

# Validering og testing av nye aktsomhetskart for snøskred i Norge (NAKSIN)

*Marte Flaate Busengdal*



Masteroppgave i geofag  
Studieretning: Geofarar  
60 studiepoeng

Institutt for geofag  
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

Juni/2019

© **Marte Flaate Busengdal, 2019**

Veiledere: Dieter Issler (NGI), Anders Solheim (NGI/UiO)

Tittel: Validering og testing av nye aktsomhetskart for snøskred i Norge (NAKSIN)

<https://www.duo.uio.no/>

Trykk: Reprosentralen, Universitetet i Oslo

# Sammendrag

Dagens aktsomhetskart for snøskred båndlegger store arealer i Norge og ekspertene anser aktsomhetssonene å være for store i mange tilfeller, spesielt ved kystnære områder. I områder med innlandsklima er problematikken i noen tilfeller omvendt, - aktsomhetskartene dekker ikke store nok arealer, noe som gjør at infrastruktur og bebyggelse kan bli etablert i utsatte områder. Et behov for å forbedre aktsomhetskartene for snøskred er derfor bakgrunnen for prosjektet NAKSIN (Nye AktsomhetsKart for Snøskred I Norge). Hensikten med denne oppgaven er å validere og forbedre NAKSIN. I tillegg tar oppgaven for seg å utføre en validering av MoT-Voellmy, simuleringsverktøyet som benyttes i NAKSIN.

En sentral del av valideringen av MoT-Voellmy er undersøkelser av hvordan ulike grid-oppløsninger i forenklet topografi (skråplan) påvirker resultatet. Vurderingene av undersøkelsene resulterte i en anbefalt oppløsning på mellom 5 og 10 m.

En forstudie utført på et skråplan med parabolisk avbøyning ('hockeystick'-form) har bidratt til utvikling av en metode for hvordan en rekalkibrering av friksjonskoeffisientene for medrivning bør utføres. Anbefalte verdier fra parameterstudiet for en type forhold er også utarbeidet.

Valideringen av MoT-Voellmy innebar også en test av modellens robusthet når den anvendes i komplekst terreng. To veldokumenterte skredhendelser ble simulert med to modeller som begge benytter Voellmys friksjonslov; RAMMS::AVALANCHE og MoT-Voellmy. Skredhendelsene ble først tilbakeberegnet i den mye testede og kalibrerte modellen RAMMS::AVALANCHE. MoT-Voellmy, som er en relativt nyutviklet modell av NGI, ble deretter simulert på eksakt samme betingelser. Funnene fra sammenligningene viste at også MoT-Voellmy håndterer skred i komplekst terreng, men ga flere numeriske ustabiliteter. Det fremkom også at RAMMS::AVALANCHE estimerer en høyere hastighet og flythøyde sammenlignet med MoT-Voellmy.

Valideringen av NAKSIN ble utført ved å gjennomføre ulike steg. Funnene fra simuleringene, ved bruk av de forhåndsinnstilte verdiene, ga et resultat som ikke sammenfalt med detaljinformasjon fra faresonekartlegging. En systematisk kalibrering og validering av modellen var derfor nødvendig å gjennomføre. Valideringen med de nye fastsatte parameterne funnet ved kalibreringen av NAKSIN, ga et aktsomhetskart som i mange tilfeller er atskillig

bedre enn nåværende. Dette vises ved at kartene fra NAKSIN stemmer bedre overens med utført faresonekarlegging for de gitte testområdene, samt for registrerte skredhendelser. Problemene som fortsatt finnes i NAKSIN kan sannsynligvis knyttes til estimering av bruddhøyder og returperioder. De utførte undersøkelsene tyder på at de mest sannsynlige årsakene for disse avvikene er: (i) den valgte parameteriseringen av snøens tetthet og skjærstyrke som funksjon av gjennomsnittlig vintertemperatur og (ii) lineær høydeinterpolering av formparameteren av fordelingsfunksjonene for nedbørsdata. Dette er faktorer med forbedringspotensial i fremtidig utvikling av NAKSIN.

# Forord

For det første, vil jeg rette en stor takk til mine veiledere, Anders Solheim og Dieter Issler. Anders har vært til utrolig stor hjelp og alltid vært tilgjengelig om problemer skulle oppstå. I tillegg har hans tilbakemeldinger på oppgavens struktur og språk kommet godt med. En stor takk til Dieter for alle timene sammen, hans tålmodighet og behjelpelighet har kommet godt med.

Oppgaven er tilknyttet et internt FoU-prosjekt ved NGI og jeg vil rette en takk til alle på NGI, - avdeling Naturfare for å ha tatt meg godt imot. Jeg vil også rette en takk til de som tok meg med til Stryn Forskningsstasjon. Det var utrolig inspirerende. En spesiell takk til Kjetil Sverdrup-Thygeson for behjelpeligheten når problemer har oppstått i GIS og Ulrik Domaas for innspill til oppgaven.

Jeg vil også rette en stor takk til familien min for den uvurderlige støtten de har vist gjennom studieforløpet. En ekstra takk til min storesøster, Karoline for korrekturlesing. Og selvsagt samboeren min Eero Bekkedal; for korrekturlesing og ikke minst den gode støtten han har vist. Jeg hadde ikke klart meg foruten.

Tilslutt fortjener mine medstudenter en takk, og spesielt takk til min venninne og medstudent Anne Fagerhaug. Det å dele lange lunsjer, lange dager, faglige diskusjoner og frustrasjon har vært avgjørende for å komme i mål.

Marte Flaate Busengdal

---

Oslo, 31.05.2019



# Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon .....	1
1.1	Bakgrunn for prosjektet NAKSIN .....	1
1.2	Bakgrunn for prosjektet MoT-Voellmy.....	3
1.3	Formål og problemstilling .....	3
2	Teoretisk grunnlag.....	6
2.1	Snødekkets egenskaper.....	6
2.2	Snøskred .....	8
2.2.1	Betingende faktorer for utløsning av snøskred .....	10
2.2.2	Skreddynamikk.....	14
2.3	Beregningsmodeller.....	16
2.3.1	Beskrivelse av modellene.....	17
2.4	NAKSIN .....	22
2.4.1	Oppbygging av NAKSIN .....	23
2.4.2	Forenklinger .....	33
2.4.3	Begrensinger.....	33
3	Metoder .....	34
3.1	Validering av MoT-Voellmy .....	34
3.1.1	Modellering langs et skråplan .....	35
3.1.2	Modellering i skredbane med ‘Hockeystick’-form .....	36
3.1.3	Sammenligning av RAMMS og MoT-Voellmy.....	38
3.2	Validering av NAKSIN .....	39
3.2.1	Verifikasjon av modellen .....	41
3.2.2	Fastsetting av grunnleggende verdier.....	41
3.2.3	Kalibrering av NAKSIN.....	42
3.2.4	Test av anvendt interpoleringsmetode.....	43
4	Områdebeskrivelse .....	46
5	Resultater.....	63
5.1	Validering av MoT-Voellmy .....	63
5.1.1	Modellering langs et skråplan .....	63
5.1.2	Modellering i skredbane med ‘Hockeystick’-form .....	66
5.1.3	Sammenligning av RAMMS og MoT-Voellmy.....	68

5.2	Validering av NAKSIN .....	72
5.2.1	Verifikasjon av modellen .....	72
5.2.2	Kalibreringsresultat .....	76
5.2.3	Sensitivitetsanalyse .....	78
5.2.4	NAKSIN med nye fastsatte parametere .....	79
5.2.5	NAKSIN uten interpolering av nedbørsdata .....	89
5.2.6	Testing av parametersett for Lom .....	92
5.2.7	Oppsummering av resultater, NAKSIN .....	92
6	Diskusjon.....	94
6.1	Validering av MoT-Voellmy .....	94
6.1.1	Numerisk stabilitet og valg av oppløsning .....	94
6.1.2	Valg av friksjonskoeffisienter for medrivning .....	95
6.1.3	Tilbakeberegning av to veldokumenterte skredhendelser .....	97
6.2	Validering av NAKSIN .....	99
6.2.1	Fastsetting av parametere i NAKSIN.....	100
6.2.2	Sensitivitetstesting.....	101
6.2.3	NAKSIN med nye fastsatte parametere .....	102
6.2.4	Interpolerte nedbørsdata .....	108
6.3	Usikkerheter og feilkilder .....	109
7	Oppsummering og konklusjoner .....	111
7.1	Konklusjoner .....	114
8	Forslag til videre arbeid.....	115
	Litteraturliste .....	117
	Vedlegg A – MoT-Voellmy .....	122
	Vedlegg B – Dokumentasjon av NAKSIN .....	125
	Vedlegg C – Kart utarbeidet i NAKSIN .....	129
	Vedlegg D – Manual for NAKSIN .....	132



# 1 Introduksjon

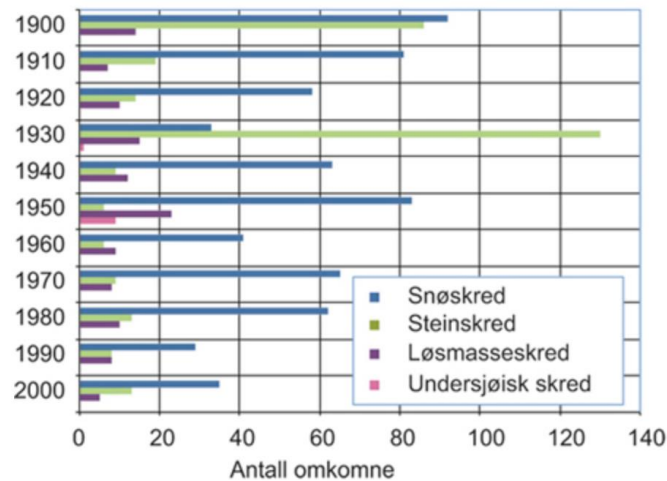
## 1.1 Bakgrunn for prosjektet NAKSIN

Store deler av Norge består av bratt terreng og mye av landet er eksponert for naturfarer. Historisk sett er det snøskred, løsmasseskred og flom som gjør størst skade og tar flest menneskeliv i Norge (Jaedicke et al., 2008). Siden begynnelsen av 1900-tallet har ca. 1100 menneskeliv gått tapt, hvorav ca. 600 er relatert til snøskred (Figur 1). Mye infrastruktur og bebyggelse er eksponert for snøskredfare, og snøskred har ført til høye samfunnsøkonomiske kostnader (Engeset, 2013; Olje - og energidepartementet, 2012). I tidsperioden 1980-2010 ble det ifølge Naturskadefondet og Norsk Naturskadepool registrert skader for rundt 1,4 mrd. kroner, som knyttes til ulike typer skred (Olje - og energidepartementet, 2012).

Det norske lovverket legger opp til at alle boliger skal være plassert i sikkerhet for naturpåkjenninger. Pålegget er gitt i medhold av Plan – og bygningsloven (PBL) §28-1 andre ledd (Plan- og bygningsloven, 2008). Bestemmelsen sier at «Grunn kan bare bebygges, eller eiendom opprettes eller endres, dersom det er tilstrekkelig sikkerhet mot fare eller vesentlig ulempe som følge av natur- eller miljøforhold» (Plan- og bygningsloven, 2008, §28-1). Med dette i grunn legges kravet om en kartoversikt som viser områder hvor snøskred potensielt kan inntreffe, i form av såkalte aktsomhetskart.

NAKSIN står for **N**ye **A**ktsomhets**K**art for **S**nøskred **I** Norge. Aktsomhetskart viser områder hvor skred *potensielt* kan forekomme. Kartene skal gi en førstehåndsvurdering av skredforekomsten i et område og hvor det bør utvises aktsomhet i forhold til skredfare, og er et godt hjelpemiddel i forbindelse med arealplanlegging og byggesaksbehandling for kommunene. Kartene bør vise både potensielle utløsning- og utløpsområder. Vurderingen av områder med potensiell fare for skred bør gjøres kvantitativt, ved bruk av matematiske modeller (Jensen et al., 2015; Taurisano & Øydvin, 2011). Ved en kvantitativ vurdering vil metoden for utarbeidelsen av aktsomhetskart være mer effektiv, og sluttresultatet av beregningene gir potensielle utløsningsområder med tilhørende utløpsområder.

De beregnede utløpsområdene angir aktsomhetssonen i et gitt område. Dersom planlagt bebyggelse ligger innenfor aktsomhetssonen, stilles det krav om en videre faresonekartlegging for dokumentering av sikkerhetskravet for aktuelle bygninger gitt i §7-3 andre ledd (TEK17, 2017).



Figur 1: Antall registrerte omkomne i Norge mellom 1900-2000 relatert til forskjellige skredtyper (Olje – og energidepartementet, 2012).

Historisk sett er det utarbeidet to generasjoner av aktsomhetskart, hvorpå et tredjegenersjons aktsomhetskart er under utarbeidelse (metodikken overlevert til Norges Vassdrags- og energidirektorat (NVE) 01.10.2018). Validering og eventuell forbedring av tredjegenersjons aktsomhetskart er en viktig del av denne masteroppgaven.

Førstegenersjons aktsomhetskart ble utarbeidet av NGI mellom 1975 og 2009 for utvalgte områder. Metodikken for første generasjon var basert på omfattende kartstudier, vurdering av historisk informasjon, befaring (hovedsakelig fra bil) og utløpsberegninger utført med  $\alpha$ - $\beta$ -modellen (Lied & Bakkehøi, 1980).

Andregenerasjons aktsomhetskart ble utarbeidet av Norges geologiske undersøkelse (NGU) i 2010, på oppdrag fra NVE, som da hadde fått nasjonalt forvaltningsansvar for skredproblematikk i Norge, og er de nåværende aktsomhetskartene ([atlas.nve.no](http://atlas.nve.no)). De nåværende aktsomhetskartene ble produsert på bakgrunn av at utarbeidelsen av førstegenersjons aktsomhetskart var en svært tidkrevende prosess og en mer effektivisert utarbeidelsesprosess var ønsket. En automatisk kjøring for hele landet ble utført, - uten ekspertintervensjon. Kartene ble kjørt med en digital terrengmodell (DTM) med 25 meters oppløsning. Metodikken baserer seg på gitte helninger på fjellsiden som definerer utløpsområder. For hvert utløpsområde beregnes utløpsområder med hjelp av en modifisert  $\alpha$ - $\beta$ -modell (Derron & Sletten, 2016). Resultatet er relativt konservative kart, med signifikante svakheter. Det er blant annet ikke tatt tilstrekkelig hensyn til småskala topografi eller lokale klimaforskjeller, og skog er ikke inkludert, noe som fører til båndlegging av store arealer i Norge, spesielt ved kystnære områder. I områder med innlandsklima er

problematikken i noen tilfeller omvendt, - aktsomhetskartene dekker ikke store nok arealer, noe som gjør at infrastruktur og bebyggelse kan bli liggende utsatt. Det er stort potensiale for forbedring, og det er derfor funnet nødvendig å lage nye aktsomhetskart for snøskred i Norge.

Et tredjegerasjons aktsomhetskart benytter en forbedret metodikk, hvor man tar hensyn til et mer komplekst terreng, skog og lokalklima. Ved utarbeidelsen av disse aktsomhetskartene, er det hensiktsmessig at faren for snøskred gjenspeiler en nominell årlig sannsynlighet på 0.001 eller større (Issler, 2016).

Det er viktig at verktøyet som skal generere nye aktsomhetskart blir kalibrert mot erfaringsdata og at dette gjøres på en objektiv måte. Krav til objektiv kalibrering kreves for å hindre underestimering av aktsomhetssonen, men også unngå overestimering av potensiell risiko som kan gjøre kartene konservative. Det er også viktig at verktøyet er brukervennlig.

## 1.2 Bakgrunn for prosjektet MoT-Voellmy

Tredjegerasjons aktsomhetskart benytter en tilsvarende simuleringsmodell som RAMMS::AVALANCHE for beregning av utløpssoner, kalt MoT-Voellmy. Programmet MoT-Voellmy tilbyr blant annet en medrivningsmodell, men beregningene i NAKSIN inkluderer ikke dette. For bruk av medrivning trenger modellen å recalibreres.

Rekalibreringen skal føre til at brukeren av MoT-Voellmy vet hvor mye de originale friksjonskoeffisientene må kompenseres med ved inkludering av medrivning. Problemet ved en modifisering av friksjonskoeffisientene er at det ikke eksisterer mange kjente skredhendelser der den eroderte massen og snøegenskapene (høyde, tetthet og skjærstyrke) er kjent. Det er derfor hensiktsmessig å utføre en slik kalibrering i enkel topografi, hvor disse parameterne gjøres kjent.

## 1.3 Formål og problemstilling

Hovedmålet med oppgaven er å teste verktøyet NAKSIN (Nye AktsomhetsKart for Snøskred I Norge) grundig mot detaljkartlegging, samt bidra til forbedring der testing viser at dette er nødvendig. Oppgaven skal også bidra til validering av NAKSIN, og deler av valideringsarbeidet er utført ved kalibrering og sensitivitetsanalyse for å gi en mer plausibel modell som håndterer de ulike klimaområdene.

NAKSIN anvendes med en deterministisk simuleringsmodell; MoT-Voellmy, som er en kvasi-3D modell utviklet ved NGI (NGI, 2014). Modellen MoT-Voellmy har behov for å bli validert, noe som vil bli utført stegvis. Om mulig, skal studiet gi anbefalinger om hvordan man kan modifisere standard kalibrering av modellen med medrivning.

Det er ikke utført egne feltundersøkelser i forbindelse med denne oppgaven. Det er derfor lagt stor vekt på tidligere utførte faresonekartlegginger, hvor dimensjonerende faresoner, samt detaljkartlagte skred er brukt som evalueringsmateriale av det simulerte resultatet fra NAKSIN.

Oppgaven utgjør en valideringsdokumentasjon som kvalitetssikrer og dokumenterer at både simuleringsmodellen MoT-Voellmy og verktøyet NAKSIN er egnet til sitt formål.

Delmål i oppgaven er:

#### NAKSIN

- Kalibrering på bakgrunn av kjente skredhendelser, samt se hvordan tetthet og skjærstyrke påvirker simuleringsresultatet.
- Undersøke om hvor vidt det er overensstemmelse mellom simulerte utløpslengder og kartlagt faresone og/eller detaljkartlagte skred.
- Undersøke om de estimerte utløsningssannsynlighetene og bruddhøydene er realistiske.
- Kritisk vurdering om tredje generasjons aktsomhetskart er mer pålitelig enn nåværende aktsomhetskart.

#### MoT-Voellmy

- Avdekke eventuelle numeriske ustabiliteter i modellen.
- Gi en anbefaling av hvilke oppløsninger MoT-Voellmy bør simuleres med.
- Rekalibrering av friksjonskoeffisientene for medrivning.
- Sammenligne simuleringsresultat fra to lignende modeller (RAMMS::AVALANCHE og MoT-Voellmy).

Oppgaven tar for seg bakgrunn, teori, metode og resultat fra valideringen av MoT-Voellmy og NAKSIN. For modellen MoT-Voellmy ble versjonen '23.06.2016' brukt. For NAKSIN ble versjonen '01.10.2018' brukt. Det eksisterer i dag nyere versjoner av både MoT-Voellmy og NAKSIN.

Det er valgt å ikke beskrive i detalj de mange forbedringene som har blitt utført gjennom testingen av verktøyet NAKSIN. Den videre valideringen av verktøyet, er utført med utgangspunkt i at NAKSIN ikke inkluderer vind som kan føre til akkumulasjon av snø i utløsningsområdet.

I kapitlet som skal gi det teoretiske grunnlaget for snø og snøskred er klassifiseringen av skred begrenset til å omhandle flakskred. Flakskred er større og mer destruktive enn løssnøskred og ettersom aktsomhetskart og dynamiske simuleringsmodeller tar utgangspunkt i verst mulig utfall, vil de derfor baseres på flakskred. I denne oppgaven vil ordet skred være synonymt med ordet snøskred, om ikke annet er spesifisert. Med mindre annet er beskrevet i figurene og kartene, er det undertegnede selv som har utarbeidet kart og figurer.

## 2 Teoretisk grunnlag

I det påfølgende kapittel vil bakgrunnsinformasjon om emner som omhandles i denne oppgaven bli introdusert. Først presenteres generell teori vedrørende snø og definisjoner av sentrale begrep. Deretter vil ulike mekanismer knyttet til skredutløsning samt hvordan skred beveger seg bli beskrevet. Til slutt presenteres to Voellmy-modeller; RAMMS og MoT-Voellmy, og NAKSIN.

### 2.1 Snødekkets egenskaper

Fra det øyeblikket snøkrystaller dannes og faller mot bakken eller mot toppen av et tidligere avsatt snølag, er krystallene under konstant omvandling. Årsaken til omvandlingen er at krystallene ikke er i termodynamisk likevekt med omgivelsene, og gjennomgår derfor metaformose (Lied & Kristensen, 2003). Begrepet metamorfose kan innenfor snøteori deles inn i tre prosesser; destruktiv, - konstruktiv – og smeltemetamorfose. Hvilken grad og type metamorfose som oppstår er i hovedsak kontrollert av temperatur og temperaturgradient. Den bestemmer vanddamptrykkgradienten, og dermed i hvilken retning og hvor raskt vanddamptransporten foregår. Sublimasjon fra et sted på overflaten og pålagring et annet sted er den avgjørende fysiske prosessen. Vindkonveksjon og solinnstråling har betydning for energibalansen og energifordelingen i snødekket. Nedbør som kommer i form av regn fører til rounding av snøkornene og de pakkes derfor tettere, mens nysnø har en tendens til å redusere temperaturgradienten (McClung & Schaerer, 2006). Metamorfose og overflateprosesser styrer lagdelingen til snødekket, og har betydning for snødekkets stabilitet og dermed den videre utviklingen av skredsituasjonen (Lied & Kristensen, 2003).

#### Kohesjon og friksjon

Det er viktig å ha detaljkunnskap om snøens fysiske egenskaper for å forstå dannelsen av svake lag. Hvor mye et snølag tåler, defineres av skjærstyrken. Skjærstyrken kan settes sammen av to komponenter, kohesjon og friksjon. Kohesjon og friksjon styres av variablene tetthet, krystallform, temperatur, vanninnhold og overliggende vekt. Kohesjon er ofte relatert til hvor godt snøen er bundet, og friksjon kan i all hovedsak relateres til vekten av den overliggende snøen, som tvinger kornene sammen og bremser bevegelsen mellom snøkornene i et lag relativt til kornene i et annet lag. Det er forskjellen i fastheten mellom de ulike lagene som bestemmer hvilken type snøskred som vil oppstå når brudd forekommer. Løssnøskred

oppstår grunnet mangel på kohesjon, og vil starte som et punkt i løssnø slik som navnet tilsier. Den andre hovedtypen av snøskred er snø med høy kohesjon. De danner lag med sterke intergranulære bindinger, som ved utløste skred vil danne et snøflak som glir ut som en blokk, betegnet som flakskred. Betingelsen for utløsning av flakskred er konseptet av et svakt lag (McClung & Schaerer, 2006).

### **Svake lag**

Dannelsen av de svake lagene kan skje på tre ulike måter. De kan dannes som følge av vanndamptransport fra bakken og mot toppen av snøpakken, hvor vanndamptransporten går fra varmt til kaldt. Temperaturgradienten er den avgjørende, og en stor temperaturgradient opptrer ved tynt snødekke og klar himmel, som er forutsetningen for at begerkrystaller skal kunne dannes (McClung & Schaerer, 2006).

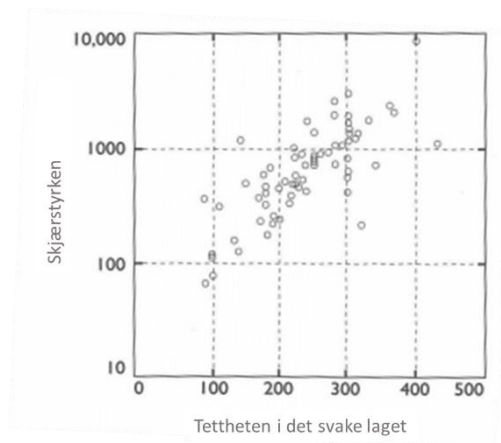
Den andre dannelsesprosessen av svake lag kan skje ved at temperaturen ved toppen av snøpakken er mye kaldere enn selve lufttemperaturen. Luften vil ikke kunne klare å holde på vanndampen, som avsettes på det kaldere snølaget. Dette gir såkalte rimlag. Når det deretter snør over rimlaget (gitt at det er lite eller ingen vind), vil dette kunne danne et vedvarende svakt lag (McClung & Schaerer, 2006).

Den siste måten dannelsen av svake lag kan forekomme på, er ved stor nysnøtilvekst og at fokksnø legger seg over dette 'løse' laget. Dette fører til dannelsen av svake lag og opptrer typisk i forsenkninger. Svake lag som dannes på denne måten vil kun eksistere i en begrenset periode ettersom nysnø har en tendens til å binde seg raskt (McClung & Schaerer, 2006).

