlegging

Grunnlagsdata for faresonekartlegging er kartgrunnlag og terrengmodeller, geologiske kart (berggrunnsgeologiske kart og kvartærgeologiske kart), flybilder, skredhistorikk, eksisterende skredfarevurderinger og tidligere rapporter om skred i området, samt klimaanalyse. I tillegg gjøres det feltarbeid for blant annet å plukke ut utløsningsområder. Skredsimulering utføres med forskjellig programvare som et input i fastsetting av faresoner. Faglig skjønn er en viktig del av fastsetting av endelige faresoner.

Tidlig i prosjektet ble det klart at den dimensjonerende skredtypen fra Sukkertoppen er snøskred for alle gjentakstintervallene, og skredfaren er vurdert i henhold til TEK17. Merk også at jord- og flomskred kan true bebyggelsen, men snøskred er vurdert til å være skredtypen som dimensjonerer faresonene. Sørpeskredfare fra Vannledningsdalen inngår ikke i dette arbeidet.

Ved modellkjøring og beregninger av utbredelse av snøskred vil det alltid være en viss grad av usikkerhet. Det fins ingen norsk standard for dette, men deltakerne i faggruppa har anvendt en kombinasjon av skjønn, erfaring og metoder anbefalt i de Sveitsiske retningslinjer. Når det gjelder inputdata for simuleringene er klima den mest usikre faktoren da dette er generelt er beheftet med stor usikkerhet i et lengre perspektiv.

4.3 Faresoner og byggteknisk forskrift TEK17

Faresoner for skred klassifiseres i henhold til inndelingen for sikkerhet mot skred i TEK17 og deles inn i områder med største nominelle årlige sannsynlighet på 1/100, 1/1000 og 1/5000. Dette angir den årlige sannsynligheten for skredskader av betydning, det vil si skred med en intensitet som kan medføre fare for liv og helse eller større materielle skader. Dette innebærer at en for de fleste skredtyper kan redusere utløpsområdet i forhold til det maksimale utløpet til skred med den aktuelle sannsynligheten.

Nedenfor er sikkerhetsklassene og eksempler på ulike tillatte byggverk angitt:

Tabell 1: Plassering av tillatte byggverk i sikkerhetsklasser. (Kilde: Direktoratet for byggkvalitet, DiBK)

Sikkerhets-klasse	**Beskrivelse av tillatte byggverk**	**Eksempler på byggverk (kort versjon)**
S1 (største årlige nominelle sannsynlighet 1/100 år)	Bygg hvor det normalt ikke oppholder seg personer og der det er små økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.	Garasje, uthus, naust, mindre brygger og lagerbygning med lite personopphold.
S2 (største årlige nominelle sannsynlighet 1/1000 år)	Byggverk hvor det normalt oppholder seg maksimum 25 personer, eller der det er middels økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.	Enebolig, tomannsbolig og eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med maksimum 10 boenheter. Arbeids- og publikumsbygg/brakkerigg/overnattingssted hvor det normalt oppholder seg maksimum 25 personer.
S3 (største årlige nominelle	Byggverk der det normalt oppholder seg mer enn 25 personer, eller der det er store økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser.	Eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med mer enn 10 boenheter.

sannsynlighet 1/5000 år)		Arbeids- og publikumsbygg/brakkerigg/overnattingssted hvor det normalt oppholder seg mer enn 25 personer. Skole, barnehage, sykehjem og lokal beredskapsinstitusjon.

Ved nybygg skal vanlige bolighus ligge i områder som oppfyller krav til sikkerhetsklasse S2. Det betyr at største årlige nominelle sannsynlighet for skred skal være 1/1000.

De samme kravene gjelder ikke for eksisterende bebyggelse. Det finnes i dag en rekke boliger på fastlandet og på Svalbard som ligger i områder der sannsynligheten for skred er større enn 1/100 og 1/1000 år.

5. Resultater

Resultater fra arbeidet med vurdering og simulering av snøskred er presentert i de vedlagte arbeidsrapportene.

5.1 Faktorer med innvirkning på faresonen

Nye simuleringer har inkludert flere og større løsneområder enn simuleringene og vurderingene som lå til grunn for det eksisterende faresonekartet (NVE, 2016). Kartleggingen fra 2016 tok blant annet ikke med de øvre løsneområdene. Snøskred som løsner i øvre del av Sukkertoppen kan utløse sekundære skred lengre ned i fjellsiden, og dette bidrar til større skredmasser i bevegelse og større utbredelse/utløp av snøskredet. I tillegg til flere og større løsneområder har de nye vurderingene også tatt hensyn til effekten av vindtransportert snø og klimaendringer i simuleringene.

Hensyn til vindtransportert snø

Alle deltakerne i faggruppen har lagt stor vekt på pålagringen av snø med vind, noe som stemmer godt med analysene av snødekket UNIS har utført i forbindelse med laserscanningen. Påslag som følge av vindtransportert snø har generelt vært mye større enn klimapåslaget, dette støttes av resultater fra gjennomgangen av historiske hendelser og koplingen til værdata – vind fra østlig sektor uten at det har vært store nedbørsmengder, har vært tilfelle ved flere av hendelsene. Det er særlig østre del av øvre utløsningsområde, som ligger i le for herskende vindretning som påvirkes mest, mens vestre del mot Vannledningsdalen påvirkes i mindre grad av vindtransportert snø.

Hensyn til usikkerhet i klimaendringer

NVE satte som utgangspunkt at det skulle legges til grunn et tillegg på 30% økt nedbør i beregningene som ligger til grunn i simuleringene. Dette er implementert på forskjellige måter av medlemmene i faggruppen. Se vedlegg 1-4 for mer informasjon.

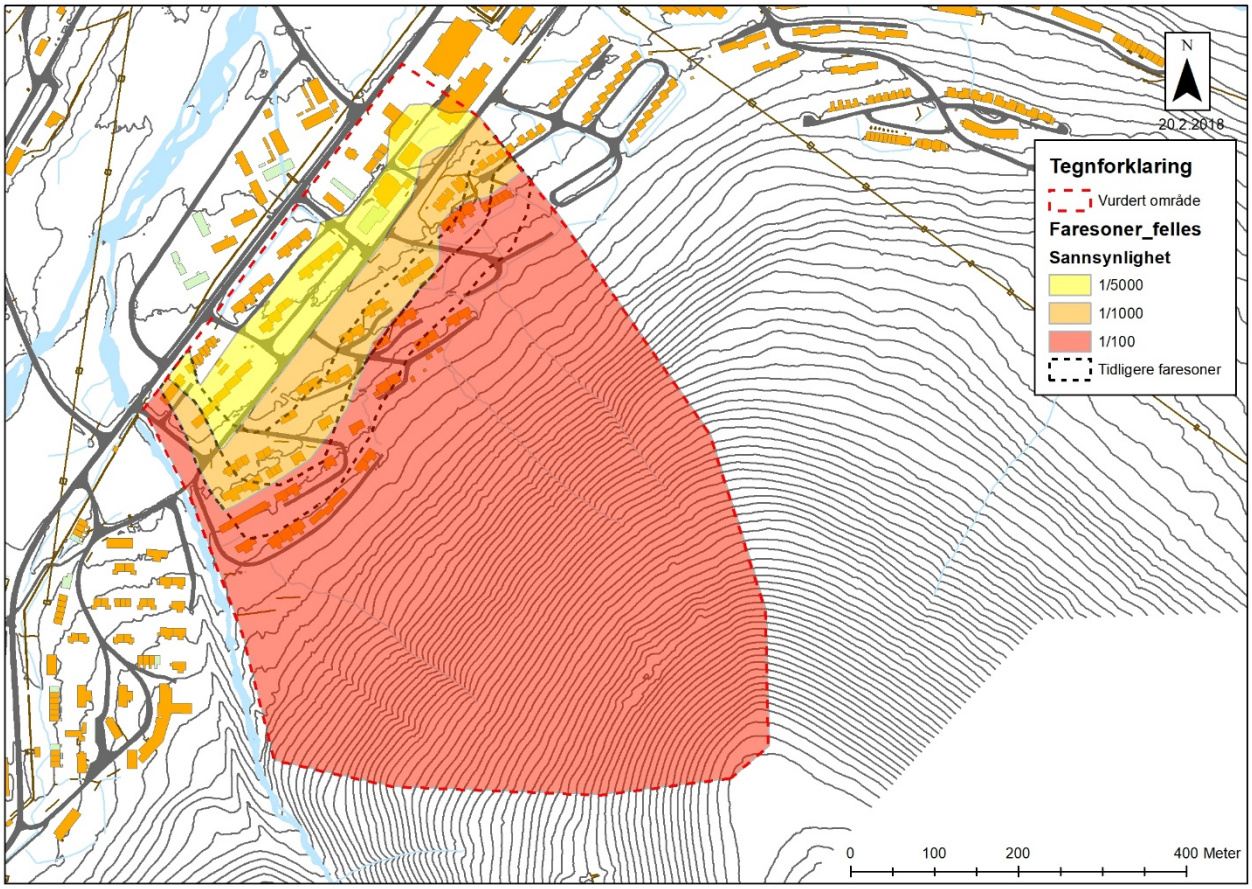
Klimafraskrivning er beheftet med stor usikkerhet da det er svært mange variabler som virker inn, både naturlig variasjon og menneskeskapt påvirkning. NVE har gjort et forsøk ved å legge til et påslag av nedbør. For framtiden er det likevel vanskelig å konkludere med hvordan dette påvirker skredfaren, da dette videre er avhengig av blant annet temperatur – som igjen har betydning for snøgrense og fuktigheten i snødekket. Resultat fra simuleringene viser at den utslagsgivende faktoren som er førende for bruddkanthøyden er tillegget for vindtransportert snø. I denne sammenheng er det viktig å påpeke at økte nedbørsmengder vil gi økt potensiale for vindrift av snø, som igjen kan påvirke hyppigheten av skred. Dette vil trolig ikke ha betydelig innvirkning for størrelsen på skredene.

5.2 Endringer i faresoner under Sukkertoppen

Resultatene og vurderingene til deltakerne i faggruppa ble lagt fram og diskutert på et arbeidsmøte i Narvik januar 2018, og det ble enighet om omforente faresoner under møtet.

Resultatet av de reviderte faresonene er presentert i figur 2. Grensen for samtlige faresoner er forskjøvet nærmere sentrum i forhold til faresonekartet utarbeidet i 2016. Faresonen 1/100 ligger nært der tidligere skred med nominell årlig sannsynlighet på 1/1000 år gikk, og nå inkluderer den

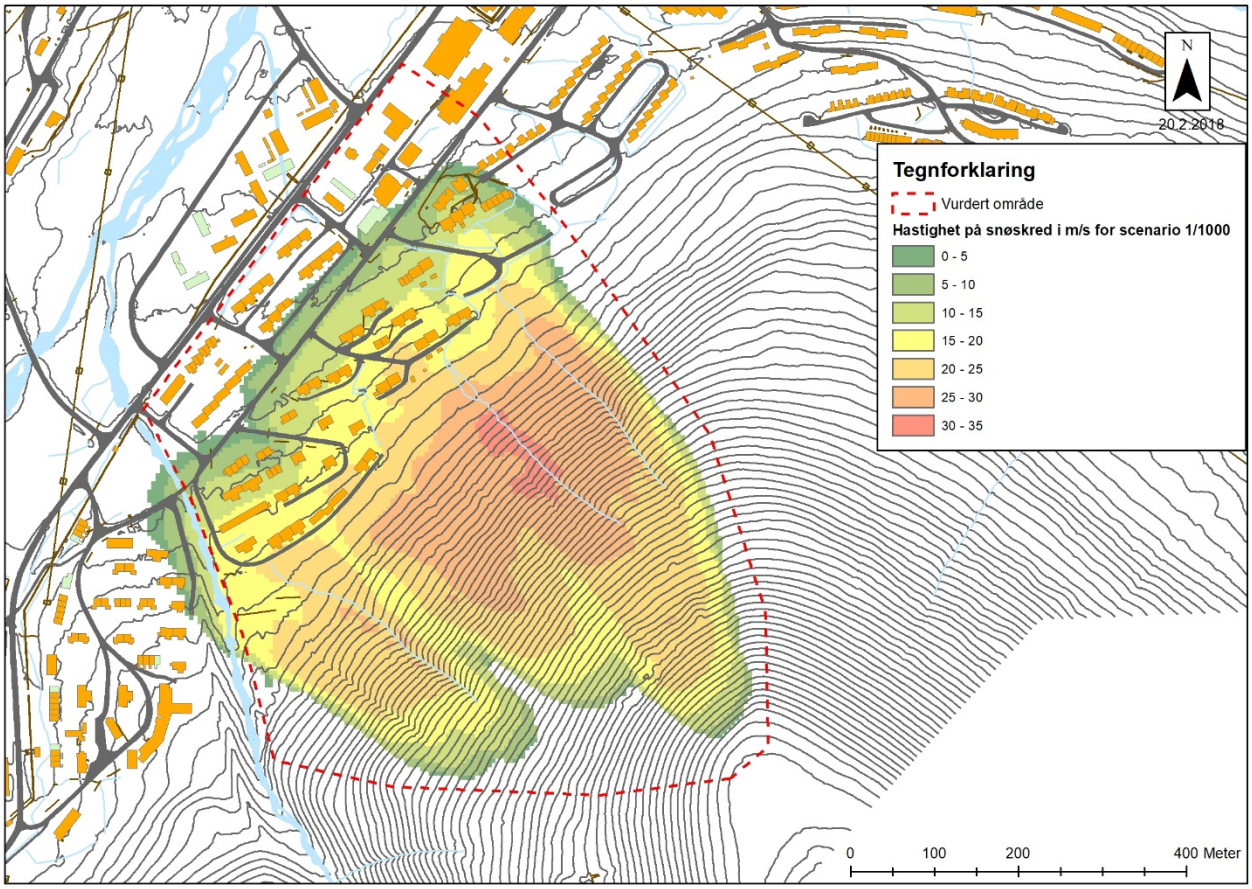
også nest øverste husrekke. Faresonen 1/1000 går nå i hovedsak rett ovenfor Hilmar Rekstens vei. De ulike utløsningsområdene gir ulike utbredelse av skredene, og området der faresonen 1/1000 krysser veien sammenfaller med skredbanen til skredet i 2017. Faresonen med årlig sannsynlighet 1/5000 strekker seg i vest ned til vei 500 og fortsetter langs vei 211 til vei 223, og rett nedenfor vei 223 helt nord i området.



Figur 2: Kartet viser reviderte faresoner og eksisterende faresoner (NVE, 2016). Stiplede linjer illustrerer grensene i NVE rapport 91/2016, mens de fargede områdene er det omforente resultatet av faggruppens arbeid

5.3 Dimensjonerende skred

For å komme fram til dimensjonerende skred som grunnlag for utredning av mulig plassering av sikringstiltak er det tatt utgangspunkt i hastigheten i alle simuleringene for scenarioet til 1000-årsskredet i utløpsområdet. Hastigheten for en av simuleringene er vist i Figur 3 og hastigheten for snøskred er avgjørende for plassering og utforming av sikringstiltak. Dimensjonerende skred stopper like ved Hilmar Rekstens vei, og for området nærmest Spisshusene og ned langs vei 228 er det skred fra ravinen (der snøskred i 2017 ble utløst) som gir størst hastighet. Skred som passerer veien vil kunne nå bolighusene, men med lav hastighet.

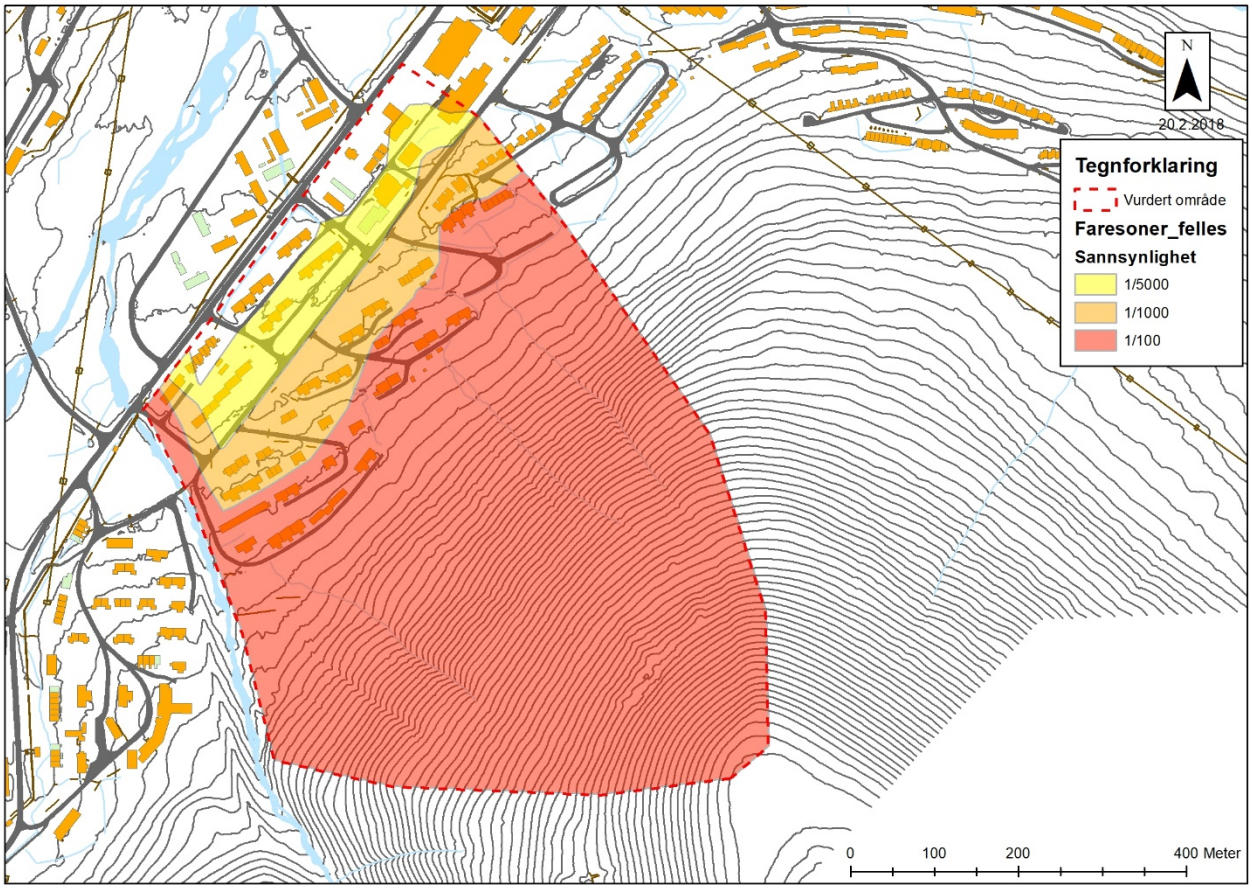


Figur 3: Kartet viser hastighet i m/s på modellert snøskred i NVEs scenario med gjentakstintervall 1/1000. Modellert snøskred indikerer hastigheter omkring 20 m/s ved øvre husrekke. Snøskredet stopper omkring veg 200 også kjent som Hilmar Rekstens vei.

6. Videre oppfølging

Revidert faresonekart og resultater fra dimensjonerende skred får innvirkning på framtidig arealutnyttelse i Lia under Sukkertoppen. Kartet nedenfor viser faresoner for Lia under Sukkertoppen (Figur 4), og vil erstatte eksisterende faresonekartlegging fra 2016, innenfor områdeavgrensningen.

Mulige sikringstiltak er omtalt i konseptstudiet.



Figur 4: Nye faresoner for området Lia under Sukkertoppen erstatter faresonene fra 2016 innenfor områdeavgrensningen.

Referanser

DiBK, 2018. https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/ informajon hentet 21.02.2018

NGI, 2017. Sukkertoppen Svalbard – avalanche incidents. Documentation of avalanches. NGI-report 20171006-01-R

NVE, 2016. Skredfarekartlegging i utvalgte områder på Svalbard. NVE Rapport nr 91-2016.

NVE, 2017. Gjennomgang og evaluering av skredhendelsen i Longyearbyen 21.02.2017. NVE Rapport nr 31-2017

NVE, 2018. Konseptstudium – Sikringstiltak Sukkertoppen og Vannledningsdalen. NVE Rapport nr

Vikhamar-Schuler, D., Førland, E. J., Hisdal, H., 2016. Kort oversikt over klimaendringer og konsekvenser på Svalbard. NCCS report no. 2/2016.

Vedlegg

Vedlegg 1	Arbeidsrapport NGI
Vedlegg 2	Arbeidsrapport NVE
Vedlegg 3	Arbeidsrapport Skred AS
Vedlegg 4	Arbeidsrapport UNIS

REPORT

Longyearbyen – Sukkertoppen

EVALUATION AND SIMULATION OF AVALANCHE RUNOUT

DOC.NO. 20170910-01-R
REV.NO. 0 / 2018-02-06

NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE
NGI.NO

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Project

Project title:	Longyearbyen - Sukkertoppen
Document title:	Evaluation and simulation of avalanche runout
Document no.:	20170910-01-R
Date:	2018-02-06
Revision no. /rev. date:	0 /

Client

Client:	NVE - Region Nord
Client contact person:	Knut Hoseth
Contract reference:	Confirmation of order 25th October 2017

for NGI

Project manager:	Kjetil Brattlien
Prepared by:	Kjetil Brattlien, Peter Gauer and Christian Jaedicke
Reviewed by:	Peter Gauer

Summary

NGI has been contracted by NVE to evaluate avalanche runout for the area under the Sukkertoppen Mountain in Longyearbyen.

The objective of this report is to give input to NVE in their work making a new hazard map in the area for avalanches with annual nominal probability of 1/100, 1/1000 and 1/5000. This report does not consider slush flows in Vannledningsdalen nor debris flows in the area.

Extreme avalanches might have both larger initial volumes and less friction in the track than the 2015 and 2017 avalanches. NGI has made RAMMS simulations with altitude limits of 50 m and 10 m to simulate runout in conditions with lower friction also at low elevation. These friction parameters are used in simulations with reasonable release areas and thickness. The release area is at elevation 250-350 m, and avalanches are believed to be thicker in the east part close to the ridge. The following simulations are considered to be especially relevant for the avalanche hazard zoning:

- Figure 4.6 shows simulations with 75 cm fracture height in the west part of the release area and 125 cm fracture height in east part. The simulation is considered to be relevant for 100 year runout.
- Figure 4.7 shows simulations with 100 cm fracture height in west part of the release area and 150 cm fracture height in east part. The simulation is considered to be relevant for 1000 year runout.
- Figure 4.8 shows simulations with 150 cm fracture height in west part of the release area and 200 cm fracture height in east part. The simulation is considered to be relevant for 5000 year runout.
- Figure 4.9 shows simulations with 100 cm fracture height. The simulation is considered to be relevant for 1000 year runout.
- Figure 4.10 shows the alfa-beta calculations where the upper row of houses are close to the beta-point.

The objective of this report was not to draw new hazard zones.

Contents

1 Introduction 6
2 Terrain 7
3 Climate 8
3.1 Data sources 8
3.2 Climate overview 8
3.3 Wind climate 13
3.4 Climate change 14
3.5 Weather relevant for avalanche events 15
3.6 Weather situations leading to avalanches in Lia and Sukkertoppen 17
4 Simulation of avalanche runout 17
4.1 Back calculation of 2015 and 2017 avalanches 18
4.2 Dependency on release volume and release elevation 20
4.3 Runout of extreme avalanches 22
4.4 Sensitivity 25
5 References 26

Review and reference page

1 Introduction

NGI has been contracted by NVE to evaluate avalanche runout for the area under Sukkertoppen Mountain in Longyearbyen. Figure 1.1 shows an overview map where avalanche runout is evaluated within the blue line.

The objective of this report is to give input to NVE in their work making a new hazard map in the area for avalanches with annual nominal probability of 1/100, 1/1000 and 1/5000. This report does not consider slush flows in Vannledningsdalen at the west boundary of the blue line nor debris flows from Sukkertoppen area.

NGI has worked with natural hazard and avalanches on Svalbard for decades. The latest field work in this project was performed by Kjetil Brattlien, NGI, 30-31 October 2017 together with a group from NVE, UNIS, and SKRED AS. Reference is also made to NGIs 2017 documentation of avalanches from Sukkertoppen (NGI report 20171006 - 01-R dated 11th December 2017).

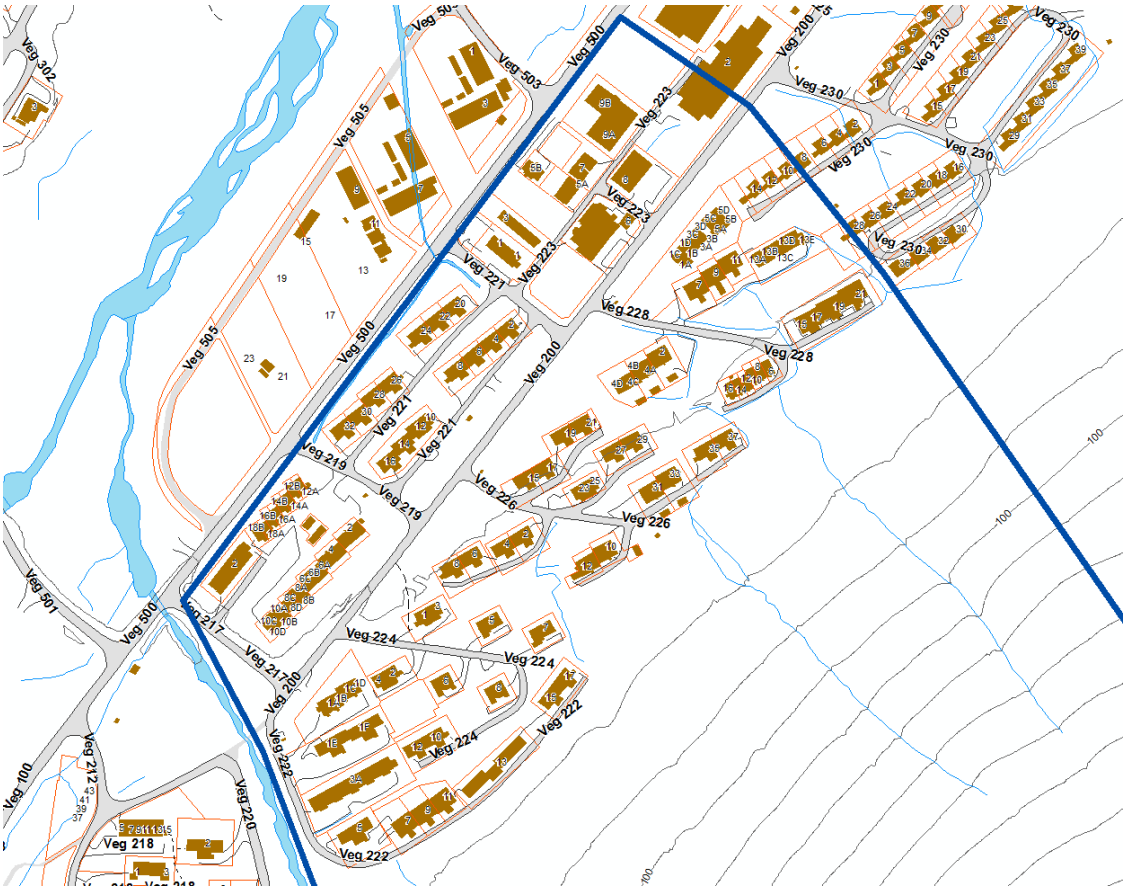


Figure 1.1: Overview map where avalanche runout is evaluated within the blue line.

2 Terrain

Two avalanches destroyed houses in the area in 2015 and 2017. In 2015 the avalanche released from the north shoulder of Sukkertoppen at about 125 m. In 2017 avalanches released both at the same place as in 2015, but also near the top of Sukkertoppen at about 350 m. There is a flat area of approximately 200x300 m^2 at the top of the mountain where snow can collect and cause a source for snowdrift into the release area.

The houses below the mountain are located up to an elevation of 55 m where the terrain is getting steeper. Most of the terrain above about 100 m is 30-35 degrees steep, with local areas of steeper or less steep terrain. Figure 2.1 shows the terrain and also the runout of the 2015 avalanches (turquoise) and 2017 avalanches (black).

NGI report 20171006-01-R gives additional details about the terrain and avalanche history relevant for evaluation of avalanche runout.

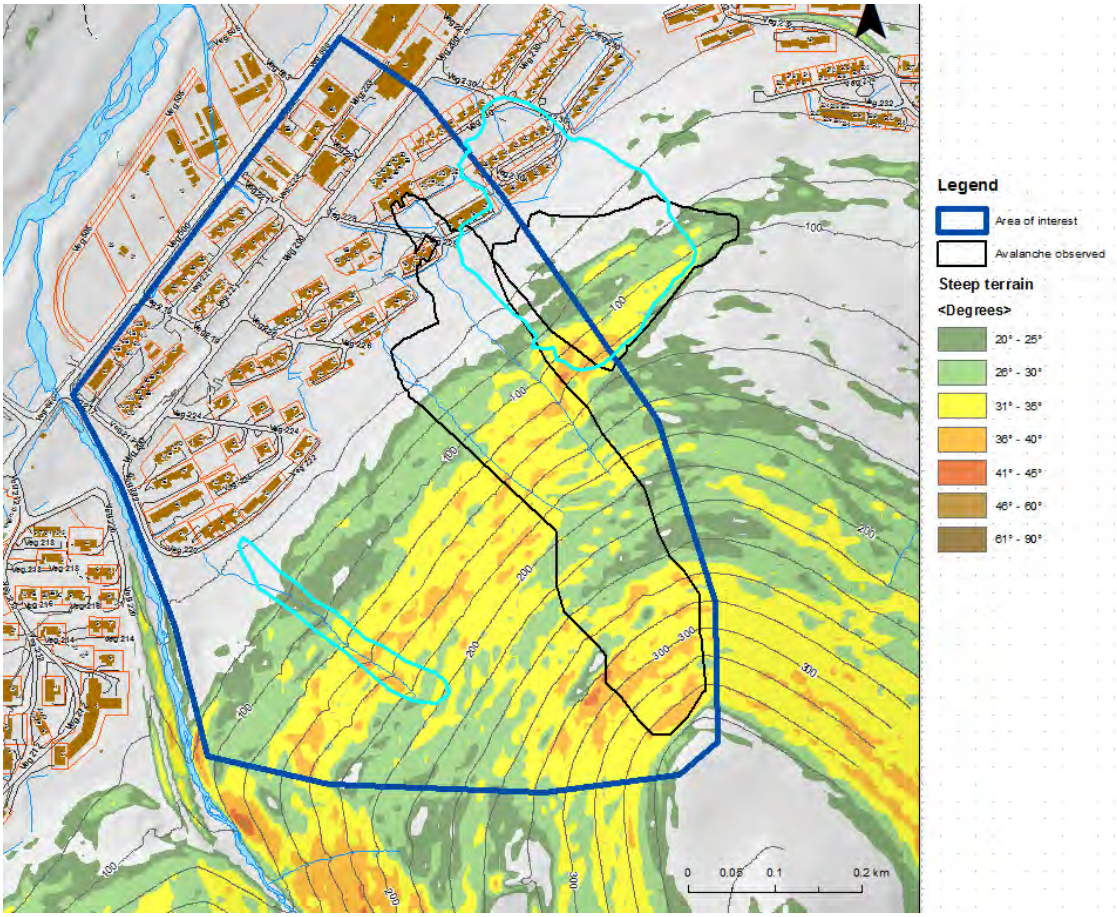


Figure 2.1: Terrain steepness and 2015 avalanches (turquoise) and 2017 avalanches (black).

3 Climate

Longyearbyen is located in an arctic desert climate. The observed annual precipitation at the airport is less than 200 mm in the period 1976 – 2016 (Fig. 2). The climate on Svalbard has changed significantly in recent years. There is generally little snow on the ground. The maximum snow height at the airport was 56 cm in 1986-04-26 (snow height data is missing 1995-2008). Due to the lack of vegetation, wind speeds are high and drifting snow is almost always apparent (Jaedicke and Sandvik, 2002).

3.1 Data sources

Long data series are available from two weather stations, the station 99860 Longyearbyen (operates 1911 – 1977) and the station 99840 Svalbard – Lufthavn (operated 1975 – today). The first station was located on Skjæringa near the Sysselmanns office. When the airport was established the station was moved, with two years of overlap to be able to see the differences between the two stations. Unfortunately, the period 1911 – 1957 shows extensive holes in the observations and for a statistical analysis, only the data from 1957 to 1977 can be used for the Longyearbyen station. A long time series, starting in 1899, of monthly mean temperatures for Spitsbergen has been established by the Norwegian Meteorological Institute, but monthly mean temperature cannot be used for the analysis of weather events relevant for avalanches.

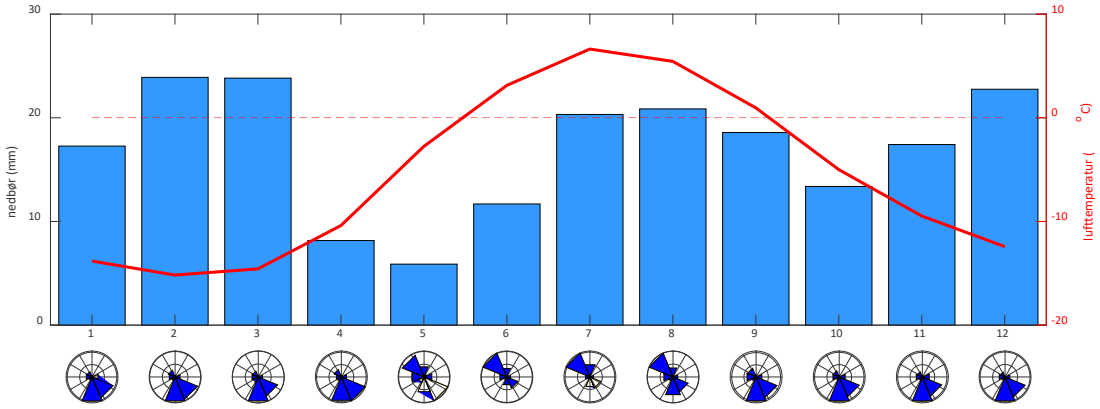
3.2 Climate overview

A climate overview was produced for both stations. The overview allows to compare the two stations and to see, if there are significant differences between stations. A graphical overview for both stations is shown in Figure 3.1. Most of the characteristic of the stations are similar, such that there is very little precipitation in general, and in the months of April, May and June in particular. Winds reach up to 30 m/s at both stations.

The feature most relevant for avalanches in Lia and Sukkertoppen are the prevailing wind directions in the winter months October to April which is out of the valleys towards the fjords. The old station at Skjæringa shows slightly more wind from the south, down the Longyear valley, while the station at the airport covers mostly the wind out from Advent Valley (more East-West). The extreme observed minimum and maximum values are listed in Table 3.1.

Please observe that this analysis uses the data from the whole period available for the two stations as described above and does not show the climatological normal for the period 1961 – 1990 as produced by the Norwegian Meteorological Institute.

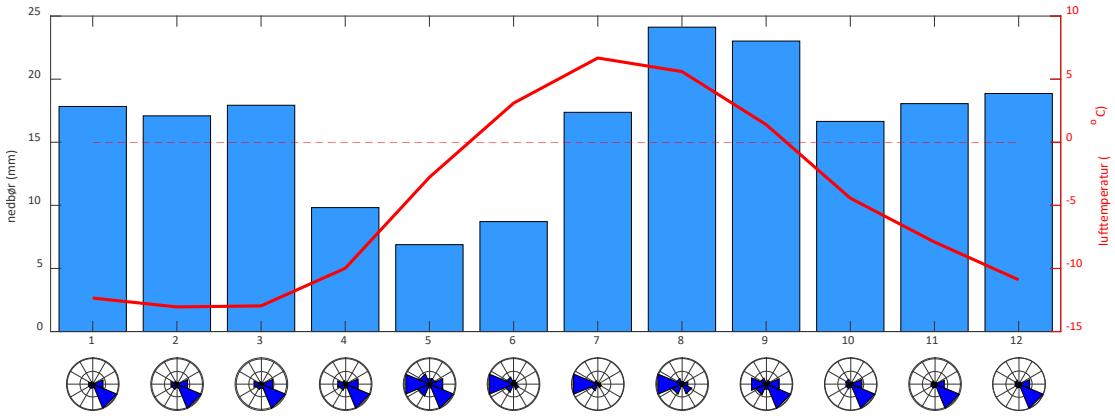
Stasjonsnavn: 99860 LONGYEARBYEN



Ekstrem- og gjennomsnittsverdier

Årsnedbør:	204 mm	Middeltemperatur:	-5.7 °C
Vinternedbør:	119 mm	Maks. lufttemperatur:	17.2 °C
Sommernedbør:	85 mm	Min. lufttemperatur:	-38.5 °C
Maks. ettdøgnsnedbør:	38 mm	Maks. vindhastighet:	26.8 m/s
Maks. tredøgnsnedbør:	48 mm	Maks. VINTER vindhastighet:	26.8 m/s
Maks. femdøgnsnedbør:	59 mm		
Snøhøydemålinger ikke tilgjengelig		**Data tilgjengelig fra 1/1/1957 til 1/7/1977**	

Stasjonsnavn: 99840 SVALBARD LUFTHAVN



Ekstrem- og gjennomsnittsverdier

Årsnedbør:	196 mm	Middeltemperatur:	-4.7 °C
Vinternedbør:	106 mm	Maks. lufttemperatur:	19.2 °C
Sommernedbør:	90 mm	Min. lufttemperatur:	-44.0 °C
Maks. ettdøgnsnedbør:	43 mm	Maks. vindhastighet:	26.8 m/s
Maks. tredøgnsnedbør:	57 mm	Maks. VINTER vindhastighet:	26.8 m/s
Maks. femdøgnsnedbør:	59 mm		
Maks. snøhøyde:56 cm Dato:25/4/1986		**Data tilgjengelig fra 1/8/1975 til 18/1/2018**	

Figure 3.1: Climate in Longyearbyen (1957-1977) and Svalbard Lufthavn (1975-2018).

Table 3.1 Statistics from observed data for the stations Longyearbyen and Svalbard Lufthavn.

		Longyearbyen 998620		**Svalbard Lufthavn 99840**	
Element	**unit**	**date**		**Date**	
Operational from		16.08.1911		01.08.1975	
Operational to		01.07.1977		Until today	
Periods without data		No useful data before 01.01.1957		None	
Mean air temperature	°C		-5,7		-4,7
Max. air temperature	°C	30.07.1970	17,2	16.07.1979	19,2
Min. air temperature	°C	21.02.1967	-38,5	01.03.1986	-44,0
Annual precipitation	mm		204		194
Winter precipitation	mm		119		105
Summer precipitation	mm		85		89
Max. 24 h precipitation	mm	09.02.1960	38	05.08.1991	43,2
Max. 72 h precipitation	mm	11.12.1960	48	06.08.1991	56,7
Max. snow height	cm	No observ.	No observ.	24.04.1986	56
Max. wind velocity	m/s	09.11.1964	26,8	02.03.1979	26,8
Estimated 24h precip. with 100 year return period	mm		48		43
Estimated 24h precip. with 1000 year return period	mm		65		57
Estimated 72h precip. with 100 year return period	mm		58		58
Estimated 72h precip. with 1000 year return period	mm		78		78
Estimated 24h snowfall with 100 year return period	mm		46		30
Estimated 24h snowfall with 1000 year return period	mm		63		40
Estimated 72h snowfall with 100 year return period	mm		56		48
Estimated 72h snowfall with 1000 year return period	mm		75		62
Observations wind > 5 m/s , from dir. (60 – 120 degr)	%		1,6		12,8
Observations wind > 10 m/s, from dir. (60 – 120 degr)	%		0,2		2,3
Observations snow precip. and wind > 5 m/s from dir. (60 – 120 degr)	%		0,08		0,38
Observations snow precip. and wind > 10 m/s from dir. (60 – 120 degr)	%		0,01		0,11

The precipitation observations can be used for an extreme value analysis that predicts the expected values for a 100 and 1000 year return period. These values are highly uncertain, as the extrapolation of the fitted Gumbel distribution should cover at most three times the observation period, which would be for the station Longyearbyen 63 years and the station Svalbard Lufthavn 132 years.

In lack of better methods we apply the function on the existing data. Expected values for precipitation with a 100 and 1000 year return period are low at both stations as shown in Figure 3.1 to 3.5 and listed in Table 3.1. The values for snow precipitation (air temp. < 1 ^{o}C) are in the range of thresholds that are used in daily avalanche warning 30 mm for 24h and 50 mm for 72 hours. This would lead to the conclusion that, given the climate records of the stations, avalanche relevant precipitation could be expected in the order of once every 100 years.

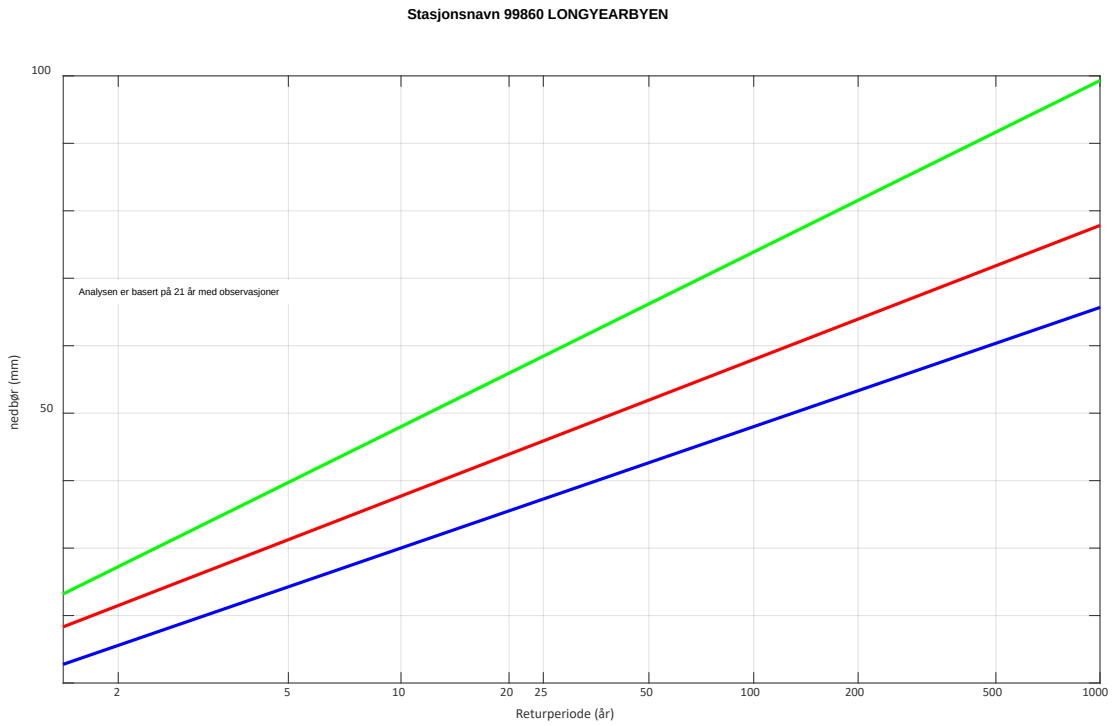


Figure 3.2: Extreme value analysis for all precipitation at station 99560 Longyearbyen.

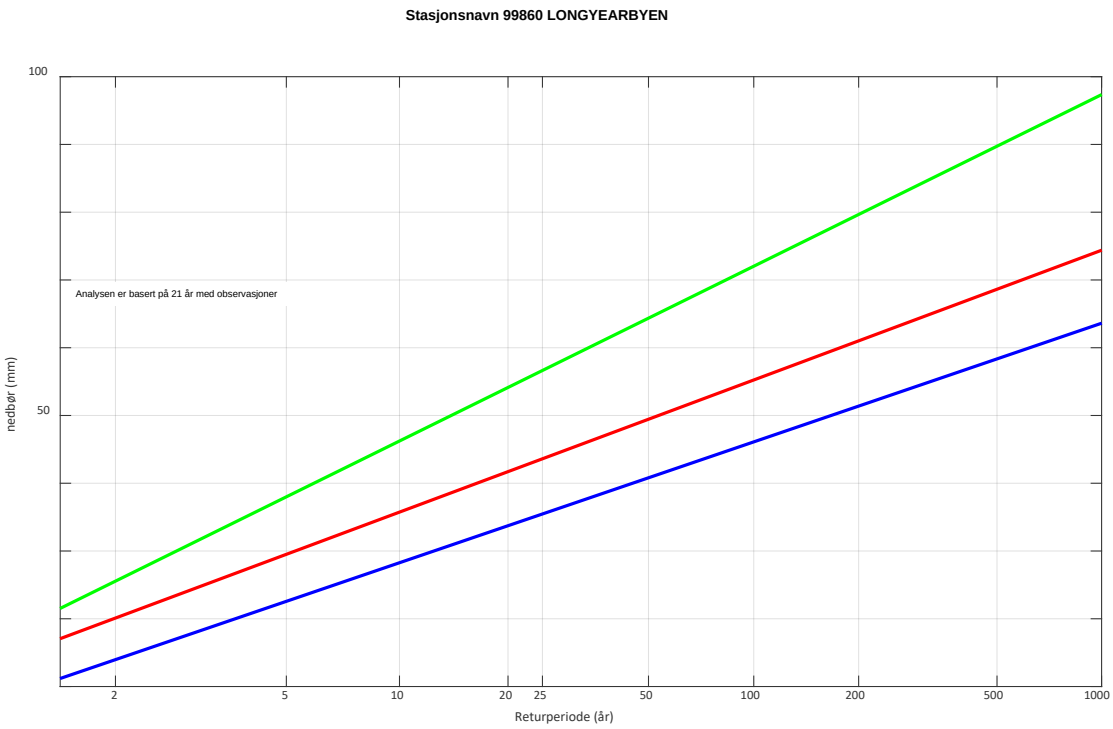


Figure 3.3: Extreme value analysis for snow precipitation (air temperature lower than +1 °C) for station 99560 Longyearbyen.

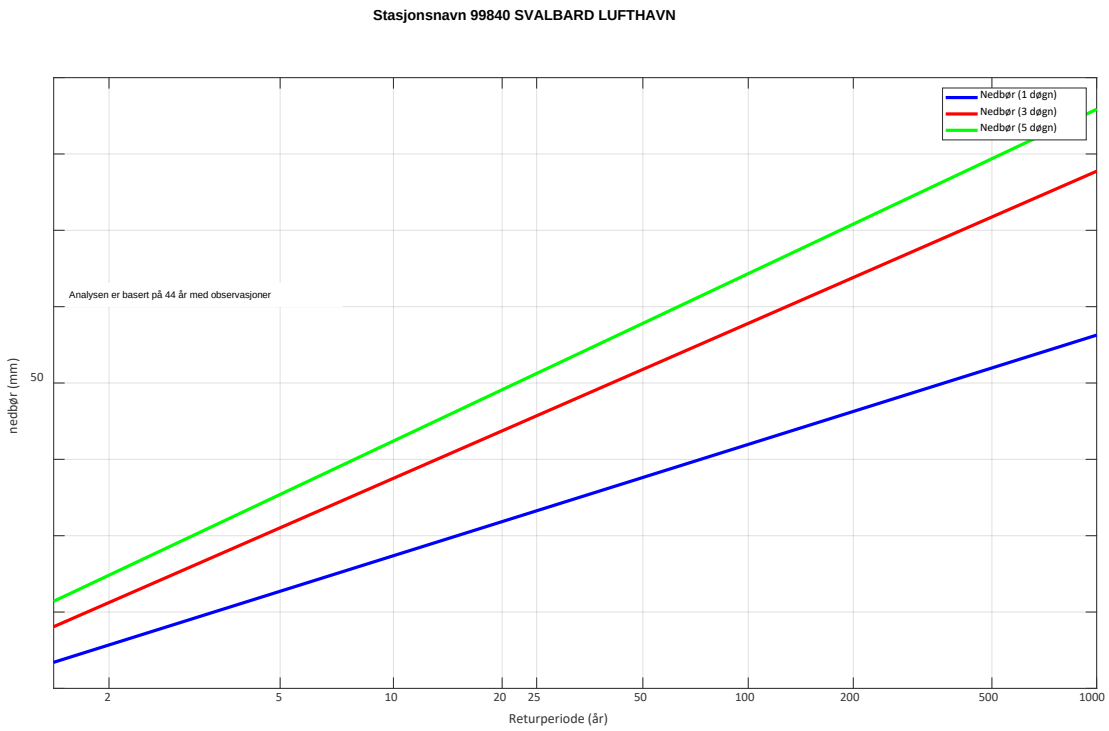


Figure 3.4: Extreme value analysis for all precipitation at station 99840 Svalbard Lufthavn.

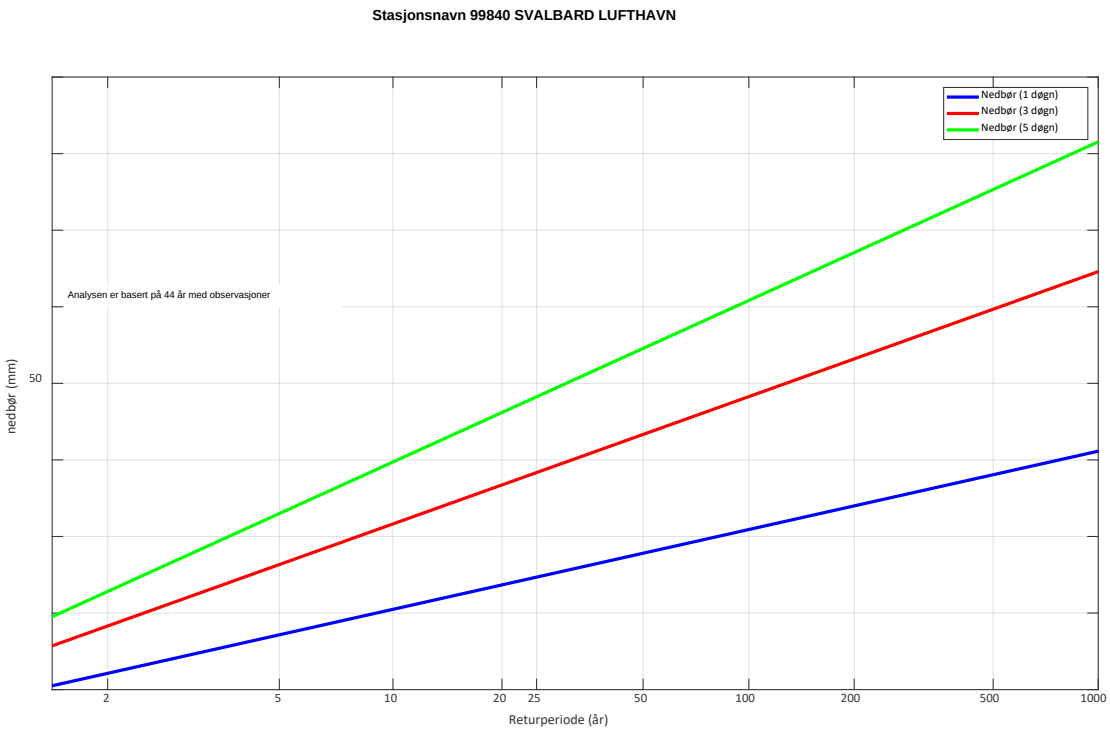


Figure 3.5: Extreme value analysis for snow precipitation (air temperature lower than +1 °C) for station 99840 Svalbard Lufthavn.

3.3 Wind climate

Eight weather stations have been located in and around Longyearbyen covering different periods from 1957 to today. In an attempt to collect all available climate data, NGI has analysed the wind roses for all these stations (Figure 3.6). The wind roses clearly show the dominating wind direction from the south east, out of Adventdalen. This the primary wind direction for accumulation of snow in the release zones in Lia and Sukkertoppen. Please observe that the stations cover different observation periods, some of which do not overlap.