### **Tetthet**

Tettheten påvirker styrken i snøen, og er derfor en viktig faktor for utviklingen av stabiliteten i snøen (McClung & Schaerer, 2006). Styrken til snøen øker omtrent eksponentielt med tettheten ved en konstant temperatur (Mellor, 1975). Holder man tettheten konstant, men varierer temperaturen av en snøprøve, ser man at styrken avtar med økende temperatur (Mellor & Smith, 1966) (dette må gjennomføres uten at snøen gjennomgår metamorfose). Tettheten til tørr nysnø ligger på 50–150 kg/m<sup>3</sup>. I selve skredsnøen er tettheten vanligvis mellom 200 og 400 kg/m<sup>3</sup> for tørre snøskred (Lied & Kristensen, 2003). Om snøen har vært gjennom en smelteprosess vil densiteten, avhengig av hvor mye som har smeltet og blitt til vann, være rundt 200 til 600 kg/m<sup>3</sup> (McClung & Schaerer, 2006). Snø oppfører seg som et visko-plastisk materiale og fortetter seg så lenge belastningen er større enn den kompressive

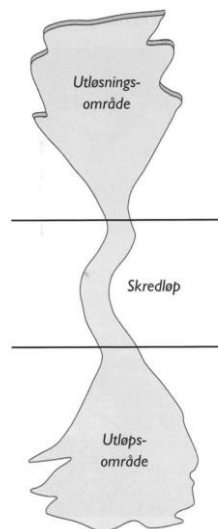
styrken, som øker med tettheten. Snøen kryper også så lenge skjærspenninger virker. Denne prosessen foregår raskere ved høyere temperatur fordi snøens viskositet avtar når den nærmer seg smeltepunktet og fritt vann oppstår i porene. Våt snø kan igjen fryse og bli mye sterkere når vannlaget langs snøkornene blir til is (Lied & Kristensen, 2003; McClung & Schaerer, 2006). Studier utført med skjærboksforsøk av Jamieson og Johnston (2001) samt Figur 2 gitt av McClung og Schaerer (2006) viser karakteristiske verdier for skjærstyrken i et svakt lag. Størst andel av verdier for skjærstyrken i et svakt lag ligger i intervallet 100-2500 Pa, med tilhørende tetthetsvariasjon på 100-300 kg/m<sup>3</sup>.



Figur 2: Skjærstyrke (Pa) som funksjon av det svake lagets tetthet (kg/m<sup>3</sup>). Modifisert fra McClung og Schaerer (2006).

## 2.2 Snøskred

Skredbanen til et snøskred deles inn i tre deler; utløsningsområde, skredløp og utløpsområde (Figur 3) (Lied & Kristensen, 2003).



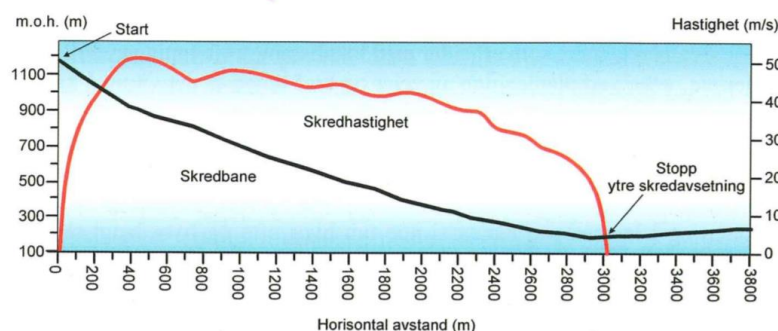
Figur 3: Inndeling av skredbanen (Lied & Kristensen, 2003).



Bruddkanten definerer den øvre begrensningen av utløsningsområdet. Den nedre grensen til utløsningsområdet er linjen hvor flaket glir ut, men er ofte vanskelig å lokalisere (Lied & Kristensen, 2003). Hva som definerer et potensielt utløsningsområde, bestemmes i stor grad av terrenghelningen. Utallige observasjoner gjennom tidene og målinger av skjærstyrken tyder på at det er meget sjeldent at et flaskred løsner ved mindre enn 28°. En helning på over 60° vil kontinuerlig generere småskred. Dette medfører at større snømasser ikke får bygget seg opp og større snøskred opptrer derfor svært sjeldent i områder med over 60° helning (McClung & Schaerer, 2006).

Når et skred har blitt utløst vil snømassene følge terrenget nedover skråningen. Det er området mellom utløsningsområdet og utløpsområdet som kalles skredløp. Avhengig av om snømassenes løp tvinges inn i forsenkinger i terrenget kan skredløpet defineres som enten kanalisert eller ikke-kanalisert. I kanaliserte løp vil deler av skredmassene kunne gå ut av løpet. Dette gjelder spesielt store, tørre snøskred, hvor deler av skredet består av snøsky. En snøsky defineres som det suspenderte laget i et snøskred og oppfører seg som en turbulent strømning. Ved høy hastighet og et stort volum krever det derfor større terrengformasjoner for å holde skredmassene i løpet (Lied & Kristensen, 2003). I et ikke-kanalisert skredløp, hvor det er få terrengformasjoner, vil skredets utløpsområde typisk være bredere i utløpsområdet enn utløsningsområdet (McClung & Schaerer, 2006).

Når det kommer til hastigheten i et skredløp (Figur 4) vil akselerasjonen være størst tidlig i forløpet. De drivende kreftene avhenger av terrenghelning, samt at de motstående kreftene vil øke noe med hastigheten. Dette vil føre til at senere i forløpet, om terrenghelningen fortsatt er bratt, vil de drivende kreftene forbli store og hastigheten blir konstant og akselerasjonen går mot null. Ved avtagende terreng vil de drivende kreftene bli mindre og oppbremsing skjer og en negativ akselerasjon oppstår.

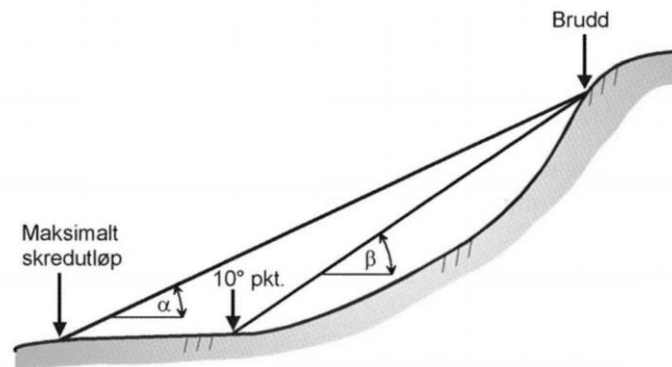


Figur 4: Hastighetsforløpet til et skred (Lied og Kristensen, 2003).

Der skredmassene til slutt stopper opp og avsettes kalles et utløpsområde. Ved store skred, hvor friksjonen er liten og hastigheten stor, vil en oppbremsing først skje når terrenget har en helning på rundt 10°. Alfa-Beta modellen (Lied & Bakkehøi, 1980) er utviklet av NGI på bakgrunn av en statistisk behandling av 200 skred. Ved bruk av denne statistiske modellen kan den maksimale utløpsdistansen estimeres ved hjelp av vinklene alfa og beta (Figur 5). Alfa er vinkelen mellom bruddhøyden og ytre skredavsetning. Vinkelen beta representerer skredbanens bratthet og måles fra skredets startpunkt og ned til hvor terrenget blir slakere enn 10° (Lied & Bakkehøi, 1980). Valg av 10°-punktet er bestemt som følge av teori beskrevet ovenfor.

$$\alpha = 0.96 \beta - 1.4^\circ \quad (1)$$

med et standardavvik,  $S = 2.3^\circ$



Figur 5: Sammenhengen mellom alfa og beta-vinklene.  $\alpha$  viser rekkevidden til skredet,  $\beta$  angir helningen til siktelinjen mellom bruddhøyden og der skredbanen har en terrenghelning på 10° (Lied & Bakkehøi, 1980). Figur fra Lied og Kristensen (2003).

### 2.2.1 Betingende faktorer for utløsning av snøskred

Snø er et komplekst materiale og kan beskrives som et visko-elasto-plastisk materiale, avhengig av belastningen det blir utsatt for. Ved sakte påføring av en belastning, vil snø ligne en viskøs væske. Tilføres belastningen raskt, vil det kunne føre til sprøtt brudd (Bozhinskiy & Losev, 1998). Årsakene til et brudd kan forklares utfra et geoteknisk perspektiv og Coulombs bruddkriterium som er gitt ved (Lied & Kristensen, 2003):

$$\tau_w = c + \rho g z \cos \theta \cdot \tan \phi, \quad (2)$$

hvor  $\tau_w$  er skjærstyrken til det svake laget (Pa) og  $c$  er kohesjonen (Pa).  $\rho$  og  $\theta$  er henholdsvis tettheten til snøen ( $\text{kg/m}^3$ ) og terrenghellning ( $^\circ$ ).  $\tan \phi = \mu$  er friksjonskoeffisienten og  $\phi$  er

friksjonsvinkel ( $^{\circ}$ ),  $g$  er tyngdens akselerasjon ( $m/s^2$ ) og  $z$  er tykkelsen på overliggende lag (m).

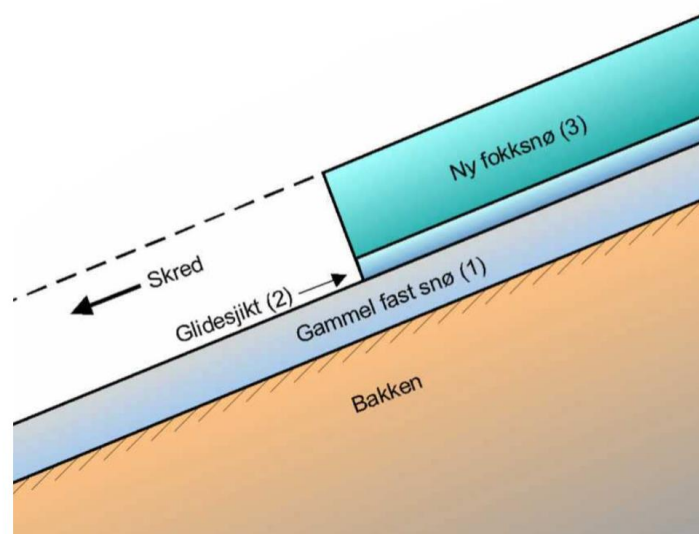
Denne måten å uttrykke brudd på er en ekstrem forenkling. Forenklingene gjøres på bakgrunn av at det ikke kan uttrykkes på en bedre måte i en praktisk modell som for eksempel NAKSIN (Kap. 2.4).

Skjærspenningen ( $\tau_{xz}$ ) i det svake laget (lag 2 i Figur 6) som følge av tyngden fra lag 3 kan skrives som (Lied & Kristensen, 2003):

$$\tau_{xz} = \rho g z \sin \theta \quad (3)$$

Skredet vil bli utløst, basert på en vanlig stabilitetsbetraktning, når:

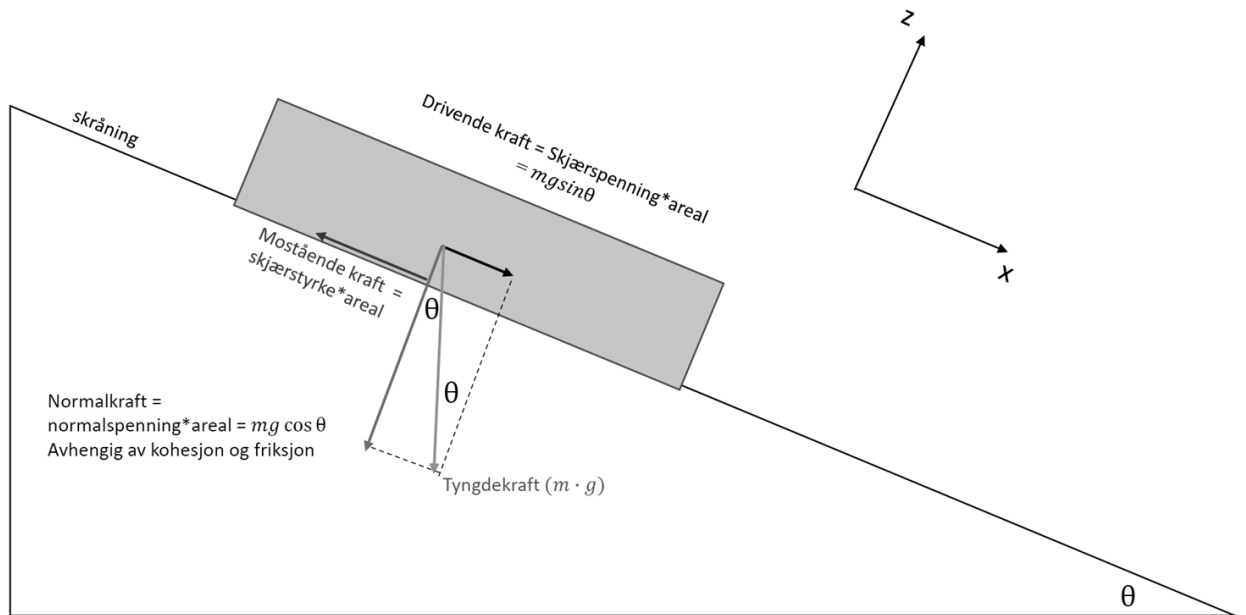
$$\tau_{xz} \geq \tau_w \quad (4)$$



Figur 6: En klassisk sammensetning av snødekket i en ustabil situasjon (Lied & Kristensen, 2003).

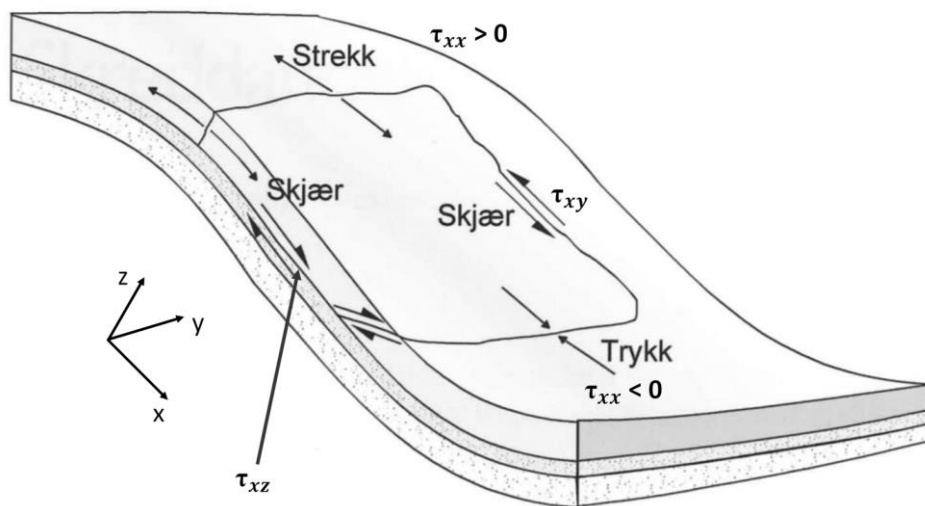
### Spenningsforhold ved utløsning av flaskred

For å få et brudd må skjærspenningen overskride skjærstyrken (Ligning 4). Slik det fremkommer av Figur 7 kan tyngdekraften uttrykkes i en parallell og normal kraftkomponent. Den parallelle kraften gir opphav til skjærspenninger i snødekket og fører til deformasjon, mens den normale kraftkomponenten bidrar til økt stabilitet i snødekket. Dette forholdet er avhengig av helningsvinkel og snøtype.



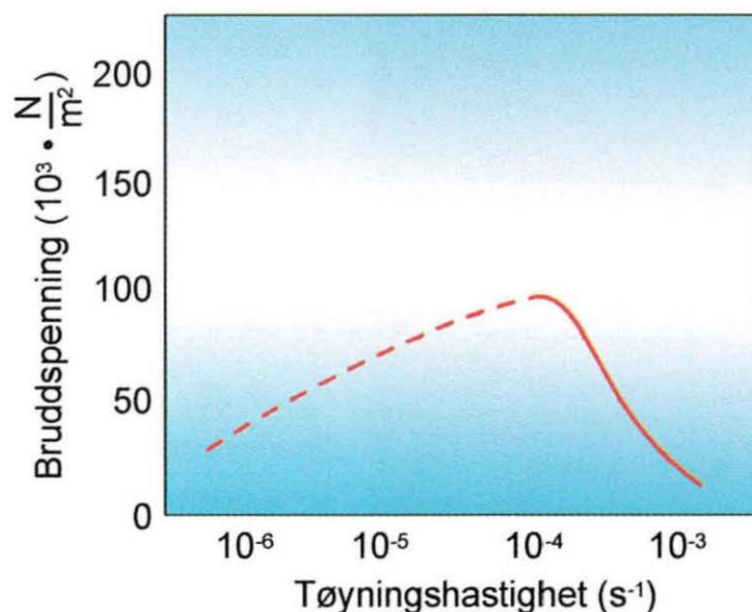
Figur 7: Prinsippskisse av kreftene som virker på en snøpakke med en gitt helning ( $\theta$ ).

Ved et hellende terreng er det i overgangen mellom det slake og bratte partiet at strekkspenninger vil oppstå, dette fører til økt sig og glidning, mens det vil oppstå en understøtte av trykkspenninger på nedsiden og skjærkrefter på sidene mellom snølagene (Figur 8) (Lied & Kristensen, 2003).



Figur 8: De ulike spenningene i et snøflak. Modifisert fra Lied og Kristensen (2003).

Det er dette snøsiget som kan forårsake skred (Lied & Kristensen, 2003). For at snø skal gå i brudd må en kritisk tøyningshastighet og bruddtøyning oppnås i det svake laget (Figur 9) (Bader & Salm, 1990).



Figur 9: Forholdet mellom snøens bruddspenning og tøyningshastighet. Ved stigende tøyningshastighet gir det en økende bruddstyrke inntil et visst punkt på kurven hvor det vil gå i brudd (Lied & Kristensen, 2003).

## Tøyningsforhold

Lave tøyningshastigheter gjør at snøen opptrer visko-plastisk (Lied & Kristensen, 2003; Mellor, 1975). En økning av tøyningshastighetene er avgjørende for at initialbrudd skal oppstå (sprøtt brudd), og skjer ved rask pålagring, ofte i kombinasjon med intensiv nedbør og vindtransportert snø, og høyere temperaturer. Ved økning av tøyningshastighetene vil isbroene, - eller sintringen mellom snøkrystallene tøyes for raskt og vil ikke lenger deformeres, men knekker og skjærstyrken reduseres betydelig. For at brudd skal oppstå er det ikke kun skjærstyrken til det svake laget som må overgås, men også strekkfastheten til det overliggende laget, som typisk kan være et fokksnølag (McClung & Schaerer, 2006).

## Supersvake lommer

En snøpakke vil aldri være homogen, men vil bestå av områder med ulik styrke. For å kunne oppnå de kritiske forholdene for dannelsen av initialbrudd, må tilstedeværelsen av supersvake lommer eksistere i det svake laget. Ved belastning av det svake laget vil randen av en slik 'supersvak lomme' svekkes, og en kjedereaksjon av brudd vil kunne bre seg radielt utover. Dette kan sammenlignes med en dominoeffekt eller korthusstruktur som kolliderer og hvor bruddforplantingen som oftest opptrer i de svake lagene dannet under skarelag (McClung & Schaerer, 2006).

## Lagdeling i snøpakken

Det er metamorfose- og overflateprosessene som styrer lagdelingen til snødekket, og kan føre til dannelsen av glidesjikt og glideplan. En klassisk sammensetning av snødekket i en ustabil situasjon består av et fastere snølag øverst med en viss kohesjon, for eksempel fokksnø. Laget med høyere kohesjon vil ved utgliding gli langs et lag med mindre styrke som kalles et glidesjikt. Glidesjiktet kan, som nevnt tidligere, bestå av nedsnødd overflaterim eller grove krystaller med en veldig svak intergranulær binding (begekkrystaller). Selve glideplanet ligger under det svake glidesjiktet, og består av fastere snø (Figur 6). I noen tilfeller kan bakken representere glideplanet (Lied & Kristensen, 2003).

Ved intenst snøfall, hvor tilveksten av nysnø skjer i løpet av kort tid, vil situasjonen kunne bli svært ustabil (Lied & Kristensen, 2003; Taurisano & Øydvin, 2011). Bakkehøi (1987) presenterte statistiske data basert på observasjoner av skred og værforhold ved Ryggfonn, NGIs forsøksfelt på Strynefjellet, og kom frem til en kumulativ sannsynlighetsfordeling av nedbørsmengde. Dataene viser at det er 5 % sannsynlighet for at skred vil løsne hvis det i løpet av tre døgn kommer en nedbørsmengde på 10 mm. En nedbørsmengde på 90 mm i løpet av tre døgn gir en sannsynlighet på 95 % for at skred utløses (nedbør i mm betyr vannmengde av smeltet snø, og 1 mm nedbør tilsvarer ca. 1 cm snø). De statistiske dataene er basert på antall ganger det snødde og skred ble utløst, men inkluderer ikke de gangene det snødde og skred ikke ble utløst.

## 2.2.2 Skreddynamikk

### Klassifisering av flaskred

Snøskred kan klassifiseres på ulike måter, basert på for eksempel morfologien eller skreddynamikken. Ved en morfologisk klassifisering har De Quervain et al. (1973) klassifisert snøskred basert på skredenes bruddform, fuktighet, bevegelsesform, hvor det svake laget befinner seg samt hvilken geometrisk terrengformasjon skredet beveger seg i. Alle disse egenskapene påvirker skreddynamikken på ulike måter (Hopfinger, 1983).

For skreddynamikk i tørre flaskred skiller en vanligvis mellom snøskred med høytetthetskjerne og snøskyskred. Schaerer og Salway (1980) har påvist gjennom målinger at tørre flaskred er vanskelig å klassifisere. Dette bekreftes også gjennom eksperimenter (Gauer et al., 2008; Issler & Gauer, 2008; Schaer & Issler, 2001). En videre tolkning av disse

resultatene indikerer at begrepet skred med mikset bevegelse vil være en mer korrekt betegnelse (Gauer et al., 2008; Kogelnig et al., 2011; McClung & Schaerer, 2006).

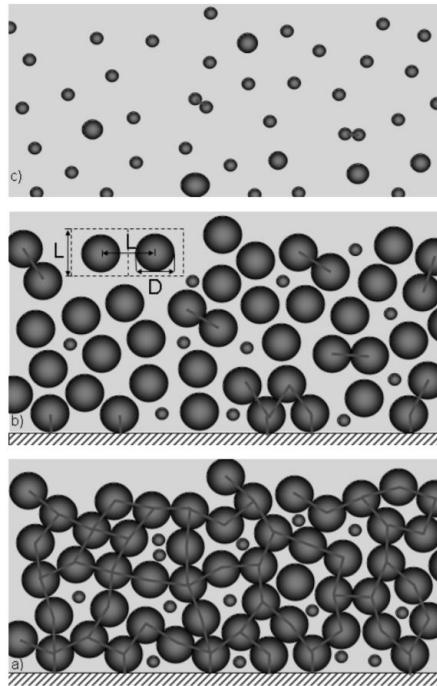
Ved snøskred med mikset bevegelse kan ulike flyteregimer identifiseres. Disse tre flyteregimene skiller seg fra hverandre i hvor tett partiklene er pakket og inndeles i flytelag, fluidisert lag og suspensjonslag (Gauer et al., 2008; Issler, 1998; Issler & Gauer, 2008; Issler et al., 1996; Kogelnig et al., 2011; Lied & Kristensen, 2003; McClung & Schaerer, 2006; Schaer & Issler, 2001; Schaerer & Salway, 1980)

Når flakskred, grunnet ruheten til terrenget, bryter opp i mindre blokker eller partikler, vil partiklene bli mindre ettersom de kolliderer med hverandre eller underlaget (snø eller bakken). Dette fører til en blanding av snøpartikler og luft som har en relativt høy densitet ( $200-400 \text{ kg/m}^3$ ) (Figur 10a) (Lied & Kristensen, 2003; McClung & Schaerer, 2006).

Forholdet mellom partikkelavstand og partikkeldiameter er gitt ved  $L/D$ , hvor  $D$  er diameter og  $L$  er avstanden mellom midtpunktene av to partikler (Gauer et al., 2008). I flytelaget er  $L/D \geq 1$ , som innebærer at partiklene har vedvarende kontakt mellom seg eller bakken, hvor en tredjedel til halvparten av hulrommene i tetthetskjernen er fylt med snøpartikler og resten med luft (McClung & Schaerer, 2006).

Ved tilstrekkelig høye skjærhastigheter, vil trykket fra partikkelkollisjoner drive partiklene fra hverandre, og nettverket av partikkelkontakter forsvinner. Dette innebærer at laget blir fluidisert. Her er  $L/D$  betydelig større enn 1 (Figur 10b). Tettheten til det fluidiserte laget er derfor mye lavere enn i flytelaget, og ligger på omtrent  $30-100 \text{ kg/m}^3$  (Gauer et al., 2008; Issler, 2003).

Snøsky eller det suspenderte laget i et snøskred (Figur 10c) har lavest densitet ( $2-10 \text{ kg/m}^3$ ) (Lied & Kristensen, 2003) av de tre lagene og oppfører seg som en turbulent strømning av en (tilnærmet) newtonsk væske. Turbulens og viskositet avhenger av partikkelkonsentrasjonen, hvor partikkelkollisjoner i snøsky er veldig sjeldne, siden  $L/D \gg 1$ . Den gjennomsnittlige partikkelstørrelsen er mindre i det fluidiserte laget enn i det tette flyteregimet (Issler et al., 1996).



Figur 10: Flyteregime. a) flytelag med høytetthetskjerne. b) Fluidisert lag, reduksjon i partikkelkontakt. c) Suspensjonslag, partikkelkollisjon er sjeldent (Gauer et al., 2008).

## 2.3 Beregningsmodeller

De fleste numeriske modeller for snøskred baserer seg på hydraulisk teori, hvor matematiske ligninger som beskriver åpen kanalstrøm blir anvendt. Dette har sin bakgrunn i at snøskred kan oppføre seg dels som væske (LeVeque, 2002; McDougall, 2006). Friksjonen som inngår i de kontinuumsmekaniske modellene kan benytte ulike reologier. Her benyttes friksjonsloven etter Voellmy (Salm, 1993; Voellmy, 1955), som tar utgangspunkt i Newtons andre lov. Gjennom balanseligninger for masse og moment beskrives bevegelsen til 'skredvæsken', hvor friksjonsloven er representert ved et hastighetsavhengig- og hastighetsuavhengig ledd.

Det finnes flere numeriske beregningsmodeller som anvendes for modellering av snøskred. I denne oppgaven anvendes to Voellmy-modeller; RAMMS::AVLANCHE (*RApid Mass Movements Simulation*) og MoT-Voellmy (*Method of Transport*).



### 2.3.1 Beskrivelse av modellene

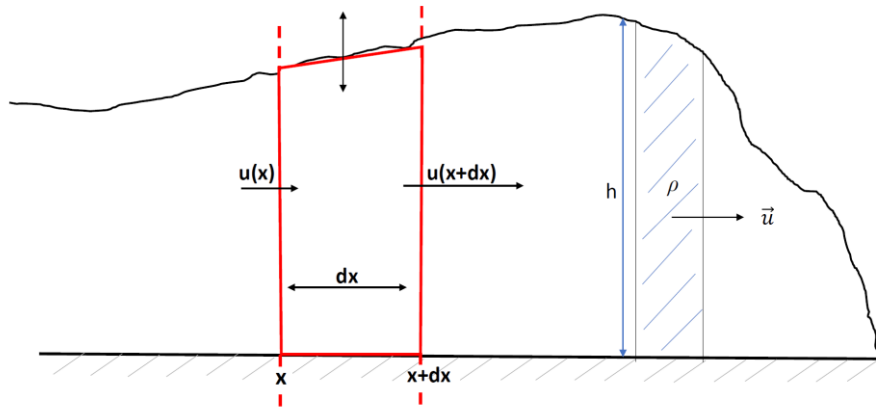
#### RAMMS::AVALANCHE

RAMMS::AVALANCHE 1.7.20 (SLF/WSL, 2017) (fra nå omtalt som RAMMS) er et numerisk simuleringsverktøy utviklet i Sveits ved Institutt for snø- og skredforskning (SLF), hvor testing og kalibrering mot målinger og observasjoner av snøskred i Alpene er utført over lengre tid (Bartelt et al., 2017). RAMMS er en to-dimensjonal modell som beregner bevegelsen fra utløsningsområdet til utløpsområdet i et tredimensjonalt terreng. Det brukes dybde-midlede masse- og momentbalanseligninger for å beregne endring i hastighet og flythøyde (Christen et al., 2010a). Masse- og momentbalanseligningene består av tre ligninger, som må løses i hverandre siden hver ligning består av tre ukjente. Dette gjør at de som oftest må løses numerisk. Forenklinger har blitt utført og omfatter følgende (LeVeque, 2002):

- Massen er antatt å være inkompressibel, som gjør at tettheten  $\rho$  settes til en konstant.
- Det er antatt at vertikal hastighet i en masse kan neglisjeres.
- Ligningene som brukes baseres på hydraulisk teori ‘The shallow water equations’, hvor ligningene inneholder flere ukjente ledd, som flythøyde og hastighet.
- Initialbetingelsen for skredets flythøyde, samt snøens friksjonsegenskaper må bestemmes.

Massebalanseligningen tar utgangspunkt i summen av massen som går inn og ut av en infinitesimal søyle som står normalt på terrenget (Figur 11):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_y)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$



Figur 11: Masseendringen inn og ut av en infinitesimal søyle som står normalt på terrenget (vist i rødt).

Momentbalanseligningene er bevaring av bevegelsesmengde og kan brukes til å beregne hastigheten i modellen:

$$\frac{\partial(hu_x)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_x^2)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_x u_y)}{\partial y} = hg_x + \frac{\partial(h\bar{\sigma}_{xx})}{\partial x} - \sigma_{xz}^b, \quad (6)$$

og

$$\frac{\partial(hu_y)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_x u_y)}{\partial x} + \frac{\partial(hu_y^2)}{\partial y} = hg_y + \frac{\partial(h\bar{\sigma}_{yy})}{\partial y} - \sigma_{yz}^b \quad (7)$$

Venstre siden av de tre ligningene 5, 6 og 7 inneholder hver tre ukjente; flythøyde ( $h$ ) og hastighet ( $u_x$  og  $u_y$ ).  $hu_x$ ,  $hu_y$  er den dybdeintegreerte hastigheten ( $m^2/s$ ) i skredet i retningene  $x$ ,  $y$  parallell med bakken og ligningen brukes til å beregne endringen mellom de to fluksene (gjennomstrømning av masse per tidsenhet ( $m/s \cdot m$ )). Ved å sette initialbetingelser til variablene  $h$ ,  $u_x$  og  $u_y$ , kan neste tidsskritt beregnes, men som nevnt tidligere, kreves det at de tre ligningene for masse- og momentbalanse løses i hverandre (LeVeque, 2002).

Høyre siden av ligning 6 og 7, utgjør det første leddet den effektive akselerasjonen, hvor  $g = (g_x, g_y, g_z)$  er tyngdeakselerasjonen ( $m/s^2$ ) (den drivende kraften) i koordinatsystemet  $x$  og  $y$  og er parallell med bakken, mens  $z$  står vinkelrett på bakken.  $\sigma_{xx}$  og  $\sigma_{yy}$  er de vertikale og horisontale normalspenningene i retning  $x$  og  $y$ , og er den motstående kraften sammen med  $\sigma_{xz}$  og  $\sigma_{yz}$ .  $\sigma_{xx}$  og  $\sigma_{yy}$  er det hydrostatiske trykket som resulterer fra forandringer i dybden etter som skredet beveger seg nedover (LeVeque, 2002).

$$\bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = \frac{1}{2} \sigma_{zz}^b = \frac{1}{2} \rho h g_z \quad (8)$$

For å løse balanseligningen, må man også vite hvordan  $\sigma_{xz}^b$  og  $\sigma_{yz}^b$  uttrykkes med de gitte variablene ( $h$  og  $u$ ).  $\sigma_{xz}^b$  og  $\sigma_{yz}^b$  er empiriske antagelser for hvordan friksjonen i skredet er, og tar utgangspunkt i Voellmys friksjonsmodell (Voellmy, 1955) som originalt tok utgangspunkt i hydraulisk teori. Salm (1993) modifiserte ligningen og inkluderte indre friksjon, samt aktive og passive strømningsforhold (Savage & Hutter, 1989). Voellmy-Salm ligningen er gitt ved (Salm, 1993; Voellmy, 1955):

$$\sigma_{xz}^b = n_{u_x} \left[ \mu h g_z + \frac{g \|u\|^2}{\zeta} \right] \text{ og } \sigma_{yz}^b = n_{u_y} \left[ \mu h g_z + \frac{g \|u\|^2}{\zeta} \right] \quad (9)$$

hvor  $\sigma_{xz}^b$  og  $\sigma_{yz}^b$  er den totale motstanden (Pa),  $g$  er tyngdesakselerasjon ( $\text{m/s}^2$ ),  $h$  er flythøyden (m) og  $\|u\| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$  er hastigheten (m/s).  $\mu$  og  $\zeta$  ( $\text{m/s}^2$ ) er Voellmy-Salms to friksjonskoeffisienter; ett for Coulomb friksjon, som er hastighetsuavhengig, og ett for hastighetsavhengig friksjon. I den hastighetsuavhengige delen er friksjonen proporsjonal til normalspenningen på glidelaget (friksjonskoeffisient  $\mu$ ), hvor  $\mu$  dominerer i starten og slutten av skredet, og kan relateres til friksjonsvinkelen, gitt ved  $\mu = \tan \varphi$ . Den hastighetsavhengige viskøs-turbulente friksjonen (friksjonskoeffisient  $\zeta$ ) dominerer når hastigheten til skredet er stor, og oppstår på grunn av viskøse og turbulente krefter. Når det kommer til de aktive og passive strømningsforholdene er de gitt ved jordtrykkskoeffisienten (earth pressure coefficient)  $k_{a/p}$ . Den aktive delen refererer til masser som flyter ut (dilaterende strømning), og passiv til masser som bygger seg opp (kompressiv strømning).  $k_{a/p}$  kan bli brukt til å kontrollere spredningen og avsetningen av snømassene i utløpssonen. Selv om RAMMS tilbyr denne funksjonen, er  $k_{a/p} = 1$  på grunn av at den har liten påvirkning av sluttberegningen av utløpsdistanse og hastighet (Christen et al., 2010a).

De anbefalte friksjonsverdiene ( $\mu$  og  $\zeta$ ) utarbeidet av SLF er avhengig av skredstørrelse, antatt returperiode, terrengformasjon og terreng høyden (Tabell 1) (Bartelt et al., 2017). Skog kan også tas hensyn til ved å justere friksjonskoeffisientene ved å minke  $\zeta$  betraktelig (Christen et al., 2010b). Dette vil kunne bidra til mer korrekt simulering, men siden RAMMS skiller kun mellom skog/ikke skog vil det ikke være mulig å skille mellom volum, treslag og alder på skogen.

Tabell 1: Anbefalte friksjonsverdier kalibrert etter målte og observerte skred i Alpene (Bartelt et al., 2017).

<b>Large avalanche ( &gt; 60'000 m<sup>3</sup> )</b>		300-Year		100-Year		30-Year		10-Year	
	Altitude (m.a.s.l.)	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$
unchannelled	above 1500	0.155	3000	0.165	3000	0.17	3000	0.18	3000
	1000 - 1500	0.17	2500	0.18	2500	0.19	2500	0.2	2500
	below 1000	0.19	2000	0.2	2000	0.21	2000	0.22	2000
channelled	above 1500	0.21	2000	0.22	2000	0.225	2000	0.235	2000
	1000 - 1500	0.22	1750	0.23	1750	0.24	1750	0.25	1750
	below 1000	0.24	1500	0.25	1500	0.26	1500	0.27	1500
gully	above 1500	0.27	1500	0.28	1500	0.29	1500	0.3	1500
	1000 - 1500	0.285	1350	0.3	1350	0.31	1350	0.325	1350
	below 1000	0.3	1200	0.315	1200	0.33	1200	0.345	1200
flat	above 1500	0.14	4000	0.15	4000	0.155	4000	0.165	4000
	1000 - 1500	0.15	3500	0.16	3500	0.17	3500	0.18	3500
	below 1000	0.17	3000	0.18	3000	0.19	3000	0.2	3000
<b>Medium avalanche ( 25'000 - 60'000 )</b>		300-Year		100-Year		30-Year		10-Year	
unchannelled	above 1500	0.195	2500	0.205	2500	0.215	2500	0.225	2500
	1000 - 1500	0.21	2100	0.22	2100	0.23	2100	0.24	2100
	below 1000	0.23	1750	0.24	1750	0.25	1750	0.26	1750
channelled	above 1500	0.25	1750	0.26	1750	0.27	1750	0.28	1750
	1000 - 1500	0.27	1530	0.28	1530	0.285	1530	0.295	1530
	below 1000	0.28	1350	0.29	1350	0.3	1350	0.31	1350
gully	above 1500	0.32	1350	0.33	1350	0.34	1350	0.35	1350
	1000 - 1500	0.33	1200	0.34	1200	0.35	1200	0.36	1200
	below 1000	0.36	1100	0.37	1100	0.38	1100	0.39	1100
flat	above 1500	0.17	3250	0.18	3250	0.19	3250	0.2	3250
	1000 - 1500	0.19	2900	0.2	2900	0.21	2900	0.22	2900
	below 1000	0.21	2500	0.22	2500	0.23	2500	0.24	2500
forested area (mu=delta, xi=fix)		0.02	400	0.02	400	0.02	400	0.02	400

<b>Small avalanche ( 5'000 - 25'000 m<sup>3</sup> )</b>		300-Year		100-Year		30-Year		10-Year	
	Altitude (m.a.s.l.)	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$
unchannelled	above 1500	0.235	2000	0.245	2000	0.25	2000	0.26	2000
	1000 - 1500	0.25	1750	0.26	1750	0.265	1750	0.275	1750
	below 1000	0.265	1500	0.275	1500	0.285	1500	0.295	1500
channelled	above 1500	0.28	1500	0.29	1500	0.3	1500	0.31	1500
	1000 - 1500	0.3	1350	0.31	1350	0.315	1350	0.325	1350
	below 1000	0.31	1200	0.32	1200	0.33	1200	0.34	1200
gully	above 1500	0.37	1200	0.38	1200	0.39	1200	0.4	1200
	1000 - 1500	0.38	1100	0.39	1100	0.4	1100	0.41	1100
	below 1000	0.4	1000	0.41	1000	0.42	1000	0.43	1000
flat	above 1500	0.215	2500	0.225	2500	0.23	2500	0.24	2500
	1000 - 1500	0.23	2250	0.24	2250	0.245	2250	0.255	2250
	below 1000	0.245	2000	0.255	2000	0.26	2000	0.27	2000
<b>Tiny avalanche ( &lt; 5'000 m<sup>3</sup> )</b>		300-Year		100-Year		30-Year		10-Year	
unchannelled	above 1500	0.275	1500	0.28	1500	0.285	1500	0.29	1500
	1000 - 1500	0.29	1400	0.295	1400	0.3	1400	0.305	1400
	below 1000	0.3	1250	0.31	1250	0.32	1250	0.33	1250
channelled	above 1500	0.31	1250	0.32	1250	0.33	1250	0.34	1250
	1000 - 1500	0.33	1180	0.34	1180	0.345	1180	0.355	1180
	below 1000	0.34	1050	0.35	1050	0.36	1050	0.37	1050
gully	above 1500	0.42	1050	0.43	1050	0.44	1050	0.45	1050
	1000 - 1500	0.43	1000	0.44	1000	0.45	1000	0.46	1000
	below 1000	0.44	900	0.45	900	0.46	900	0.47	900
flat	above 1500	0.26	1750	0.265	1750	0.27	1750	0.275	1750
	1000 - 1500	0.27	1600	0.275	1600	0.28	1600	0.285	1600
	below 1000	0.28	1500	0.285	1500	0.29	1500	0.295	1500
forested area (mu=delta, xi=fix)		0.02	400	0.02	400	0.02	400	0.02	400

Ved bruk av de anbefalte verdiene, blir friksjonskoeffisienten automatisk beregnet ut fra topografi i terrengmodellen. Egne vurderinger av friksjonskoeffisienten kan også gjøres. En tabell har blitt tilpasset norske forhold etter kalibrering mot kjente norske skredhendelser og målinger fra NGIs forsøksfelt Ryggfonn på Strynefjellet. Siden Norge ligger lengre nord og snøen vil være tørrere lengre ned i terrenget, kan høydesonen senkes 500 m i forhold til de angivelige friksjonskoeffisientene til de antatte høydesonene (Håland et al., 2015).

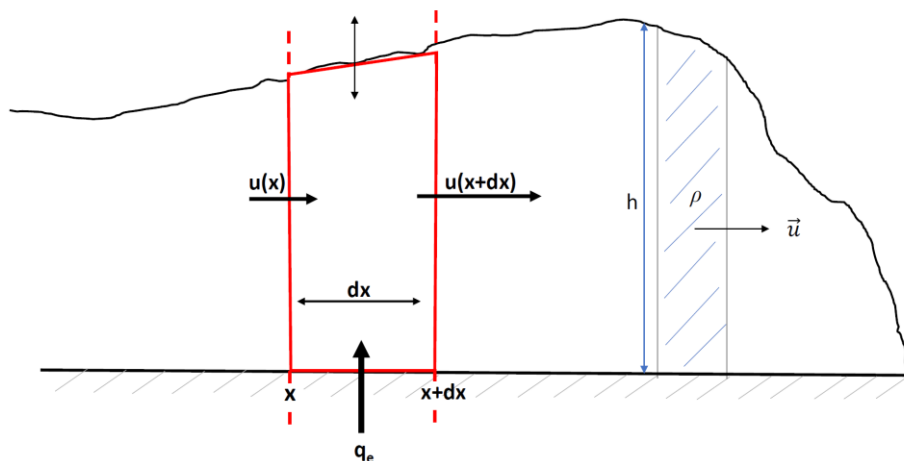
## MoT-Voellmy

MoT-Voellmy ligner på RAMMS og er utviklet av Norges Geotekniske Institutt (NGI, 2014). MoT-Voellmy er en kvasi-3D (dybde-midlet i to horisontale dimensjoner) dynamisk skredmodell som løser masse- og momentligningene på samme måte som RAMMS. RAMMS og MoT-Voellmy løser beregningene av balanseligningene på tilsvarende måte gjennom et Eulerian-referansesystem (Christen et al., 2010a). Et Eulerian-referansesystem tar for seg hver enkelt rute, og beregner hvordan massen i en celle vil bli endret mellom det som strømmer inn og ut. Den tar også for seg hvordan hastighetene endrer seg grunnet tyngdekraft, friksjon og trykk fra massene i nabocellene. Dette beregnes ved bruk av et kartesisk koordinatsystem (Christen et al., 2010a; Schraml et al., 2015).

MoT-Voellmy tilbyr bruken av konstante eller varierende friksjonskoeffisienter. Ved bruk av varierende friksjonskoeffisienter må et sett med verdier for  $\mu$  og  $k$  utarbeides, hvor den turbulente friksjonskoeffisienten er enhetsløs og er gitt ved  $k = g/\xi$ . MoT-Voellmy tilbyr også en enkel medrivningsmodell, Issler-Jóhannesson (IsJo). Denne enkle medrivningsmodellen antar at alle forbindelser mellom snøpartiklene på overflaten og i snødekket brytes øyeblikkelig når skjærspenningen overstiger  $\tau_w$ . Da er snøpartiklene satt fri og akselereres av skjærspenningen som skredet utøver på snømassen. Samtidig motvirker friksjonen, som er aktiv mellom snødekket og den eroderte snømassen, akselerasjon. Derfor oppstår differansen mellom  $\tau_s - \tau_w$ , som bestemmer hvor raskt den eroderte massen kan blande seg med resten av skredets masse. Erosjonshastigheten, altså hastigheten som snødekket eroderes bort med, beregnes etter følgende form (Issler & Jóhannesson, 2011):

$$q_e = \frac{\tau_s - \tau_w}{\rho_s u} \quad \text{når } \tau_s > \tau_w \quad (10)$$

hvor  $q_e$  er erosjonshastigheten,  $\rho_s$  er tettheten av snødekket,  $\tau_s$  er skjærspenningen,  $\tau_w$  er skjærstyrken og  $u$  er skredhastigheten (Figur 12).



Figur 12: Masseendringen inn og ut av en infinitesimal søyle som står normalt på terrenget (vist i rødt), hvor medrivning er inkludert.

Skjærstyrken i et naturlig snødekke øker med avstanden fra overflaten ettersom snø komprimeres av egen vekt. Skjærstyrken vil også øke når tyngden fra skredet presser på. Denne effekten kan inkluderes i medrivningsmodellen, IsJo, og vil være med på å øke den effektive skjærstyrken. I formelen for erosjonshastigheten (Ligning 10) er kraften delt på hastigheten. Dette skyldes at det trengs økt kraft/skjærspenning for å akselerere erodert masse til skredets hastighet jo raskere skredet går.

## 2.4 NAKSIN

NAKSIN (Nye AktsomhetsKart for Snøskred I Norge) er et verktøy utviklet av NGI for å generere nye aktsomhetskart for snøskred (Figur 13). De nye aktsomhetskartene tar hensyn til de lokale klima- og vegetasjonsforholdene og er et tredje generasjons aktsomhetskart utviklet på oppdrag for Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) (for mer informasjon om de to foregående aktsomhetskartene, se Kap. 1.1). Skredets utløpsdistanse simuleres av beregningsprogrammet MoT-Voellmy som skal gjengi utløpsområdet. Utløpsområdet definerer aktsomhetssonen. Ved å implementere data som klima, terreng og skog (friksjonskoeffisientene avhenger bl.a. av klimaforholdene og skogegenskaper), vil de nye kartene forhåpentligvis fremstå mer realistisk enn de nåværende kartene. MoT-Voellmys kildekode er utarbeidet av NGI. Bruken av programvare med åpen kilde gjør at brukerne av NAKSIN ikke er avhengig av dyre lisenser for genereringen av de nye aktsomhetskartene. Det er lagt opp til at kommuner og rådgivende konsultantselskaper selv skal kunne utføre dette, hvor en viss forståelse og innsikt, samt kunnskap om spesielle skredhendelser i området er nødvendig. De nye aktsomhetskartene vil ikke bli generert på en helautomatisert måte for

hele landet slik de nåværende kartene ble, men vil bli laget for områder på størrelse med en gjennomsnittlig kommune eller mindre. Generering av kartene skjer på en semi-automatisk måte, som krever noen justeringer av manuelle parametere av brukeren. Det vil i tillegg være noen valgmuligheter slik at snøskred eksperter kan oppnå best mulig resultater (Busengdal & Issler, 2018; Issler et al., under utarbeidelse).

NAKSIN er implementert i Python 3 ettersom de fleste geografiske informasjonssystemene (GIS) tilbyr et Python-applikasjonsgrensesnitt (API). MoT-Voellmy brukes som simuleringsverktøy, og kan enkelt startes fra en Python rutine. De geografiske inndataene (DTM, klima og skog) og NAKSINs utdata – aktsomhetskart – er alle rasterfiler i enten ESRI ASCII Grid eller BinaryTarrain 1.3 format (Issler et al., under utarbeidelse). Dette gjør visualisering i GIS enkel (Figur 13).

1	Spesifiser kartleggingsområde (polygon)	Bruker
2	Bestem prosessområdet (rektangel)	NAKSIN
3	Finn potensielle utløsningsområder	NAKSIN
4	Estimerer utløsningssannsynligheten for hvert område (klima, skog), ekskluderes om $p < 0.001/\text{år}$	NAKSIN
5	For hvert utløsningsområde, velg startbetingelser og friksjonskoeffisienter (klima, skog), simuleres med MoT-Voellmy	NAKSIN
6	Kombiner alle områder truffet av minst et snøskred	NAKSIN
7	Sjekk resultat, fremstill kart i tilbydd GIS-verktøy	Bruker

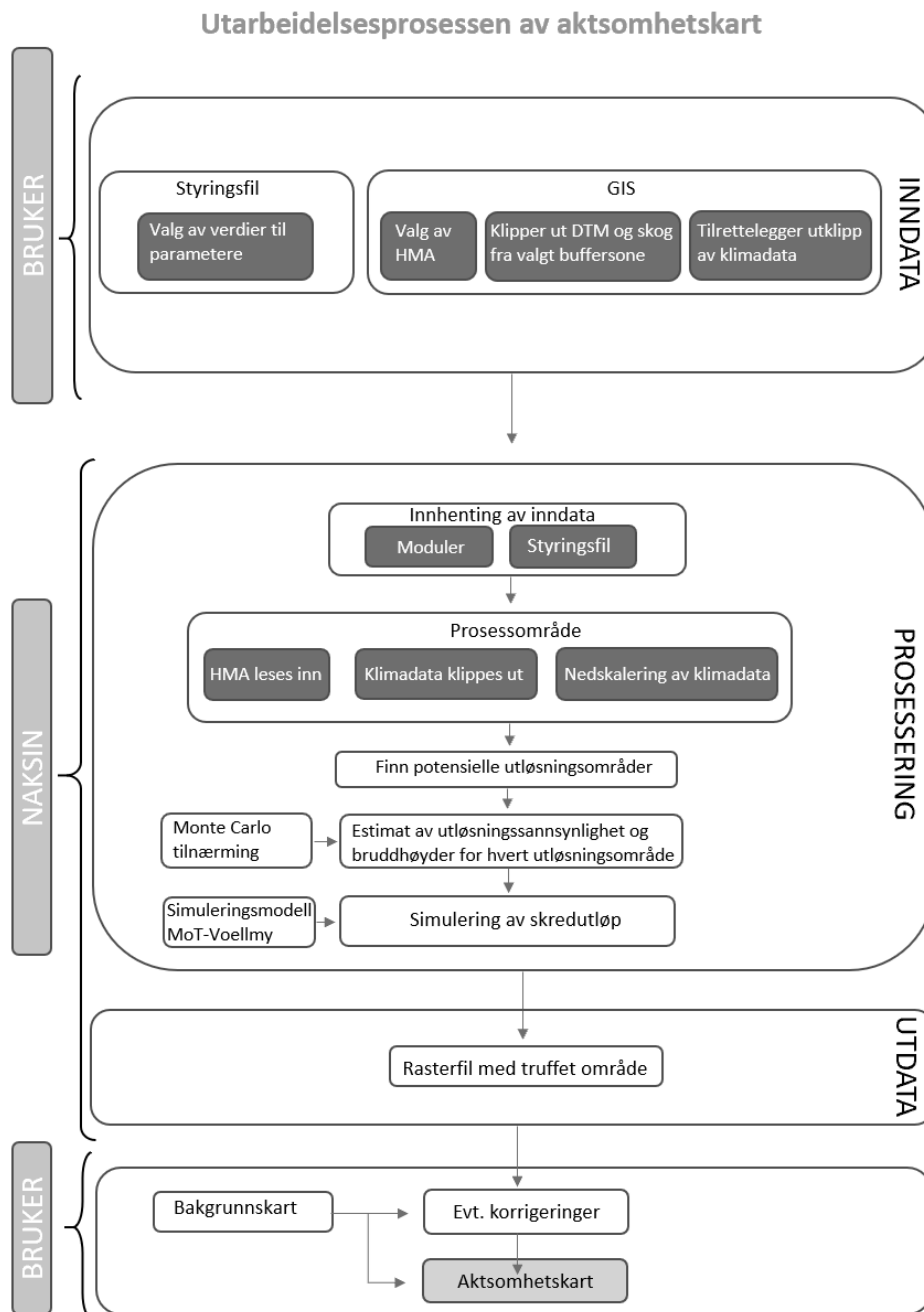
Figur 13: Flytskjema over NAKSIN. Viser utførelsesstegene til bruker og NAKSIN.