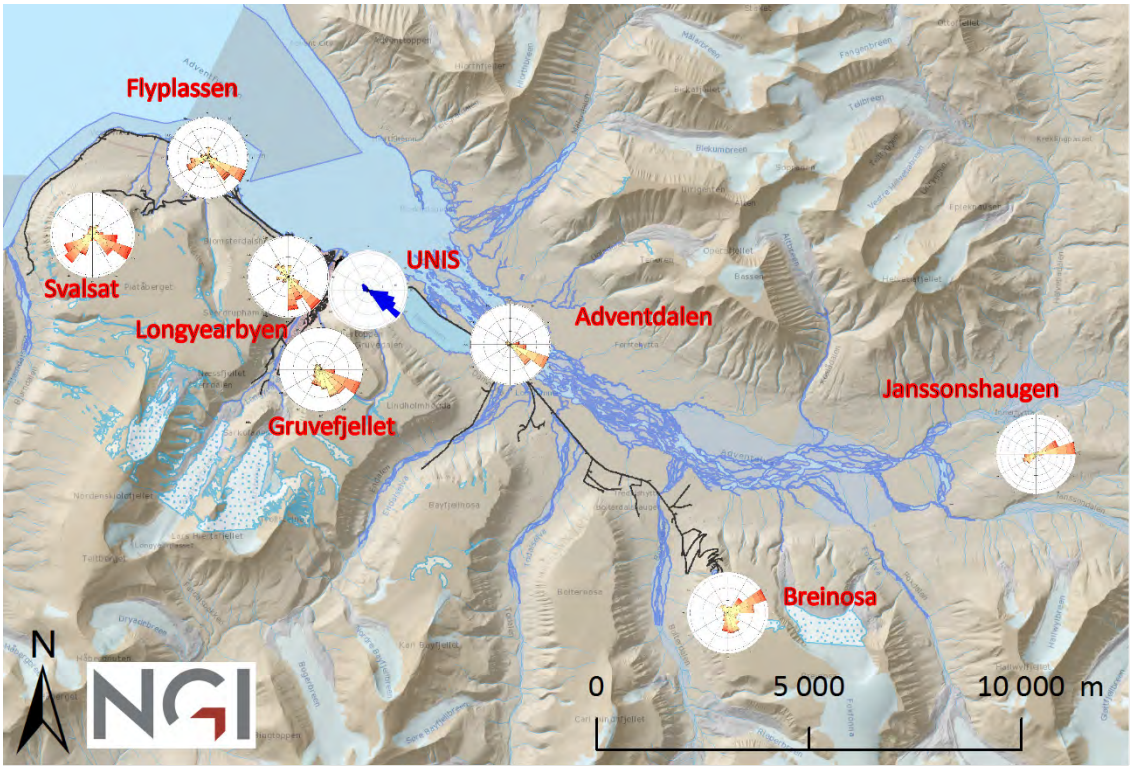


Figure 3.6: Wind roses from eight weather stations in and around Longyearbyen. Please observe that the stations cover different observation periods, some of which do not overlap.

3.4 Climate change

The annual mean temperature has increased by 3 ºC since 1990. Especially the winter temperatures have increased with 2-3 ºC per decade. This leads to more frequent warm spells with rain in winter time. Also the amount of precipitation has increased by 20-30% in Longyearbyen since 1990 (Vikhamar-Schuler et al., 2016).

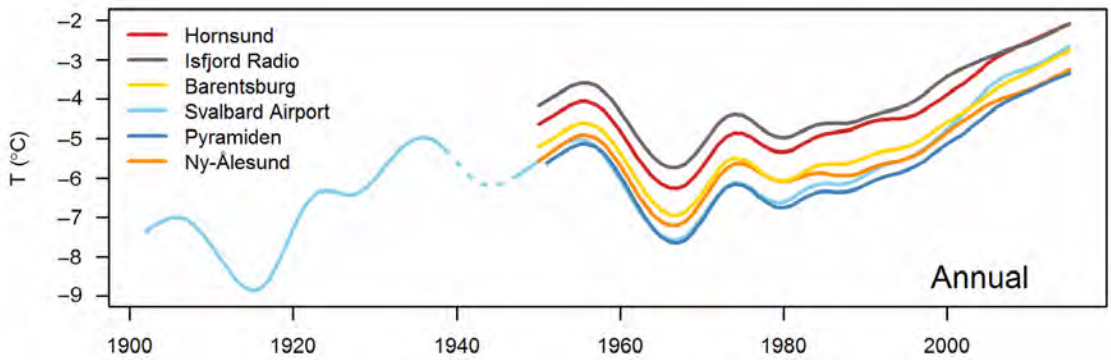


Figure 3.7: Long-term annual and seasonal mean temperatures (8C) for the reconstructed series from Hornsund, Isfjord Radio, Barentsburg and Ny-Ålesund (19502015), Pyramiden (19512015) and Svalbard Airport (19022015). From (Gjelten et al., 2016).

3.5 Weather relevant for avalanche events

3.5.1 Weather prior to the 2015 event (Jaedicke et al., 2016)

Starting on 17th December 2015 an intensive low pressure formed by two separate low pressures joining paths in the Norwegian Sea. The centre of the system increased in intensity while it moved towards the Svalbard archipelago. The low pressure system was followed closely by the meteorologists and on the 17th December at 11:45 a first weather awareness warning was issued for the Svalbard Islands. The warning was "*Spitsbergen: On Friday evening storm from east, night to Saturday possibly hurricane force. Locally gusts up to 40-45 m/s. Saturday morning decreasing wind, first in southern parts.*" The highest wind speeds were measured during the night from the 18th to 19th December. The lowest pressure of 966 hPa was measured on 19th December at 06:00.

The storm prior to the fatal avalanche started on 17th December 2015 around 12:00 and ended in the morning of the 19st December, approximately three hours prior to the avalanche. Dominating wind direction was from east and wind velocities up to 25 m/s and gusts up to 30 m/s were measured at the airport. The mean temperature during the storm was -5.8 ºC, with a maximum of -0.6 ºC and minimum of -15.3 ºC before the storm started. The temperature increased from -12 ºC to -2 ºC within 24 hours. The wind velocities at the at the mountain station Gruvefjellet were in the same range as at the airport. The valley station Adventdalen southeast of the town recorded the highest wind velocities with 26 m/s and with gusts up to 33 m/s.

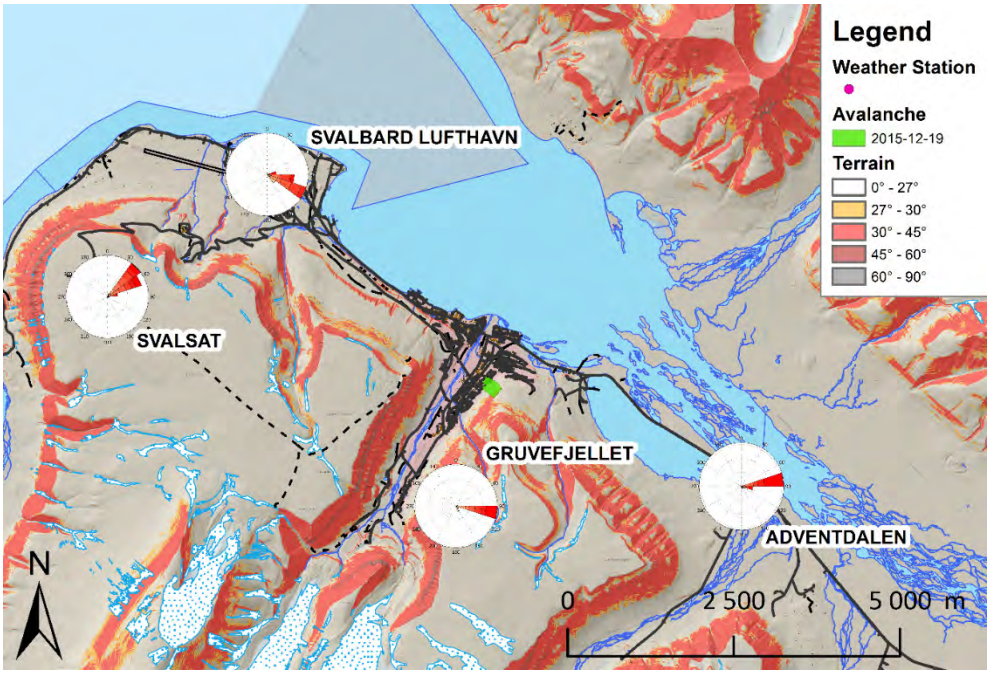


Figure 3.8: Position and wind rose of the weather stations used in the analysis for the period 17th to 20th December 2015.

The wind roses from the storm are shown on the map in Figure 3-8. The unofficial observed storm precipitation was approximately 30 mm, while the official record shows 18 mm in the morning on the 19th. Reliable snow precipitation measurements in these wind speeds are almost impossible. The meteorological forecast model HIRLAM 12 predicted a total of 45 mm for Friday 18th and Saturday 19th (Meteorologisk Institutt, 2016).

3.5.2 Weather prior to the 21.02.2017 event

The start of February 2017 was mild and in the period 05.02. – 12.02. most of the precipitation of 28 mm fell as rain (Figure 3.9). During the 12.02. rain changed to moist snow. This moist snow on the surface was then exposed to very low temperatures in the period 13.02. – 19.02. The lowest temperature measured in this period was -21.1 ºC on the 18.02. The "warm" snow transformed in this period to a layer of faceted crystals with low density and stability. During the 19.02. new snow precipitation fell on top of the week layer in calm weather. Winds increased to gale in the afternoon of the 20.02. The avalanche happened around noon on the 21.02. Most of the wind prior to the event was from southeast in the period 05.02. – 22.02.

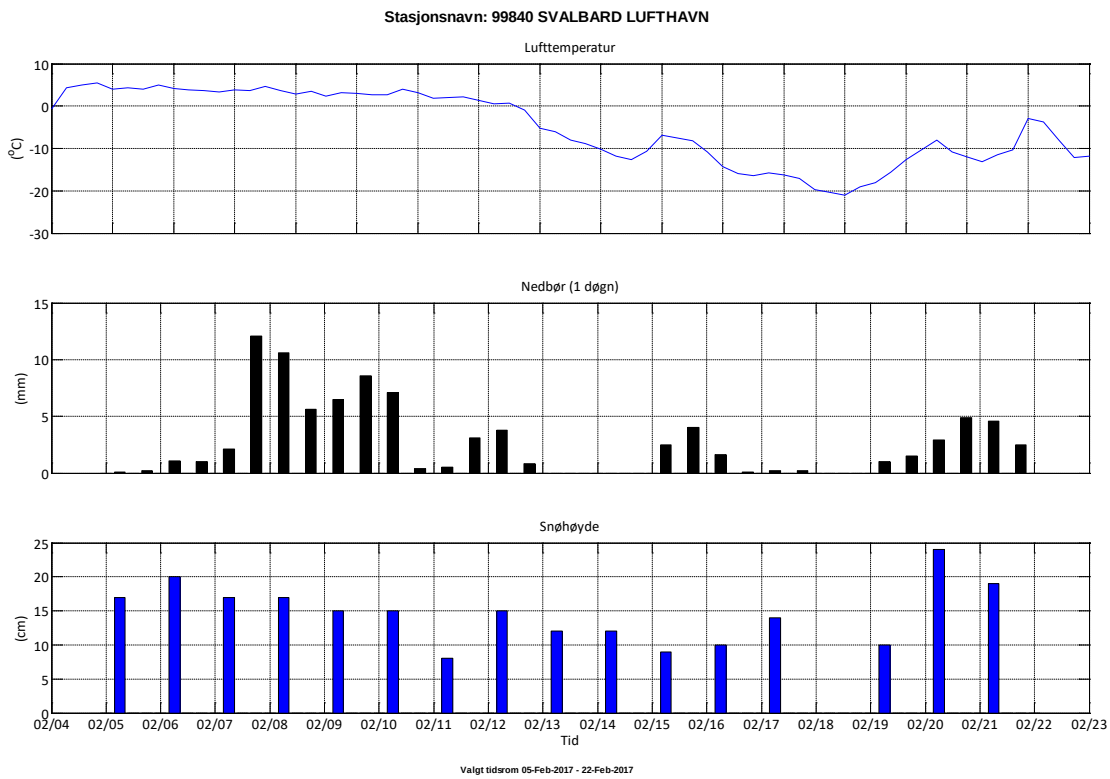


Figure 3.9: Weather observations from Svalbard Lufthavn prior to the avalanche 21.02.2017.

3.6 Weather situations leading to avalanches in Lia and Sukkertoppen

For the establishment of early warning routines, Hestnes and Bakkehøi (1992) and Hestnes (1993) showed the weather situations that lead to earlier minor avalanche events in the mountain side behind the now destroyed houses. Within three winter seasons, there were four avalanches. All of them accompanied with relative moderate winds from south easterly directions and limited precipitation (maximum prior to an avalanche was 16.6 mm in 5 days).

Searching the 44 years of weather observations from the airport with the criteria of negative temperatures, winds over 10 m/s and precipitation over 10 mm in 24h, 25 episodes are found. Most of them with wind direction from southwest which is the prevailing wind direction accompanied by most precipitation. Only 2 of those events have wind directions from southeast, one in 2006-11-04 and the fatal event in December 2015. Increasing the criteria to the 18 mm as observed on the morning of the 19th December, only the event of the fatal avalanche remains.

Considering the results from Hestnes and Bakkehøi (1992) and Hestnes (1993), with much less precipitation or wind being sufficient to lead to an avalanche release (using 5 mm and 5 m/s as criteria), 32 episodes with south easterly winds are found. Slightly less than one event annually in average.

4 Simulation of avalanche runout

NGI has simulated avalanche runout with RAMMS-Avalanche version (RAMMS User Manual v.1.7.0, Christen et al., 2010), and with the alfa-beta model developed by NGI (Lied and Bakkehøi, 1980). Documentation on these models are also available on internet, in literature and additional information can be given by NGI if requested.

Simulation are only part of the hazard assessment. The simulations shown in the following are relevant for the assessment of the different return periods, but they do not necessarily reflect an avalanche of the given return period. Avalanche return period depend on release probability and on the probability to reach a certain runout. Therefore different release areas/scenarios might contribute to the various return periods.

The following comments are relevant for the RAMMS simulations:

- RAMMS simulations are done by first defining a release area and a fracture height. Different release areas and fracture heights have been tested to back-calculate previous avalanches and to simulate avalanches with possible return periods of 100-, 1000- and 5000 years.
- NGI has used the automatic procedure for calculation of friction parameters (MuXi-file) for different global parameters for return period 300 and 100 years,

and for different avalanche volume categories (large, medium and small avalanches). Please note that return periods 1000- and 5000 years are not available in RAMMS.

- Different altitude limits in the automatic MuXi-procedure have been tested. Some simulations are done with standard RAMMS altitude limits 1500 m and 1000 m. This defines lowest friction parameters in terrain above 1500 m, increased friction parameters between 1500-1000 m and highest friction parameters below 1000 m.
- NGI has also made simulations shifting the altitude limits to 50 m and 10 m to simulate runout in conditions with lower friction. This is partly motivated by NGIs mapping of avalanche runout at Svalbard showing that extreme avalanches at low elevation can have runout similar to high altitude avalanches in Norway mainland and to test the sensitivity of the parameter choice.
- RAMMS results can be displayed in different ways. NGI has showed the maximum avalanche velocity in this report. Maximum pressure (p) on a wide wall can be calculated form the maximum velocity (v) and the density (ρ) by the equation $p = \rho \cdot v^2$. This means that a pressure of 1 kPa corresponds to a velocity of 1.8 m/s for a density of 300 kg/m^3 and a velocity of 2.2 m/s for a density of 200 kg/m^3.

The following comments are relevant for the alfa-beta simulations:

- The alfa-beta model is a statistical method developed by NGI around 1980 by comparing the longest recorded runout of more than 200 avalanches paths on the west coast of Norway. The majority of avalanches were in terrain with vertical drop of more than 500 m (91 %) and the smallest vertical drop was 325 m. In general the data indicate that runout is little dependent on vertical drop, indicating also valid in smaller terrain.
- The statistical relationship between the 10-degree beta-point and the runout is developed mainly in U-shaped valleys using a 20 m terrain model. Care should be used when selecting beta-point with a high resolution terrain model since local now-relevant beta-points can give misleading results.
- NGI has mapped high altitude avalanches in Norway midland that have surprisingly long runout due to low friction. These avalanches are relevant to extreme runout at Svalbard at low altitude.
- Similar relations relation between alfa and beta exist also for different countries. A comparison can be found, e.g., in (Gauer, 2016).

4.1 Back calculation of 2015 and 2017 avalanches

Figure 4.1 shows the NGI simulation of the 2015 avalanche (black) with release thickness of 80 cm in the west part and 200 cm in east part, corresponding to a total volume of 16000 m^3. Altitude limits were 500 m and 0 m, meaning middle friction level since the runout is in terrain below 100 m.

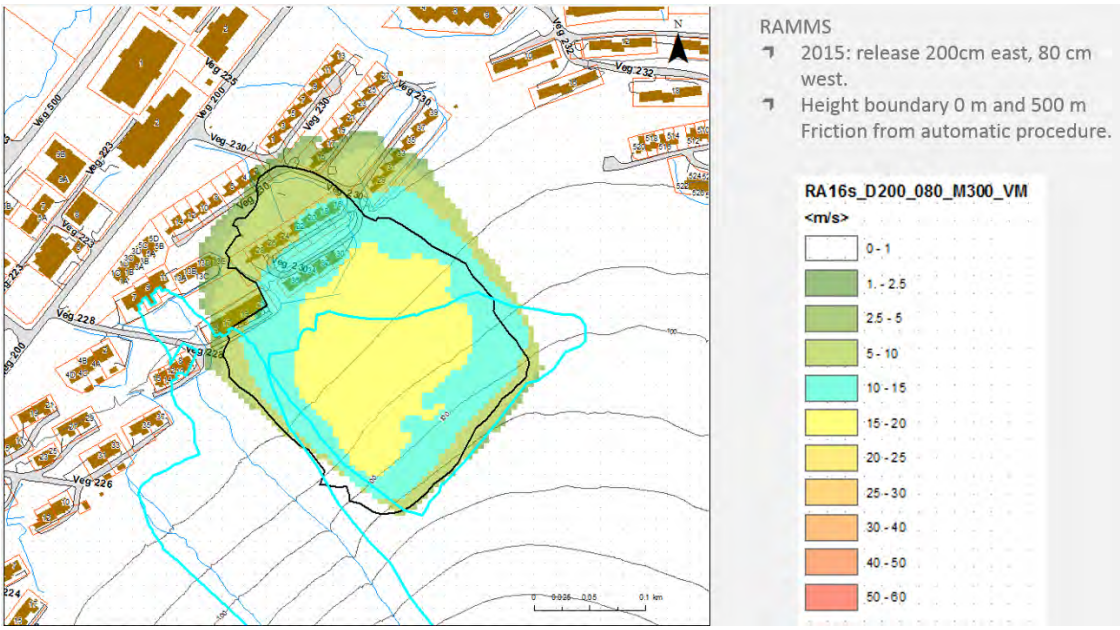


Figure 4.1: RAMMS simulation of 2015 avalanche (black).

Figure 4.2 shows the NGI simulation of the upper 2017 avalanche (black) with fracture height of 75 cm in the west part and 125 cm in east part closer to the ridge. Altitude limits used are 50 m and 10 m, meaning lowest friction level in the entire slope. The avalanche in 2017 did not release over the whole width in contrast to the simulation shown.

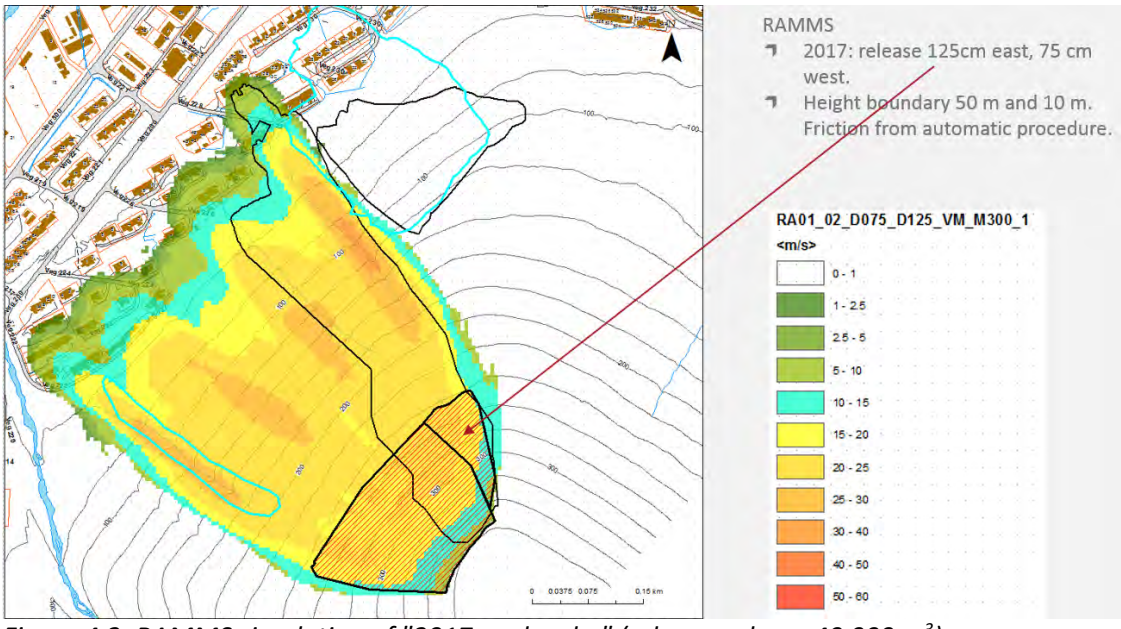


Figure 4.2: RAMMS simulation of "2017 avalanche" (release volume 40 000 m^3).

The 2015 and 2017 runout can also be reproduced by either higher friction and larger initial volume, or by lower friction and smaller initial volume. The release volume is governed by the conditions in the release area mainly dependent on the terrain, snow depth, layering and stability. The friction conditions in the runout area is governed by the conditions in mainly dependent on the terrain, and snow and friction parameters in the track.

Extreme avalanches might have both larger initial volumes and less friction in the track than the 2015 and 2017 avalanches.

4.2 Dependency on release volume and release elevation

Figures 4.3 and 4.4 show RAMMS calculations with fracture height of respectively 1 m and 2 m in two release areas. Calculations were done with standard automatic procedure and altitude levels (1500 and 1000 m, i.e. similar to 1000 m and 500 m in this terrain). The figures show that the avalanche runout is very dependent on fracture height.

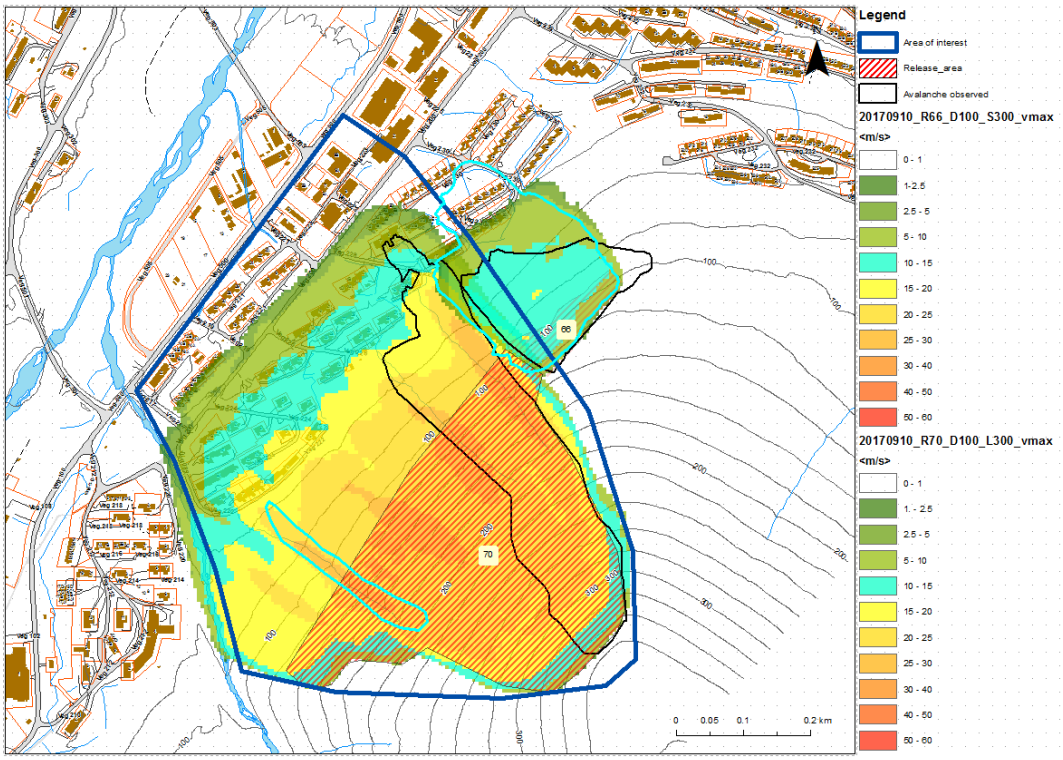


Figure 4.3: RAMMS simulation with standard parameters and 1 m thickness.

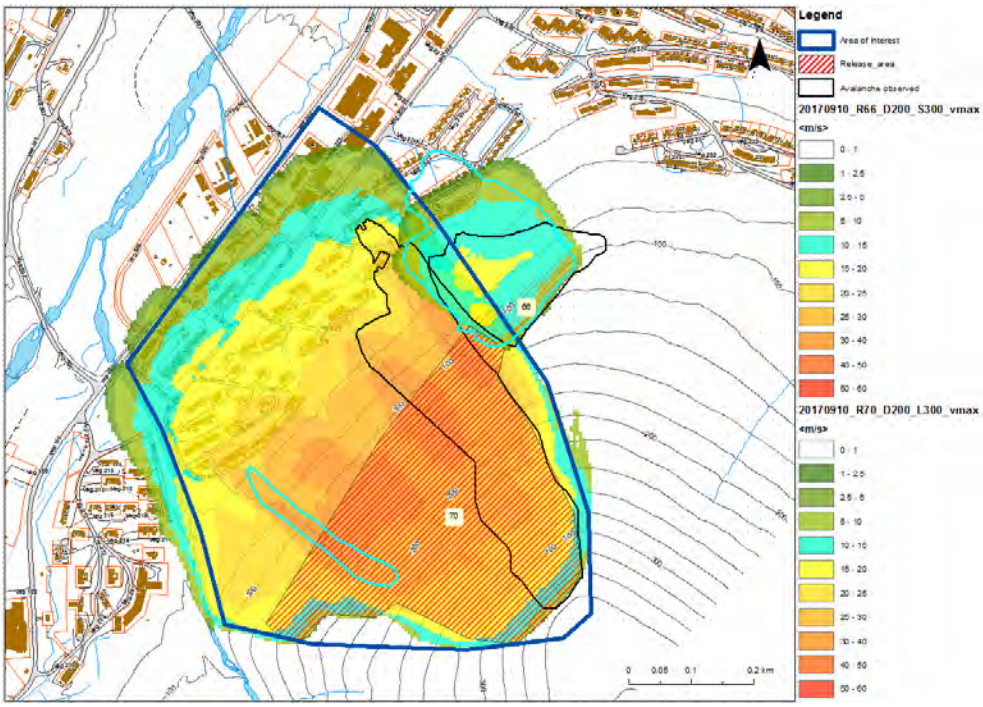


Figure 4.4: RAMMS simulation with standard parameters and 2 m thickness.

Figure 4.5 shows RAMMS calculation with 2 m release thickness for an avalanche releasing at elevation 100-200 m. Note that the simulation and runout is similar to Figure 4.4 with the release area at elevation 100-350 m. This indicate that runout is not very dependent on release elevation.

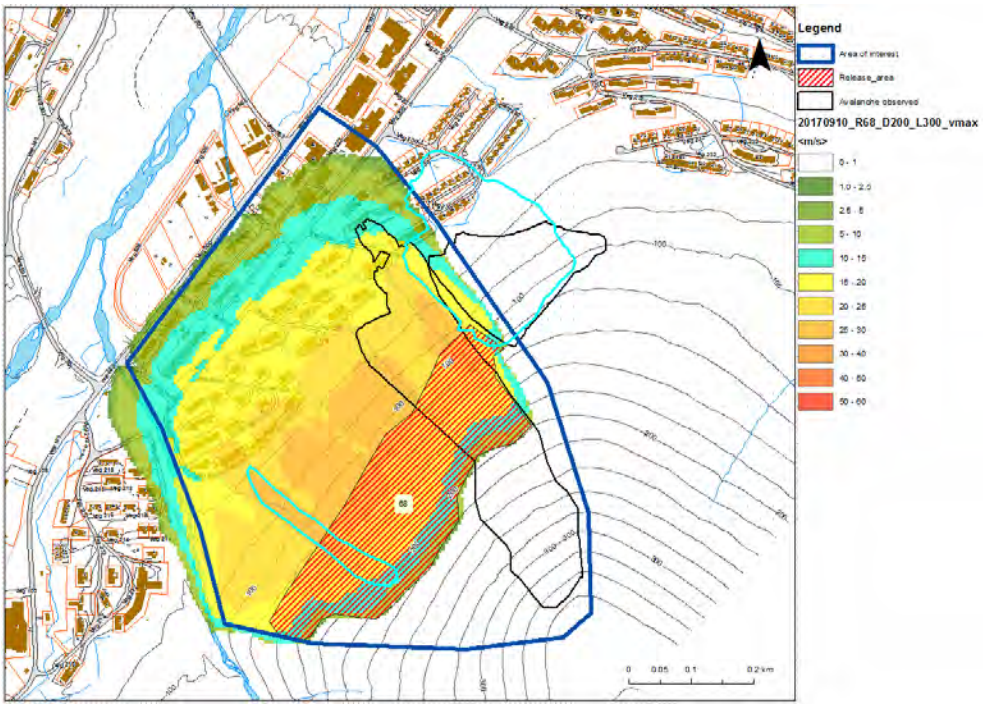


Figure 4.5: RAMMS simulation with standard parameters and 2 m thickness.

4.3 Runout of extreme avalanches

Extreme avalanches might have both larger initial volumes and less friction in the track than the 2015 and 2017 avalanches. NGI has made RAMMS simulations with altitude limits of 50 m and 10 m to simulate runout in conditions with lower friction also at low elevation. These friction parameters are used in simulations with reasonable release areas and thickness. The release area is at elevation 250-350 m, and avalanches are believed to be thicker in the east part close to the ridge. The following simulations are considered to be especially relevant for the avalanche hazard zoning:

- Figure 4.6 shows simulations with 75 cm release thickness in the west part of the release area and 125 cm thickness in east part. The simulation is considered to be relevant for 100 year runout.
- Figure 4.7 shows simulations with 100 cm release thickness in west part of the release area and 150 cm thickness in east part. The simulation is considered to be relevant for 1000 year runout.
- Figure 4.8 shows simulations with 150 cm release thickness in west part of the release area and 200 cm thickness in east part. The simulation is considered to be relevant for 5000 year runout.
- Figure 4.8 shows simulations with 150 cm release thickness in west part of the release area and 200 cm thickness in east part. The simulation is considered to be relevant for 5000 year runout.
- Figure 4.9 shows simulations with 100 cm release thickness in the lower half of the slope. The simulation is considered to be relevant for 1000 year runout.
- Figure 4.10 shows the alfa-beta calculations where the upper row of houses are close to the beta-point.

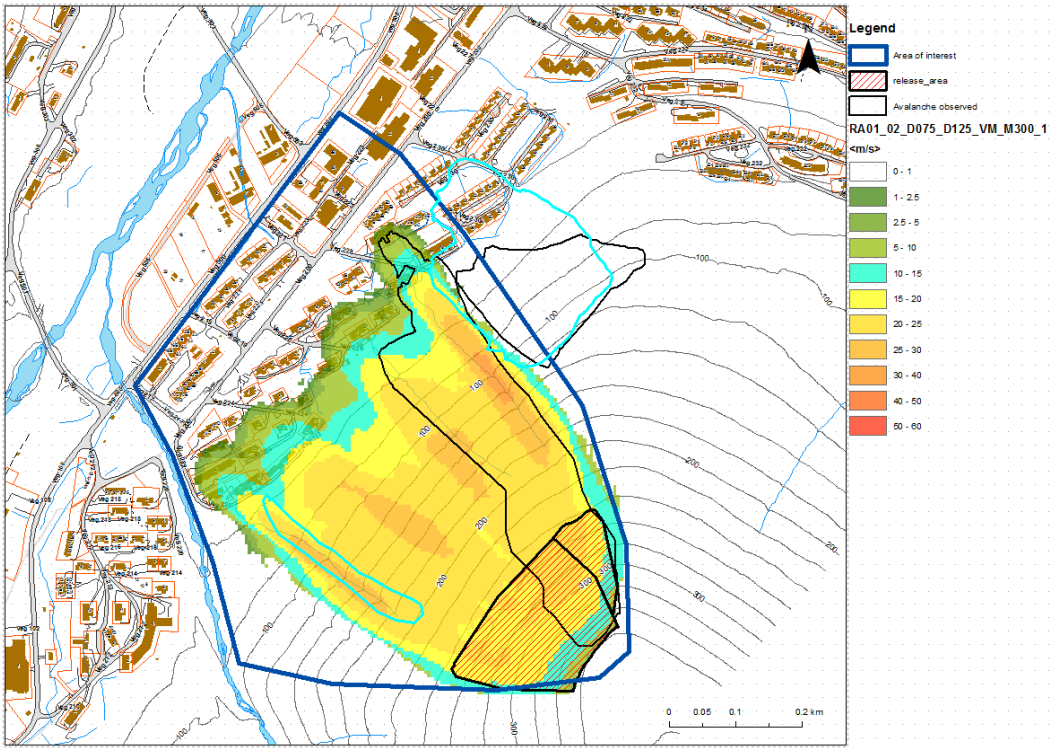


Figure 4.6: RAMMS simulation with fracture height 75 cm west and 125 cm east (release volume 40 000 m³).

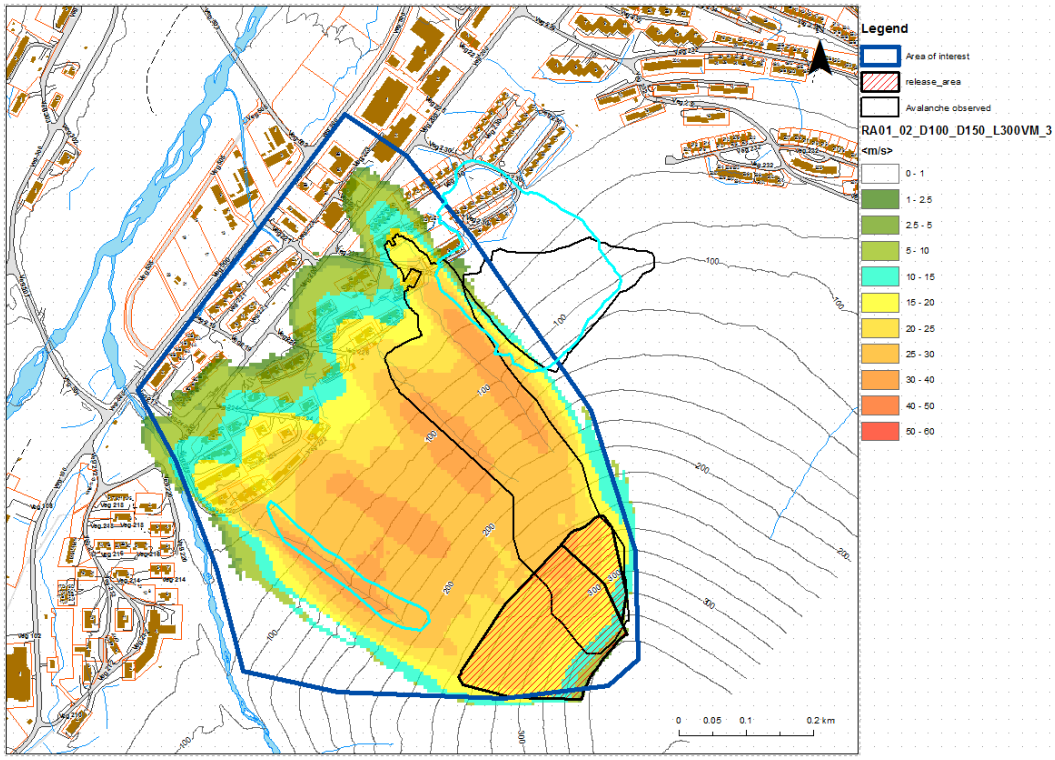


Figure 4.7: RAMMS simulation with fracture height 100 cm west and 150 cm east (release volume 52 000 m³).

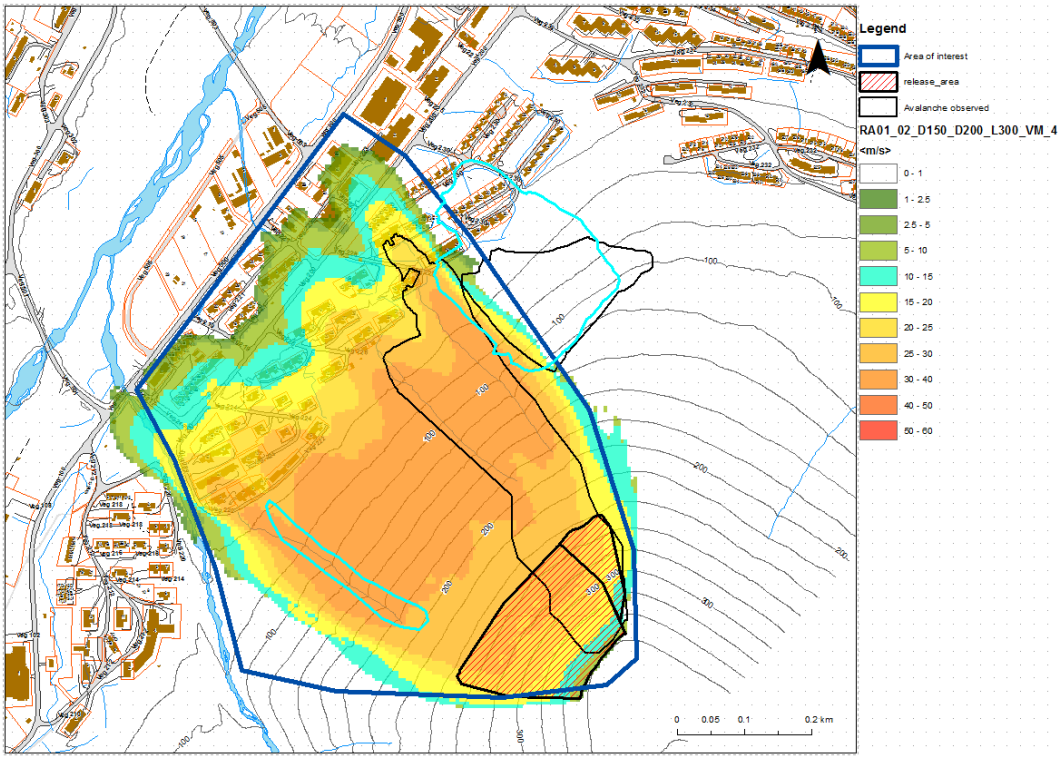


Figure 4.8: RAMMS simulation with fracture height 150 cm west and 200 cm east (release volume 76 000 m³).

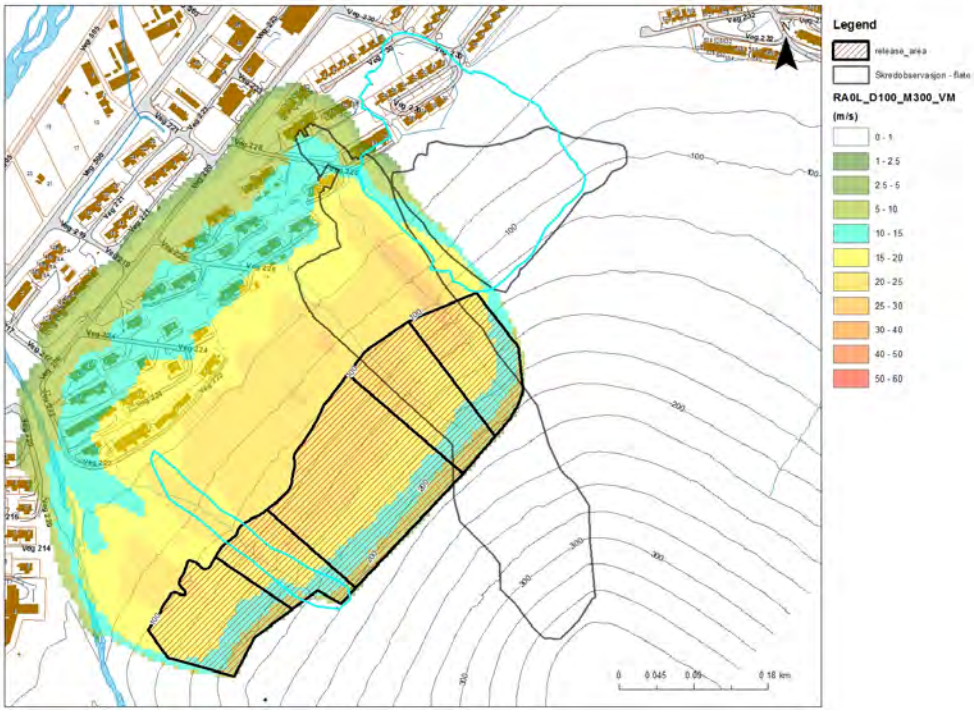


Figure 4.9: RAMMS simulation with fracture height 100 cm (release volume 96 000 m³).

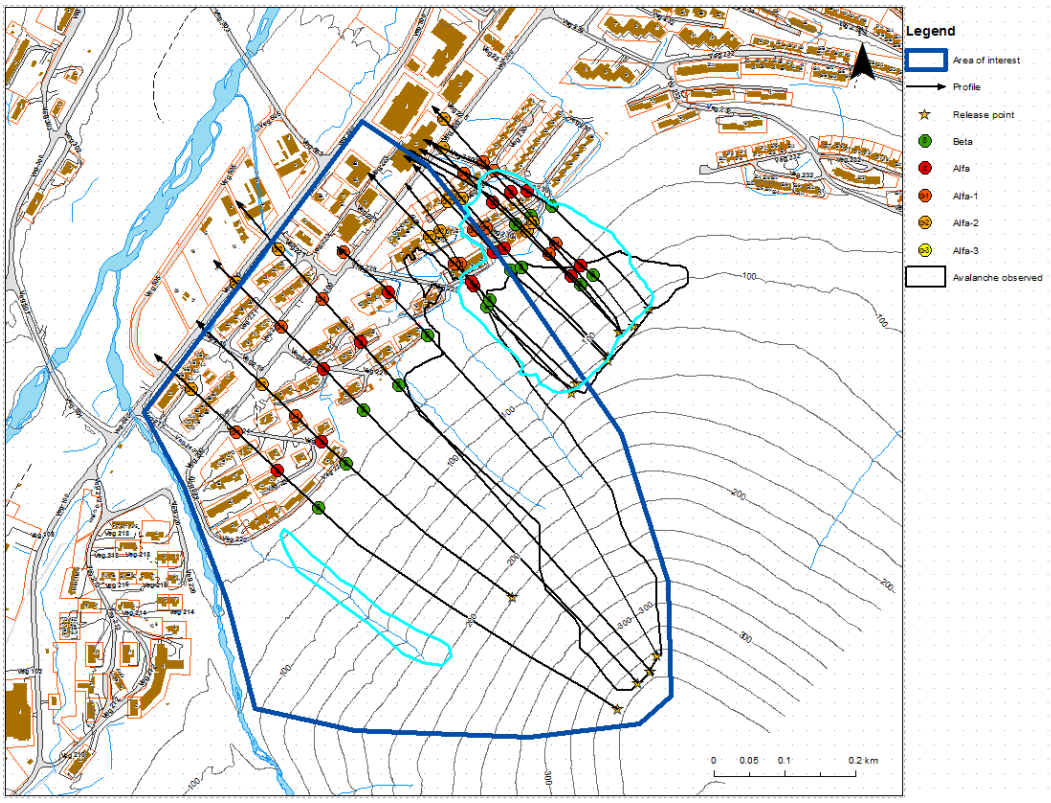


Figure 4.10: Alfa-beta calculations.

4.4 Sensitivity

Figure 4.11 illustrates the dependence of the simulated runout length on the parameter choice and the initial volume along a selected profile. As mentioned above, different release areas/scenarios might contribute to the various return periods.

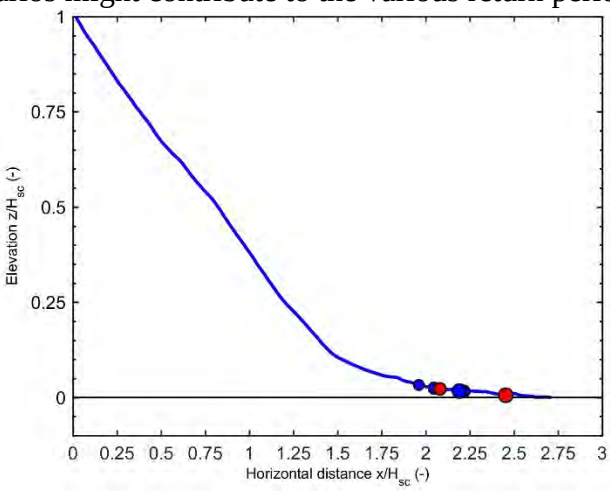


Figure 4.11: Influence of the runout length along a selected profile of RAMMS simulations on parameter choice and initial volume (40 000, 52 000, 56 000, and 76 000 m³) and parameter choice M300 (blue) and L300. ($H_{SC} \approx 320$ m).

5 References

Christen, M.; Kowalski, J. & Bartelt, P. 2010, RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain *Cold Regions Science and Technology,63*, 1-14

Gjelten, H.M., Nordli, Ø., Isaksen, K., Førland, E.J., Sviashchennikov, P.N., Wyszynski, P., Prokhorova, U. V., Przybylak, R., Ivanov, B. V., Urazgildeeva, A. V., 2016. Air temperature variations and gradients along the coast and fjords of western Spitsbergen. Polar Res. 35. https://doi.org/10.3402/polar.v35.29878

Gauer, P. 2016, Selected Observations from Avalanche Measurements at the Ryggfonn Test Site and Comparisons with Observations from other Locations *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2016, Breckenrigde, CO,* **2016**, 1340-1347

Hestnes, E. and S. Bakkehøi, 1992. Lia, Longyearbyen. Evaluation of avalanche hazard and mitigative measures for pre-venting accidents in road 226-230. (In Norwegian) NGI-Rapport 904025-2, 26 pp.

Hestnes, E. 1993. Lia, Longyearbyen. Routines for acute hazard evaluation. Suggestions of remedies, observation pro-gram, evaluation of collected data and measures. (In Norwegian) NGI-Rapport 904025-7, 29 pp.

Jaedicke, C., Hestnes, E., Bakkehøi, S., Mørk, T., Brattlien, K., 2016. Forecasting the fatal Longyearbyen avalanche. Possibilities and challenges, in: Proceedings of the International Snow Science Workshop 2016, Breckenridge, Colorado.

Meteorologisk Institutt, 2016. Rapport etter førjulstorm Svalbard, met.no info.

Lied, K. & Bakkehøi, S.Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters *Journal of Glaciology,* **1980**, *26*, 165-177

RAMMS User Manual v.1.7.0 Avalanche, **2017**

Vikhamar-Schuler, D., Førland, E.J., Hisdal, H., 2016. Short overview over climate change and consequences on Svalbard, NCCS report.

Kontroll- og referanseside/ Review and reference page

Dokumentinformasjon/*Document information*		
Dokumenttittel/*Document title* Longyearbyen Sukkertoppen. Evaluation and simulation of avalanche runout.		**Dokumentnr./*Document no.*** 20170910-01-R
Dokumenttype/*Type of document* Rapport / Report	**Oppdragsgiver/*Client*** NVE - Region Nord	**Dato/*Date*** 2018-02-06
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ *Proprietary rights to the document according to contract* Oppdragsgiver / Client		**Rev.nr.&dato/*Rev.no.&date*** 0 /
Distribusjon/*Distribution* BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/*Keywords* Avalanches		

Stedfesting/*Geographical information*	
Land, fylke/*Country* Norway	**Havområde/*Offshore area***
Kommune/*Municipality* Svalbard	**Feltnavn/*Field name***
Sted/*Location* Longyearbyen	**Sted/*Location***
Kartblad/*Map*	**Felt, blokknr./*Field, Block No.***
UTM-koordinater/*UTM-coordinates* **Zone:** 33**East:** 514500**North:** 8682500	**Koordinater/*Coordinates*** **Projection, datum: East: North:**

Dokumentkontroll/*Document control*
Kvalitetssikring i henhold til/*Quality assurance according to NS-EN ISO9001*

Rev/ *Rev.*	**Revisjonsgrunnlag/*Reason for revision***	**Egenkontroll av/ *Self review by:***	**Sidemanns-kontroll av/ *Colleague review by:***	**Uavhengig kontroll av/ *Independent review by:***	**Tverrfaglig kontroll av/ *Interdisciplinary review by:***
0	Original document	2018-02-06 Kjetil Brattlien	2018-02-06 Peter Gauer		

Dokument godkjent for utsendelse/ *Document approved for release*	**Dato/*Date*** 6 February 2018	**Prosjektleder/*Project Manager*** Kjetil Brattlien

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI

OSLO
TRONDHEIM
HOUSTON
PERTH

NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE
NGI.NO

Main office
PO Box 3930 Ullevaal St.
NO-0806 Oslo
Norway

Trondheim office
PO Box 5687 Torgarden
NO-7485 Trondheim
Norway

T (+47)22 02 30 00
F (+47)22 23 04 48
NGI@ngi.no

BIC NO. DNBANOKK
IBAN NO26 5096 0501 281
ORGANISATION NO.
958 254 318MVA

ISO 9001/14001
CERTIFIED BY BSI
FS 32989/EMS 612006

Norges vassdrags- og energidirektorat

NVE

Notat

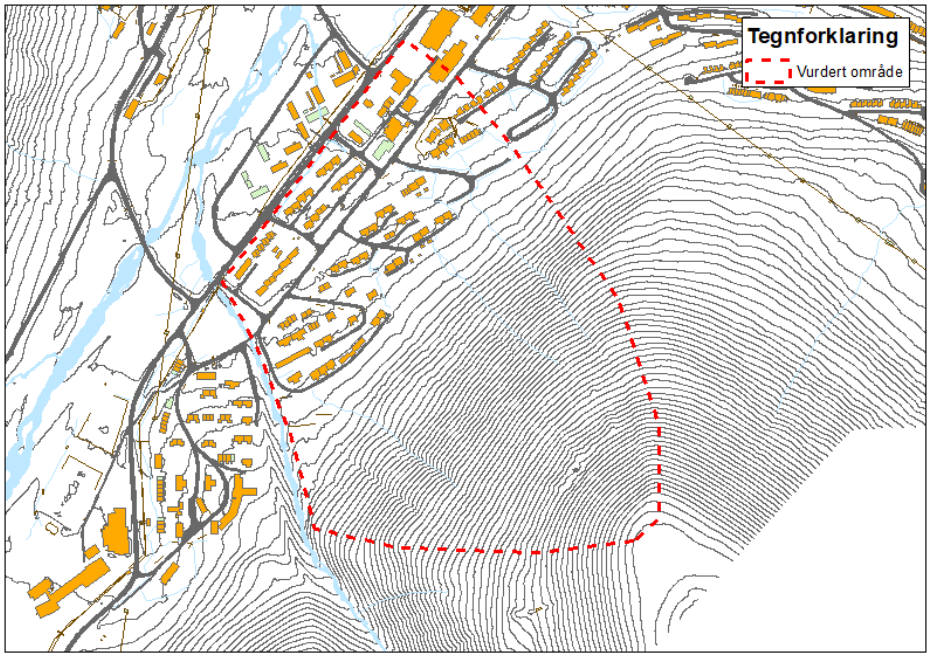
Saksbehandler:	Odd-Arne Mikkelsen
Ansvarlig:	Knut Aune Hoseth
Dato:	20.2.2018
Vår ref.:	201706702
Kvalitetskontroll:	Jaran Wasrud

NVEs vurderinger av dimensjonerende skred fra Sukkertoppen, Longyearbyen

1. Bakgrunn

NVE har satt ned en faggruppe med representanter fra NGI, Skred AS, UNIS og NVE for å sammen komme fram til inputparameter for dimensjonerende skred og reviderte faresoner for skred fra Sukkertoppen. Det aktuelle området er vist i Figur 1. Snøskred vurderes å være dimensjonerende skredtype fra Sukkertoppen.

Dette notatet omhandler NVEs vurdering av skredfaren fra Sukkertoppen og beskriver grunnlaget for vurderingen, og arbeidsmetodikken for å komme frem til NVEs tolkning av dimensjonerende skred.