### 2.4.1 Oppbygging av NAKSIN

Verktøyet NAKSIN genererer potensielle utløsningsområder bestemt av topografiske forhold. De tilhørende utløsningssannsynlighetene og bruddhøydene er estimert som en funksjon av topografi og klimatiske forhold, samt tettheten og kvaliteten til skogen. Aktsomhetssonen er bestemt av utløpsdistansen gitt av simuleringsmodellen, - MoT-Voellmy (Figur 14).

Simuleringsmodellen MoT-Voellmy er som nevnt tidligere (Kap. 2.3) en enkel kvasi-3D modell. Friksjonskoeffisientene  $\mu$  og  $k$  som er brukt i simuleringsmodellen MoT-Voellmy i NAKSIN, er basert på en tabell over anbefalte verdier for friksjonskoeffisientene  $\mu$  og  $\xi = g/k$  utgitt av SLF for den tilsvarende modellen RAMMS (Bartelt et al., 2017) (Tabell 1). Hele tabellen fra SLF interpoleres med hensyn til skredvolum, terrengkrumning og lokal

vintertemperatur. Den sistnevnte kobles til SLFs høydekategorier med hjelp av klimastatistikk fra Sveits som viser at  $T_w(1000 \text{ moh.}) = -1.8^\circ\text{C}$  og  $T_w(1500 \text{ moh.}) = -3.9^\circ\text{C}$ . Dermed er friksjonsverdiene som brukes i simuleringsmodellen klimaavhengig (Issler et al., under utarbeidelse).



Figur 14: Flytdiagram over utarbeidelsesprosessen av aktsomhetskart med NAKSIN.



## Valg av potensielle utløsningsområder

De potensielle utløsningsområdene separeres i NAKSIN i to steg, hvor det første steget omhandler de potensielle utløsningsområdene, som er topografisk bestemt. Dette innebærer anvendelsen av geometriske kriterier i utvelgelsen. I det andre steget blir utløsnings sannsynligheten beregnet for hvert av de identifiserte utløsningsområdene.

Det inngår flere kriterier i utvelgelsen av potensielle utløsningsområder. Første kriterium baseres på helningen til terrenget (Issler et al., under utarbeidelse). Brukeren definerer en nedre og øvre grenseverdi, som typisk ligger mellom 26-30° og 55-60° (Issler, 2016). Områder over og under dette ekskluderes.

Det andre kriteriet anvendes for planform-krumning, hvorav rygger og skuldrer velges bort ved hjelp av konturlinjenes kurvatur. Algoritmer brukes til å telle celler og en geometrisk seleksjon av minste antall naboceller gjøres, hvor 'utstikkere' og 'flaskehals' velges bort. Fjerningen av utstikkere gjøres ved å se på poengsummen av cellene. Naboceller som deler kant gir ett poeng, de som kun deler hjørner gir halvt poeng. Utstikkere er identifisert med poengsummer mindre enn 2.5, mens 'flaskehals' er definert som celler som ikke har noen naboer i N-S eller Ø-V retning (Figur 15) (Issler et al., under utarbeidelse).

		1.5	2.5										
			4.0	4.5	4.0	4.0	3.0				3.5	2.5	
			4.0	6.0	6.0	6.0	5.5	3.0		3.0	5.0	3.0	
			4.5	6.0	6.0	6.0	6.0	4.5		4.5	4.5		
		3.0	5.5	6.0	6.0	6.0	6.0	5.0	4.0	5.0	4.5		
		2.5	4.5	5.5	6.0	5.5	4.5	3.0		4.5	5.5	3.0	
				3.0	4.0	3.0				2.5	4.0	2.5	

Figur 15: Grafisk fremvisning av algoritmen for eliminering av utstikkere og 'flaskehals' fra potensielle utløsningsområder (farget celler). Den røde cellen er eliminert først, derved faller nabetallet for den turkise cellen til 1.5 og cellen blir også eliminert. Den gule cellen er en 'flaskehals' og er også eliminert, selv om nabetallet er 4 (Issler et al., under utarbeidelse).

Elimineringen fører til oppdeling av utløsningsområder og baseres på at det er høyst usannsynlig at et brudd i det svake laget vil forplante seg på tvers av slike rygger. ‘Øyer’ som er innlemmet i utløsningsområdet, der terrenghelning er lavere eller høyere enn terskelverdien, vil bli inkludert i polygonet til utløsningsområdet (Issler et al., under utarbeidelse).

I det siste kriteriet i utvelgelsen av potensielle utløsningsområder defineres størrelsen av utløsningsområdet, og begrenses ut fra *tre* krav. *Ett* av kravene er at brukeren selv må sette en valgt verdi for minimumsstørrelse av utløsningsarealet ( $A$ ) på mellom 200 og 1000 m<sup>2</sup>.

Ekskluderingen av små utløsningsarealer baseres på enkle kraftligninger:

$$F_{\downarrow} \sim \rho L^2 H g \sin \theta \quad (11)$$

$$F_{\uparrow} \sim \tau 4LH \quad (12)$$

$$F_{\downarrow} > F_{\uparrow} \Rightarrow \rho L g \sin \theta > 4\tau \quad (13)$$

$$L \geq \frac{4\tau}{\rho g \sin \theta} \rightarrow A \geq \left( \frac{4\tau}{\rho g \sin \theta} \right)^2 \quad (14)$$

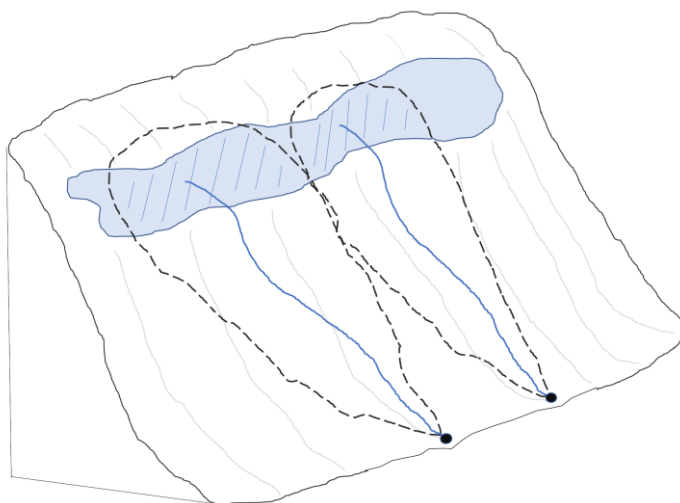
hvor  $F_{\downarrow}$  er drivende krefter og  $F_{\uparrow}$  er motstående krefter.  $\tau$  representerer snøens styrke og avhenger av snøkvalitet og ulike verdier for strekk, kompresjon og tøyning. Om  $L$ , som er lengden av utløsningsområdet, blir liten, må styrken til snøen være veldig lav for at et skred skal utløses.  $\theta$  er helningen til planet,  $H$  er tykkelsen på utløsningsområdet,  $\rho$  er tettheten til snøen.

Det *andre* kravet er at det settes en maksimumsverdi av brukeren lik en standardverdi med en total høydeforskjell på typisk mellom 200 og 500 m. Lange utløsningsområder kan i virkeligheten for eksempel være en renne (Figur 16). Det er derfor viktig å begrense høydeforskjeller for å få realistiske utløsningsområder. Ut fra den valgte terskelen, vil alt nedenfra fjernes til høydedifferansen blir lik den valgte terskelen.

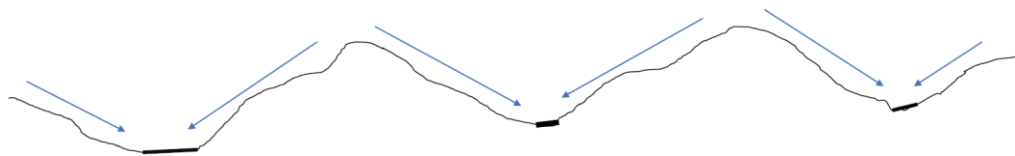


Figur 16: Visuell fremstilling av avgrensning av utløsningsområde. Hvor områder under den valgte terskelen, som i dette eksempelet er satt til 400 m, vil bli fjernet.

Det *tredje* kravet baserer seg på inndeling i dreneringsløp. Fjordstrøk kan ha store strekninger med områder med helning mellom  $30^\circ$  og  $60^\circ$ , og krumning som ikke er stor nok horisontalt til at oppdeling kan skje. Disse områdene har derfor blitt delt inn etter dreneringsløp (Figur 17), hvor det tas utgangspunkt i grensen til kartleggingsområdet, hvor de lokale minimumspunktene (laveste punktene) (Figur 18) er. Dette gir til slutt inndeling etter nedbørsfelt, som bidrar til mer reelle skredstørrelser (Issler et al., under utarbeidelse).



Figur 17: Visuell fremstilling av hvordan lange horisontale utløsningsområder blir delt opp etter dreneringsløp.



Figur 18: Lokale minimumspunkt som inndelingen tar utgangspunkt i.

## Utløsningssannsynlighet

Videre i valg av utløsningsområder beregnes utløsningssannsynligheten, deretter ekskluderes områder med en lavere utløsningssannsynlighet enn den valgte terskelverdien satt av brukeren (forhåndsinnstilt verdi 1/1000 per år). For de gjenværende utløsningsområdene blir den korresponderende bruddhøyden for  $T = 1000$  år estimert, som er viktig inndata for MoT-Voellmy (Issler, 2016).

NAKSIN bruker de meteorologiske og klimatologiske dataene fra [seNorge.no](http://seNorge.no) (NVE, 2019c). Disse dataene er produsert av Norges Meteorologiske institutt ([met.no](http://met.no)). I dataene fra seNorge inngår blant annet gjennomsnittlig temperatur, gjennomsnittlig nedbør, maksimal daglig nedbør med en returperiode på 5 år og gjennomsnittlig maksimum sesong snøhøyde og snøens vannekvivalent (SWE). Dataene er basert på Meteorologisk institutt sine værstasjoner, hvor temperatur – og nedbørsdataene modelleres og interpoleres til et rutenett med en cellestørrelse på  $1 \text{ km}^2$  for hele landet ved bruk av punktobservasjoner. Snødata beregnes av snømodeller (HBV-modellen) som kjøres med værdata (Engeset, 2016).

Gjennomsnittlig vintertemperatur, samt form- og skalaparameterne til nysnøtilvekst og snøhøyde fra ekstremverdi statistikken interpoleres. Sannsynlighetsfordelingen for ekstremverdiene til 3-døgns nysnøtilvekst og snøhøyde følger en generalisert Pareto-fordeling, hvor det antas at parameterne i denne fordelingen kan interpoleres med høyden (for flere detaljer, se Kap. 3.2.4, ligning 31). Form- og skalaparameterne ( $\zeta$  og  $\sigma$ ) beskriver formen til fordelingen, hvor formparameteren beskriver halen til fordeling, mens skalaparameteren representerer spredningen til dataene (Ragulina & Taurisano, 2014). En nedskalering fra  $1 \text{ km}^2$  til DTMs oppløsning ( $10 \text{ m}$ ) er nødvendig, siden store variasjoner blant de klimatiske variablene innad i en  $1 \text{ km}^2$  celle kan forekomme. Det beregnes en regresjonsformel for enhver av de fem parameterne for hele beregningsområdet, ved å bruke alle seNorge-cellene som minst delvis ligger innenfor beregningsområdet. Regresjonskoeffisientene benyttes deretter for å finne verdien av variabelen ved  $TA_0$  (gjennomsnittlig vintertemperatur ved

havnivå) (men også for form- og skalaparameterne,  $\xi$  og  $\sigma$ ), og  $\lambda$  (høydegradient for vintertemperatur) mot den gjennomsnittlige terrenghøyden,  $Z$ , av seNorge-gridcellene. Er høydeforskjellen i et gitt beregningsområde liten, vil dataene ikke bli interpolert med høyden og en fast verdi fra seNorge blir benyttet (Busengdal & Issler, 2018).

$$TA(Z) = TA_0 + \lambda_{TA} \cdot Z \quad (15)$$

Ved anvendelse av skogsdata i beregning av utløsningssannsynlighet vil en videre eliminering av potensielle utløsningsområder forekomme, samt utløsningssannsynligheten til potensielle utløsningsområder vil bli redusert. Skogsdataene er representert via kartet SAT-SKOG (NIBIO, 2010), som gir oversikt over treslag, alder og volum og er publisert av Norsk institutt for skog og landskap (NIBIO). I forbindelse med NAKSIN trenger man  $n$  og  $D$ , som er gjennomsnittlig antall trær per  $m^2$  og gjennomsnittlig stammediameter. Disse variablene finnes ikke i SAT-SKOG, men må beregnes ut fra det som eksisterer i grunnlagsdatasettet (Gauer, 2016). Grunnlagsdatasettet består av skogvariabler (volum, treslag, alder) som benyttes til å beregne  $n$  og  $D$ .

Kvaliteten til grunnlagsdatasettet er en viktig faktor for utløsningssannsynligheten. SAT-SKOG er ikke av ypperste kvalitet, men i store deler av landet er det det eneste datasettet som i dag er tilgjengelig (Gauer, 2016). For utvalgte områder (Trøndelag og Østlandet) er nye datasett publisert (SR16), som ser ut til å ha en større nøyaktighet. SR16-dataene (NIBIO, 2015) er basert på kronedekningen, hvor utløsningsområder vil bli ekskludert hvis (Busengdal & Issler, 2018):

$$CC(i \text{ prosent}) > 60 + 40 \cdot ((\text{skråning}/30) - 1) \quad (16)$$

Det kreves minimum 60% kronedekning ved 30° helning for at skredutløsning skal bli utelukket. Terskelen øker til 80% ved 45° og 100 % ved 60°.

Målinger av snøtrykk på støtteforbygninger førte frem til den empiriske ligningen av den effektive skjærstyrken når skog er implementert (Ancey & Bain, 2015; Haefeli, 1939; Margreth, 2007) og forenklet av Issler et al. (under utarbeidelse) til:

$$\tau_f = nD\rho_S g H_S^2 \left( 0.8 + 1.2 \frac{H_S}{D} \right) \sin(2\theta), \quad (17)$$

hvor  $n$  er produktet av gjennomsnittlig antall trær per  $m^2$  og  $D$  er den gjennomsnittlige stammediameteren til trærne.  $\rho_s$  og  $H_S$  er henholdsvis tettheten ( $kg/m^3$ ) og snøhøyden (m) til den gamle snøen.  $\theta$  er terrenghelning.

### Bruddhøyde for $T = 1000$ år

NAKSIN baserer seg på en enkel fremstilling hvor skråningen er tilnærmet uendelig og snøpakken fremstilles forenklet med et svakt lag. Bruddkriteriet i NAKSIN avhenger av helning, skjærstyrke og last pga. gammel snø ovenfor det svake laget samt nysnø. Det svake laget er lokalisert med en avstand  $\alpha H_S$  fra overflaten av den gamle og nye snøen (Figur 19). Skjærspenningen ( $\tau_s$ ) i det svake laget er gitt ved (Issler et al., under utarbeidelse):

$$\tau_s = (\alpha H_S \rho_S + H_N \rho_N) g \cdot \sin \theta \cos \theta \quad (18)$$

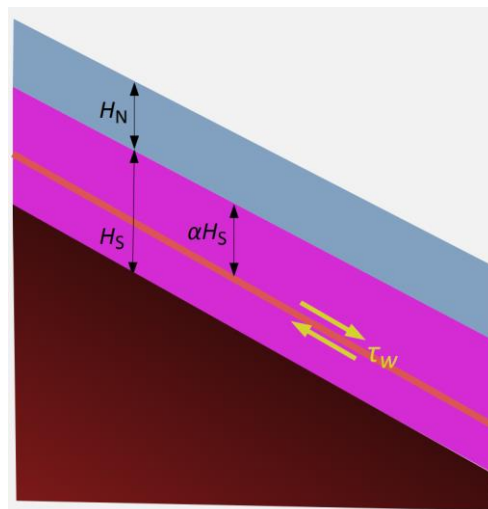
$H_S$  og  $H_N$  er henholdsvis gammel og ny snøhøyde.  $\rho_S$  og  $\rho_N$  er tetthetene til de to lagene og er gitt ved (Issler et al., under utarbeidelse):

$$\rho_S(TA) = \text{maks}[200, \text{min}(400, 320 + 20^\circ C \cdot TA)] \text{ kgm}^{-3} \quad (19)$$

$200 \text{ kg/m}^3$  er i utgangspunktet satt til å være referanseverdien ved  $-6^\circ C$  og  $400 \text{ kg/m}^3$  ved  $+4^\circ C$ .  $TA$  er gjennomsnittlig vintertemperatur.

Tettheten i nysnø er antatt å være mindre enn i det gamle laget:

$$\rho_N(TA) = 0.5 \rho_S(TA) \quad (20)$$



Figur 19: En forenklet snøpakkestruktur er antatt for beregning av utløsningssannsynligheten i NAKSIN.  $H_S$  og  $H_N$  er henholdsvis gammel og ny snøhøyde,  $\tau_w$  er skjærstyrken til det svake laget, som ligger  $\alpha H_S$  under overflaten til det gamle snødekket (Issler et al., 2018).

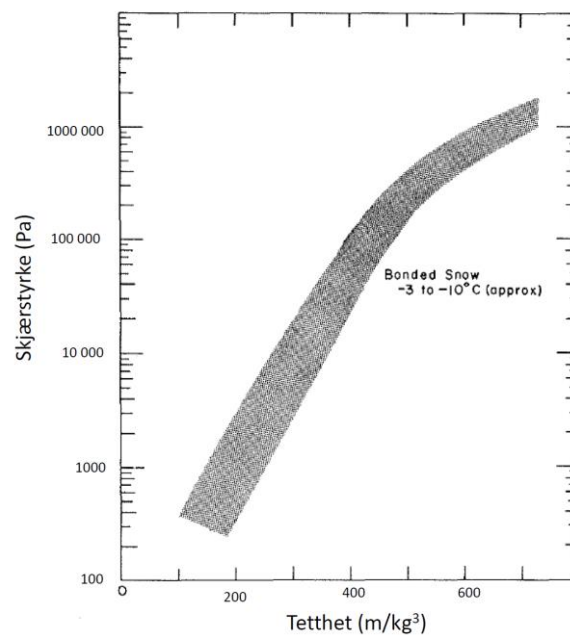
Flere målinger viser at skjærstyrken til det svake laget øker eksponentielt med tettheten ved konstant temperatur (Figur 20) (Mellor, 1975), og avtar med økende temperatur ved konstant tetthet (Mellor & Smith, 1966). Disse to tendensene er kombinert til:

$$\tau_w(\rho_w, TA) \approx \tau_w(-10^\circ\text{C}) e^{\frac{\rho_w - 200.0 \text{ kg/m}^3}{\rho_r}} \cdot \left(0.41 + 1.73 \cdot 10^{\frac{4.76^\circ\text{C}}{TA}}\right) \quad (21)$$

Tettheten til det svake laget ( $\rho_w$ ) er antatt å være mindre enn tettheten til det gamle snølaget ( $\rho_s$ ). Grunnet mangel på spesifikke data, er tettheten til det svake laget ( $\rho_w$ ) empirisk satt til  $\rho_w = 0.80\rho_s$ . Temperaturen til snøpakken er gitt ved  $T = \min(-0.1^\circ\text{C}, TA)$ .  $TA$  er den gjennomsnittlige vintertemperaturen i luften.  $\tau_r = \tau_w(200 \text{ kg/m}^3, -10^\circ\text{C})$  er skjærstyrkens referanseverdi ved  $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$  og referansetemperatur  $-10^\circ\text{C}$ , samt er  $1/\rho_r$  stigningstallet hentet fra arbeidet til Mellor (1975) (Figur 20) (Issler et al., under utarbeidelse). Det siste leddet i ligningen for skjærstyrken til det svake laget baseres på studier utført av Mellor og Smith (1966) og omskrevet av Issler et al. (under utarbeidelse):

$$\tau_T = 0.41 + 1.73 \cdot 10^{\frac{4.76^\circ\text{C}}{TA}} \quad (22)$$

Tallet 0.41 er den empiriske verdien av forholdet  $\frac{\tau_0}{\tau_{-10}}$ , der  $\tau_0$  og  $\tau_{-10}$  er henholdsvis skjærstyrken i det svake laget ved  $0^\circ\text{C}$  og  $-10^\circ\text{C}$ .  $\tau_T$  er skjærstyrken ved hvilken som helst temperatur,  $TA$ , under  $0^\circ\text{C}$ .



Figur 20: Viser forholdet mellom skjærstyrken (Pa) til et svakt lag og tettheten ( $\text{m/kg}^3$ ). Hentet fra fig.18 i arbeidet til Mellor (1975).

Brudd vil oppstå når skjærspenningen ( $\tau_s$ ) i det svake laget er lik eller overgår skjærstyrken ( $\tau_w$ ) til det svake laget.

$$\Theta\left(1 - \frac{\tau_w}{\tau_s}\right) = \begin{cases} 1, & \text{hvis } \tau_w < \tau_s \text{ (Brudd)} \\ 0, & \text{hvis } \tau_w > \tau_s \text{ (Stabilt)} \end{cases} \quad (23)$$

Tilveksten av nysnø sees over en periode på 3 dager. Om tilveksten av nysnø er stor nok, vil brudd oppstå som oftest før det slutter å snø. Bruddhøyden ( $d_0$ ) er bestemt av:

$$d_0 = \frac{\tau_w}{\rho_N g \sin \theta} - \alpha H_S \left(\frac{\rho_S}{\rho_N} - 1\right) \cos \theta \quad (24)$$

Dette fører til en probabilistisk tilnærming for utløsning av skred. Den tar for seg fordelingsfunksjonene til nysnøtilvekst, gammel snøhøyde, skjærspenning og posisjon av det svake laget. Utløsningssannsynligheten er dermed gitt ved (Issler et al., under utarbeidelse):

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{A,i} = & \int_0^{H_{N,maks}} \int_0^{H_{S,maks}} \int_{\tau_{w,min}}^{\tau_{w,maks}} \int_0^1 \Theta\left(1 - \frac{\tau_w}{\tau_s(H_S, H_N, \alpha)}\right) \\ & \times p_4(\alpha) d\alpha p_3(\tau_w) d\tau_w p_2(H_S) dH_S \tilde{p}_1(H_N) dH_N \end{aligned} \quad (25)$$

Om man kjenner fordelingsfunksjonene til de stokastiske variablene, kan utløsningssannsynligheten av de gjenværende utløsningsområdene beregnes med hjelp av Monte Carlo-metoden. Denne tilnærmingen baserer seg på ekstremt mange gjentatte forsøk per utløsningsområde (med fire variabler minst  $10^4$ ) som evaluerer snødekkets stabilitet ved verdier av  $\alpha$ ,  $\tau_w$ ,  $H_S$  og  $H_N$  som er generert tilfeldig med de valgte sannsynlighetsfordelingene. Det antas at  $\alpha$  har en uniform fordeling,  $\tau_w$  en log-normal fordeling, mens  $H_S$  og  $H_N$  har en generalisert Pareto-fordeling. Dersom bruddsannsynligheten er større enn en terskelverdi, simuleres utløpet av skredet med beregningsprogrammet MoT-Voellmy. Grunnet forankringskreftene trær har, kan skog innlemmes i beregningen av utløsningssannsynligheten for skred ved å legge til den effektive skjærstyrken,  $\tau_f$ , til det svake laget sin skjærstyrke,  $\tau_w$  (Issler et al., under utarbeidelse).



## 2.4.2 Forenklinger

Det vil alltid bli gjort antakelser og forenklinger ved utvikling av verktøy som skal representere virkeligheten. Et verktøy som NAKSIN vil bestå av kompleksitet som er vanskelig å løse numerisk. Mangel på kunnskap og for stor matematisk kompleksitet har gjort at NAKSIN inneholder flere antagelser og forenklinger. En sentral forenkling i NAKSIN tar utgangspunkt i at skråningen er tilnærmet uendelig og snøpakken fremstilles med ett svakt lag. Noen parametere er empirisk satt grunnet mangel på data.

## 2.4.3 Begrensinger

Dagens simuleringsmodeller inkluderer ikke snøskyproblematikken. Snøskyer kan gå langt over antatte aktsomhetssoner og kan utøve store skader på byggverk. Effekten av vind kan føre til stor fortetning av snøen i skråninger i le for vinden, som ofte er foretrukne utløsningsområder. Områder som akkumulerer store mengder snø grunnet snødrift, kan få estimert for små bruddhøyder, og beregningen av skred kan bli utelukket eller at de ikke når sitt fulle potensial når det kommer til utløpsområde. At NAKSIN ikke inkluderer effekten av vind utgjør derfor en av begrensingene til modellen.

## 3 Metoder

Metodekapittelet gir en innføring i hvordan valideringen av MoT-Voellmy og NAKSIN har blitt utført.

### 3.1 Validering av MoT-Voellmy

Det ble utført en validering av MoT-Voellmy for å dokumentere at programmet er egnet til sitt formål, og for å avdekke potensielle numeriske problem. Valideringen av MoT-Voellmy består av følgende steg:

1. Systematisk studie av hvordan resultatet (utløpsdistanse, flythøyde og maksimal hastighet) avhenger av grid-oppløsningen. Dette utføres i enkel topografi modellert som et skråplan.
2. Sammenligning mellom modellerte og teoretisk beregnede verdier for terminalhastighet på et skråplan.
3. Systematisk studie av effekten medrivning har på dynamikken til skredet.
4. Sammenligning mellom simuleringsprogrammene RAMMS og MoT-Voellmy i utvalgte studieområder.

For de tre første valideringsstegene ble tilhørende inndata, som kreves for simulering, programmert og utarbeidet i programmet GNU Octave 4.4.1 (GNU, 2018).

For steg 4 var de fleste inndataene allerede utarbeidet, bortsett fra noen få filer, som ble utarbeidet i ArcGIS Pro 2.1.2 (Esri, 2018). Samtlige filer var originalt i raster-format, og måtte prosesseres til riktig format for å leses av RAMMS og MoT-Voellmy.

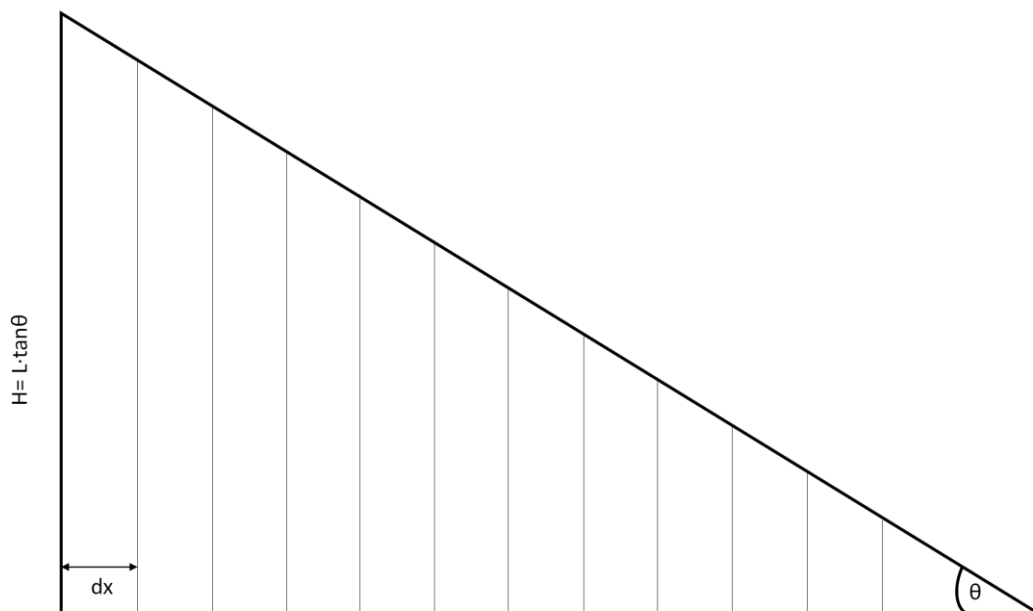
For å kunne utføre simuleringer i MoT-Voellmy krever programmet inndata i ESRI ASCII Grid-format (.asc) som representerer terrenget (DTM) og utløsningsområdet, med spesifisert bruddhøyde. MoT-Voellmy har også en implementert skog- og medrivningsmodell og krever filer som definerer skogens tetthet ( $nD$ ), mens medrivningsmodellen krever filer for skjærstyrke og eroderbar snøhøyde.

For at simuleringer skal utføres i MoT-Voellmy, kreves det utarbeidelse av en styringsfil. I den utarbeidede styringsfilen spesifiseres fillokasjonen for de utarbeidede inndataene og innparameterne tallfestes. I styringsfilen kan det velges om friksjonskoeffisientene skal

simuleres med konstante eller varierende verdier. Ved valg av varierende friksjonskoeffisienter må de utarbeidede verdienes ( $\mu$  og  $k$ ) fillokasjon spesifiseres.

### 3.1.1 Modellering langs et skråplan

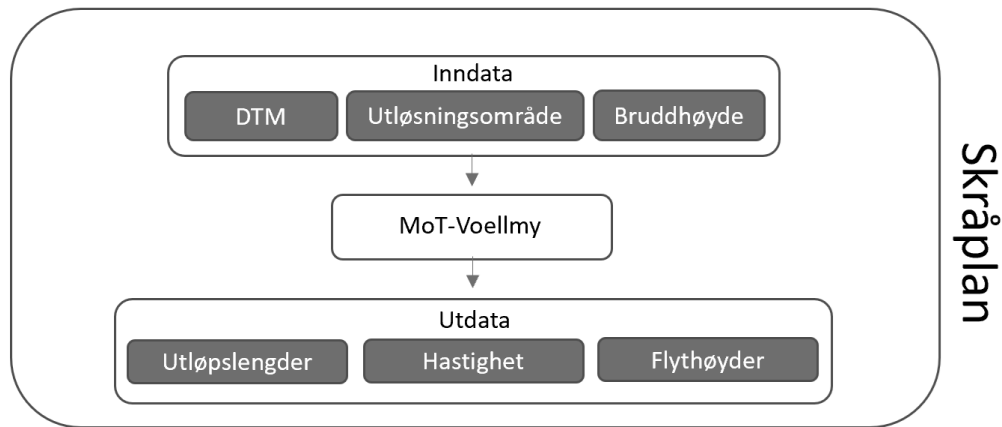
For å analysere hvordan resultatet avhenger av grid-oppløsningen ble en systematisk studie utført på en idealisert skredbane formet som et tilnærmet uendelig skråplan (Figur 21). En digital terrengmodell (DTM) ble programmert med grid-oppløsninger på 1, 2, 5, 10 og 20 m (Figur 21). Dette skråplanet hadde en Ø-V-akse på 10 000 m og N-S-akse på 500 m med en helning fra horisontalplanet på  $30^\circ$ . I tillegg ble et utløsningsområde på  $100 \times 100$  m med en bruddhøyde på 1.0 m, målt vinkelrett på planet, programmert med oppløsninger på 1, 2, 5, 10 og 20 m. Friksjonskoeffisientene  $\mu$  og  $k$  (Coulomb friksjon:  $\mu$  og den hastighetsavhengige turbulent-friksjonen:  $k = g/\zeta$ ) ble holdt konstant på henholdsvis 0.4 og 0.001 ( $\zeta = 9810 \text{ m/s}^2$ ), mens simuleringenes oppløsning ble testet med 1, 2, 5, 10 og 20 m. Resultatet (modellert utløpslengde for flythøyden ( $>5 \text{ cm}$ ), hastighet og avsetning (flythøyde)) fra simuleringene med ulike oppløsninger ble deretter sammenlignet (Figur 22). Det ble også utført en sammenligning mellom simulert hastighet og teoretisk hastighet.



Figur 21: Prinsippkisse over skråplanet.  $dx$  representerer oppløsningen og ble variert mellom 1 og 20 m.  $H = L \cdot \tan \theta$ , hvor  $\theta = 30^\circ$  og  $L$  er lengden av skråplanet (10 000 m).

Bestemmelsen av oppløsning ble også utført ved å utføre simuleringer i en reell topografisk skredbane. Ved bruk av GIS, ble filer for utløsningsområdet utarbeidet for et tilfeldig valgt studieområde og spesifisert i styringsfilen til MoT-Voellmy. Simuleringene i den reelle

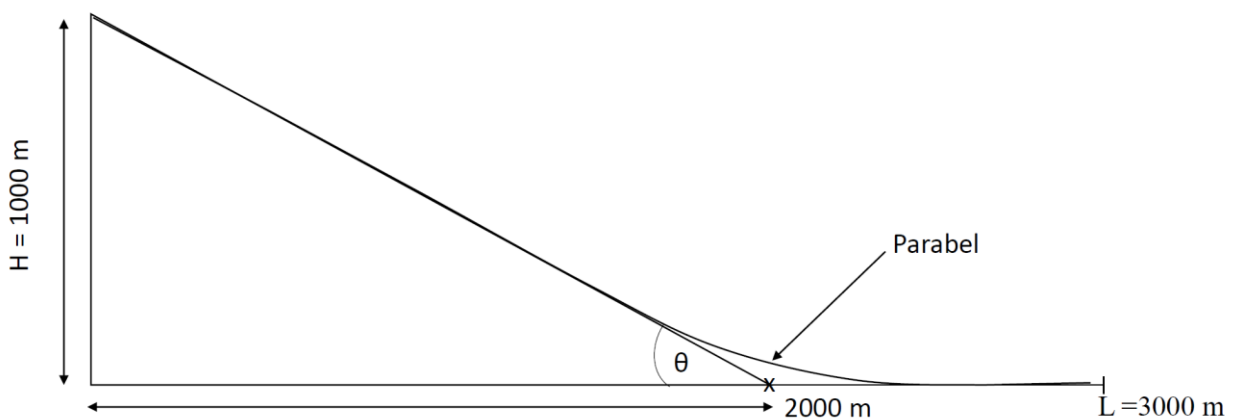
topografiske skredbanen ble kjørt med de samme betingelsene som for det teoretiske skråplanet. Utløpsdistansen fra simuleringresultatet (utført med ulike oppløsninger) ble sammenlignet.



Figur 22: Flytdiagram over inn- og utdata i MoT-Voellmy som brukes i steg 1 og 2 av valideringen.

### 3.1.2 Modellering i skredbane med 'Hockeystick'-form

Hovedproblemet ved utførelsen av en recalibrering av friksjonskoeffisientene for medrivning i snøskredmodeller er at det ikke eksisterer nok datagrunnlag for å kunne si noe om den eroderte massen og snøegenskapene (høyde, tetthet og skjærstyrke). For å modifisere standard kalibrering av modellen for medrivning, ble en systematisk studie utført på en idealisert skredbane formet som en 'hockeystick' (Figur 23). Den idealiserte skredbanen ble utformet med en grid-oppløsning på 5 m og en Ø-V-akse med lengde 3000 m samt en N-S-akse med lengde 500 m. Fallhøyden ble satt til 1000 m, parabolisk avbøyning ved 2000 m og en helning satt til  $\theta \approx 26^\circ$ . Dette utgjør tilsammen terrengmodellen. Et tilhørende utløsningsområde på 100x100 m ble programmert med en bruddhøyde på 1.0 m, målt vinkelrett på planet.



Figur 23: Prinsippkisse av hockeystick med parabolisk avbøyning.

For å kunne utarbeide friksjonskoeffisienter for medrivning, ble det utarbeidet et sett med simuleringer uten medrivning. Disse skredene ble videre brukt for tilbakeberegningen av skredene med medrivning.

For utførelsen av simuleringer med medrivning trenger medrivningsmodellen (IsJo) filer for den eroderbare snøhøyden ( $m$ ) og skjærstyrken ( $\tau_w$ ) (Figur 24). Filer for den karakteristiske skjærstyrken for snølaget og den eroderbare snøhøyden ble programmert med en oppløsning på 5 m, hvor skjærstyrken ( $\tau_w$ ) ble satt til  $< \rho gh \cdot \sin\theta$ , hvor  $\rho$  er tettheten til snøen,  $g$  er tyngdeakselerasjonen og  $\theta$  er helningen til planet.

Som nevnt i teori (Kap. 2.3.1) vil skjærstyrken øke når tyngden av skredet presser på. Denne effekten var forhåndsinnstilt til  $\mu_s = 0.25$ , som betyr at om skjærstyrken settes til 500 Pa, vil den effektive skjærstyrken være  $\sim 1000$  Pa. En forenkling ble utført ved å sette  $\mu_s = 0$ .

Skjærstyrken ble systematisk variert sammen med friksjonskoeffisientene  $\mu$  og  $k$  (Coulomb friksjon:  $\mu$  og den hastighetsavhengige turbulent-friksjonen:  $k = g/\zeta$ ). Hensikten med simuleringene var å bestemme standard kalibreringen for medrivning av MoT-Voellmy. Dette ble gjort ved å ta utgangspunkt i RAMMS sine friksjonskoeffisienter. Valget av verdiene til  $\mu$  og  $k$  ble derfor basert på anbefalte verdier utgitt av SLF (Bartelt et al., 2017).

Friksjonskoeffisienten ( $\mu$ ) ble satt til verdier på 0.15, 0.20, 0.30 og 0.40.

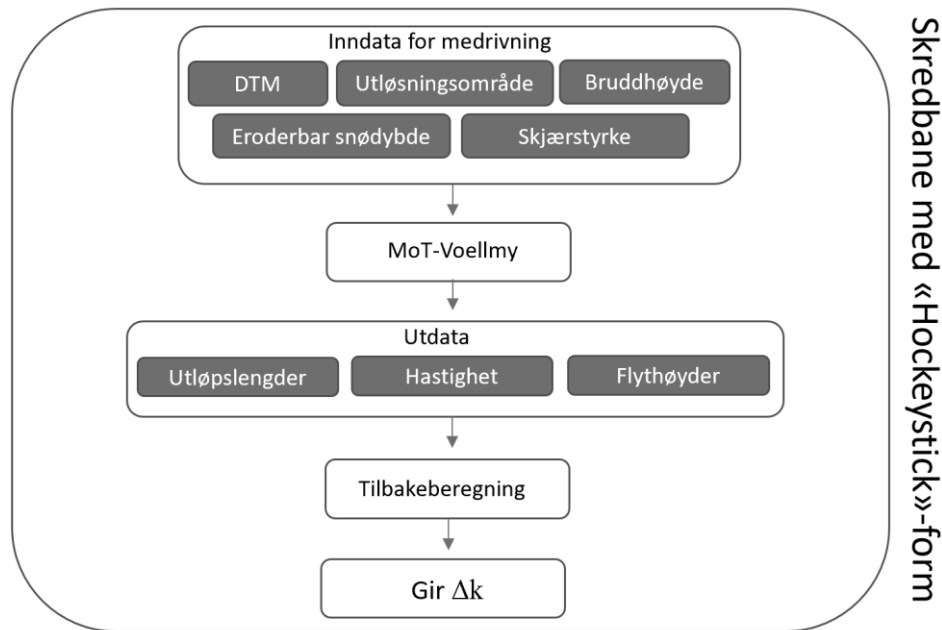
Turbulenskoeffisienten ( $k=g/\zeta$ ) ble variert mellom 0.001 og 0.004, i steg på 0.001.

For å kontrollere utviklingen av medrivning ble tidssteget som representerte maksimal hastighet ( $u$ ) valgt med tilsvarende tidssteg for flythøyden ( $h$ ). For at snødekket skulle eroderes måtte skjærspenningen ( $\tau_s$ ) fra skredet overskride snøens skjærstyrke ( $\tau_w$ ). Erosjonsraten er null så lenge skjærspenningen ( $\tau_s$ ) er mindre enn skjærstyrken ( $\tau_w$ ):

$$\tau_s = \rho(\mu gh \cos \theta + ku^2) < \tau_w \quad (26)$$

hvor  $\rho$  er tettheten til snøen,  $\mu$  er Coulomb-friksjon,  $\theta$  er helningen til planet og  $k$  er den hastighetsavhengige turbulent-koeffisienten.

I de tilfellene  $\tau_s$  ga positive verdier, tilsvarte det simulering med medrivning. For å finne beste tilpasning av Voellmy-friksjonskoeffisientene for simuleringene med medrivning ble det utført en stegvis endring av  $k$ . Dette ble utført til utløpsdistansen med- og uten medrivning ble lik (Figur 24).  $\mu$  ble holdt konstant.



Figur 24: Flytskjemaet omhandler recalibreringen av friksjonsparametere for medrivning. Gir en grov oversikt over inn- og utdataene for simulering med medrivning.

### 3.1.3 Sammenligning av RAMMS og MoT-Voellmy

RAMMS og MoT-Voellmy ble sammenlignet for å vurdere hvordan MoT-Voellmy håndterer skred i komplekst terreng. Målet var å tilbakeberegne to utvalgte og veldokumenterte skredhendelser i RAMMS og MoT-Voellmy, og deretter sammenligne dem.

Skredhendelsene i Makunosawa i Japan (2008) og Rigopiano i Italia (2017) ble valgt for tilbakeberegningen. Begge skredhendelsene ødela store mengder skog, noe som måtte tas hensyn til i simuleringene, men modellen RAMMS skiller kun mellom skog/ikke skog. Basert på informasjon fra flyfoto ble det i GIS utarbeidet en klassifisering av skogen (skog/ikke skog) i og rundt skredbanen før skredhendelsene inntraff. For Makunosawa var utløsningsområdet allerede utarbeidet, mens for Rigopiano-hendelsen ble et utløsningsområde utarbeidet basert på beskrivelse fra befæringsrapporten (Issler, 2018) og terrengformasjoner fra bakgrunnskart. Den benyttede kommersielle versjonen av RAMMS inkluderer ikke medrivning, noe som ble kompensert for ved å øke utløsningsvolumet. Terrengmodell med en oppløsning på 10x10 m<sup>2</sup>, samt høydelinjer og bakgrunnskart var allerede utarbeidet for begge skredhendelsene.

Skredene ble simulert i RAMMS med varierende friksjonskoeffisienter, som blir automatisk utarbeidet basert på returperiode, skredvolum, høyde over havet og terrengformasjoner (åpent,

kanalisert, gjel og flatt område), samt skogsinformasjon. Friksjonskoeffisientene tar utgangspunkt i de anbefalte verdiene gitt av SLF og bestemmes ved å angi størrelse (veldig lite, lite, middels og stort) og returperiode (10, 30, 100 og 300 år) (Bartelt et al., 2017; Christen et al., 2010a). For å oppnå et simuleringsresultat som ga en god tilnærming av de beskrevne detaljene fra skredhendelsene, ble friksjonskoeffisienten ( $\mu$ ) systematisk redusert med 0.02 og turbulenskoeffisienten ( $\zeta$ ) økt med 200 m/s<sup>2</sup> i forhold til de anbefalte verdiene fra RAMMS. De estimerte verdiene for bruddhøyde og utløsningsvolum var henholdsvis 1.5 m og 100000-200000 m<sup>3</sup> for Makunosawa og 1.25-2.0 m og 75000-160000 m<sup>3</sup> ved Rigopiano.

For å kunne utføre en akseptabel sammenligning av modellene måtte skredhendelsene simuleres med like betingelser. Utdataene fra tilbakeberegningen av skredhendelsene i RAMMS, bestående av  $\mu$  og  $\zeta$  (hvor  $\zeta$  må konverteres til  $k=g/\zeta$ ), ble derfor brukt i MoT-Voellmy.

Grunnet lite informasjon om hastighet og punktopplysning for flythøyden i terrenget fra hendelsene, ble det fokusert på hvordan modellene løser problemer i komplekst terreng.

## 3.2 Validering av NAKSIN

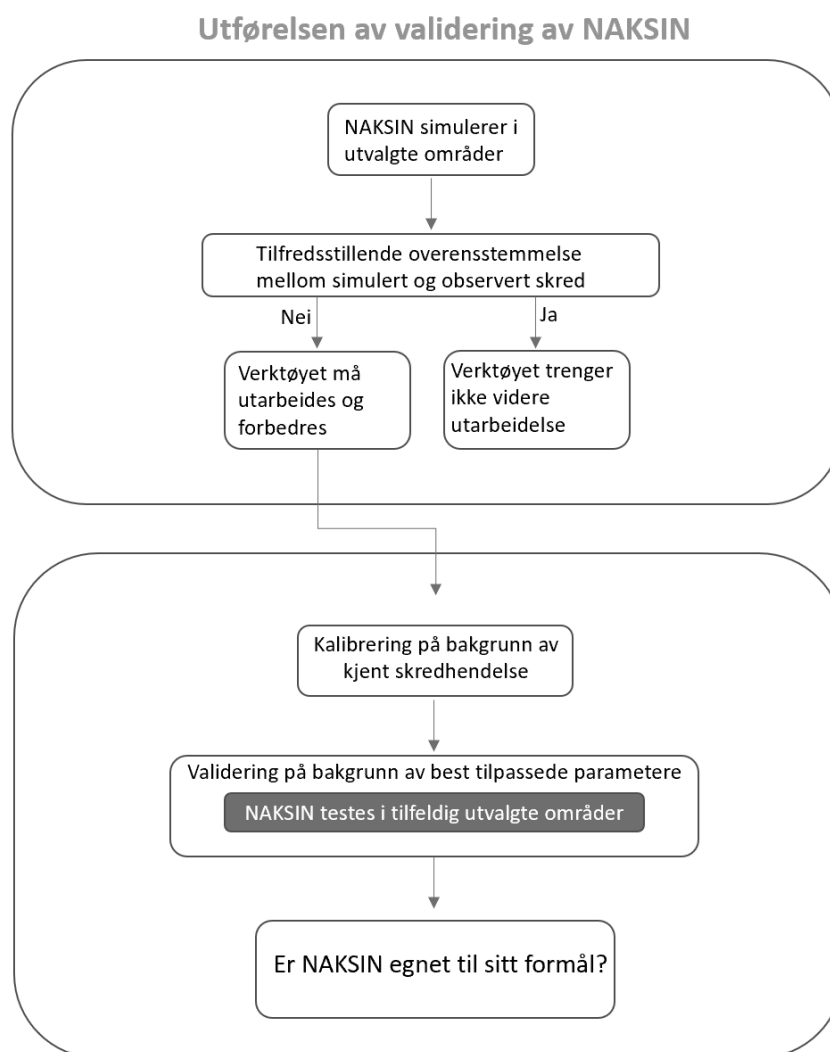
For kjøring av NAKSIN kreves et sett med Python-3 moduler, simuleringsmodellen MoT-Voellmy, en tabell over anbefalte verdier for  $\mu$  og  $k$ , samt en mal for å lage styringsfiler. For hver kjøring må det i styringsfilen spesifiseres av brukeren hvilket område som skal kartlegges, stien til mappene med topografiske data, klimadata og skogsdata. I tillegg må det velges returperiode, maksimalutløsningsområde og hvor stor buffersone som skal klippes. En mer detaljert beskrivelse av styringsfilen og oppsett for kjøring av NAKSIN er presentert i vedlegg D.

Målet med oppgaven var å få testet modellen grundig mot detaljkartlegging, samt bidra til forbedringer der testing viste at dette var nødvendig. Dette gjør det mulig å vurdere modellens pålitelighet. De simulerte utløpslengdene som utgjør aktsomhetssonen sammenlignes med de nåværende aktsomhetskartene, historisk informasjon, skredobservasjoner, flyfoto og detaljkartlegging. Dette ble brukt for å si noe om plausibiliteten til modellen.

Faresonekartlegging blir heretter brukt som en samlebetegnelse for detaljkartlegging, med bruk av historisk informasjon, skredobservasjoner og flyfoto når simuleringsresultat for et område skal evalueres.

Valideringen omfatter følgende fem steg (Figur 25):

1. Verifikasjon av modellen, - fungerer modellen, er den numeriske løsningen korrekt?
2. Systematisk kalibrering på bakgrunn av kjent skredhendelse.
3. Systematisk sensitivitetsanalyse.
4. Validering ved bruk av utvalgte områder med detaljinformasjon fra faresonekartlegging.
5. Test av hvor god den valgte lineære interpoleringsmetoden for parameterne av fordelingsfunksjonen for nedbør er.



Figur 25: Grovt skissert flytdiagram over valideringsprosessen av NAKSIN.