Figur 1: Område vurdert i dette arbeidet vist som stiplet polygon

2. Bakgrunnsmateriale

2.1. Tidligere rapporter

Det er benyttet flere tidligere skredrapporter for å bli kjent med tidligere hendelser i tillegg til nyere dokumenter som

- «Sukkertoppen Svalbard – avalanche incidents» av NGI 2017
- «Summary of snow depth changes due to the February 2017 avalanche» av UNIS 2017

2.2. Datagrunnlag

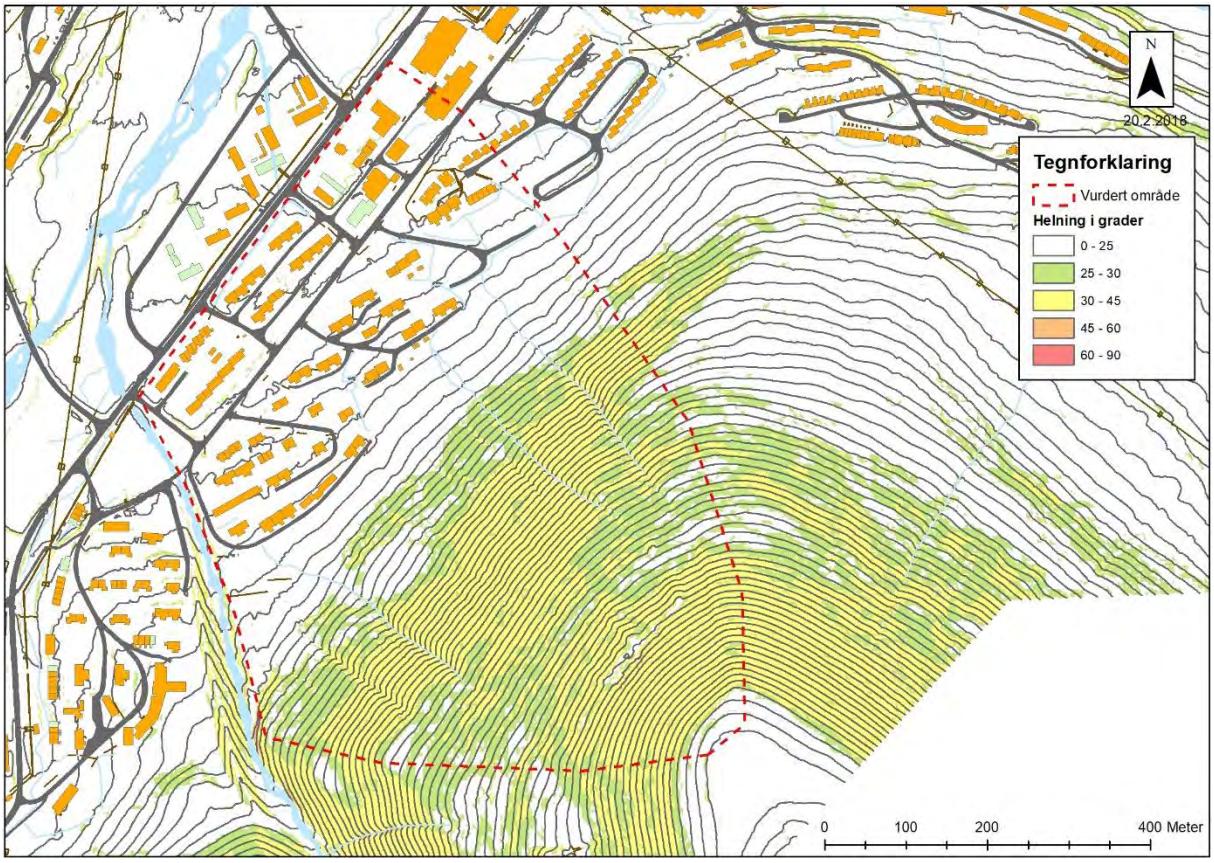
Det er benyttet terrengmodell DTM1_S2008_13651_LYB_FKB-B_TT.tif for alle simuleringer i RAMMS. I tillegg har vi hatt tilgang på terrengmodell med oppløsning på 25 cm utarbeidet av UNIS.

Det er benyttet RAMMS 1.7.06 for datamodelleringer av snøskred.

For ekstremverdianalyse av nedbør er det benyttet måleserie (RR) fra Svalbard Lufthavn (99840) fra 1975-2017.

3. Topografi og terrengformasjoner

Longyeardalen er er en U-dal med Longyearelva i bunnen. Sukkertoppen ligger på dalens østside og er en vestvendt fjellside som strekker seg fra 35 moh til 373 moh. Det er bebyggelse opptil kote 55 under Sukkertoppen. Fra kote 55 opp til kote ca, 175 er terrenget rundt 35 grader Videre oppover til kote 280 er terrenget rundt 30 grader, før det blir litt brattere opp til kote 370. Se helningskart figur 2. I nordre del av det vurderte området er det en ryggformasjon opp mot toppen. Denne ryggformasjonen samler mye snø på grunn av vindtransport fra øst vinterstid. Det er 3 markerte raviner i terrenget som NVE på bakgrunn av dokumentasjon av tidligere hendelser tolker å væredannet av erosjon og tidligere jord- og flomskred. Disse ravinene samler også mye snø på vinterstid. Terrenget kan karakteriseres som relativt jevnt med få konvekse områder.

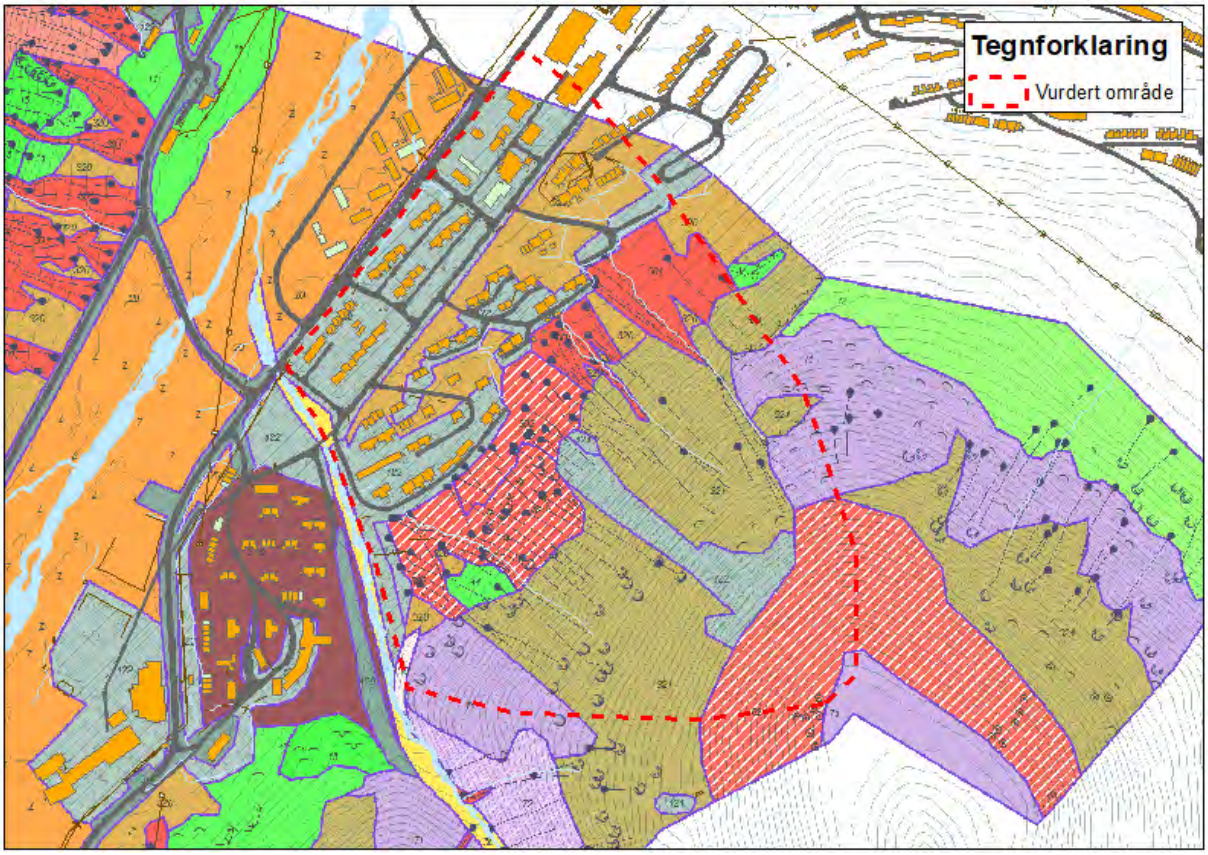


Figur 2: Helningskartet viser at store deler av vestvendt side av Sukkertoppen er snøskredterreng.

4. Valg av dimensjonerende skredtype

For å kunne tegne faresoner i henhold til TEK17, så må alle skredtyper vurderes. I dette tilfellet er det kjent å ha gått jord- og flomskred fra Sukkertoppen. Det er tydelige spor i terrenget etter flomskred. Det er flere tydelige raviner i nedre del av fjellsiden. 3 større raviner, en over veg 228, og 2 stk over veg 222 som stammer flomskred hendelser på 70 tallet og 80 tallet. Den øvre rekken av bebyggelsen tolkes av NVE å være bygd oppå flomskredavsetninger. Det er usikker hvor langt flomskredavsetningene strekker mot dalbunnen ettersom terrenget er endret grunnet oppføring av

bebyggelse og infrastruktur. Foreløpig utkast av kvartærgeologisk kartlegging utført av NGU/UNIS ved Lena Rubensdotter er vist i figur 3.



Figur 3: Foreløpig utkast av kvartærgeologisk kartlegging av løsmasser under Sukkertoppen.

Helningskartet i figur 2 viser at store deler av fjellsiden er mellom 25 og 45 grader og dermed er potensielle løsneområder for snøskred. Utbredelsen av snøskredhendelsene i desember 2015 og februar 2017 er vist i figur 8, der man ser at disse skredene har et langt utløp i forhold til terrenget og størrelsen på skredet. På bakgrunn av tidligere snøskredhendelser og terrenget i fjellsiden vurderes det at snøskred er skredtypen som er dimensjonerende for alle faresoner, men jord- og flomskred vurderes å kunne treffe bebyggelse, men ikke så hyppig som snøskred. Foreløpig kvartærgeologisk kartlegging under Sukkertoppen vist i figur 3 og NGI rapport «Sukkertoppen Svalbard – avalanche incidents» viser til tidligere flomskred og avsetninger etter disse. NVE vurderer ikke flomskred til å være dimensjonerende skredfare.

5. Klimaanalyse

5.1. Ekstremverdianalyse av nedbør

Ekstremverdianalysen er utarbeidet i tråd med NVE rapport 22/2014, «Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller». Det er benyttet den Bayesianske teknikken for GEV og shape-parameteren funnet i tabell 2 i NVE rapport 22/2014.

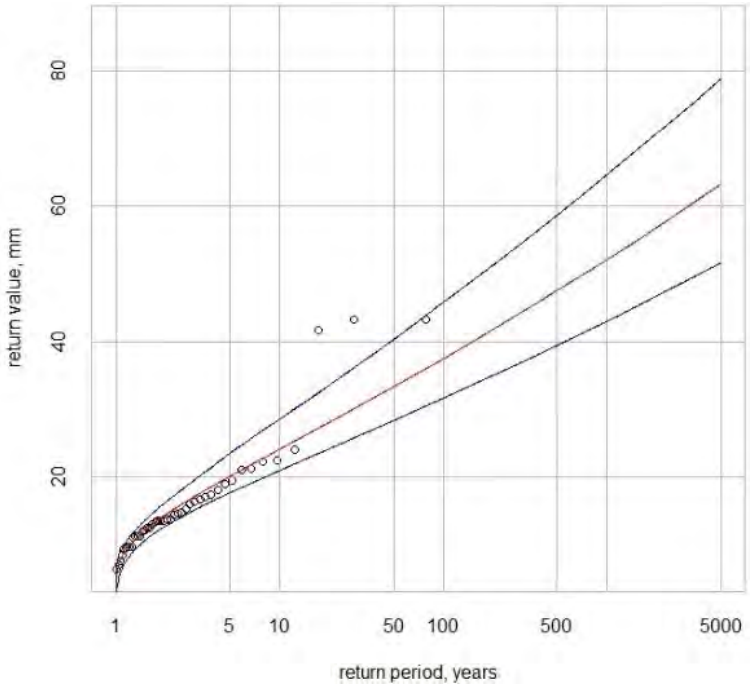
Det er benyttet nedbørsdata (RR) fra Svalbard Lufthavn (99840) i tidsperioden 1975-2017. Målestasjonen er ved flyplassen, mens Sukkertoppen er ca 5 km sørøst om målestasjonen, se illustrasjon i figur 3.

Figur 4: Plassering av målestasjonen vises som punkt ca 5 km nordvest for vurdert området fra Sukkertoppen markert med rød sirkel.

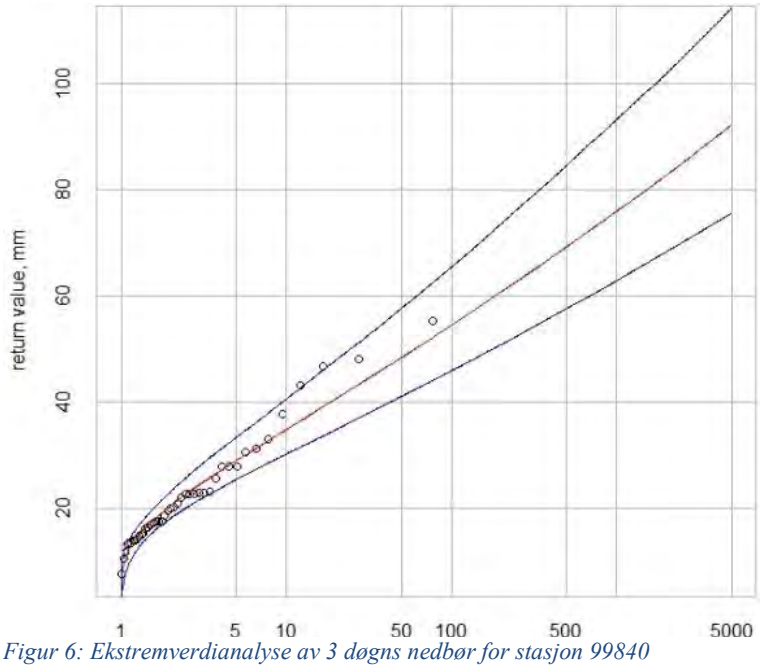
Det er utført ekstremverdianalyse på 1 døgn og 3 døgns nedbør, resultatet er presentert i diagram i figur 5 og 6. 3 døgns nedbør benyttes i alpene for å estimere bruddkanthøyden på snøskred. Det er gjort analyse av datasettet for hele året, ikke utelukkende for vinterhalvåret. Ekstremverdiene indikerer hvor mye nedbør som kan ventes basert på den gjeldende måleserien ved gitte gjentaksintervall. Blå kurver viser 95% konfidensintervall, og kan ansees som et anslag på usikkerhet i estimatet.

I en ekstremverdianalyse antas det at det ikke er en trend i målingene. Vi vet at nedbøren på Svalbard har økt. Dette betyr at usikkerheten er større enn det konfidensintervallet antyder. Usikkerheten øker jo færre observasjoner man har og jo høyere gjentakstintervallet er. Usikkerheten for returperioder på 1000 og 5000 år er derfor meget stor. Det må også påpekes at måleserien har såkalte «outliers», dvs. målinger som ikke passer med fordelingen som er brukt, og kan antas å ha høye gjentaksintervall.

Økt nedbør gjør at det de siste årene kan ha vært flere perioder med store nedbørsmengder innen ett år som ikke inngår i datagrunnlaget for ekstremverdianalysen av årlig maksimum. Dette gjør at man kan underestimere ekstremverdiene. På den annen side er uttaket av årlig maksimum basert på hele året (også perioden hvor det ikke kan gå snøskred), og ikke bare vintersesongen. Datagrunnlaget for hele året viser at det er litt overvekt av kraftige nedbørshendelser i barmarksesongen i forhold til vintersesongen.



Figur 5: Ekstremverdianalyse av 1 døgns nedbør for stasjon 99840



Figur 6: Ekstremverdianalyse av 3 døgns nedbør for stasjon 99840

5.2. Vind

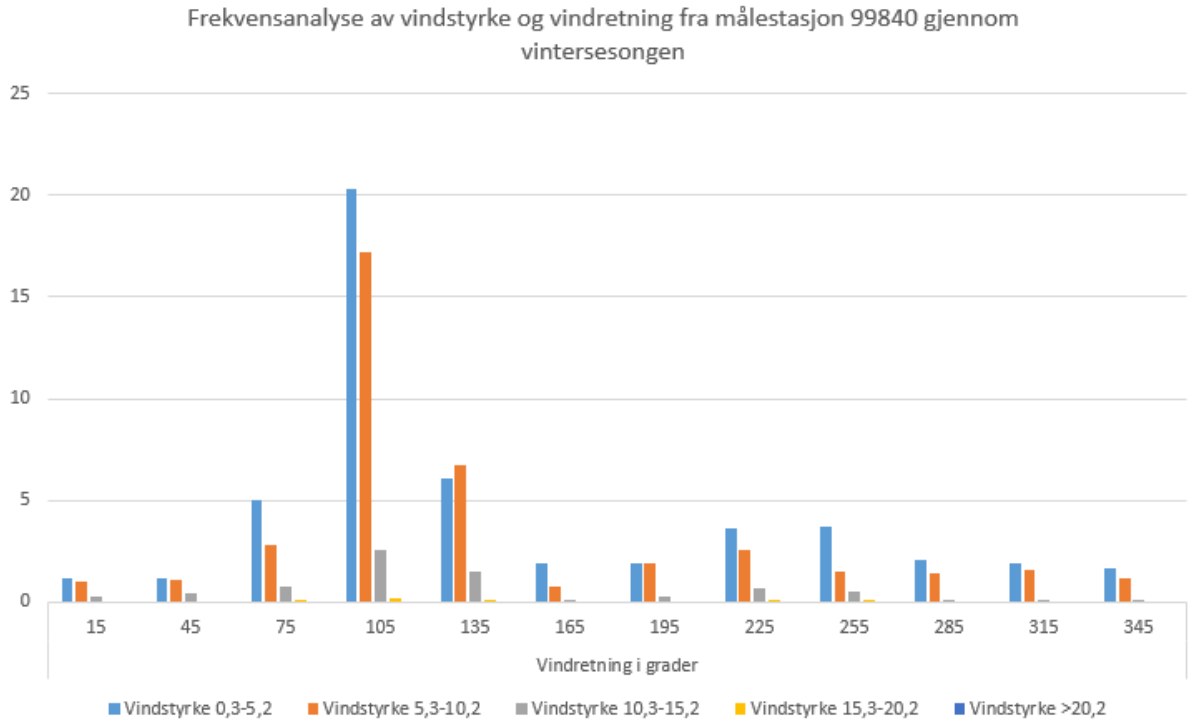
Vind transporterer snø inn i løsneområder og bidrar til pålagring som kommer i tillegg til snøfall. Longyeardalen er en sørvest-nordøst orientert U-dal med fjellsider som gradvis blir brattere opp mot 500 moh. På begge sider av Longyeardalen er det platåfjell med store flater. Ved vind vil snø på disse flatene bli transportert inn i løsneområder rundt Longyeardalen. Vindtransport av snø har stor innvirkning i regionen og NVE har derfor valgt å legge til ekstra snø i løsneområdene. Mengden er vurdert ut fra terrengform og gjentaksintervall. Tillegget av snø som følge av vindtransport er vist i tabell 1 under.

Tabell 1: Vindtransport av snø fører til økte mengde snø i løsneområdet og dermed økte bruddkanthøyder. NVE har gjort et valg der man må legge på gitte snømengder brukt i modellering for hvert scenario og type terreng.

Vindtransport

Returperiode i år		**100**	**1000**	**5000**
Terrengform				
	Skål/renne	60 cm	80 cm	100 cm
	Jevn		10 cm	20 cm

NVE har utført en analyse av hvilken vindretning som dominerer vinterstid i Longyearbyen. Vindretning vinterstid basert på måleverdier fra Svalbard Lufthavn siste 10 år gjennom vintersesongen, viser at vind fra øst og sørøst er dominerende og forekommer hyppig. Vind kraftigere enn 5,3 m/s fra østlig sektor, som har potensiale til å flytte på snø forekommer rundt 30% av tiden. Ved de to siste snøskredhendelsene som traff bebyggelsen i Longyearbyen i 2015 og 2017 var det sterk vind fra øst.



Figur 7: Analyse av dominerende vindretning fra Svalbard Lufthavn viser at vind fra østlig sektor dominerer vinterstid. X-aksen viser vindretning i grader, mens y-aksen viser hvor mange % av tiden det er registrert vind av gitt retning og styrke.

6. Vurdering av bruddkanthøyde for snøskred

Det er lagt til grunn at 1 mm nedbør tilsvarer 1 cm snø. Det er beregnet bruddkanthøyde, d0, basert på 28 grader bratt terreng som det er gjort beregninger ut fra. NVE har lagt til 30% usikkerhet i ekstremverdianalysen, for så lagt på vindtransport i snø i henhold til tabell 1. NVE har valgt å håndtere usikkerhet ved å legge på et klimapåslag i våre beregninger grunnet observerte endringer i Longyearbyen siste 10-15 år. Dette påslaget er gjort på 3 døgns ekstremverdier og utgjør omkring 20 cm for et skred med 1000 års gjentaksintervall. Det vurderes at det ekstra påslaget ikke utgjør en betydelig endring, med tanke på at vindtransport av snø er hele 80 cm.

Bruddkanthøyde for returperiode 100 år inklusiv vindtransport av snø

Skål/renne:	115 cm
Jevn:	65 cm

Bruddkanthøyde for returperiode 1000 år inklusiv vindtransport av snø

Skål/renne:	160 cm
Jevn:	100 cm

Bruddkanthøyde for returperiode 5000 år inklusiv vindtransport av snø

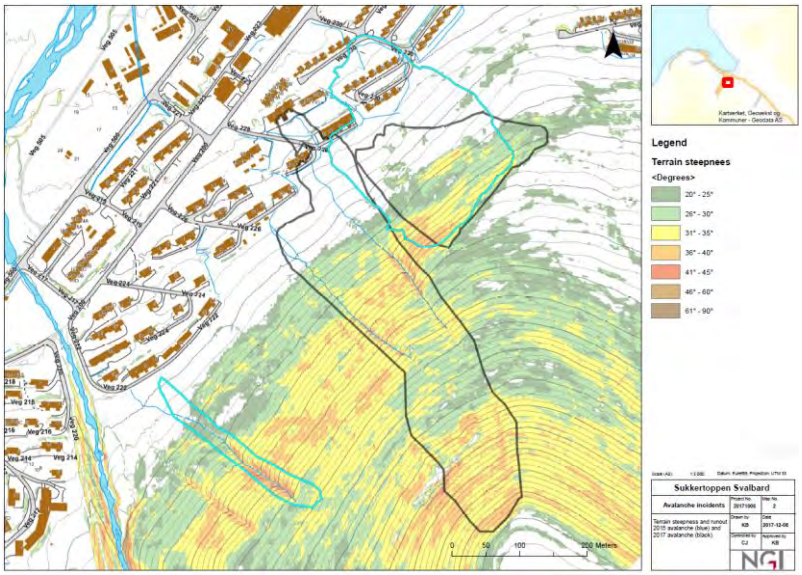
Skål/renne:	195 cm
Jevn:	125 cm

7. Modellering av snøskred i RAMMS

NVE har benyttet modelleringsprogrammet RAMMS for å modellere snøskred fra Sukkertoppen. Programmet er utviklet i Sveits og er tilpasset forholdene i alpene.

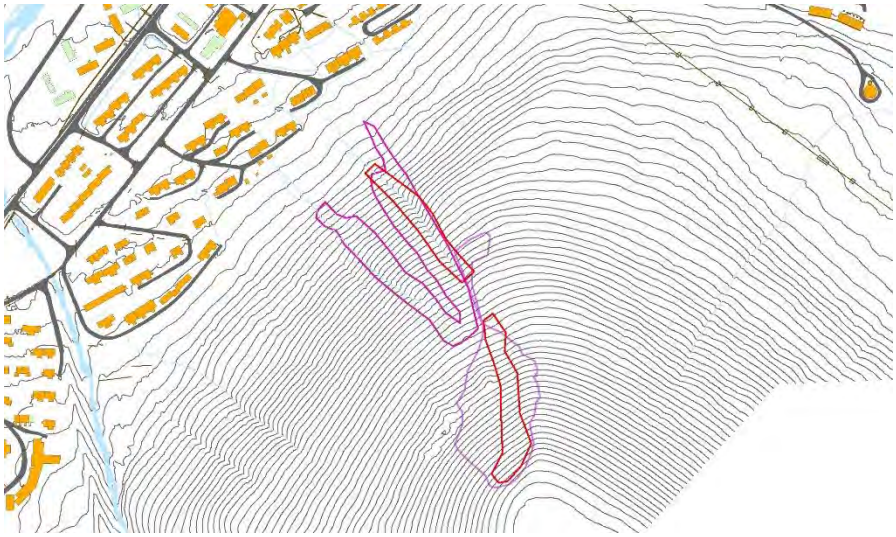
7.1. Kalkulering av tidligere hendelser

For å tilpasse parametere i RAMMS til forholdene på Svalbard er det utført tilbakekalkuleringer av kjente snøskredhendelser. Dette er spesielt viktig for å få realistiske friksjonsparametere.



Figur 8: Utløpet av snøskredet 21 februar 2017 vises med sort polygon. Registrering av snøskredets utbredelse utført av NGI etter snøskredet 21 februar 2017. Skredet fra 2015 er vist med lyst blått polygon.

Det er sett nærmere på skredhendelsen 21.februar 2017 der et snøskred startet øverst på Sukkertoppen og traff bebyggelsen i veg 228 vist i figur 8. Viser til notat utarbeidet av UNIS i dette prosjektet «Summary of snow depth changes due to the February 2017 avalanche» som baserer seg på GIS analyse av endringer i snømengder basert på laserscanning av Sukkertoppen før og etter snøskredet 21 februar. Viser også til notat «20171006-01-R_Rev0_Sukkertoppen history» utarbeidet av NGI i dette prosjektet som tar for seg kjent skredhistorikk fra Sukkertoppen. Disse to notatene og NVEs inntrykk etter befaring av Sukkertoppen dagen etter skredet (21 februar) er utgangspunktet for kalkuleringen.



Figur 9: Lilla polygoner viser erosjon av snø fra skredhendelsen februar 2017 og er hentet fra notatet «Summary of snow depth changes due to the February 2017 avalanche» utarbeidet av UNIS. NVE har justert løsneområdet som markert med rød polygon som bakgrunn for tilbakekalkuleringen av skredhendelsen.

7.2. Justering av friksjonsparametere

Friksjonen mellom skredmassene og underlaget har svært mye å si for rekkevidden og utbredelsen av snøskred. Friksjonen er avhengig av flere faktorer, blant annet returperiode på skred, størrelse på skred, høydenivå på skred og terrengform. NVE har justert på enkelte parametere i programmet RAMMS utover standardparametere.

Parametere som er justert er:

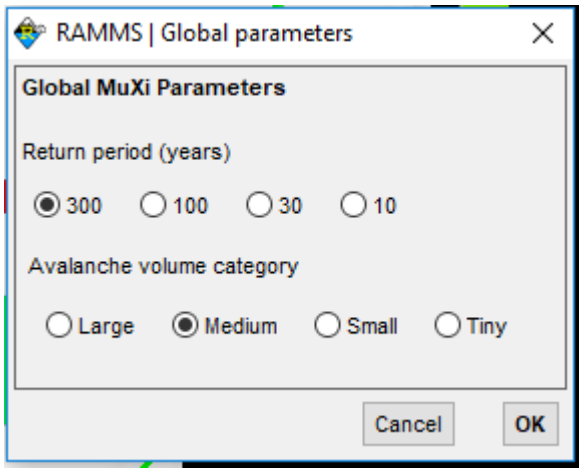
- Volum på snøskred
- Returperiode
- Høydeintervall
- Bruddkanthøyde

Det er benyttet tetthet for snø på 300kg/m^3.

Volumet på snøskred har innvirkning på friksjonen mot underlaget. Disse verdiene for volum er standardverdier definert ut fra forskning gjort i Sveits.

Størrelse på snøskred	**Volum**
Tiny avalanche	<5000 m^3
Small	5000 – 25000 m^3
Medium	25000 – 60000 m^3
Large	>60000 m^3

Friksjonsverdier mot underlaget blir også påvirket av returperioden på snøskredet. Er det et sjeldent skred som har returperiode på 300 år, så vil friksjonen mot underlaget være mindre enn ved et snøskred med returperiode på 30 år.



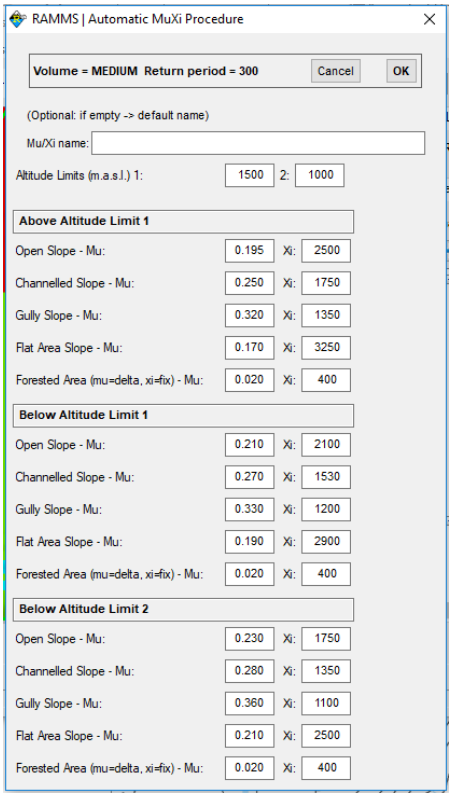
Figur 10: Returperiode og volumet på snøskredet har stor innvirkning på friksjonen mot underlaget, som igjen vil bestemme rekkevidde og utbredelse på snøskred.

Siste parameteren NVE har valgt å justere på er friksjonen ved forskjellige høydeintervall. Standard er at friksjonen mot underlaget blir høyere jo lavere i terrenget. Standardverdier for alpene er <1000moh, 1000-1500 moh og >1500 moh. NVE valgte høydeintervall <50 moh, 50-150 moh og >150 moh.

Det er gjort sensitivitetsanalyser for å se om disse parameterne gir store forskjeller for utløpene i skredet på Sukkertoppen 21 februar 2017 i forhold til registrert utløp. Skredet i nedre løsneområdet er sekundærskred som blir løst 10-14 sekunder etter det øvre skredet har startet basert på friksjonsparameter.

Parametere som gir størst utslag på rekkevidden er volum på skred og friksjon. Ved returperiode på 100 år, viser det seg at skredene går mer eller mindre like langt og stemmer godt overens med registrert skred i 21 februar 2017. Dette er om man setter friksjonen svært lavt, eller øker skredstørrelsen til M, som er et hakk utover anbefalt.
Merk at RAMMS ikke tar høyde for medriving av snø langs skredbanen slik som vil forekomme i naturen.

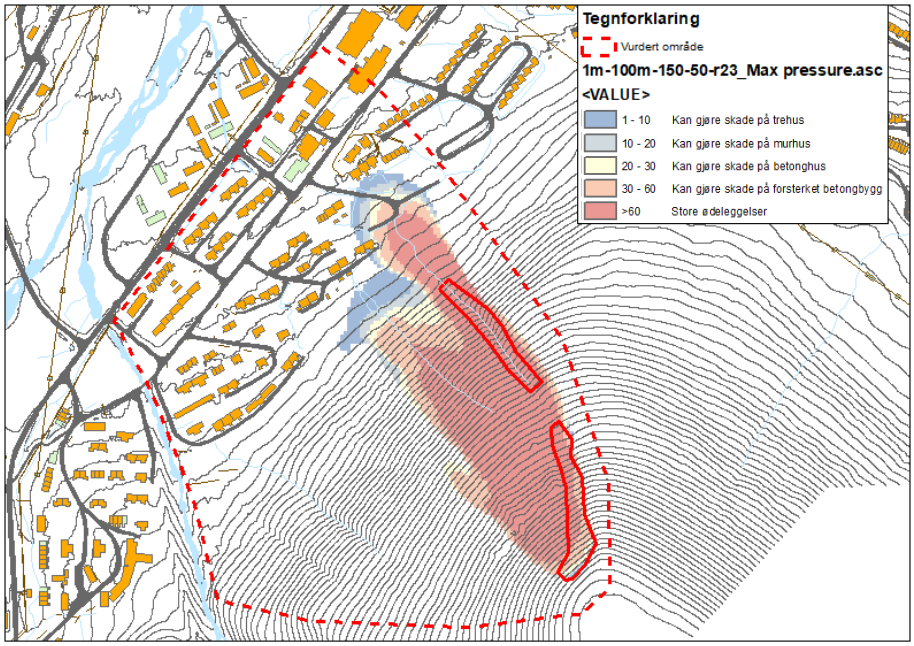
Med dette som bakgrunn vurderer NVE parametere presentert i tabell 2 vil være riktige modellering av skredhendelsen 21. februar 2017



Figur 11: Justering av hvilke høydeintervaller som skal ha forskjellig friksjon.

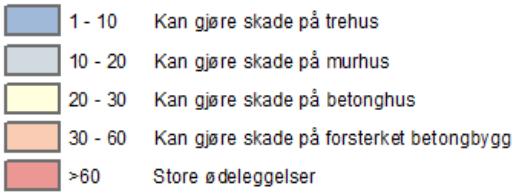
Tabell 2 Valgte parametere for tilbakekalkulering av skredhendelse 21. februar 2017

Gjentaksintervall	100
Volum	M
Høydeintervall	150 – 50
Bruddkant	1 meter i øvre og 0,5 meter i nedre



Figur 12: Modellering av utbredelse og rekkevidde for skredet 21.februar. Parametere som presentert i tabell 2. Nederste skred er sekundært og starter 12 sekund etter det øverste har løsnet.

Simuleringer for sensitivitetsanalysen finnes i vedlegg 1. I vedlegg 1 er illustrasjonene av en sensitivitetsanalyse der man analyserer virkning av å endre innstillinger i RAMMS. Det er utbredelsen av trykket (i kPa) fra skredet som er illustrert i kartene.



Figur 13: Tegnforklaring på sensitivitetsanalyse som viser trykket i kPa utøvd av snøskred og potensiell skade

7.3. Vurdering av løsneområder

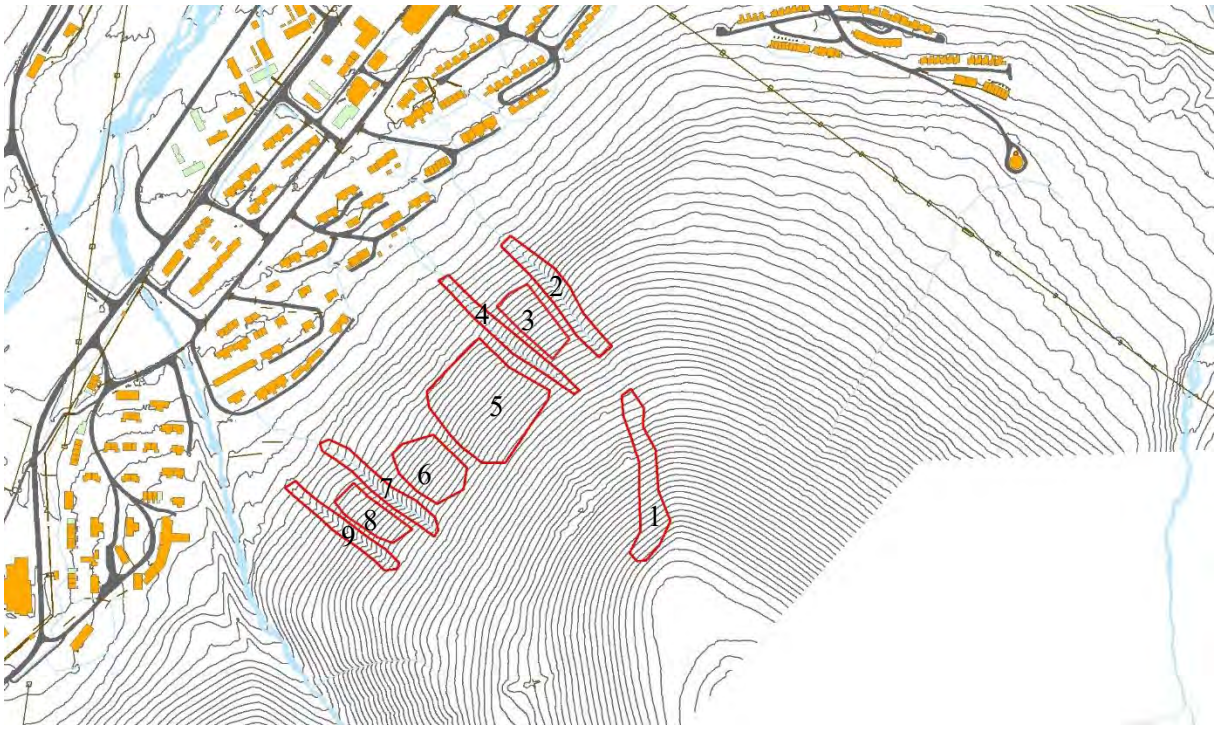
Å definere løsneområder er viktig for beregninger av rekkevidde og utbredelse av skred. Det er laget mange skredrapporter fra denne fjellsiden gjennom årenes løp. Snøskredet i februar 2017 var uvanlig for lokalsamfunnet, og ingen kan huske skred fra helt øverst Sukkertoppens fjellside med utløp helt ned til bebyggelsen.

Tommelfingerregelen tilsier at snøskred løsner ved 30 grader og brattere ved ferdsel i terrenget, men for sjeldne skred med gjentaksintervaller på 100, 1000 og 5000 år, vil snøskred også kunne løsne i slakere terreng. Avgrensning av løsneområdet er 28 grader og brattere.

Videre er terrengform ilagt en stor betydning for hvor det vil gå skred, og hyppigheten. Renner og forsenkninger samler fort snø ved vind, slik at pålagring av snø fort blir betydelig i forhold til nysnømengde, noe som igjen øker sannsynligheten for at skred løsner. Jevne flate områder der terrenget er ned mot 28 grader er noe mindre gunstige terrengformasjoner for å samle snø i store mengder. Likevel kan man ikke utelukke at skred kan løsne fra slike områder, men sannsynligheten er mindre. Denne typen terreng i områdene i øvre halvdel av fjellet er vurdert som potensielle løsneområder for scenarioene 1/1000 og 1/5000.

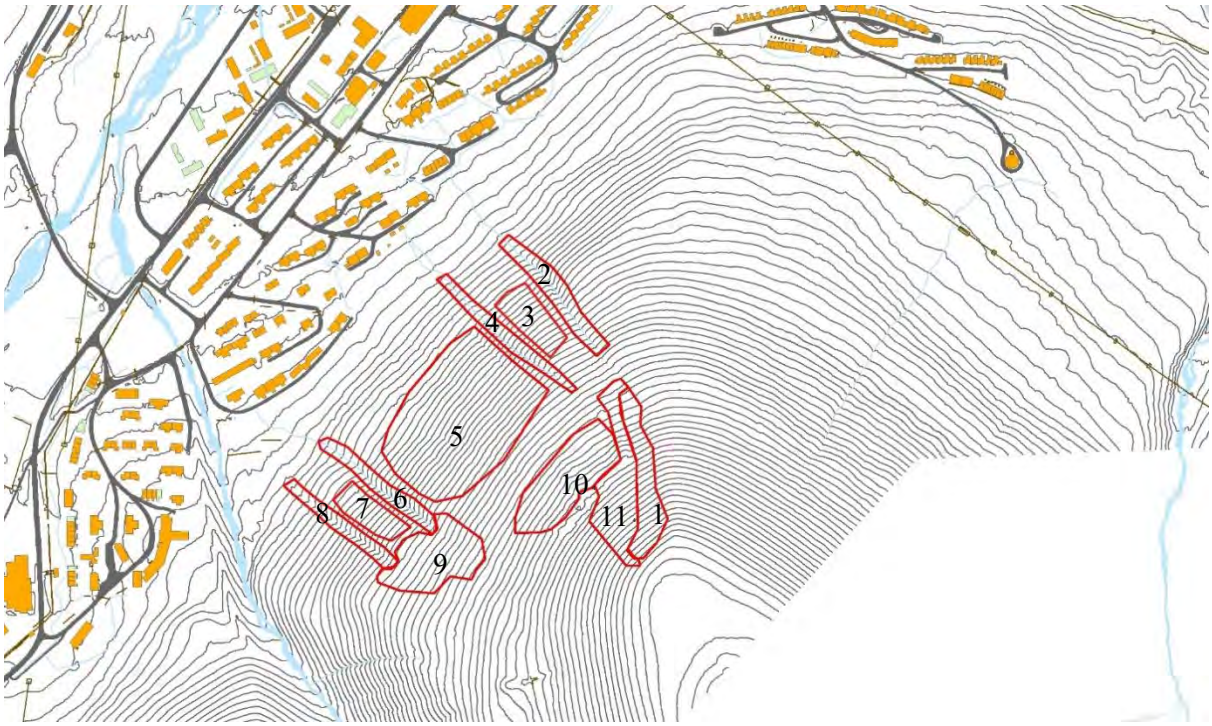
Størrelsen på løsneområdene vurderes å øke ved sjeldnere skred. Et svært sjeldent skred med årlig nominell sannsynlighet 1/5000, vil ha større løsneområder enn et skred med sannsynlighet 1/100.

På bakgrunn av befaring, bilder, tidligere skredhistorikk og analyser av kart er løsneområdene definert ut fra årlig nominell sannsynlighet på 1/100, 1/1000 og 1/5000. Disse er illustrert i henholdsvis figur 14, 15 og 16.



Figur 14: Løsneområder som er lagt til grunn for modellering for et scenario med årlig sannsynlighet 1/100. Skred nummer 1 løsner først og løser ut skred nummer 2. Snøskred nummer 3 – 9 løser ut hver for seg.

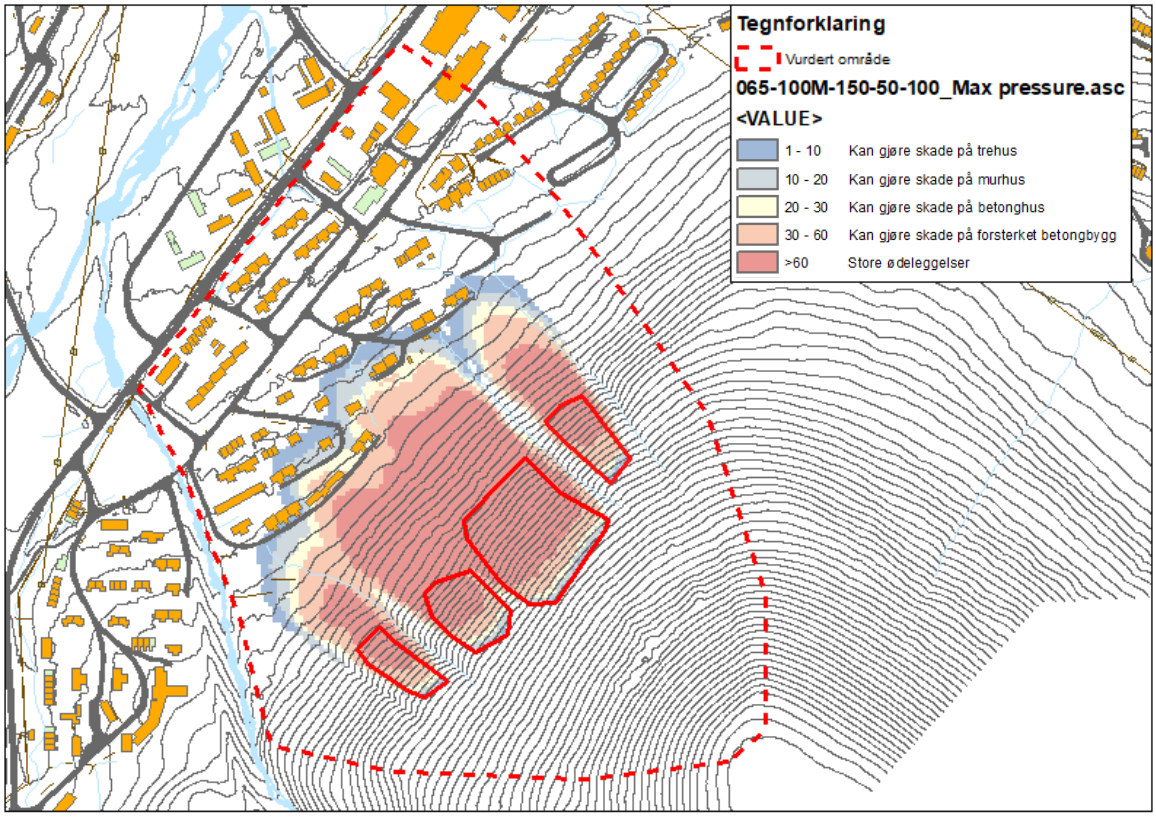
Figur 15: Skredbaner som er lagt til grunn for modellering av skred med årlig sannsynlighet 1/1000. Skredbane 1 løsner først, for så å løse ut skredbane 2 og 3. Skred bane 11 løser ut skredbane 5 og 6. Skredbane 10 løser ut først, for så å løse ut skredbane 7, 8 og 9.



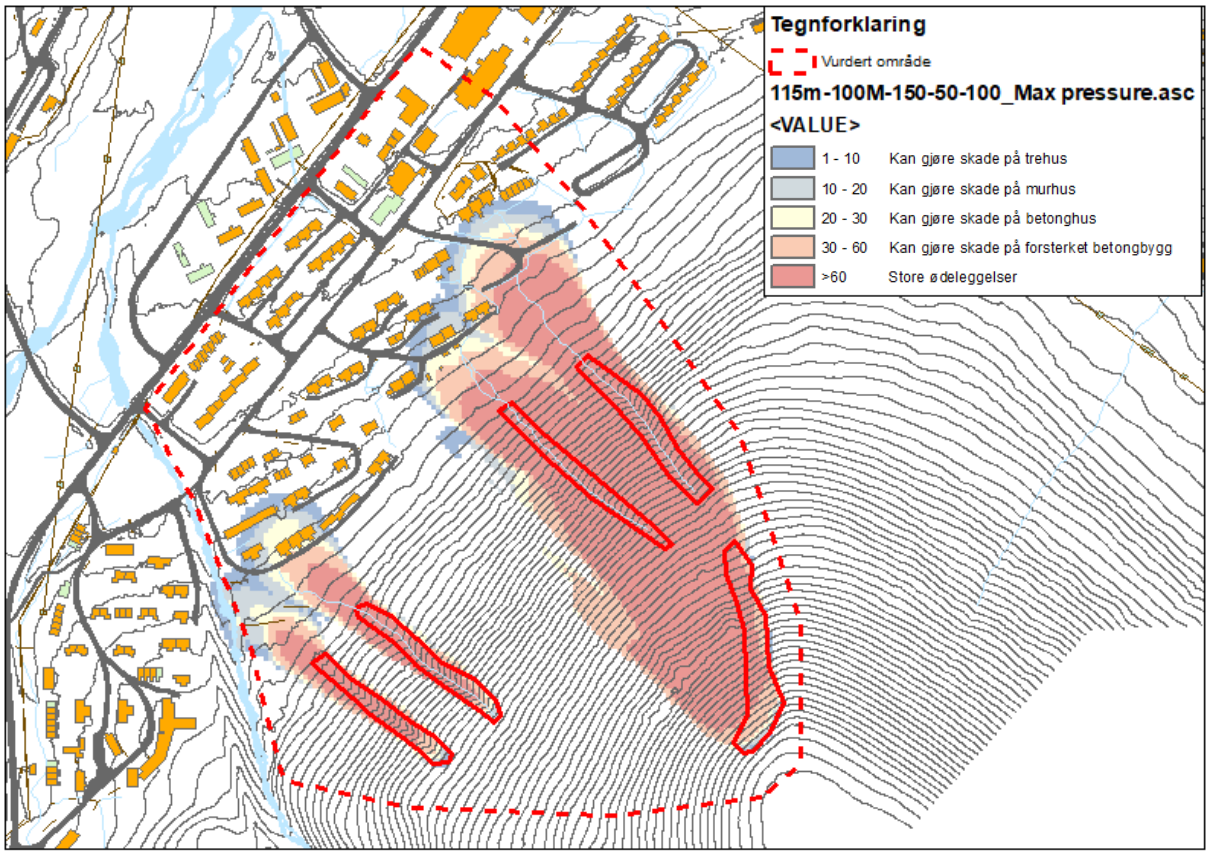
Figur 16: Skredbaner som er lagt til grunn for modellering av skred med årlig sannsynlighet 1/5000. De nedre skredbanene er sekundærskred som først løses ut etter at skredene høyere opp i fjellsiden løsner. Samlet sett er løsneområdene mye større for 1/5000 scenarioet enn både 1/1000 og 1/100 scenarioet. Skredbane 1 løser ut skredbane 2, 3 og 11. Skredbane 11 løser ut skredbane 4 og 10. Skredbane 10 løser ut skredbane 5, mens skredbane 9 løser ut skredbane 6, 7 og 8.

7.4. Beregninger:

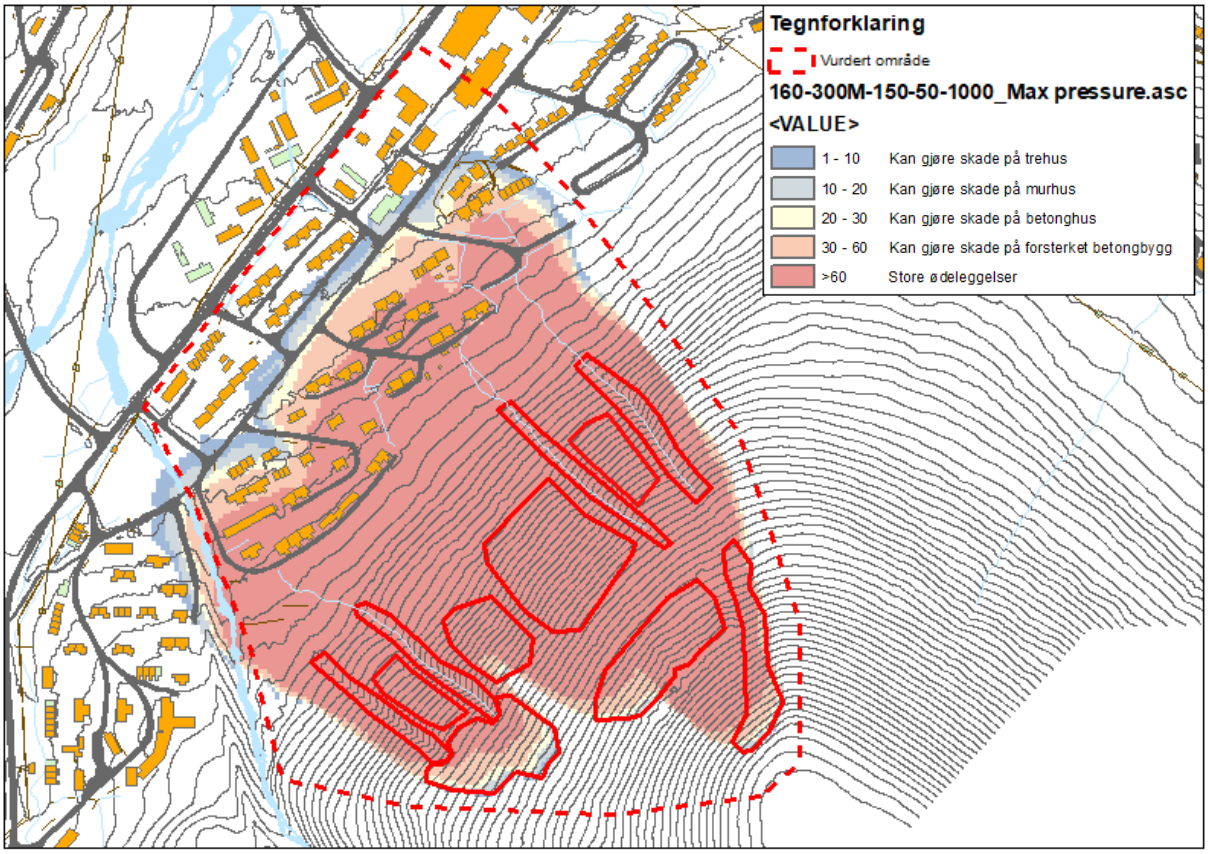
Modelleringer er utført i RAMMS med 1 meter terrengmodell resamplet til 5 meter etter anbefaling fra utvikler av programvaren. Tetthet på skredet er 300kg/m^3 som anbefalt i brukermanualen til RAMMS.