### 3.2.1 Verifikasjon av modellen

Det første steget i verifikasjonen var å verifisere NAKSIN med de forhåndsinnstilte parameterne. Det ble utført tre grunntester for å undersøke om NAKSIN var egnet til sitt formål. Den første grunntesten besto av simuleringer med de forhåndsinnstilte parameterne for å avdekke problemer og sjekke om de fastsatte verdiene var korrekte. De fastsatte verdiene i NAKSIN gitt ved referanseskjærstyrke  $\tau_r = 2500$  Pa, tettheten til det gamle snølaget  $\rho_s = 200$  kg/m<sup>3</sup> ved en temperatur på -6°C og 400 kg/m<sup>3</sup> ved +4°C. De beregnede skredutløpene ble sammenlignet med detaljinformasjon fra utført faresonekartlegging.

I den andre grunntesten ble referanseskjærstyrken ( $\tau_r$ ) i utvalgte områder variert mellom 1500 til 2500 Pa. Det ble valgt ut et område for å representere maritimt klima og et for kontinentalt klima. Grunntesten ble utført for å fastsette hvilke skjærstyrkeintervaller de ulike klimatypene passer best til. Simuleringsresultatet ble evaluert iht. tidligere utført faresonekartlegging for hvert område.

SR16-data er utarbeidet for Sør-Trøndelag, og simuleringer ble utført i NAKSIN med skogdatasettet SR16 for Gauldalen, og utgjør den tredje grunntesten. Dette ble gjort for å se hvilken effekt skogen har på simuleringsresultatet. Valget av Gauldalen ble basert på at dalen har et bratt ravineterreng, som er bratt nok for at skred vil oppstå om skog ikke er inkludert. Gauldalen har tett granskog.

### 3.2.2 Fastsetting av grunnleggende verdier

Det ble valgt å vurdere de parameterne og variablene som har størst innvirkning på resultatet av NAKSIN. Stigningstallet som inngår i funksjonen til skjærstyrken (Ligning 21) ble bestemt basert på forholdet mellom skjærstyrke og tetthet, publisert av Mellor (1975) (Figur 20). Opprinnelig verdi i NAKSIN var avlest til  $1/\rho_r = 0.014$  m<sup>3</sup>/kg og de nye maksimum- og minimumsverdiene for  $1/\rho_r$  er henholdsvis 0.019 m<sup>3</sup>/kg og 0.021 m<sup>3</sup>/kg.

Oppdelingen av utløsningsområdene ble også testet. Størrelsen på det maksimale utløsningsområdet, kan endres i parameterfilen. Det ble testet med arealer på 1 million m<sup>2</sup>, 300 000 m<sup>2</sup> og 100 000 m<sup>2</sup>. Ved et utløsningsområde på 100 000 m<sup>2</sup> vil inndelingen skje etter de lokale nedbørsfeltene (Figur 17 og Figur 18). Ved å sette utløsningsområdet til 300 000 m<sup>2</sup> eller 1 million m<sup>2</sup> vil utløsningsvolumet bli større som medfører lavere verdier for

friksjonskoeffisienten  $\mu$  (Tabell 1). Videre simulering ble kjørt med stigningstall  $0.020 \text{ m}^3/\text{kg}$  og  $300\,000 \text{ m}^2$  som maksimalt utløsningsområde.

### 3.2.3 Kalibrering av NAKSIN

Det store antallet av parametere og variabler i en modell som NAKSIN gjør parameterbestemmelsen av slike modeller kompleks. For å gjennomføre en objektiv bestemmelsesprosess av parametere, bør det utføres en kvantifisering av simuleringsresultatet. Valg av fremgangsmåte for kvantifisering av simuleringsresultat kan resultere i ulike svar basert på anvendt metode. Valgt metode for kalibrering av NAKSIN beskrives nedenfor.

#### Valg av best tilpassede parametere for NAKSIN

For valg av best tilpassede parametere for NAKSIN, ble en systematisk kalibrering gjennomført i *ett* utvalgt område, hvor referanseskjærstyrken ( $\tau_r$ ) og tettheten ( $\rho_s$ ) til gammel snø (Ligning 21 og 19) ble systematisk variert til simulert skred ga god overensstemmelse med observerte skred. Referanseskjærstyrken ble testet fra 1800 til 2100 Pa. For kvantifisering av simuleringsresultatet ble vurderingskriteriene utløpslengde og returperiode sammenlignet mot skredhendelsen i 2008. Fremgangsmetoden for uthenting av utløpslengden ble utført ved å måle den horisontale utløpsdistansen fra et valgt punkt i bakkant av utløsningsområdet og ut til lengste utløpslengde. Utløpslengden med minste prosentvise avvik fra observert skred utgjorde de best tilpassede parameterne (Ligning 27).

$$\Delta \text{Utløpslengde (\%)} = \frac{\text{Utløpslengde}_{\text{simulert}} - \text{Utløpslengde}_{\text{observert}}}{\text{Utløpslengde}_{\text{observert}}} * 100 \quad (27)$$

Resultatet ble videre brukt til validering av NAKSIN. Før valideringen av NAKSIN ble det utført en sensitivitetsanalyse av resultatet fra kalibreringen. Modulen *release\_prob*, som beregner utløsningssannsynligheten, ble gjennomgått. En av ligningene modulen inneholder er tettheten til det svake laget,  $\rho_w$ .  $\rho_w$  er antatt å være signifikant mindre enn tettheten i den gamle snøen,  $\rho_s$ .

$$\rho_w = 0.80\rho_s \quad (28)$$

Konstanten 0.80 er ikke forankret i noen teori, men er empirisk satt. En sensitivitetsanalyse av parameteren  $\rho_w$  ble utført ved tre utvalgte områder, hvor  $\rho_w$  ble testet med 0.79, 0.80, 0.81 og 0.82. Vurderingskriteriene for valg av  $\rho_w$  ble basert på utløpslengde sammenlignet med kartlagt 1000-årssone, samt om snøfattige områder fikk skred eller ikke.

Resultatet fra kalibreringen og sensitivitetstesting ble deretter brukt i valideringen ved bruk av tilfeldig utvalgte områder. De utvalgte områdene representerte maritimt og kontinentalt klima, samt områder med liten og stor forskjell i fallhøyde (H/L). Detaljinformasjon fra faresonekartlegging ble brukt til evalueringen av simuleringsresultatet.

Fremgangsmåten for vurderingen av resultatet fra sensitivitetsanalysen og valideringen ble utført ved å anvende en kvalitativ vurdering av de visuelle fremstillingene.

Om den utførte valideringen av NAKSIN viste seg å ha ‘problematisk område’, i form av at skred ikke ble generert, ble en kalibrering av dette området utført til et nytt parametersett ble funnet og som genererte skred. En simuleringstest i NAKSIN med det foreslåtte parametersettet for området ble også utført for utvalgte valideringsområder.

### 3.2.4 Test av anvendt interpoleringsmetode

NAKSIN er basert på blant annet antakelsen om at parameterne som beskriver fordelingsfunksjonen snøhøyde og 3-døgns nysnøtilvekst er antatt å variere lineært med høyden over havet. Den lineære høydeinterpoleringen av Pareto-parameterne til snøhøyden; skala og form, ble plottet og resultatet ble sammenlignet med forventet klimastatistikk for de valgte områdene. Dette kunne bidra til å si noe om valget av anvendt interpoleringsmetode (interpoleringen av temperatur mot terrenghøyden så ut til å ha god overensstemmelse).

Plottingen av fordelingen ble utført ved at ulike referanseverdier for terrenghøyde (mellom 4-8 referanseverdier) ble valgt ut. Utvalget besto av den laveste og høyeste terrenghøyden, samt utvalgte høyder mellom. Referanseverdiene for terrenghøyden ( $Z$ ) ble deretter satt inn i ligningene til den lineære høydeinterpoleringen av snøhøydens Pareto-parametere:

$$Skala_{H_s, maks} = \sigma_{H_s,0} + \lambda_{\sigma_{H_s}} \cdot Z \quad (29)$$

$$Form_{H_s, maks} = \xi_{H_s,0} + \lambda_{\xi_{H_s}} \cdot Z \quad (30)$$

$\sigma_{H_s,0}$  og  $\xi_{H_s,0}$  angir havnivåverdi,  $\lambda_{\sigma_{H_s}}$  og  $\lambda_{\xi_{H_s}}$  er høydegradient, og  $Z$  er terrenghøyden.

De interpolerte skala- og formparameterne for maksimal snøhøyde ble videre brukt i Paretofordelingen ( $P(x)$ ), og ble angitt henholdsvis som  $\sigma$  og  $\xi$ :

$$P(x) = 1 - \left[1 + \xi \cdot \frac{x}{\sigma}\right]^{-\frac{1}{\xi}} \quad (31)$$

$$T = \frac{1}{(1-P)n} \rightarrow P = 1 - \frac{1}{nT} \quad (32)$$

hvor  $T$  er returperioden (per år) og hvor  $n$  er frekvensen for antall hendelser i et datasett for en bestemt tidsperiode. Variablene som inngår i ligningene (31 og 32) kan forklares enklere ved hjelp av et eksempel. I et datasett av en gitt størrelse vil frekvensen av en hendelse skje  $n = 10$  per år, og gi 1000 skred per 1 mill. snøfall ( $P = 1000$  skred per 1 mill. snøfall) som har en returperiode på  $T = 1/100$ .

Ved å løse ligningen på  $x$  ( $x = HS_{maks}$  eller  $x = HN_{maks.}$ ), ble snøhøyden ( $HS_{maks}$ ) funnet for den gitte returperioden:

$$x = \frac{\sigma}{\xi} \cdot \left( \frac{1}{nT}^{-\xi} - 1 \right) \quad (33)$$

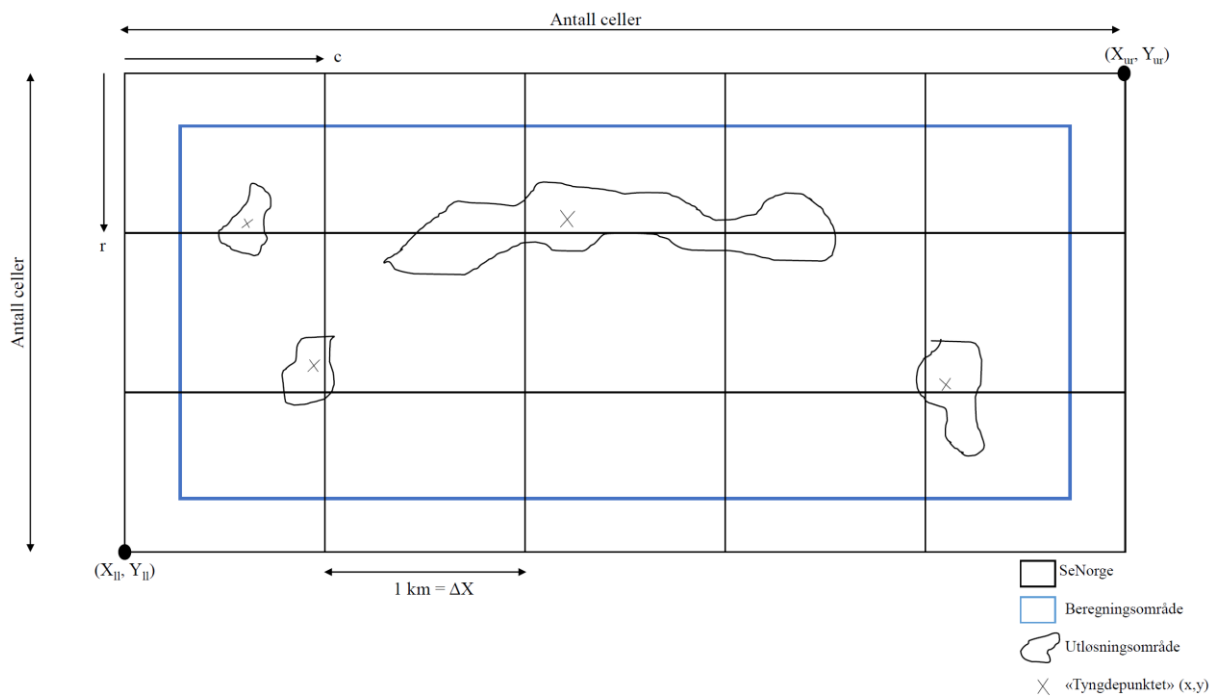
I tilfellet hvor en ser på snøhøyden, vil  $n$  være antall ganger maksimal snøhøyde opptrer i løpet av en sesong, hvor  $n = 1$ .

Den lineære høydeinterpoleringen av Pareto-parameterne til nysnøtilveksten ble plottet mot utvalgte referanseverdier for terreng høyden. Fremgangsmåten for nysnøtilvekst utføres på samme måte som for snøhøyde, men  $n$  (snøfallfrekvensen) må beregnes. Snøfallfrekvensen ( $n$ ) som er brukt i ligningen for Pareto-fordelingen, tilsier at hvis et område er kaldt og har mye snø, vil ikke det snø mer enn 20 ganger. Er det ikke kaldt og lite snø, vil det ikke snø mer enn 10 ganger i løpet av en sesong. Kaldt tilsier at sesongen vil vare mye lengre, og sannsynligheten for at det vil snø flere ganger vil derfor være større.

$$Snøfall_{frek}(n) = \min(20.0, \max(0.0, (10.0 - 2.0 \cdot TA) \cdot HS_{\max_{med}}/1.5)) \quad (34)$$

Siste steget av valideringen ble utført for å se hvordan modellen kjørte uten interpolering av snøhøyde og nysnøtilvekst. Interpoleringen for parameterne av fordelingsfunksjonen for nedbør ble fjernet og modellen ble testet ved å benytte gjennomsnittlig celleverdi (1 km) hentet fra seNorge (NVE, 2019c). Celleverdiene ble hentet ut ved å anvende utløsningsområdenes tyngdepunkt fra NAKSIN i et gitt beregningsområde, samt

gjennomsnittlige parametrene for snøhøyde og nysnøtilvekst. Høydeinterpolering ble ikke tatt med i beregningene (Figur 26).



Figur 26: Uthenting av tyngdepunkt fra hvert utløsningsområde hvor seNorge-verdien vil brukes istedenfor interpoleringsverdier.

Simuleringer uten interpoleringen gir ingen verdier hvor vann opptrer, som ved kyst og fjorder. En forhåndsinnstilt verdi ble derfor satt for å ikke utelukke potensielle skred. Verdiene ble satt til at det går skred hvert år og at bruddhøyden er på 1.5 meter ved en returperiode ved 1000 år.

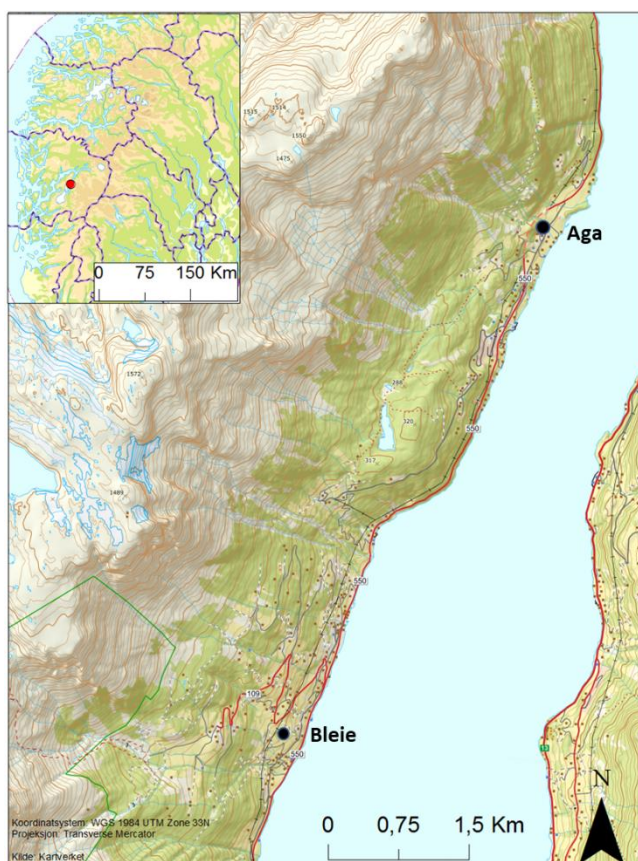
## 4 Områdebeskrivelse

Hvert område som har blitt brukt i NAKSIN, ble plukket ut til å representere ulike klimatiske forhold, samt liten og stor fallhøyde (H/L), i kombinasjon med at de er områder som har detaljkartlagte skred og utført faresonekartlegging.

For skredhendelsene som ble brukt i valideringen av MoT-Voellmy, i hhv. Rigopiano og Makunosawa, vil det bli gitt en detaljert beskrivelse av de to skredhendelsene.

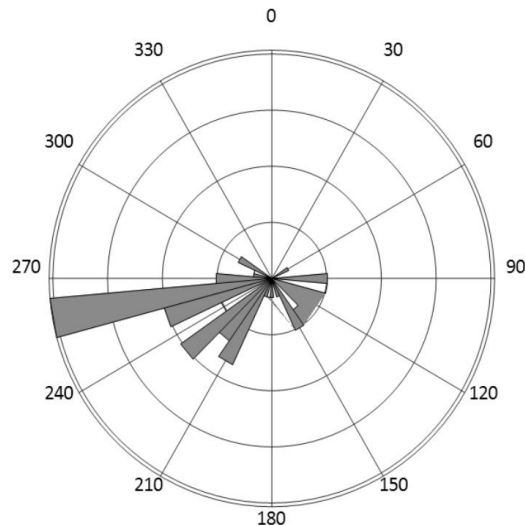
### Bleie og Aga

Bleie og Aga (Figur 27) ligger på vestsiden av Sørfjorden i Ullensvang kommune i Hordaland. I vest ligger nordlige del av Folgefonna, med høyder på ca. 1400 moh. Avstanden ned til fjorden er kun 2-3 km, og terrenget er bratt, med helning på 30-45° i de øvre delene, mens nedre del, mot fjorden, er slakere, med helning <20°. Skogen strekker seg opp til ca. 550 moh. og består av en blanding av plantet gran og naturlig skog.



Figur 27: Topografisk kart over en del av Sørfjorden, Hardanger, som viser beliggenheten av Bleie og Aga.

Bleie og Aga har et typisk maritimt klima med mye nedbør, hvor snøhøydenormalen er på 200-400 cm årlig (NVE, 2019c). Dataene ble hentet fra stasjonen ved Folgefonna skisenter, som gir et mer presist bilde av den dominerende vindretningen i høyfjellet. Den fremherskende nedbørførende vindretningen er fra vest (Figur 28), som gjør at østvendte helninger ligger i le og er potensielle områder for snøakkumulasjon.



Figur 28: Vindrose fra Folgefonna Skisenter (49085), som viser prosentvis fordeling av vindretning ved nedbør som snø. Dominerende nedbørførende vindretningene er fra vest, men også vind fra sørvest vil kunne gi store mengder nedbør (Brattlien et al., 2018).

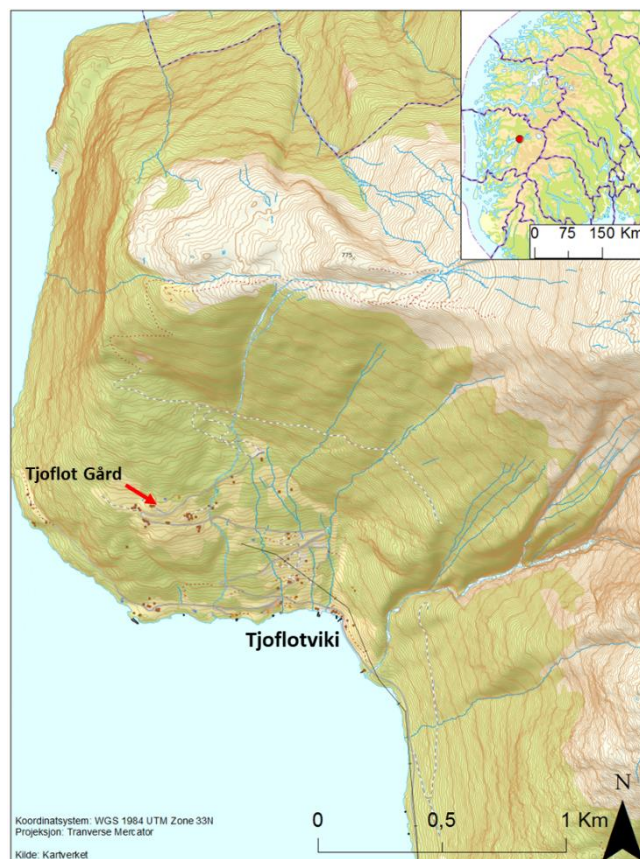
Valget av Bleie og Aga baseres på at lokaliteten ligger i et maritimt klima, og at skredbanene har stor fallhøyde (H/L). Samt at det har blitt utført faresonekartlegging, med 100, 1000 og 5000-års soner, hvor den kartlagte 1000-årssonen ble brukt som valideringsdokumentasjon av de simulerte utløpslengdene fra NAKSIN. Området Bleie har også en veldokumentert ekstremhendelse i 1994 som også ble brukt til å validere resultatet fra NAKSIN.

Skredet som skjedde ved Bleie 27. januar 1994, ble estimert til å være et 1000-års skred. Skredet gikk ned til fjorden og hadde en total horisontal lengde på 3600 m, med et vertikalfall på om lag 1300 m. Det gir en gjennomsnittlig helning på 19.9°. Utløsningsområdet ligger østvendt. Dagene før skredet gikk, falt det 344.4 mm i løpet av uken. Nedbøren i seg selv tilsvarte en 10-års returperiode. Utløsningsområdets helning tilsa at et skred ville gå lenge før de 3 m med snø kom, men ettersom temperaturen i området *før* nedbørshendelsen var på 7,2°C og nedbøren falt i form av regn, ble de svake lagene mest trolig omdannet. Dette førte til at skredet ikke ble utløst selv med stort snøfall, men først da nedbørmengden var avtagende (Lied et al., 1998). Grunnet antatt mangel på svake lag, måtte det en stor last til for å kunne overstige skjærstyrken og utløse skredet.

Med en dominerende vindretning fra vest, kunne den totale akkumulasjonen i utløsningsområdet estimeres til rundt 500 mm og utgjorde en stor tilleggsbelastning. Etter skredhendelsen observerte man at snøen var kald, med en lav friksjon hele veien ned til fjorden. Dette var en tilleggsfaktor som bidro til at skredet ble så ekstremt. Det estimerte utløsningsarealet med terreng brattere enn 30° ble estimert til 360.000 m<sup>2</sup> med et volum fra 0,7 til 1 million m<sup>3</sup> snø (Lied et al., 1998).

## Tjoflotviki

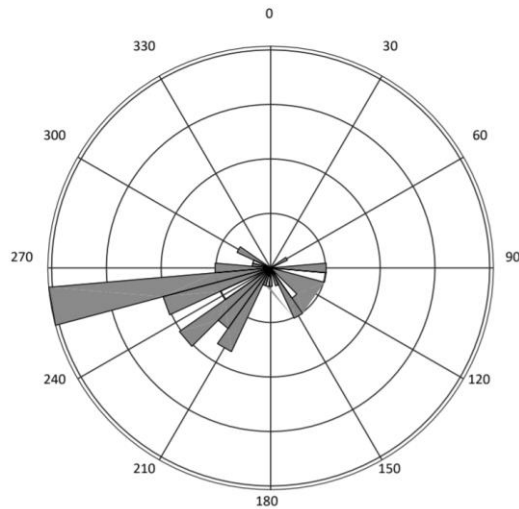
Tjoflotviki (Figur 29) ligger i Hardangerfjorden i Ullensvang kommune i Hordaland. Terrenget strekker seg fra fjorden og opp til 1000 moh. De potensielle utløsningsområdene starter fra 500 moh., og følger en rygg som strekker seg mot nord til 1000 moh., og har en terrenghelning mellom 30° og 45°. Skogen ved Tjoflotviki er relativt tett og strekker seg opp til 600-700 moh. og består mest av gran (Issler et al., under utarbeidelse).



Figur 29: Topografisk kart over Tjoflotviki i Ullensvang kommune.

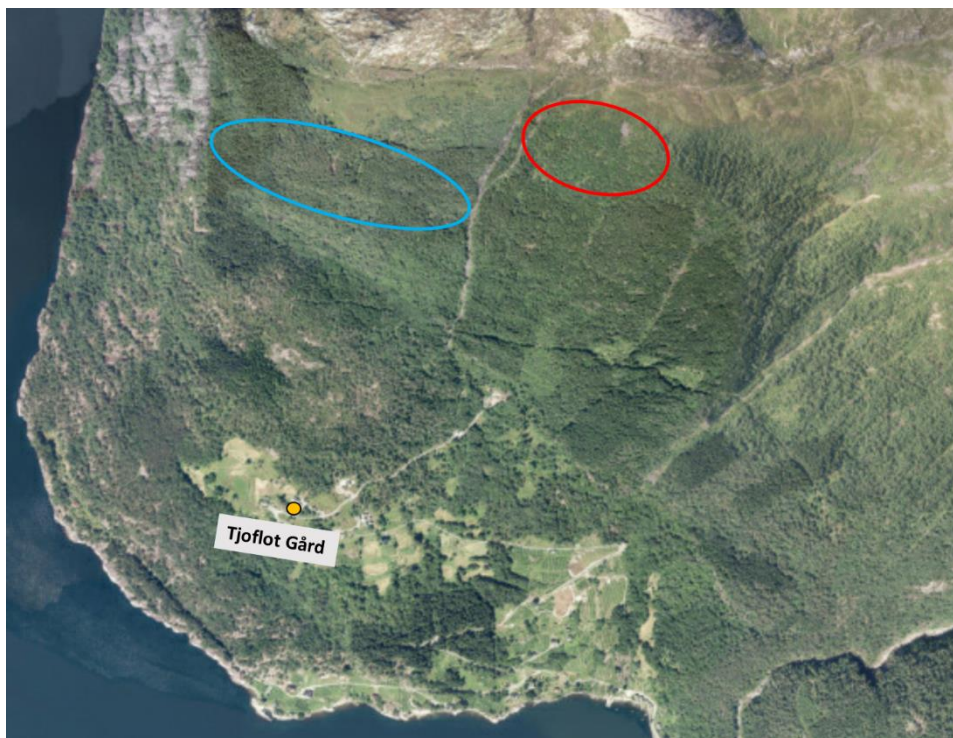
Klimaet er maritimt med milde vintre. Gjennomsnittlig temperatur i januar og februar ligger rett under 0°C. Normal årsmaksimum av snøhøyden i utløsningsområdet er 200-400 cm, men store mengder snø kan falle på kort tid (NVE, 2019c). Fremherskende nedbørførende vindretning er vest og sørvest (Figur 30).





Figur 30: Vindrose fra Folgefonna (55290). Viser prosentvis fordeling av vindretning ved nedbør som snø. Dominerende nedbørførende vindretningene er fra vest-sørvest (Gisnås et al., 2019).

Basert på den utførte faresonekartleggingen, historisk informasjon og uthenting av informasjon om vegetasjon fra flyfoto, ble Tjoflotviki valgt som valideringsområde. Tjoflot Gård (Figur 29 og Figur 31) ligger ikke i noen potensielle faresoner, men tidligere arbeid i NAKSIN viser at dette utgjør et problemområde. Det er også interessant å se hvordan skogdatasettet SAT-SKOG påvirker resultatet.



Figur 31: Flyfoto over Tjoflotviki. Blå ring viser at området ovenfor Tjoflot Gård (markert med gul prikk) består av tett skog og utgjør et lite sannsynlig skredområde. Rød ring viser skog med lysere farge og noe lavere trehøyder. Området antas derfor å være noe yngre enn omkring liggende skog og en mulig årsak til dette kan være hyppigere skredaktivitet.

## Sande

Sande (Figur 32) ligger ute i havgapet, hvor terrenget er bratt og vegetasjonen er snau. Nordvestlandet er kjent for å ha mye nedbør, men med statistisk positive temperaturer året rundt, kan det gi snøfattige vintre. Det var derfor interessant å velge Sande som lokasjon for å se hvordan NAKSIN håndterer områder med lite vegetasjon, mye nedbør og positive temperaturer.

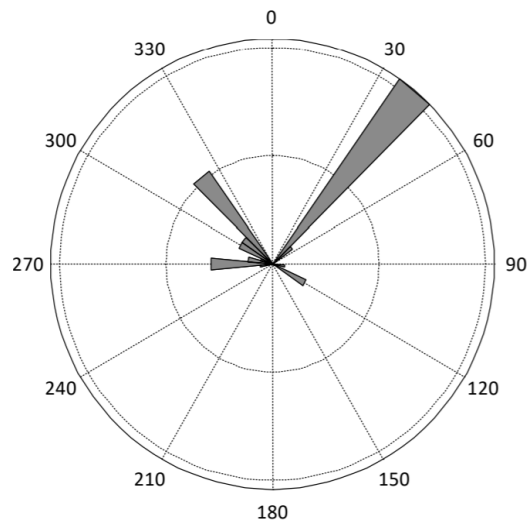


Figur 32: Topografisk kart over Sande. Rød stjerne representerer skredhendelsen fra 1800-tallet.

Kartleggingsområdet Sande (Figur 32) ligger på Gurskøy på Søre Sunnmøre i Møre og Romsdal, lengst ut mot havet sørvest i fylket, rett nord for Stad. Terrenget strekker seg fra 0 moh. til rundt 500 moh., og er bratt, med helninger på 45-60° i de øvre delene. Fra de øvre delene og ned til 50 moh. har terrenget en helning på 30-46°. Fra 50 moh. og til sjøen er terrenget slakere. Vegetasjonen består av plantet gran.

Klimaet ved Sande er maritimt, med relativt milde vintre og med en gjennomsnittlig vintertemperatur på 0.7°C. Nedbørnormalen ved Sande er 2500 mm årlig, og med en snøhøydenormal på <25 cm (NVE, 2019c). Ved ekstremtilfeller (returperiode på 1000 år), med kalde vintre, kan 3-døgns nysnøtilveksten og snøhøyden bli på henholdsvis 90 mm og

1.9 m (Gisnås et al., 2019). Fremherskende nedbørførende vindretning er fra nordøst og nordvest (Figur 33).

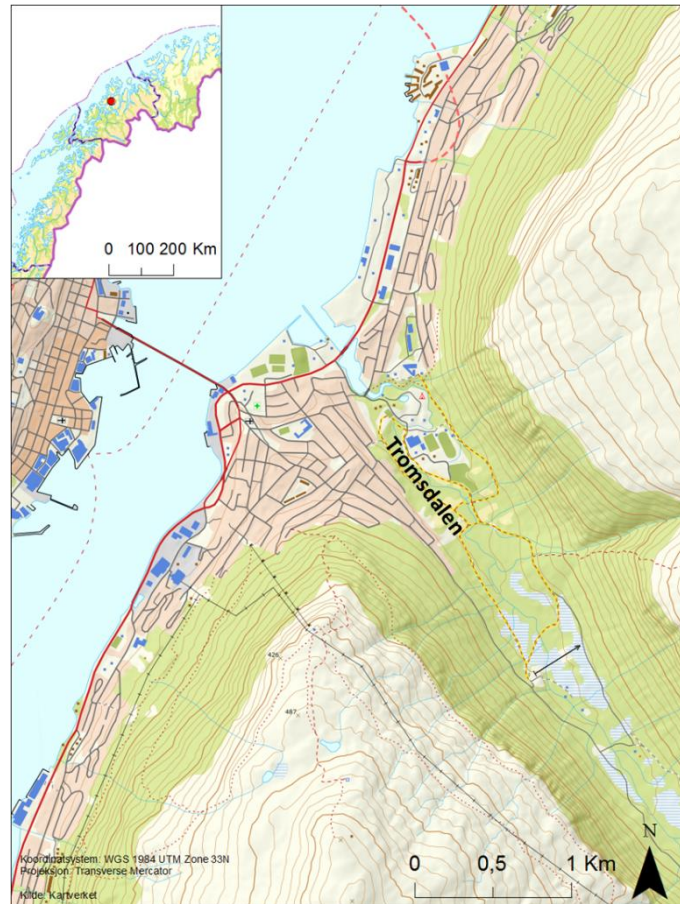


Figur 33: Vindrose fra Fiskåbygd (59610). Viser prosentvis fordeling av vindretning ved nedbør som snø. Dominerende nedbørførende vindretningene er fra nordøst og nordvest (Gisnås et al., 2019).

Under utarbeidelsen av faresonene ble historisk informasjon innhentet som viste at snøskred har gått ned til fjorden i en av rennene vendt mot sørvest (Figur 32). Dette skjedde på 1800-tallet, men da trolig i en kaldere periode. Denne hendelsen er vurdert til å være av størrelsesorden 1/1000 år (Gisnås et al., 2019).

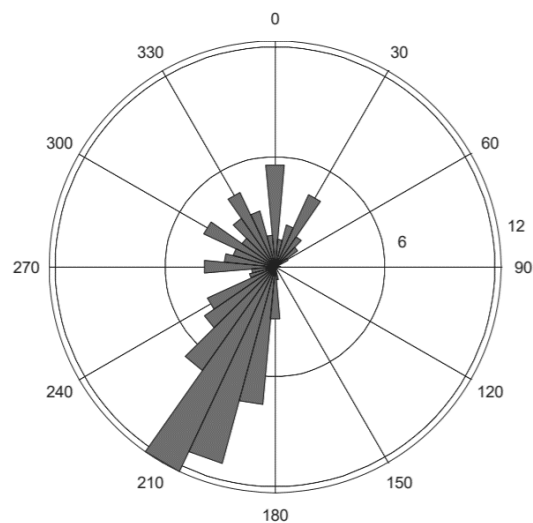
## Tromsdalen

Tromsdalen (Figur 34) ligger i Tromsø kommune og er en del av Tromsø by. De omkransende fjellene strekker seg fra 0 moh. til høyder på ca. 600 moh. Fra 70 til 300 moh. har terrenget en helning på 30-45°, og utgjør de potensielle utløsningsområdene for Tromsdalen. Områder over 300 moh. og under 70 moh. flater terrenget ut. Områdene med terrenghelning på 30-45° har sparsom skog. I områdene over denne terrenghelningen (>300 moh.) avtar skogen, mens i områdene nedenfor 70 moh. er skogen tett og består for det meste av løvtrær.



Figur 34: Topografisk kart over Tromsdalen, som er en del av Tromsø.

Klimaet i Tromsdalen er maritimt med en gjennomsnittlig temperatur  $-4^{\circ}\text{C}$  i vintermånedene januar og februar. Den normale årlig maksimale snøhøyden er på 200-400 cm (NVE, 2019c). Fremherskende nedbørførende vindretning er fra sørvest og nordvest (Figur 35). Vindretning fra sørvest vil også kunne gi stor transport av fokksnø.



Figur 35: Vindrose fra Tromsø (90450). Viser prosentvis fordeling av vindretning ved nedbør som snø. Dominerende nedbørførende vindretningene er fra sørvest (Sandersen, 2016).

Området ble valgt fordi det representerer et maritimt klima nord for polarsirkelen. NAKSIN må også fungere for slike områder. Det eksisterer også flere kartlagte skred som kan brukes i valideringen av simuleringene.

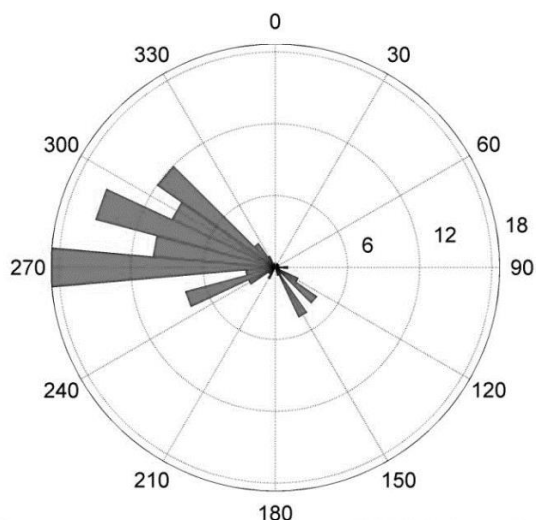
## Tyinstølen

Tyinstølen (Figur 36) ligger i Vang kommune, Oppland, på 1080 moh. og det aktuelle området strekker seg til 1200 moh. Fra 1140 til 1200 moh. har terrenget en helning på 30-45°. Vegetasjonen er skrinn, og består i hovedsak av fjellbjørk.



Figur 36: Topografisk kart over Tyinstølen i Vang kommune.

Middeltemperaturen for månedene januar og februar ved Tyinstølen er  $-8^{\circ}\text{C}$ , en normal årlig maksimal snøhøyde er 150-400 cm (NVE, 2019c). Merk at stasjonen har kun 7 år med data. Fremherskende nedbørførende vindretning er fra vest (Figur 37). Sider vendt mot øst er spesielt utsatt for akkumulasjon av snø grunnet snødrift fra vest.



Figur 37: Vindrose fra Tyinkrysset (23850). Viser prosentvis fordeling av vindretning ved nedbør som faller som snø. Fremherskende nedbørførende vindretningene er fra vest, men store mengder nedbør kan komme fra andre vindretninger også (Kronholm, 2012).

Tyinstølen representerer innland – og høyfjells klima, - et klima som er viktig å få testet ut i NAKSIN. Tyinstølen ble også valgt grunnet skredhendelsen som skjedde tilbake i 2008 (Figur 38). Skredhendelsen var ekstrem og kan derfor brukes som valideringsdokumentasjon.

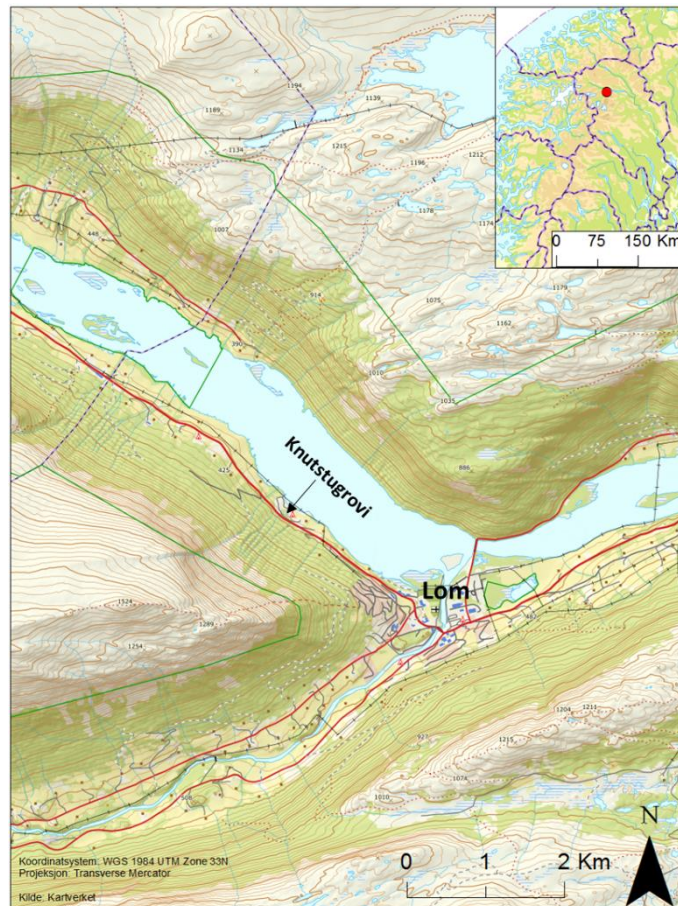
I januar 2008 ble et skred ved Tyinstølen spontant utløst med en fallhøyde på kun 150 m og med en utløpslengde på 300 m lengre enn nåværende aktsomhetskart. Det som gjorde skredet spesielt var at utløpsvinkelen kun var på  $14.5^\circ$ , som tilsvarer 5 standardavvik fra alfa-beta beregninger. Skredet var sterkt fluidisert, men utløpslengden var ikke en følge av snøsky (Issler et al., under utarbeidelse). Utløsningsområdet ligger i en østvendt helning.



Figur 38: Bilde av skredet ved Tyinstølen, januar 2008, sett fra nord. Foto: Svein Helge Frækaland, Statens Vegvesen.

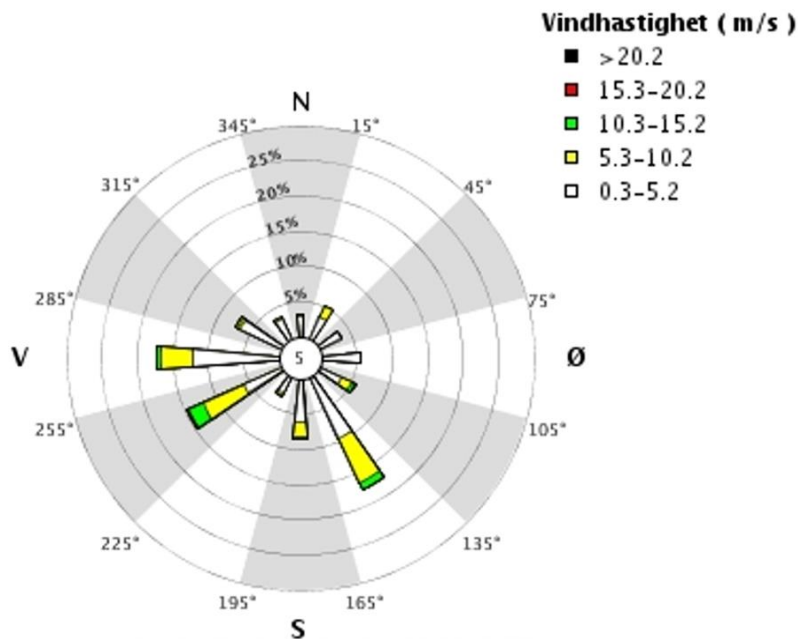
## Lom

Det vurderte området Lom (Oppland fylke) (Figur 39) strekker seg fra 382 moh. til rundt 1500 moh. Fra tregrensen og oppover mot toppen av dalsidene har terrenget en helning på 30-60°. Tregrensen strekker seg opp mot 800 moh., og vegetasjonen består av furu- og løvskog.



Figur 39: Topografisk kart over Lom.

Lom er et nedbørsfattigområde (kontinentalt klima) hvor den normale årlig maksimale snøhøyden nede i dalen er <25 cm. Oppover mot dalsidene er årsmaksimum bortimot 50-100 cm (NVE, 2019c). Siden nedbørførende vindretning ikke vil være den største bidragsgivende faktoren for utvikling av en potensiell skredsituasjon ved Lom, benyttes den dominerende vindretningen her. Dominerende vindretning med størst andel av vindhastighetene opp mot 10 m/s, er fra sørvest (Figur 40) (eKlima.no, 2019). Dalsider vendt mot nordøst er spesielt utsatt for akkumulasjon av snø grunnet snødrift fra sørvest. Stasjon *Sognefjellshytta* (40 km unna) ble brukt for å representere vind i høyfjellet.



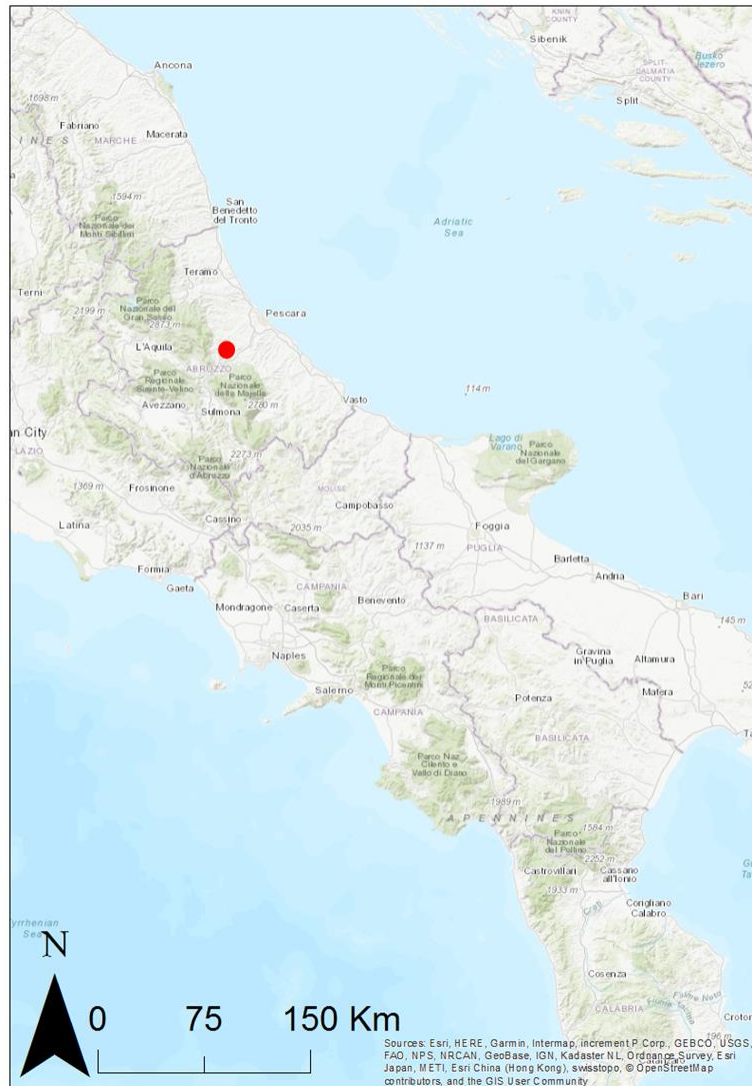
Figur 40: Vindrose fra Sognefjellhytta (55290). Viser prosentvis fordeling av vindretning. Dominerende vindretning med størst andel av vindhastigheter over 10 m/s er fra sørvest. Data hentet fra eKlima.no (2019).

Lom har få skredhendelser, men skredet ved Knutstugrovi (Figur 39) går omtrent hvert andre år ned til veien, Rv15 (NVE, 2019b), og det er interessant å se hvordan NAKSIN håndterer områder med lave temperaturer og lite nedbør.

## Rigopiano, Italia

Monte Siella som ligger i kommunen Farindola i Abruzzo-regionen i det sentrale Italia (Figur 41), har tre kjente skredbaner; Grava di Costa Mercante, Grava di Valle Cupa og Grava dei Bruciati (fører til Rigopiano-plataået). Monte Siella er en del av Gran Sasso-massivet og har en høyde på 2027 moh. Generelt får regionen størst akkumulasjon av snø i sidene vendt mot nordøst eller sørøst. Noen av skredbanene som Grava di Valle Cupa og Grava di Costa Mercante, har årlig skredaktivitet. Grava dei Bruciati har også hyppig skredaktivitet, men ikke årlig (Issler, 2018).





Figur 41: Topografisk kart som viser Abruzzo-regionen angitt med rødt punkt.

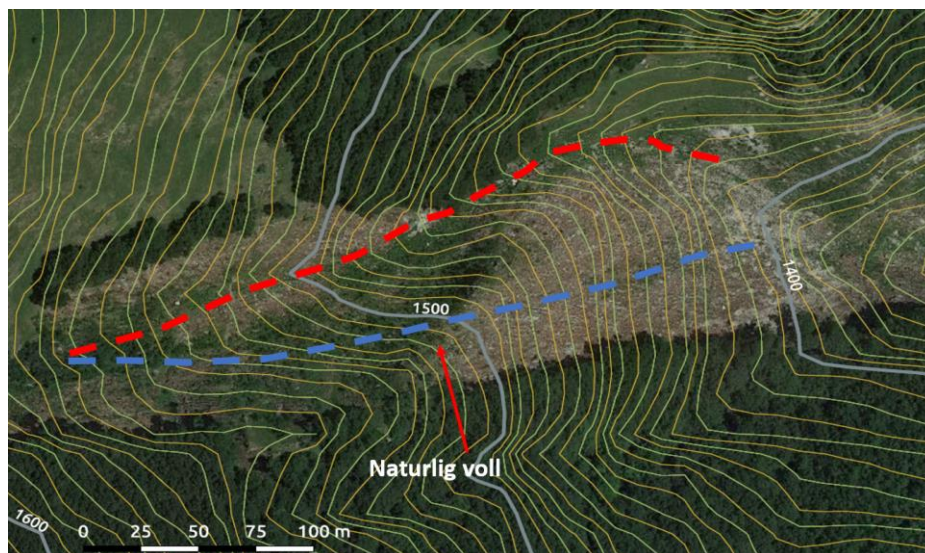
En intens nedbørshendelse i januar, 2017 førte til minst 2 m nysnø i løpet av fire dager i Gran Sasso-området. I tillegg ble en rekke jordskjelv registrert den 18. januar. Ved kvelden 18. januar, 2017 ble et stort skred utløst fra østflanken av Monte Siella og gikk ned skredbanen Grava dei Bruciati. Hotellet Rigopiano, som lå i den aktuelle skredbanen ble totalt ødelagt, og 29 av 40 personer som ventet på å bli evakuert omkom. Skredet ødela også rundt 5 hektar med moden til ung bøkeskog (Issler, 2018).

Grava dei Bruciati-skredbanen strekker seg fra 1900 moh. og ned til 1090 moh., med en horisontal utløpsdistanse på 2200 m (Figur 42). Utløsningsområdet var på totalt 350x350 m og gikk fra 1900 moh. ned til 1650 moh. Øvre del av utløsningsområdet utgjør den bratteste delen av skredbanen, med en helning på 35-40°. Nedre del av utløsningsområdet har en helning på 30-35°. Utløsningsområdet har konkav form.



Figur 42: Flyfoto tatt om sommeren etter skredhendelsen. Ved 1500 moh. ligger den naturlige vollen. Potensielt utløsningsområdet vist i rødt (Issler, 2018). Gul ramme representerer utsnittet av Figur 43.

Fra rundt 1700 moh. blir skredbanen kanalisert og ved ca. 1550 moh. er det en markert naturlig voll (Figur 43) som har en helning på rundt  $30^\circ$  oppstrøms og som er 15-20 m høy. Den raskeste delen av skredet strømmet delvis over denne vollen, mens den delen av skredet som hadde en lavere hastighet gikk til venstre for vollen (med en radius på 150 m) og gjennom et trang gjel (Figur 43).