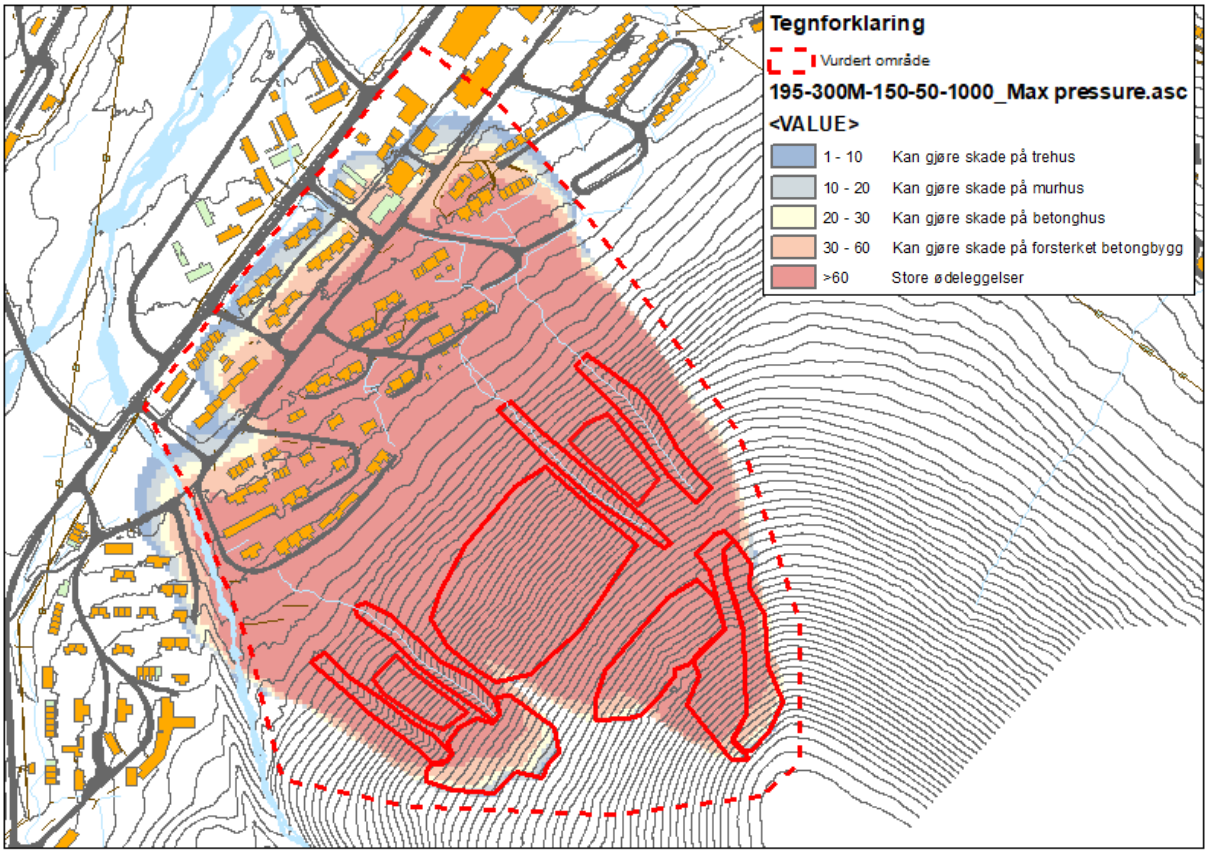
Figur 17: Maks trykk fra et snøskred som løsner i nedre del av fjellside med returperiode 100 år – 0,65 meter bruddkant i løsneområdet jevnt terreng – 100 år – str M – høydenivå 150-50.



Figur 18: Maks trykk i skredbanene ved 100 års returperiode med bruddkant på 1,15m snø i renner/forsenkninger, 100M og høydeintervallet 150-50



Figur 19: Maks trykk fra et snøskred med returperiode på 1000 år – 1 m bruddkant i løsneområdet i jevnt terreng og 1,6 m i renner – 300 år – M – høydeintervall 150-50



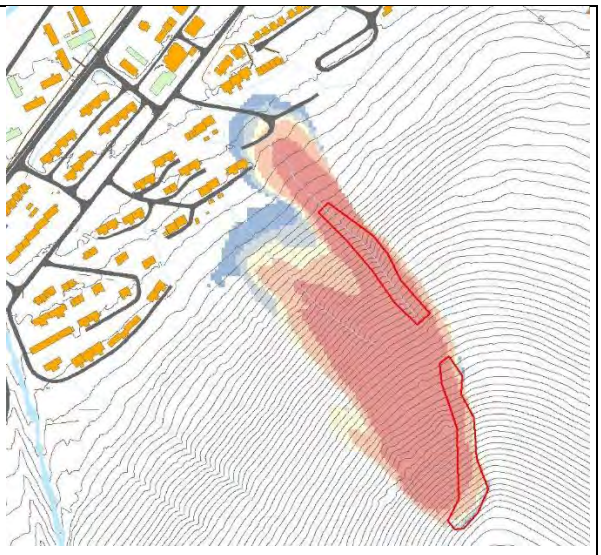
Figur 20: Maks trykk fra et snøskredscenario med returperiode 5000 år – 1,25 m bruddkant i løsneområdet på jevnt terreng og 1,95 m i renner – 300 år – M – høydenivå 150-50

8. Oppsummering:

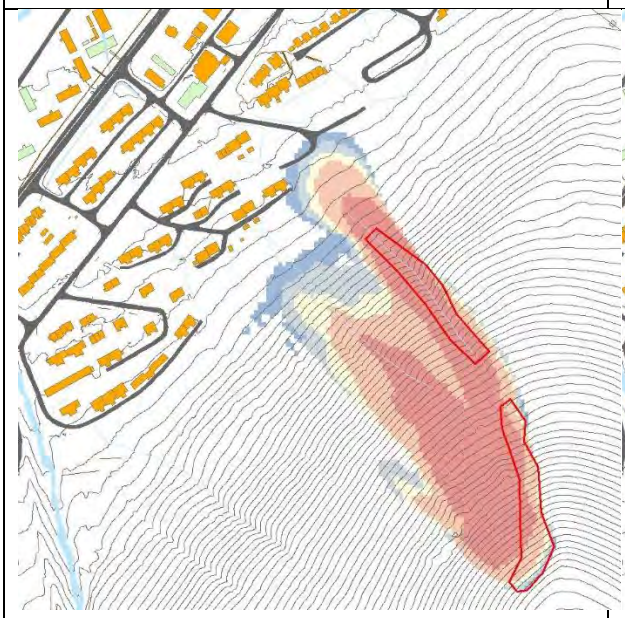
De utførte modelleringene indikerer rekkevidde og utbredelse på snøskred ved årlig sannsynlighet 1/100, 1/1000 og 1/5000. Modelleringene er et av flere verktøy man benytter når det skal vurderes utstrekning på faresoner. Det er viktig at faresoner ikke tegnes direkte ut fra modelleringene. Det må alltid gjøres en faglig og skjønnsmessig vurdering ut fra all tilgjengelig informasjon om kartleggingsområdet for å vurdere om modellresultatene er realistiske, og for å vurdere hvordan faresonene til slutt bør tegnes.

Vedlegg 1: Sensitivitetsanalyse

Størrelse large - 100 – 1m og 0,5m – høydeintervall 100-300



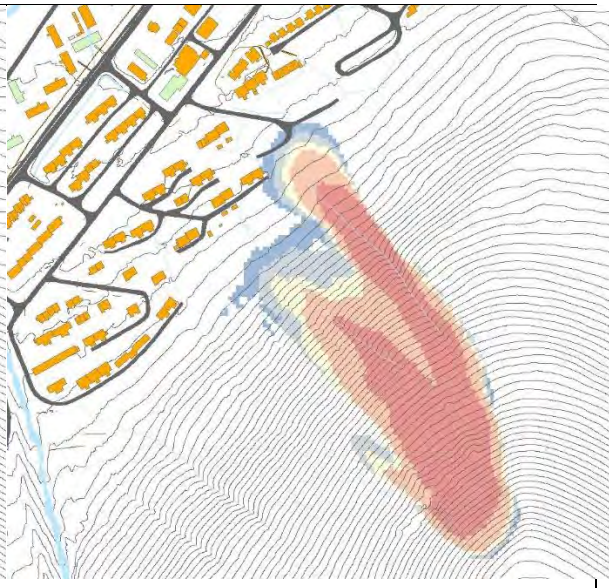
Størrelse medium - 100 – 1m og 0,5m – høydeintervall 100-300



Størrelse small – 100 – 1m og 0,5m – høydeintervall 100-300

Størrelse tiny - 100 – 1m og 0,5m – høydeintervall 100-300

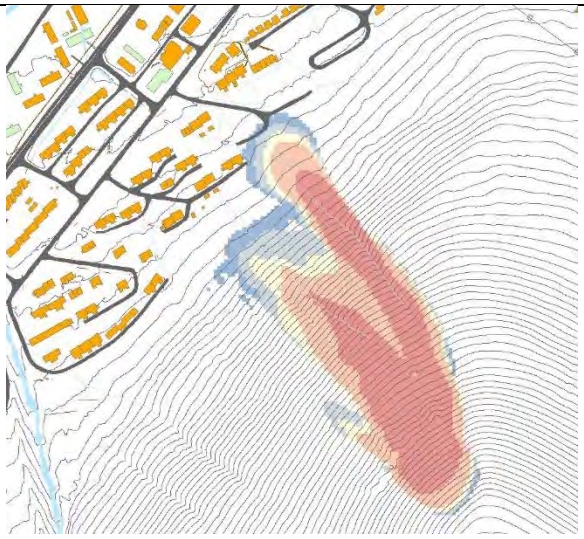
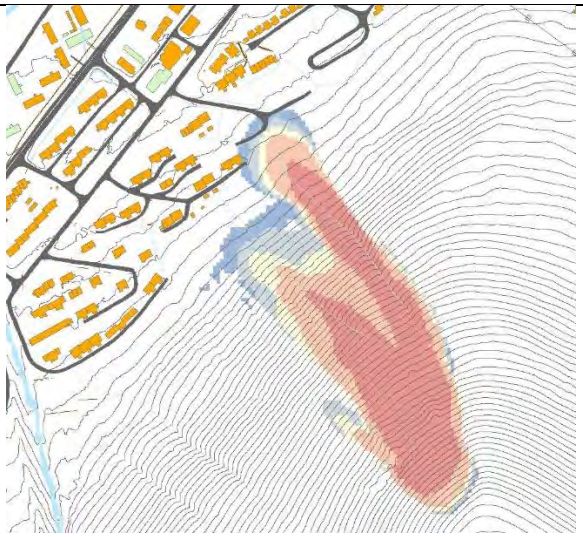
Høydeintervall 1500-1000 – 100 - small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100

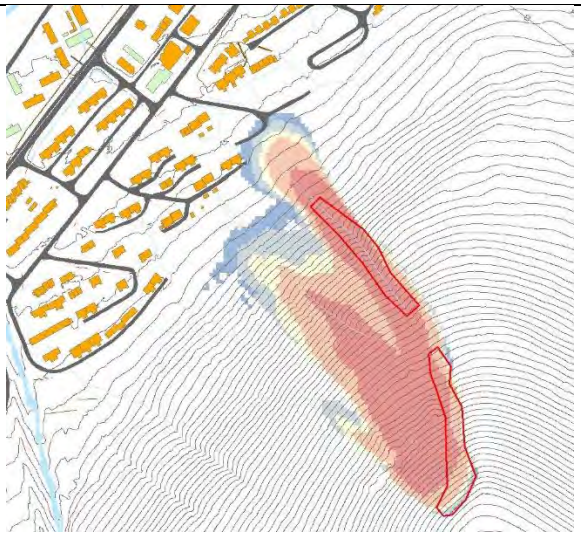


Høydeintervall 300-100 – 100 – small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100

Høydeintervall 150-50 – 100 - small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100

Høydeintervall 0-0 – 100 – small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100

	
10 års returperiode - small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100	30 års returperiode - small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100
	
100 års returperiode - small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100	300 års returperiode – small - 1m og 0,5m – høydenivå 300-100

	
Bruddkant 0.8 m og 0,5 m – 100 – small – høydenivå 300-100	Bruddkant 1 m og 0,5 m – 100 - small – høydenivå 300-100
Bruddkant 1,2 m og 0,5 m – 100 - small – høydenivå 300-100	Bruddkant 1,2 m og 0,7 m – 100 – small – høydenivå 300-100

Notat

Oppdragsgiver	Navn Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)	Kontaktperson Jeanette Gundersen
Oppdrag	Nummer og navn 17228 Svalbard, Longyearbyen – Skredfarevurderinger i Lia	Oppdragsleder Kalle Kronholm
Dokument	Nummer 17228-01-1 Utført av Kalle Kronholm	Dato 2018-02-06 Kontrollert av Andrea Taurisano

Vurderinger for dimensjonerende skred

1 Bakgrunn

Skred AS er bedt om å bistå NVE med å vurdere mulige sikringsløsninger for bebyggelsen nedenfor Lia, i området vist i Figur 1. I den forbindelse ønsker NVE å bruke ulike ekspertgrupper til å simulere dimensjonerende skred. Basert på disse simuleringene, skal det tegnes faresoner for området. Det er tidligere gjort skredfarevurderinger for området, og senest i 2016 utarbeidet faresoner (NVE rapport 2016-91).

1.1 Mål

Denne rapporten presenterer dimensjonerende skred for det vurderte området, og gir en kort beskrivelse av datagrunnlag og vurderinger som er gjort for å komme frem til dimensjonerende skred.

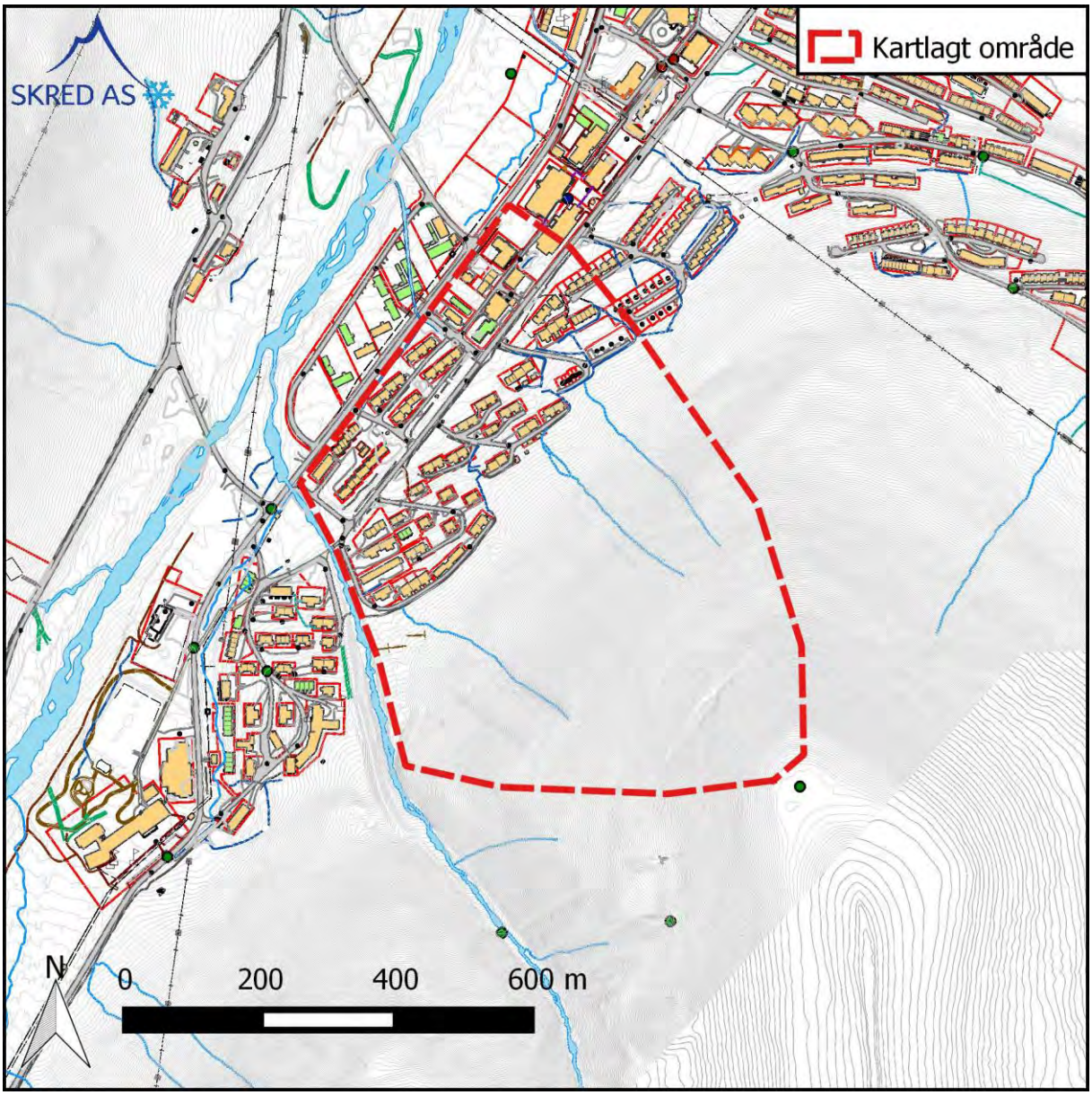
Denne rapporten inneholder ikke en fullstendig gjennomgang av kjente skredhendelser og tidligere vurderinger, siden dette er utført i andre rapporter. Vi har heller ikke beskrevet utført feltarbeid.

1.2 Grunnlag

Vi har benyttet RAMMS 1.7.06 til alle beregninger. Terrengmodellen anvendt i beregningene er DTM1_S2008_13651_LYB_FKB-B_TT.tif, som er gjort tilgjengelig av NVE. Merk at terrengmodellen lå med projeksjon WGS84/33N, men at vi har omdefinert den til ETRS89/33N, slik det ble avtalt på møte i Longyearbyen.

Figurene viser trykk, med en tetthet i skredmassene på 300 kg/m^3, ettersom NGI under møtet i Longyearbyen mente at gjorde det lettere å sammenligne resultater av beregningene. Av samme grunn anvendes en grenseverdi på 1 kPa i figurene (se kapittel 5 side 15 for anvendt fargeskala). Dette til tross for at trykk ikke nødvendigvis gir mest

informasjon av nytte for en skredfarekartlegging eller design og dimensjonering av sikringstiltak.



Figur 1: Vurdert område.

2 Snøskred

Det finnes ingen norsk standard for beregning av utbredelse av snøskred. Vi har derfor anvendt en kombinasjon av skjønn og metoder anbefalt i de Sveitsiske retningslinjer.

Først er det utført etterregning av (delvis) kjente hendelser, deretter er det foreslått dimensjonerende skred for det vurderte området.

2.1 Etterregning av hendelsen 2017-02-21

Omrisset av denne skredhendelsen (Figur 2) er digitalisert fra et feltkart NGI hadde med på befaring i november 2017. Vi ser at det i ettertid er justert litt på de øvre deler av omrisset (NGI rapport 201710006-01-R), men det har ingen reell betydning for analysen.

2.1.1 Utløsningsområde foreslått av UNIS

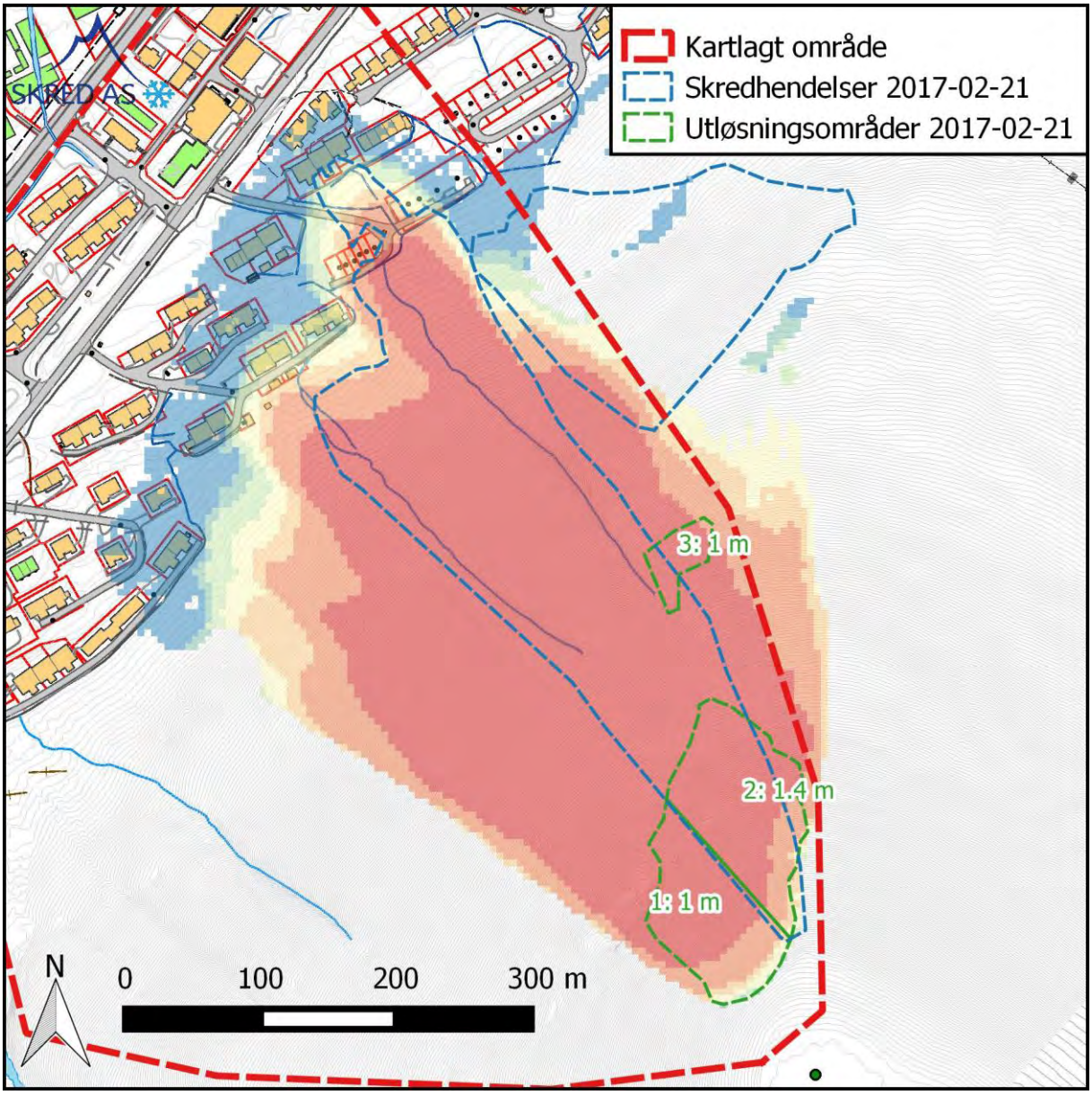
UNIS har, basert på laserskanninger og tolkning av bilder, foreslått følgende areal og bruddkanter på utløsningsområder og medrivningsområder:

- Øvre og nedre utløsningsområde med gjennomsnittlig bruddkant på 1,0 m.
- Medrivning i en stor del av skredbanen på gjennomsnittlig 0,4 m.

I RAMMS kan ikke medrivning inkluderes, og vi har derfor justert forslagene fra UNIS på følgende måte (Figur 2):

- Den nedre delen av utløsningsområdet ble separert fra den øvre delen, og fikk bruddkant d_0=1,0 m.
- Den øvre delen av utløsningsområdet ble delt i nord og sør. Den nordlige delen fikk d_0=1,4 m, for å inkludere medrivning. Den sørlige delen fikk d_0=1,0 m, siden det har ikke var medrivning nedover.
- Totalt gir dette et volum på 28900 m^3. I RAMMS parametertabellen svarer det til en størrelse M.
- Vi vurderer at denne hendelsen har en årlig sannsynlighet på 1/100, og har derfor satt dette i RAMMS. Merk at bruddhøyden på d_0=1,4 m i utløsningsområde 2 stemmer svært godt med foreslåtte verdier for dimensjonerende bruddhøyder for en hendelse med årlig sannsynlighet på 1/100 (d_0=1,3 m) i Tabell 4.
- Friksjonsverdier ble som vurdert over, satt til M100, med høydenivå på 500 moh. og 100 moh. slik vi ofte bruker å gjøre.
- En horisontal oppløsning i modellberegningene er brukt, som avtalt på møte i Longyearbyen.

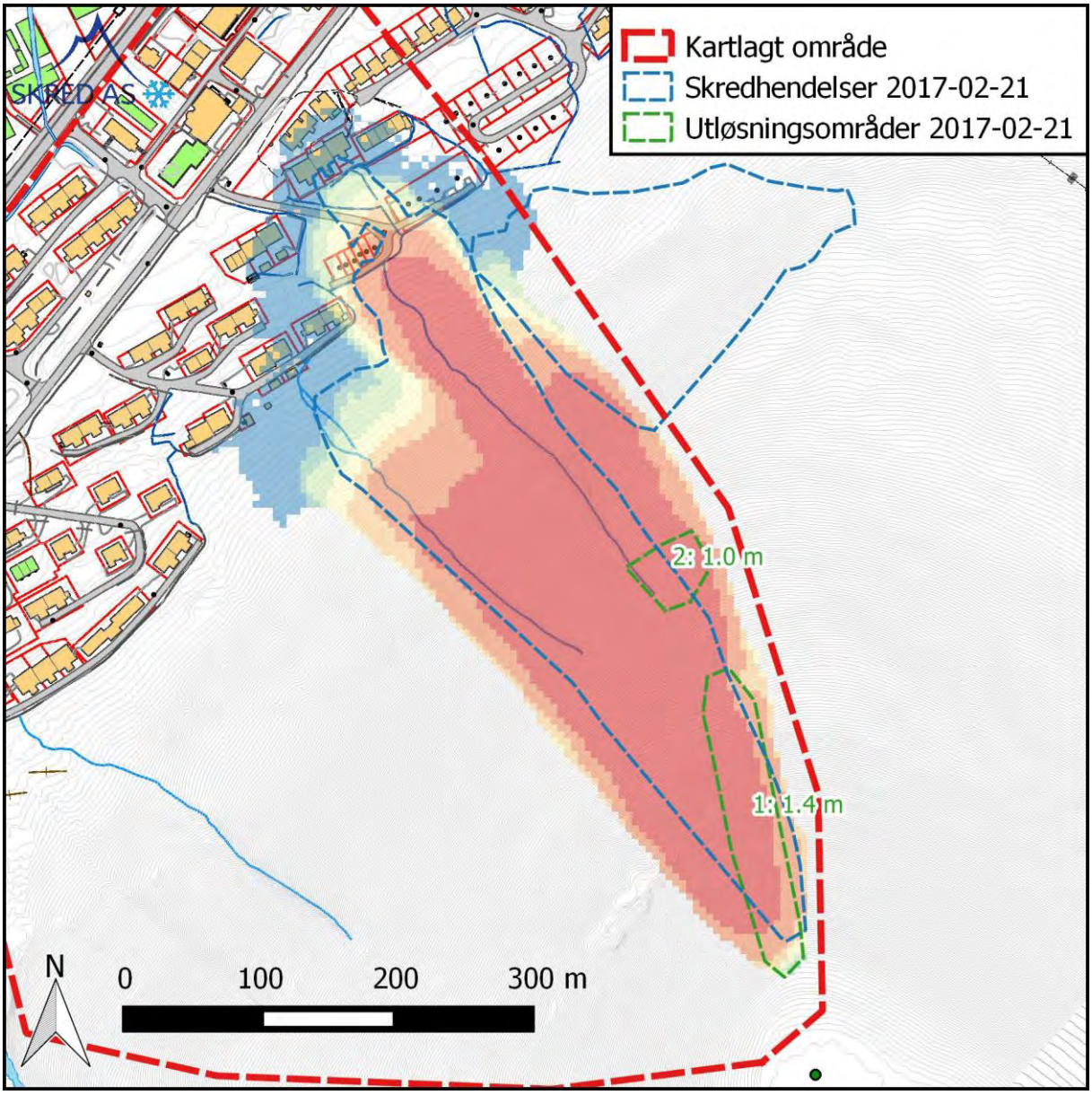
Beregnet skredutbredelse er vist i Figur 2. For området med lengst utløp stemmer beregnet utløp med trykk >1 kPa bemerkelsesverdig godt med tegnet skredomriss, med unntak av noe for stor side verts utbredelse av beregnet utløp. For områdene lenger sør, er skredutløp betydelig lenger enn observert skredomriss. Også i det sørlige området stemmer beregnet utløp relativt bra med observert omriss dersom bruddkanten i utløsningsområde 1 settes til d_0=0,4 m (ikke vist i figur).



Figur 2: Observert skredomriss for hendelsen 2017-02-21 sammenlignet med beregnet skredutbredelse med utløsningsområder og bruddkanter modifisert etter forslag fra UNIS, og friksjonsverdier M100 med høydenivå på hhv. 500 moh. og 100 moh.

2.1.2 Utløsningsområde bak rygg

Med et utløsningsområde akkurat bak ryggen, og d_0=1,4 m (svarende til bruddkanten foreslått av UNIS, og omtrent et gjentaksintervall på 100 år gitt i Tabell 4) samt et sekundærskred lenger nede i skredbanen med bruddkant d_0=1,0 m (foreslått av UNIS samt i Tabell 4), gir beregnet utløp overraskende bra resultater (Figur 3). Faktisk er det bedre overensstemmelse mellom observert omriss og resultater enn i Figur 2.



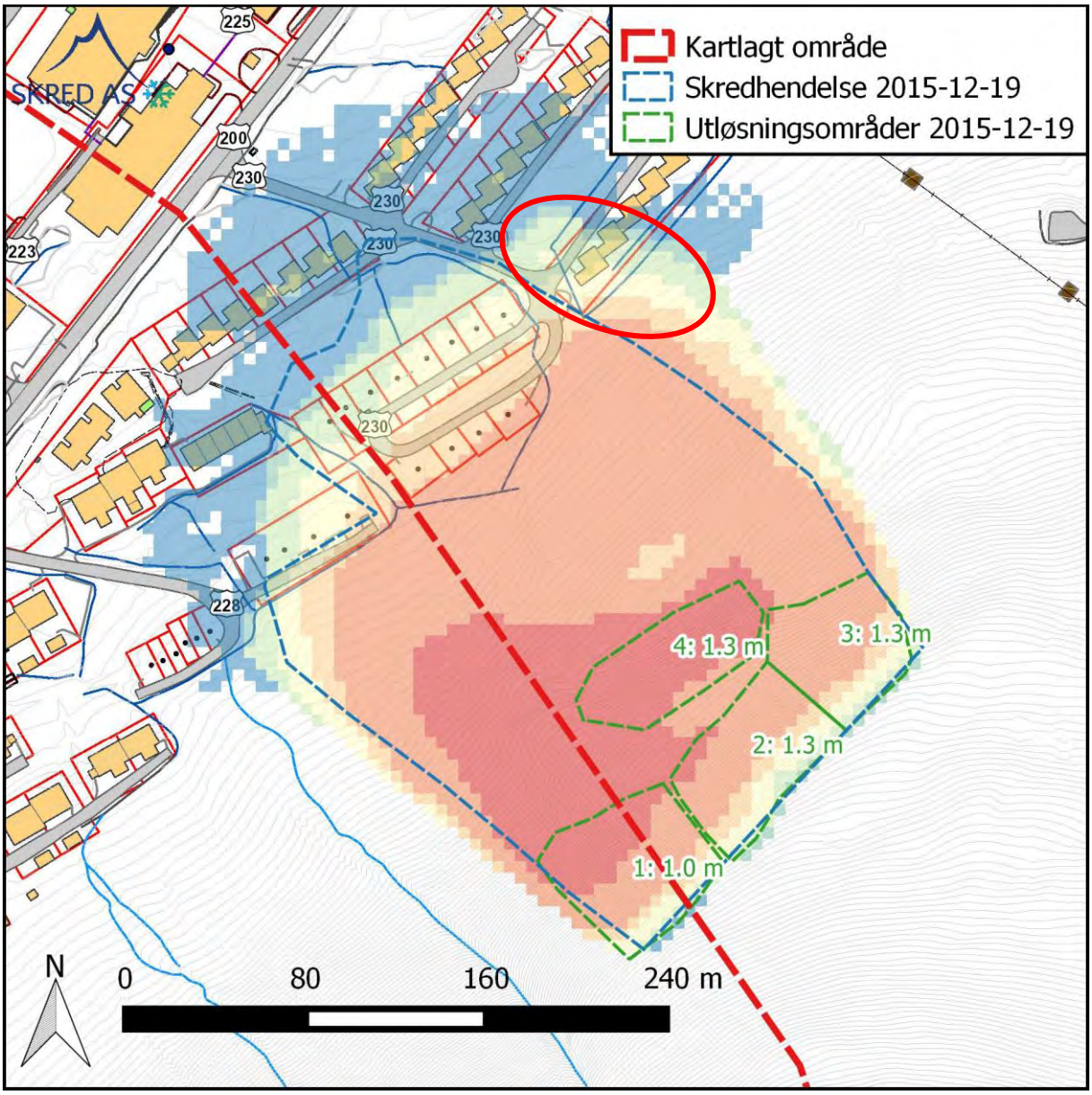
Figur 3: Observert skredomriss for hendelsen 2017-02-21 sammenlignet med beregnet skredutbredelse med utløsningsområder og bruddkanter tatt fra hhv. terrengmodellen og dimensjonerende 100-års hendelse (Tabell 4). Friksjonsverdier M100 med høydenivå på hhv. 500 moh. og 100 moh.

2.2 Etterregning av hendelsen 2015-12-19

Omrisset av denne skredhendelsen er digitalisert fra NGI befaringskart medbrakt til befaringen i november 2017. Formen på utløsningsområdet er estimert fra NGI rapport 201710006-01-R. Bruddhøyde er delvis estimert fra NGI rapport 201710006-01-R, og delvis fra dimensjonerende høyder i Tabell 4. Anvendte verdier for bruddhøyde er vist i Figur 4. De viste areal og bruddhøyder gir et samlet volum på 17840 m^3, noe som svarer til størrelse Small i RAMMS. Vi antar at denne hendelsen svarer til et snøskred med årlig sannsynlighet

på 1/100-1/300. Friksjonsparametre er testet med både M100, M300, S100 og S300 alle med høydenivå på hhv. 500 moh. og 100 moh.

Med de angitte bruddhøyder og utløsningsområder, gir M300 beste resultat, men det er vanskelig å gjenskape det observerte tydelige skillet mellom høyt og lavt trykk i den nordlige delen av skredutløpet (rød sirkel i Figur 4). Mer sannsynlige friksjonsverdier ut fra antatt volum og RAMMS anbefalinger (S100 og S300) gir kortere utløp enn vist i Figur 4.



Figur 4: Etterregning av 2015-hendelsen. Bruddkanter og utløsningsområder anvendt i beregningene er vist. Resultat med friksjonsparametre M300 er vist, og gir beste tilpasning til observert skredomriss, hvis trykkkriteriet på 1 kPa legges til grunn.

2.3 Utløsningsområder

Utløsningsområdene i de dimensjonerende skredhendelsene er definert på bakgrunn av terrenghelning (tatt fra 1 m og 0,25 m terrengmodellene), -form (konkav/konveks), og avstand fra platå og rygg. Generelt gjelder følgende:

- 100-års scenario: Søkk sammenhengende brattere enn 30°. Utløst slik at de beveger seg sammenhengende, hvilket i praksis er gjort ved at det øvre utløsningsområdet startes 10 sekunder før de nedre områdene.
- 1000-års scenario: Søkk og andre parti sammenhengende brattere enn 30°. Utløst slik at de beveger seg sammenhengende, hvilket i praksis er gjort ved at de øvre utløsningsområdene startes 10 sekunder før de nedre områdene.
- 5000-års scenario: Søkk og andre parti sammenhengende brattere enn 30°, omtrent som for 1000-års hendelsen. Utløst slik at de beveger seg sammenhengende, hvilket i praksis er gjort ved at de øvre utløsningsområdene startes 10 sekunder før de nedre områdene.

Utløsningsområdene er vist i Figur 12, Figur 13, og Figur 15.

2.4 Bruddkanthøyde

2.4.1 Klimaanalyse

Det er foretatt en klimaanalyse basert på nedbørdata fra eklima.met.no samt DAGUT i Hydra2. Vi har analysert nedbør og vind for vinterhalvåret, som vi har definert som januar, februar, mars, april, november og desember (som i METreport 2017/15, figur 3.3.2). I denne perioden forventes nedbør hovedsakelig å komme som snø, muligens på snødekt mark. Det er brukt data fra de to stasjonene 99840 Svalbard Lufthavn med data fra perioden 1975-2017 (42 år) og 99860 Longyearbyen med data fra perioden 1911-1977 (66 år). Dataseriene for begge stasjoner er svært kort sett i forhold til gjentakelsesintervall på 1000 år og spesielt 5000 år.

Vi har utført ekstremverdianalyse av nedbør over tre døgn, siden dette anvendes i den Sveitsiske standarden som inngangsverdi i dimensjonerende bruddhøyde. Disse analysene er gjort i eklima.met.no. I tillegg har vi vurdert usikkerheter i ekstremverdianalysen basert på nedbør over 1 døgn, samt 5 døgn. Dette er gjort for 99840 Svalbard Lufthavn med DAGUT i Hydra2.

Registrerte maksimale nedbørmengder over tre døgn ved de to stasjonene er vist i Tabell 1. Verdiene er generelt høyere for den nyere måleserien fra 99840 Svalbard Lufthavn enn for 99860 Longyearbyen.

Ekstremverdianalysen fra Eklima for maksimale nedbørmengder over tre døgn er vist i Tabell 2. Også her er det høyere forventningsverdier for den nyere måleserien fra 99840 Svalbard Lufthavn enn for 99860 Longyearbyen.

Tabell 1: Maksimale observerte nedbørmengder over 3 døgn for månedene januar, februar, mars, april, november og desember. Data fra eklima.met.no.

Rangering	99840 Svalbard Lufthavn (1975-2017)		99860 Longyearbyen (1911-1977)	
	Nedbørmengde (mm)	Dato	Nedbørmengde (mm)	Dato
1	48,1	04.12.1995	42,9	06.03.1974
2	46,4	09.11.2016	40,2	16.02.1959
3	43,1	31.01.2012	39,2	09.02.1960
4	33,0	22.11.2002	28,4	06.03.1976
5	31,1	18.01.2010	25,2	28.12.1966
6	30,4	17.03.2011	23,7	07.12.1945
7	28,8	30.11.1993	22,5	16.01.1946
8	27,9	06.03.1976	22,4	14.12.1961
9	27,8	28.02.1991	22,2	14.03.1964
10	27,8	22.11.1999	19,1	13.01.1912

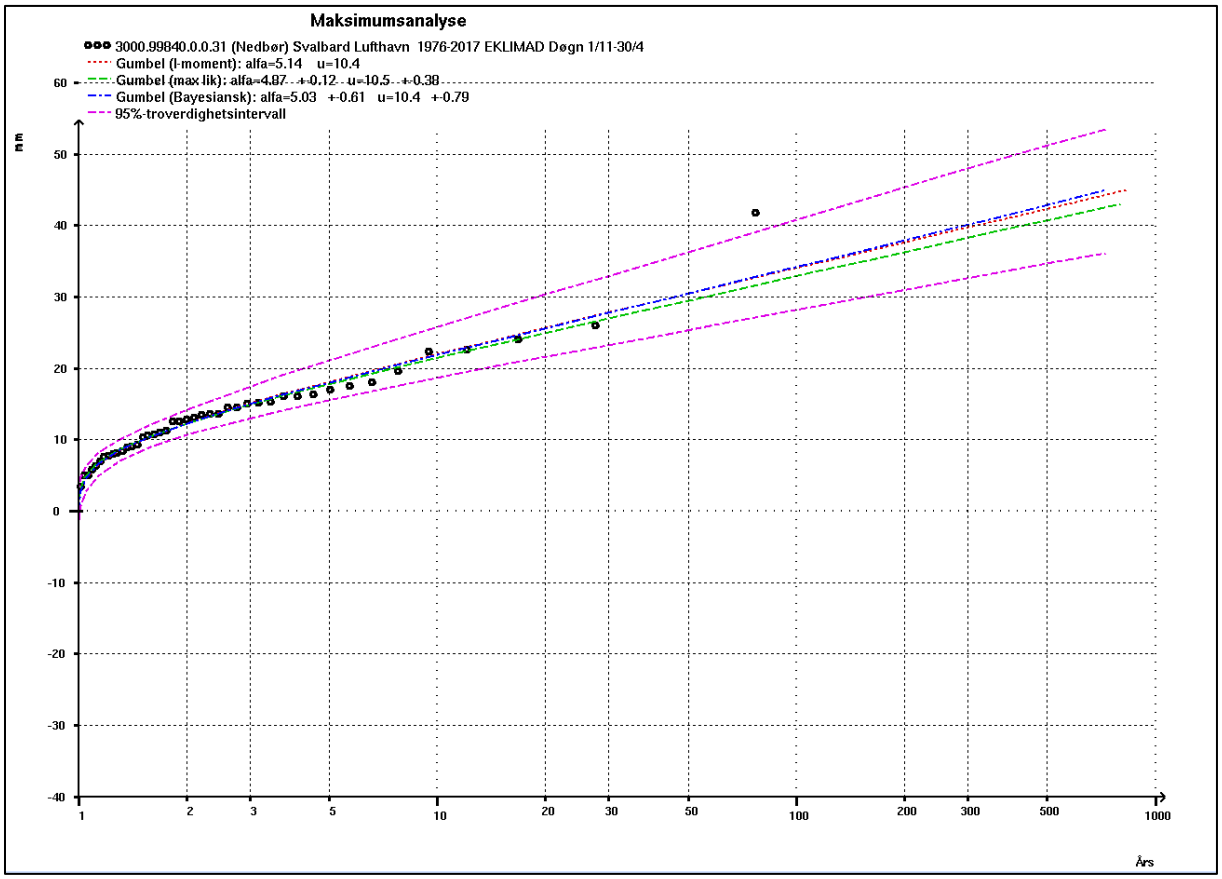
Tabell 2: Ekstremverdianalyse av 3-døgnsnedbør fra eklima.met.no for månedene januar, februar, mars, april, november og desember.

Gjentaks-intervall	99840 Svalbard Lufthavn (1975-2017)		99860 Longyearbyen (1911-1977)	
	Eklima, Gumbel (mm)	Eklima, NERC (mm)	Eklima, Gumbel (mm)	Eklima, NERC (mm)
100 år	51	48	47	45
1000 år	70	78	63	73
PMP	-	163	-	153

Analysen i Eklima gir ikke innblikk i hvordan de anvendte metodene passer til observasjonene, og usikkerheten rundt forventningsverdiene. På grunn av korte tidsserier i forhold til gjentaksintervallene vi ønsker å analysere, antar vi det er svært store usikkerheter rundt forventningsverdiene. For å studere dette, har vi anvendt DAGUT i Hydra2. Da denne ikke gir mulighet for å analysere nedbør over tre døgn, har vi sett på analysen for nedbør over ett døgn og fem døgn. Bare data fra 99840 Svalbard Lufthavn er anvendt, og for vintersesongen definert som januar, februar, mars, april, november og desember. I DAGUT er det ikke lagt inn mulighet for å analysere med NERC metoden, så der har vi sett på Gumbel og GEV metodene.

Tilpasningen av Gumbel analysen med ulike tilnærminger (L-moment, maximum likelihood og Bayesiansk) til data for nedbør over 1 døgn er vist i Figur 5. Det er forholdsvis lik og god tilpasning, med unntak av maksimalverdien på 41,7 mm registrert 2016-11-06. Estimerte verdier for gjentakelsesintervall på 100 år er forholdsvis like med de tre metodene (Tabell 3). For gjentakelsesintervall på 1000 år er NERC estimatet betydelig høyere enn de to Gumbel metodene. Ekstrapolasjon av grafen i Figur 5 til gjentakelsesintervall på 5000 år, gir betydelig lavere verdi enn PMP fra NERC metoden. Usikkerhetene, vist med 95% konfidensintervallet

for det Baysianske estimatet, antyder svært store usikkerheter rundt forventningsverdiene, rundt ±25%.

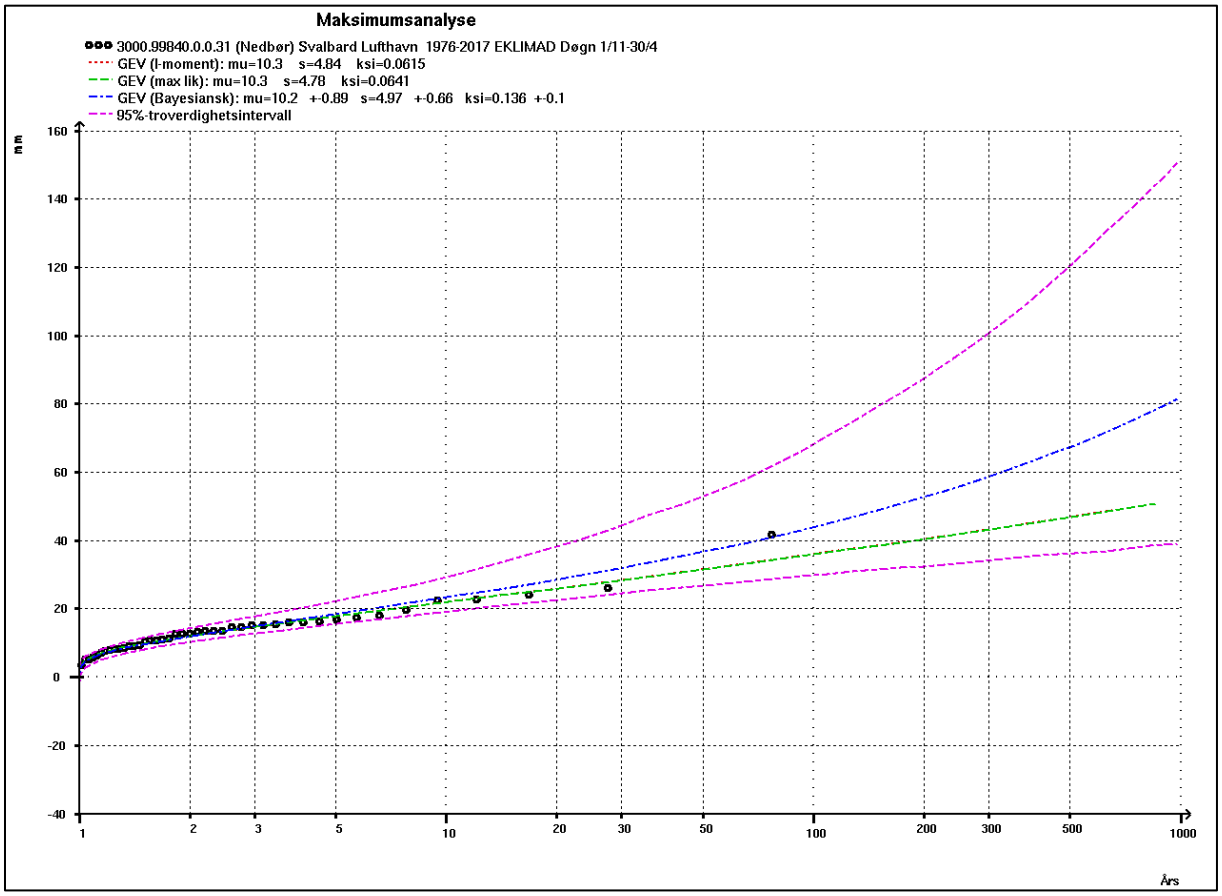


Figur 5: Gumbel-analyse av nedbør over ett døgn for 99840 Svalbard Lufthavn for månedene januar, februar, mars, april, november og desember.

Tilpasningen av GEV-analysen med ulike tilnærminger (l-moment, maximum likelihood og Bayesiansk) til data er vist i Figur 6. Her er den generelle tilnærming til dataverdiene visuelt estimert ikke så god som for Gumbel fordelingen, men maksimalverdien på 41,7 mm ser ut til å være bedre tatt med. For GEV-analysen er 95% konfidensintervallet betydelig større enn for Gumbel-analysen.

*Tabell 3: Ekstremverdianalyser av 1-døgnsnedbør fra eklima.met.no og DAGUT i Hydra2 for månedene januar, februar, mars, april, november og desember og for stasjon 99840 Svalbard Lufthavn. *Verdiene fra DAGUT er estimert ved ekstrapolasjon av grafen i Figur 5.*

Gjentaks-intervall	Eklima, Gumbel (mm)	Eklima, NERC (mm)	DAGUT, Gumbel Bayesiansk (mm)	DAGUT, Gumbel Bayesiansk, 95% konfidensintervall (mm)
100 år	34	33	34	±8 (ca ±24%)
1000 år	47	54	46	±11 (ca ±24%)
5000 år	-	-	51*	±15 (ca ±30%)*
PMP	-	119	-	-



Figur 6: GEV-analyse av nedbør over ett døgn for 99840 Svalbard Lufthavn for månedene januar, februar, mars, april, november og desember.

Etter en samlet vurdering foreslår vi å bruke følgende som utgangspunkt for dimensjonerende bruddhøyde:

- Verdiene for 3-døgns nedbør, for 99840 Svalbard Lufthavn for sesongen november-mars.

- Nedbørmengdene regnes om til snødybde ved å anta at 1 mm nedbør svarer til 1 cm snødybde.
- For gjentaksintervall på 100 år og 1000 år: forventningsverdi basert på Gumbelfordeling fra analysen i Eklima.
- For gjentaksintervall på 5000 år: forventningsverdi basert på Gumbelfordeling som ligger mellom verdien for 1- og 5-døgnsnedbør visuelt estimert fra plott generert i DAGUT.
- Sensitivitet for beregningene testes med økning på 25%.

Verdiene er vist i Tabell 4.

2.4.2 Klimaendringer

Vi har av NVE fått opplyst at klimaendringer skal inkluderes ved å legge på 30% av nedbørmengdene («NVE have decided to increase the amount of precipitation by 30% for this area to incorporate predicted increase in precipitation.»). Vi oppfatter det slik at det beregnes et klimapåslag, som skal legges på forventningsverdiene ved stasjonen. Dette er ikke vanlig prosedyre ved skredfarevurderinger, men gjøres ved flomvurderinger.

2.4.3 Justering av nedbørmengder for høyde

Stasjon 99840 Svalbard Lufthavn står 28 moh. De øvre utløsningsområdene ligger rundt 320 moh., de nedre rundt 180 moh. Det ventes en økning i nedbør med høyden, på rundt 5 cm snø per 100 m. For de øvre utløsningsområdene betyr det et tillegg på 16 cm, og for de nedre på 8 cm.

2.4.4 Justering av bruddkanthøyde til bratt terreng

Høyden på bruddkant i RAMMS skal i flere runder justeres i forhold til terrenget i utløsningsområdene. Dette er gjort som anbefalt i RAMMS, i forhold til terrenghelning på 35° i utløsningsområdene.

2.4.5 Inkludering av le for vind

De aktuelle utløsningsområdene ligger i le for hovedvindretningen, som er SØ (METreport 2017/15, figur 3.3.2). I Sveits legges det opptil 50 cm til bruddkanten i utløsningsområder som er spesielt utsatt for avsetning av vind. I Longyearbyen er det relativt begrensede nedbørmengder, og flere skredhendelser kan ikke direkte knyttes til nedbør. Dette er blant annet poengtert i NGI rapport 201710006-01-R. Vi mener derfor at man i større grad bør vekte utløsningsområdenes fortreffelighet som oppsamlere av drivsnø. Vi foreslår her å bruke tre kategorier der man øker bruddkanten med 50%, 75% og 100% for hhv. vanlige utløsningsområder i le for fremherskende vindretning, områder med godt potensial for oppsamling av drivsnø, og områder med svært gode muligheter for oppsamling av drivsnø.

2.4.6 Inkludering av medrivning

Medrivning er en svært viktig prosess for å få lange utløp, men inkluderes ikke direkte i RAMMS. Vanligvis gjøres dette indirekte ved å øke brudhøyden. Vi foreslår å øke bruddhøyden med 25%, 50% og 80% for hhv. scenario for 100 år, 1000 år og 5000 år.

2.4.7 Dimensjonerende bruddhøyde

Dimensjonerende bruddhøyde basert på vurderingene ovenfor, er vist i Tabell 4.

Tabell 4: Foreslåtte verdier for dimensjonerende bruddhøyder i de aktuelle utløsningsområdene. I tillegg bør det utføres sensitivitetstester der bruddhøyde økes med 25%, som diskutert i teksten.

Gjentaks-intervall	3-døgns nedbør, Gumbel (mm)	Dimensjonerende bruddhøyde, d_0 (m)	Test sensitivitet, d_0 (m)
100 år	51	Øvre, god oppsamling: 1,3 Øvre: 1,1 Nedre, god oppsamling: 1,0 Nedre: 0,9	Øvre, god oppsamling: 1,6 Øvre: 1,4 Nedre, god oppsamling: 1,3 Nedre: 1,1
1000 år	70	Øvre, god oppsamling: 2,0 Øvre: 1,8 Nedre, god oppsamling: 1,6 Nedre: 1,4	Øvre, god oppsamling: 2,5 Øvre: 2,2 Nedre, god oppsamling: 2,0 Nedre: 1,7
5000 år	78	Øvre, god oppsamling: 2,6 Øvre: 2,3 Nedre, god oppsamling: 2,2 Nedre: 1,9	Øvre, god oppsamling: 3,3 Øvre: 2,9 Nedre, god oppsamling: 2,7 Nedre: 2,3

2.5 Friksjon

Friksjonsverdier i RAMMS (μ og ξ), er satt basert på volum, som anbefalt i RAMMS. Maksimalt sammenhengende utløsningsvolum er som følger:

- 100-års scenario: Et konservativt (høyt) estimat på volum som flyter sammen, er at områdene 1, 5, 6, 7 og 8 flyter sammen. Dette vil gi et volum på rundt 40.000 m^3, noe som i RAMMS defineres som MEDIUM. Det er derfor anvendt friksjonsverdier **M100**.
- 1000-års scenario: Samlet utløsningsvolum er på omtrent 150.000 m^3, med omtrent 60.000 m^3 i de øvre utløsningsområdene og 90.000 m^3 i de nedre. Vi antar at det samlede volumet ikke utløses samtidig. I beregningene vi mener er dimensjonerende, utløses enten nedre eller øvre utløsningsområder samtidig. Dimensjonerende trykk for 1000-års scenario er da den maksimale verdien av disse beregningene. I RAMMS finnes ingen «knapp» for 1000-års hendelser, så vi velger å «gå ned» til **L300**.
- 5000-års scenario: alle områdene utløses samtidig, og vi ønskes lengst mulig utløp. Vi bruker derfor **L300**. Et mer konservativt estimat ville vært å redusere de to høydenivå, men dette har vi ikke gjort.

De to høydenivå (standard 1500 moh. og 1000 moh.) er endret til hhv. 500 moh. og 100 moh., basert på skjønn. NGI ønsker å bruke høydenivå på hhv. 1000 moh. og 500 moh., og vi har derfor også testet dette.

2.6 Terrengmodell

Vi er bedt om å kjøre beregningene på en terrengmodell med horisontal oppløsning på 5 m. Vi har testet sensitivitet av dette ved å bruke terrengmodell med horisontal oppløsning 1 m, 2 m og 10 m i tillegg til standarden på 5 m. Grunnlaget har vært den oversendte terrengmodellen med horisontal oppløsning på 1 m.

2.7 Resultater

2.7.1 Sensitivitet

Merk at figurene som viser sensitivitet, del

2.7.1.1 Horisontal oppløsning

Figur 8 sammenstiller resultatene av modellering med ulik horisontal oppløsning i beregningene, 10m, 5m, 2m, 1m. Bruddkanthøyder og utløsning som i 1000-års scenarioet, og friksjon M300-500-100 (hvilket betyr friksjonsverdier for M300 med høydeintervaller på hhv. 500 moh. og 100 moh.).

I det viste området og med de anvendte parametere er det marginal forskjell i maksimal skredutbredelse, der 2 m modellen gir litt kortere utløp. Det er antydning til at 10 m modellen holder ikke høyt trykk så langt ut som 5 m og 2 m modellene. Det er uvisst om dette er generelt for RAMMS.

Beregninger med oppløsning på 2 m og spesielt 1 m har betydelig lengre beregningstid enn de med 5 m og 10 m oppløsning. Det er ikke er overraskende, men er av praktisk betydning for faresonekartlegging og beregninger over store områder.

2.7.1.2 Friksjonsparametre

Figur 9 sammenstiller resultatene av ulik friksjon i beregningene, M300 og L300. Bruddkanthøyder og utløsning som i 1000-års scenarioet, og horisontal oppløsning på 5 m.

Det er betydelig forskjell i utløpslengde flere steder.

2.7.1.3 Høydenivå friksjonsparametre

Figur 10 sammenstiller resultatene av ulikt høydenivå for de to høydeavgrensninger av friksjon i beregningene. Bruddkanthøyder og utløsning som i 1000-års scenarioet, og horisontal oppløsning på 5 m.

Det er ingen forskjell på beregninger med høydenivå på 1500m/1000m og 1000m/500m fordi toppen av utløsningsområdene er lavere enn 500 moh. I området vist i Figur 10 og med anvendte parametersett, er det ubetydelig forskjell på 1000m/500m og 500m/100m, men stor forskjell fra disse beregningene til beregninger med høydenivå på 1m/0m.

2.7.1.4 Økning i bruddkanthøyde

En økning i bruddkanthøyde d_0 (Figur 11), viser en svak økning i utløpslengde av skredmasser med trykk >1 kPa ved ekstra 25% økning i bruddhøyden.

2.7.2 100-års scenario

Vårt forslag til dimensjonerende snøskred for 100-års scenarioet er vist i Figur 12.

2.7.3 1000-års scenario

Vårt forslag til dimensjonerende snøskred for 1000-års scenarioet er vist i Figur 13 (nedre utløsningsområder) og Figur 14 (øvre utløsningsområder). Faresoner og dimensjonering av tiltak bør vurderes opp mot den maksimale verdien i de to beregningene. Med unntak av området i nord, er det høyeste trykk fra de nedre utløsningsområdene.

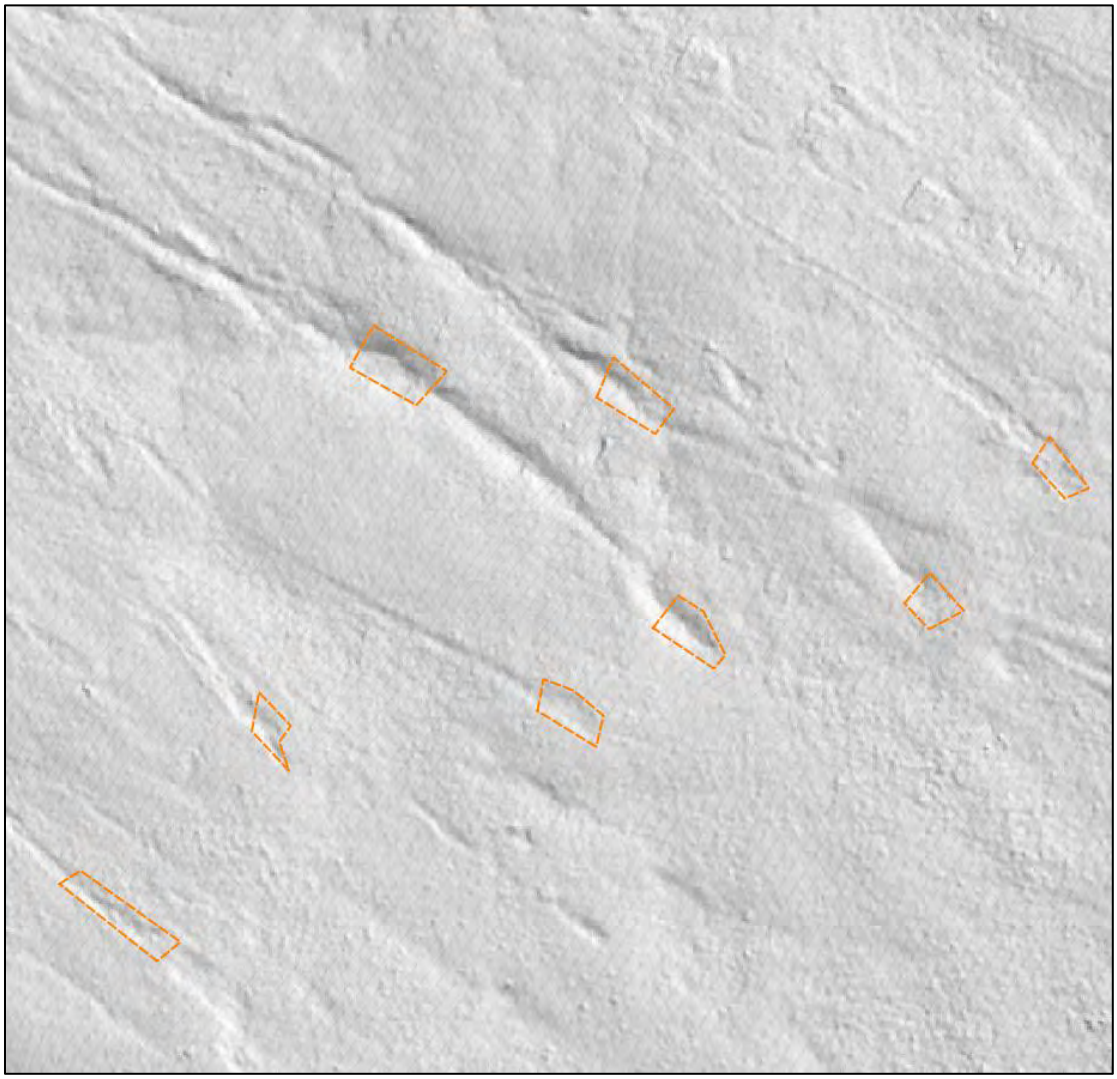
2.7.4 5000-års scenario

Vårt forslag til dimensjonerende snøskred for 1000-års scenarioet er vist i Figur 15.

3 Flomskred

3.1 Utløsningsområder

Utløsningsområder for flomskred er lagt i forsenkninger der det i skyggekartet fra terrengmodellen med horisontal oppløsning på 0,25 m er tydelige spor etter tidligere utglidninger (Figur 7).



Figur 7: Eksempler på utløsningsområder for flomskred.

3.2 Beregninger med RAMMS

Det er satt opp beregninger med flomskredmodulen i RAMMS. Utløsning av masser er satt til «BLOCK», og bruddhøyden for 1000-års hendelsen er satt til 0,5 m. Friksjon er variert med My=0,1-0,2, Xi=200-1000. Alle områder er utløst samtidig. Samtlige beregninger er kjørt på terrengmodell med horisontal oppløsning på 2 m, mens enkelte kjøringer er gjort med 1 m oppløsning.

3.3 Resultater

Beregningene viser at flomskred kan nå ned til første husrekke på vei 228, hus 6-16, og vei 222, hus 5-11. I svært sjeldne situasjoner kan skredmasser nå lenger, men trykket vil raskt avta.

Løsmasseskred vil være med på å bestemme den totale fare for skred nedenfor de større forsenkninger i fjellsiden, for 100- og 1000-års hendelser. Et forslag til dimensjonerende trykk for løsmasseskred med gjentaksintervall på 1000 år er vist i Figur 16. Løsmasseskred vil ikke nå frem til dimensjonerende snøskred med gjentaksintervall på 5000-år.

4 Konklusjon

Det er utført etterregninger av kjente snøskredhendelser i og rett utenfor det vurderte området. Siden parametrene på disse hendelsene er usikre, blir også resultatene forholdsvis usikre. Men resultater fra modellberegningene viser forholdsvis god overensstemmelse med observasjoner. Dimensjonerende bruddkanter for snøskred er vurdert fra klimaanalyse og skjønn. Sensitivitet til friksjonsparametre og horisontal oppløsning i høydemodellen er testet og diskutert. Utløsningsområder for snøskred er vurdert ut fra terreng og fra observasjoner gjort i terrenget.

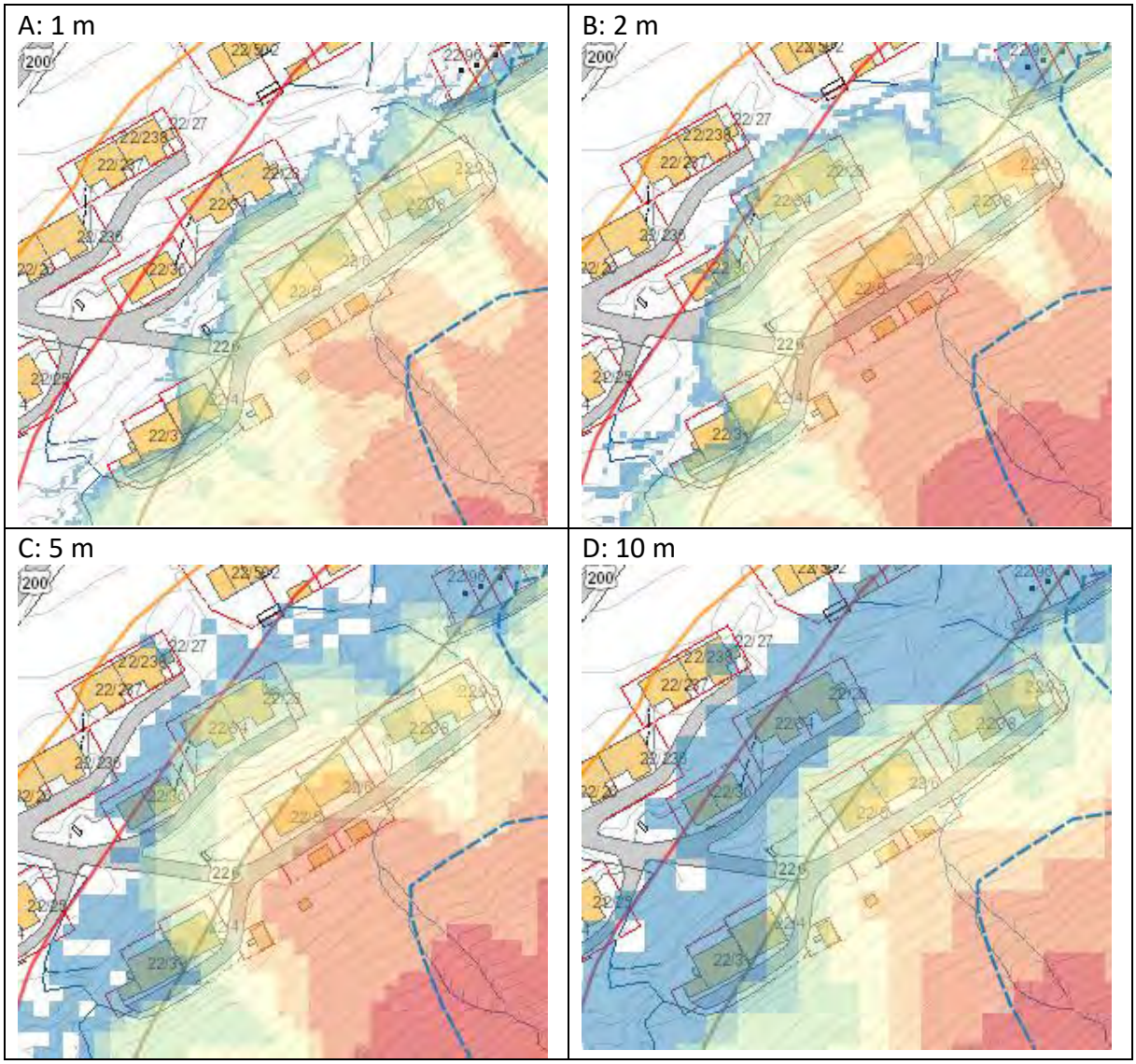
Det er utført modellberegninger for løsmasseskred. Utløsningsområder er lagt til forsenkninger i terrenget, der skyggekart viser tidligere utglidninger. Vi antar at hovedparten av disse utglidningene vil kanaliseres gjennom eksisterende forsenkninger i terrenget.

Basert på beregninger og vurderinger, er det satt opp forslag til dimensjonerende snøskred for 100-års, 1000-års og 5000-års snøskred.

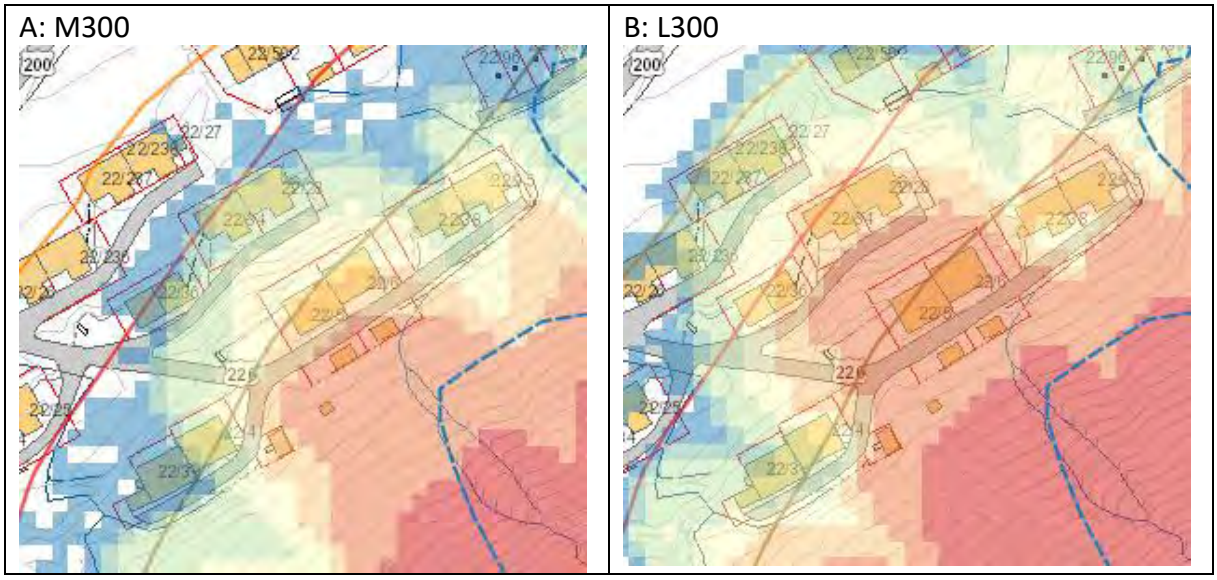
5 Figurer

Under møtet i Longyearbyen, ble det bestemt at figurer skulle vise trykk basert på tetthet på 300 kg/m^3. Det ble også diskutert å anvende samme fargeskala, men denne har vi ikke sett. I figurene i rapporten er følgende farger anvendt for trykk:

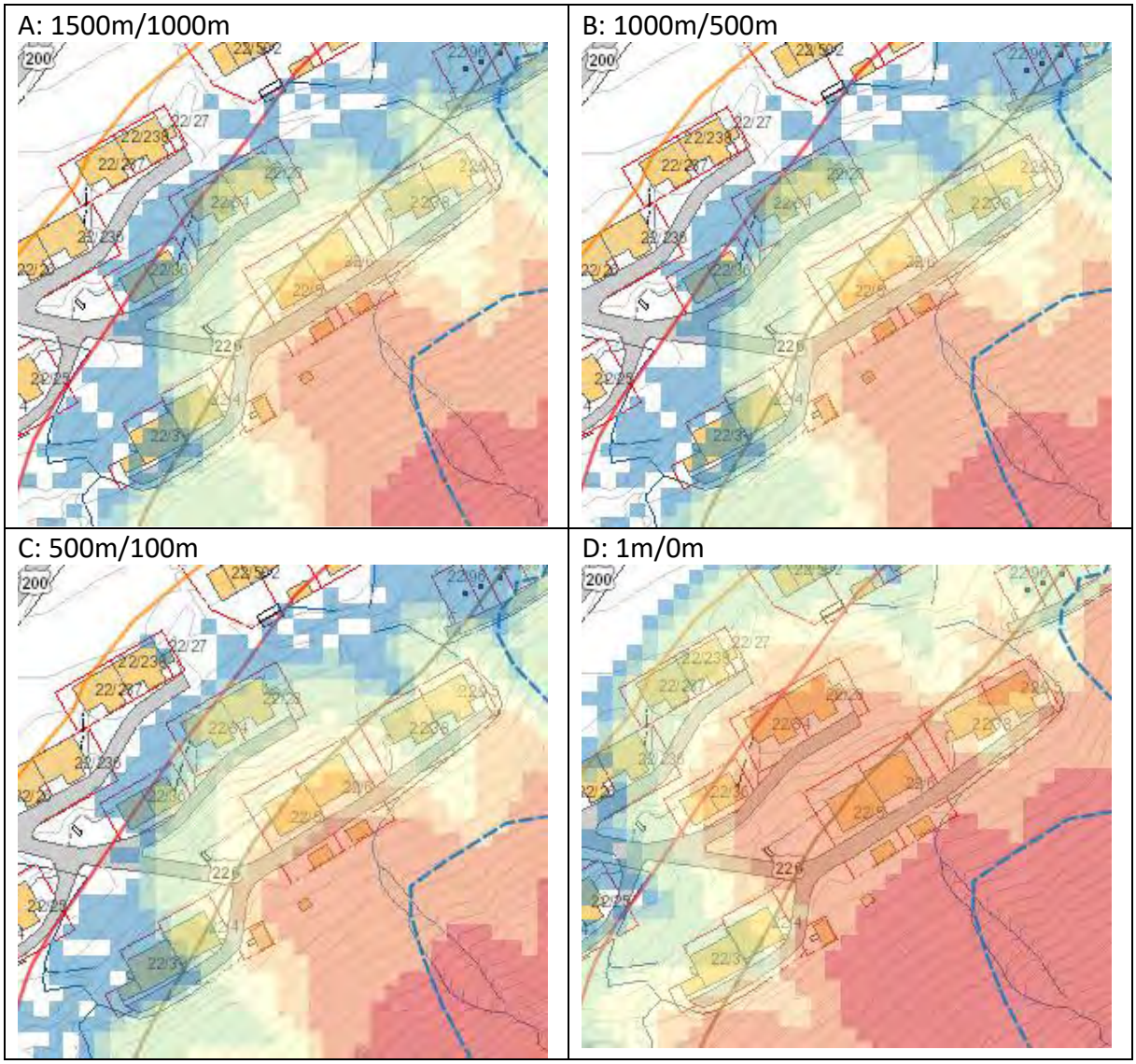
- <1: Skader ikke sannsynlig
- 1-3: Vinduer og dører kan slås inn
- 3-10: Skader på trehus
- 10-20: Skader på murhus
- 20-30: Skader på betonghus
- 30-60: Skader på forsterket betonghus
- >60: Store ødeleggelser



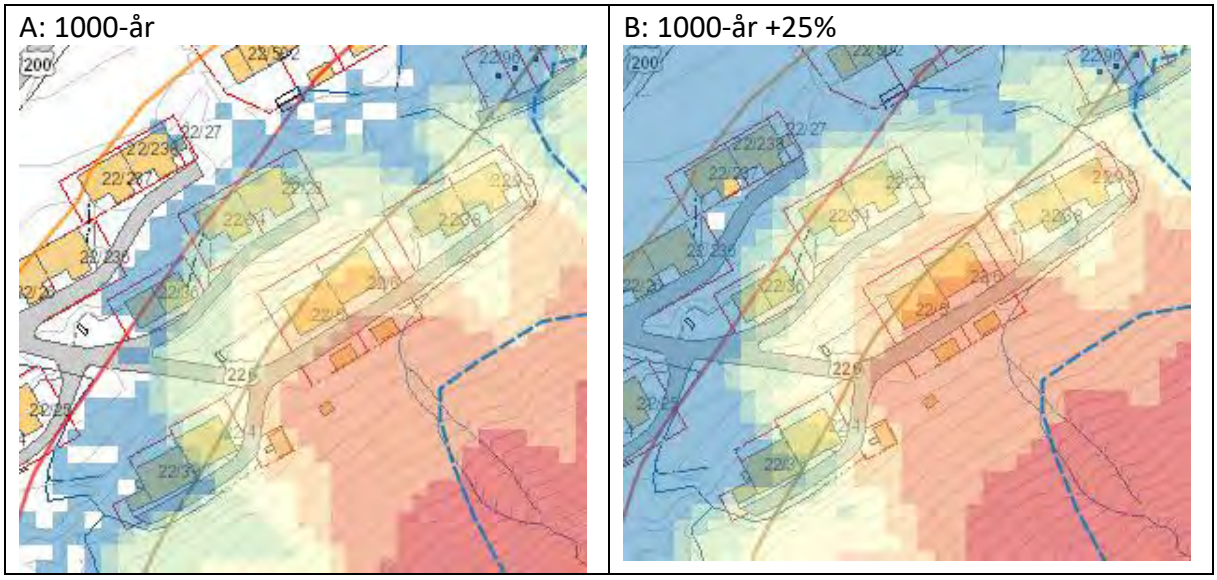
Figur 8: Sensitivitetstest av horisontal oppløsning i beregningene. Eksemplet viser 1000-års scenarioet beregnet med ulike horisontale oppløsninger.



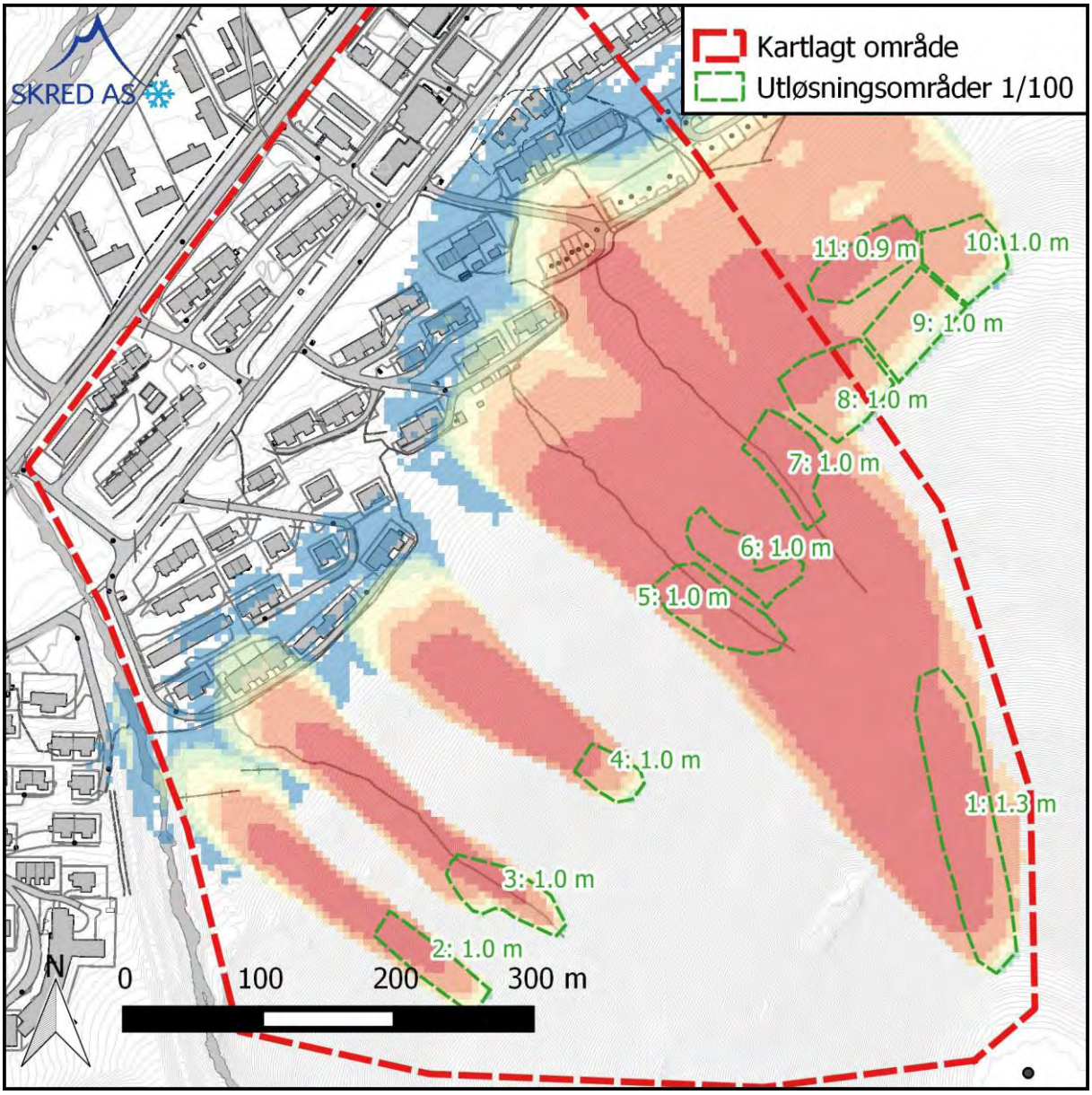
Figur 9: Sensitivitetstest av friksjonsparametre, M300 (A) vs. L300 (B), ellers standard verdier for 1000-års scenariet.



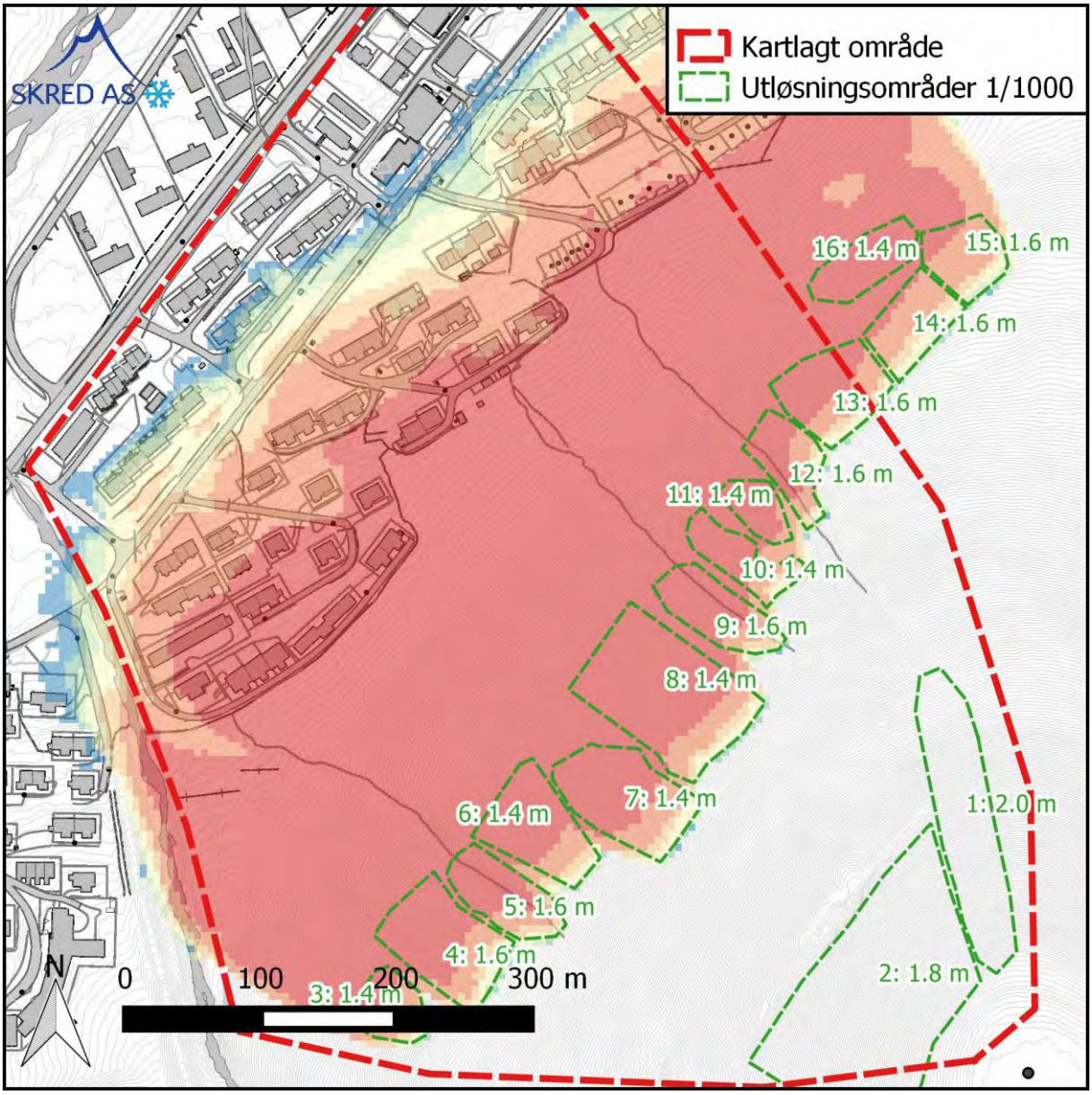
Figur 10: Sensitivitetstest av valg av de to høydenivå for friksjonsparameterne i beregningene. A: 1500m/1000m; B: 1000m/500m; C: 500m/100m; D: 1m/0m.



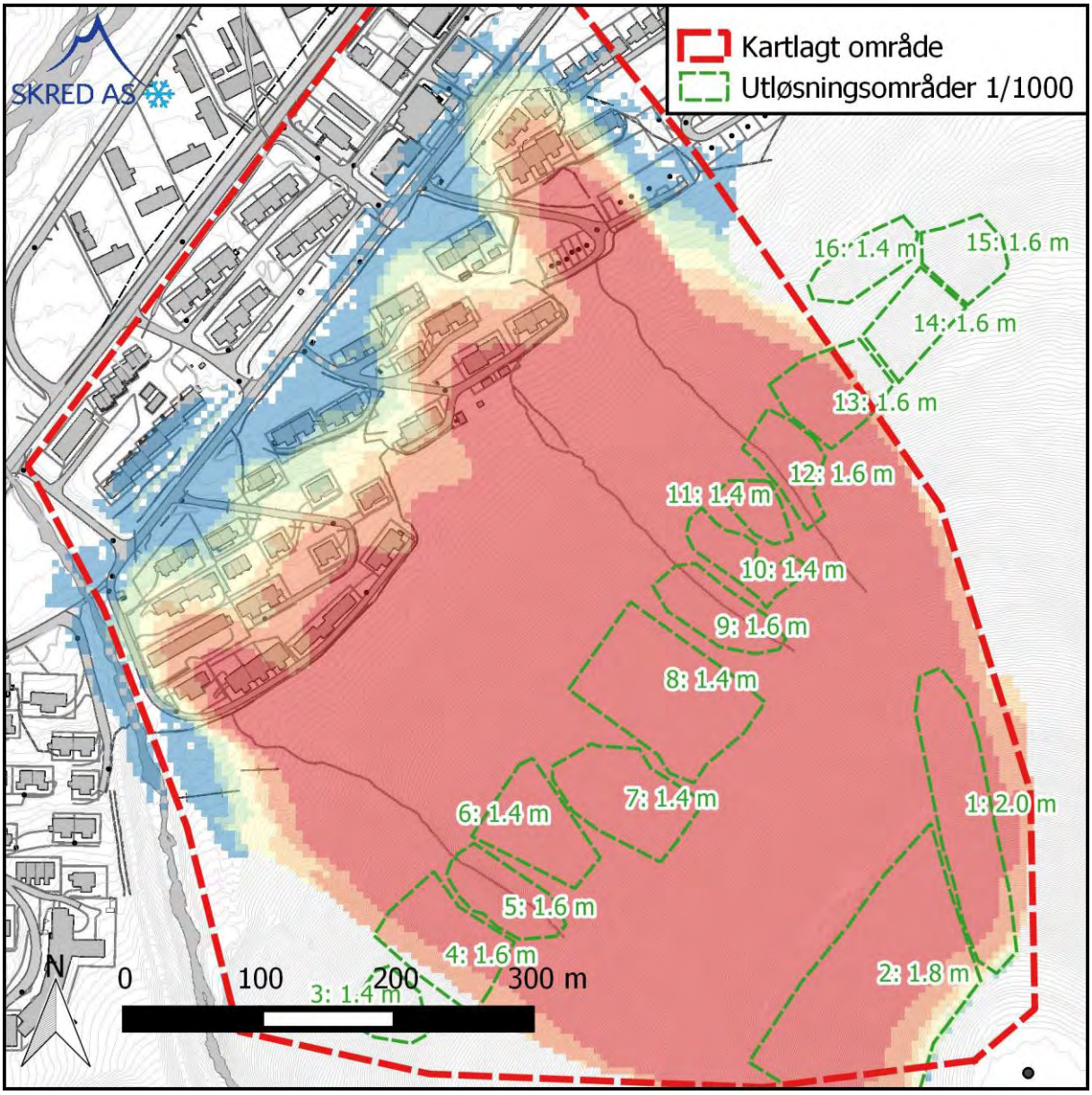
Figur 11: Sensitivitetstest av usikkerhet ved økning av bruddhøyde med 25%, ellers standard verdier for 1000-års scenariet.



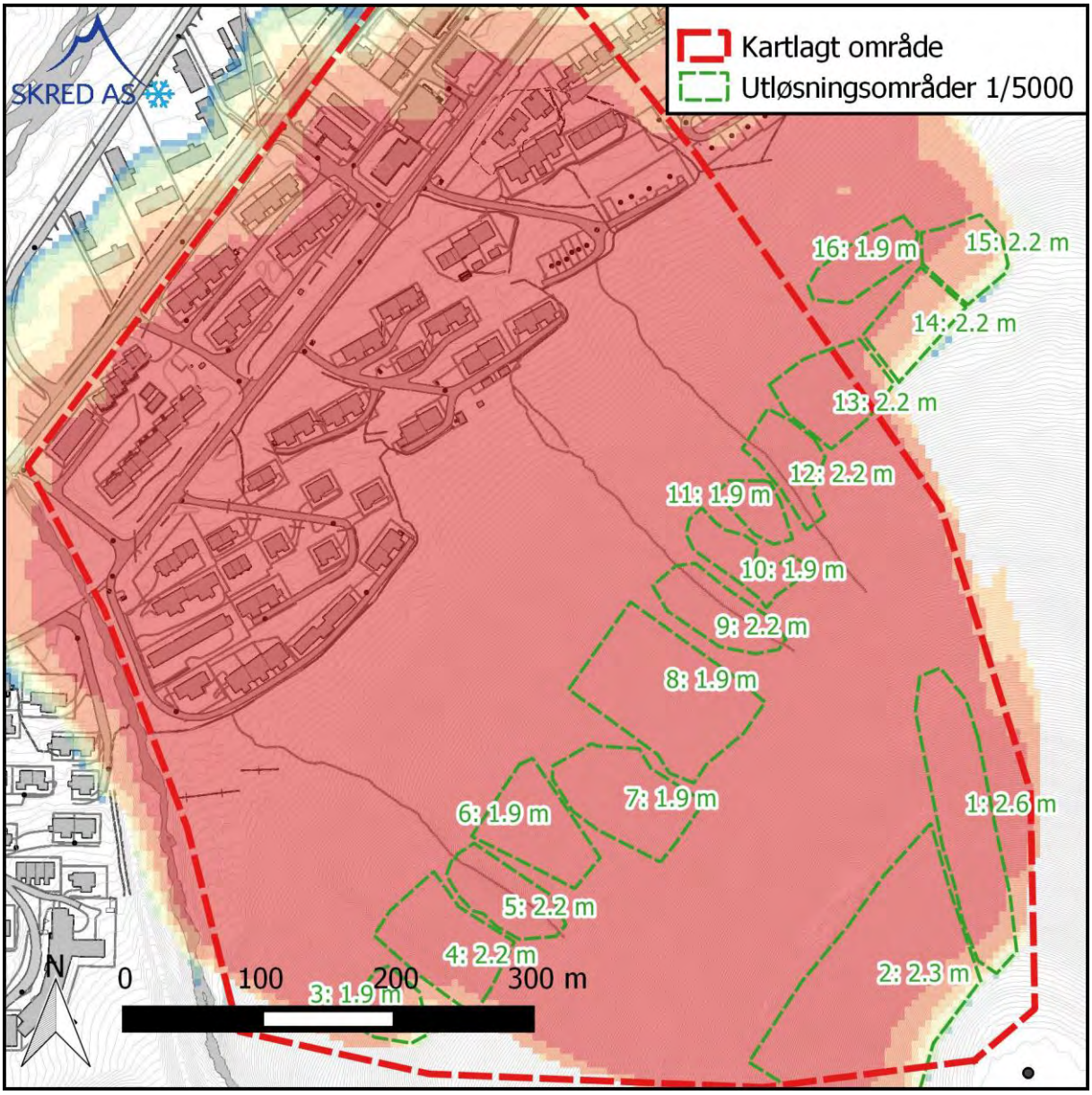
Figur 12: Maksimalt trykk for dimensjonerende 100-års scenario for snøskred.



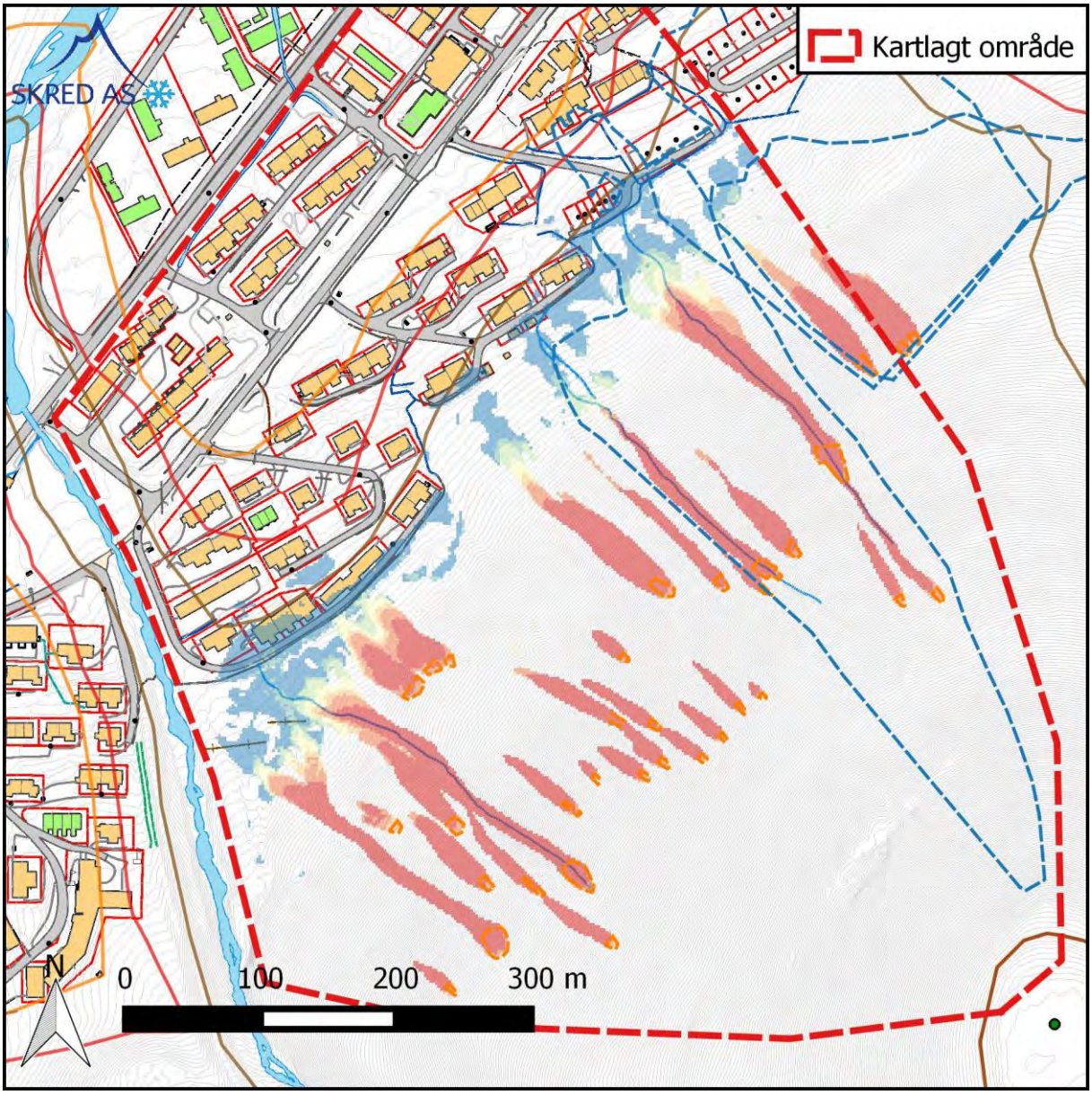
Figur 13: Maksimalt trykk for dimensjonerende 1000-års scenario for snøskred fra utløsningsområdene i nedre del av fjellsiden. Dimensjonerende hendelse er det maksimale av Figur 13 og Figur 14.



Figur 14: Maksimalt trykk for dimensjonerende 1000-års scenario for snøskred fra utløsningsområdene i øvre del av fjellsiden. Dimensjonerende hendelse er det maksimale av Figur 13 og Figur 14.



Figur 15: Maksimalt trykk for dimensjonerende 5000-års scenario for snøskred.



Figur 16: Maksimalt trykk for løsmasseskred dimensjonerende omtrent som et 100-års scenario (mot NØ) til 1000-års scenario (mot SV). Dagens faresoner er vist med linjer, der brun ≥1/100, rød ≥1/1000 og oransje ≥1/5000.

Final Report

Avalanche Modeling Sukkertoppen

Terrestrial Laser Scanning and DSM Creation
Extreme Value Analysis
SAMOS Modeling

By Alexander Prokop
UNIS, The University Centre in Svalbard
January 2018
Quality control of the SAMOS avalanche simulations by
Matthias Granig, Avalanche Simulation Centre Innsbruck, Avalanche Control Austria

Contents

INTRODUCTION *3*

PURPOSE **3**

LOCATION **3**

DIGITAL ELEVATION MODEL CREATION *5*

TERRESTRIAL LASER SCANNING **5**

DATA TREATMENT **6**

RESULTANT DIGITAL ELEVATION MODELS **7**

SURFACE ANALYSIS **8**

DEFINITION OF DESIGN AVALANCHES **9**

EXTREME VALUE ANALYSIS OF SNOW DEPTH *11*

AVAILABLE DATA **11**

RESULTS **11**

SAMOS MODELING *12*

MODELING OF THE DESIGN AVALANCHE **12**

SIMULATION RESULTS OF THE DIFFERENT SCENARIOS **16**

CONCLUSION *35*

INTRODUCTION

Longyearbyen, which is the biggest settlement on Svalbard is located on the west coast of the island. The city is surrounded by steep slopes, and avalanches are a major natural hazard in the area. On February 21st an avalanche occurred on Sukkertoppen and damaged two houses. The houses were located near the houses that were destroyed by the avalanche in December 2015. The evening before the avalanche a strong east wind prevailed with strong snow drifts - a similar weather situation as before the avalanche of December 2015.
In the following report this avalanche situation is analyzed by using high resolution digital surface models created using terrestrial laser scanning, an in-depth analysis of snow depth in release areas and their return period using extreme value analysis, and SAMOS modeling to be able to estimate run out parameters of those extreme avalanches to finally create a reliable hazard map.

PURPOSE

In this report, several scenarios of this avalanche with different volumes are simulated to get a better understanding of the run out area and to create a hazard map for the mountain Sukkertoppen. The investigation is mainly based on the avalanches that occurred on December 2017, as there is a lack of historical data from Longyearbyen.
The overall goal is to make a hazard map for the Sukkertoppen slope, in the area where the avalanche occurred. In general, avalanche modelling is done for process understanding, avalanche engineering and hazard mapping. Hazard zonation is the most effective passive protection measure and an objective for decision-making.

LOCATION

Sukkertoppen is a mountain located east of Longyearbyen (Figure 1.1). In December 2015 a large avalanche released from Lia because of heavy wind loading after a storm. After the avalanche, a hazard map was created by the consultant company Multiconsult. This hazard map did however not include sufficiently the potential release area higher up in the slope site, which is investigated in this study.

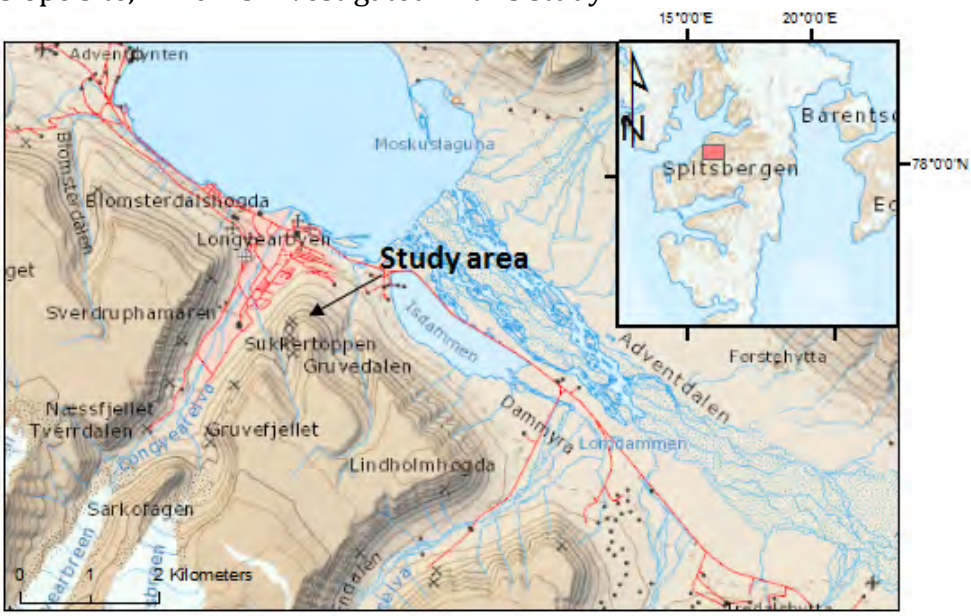


Figure 1.1: Location of Sukkertoppen southeast of Longyearbyen.

The starting zone in this project is based on laser scans from both prior to (14.02.2017) and after the avalanche that occurred February 21st 2017. The two DEMs have been compared in ArcGIS software to get detailed information about snow depth in the area before and after the avalanche. The definition of a potential starting zone is also based on the slope angle of the mountain site, as it is expected to potentially have a larger release area than the avalanche that occurred. The release area is expected to have a slope angle above 30 degrees (Figure 1.2, left). The entrainment and deposition area (Figure 1.2, right) is defined by using the DEMs from prior to and after the avalanche. The pictures in figure 1.3 were used to study the back scarp, entrainment and the deposition as well.

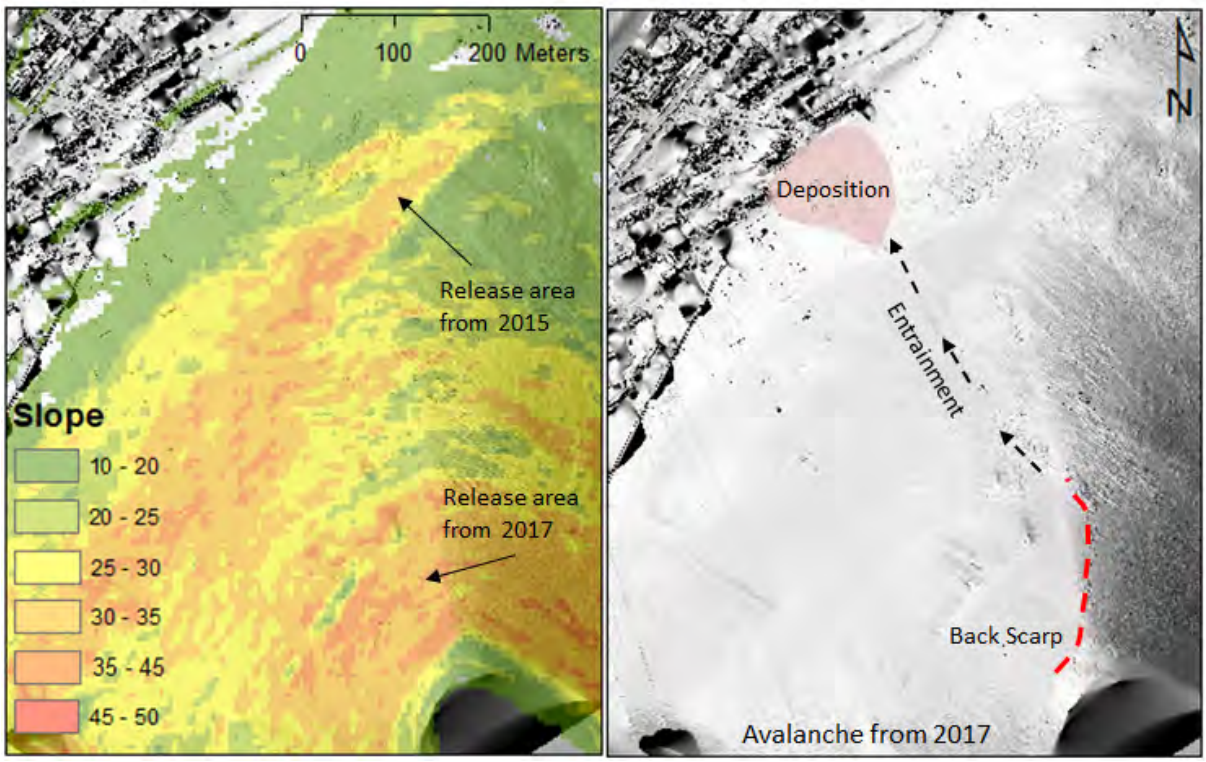


Figure 1.2: Overview of slope angle map (left) and map with starting zone, track and run-out area of the avalanche 2017 (right).

Figure 1.3: Pictures of the 2017 avalanche from Sukkertoppen taken from a northerly perspective (left) and westerly perspective (right). The pictures are taken by Holt Handcock.

DIGITAL ELEVATION MODEL CREATION

TERRESTRIAL LASER SCANNING

Modern remote sensing techniques complement traditional field methods and allow the efficient collection of information concerning snow and avalanches from remote locations or at broader spatial scales [Buhler et al., 2016; Deems et al., 2013; Eckerstorfer et al., 2016; Wesselink et al., 2017]. Terrestrial laser scanning (TLS) is a popular remote sensing tool for monitoring snow distribution and avalanche occurrence at the slope-scale. This is because TLS allows users to gather data from safe locations, well removed from avalanche hazards [Deems et al., 2013; Prokop 2009; Prokop 2008; Prokop et al., 2008]. TLS is particularly advantageous over other snow observation methods in Arctic environments where the polar night can preclude direct visual observation of snow and avalanche conditions. While traditionally employed for research applications, recent studies have demonstrated the usefulness of TLS in operational avalanche forecasting settings [Deems et al., 2015], to validate the performance of snow drift modeling [Vionnet et al. 2014; Schneiderbauer and Prokop 2012; Schoen et al. 2015], to retrieve parameters for dynamic avalanche modeling [Prokop et al. 2015] and as a tool in planning passive mitigation strategies [Prokop and Procter, 2016].

In this investigation, we present spatial snow distribution data gathered from the mountain slopes in Longyeardalen using TLS. Scans were performed regularly throughout the 2016/2017 winter season, with particular emphasis on obtaining scans of pre- and post-event scanned snow surfaces for major storm and avalanche events. For our repeated slope-scale snow measurements we used the Riegl® Laser Measurement Systems VZ-6000 laser scanner that is particularly suitable for measuring snow surfaces due to an operating laser wavelength of 1064 nm and a high scanning speed [www.riegl.com; Prokop, 2008]
We use data from five scans to quantify and analyze changes in snow distribution for this study: (S1) a bare-earth scan prior to the onset of seasonal snow cover in September 2016, (S2) a post-event scan of the December 19th, 2015 avalanche taken January 29th, 2016, (S3) a pre-event scan from February 14th, 2017, with the February 21st, 2017 post-event snow depths obtained by merging scans taken on (S4) February 22, 2017 and (S5) February 24, 2017.

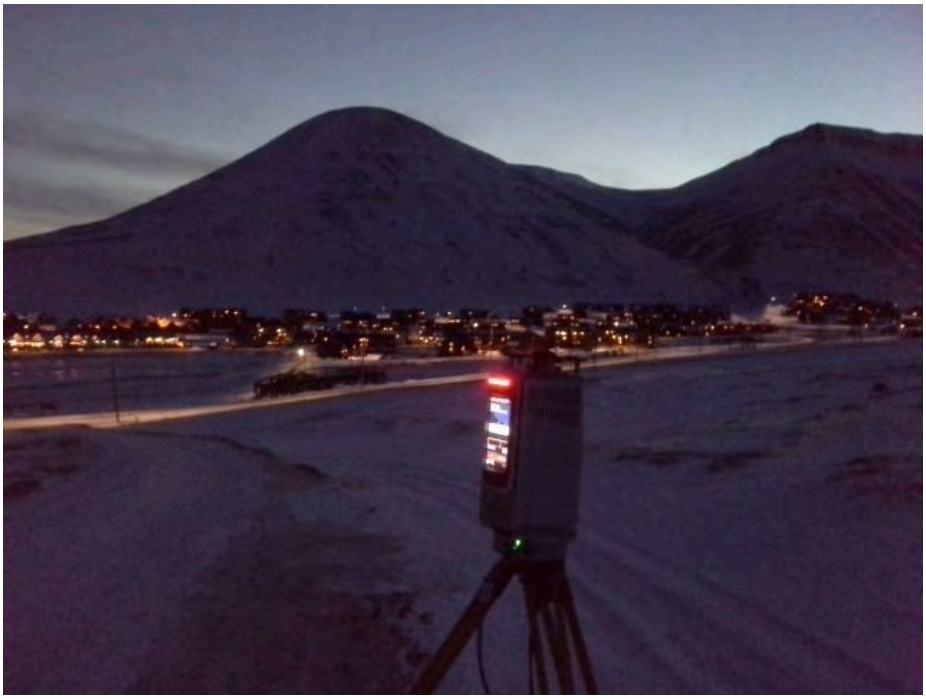


Figure 2.1: Riegls VZ-6000 laser scanner in action scanning the Sukkertoppen avalanche area

DATA TREATMENT

Positioning of repeated scans was exacted using differential global positioning system (DGPS) and an iterative closest point algorithm in RiSCAN PRO, Riegl's proprietary data processing software, resulting in a georeferenced point cloud [Prokop and Panholzer, 2009]. Filtering of non-ground or snow surface points was done using the wedge filtering approach [Panholzer and Prokop, 2013]. Final elevation differences between two snow and terrain surfaces resulting in spatially distributed maps of snow depth or changes in snow depth were derived by computing the difference in vertical distance of two digital elevation models. We resampled the original point clouds to a 0.25 m grid for analysis and display purposes, as this resolution has been shown to retain snow surface roughness features while reducing the influence of artefacts relative to higher resolution grids [Deems et al., 2015].

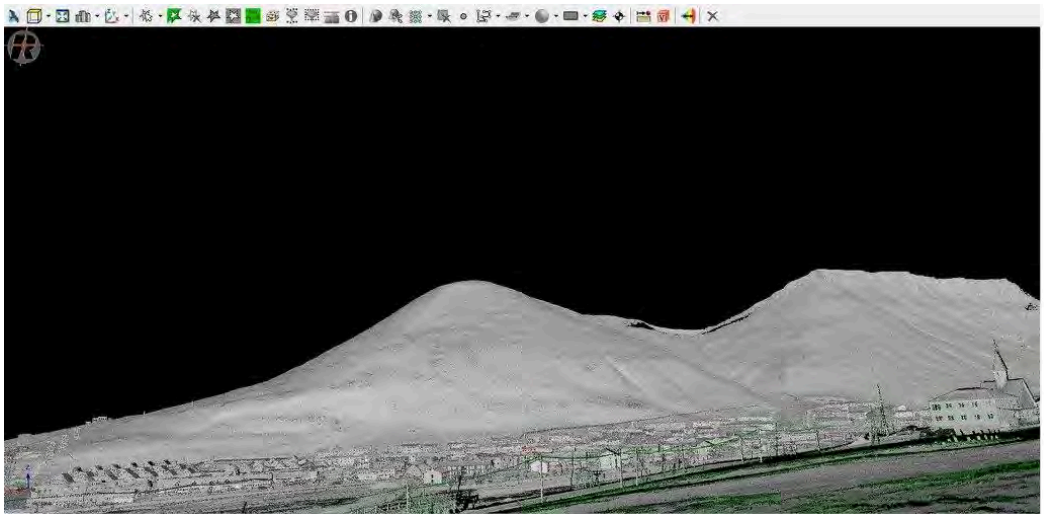


Figure 2.2: Resultant high resolution point cloud data of the area in RiScan Pro including reflectance values (shades of gray)

RESULTANT DIGITAL ELEVATION MODELS

The following digital surface models have a resolution of 25 cm and are used for terrain analysis:

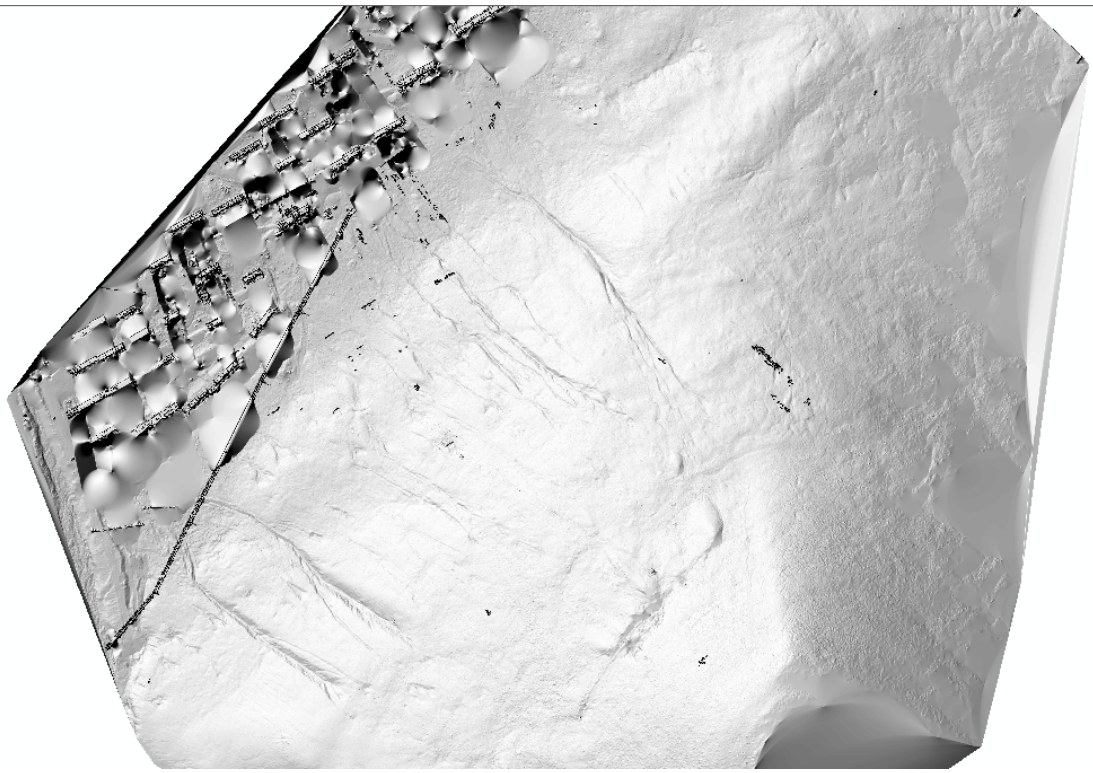


Figure 2.3: Hillshaded DSM made 16.09.2016 of the surface of Sukkertoppen without snow from terrestrial laser scan data. Resolution: 25 cm.

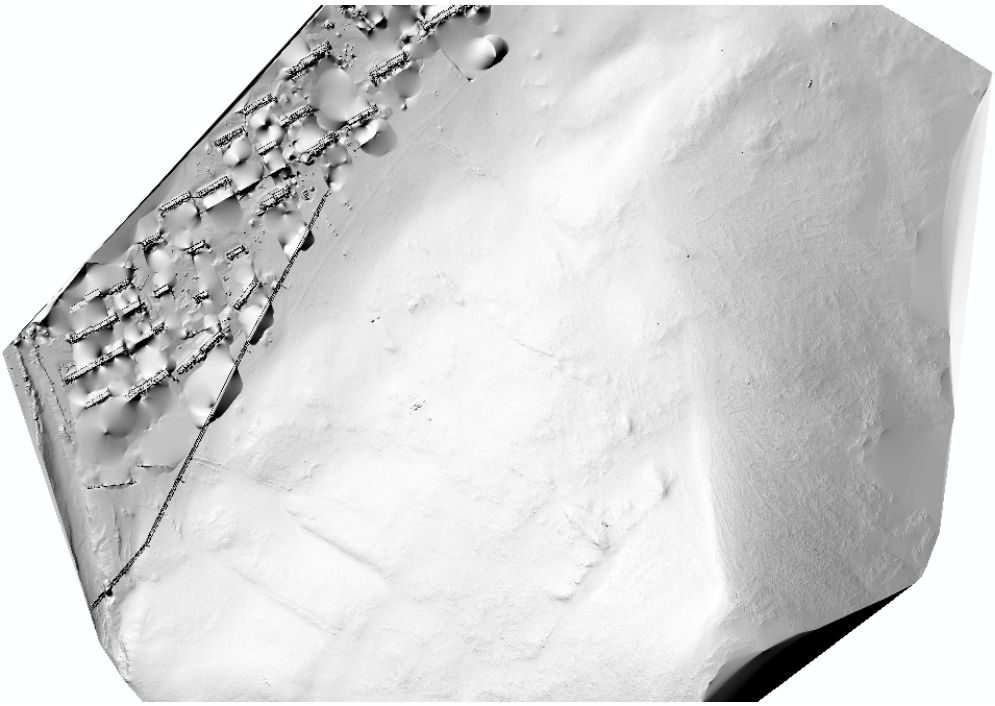


Figure 2.4: Hillshaded DSM made 14.02.2017 of the surface of Sukkertoppen with snow from terrestrial laser scan data. Resolution: 25 cm.

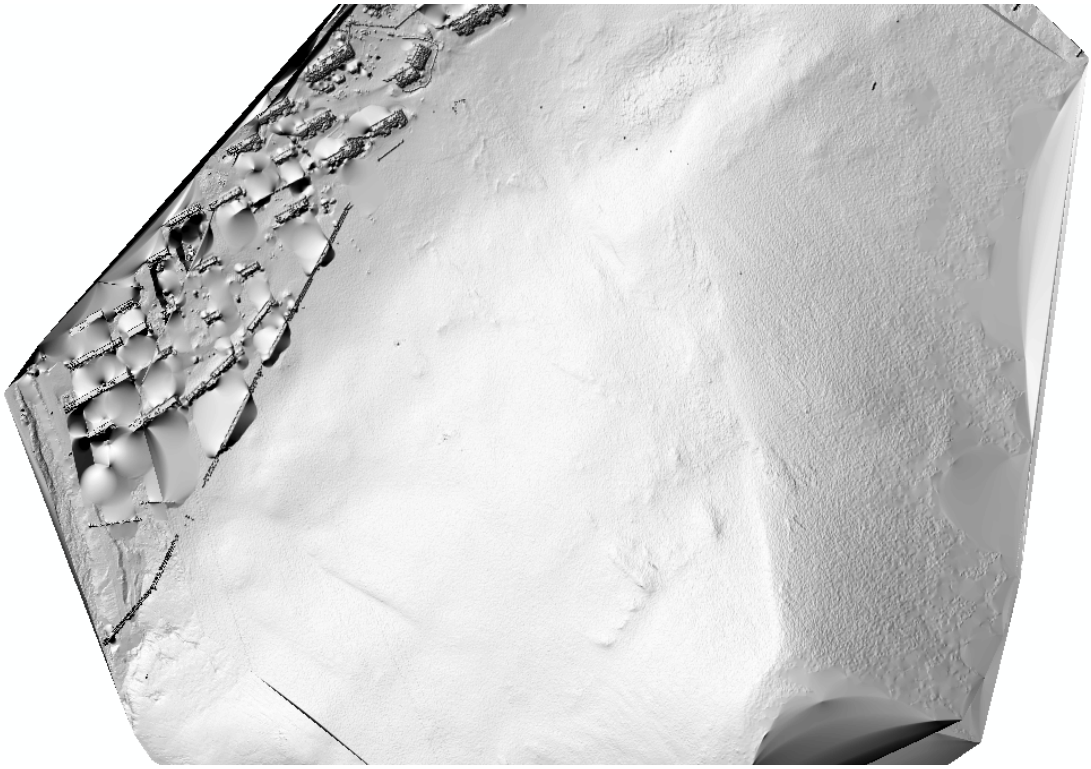


Figure 2.5: Hillshaded DSM made 22.02.2017 of the surface of Sukkertoppen with snow from terrestrial laser scan data. Resolution: 25 cm.

SURFACE ANALYSIS

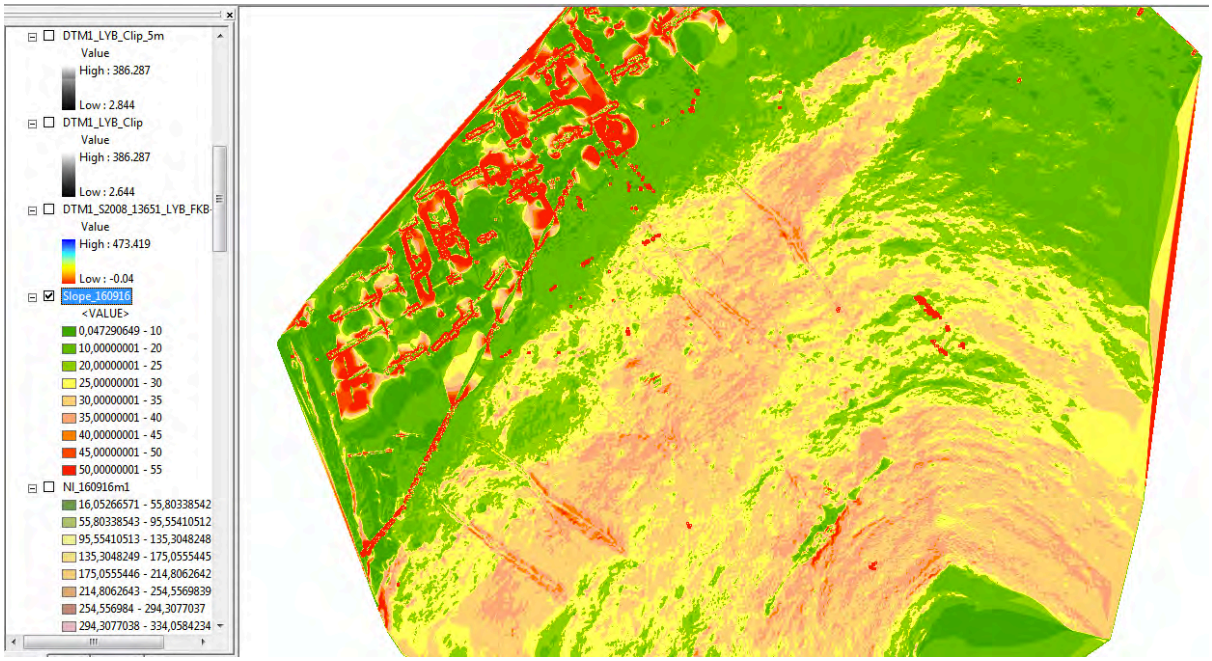


Figure 2.6: Resultant slope angle map of the surface of Sukkertoppen from 16.09.2016. Resolution 25 cm.

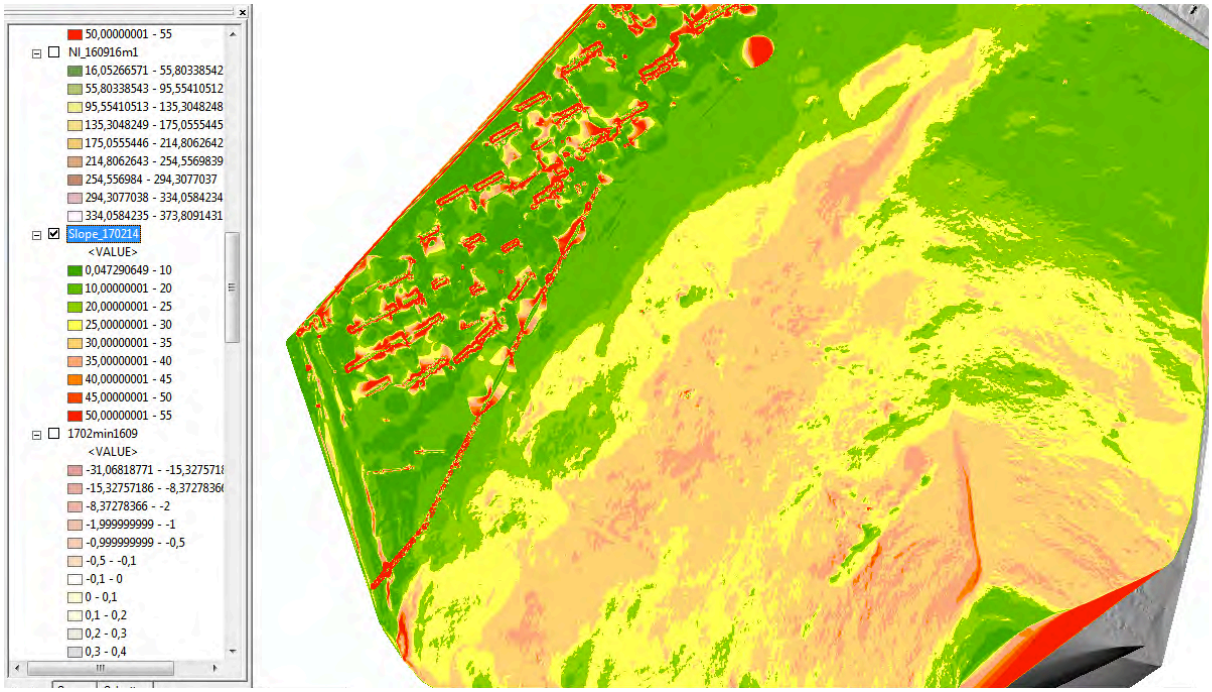


Figure 2.7: Resultant slope angle map of the surface of Sukkertoppen from 14.02.2017. Resolution 25 cm.

The high resolution digital surface models show the typical features, rough surface of the terrain without snow, and smoother surface the more snow is accumulated (pre and post avalanche). Therefore there is also a change in slope angle of the terrain. Those analysis are important for the definition of the avalanche release areas at Sukkertoppen, the friction angle of dry snow is 28 degree, so according to international standards every terrain that is steeper than 30 degree is prone to slab avalanche release of dry snow avalanches that are modeled using SAMOS. For the exact definition of the design avalanches also the differential map of changes in snow depth between 14.02.2017 and 22.02.2017 was used.

DEFINITION OF DESIGN AVALANCHES

The definition of design avalanches is a key factor for calibrating the simulation model. The important parameters to determine are: Release area, release snow depth, snow entrainment area, snow depth in entrainment area, ant the run out distance. All of these parameters are extracted from the calculation of the difference in snow depth between 14.02.2017 and 22.02.2017, picture analysis and the slope of the DEMs. The area of the avalanche release and the snow entrainment can be seen in figure 2.8., the averaged snow depth in the release area was 1 m, the averaged snow depth for the snow entrainment is 0,4 m.

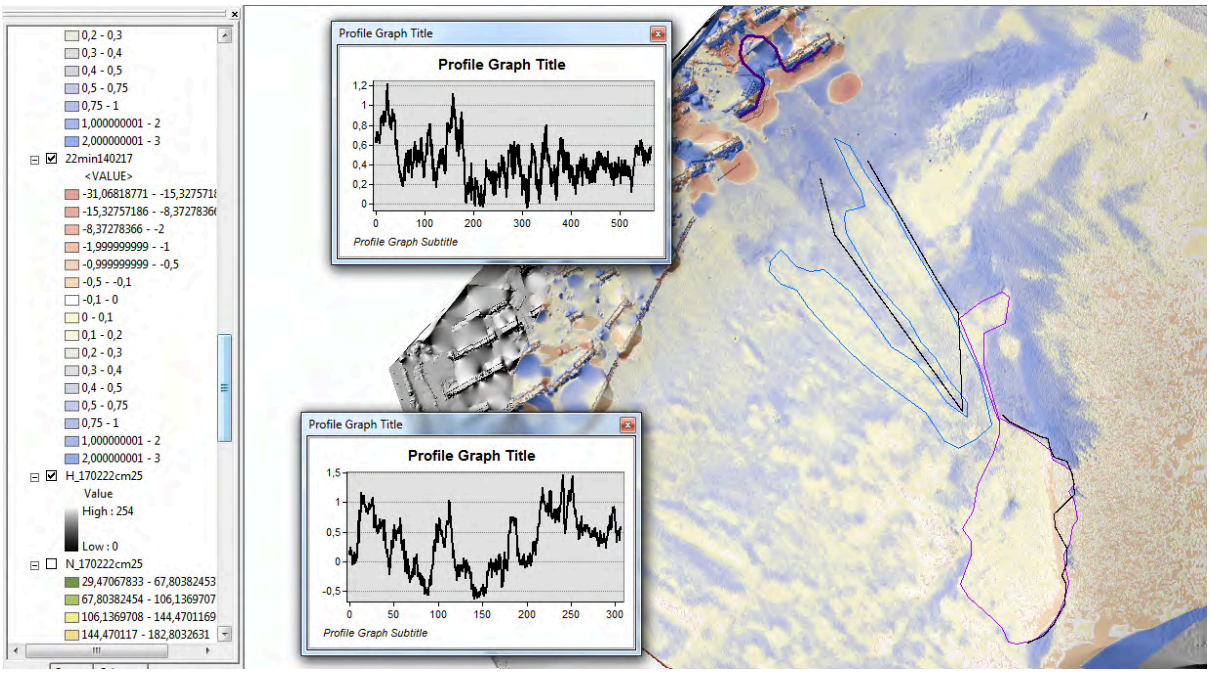


Figure 2.8: snow depth differential map between 14.02.2017 and 22.02.2017and resultant release area, release snow depth, snow entrainment area, snow entrainment snow depth and run out (meters).

For the calculation of the SAMOS simulations the following release and entrainment areas were chosen based on the above-described analysis:

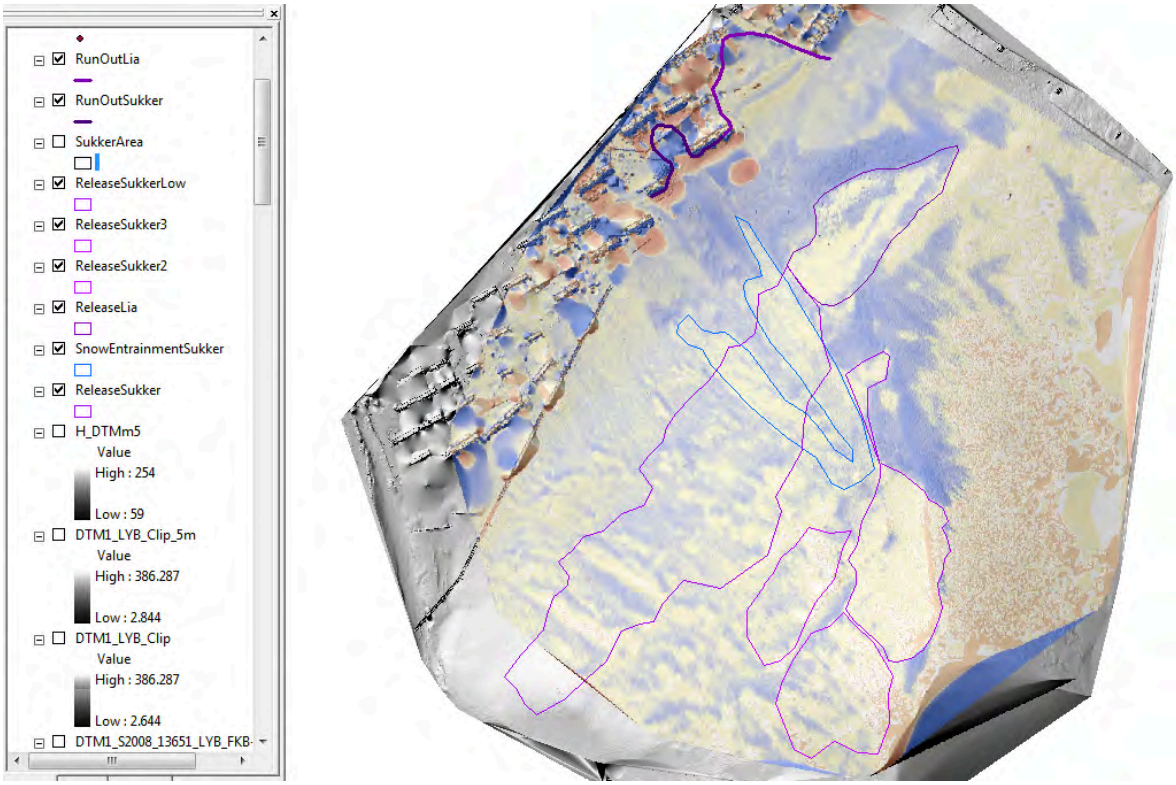


Figure 2.9: snow depth differential map between 14.02.2017 and 22.02.2017and resultant release areas also dependent on slope angle.

AVAILABLE DATA

For the Gumbel distribution calculation, 41 years of data from the weather station at the airport are used. The calculations are based on the 3D NSS in the months December to May. The data can be found on the Norwegian homepage of meteorological institute/eKlima. The 3D NSS were calculated for a 30, 100, 150, 300 and 1000 year event (*Figure 3.1.*). Data from Multiconsult (2016): This data have some mistakes. Multiconsult used all data from eKlima for the Gumbel-distribution, because they used more than one extreme event per year for the calculation of the events - normally you take one.

RESULTS

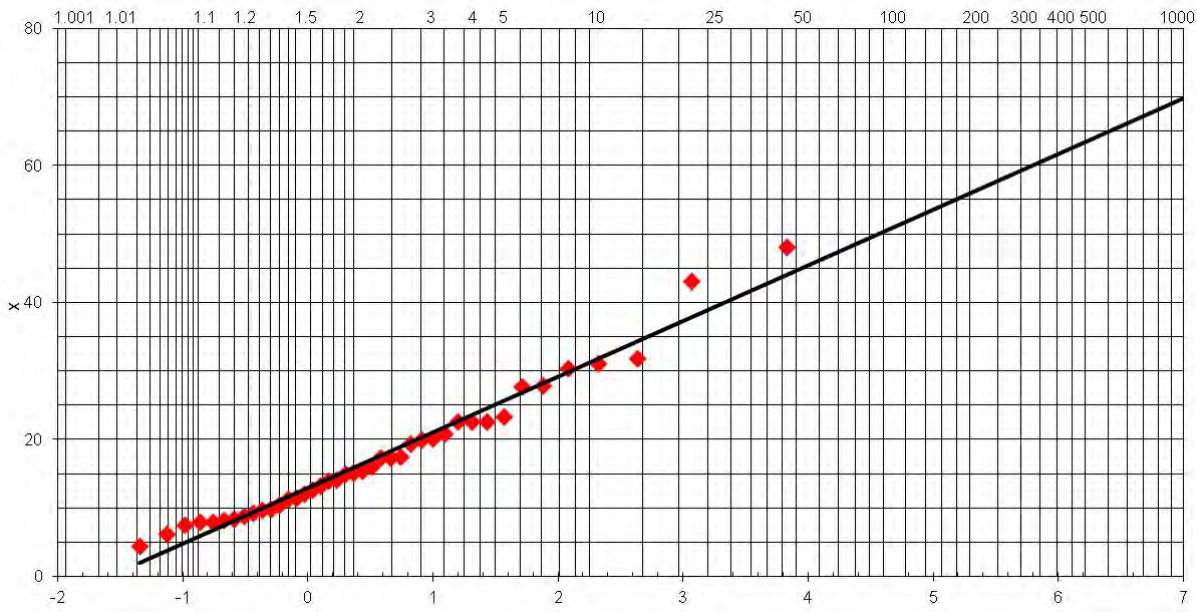


Figure 3.1: Gumbel-distribution for the weather data at Longyearbyen airport. X=snow depth in cm; Y=return period in years.

Additional to the 3D NSS, the wind drift has to be considered, because wind drift is the main factor for avalanche danger in Longyearbyen. There is no data for wind drift available in Svalbard, because there is no measuring system. In the following, to see the influence of wind drift on the fracture height, different percentages for wind drift were added to the fracture height.

weather station	airport (10 m a.s.l.)	airport (10 m a.s.l.)	airport (10 m a.s.l.)	airport (10 m a.s.l.)	airport (10 m a.s.l.)
release area	release area	release area	release area	release area	release area
event	$3DNSS_{30y}$	$3DNSS_{100y}$	$3DNSS_{150y}$	$3DNSS_{200y}$	$3DNSS_{1000y}$
release elevation max [m]	370	370	370	370	370
release elevation min [m]	335	335	335	335	335
mean elevation release area [m]	353	353	353	353	353
elevation weather station [m]	10	11	10	10	10
differenze elevation [m]	343	342	343	343	343
elevation gradient [cm/100Hm]	5	5	5	5	5
additional snow height [cm]	41	52	54	59	68
slope (averaged) [°]	35	35	35	35	35
slope factor	1	1	1	1	1
area [ha, planar]	1	1	1	1	1
area [ha]	1	1	1	1	1
$d_0$3DNSS [cm]	41	52	54	59	68
$d_{0\ 20}$NSS [cm] 28°	36	46	48	52	60
fracture height [cm]	55	70	72	79	91
incl. snow drift 150 % [cm]	99	114	127	142	165
incl. snow drift 300 % [cm]	142	180	187	205	236
incl. snow drift 400 % [cm]	171	217	226	246	284
incl. snow drift 500 % [cm]	200	254	264	288	332
incl. snow drift 1000 % [cm]	346	439	456	498	574
release volume 150 % [m³]	9.900	11.400	18.700	20.500	23.600
release volume 300 % [m³]	14.200	18.000	18.700	20.500	23.600
release volume 400 % [m³]	17.100	21.700	22.600	24.600	28.400
release volume 500 % [m³]	20.000	25.400	26.400	28.800	33.200
release volume 1000 % [m³]	34.600	43.900	45.600	49.800	57.400

Figure 3.2: Gumbel-distribution results with additional snow drift scenarios and resultant changes in snow depth in the release area dependent on return period.

Regarding the scenarios that define a return period of 1/100, 1/1000, and 1/5000 according to the Norwegian system the following scenarios were used for the Samos simulation runs considering 1) the release areas (defined from the laser scan slope map of the bare ground and the snow depth maps from Sukkertoppen), 2) the extreme value analysis (Gumbel distribution) and 3) the snow drift added in % which includes also the expected climate warming increased precipitation (snow drift was added differently to the release areas considering the laser scan snow depth maps) and 4) expected snow entrainment in the track (basis for the estimate are the laser scan snow depth maps of the avalanche in 2017):

Release area	1/100	1/1000	1/5000
Sukker1	1,8 m/0,5m)	2,1 m/1 m	2,4 m/1 m
Sukker 2	1,2 m/0,7m)	1,7 m/0,7 m	Comb. 1,2,3, low
Sukker 3	1,2 m/0,7m)	1,7 m/0,7 m	Comb. 1,2,3, 0,7 m
Sukker low	1,2 m	1,7 m	Comb. 1,2,3, low

Table 1: Return period scenarios for the SAMOS simulation runs

SAMOS MODELING

MODELING OF THE DESIGN AVALANCHE

SAMOS is a simulation-software for dry snow avalanches. It describes both the denseflow-layer (DFL) and the powder-snow-layer (PSL) of an avalanche, as well as the interaction between them. The software has been developed for the Austrian Service for Torrent and Avalanche Control (WLV), which has used a first version since 1999 (Zwinger et al., 2003; Sampl and Zwinger, 2004). The use of the software revealed several problems: too large DFL-width in channeled terrain and often too large run-out distances of the DFL and also the PSL in terms of the 5 kPa zone. An improved version, SAMOS-AT, has been developed and completed in 2007. The main changes are different

bottom friction models for the DFL, the treatment of the PSL as two-phase-flow and a different numerical solution scheme for the DFL. For a full description of SAMOS see e.g. Sampl, P., Zwinger, T., 2004. Avalanche simulation with SAMOS. Annals of Glaciology, Volume 38, or Peter Sampl and Matthias Granig 2009. Avalanche simulation with SAMOS-AT. International Snow Science Workshop, Davos 2009, Proceedings.

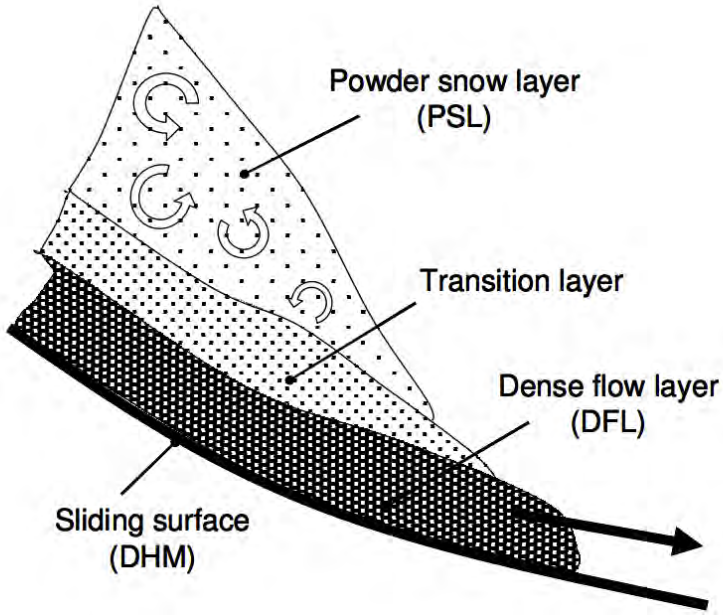


Figure 4.0: Vertical layer-structure of a dry snow avalanche as assumed in the SAMOS-AT

First the best fit to the design avalanche for the calibration of SAMOS had to be found. Different scenarios were calculated. In conclusion it is proved that SAMOS works very well under „Svalbard“ conditions as long as the calibration is done very precise. Both the accurate knowledge of the boundary conditions of the design avalanche via terrestrial laser scanning as well as the possibility to change parameters in SAMOS such as flow density, friction models, etc. have created a surprisingly good fit of the simulation results to the actual avalanche. The best fit was reached using the following parameters:

Release Area

Name	Masse [kt]	Mächtigkeit [m]	Dichte [kg/m3]	Flächendichte [kg/m2]	Fläche [ha]	projizierte Fläche [ha]
Rel_Sukker1_d0_100	4.89702	1	200	200	2.44851	2.04583

Snow Entrainment Area

Name	Masse [kt]	Mächtigkeit [m]	Dichte [kg/m3]	Flächendichte [kg/m2]	Fläche [ha]	projizierte Fläche [ha]
Ent_Sukker40_Dens125	1.18748	0.4	125	50	2.37497	2.03965

Reibungsgesetz	samosAT
Formel-Kennwerte	tau0=0 mue=0.155 Rs0=0.222 kappa=0.43 R=0.05 B=4.13

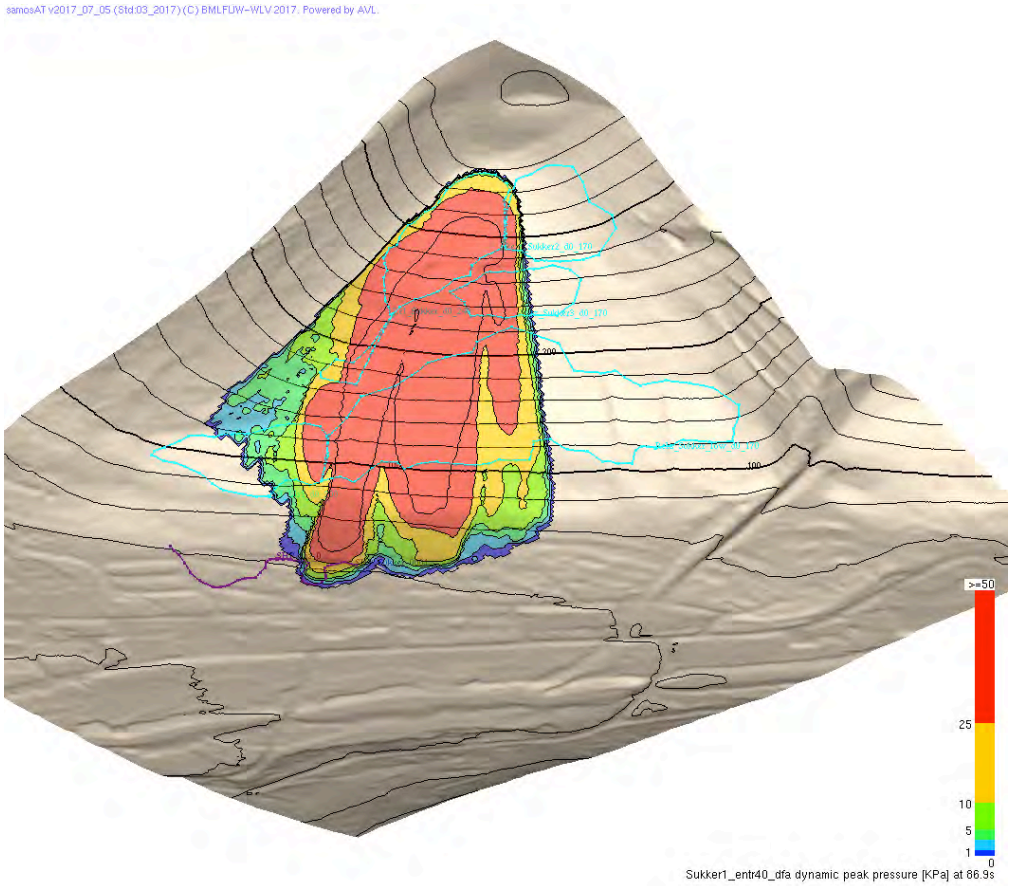


Figure 4.1: Peak pressure (KPa) of the design avalanche having the best-fit parameters.

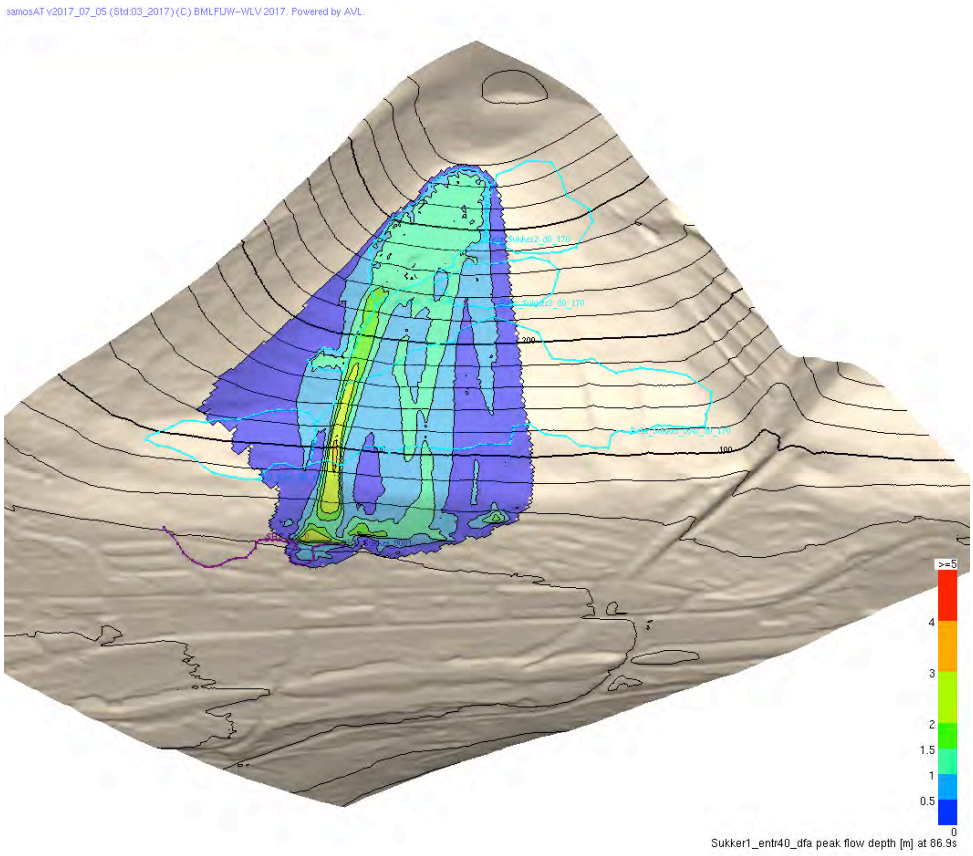


Figure 4.2: Peak flow depth in meters of the design avalanche with best-fit parameters.

To further improve the calibration of SAMOS the Lia avalanche from December 2015 was also calculated. Also those results are very well fitting the avalanche that happened.

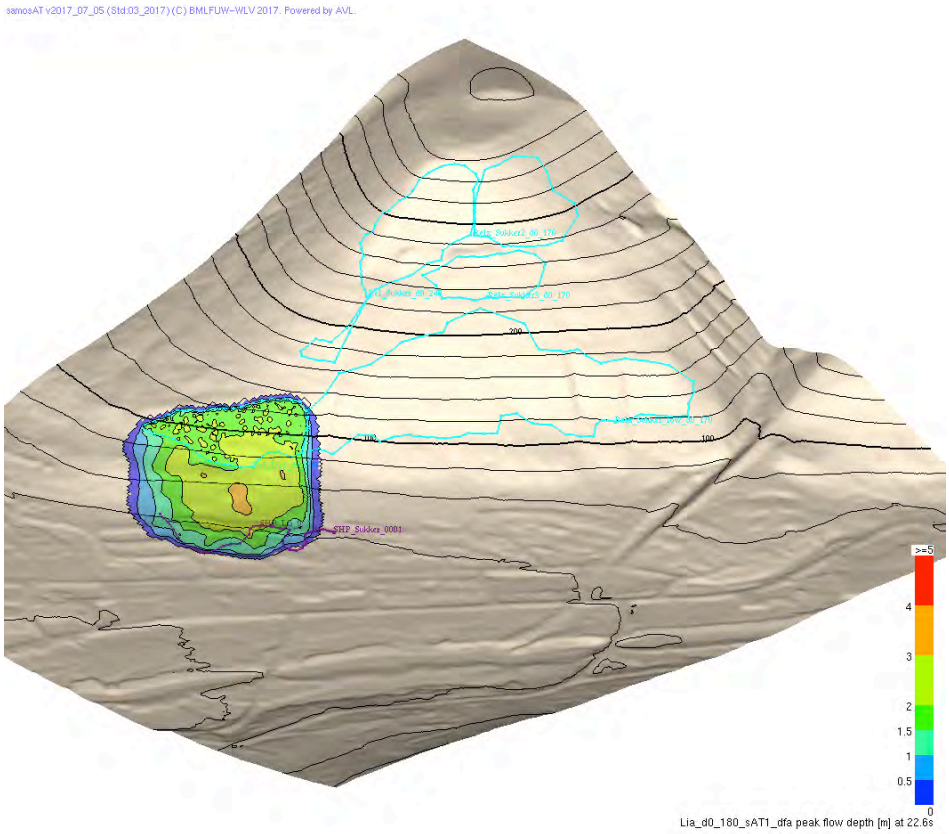


Figure 4.3: Peak flow depth in meters of the Lia design avalanche with best-fit parameters.

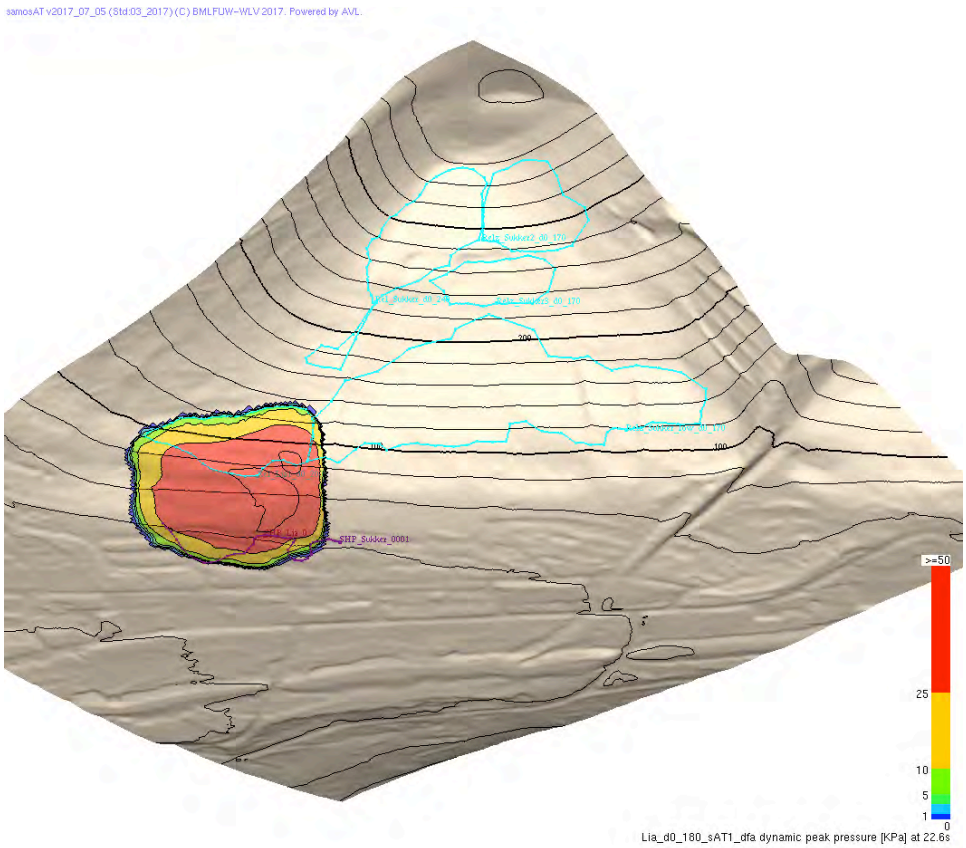


Figure 4.4: Peak pressure (KPa) of the Lia design avalanche having the best-fit parameters.

SIMULATION RESULTS OF THE DIFFERENT SCENARIOS

In the following some of the SAMOS simulation results are displayed. The scenarios were chosen addressing important avalanches that could happen from Sukkertoppen. The results can be very well used for hazard mapping.

Sukkertoppen release area from February 2017

The release area was triggered using snow depth values according to the extreme value analysis and the snowdrift accumulations.

Name	Masse [kt]	Mächtigkeit [m]	Dichte [kg/m3]	Flächendichte [kg/m2]	Fläche [ha]	projizierte Fläche [ha]
Rel_Sukker_d0_180	8.81464	1.8	200	360	2.44851	2.04583

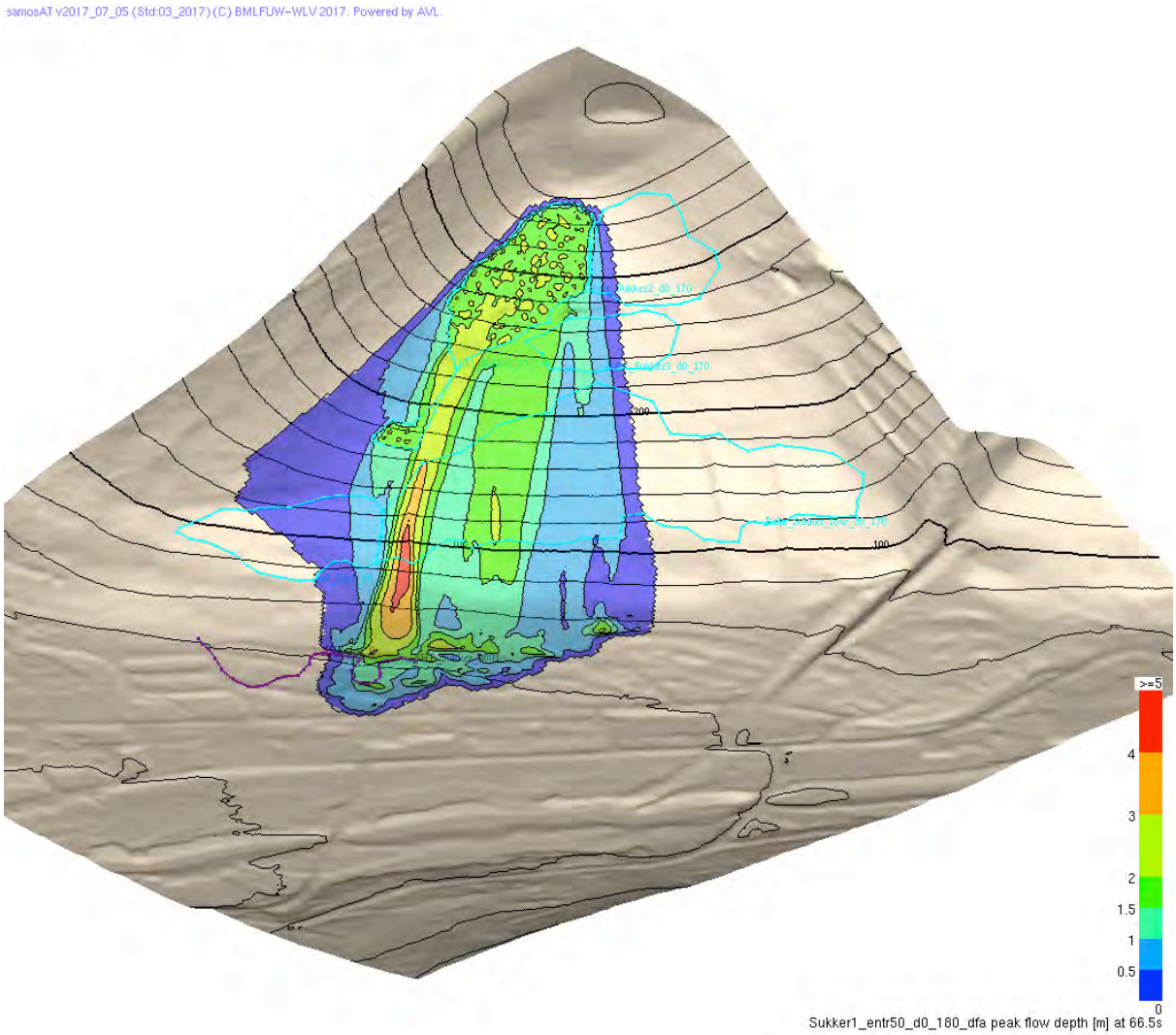


Figure 4.5: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen avalanche with 1,8 m snow depth in the release area and 0,5 m snow entrainment.

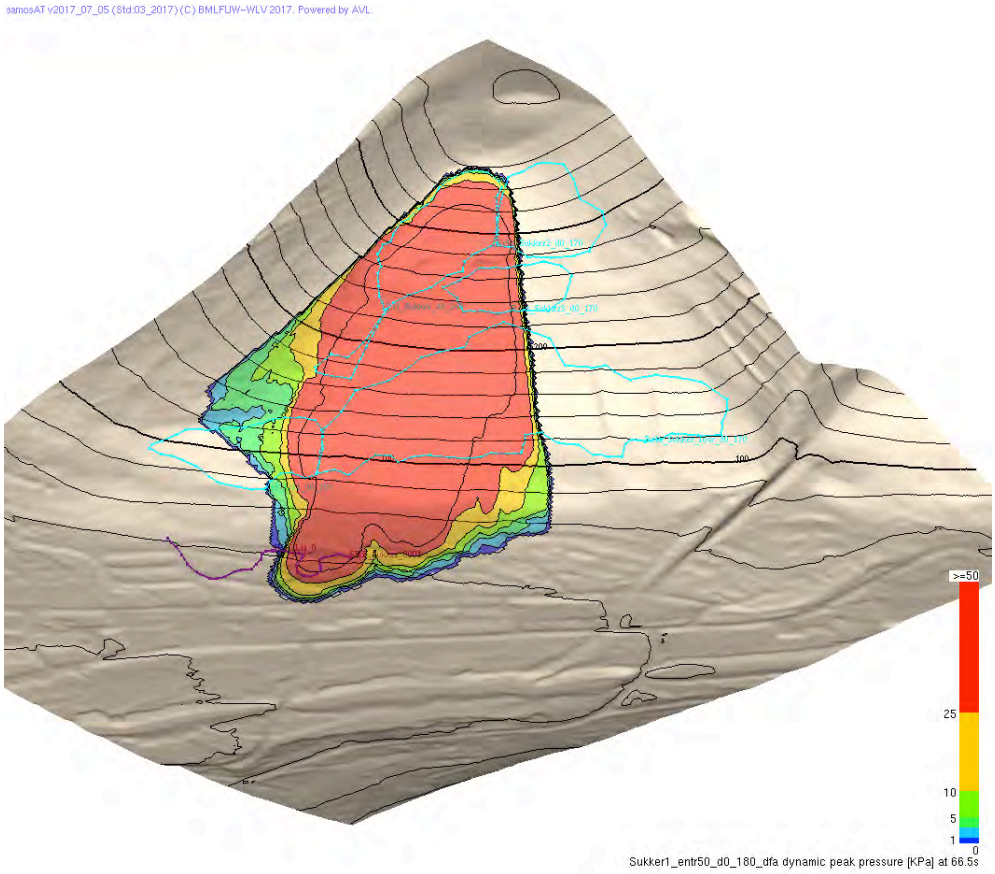


Figure 4.6: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen avalanche with 1,8 m snow depth in the release area and 0,5 m snow entrainment.

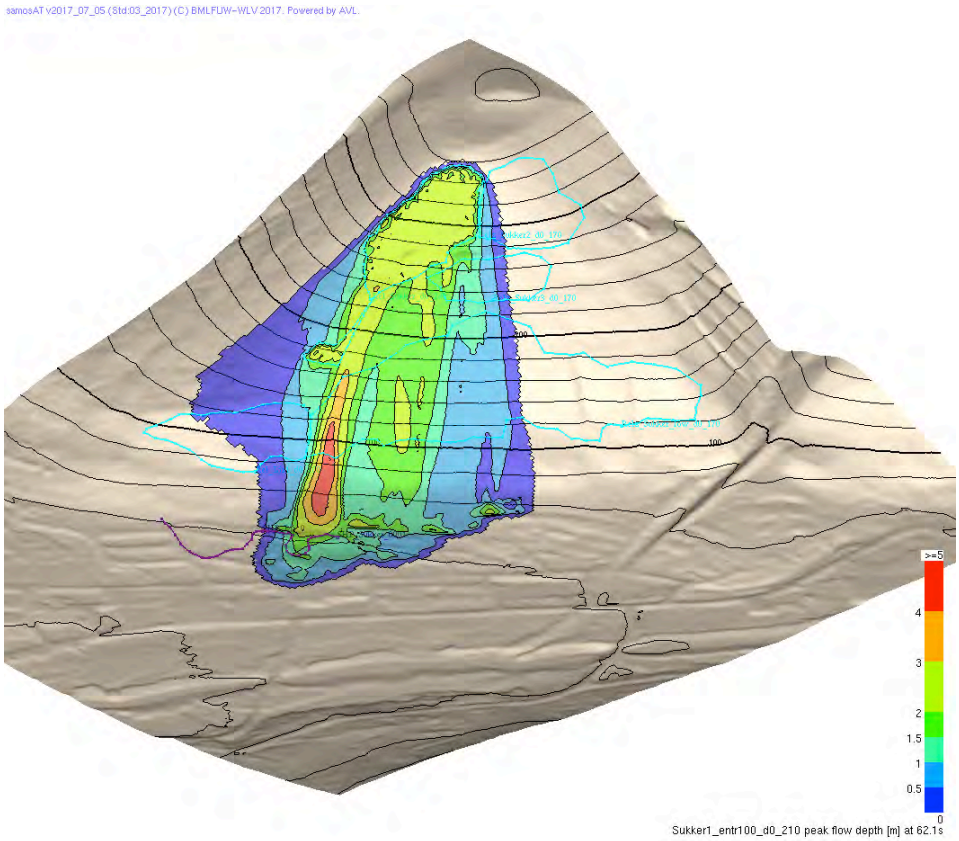


Figure 4.7: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen avalanche with 2,1 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment.

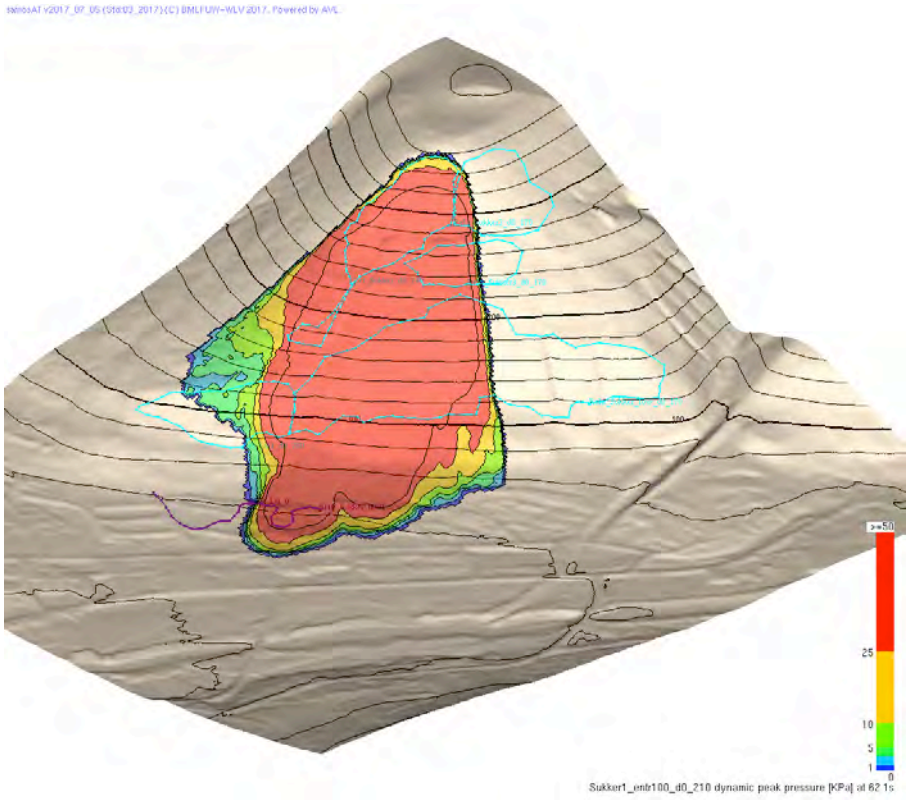


Figure 4.8: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen avalanche with 2,1 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment.

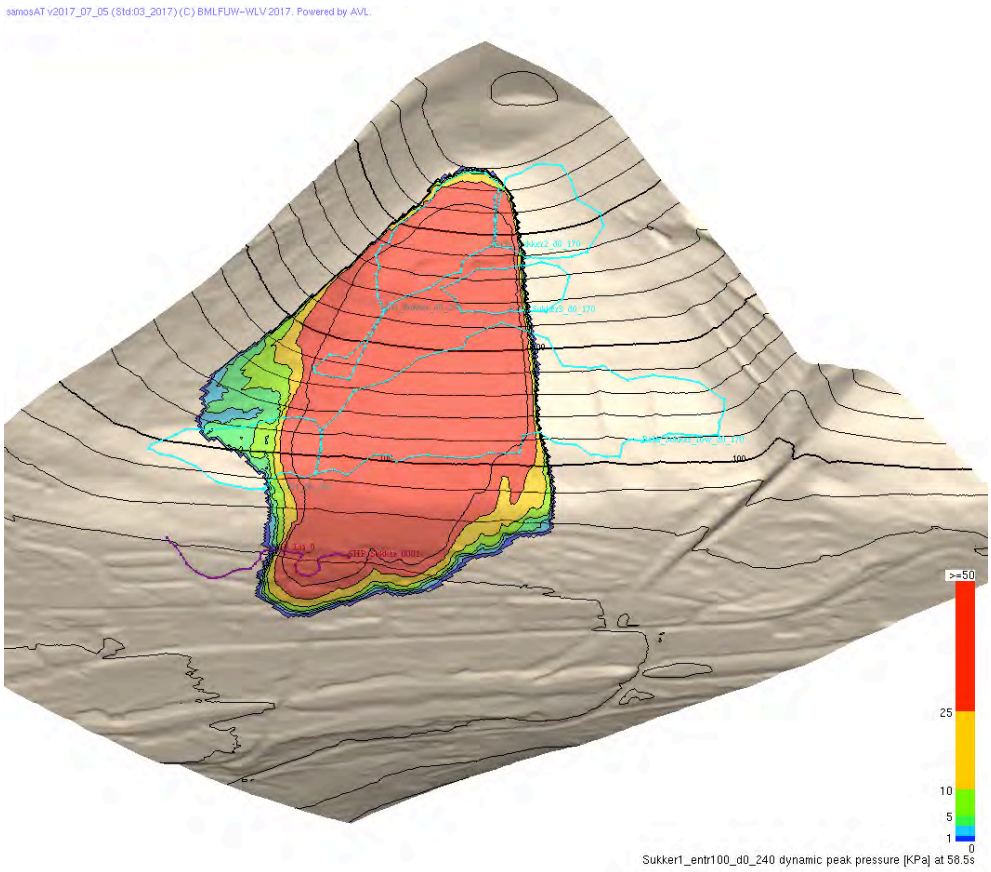


Figure 4.9: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen avalanche with 2,4 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment.

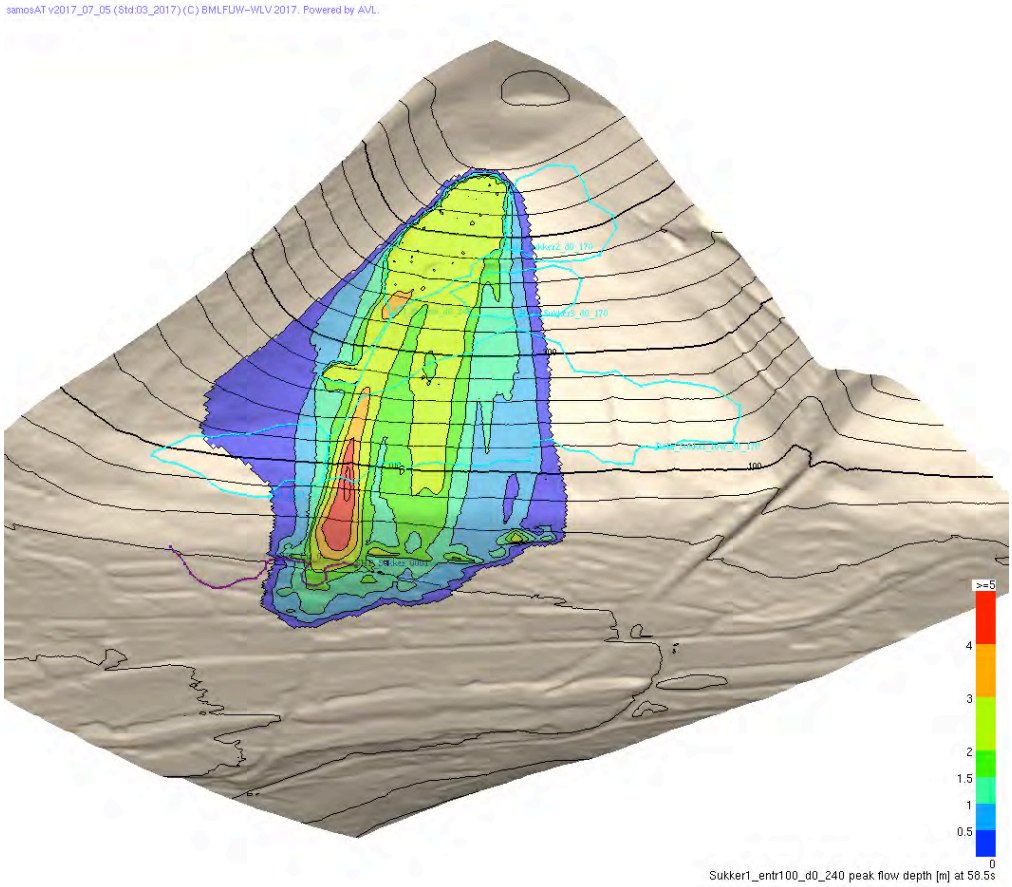


Figure 5.0: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen avalanche with 2,4 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment.

And following the results of the simulations of the other potential release areas at Sukkertoppen. The snow depth in these areas is reduced in comparison of the release area matching the February 2017 area as not as much snow drifting and consequent snow accumulation is expected.

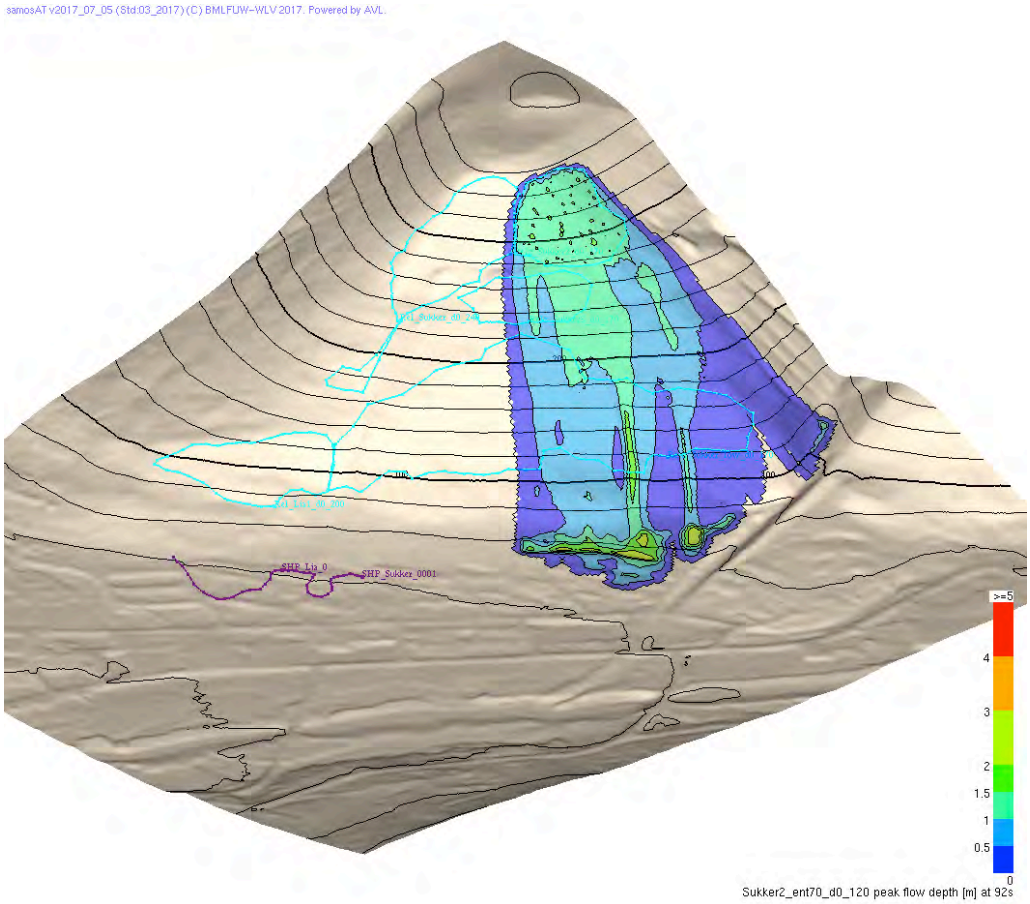


Figure 5.1: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 2 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

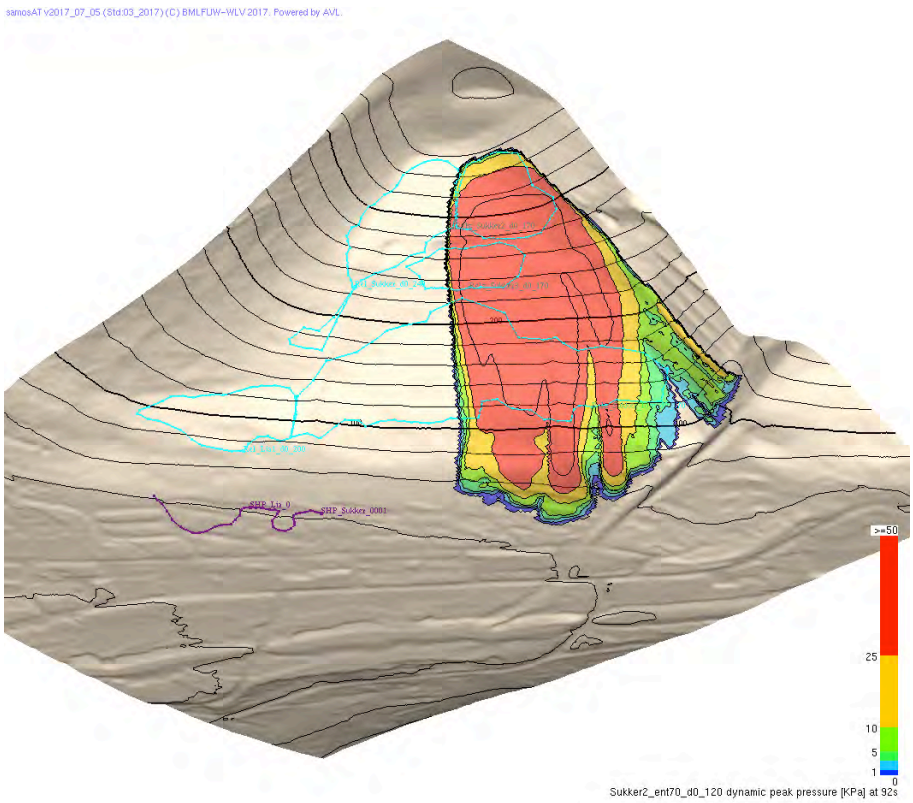


Figure 5.2: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 2 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

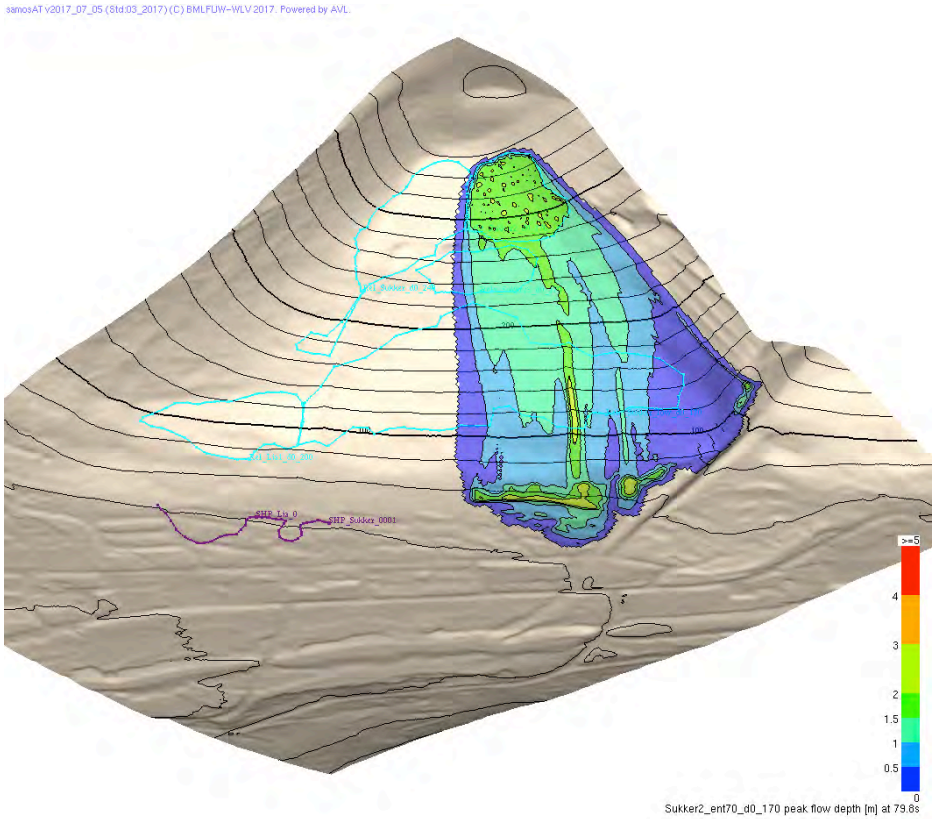


Figure 5.3: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 2 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

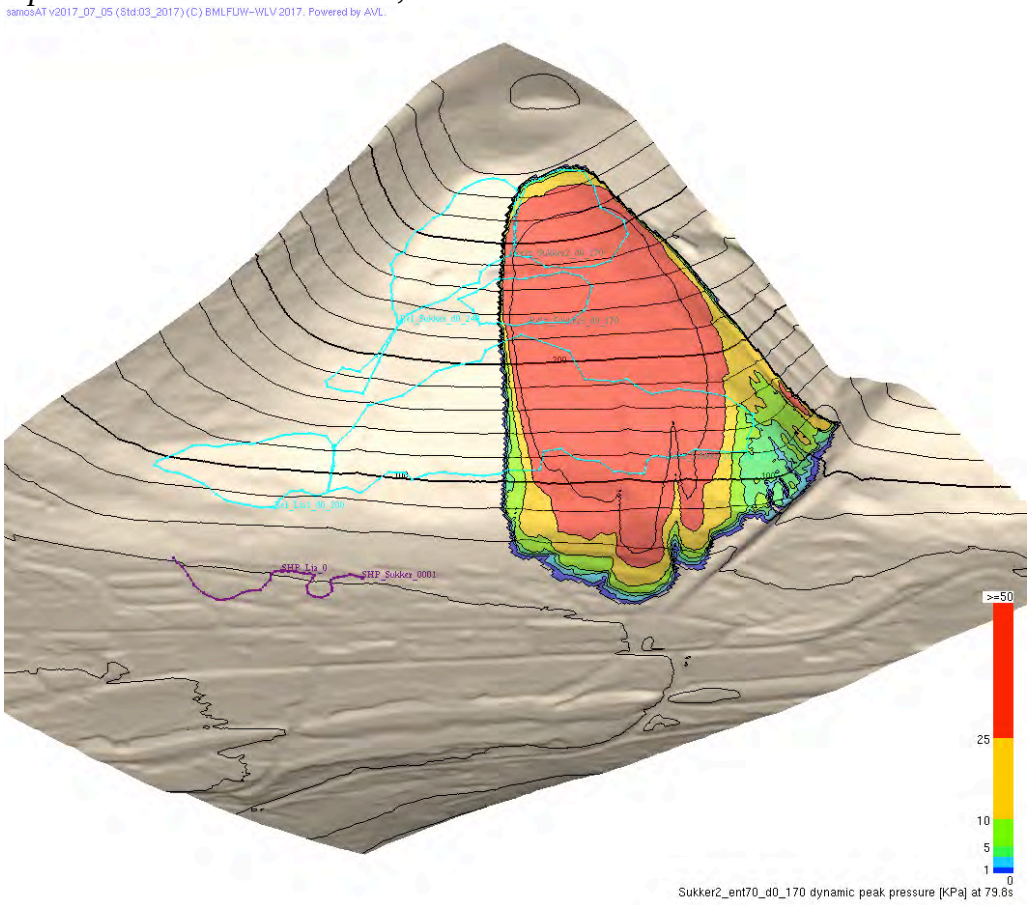


Figure 5.4: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 2 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

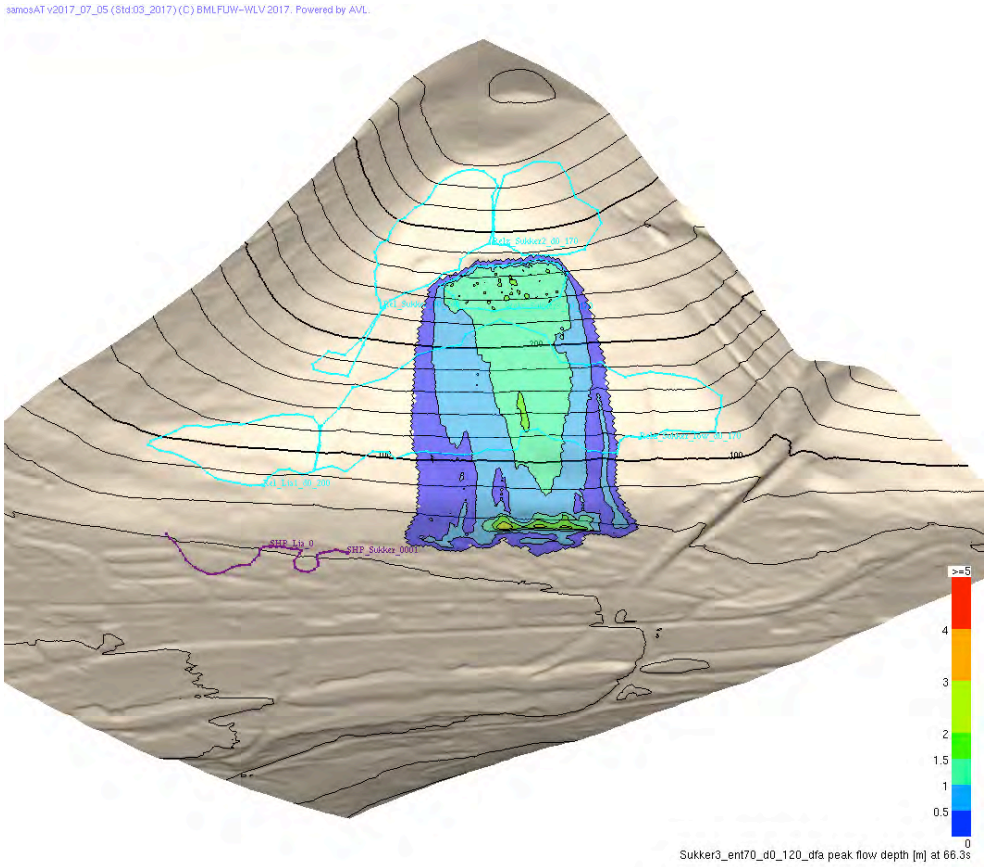


Figure 5.5: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

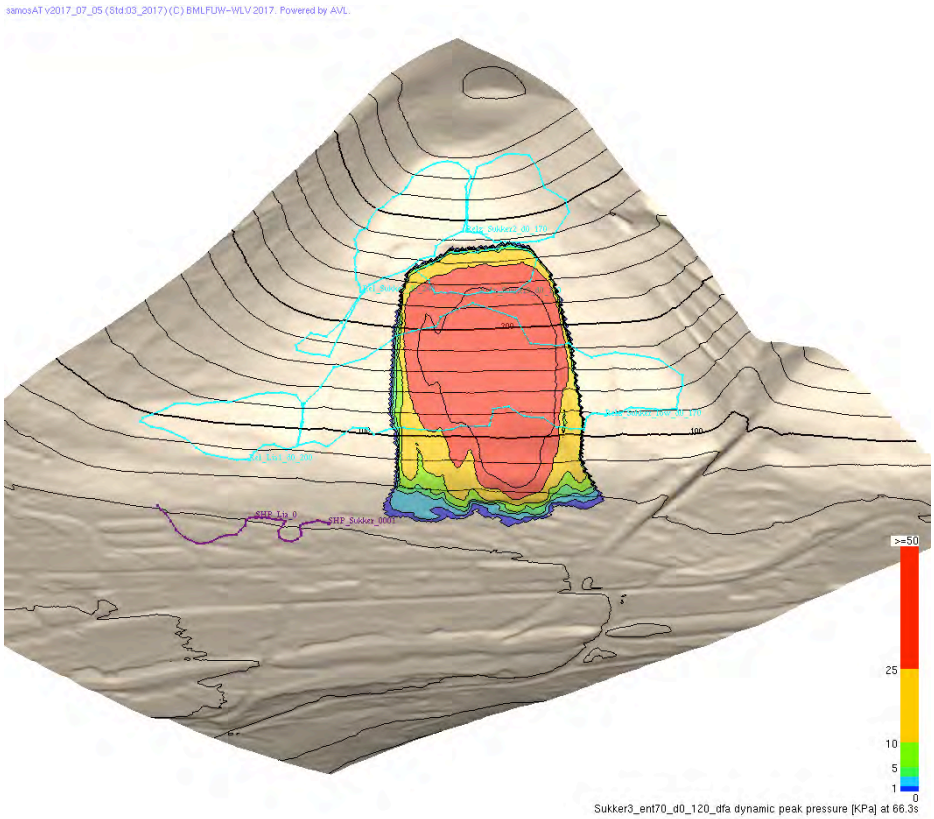


Figure 5.6: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

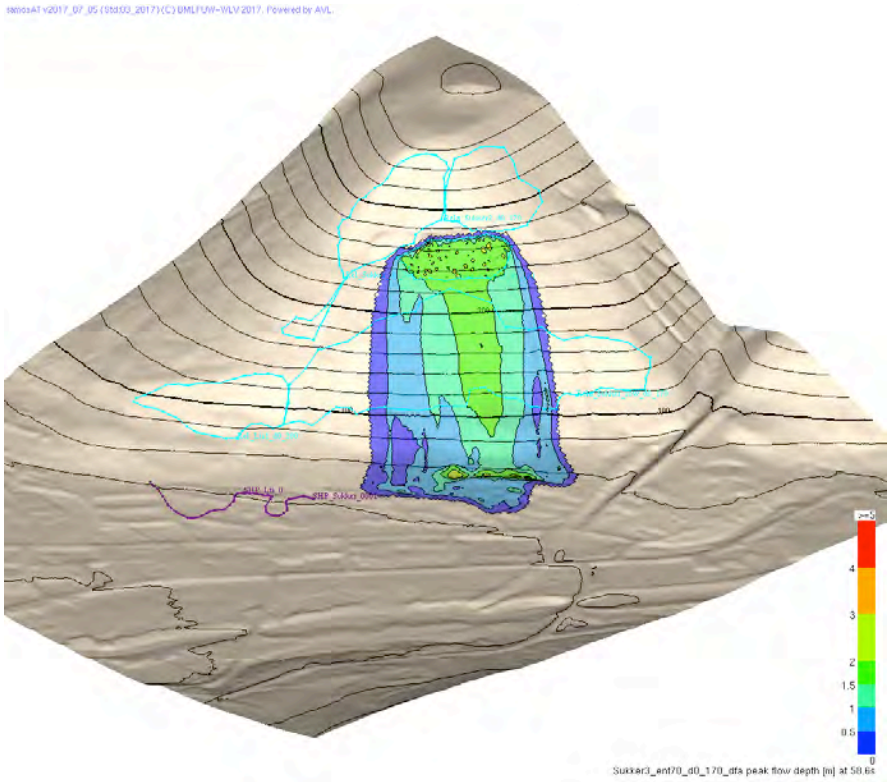


Figure 5.7: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

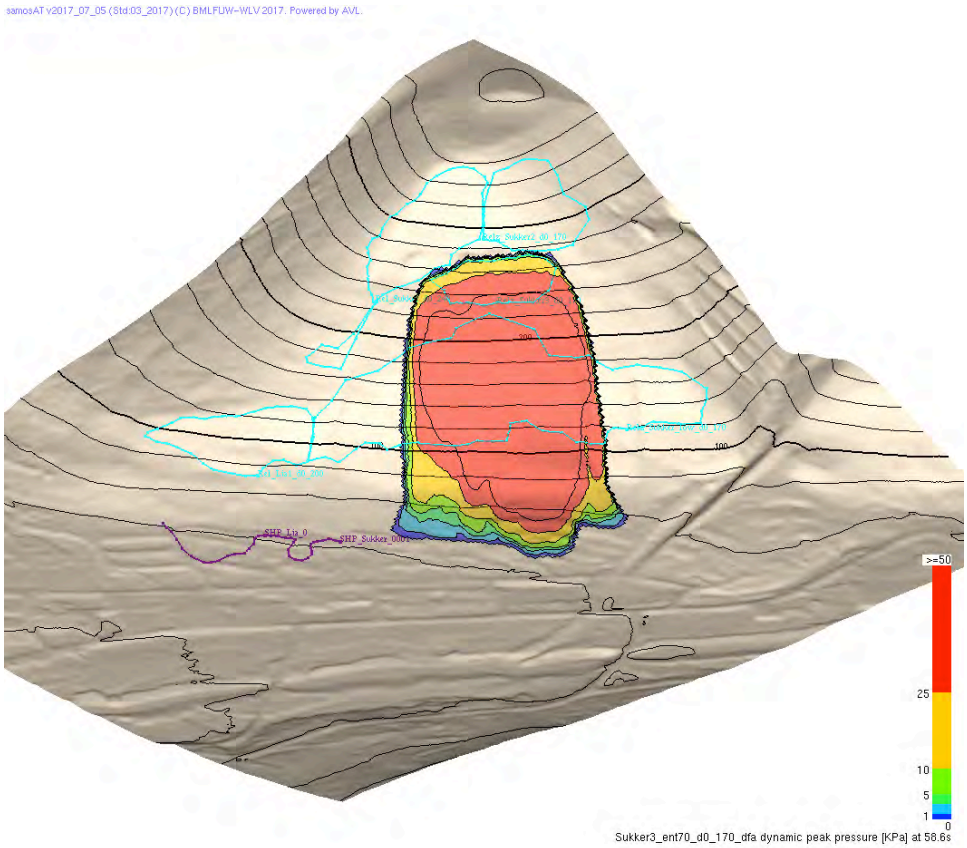


Figure 5.8: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment.

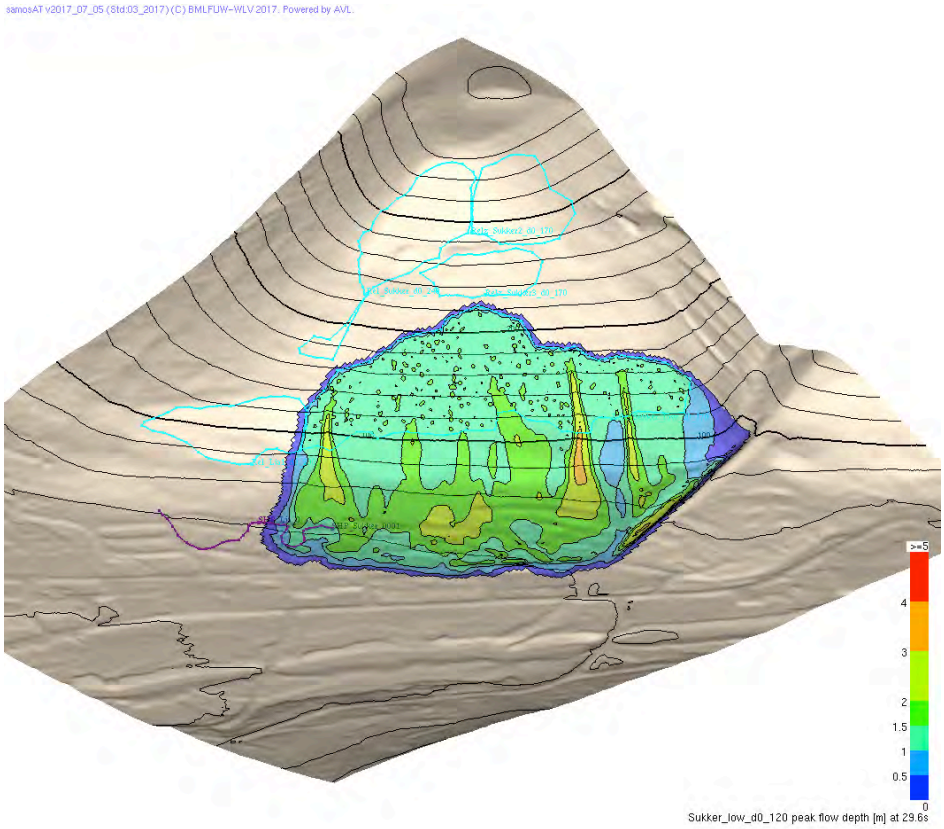


Figure 5.9: Peak flow depth in meters of the lower Sukkertoppen release area with 1,2 m snow depth in the release area.

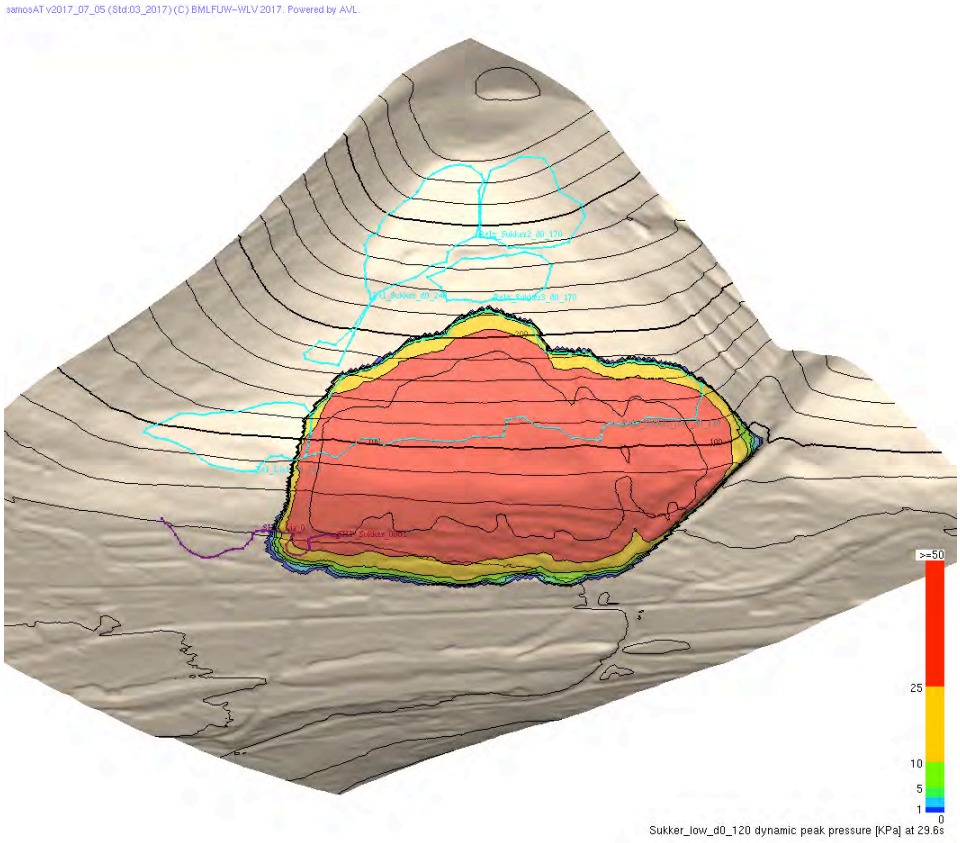


Figure 6.0: Peak pressure in KPa of the lower Sukkertoppen release area with 1,2 m snow depth in the release area.

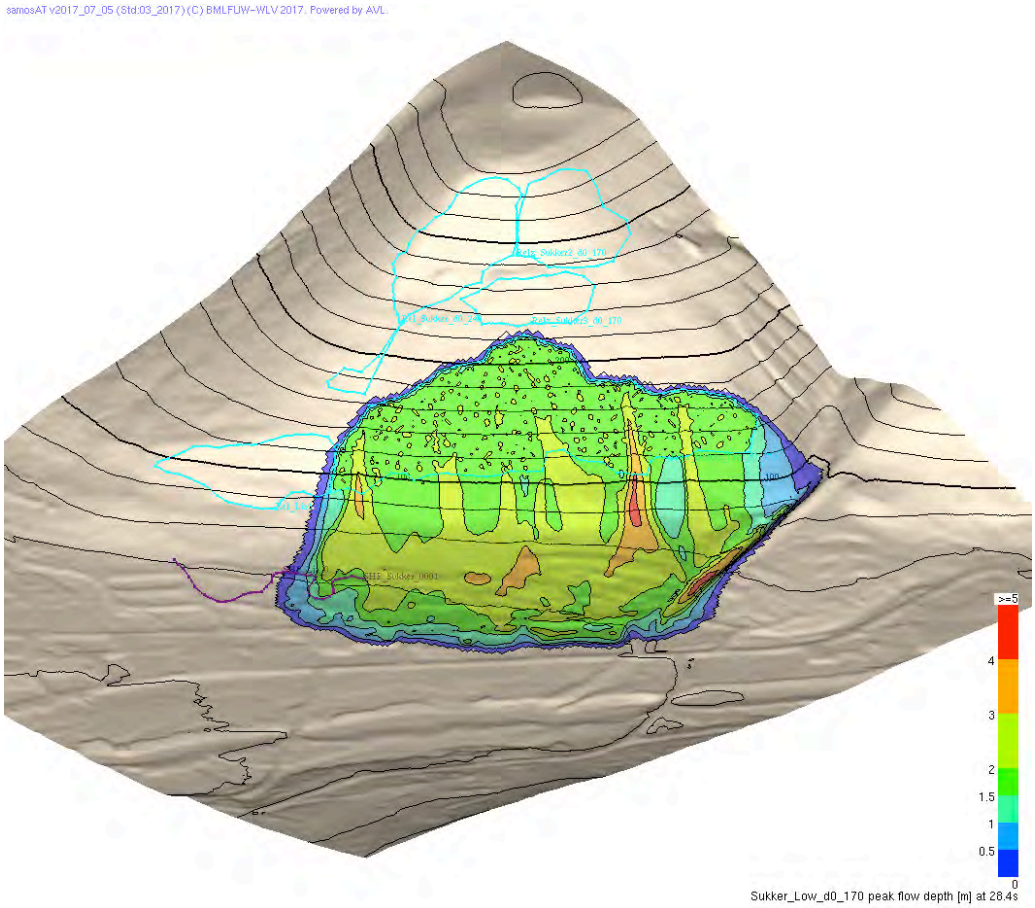


Figure 6.1: Peak flow depth in meters of the lower Sukkertoppen release area with 1,7 m snow depth in the release area.

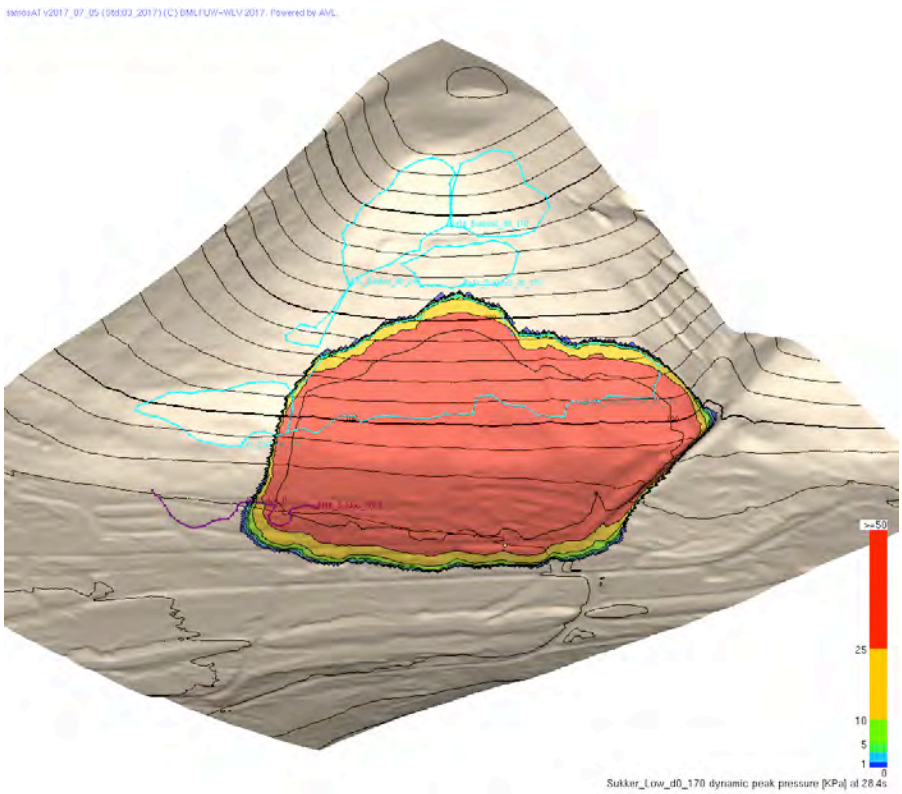


Figure 6.2: Peak pressure in KPa of the lower Sukkertoppen release area with 1,7 m snow depth in the release area.

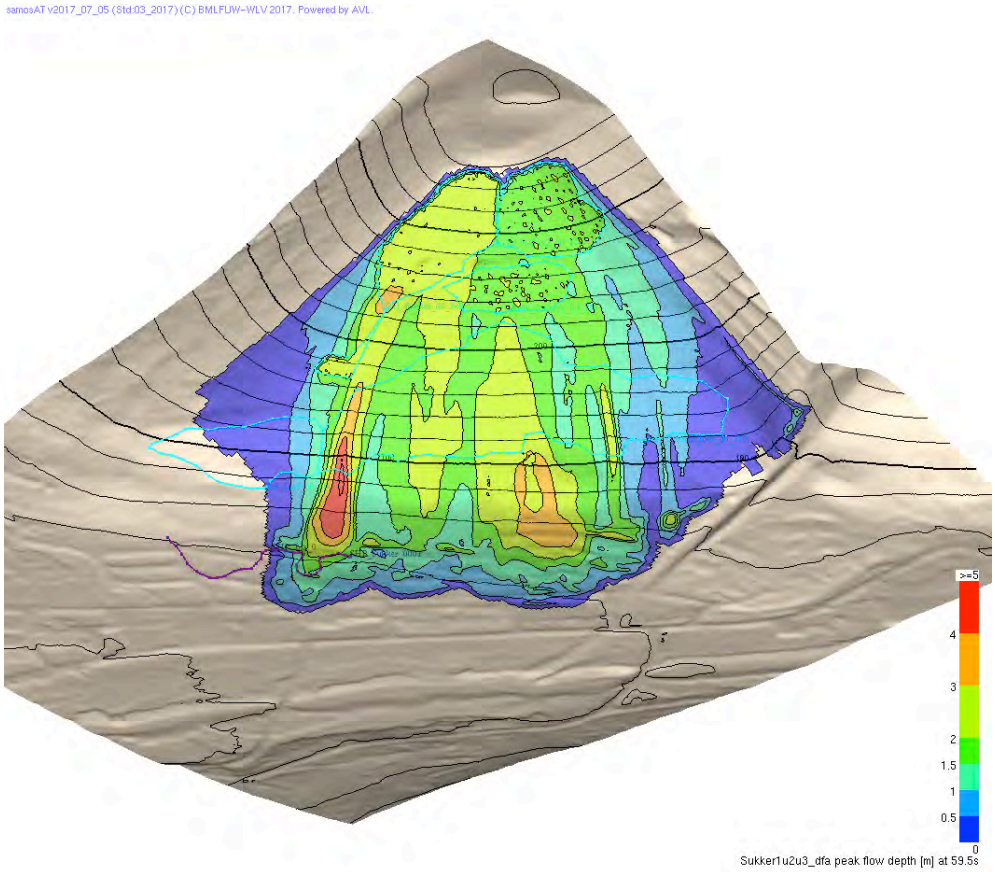


Figure 6.3: Peak flow depth in meters of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area.

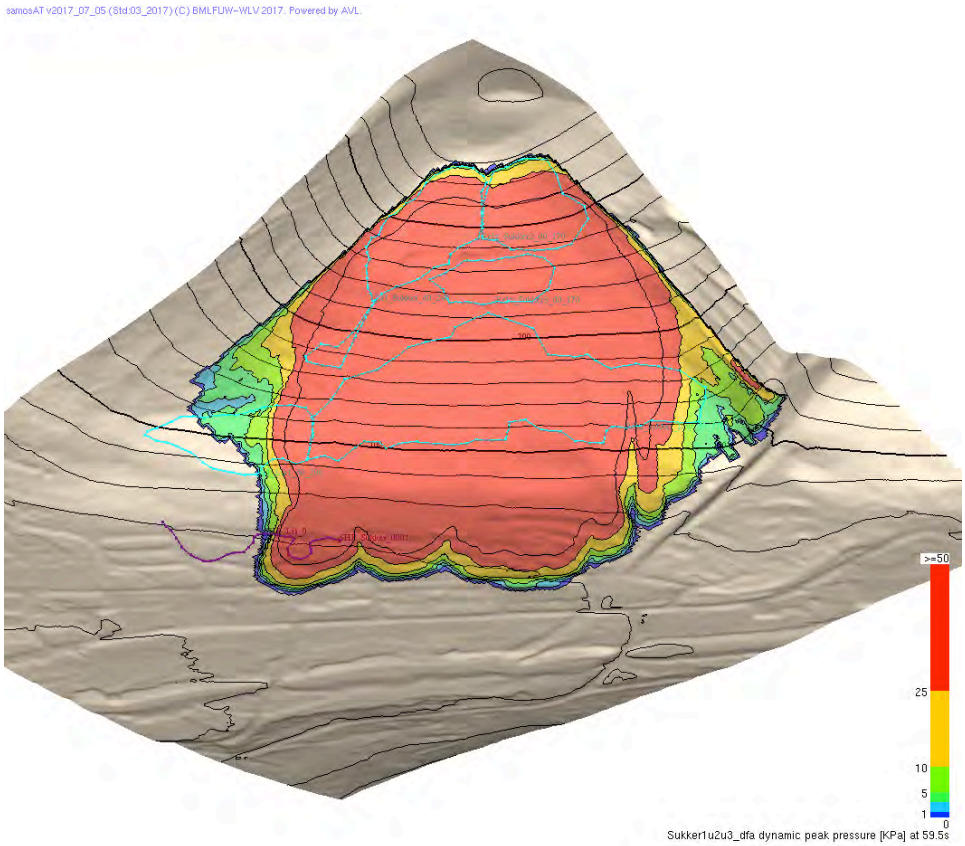


Figure 6.4: Peak pressure in KPa of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area.

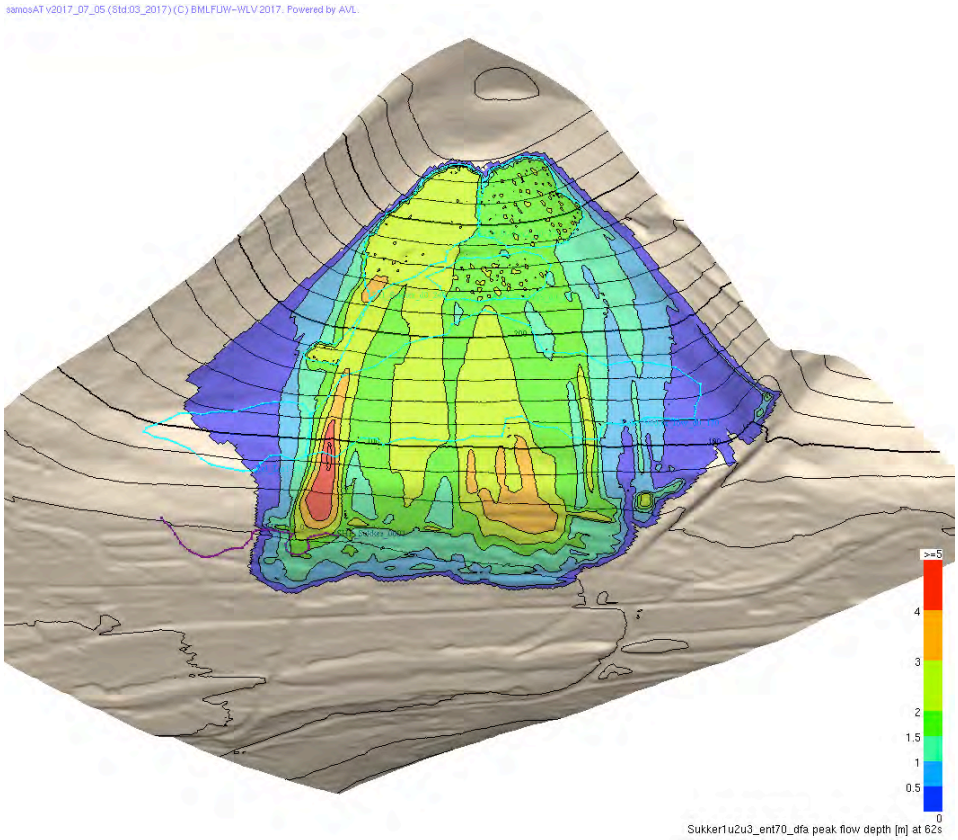


Figure 6.5: Peak flow depth in meters of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area including also a snow entrainment of 0,7 m.

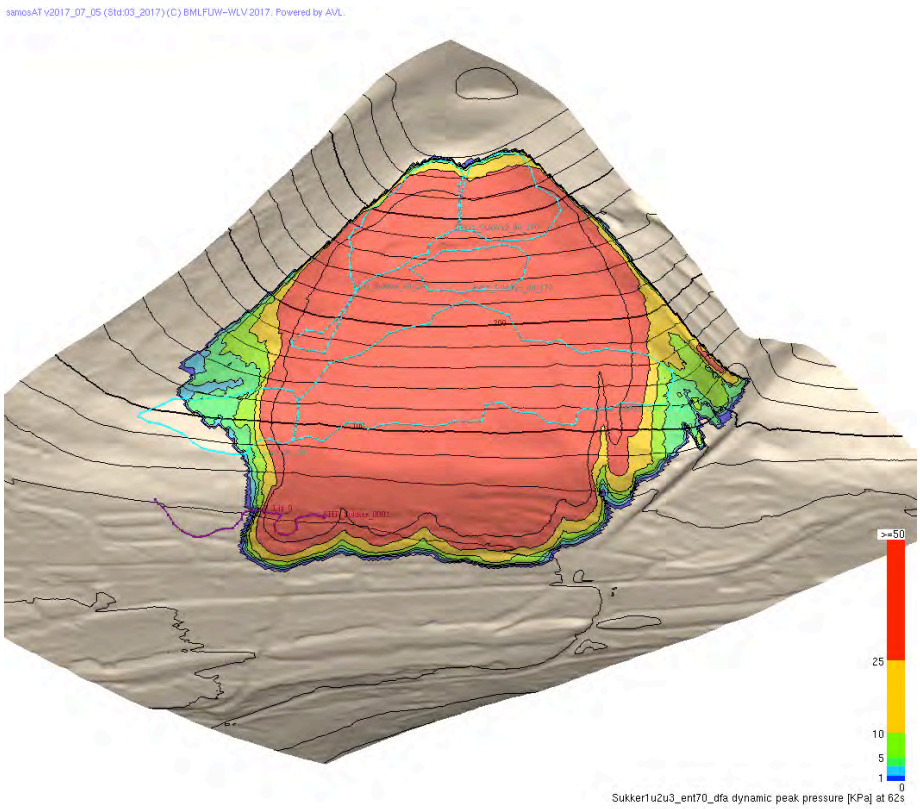


Figure 6.6: Peak pressure in KPa of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area including also a snow entrainment of 0,7 m.

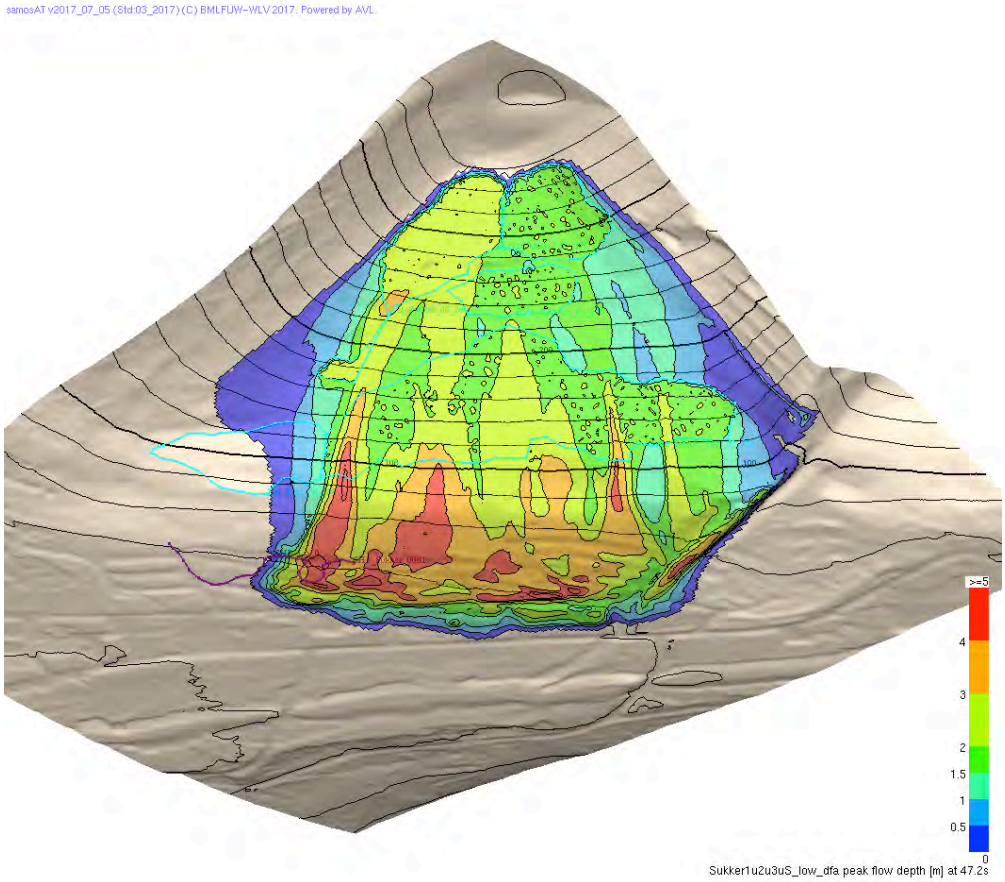


Figure 6.7: Peak flow depth in meters of Sukkertoppen release area 1,2,3 and low released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2,3 and low) snow depth in the release area.

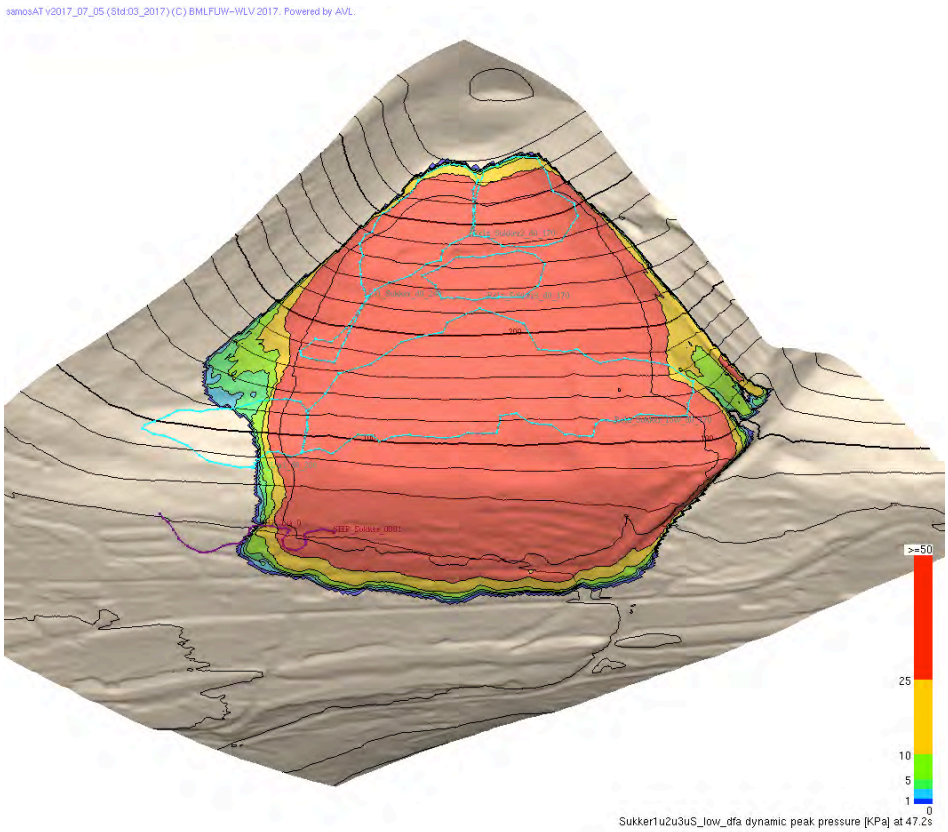


Figure 6.8: Peak pressure in KPa of Sukkertoppen release area 1,2,3 and low released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2,3 and low) snow depth in the release area

For the planning of constructions and for comparison also the peak velocities of the simulation results are of interest and displayed in the following:

Of the avalanche of February 2017 that was used for calibration:

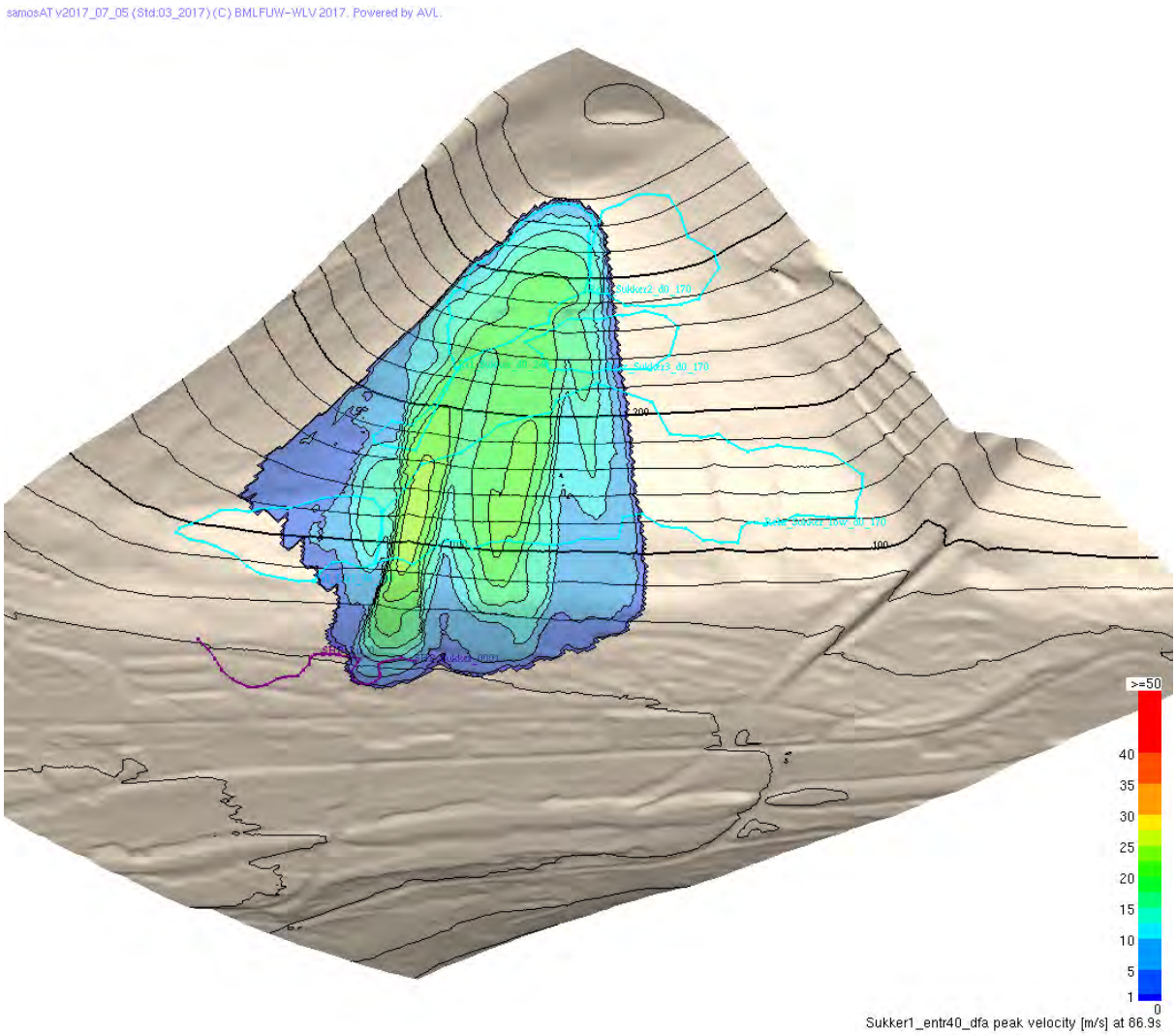


Figure 6.9: Peak velocity in m/s of the avalanche of February 2017 that was used for calibration

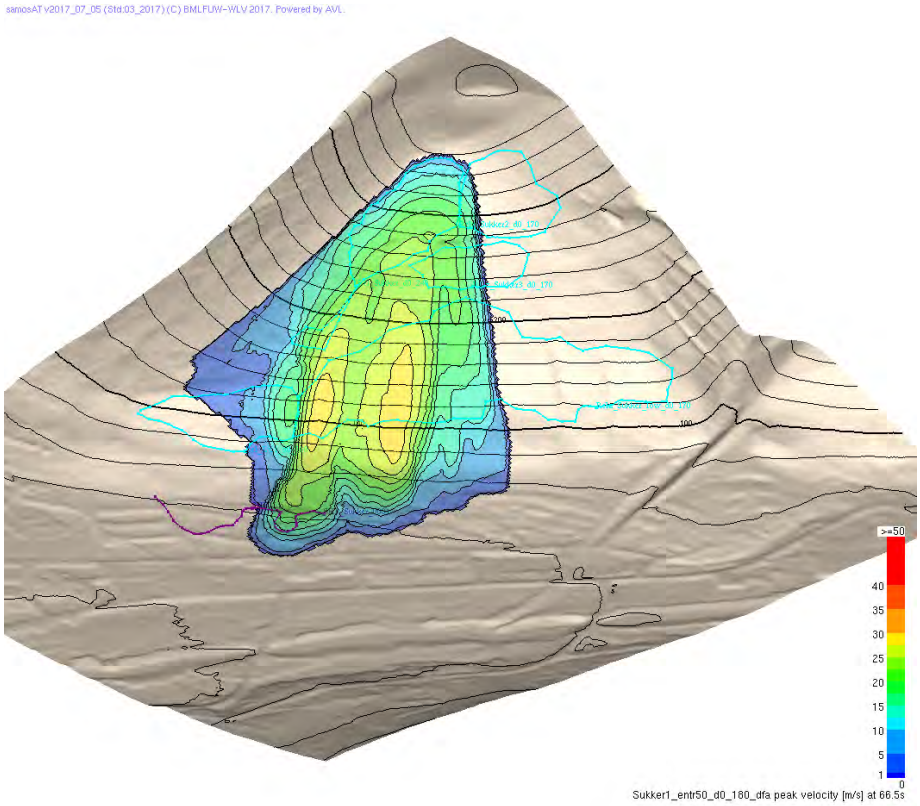


Figure 7.0: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen avalanche with 1,8 m snow depth in the release area and 0,5 m snow entrainment representing a return period 1/100.

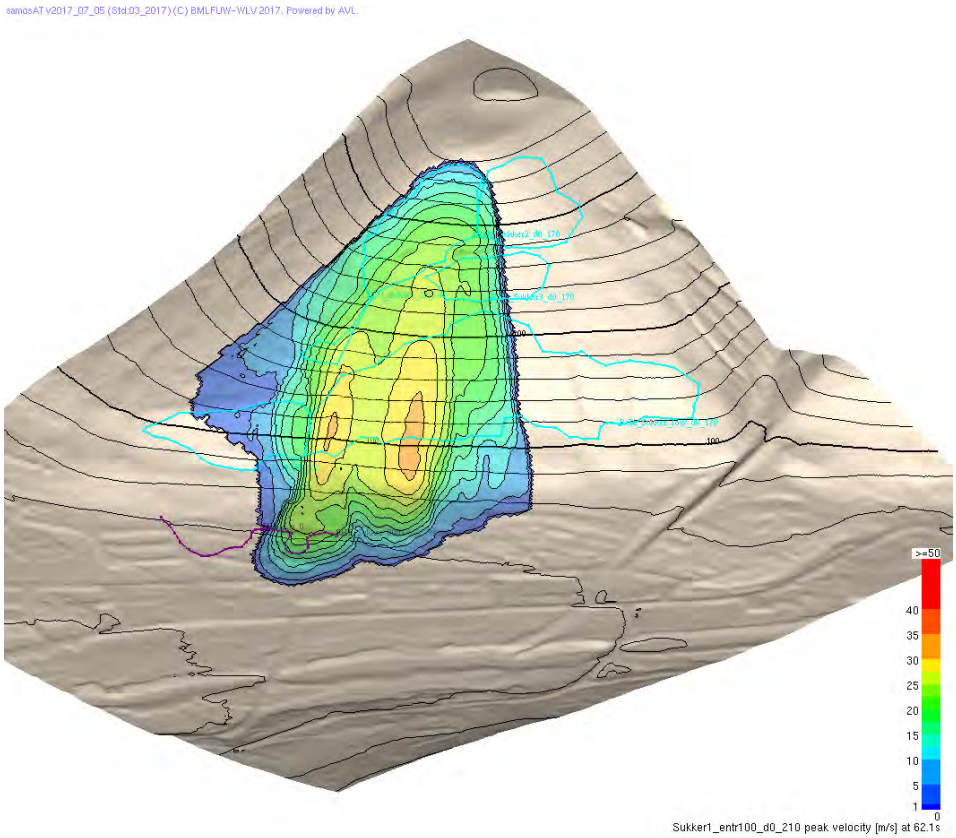


Figure 7.1: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen avalanche with 2,1 m snow depth in the release area and 1m snow entrainment representing a return period 1/1000.

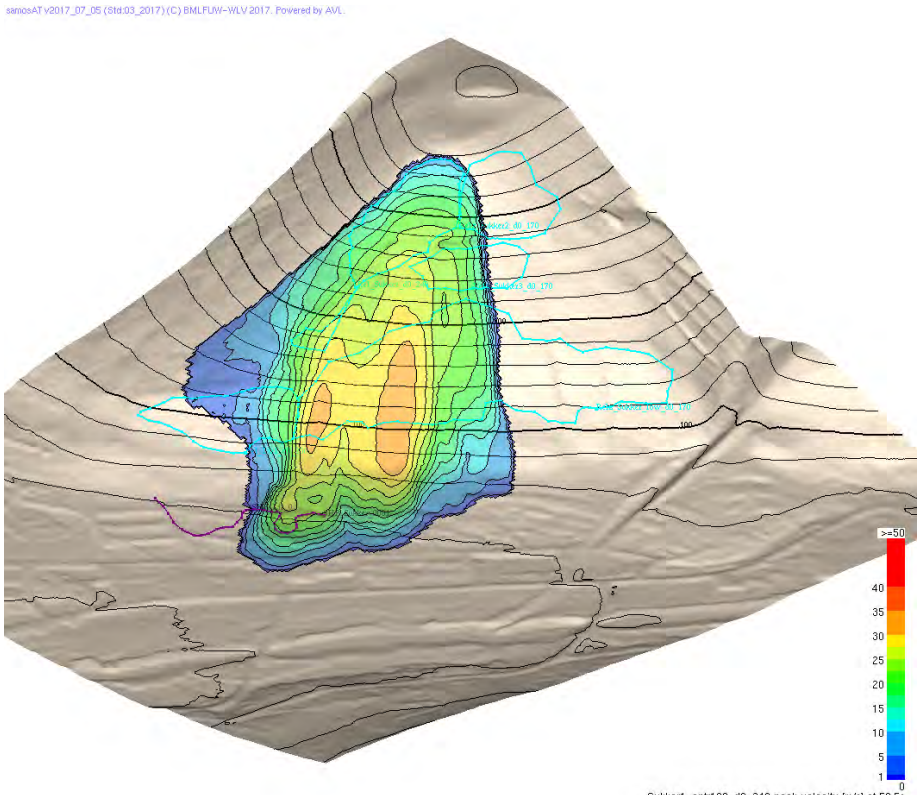


Figure 7.2: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen avalanche with 2,4 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment representing a return period 1/5000.

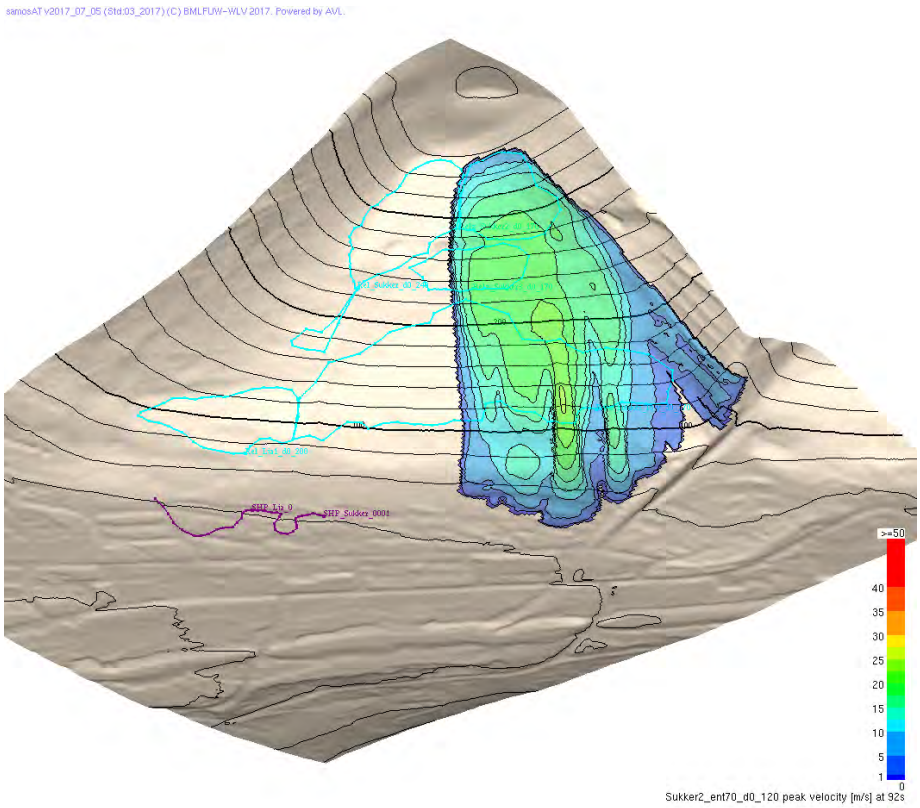


Figure 7.3: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 2 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/100.

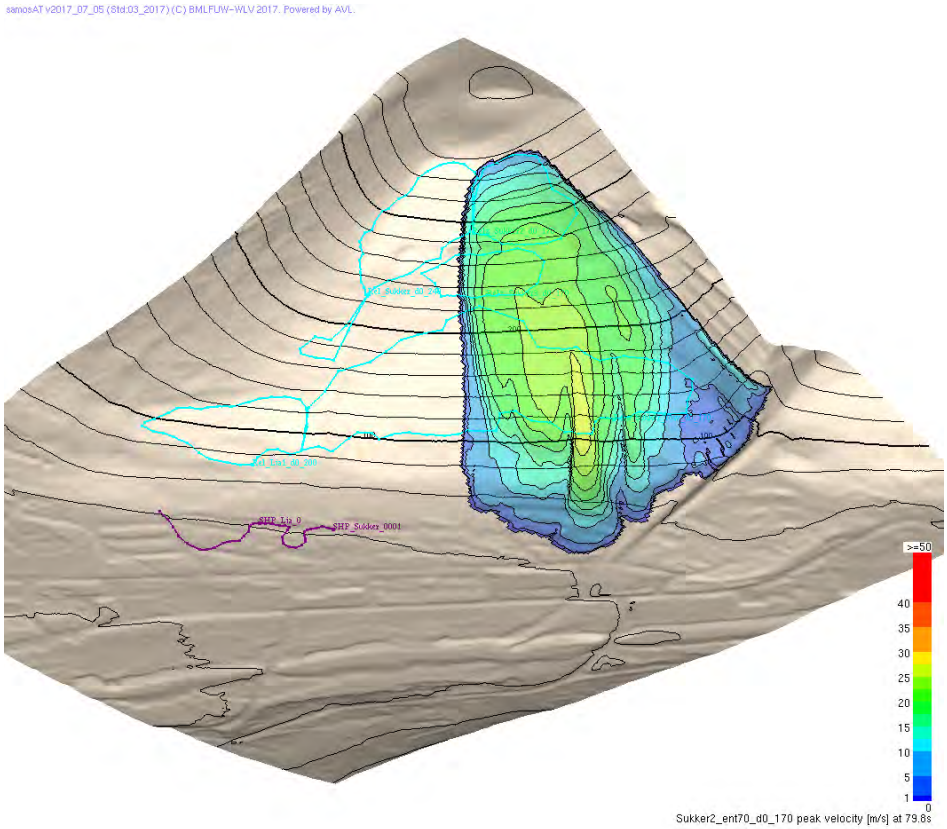


Figure 7.4: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 2 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/1000.

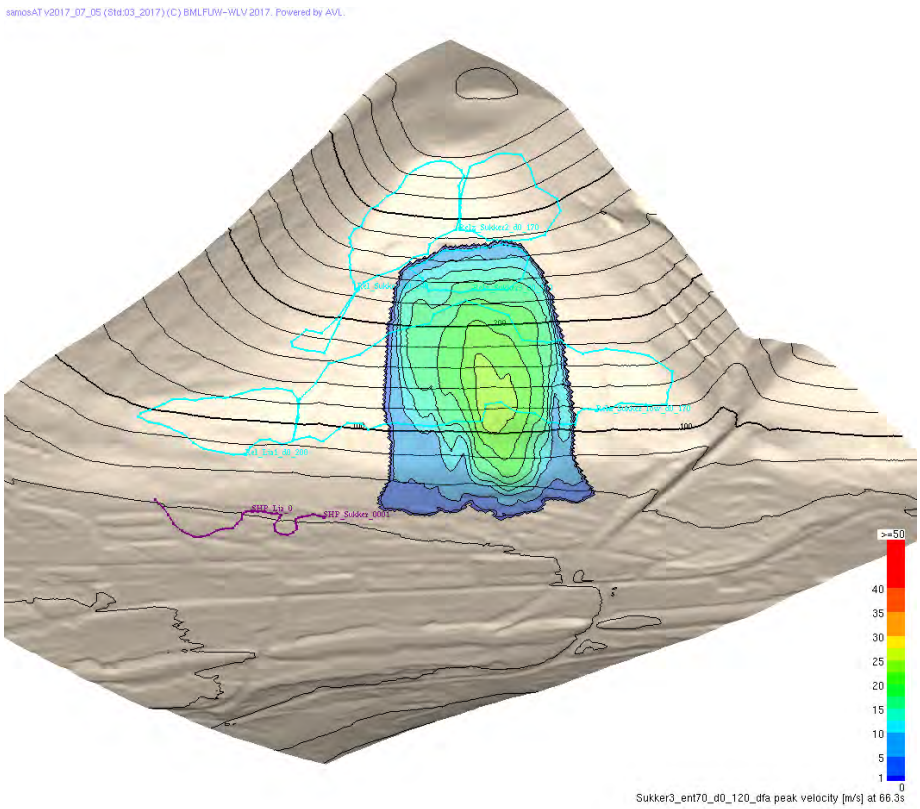


Figure 7.5: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/100.

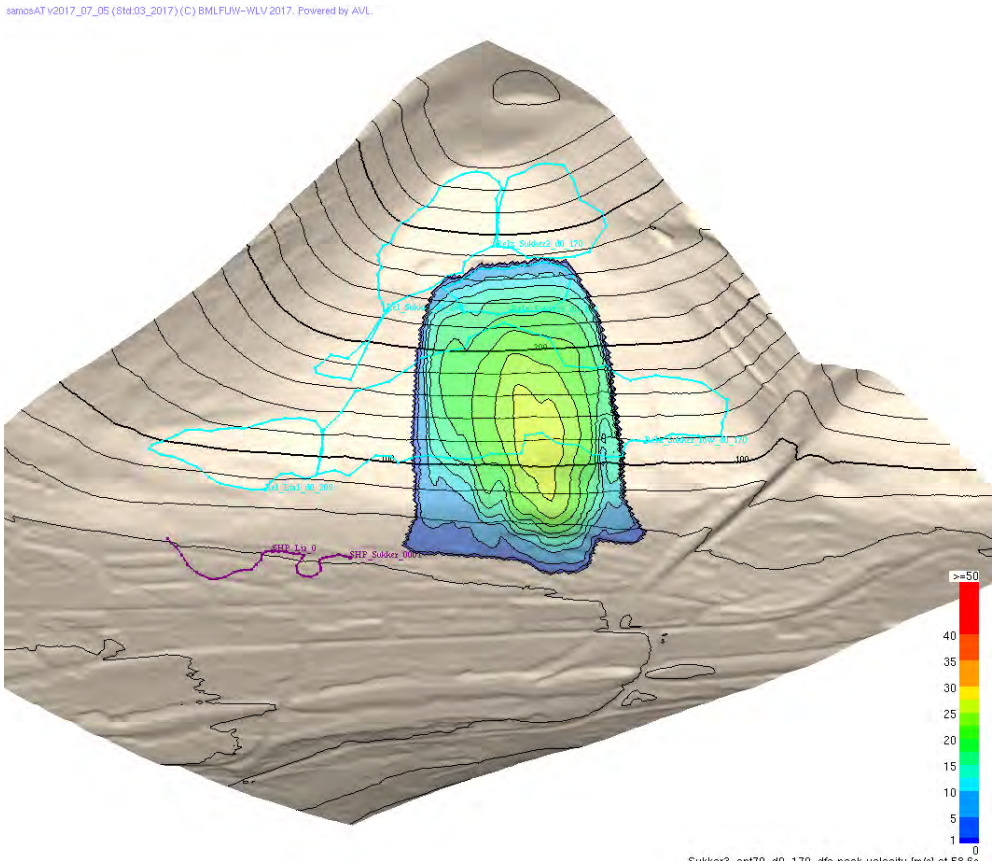


Figure 7.6: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/1000.

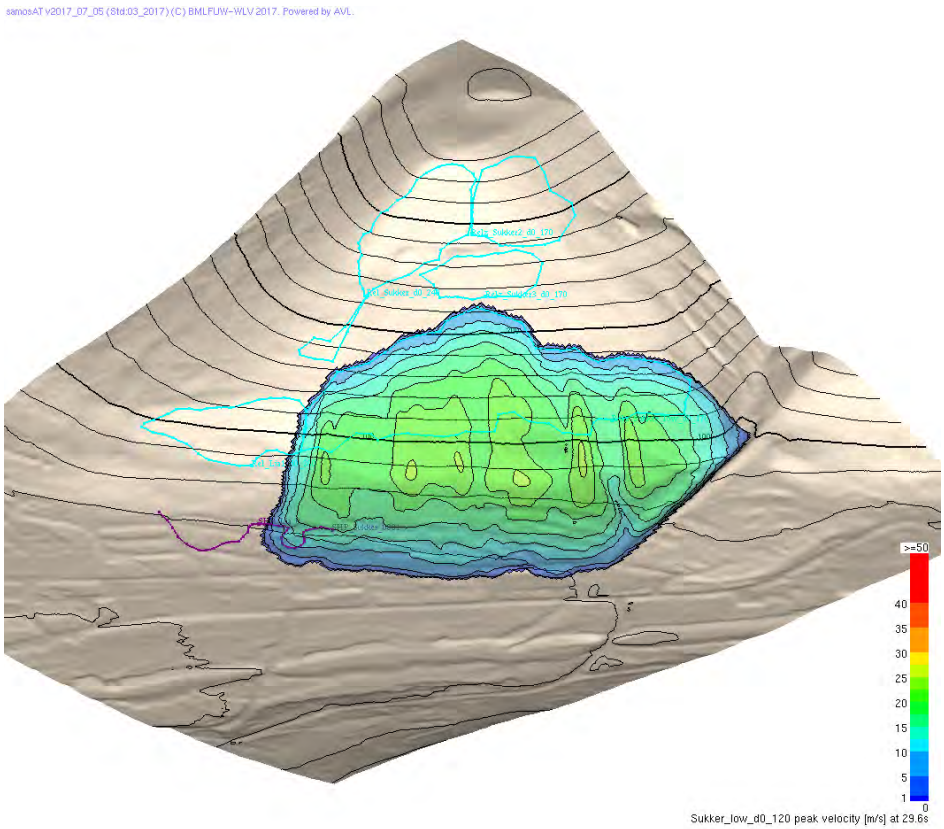


Figure 7.7: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen lower release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area representing a return period 1/100.

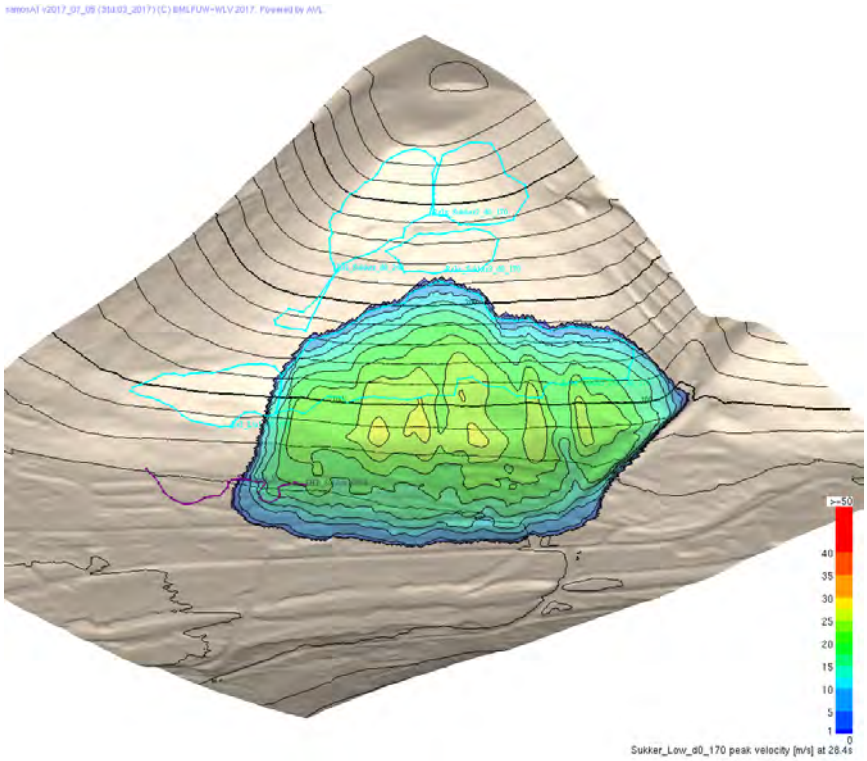


Figure 7.8: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen lower release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area representing a return period 1/1000.

If all release areas are triggered all together at once it represents scenarios with a return period of 1/5000.

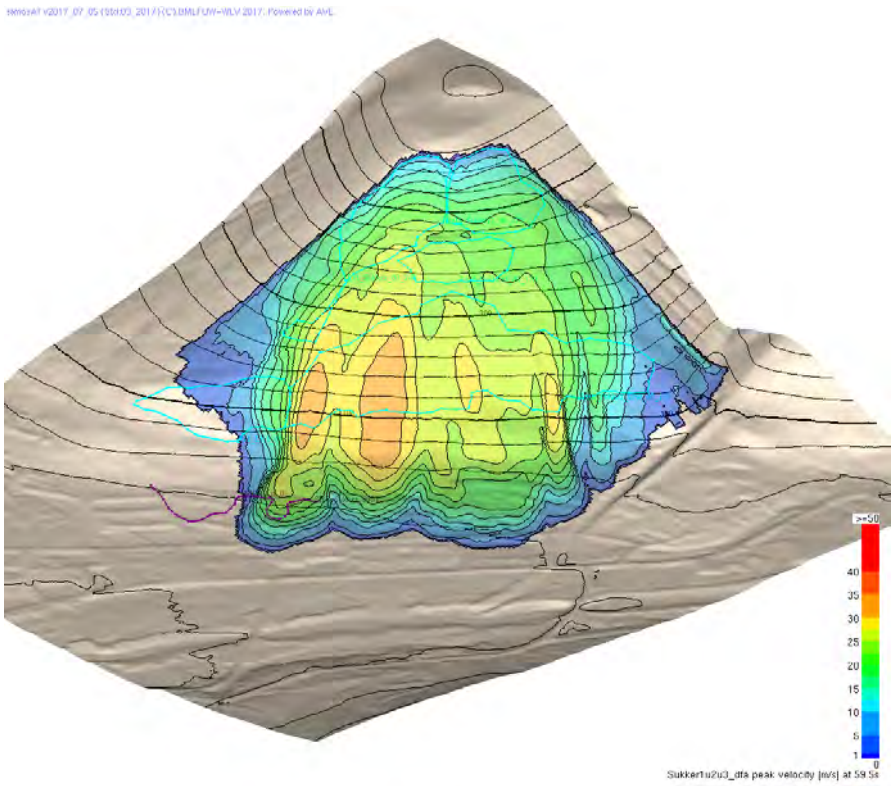


Figure 7.9: Peak velocity in m/s of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area.

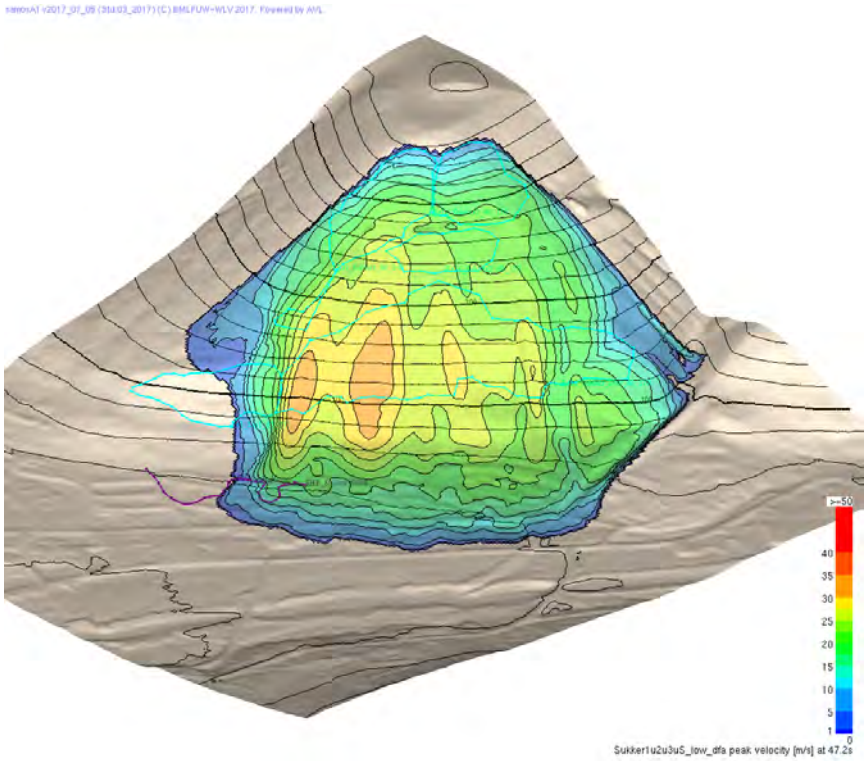


Figure 7.9: Peak velocity in m/s of Sukkertoppen release area 1,2,3 and low released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2,3 and low) snow depth in the release area representing return period 1/5000.

CONCLUSION

SAMOS has proved to be a valuable tool for simulating the avalanches from Sukkertoppen. As we can see in figure 8.1. the destructive part (dense part) of the avalanche as well as the remaining powder part (only potential destructive) could be simulated with confidence. The possibility of simulating the powder part of an avalanche is the big advantage of SAMOS in comparison to all other state of the art avalanche simulation software such as RAMMS or ELBA. This allows that SAMOS results of e.g. the flow depth can be used for the dimensioning of a stopping dam.

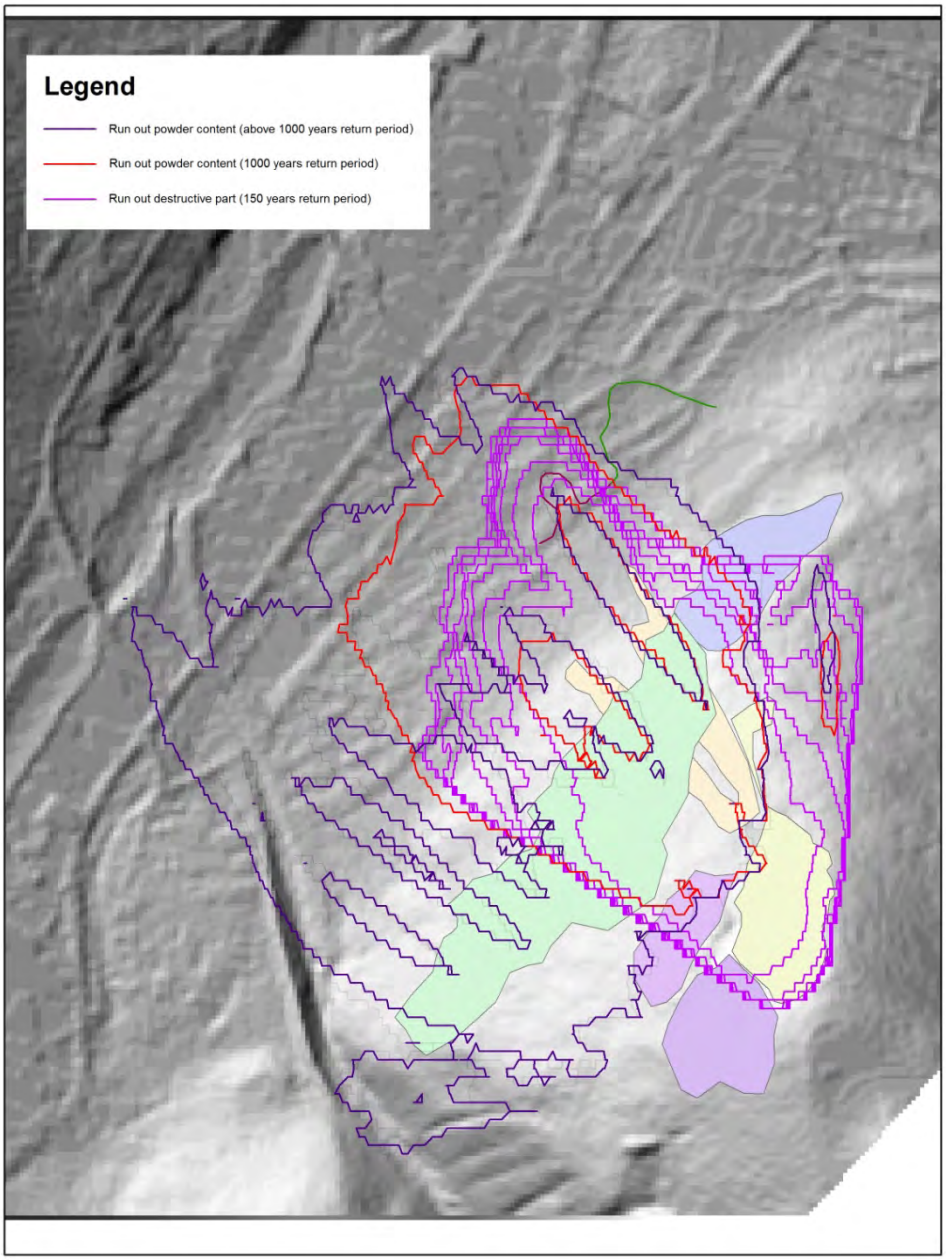


Figure 8.1: Pressure border difference between powder and dense part of the Sukkertoppen avalanche.

All simulation results can be used to draw a final avalanche hazard map regarding the Sukkertoppen avalanche including different zoning for return periods (100, 1000, 5000).

References

Buhler, Y., M. S. Adams, R. Bosch, and A. Stoffel (2016), Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): Potential and limitations, The Cryosphere, 10(3), 1075-1088, doi: 10.5194/tc-10-1075-2016.

Deems, J. S., T. H. Painter, and D. C. Finnegan (2013), Lidar measurement of snow depth: a review, J Glaciol, 59(215), 467-479, doi: 10.3189/2013JoG12J154.

Deems, J. S., P. J. Gadomski, D. Vellone, R. Evanczyk, A. L. LeWinter, K. W. Birkeland, and D. C. Finnegan (2015), Mapping starting zone snow depth with a ground-based lidar to assist avalanche control and forecasting, Cold Regions Science and Technology, 120, 197-204, doi: 10.1016/j.coldregions.2015.09.002.

Panholzer, H., and A. Prokop (2013), Wedge-Filtering of Geomorphologic Terrestrial Laser Scan Data, Sensors, 13(2), 2579, doi: 10.3390/s130202579.

Prokop, A., and H. Panholzer (2009), Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides, Natural Hazards and Earth Systems Science, 9(6), 1921-1928, doi: 10.5194/nhess-9-1921-2009.

Prokop, A (2009): Terrestrial laser scanning for snow depth observations: An update on technical developments and applications. In: Schweizer, J; Herwijnen, A. van (Eds.), ISSW 09 - International Snow Science Workshop: Proceedings, S. 192-196.

Prokop, A., and E. S. Procter (2016), A new methodology for planning snow drift fences in alpine terrain, Cold Regions Science and Technology, 132, 33-43, doi: 10.1016/j.coldregions.2016.09.010.

Prokop, A., Schon, P., Singer, F., Pulfer, G., Naaim, M., Thibert, E., Soruco, A., 2015. Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters. Cold Reg. Sci. Technol. 110, 223–230.

Prokop, A., M. Schirmer, M. Rub, M. Lehning, and M. Stocker (2008), A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes, Annals of glaciology, 49(1), 210-216, doi: 10.3189/172756408787814726.

Prokop, A (2008): Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. COLD REG SCI TECHNOL. 2008; 54(3): 155-163.

Sampl, P., Zwinger, T., 2004. Avalanche simulation with SAMOS. Annals of Glaciology, Volume 38, pp. 393-398.

Sampl Peter and Matthias Granig 2009. Avalanche simulation with SAMOS-AT. International Snow Science Workshop, Davos 2009, Proceedings, pp 519-523.

Schneiderbauer, S; Prokop, A (2011): The atmospheric snow-transport model: SnowDrift3D. J GLACIOL. 2011; 57(203): 526-542.

Schoen, P., Prokop, A., Vionnet, V., Guyomarc'h, G., Naaim-Bouvet, F., Heiser, M. (2015) Improving a terrain-based parameter for the assessment of snow depths with TLS data in the Col du Lac Blanc area. Cold Regions Science and Technology, Volume 114, Pages 15-26

Vionnet, V; Martin, E; Masson, V; Guyomarch, G; Naaim-Bouvet, F; Prokop, A; Durand, Y; Lac, C (2014): Simulation of wind-induced snow transport and sublimation in alpine terrain using a fully coupled snowpack/atmosphere model. CRYOSPHERE. 2014; 8(2): 395-415.

Wesselink, D. S., E. Malnes, M. Eckerstorfer, and R. C. Lindenbergh (2017), Automatic detection of snow avalanche debris in central Svalbard using C-band SAR data, Polar Research, 36(1), 1333236, doi: 10.1080/17518369.2017.1333236.

List of Figures

Figure 1.1: Location of Sukkertoppen southeast of Longyearbyen. 3

Figure 1.2: Overview of slope angle map (left) and map with starting zone, track and run-out area of the avalanche 2017 (right). 4

Figure 1.3: Pictures of the 2017 avalanche from Sukkertoppen taken from a northerly perspective (left) and westerly perspective (right). The pictures are taken by Holt Handcock. 4

Figure 2.1: Riegls VZ-6000 laser scanner in action scanning the Sukkertoppen avalanche area 6

Figure 2.2: Resultant high resolution point cloud data of the area in RiScan Pro including reflectance values (shades of gray) 6

Figure 2.3: Hillshaded DSM made 16.09.2016 of the surface of Sukkertoppen without snow from terrestrial laser scan data. Resolution: 25 cm 7

Figure 2.4: Hillshaded DSM made 14.02.2017 of the surface of Sukkertoppen with snow from terrestrial laser scan data. Resolution: 25 cm. 7

Figure 2.5: Hillshaded DSM made 22.02.2017 of the surface of Sukkertoppen with snow from terrestrial laser scan data. Resolution: 25 cm. 8

Figure 2.6: Resultant slope angle map of the surface of Sukkertoppen from 16.09.2016. Resolution 25 cm. 8

Figure 2.7: Resultant slope angle map of the surface of Sukkertoppen from 14.02.2017. Resolution 25 cm 9

Figure 2.8: snow depth differential map between 14.02.2017 and 22.02.2017and resultant release area, release snow depth, snow entrainment area, snow entrainment snow depth and run out (meters). 10

Figure 2.9: snow depth differential map between 14.02.2017 and 22.02.2017and resultant release areas also dependent on slope angle. 10

Figure 3.1: Gumbel-distribution for the weather data at Longyearbyen airport. X=snow depth in cm; Y=return period in years. 11

Figure 3.2: Gumbel-distribution results with additional snow drift scenarios and resultant changes in snow depth in the release area dependent on return period. 12

Figure 4.0: Vertical layer-structure of a dry snow avalanche as assumed in SAMOS-AT 13

Figure 4.1: Peak pressure (KPa) of the design avalanche having the best-fit parameters. 14

Figure 4.2: Peak flow depth in meters of the design avalanche with best-fit parameters 14

Figure 4.3: Peak flow depth in meters of the Lia design avalanche with best-fit parameters. having the best-fit parameters *15*

Figure 4.4: Peak pressure (KPa) of the Lia design avalanche *15*

Figure 4.5: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen avalanche with 1,8 m snow depth in the release area and 0,5 m snow entrainment. *16*

Figure 4.6: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen avalanche with 1,8 m snow depth in the release area and 0,5 m snow entrainment. *17*

Figure 4.7: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen avalanche with 2,1 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment. *17*

Figure 4.8: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen avalanche with 2,1 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment. *18*

Figure 4.9: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen avalanche with 2,4 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment. *18*

Figure 5.0: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen avalanche with 2,4 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment. *19*

Figure 5.1: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 2 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *20*

Figure 5.2: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 2 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *20*

Figure 5.3: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 2 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *21*

Figure 5.4: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 2 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *21*

Figure 5.5: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *22*

Figure 5.6: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *22*

Figure 5.7: Peak flow depth in meters of the Sukkertoppen release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *23*

Figure 5.8: Peak pressure in KPa of the Sukkertoppen release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment. *23*

Figure 5.9: Peak flow depth in meters of the lower Sukkertoppen release area with 1,2 m snow depth in the release area. *24*

Figure 6.0: Peak pressure in KPa of the lower Sukkertoppen release area with 1,2 m snow depth in the release area. *24*

Figure 6.1: Peak flow depth in meters of the lower Sukkertoppen release area with 1,7 m snow depth in the release area. *25*

Figure 6.2: Peak pressure in KPa of the lower Sukkertoppen release area with 1,7 m snow depth in the release area. *25*

Figure 6.3: Peak flow depth in meters of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area. *26*

Figure 6.4: Peak pressure in KPa of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area. *26*

Figure 6.5: Peak flow depth in meters of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area including also a snow entrainment of 0,7 m. *27*

Figure 6.6: Peak pressure in KPa of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area including also a snow entrainment of 0,7 m. *27*

Figure 6.7: Peak flow depth in meters of Sukkertoppen release area 1,2,3 and low released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2,3 and low) snow depth in the release area. *28*

Figure 6.8: Peak pressure in KPa of Sukkertoppen release area 1,2,3 and low released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2,3 and low) snow depth in the release area *28*

Figure 6.9: Peak velocity in m/s of the avalanche of February 2017 that was used for calibration *29*

Figure 7.0: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen avalanche with 1,8 m snow depth in the release area and 0,5 m snow entrainment representing a return period 1/100. *30*

Figure 7.1: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen avalanche with 2,1 m snow depth in the release area and 1m snow entrainment representing a return period 1/1000. *30*

Figure 7.2: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen avalanche with 2,4 m snow depth in the release area and 1 m snow entrainment representing a return period 1/5000. *31*

Figure 7.3: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 2 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/100 *31*

Figure 7.4: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 2 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/1000. *32*

Figure 7.5: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/100 *32*

Figure 7.6: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area and 0,7 m snow entrainment representing a return period 1/1000. *33*

Figure 7.7: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen lower release area 3 with 1,2 m snow depth in the release area representing a return period 1/100. *33*

Figure 7.8: Peak velocity in m/s of the Sukkertoppen lower release area 3 with 1,7 m snow depth in the release area representing a return period 1/1000. *34*

Figure 7.9: Peak velocity in m/s of Sukkertoppen release area 1,2 and 3 released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2 and 3) snow depth in the release area. *34*

Figure 7.9: Peak velocity in m/s of Sukkertoppen release area 1,2,3 and low released together with 2,4 m (1) and 1,7 m (2,3 and low) snow depth in the release area representing return period 1/5000. *35*

Figure 8.1: Pressure border difference between powder and dense part of the Sukkertoppen avalanche. *36*

NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

MIDDELTHUNSGATE 29
POSTBOKS 5091 MAJORSTUEN
0301 OSLO
TELEFON: (+47) 22 95 95 95

www.nve.no