Figur 43: Viser den naturlige vollen ved 1500 moh. etter skredet i 2017 (Issler, 2018). Blå stiplelinje viser den omtrentlige retningen til den delen av skredet som gikk over vollen. Rød stiplelinje viser retningen til den delen av skredet som gikk rundt vollen (Issler, 2018).

Mellom 1400 og 1500 moh. er den gjennomsnittlige helningen på  $18^\circ$  (Issler, 2018). Ved 1350 moh. er der en stor venstresving (radius på 500-700 m) (Figur 44) og man kan se

radiusen til ytre banen av skredet fra grenselinjen av skogødeleggelsen. Fra denne svingen ledes utløpet av Grava dei Bruciati-skredbanen til platået Rigopiano på 1200 moh., hvor hotellet Rigopiano lå.



*Figur 44: Viser den store venstresvingen ved rundt 1350 moh. og i forgrunnen av bildet, til høyre, kan en se den naturlige vollen hvor den raskeste delen av skredet strømmet over (Issler, 2018).*

Før skredhendelsen i 2017 var Grava dei Bruciati dekket i bøkeskog av ulik alder fra 1550 moh. og ned til 1220 moh. Trær utenfor og i nedre del av skredbanen besto av eldre trær, mens i den sentrale delen av skredbanen var trærne yngre. Spesielt over 1450 moh. (fra vollen og opp) var trærne enda yngre, som indikerer hyppige skred. Den totale skogkleddede delen av skredbanen var på nærmere 1.0 km (Issler, 2018).

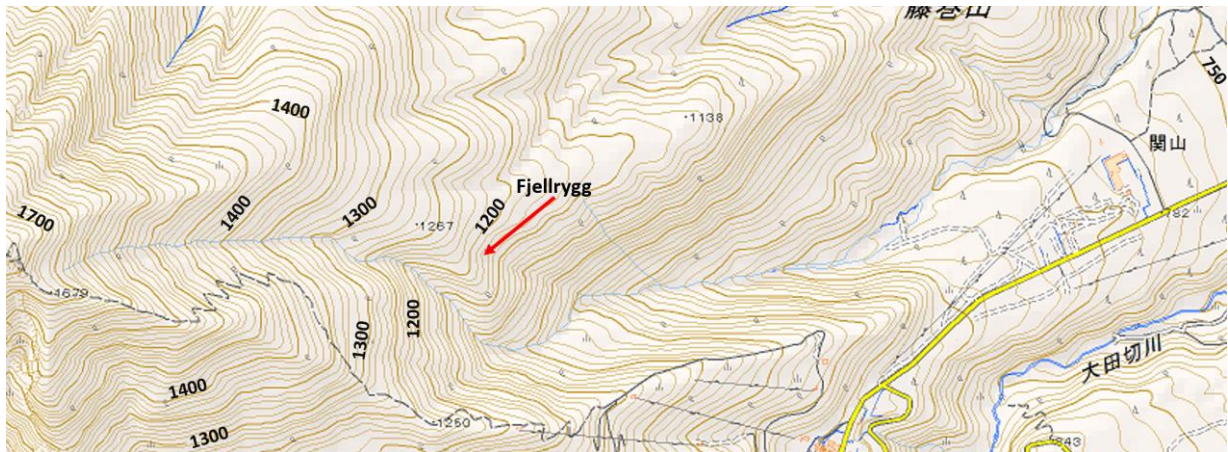
## Makunosawa, Japan

Myoko-området inkluderer Makunosawa-dalen og er lokalisert på vestkysten av Japan (Figur 45). Klimaet er preget av monsuner som tilfører store nedbørsmengder til området, og området er kjent for å være blant de mest snørike i Japan. Snøfallintensiteten i løpet av en dag kan være store (>1 m), og med en årlig gjennomsnittlig maksimal snøhøyde på >4 m i dalen (Takeuchi & Hirashima, 2013).



Figur 45: Topografisk kart som viser Myoko-området angitt med rødt punkt.

I tiden før skredhendelsen (februar, 2008) mottok Makunosawa-dalen over 174 mm snø (vannekvivalenten av nedbøren) i løpet av seks dager, som økte snøhøyden fra 225 cm til 381 cm. 17. februar, 2008, ble et stort skred utløst fra flanken vendt mot sørøst som ligger på 1700 moh. Skredet ødela også rundt 10 hektar med sederskog (Takeuchi et al., 2011).



Figur 46: Topografisk kart over skredbanen i Makunosawa.

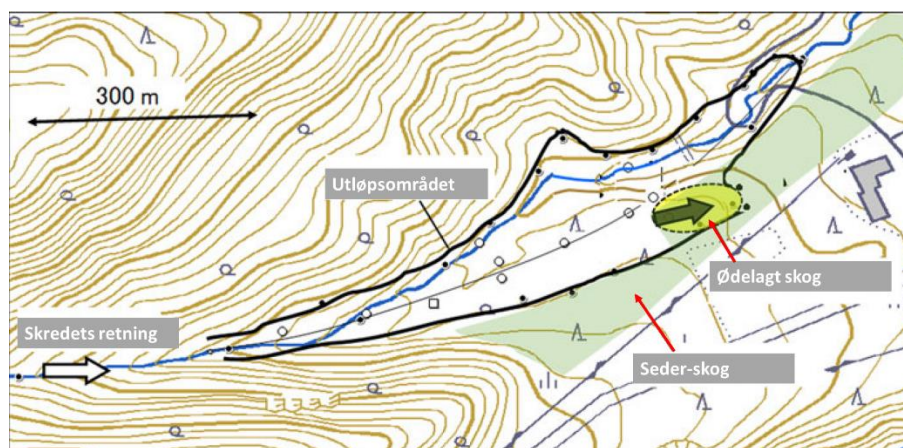
Makunosawa-skredbanen strekker seg fra 1700 moh. og ned til 770 moh. (Figur 46) med en horisontal utløpsdistanse på 3000 m. Utløsningsområdet gikk ned til 1400 moh., og ble beregnet til å ha et areal på 250x100 m. Utløsningsområdet har en helning på rundt 35 til 40°. Basert på meteorologiske data, ble det svake laget i snøpakken anslått til å ligge rundt 2 m under snøoverflaten (Takeuchi et al., 2011).

Fra rundt 1300 moh. og ned til 1200 moh. består skredbanen av en fjellrygg (Figur 46 og Figur 47), som skiller utløsningsområdet fra Makunosawa-dalen. Ved forsering av partiet hvor fjellryggen starter ble skredet delt i to, der den ene delen gikk rett over ryggen (skredløp a), mens den andre fulgte svingen rundt ryggen (skredløp b) (Figur 47).



Figur 47: Viser skredforløpet ved Makunosawa skredhendelsen. Skredløp a) representerer skredet som gikk over fjellryggen. Skredløp b) representerer skredløpet som fulgte svingen rundt fjellryggen (Takeuchi et al., 2018). Blått område viser arealet av utløsningsområdet.

Utløpsområdet har en helning på 5° og utgjorde en størrelse på 10 000 m<sup>2</sup>. Ved rundt 810 moh. strømmet deler av skredet inn i tett skog og stoppet etter 130 m. Totalt ble det observert et 130 m langt område med ødelagt sederskog hvor stammene hadde en gjennomsnittlig diameter på 0,38 m. Den delen av skredet som ikke strømmet inn i skog, fortsatte og stoppet ved 770 moh. (Figur 48). Skredets hastighet ble estimert ut fra skadene på skogen og beregnet til å være >26-31 m/s (Takeuchi et al., 2011).



Figur 48: Topografisk kart som viser utløpsområdet for skredet i Makunosawa-dalen. Farget område i gult viser det ødelagte området av sederskogen (Takeuchi et al., 2018).

# 5 Resultater

Første delkapittel presenterer resultater fra valideringen av MoT-Voellmy. I dette inngår resultatene fra grid-oppløsning, medrivning og sammenligning mellom de to modellene: RAMMS og MoT-Voellmy. I det andre delkapitlet presenteres resultatene fra kalibreringen, sensitivitetsanalysen, valideringen av NAKSIN samt en test av interpoleringsmetode for nedbørsdataene.

## 5.1 Validering av MoT-Voellmy

### 5.1.1 Modellering langs et skråplan

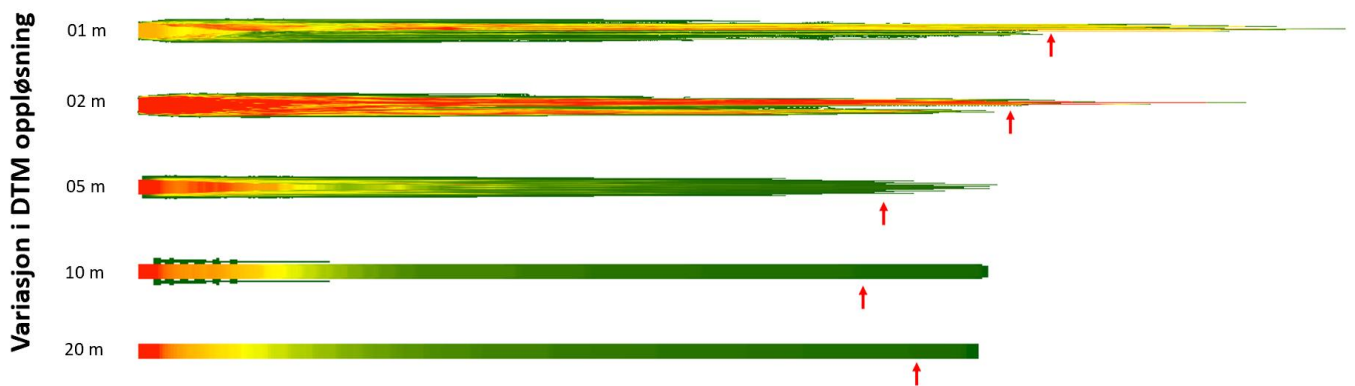
Valideringen av MoT-Voellmy ble utført i henhold til Kap. 3.1.1. Innparameterne og resultatet fra de ulike grid-oppløsningene er fremstilt i Tabell 2.

Tabell 2: Simuleringer utført på skråplan med ulike oppløsninger og konstante friksjonskoeffisienter ( $\mu$  og  $k$ ). Resultatet; simulert utløpsdistanse, maksimal flythøyde og maksimal hastighet ble hentet ut for hver av simuleringene tilhørende de ulike oppløsningene.

Parametere			Resultat			
Oppløsning (m)	$k$	$\mu$	Maks. hastighet (m/s)	Maks. flythøyde (m)	Utløpslengde (m) ved 5 cm flythøyde	Teoretisk maks. hastighet (m/s)
1	0.001	0.4	23.7	2.3	6205	36.7
2	0.001	0.4	23.1	1.3	5877	36.2
5	0.001	0.4	21.7	1.0	5260	32.3
10	0.001	0.4	20.6	1.0	4940	29.9
20	0.001	0.4	18.6	1.0	5313	26.3

Simuleringene som ble utført med ulike grid-oppløsninger og fastsatte friksjonskoeffisienter ( $\mu$  og  $k$ ) resulterte i økt utløpslengde ved økende hastighet. Minste differanse i utløpslengde mellom simuleringene, ble oppnådd med en oppløsning på 5 og 10 m. Simuleringene viste også at den numerisk modellerte hastigheten var betydelig lavere enn den teoretiske hastigheten (Tabell 2). Estimert maksimal flythøyde på 1 og 2 m oppløsning er en følge av numerisk ustabilitet. Beregningen av teoretisk maksimal hastighet ble beregnet for alle forsøkene med 1 m flythøyde.

Det fremkommer også fra resultatet (Figur 49) at de utførte simuleringene, spesielt ved 1 og 2 m oppløsning ga betydelig utspring (numeriske artefakter). Antall numeriske artefakter økte ved høyere oppløsning. Differansen mellom de numeriske artefaktene ga en usikkerhet på  $\pm 300$  m, og utløpslengden ble derfor avlest hvor flythøyden var 5 cm for å ekskludere denne usikkerheten (Figur 49).



Figur 49: Simuleringer utført på skråplan og er sett ovenfra. Oversikt over hvilken effekt ulik oppløsning av DTMen har på flythøyden. Fargeskalaen går fra rød til grønn, hvor rød tilsvare høyest flythøyde. Ved 1, 2 – og 5 m oppløsning vises numeriske artefakter. De simulerte skredene viser totale utløpslengder. Rød pil markerer avlest utløpslengde ved 5 cm flythøyde.

Hver simulering ble kjørt med de forhåndsinnstilte verdiene i MoT-Voellmy, samt med endrede parametere vist i Tabell 3.

Tabell 3: Oversikt over innparametere som ble endret i styringsfilen ved simuleringene på skråplan. Ved bruk av høyere oppløsning bør maks. tidssteg settes til 0.1 s, ved for eksempel 1 m oppløsning.

Parameter	Verdi
Medrivningsmodul	None
Min. tidssteg (s)	0.001
Maks. tidssteg (s)	0.1/0.2
Min. flythøyde (m)	0.001
Simuleringstid (s)	600

Det var også nødvendig å simulere MoT-Voellmy i en reell topografisk skredbane (Bleie), for å avdekke om det oppstår like store usikkerheter knyttet til de ulike oppløsningene.

Simuleringene ga ikke numeriske ustabiliteter (i form av artefakter), men indikerte at terrengformasjoner ble tatt mindre hensyn til og fløt mer utover ved lavere oppløsning (Figur 50). Dette førte til, at ved en oppløsning på 20 m ville det simulerte skredet ha lavere maksimal flythøyde og hastighet enn tilsvarende simulert skred med 2 m oppløsning (Tabell

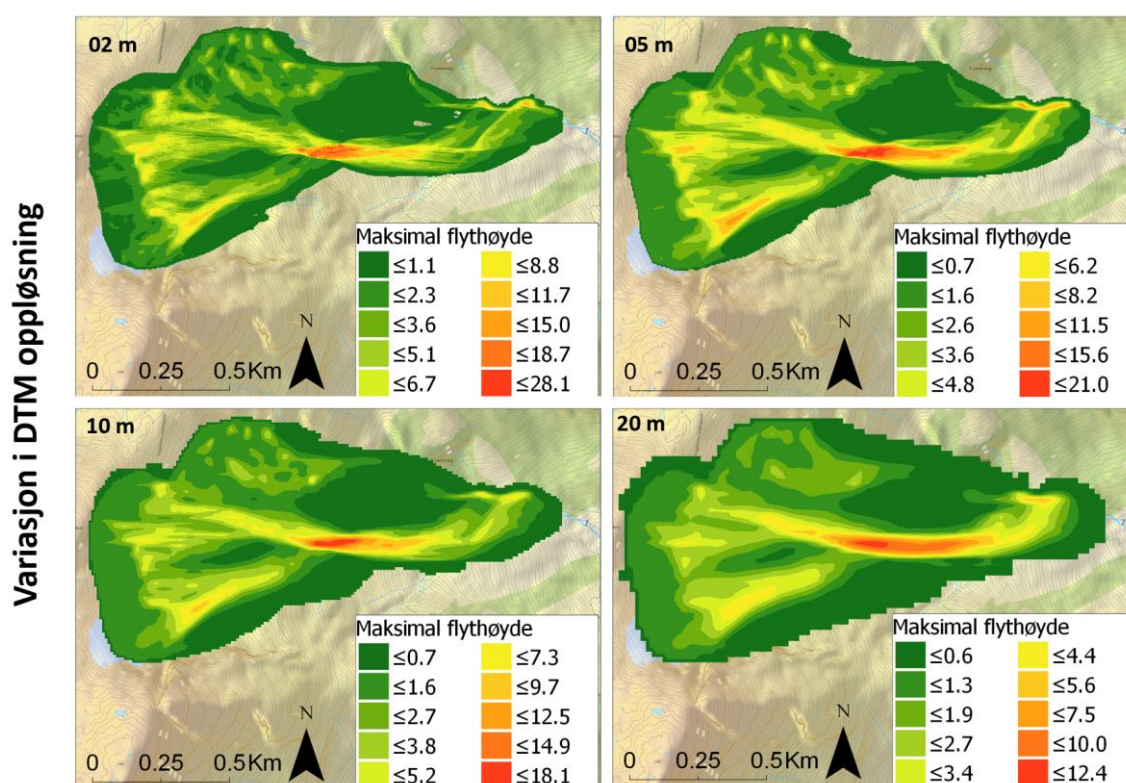


4). Ved simulering med 1 m oppløsning falt tidssteget under nedre grenseverdi (*Min. tidssteg* = 0.001 s) som førte til at beregningen ble avbrutt.

Tilsvarende som resultatet fra simuleringene utført på skråplan, viste også simuleringene utført ved Bleie lavest differanse i maksimal hastighet og flythøyde ved en oppløsning på 5 og 10 m (Tabell 4).

Tabell 4: Oversikt over simuleringresultater fra den reelle topografiske skredbanen, Bleie. Simuleringene ble variert med ulike oppløsning og konstante friksjonskoeffisienter ( $\mu$  og  $k$ ). Utløpsdistanse, maksimal flythøyde og maksimal hastighet ble hentet ut for hver av simuleringene tilhørende de ulike oppløsningene. Simuleringstid på 60 s.

Oppløsning (m)	Parametere		Resultat		
	$k$	$\mu$	Maks. hastighet (m/s)	Maks. flythøyde (m)	Utløpslengde (m)
1	0.001	0.4	-	-	-
2	0.001	0.4	47.09	28.13	1727
5	0.001	0.4	45.50	20.77	1687
10	0.001	0.4	44.12	18.09	1706
20	0.001	0.4	39.83	12.39	1723



Figur 50: Oversikt over simuleringer utført i MoT-Voellmy i skredbanen ved Bleie. Viser effekten ulike oppløsning har. 02, 05, 10 og 20 m som er angitt i figurene, representerer de ulike grid-oppløsningene. Flythøyden er avtagende med lavere oppløsning, hvor maksimal flythøyde på 2 og 20 m oppløsning er henholdsvis 28 m og 12 m. Det modellerte skredet følger terrenget bedre når DTM har høy oppløsning.

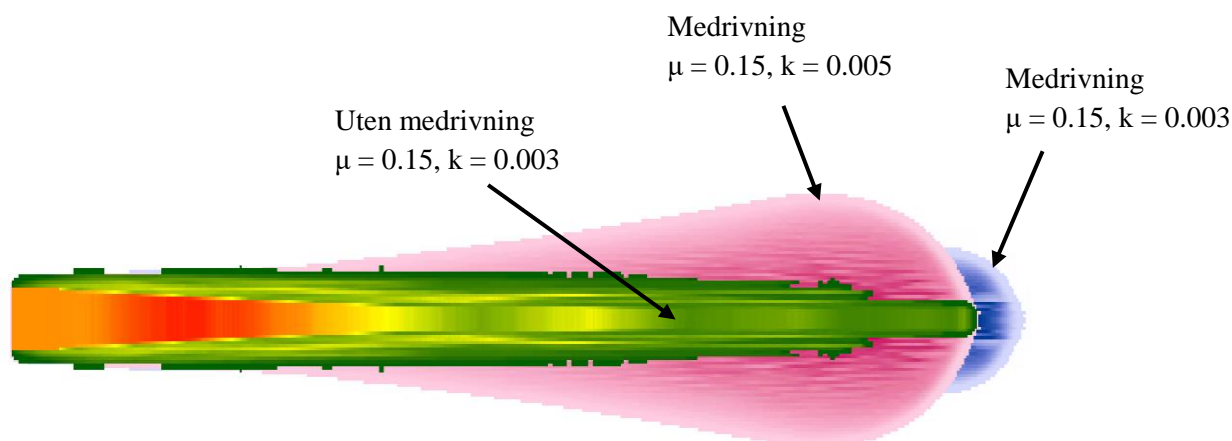
## 5.1.2 Modellering i skredbane med 'Hockeystick'-form

Kalibrering av friksjonskoeffisienter for medrivning ble utført i henhold til Kap. 3.1.2. For utførelsen av simuleringer med medrivning, ble den eroderbare snøhøyden satt til 5 m og skjærstyrken til 500, 700 og 900 Pa (Vedlegg A). Alle ble simulert med en tetthet på 250 kg/m<sup>3</sup>.

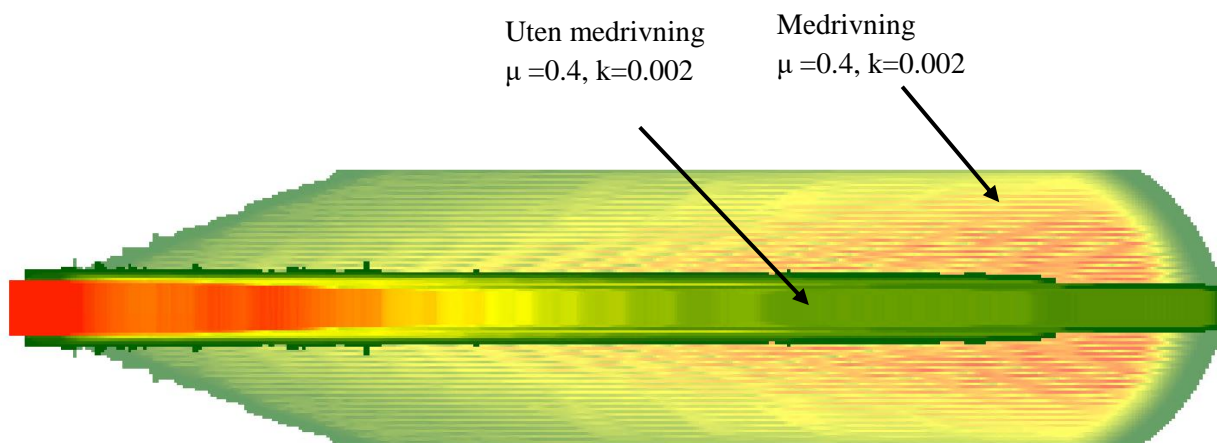
Av de totalt 48 simuleringene (Vedlegg A) var det kun 15 av disse som ga medrivning, og er fremstilt i Tabell 5. For å oppnå lik utløpslengde med og uten medrivning måtte  $k$  økes for de fleste simuleringene (Tabell 5 og Figur 51).

Tabell 5: Oversikt over friksjonskoeffisienter som ble brukt i simuleringene av skred med- og uten medrivning. Verdier for skjærstyrke ( $\tau_w$ ) vises i tabellen. Den eroderbare snøhøyden ble satt til 5 m for alle simuleringene.  $\Delta k$  er endringen som måtte til for å oppnå lik utløpslengde mellom simulering med- og uten medrivning. Numrene til simuleringene (Sim.) tilsvarer numrene i vedlegg A.

Sim.	Uten medrivning		Medrivning			Tilbakeberegning	
	k	$\mu$	k	$\mu$	$\tau_w$ (Pa)	k	$\Delta k$
2	0.002	0.15	0.002	0.15	500	0.002	0.0
3	0.003	0.15	0.003	0.15	500	0.005	0.002
4	0.004	0.15	0.004	0.15	500	0.006	0.002
13	0.001	0.20	0.001	0.20	500	0.002	0.001
14	0.002	0.20	0.002	0.20	500	0.004	0.002
15	0.003	0.20	0.003	0.20	500	0.004	0.001
16	0.004	0.20	0.004	0.20	500	0.003	-0.001
25	0.001	0.30	0.001	0.30	500	0.001	0.0
26	0.002	0.30	0.002	0.30	500	0.002	0.0
27	0.003	0.30	0.003	0.30	500	0.003	0.0
28	0.004	0.30	0.004	0.30	500	0.004	0.0
37	0.001	0.40	0.001	0.4	500	0.002	0.001
38	0.002	0.40	0.002	0.4	500	0.002	0.0
39	0.003	0.40	0.003	0.4	500	-	Nedre grenseverdi
40	0.004	0.40	0.004	0.4	500	-	Nedre grenseverdi



Figur 51: Simulering med og uten medrivning, samt med simulering hvor: 'uten medrivning( $\mu, k$ ) = med medrivning ( $\mu, k + \Delta k$ )'.



Figur 52: Simulering med og uten medrivning. Det simulerte skredet utført med medrivning går mer ut i bredden enn i utløpslengden, og får en tilsvarende utløpslengde som skred simulert uten medrivning. Dermed er  $\Delta k = 0$ .

Simuleringer utført med høy  $\mu$  resulterte i skred som ga en større utflytning i bredden, enn i lengden, sett i forhold til tilhørende simulering utført uten medrivning (Figur 52).

I simuleringer hvor MoT-Voellmy ga numeriske ustabiliteter i form av at simuleringene ble avsluttet, skyldtes dette at tidssteget falt under nedre grenseverdi. De numeriske ustabilitetene ble løst ved å sette minimum tidssteg lavt nok (*Min. tidssteg* = 0.0001 s), og jordtrykkskoeffisienten ble satt til 0. MoT-Voellmy ble ellers simulert med de forhåndsinnstilte verdiene i styringsfilen, samt med endrede parametere vist i Tabell 6.

Tabell 6: Oversikt over innparametere som ble endret i styringsfilen. Ved bruk av høyere oppløsning bør maks. tidssteg settes til 0.1 s, ved for eksempel 1 m oppløsning.

Parameter	Verdi
Medrivningsmodul	IsJo
Jordtrykkskoeffisient	0
Min. tidssteg (s)	0.001/0.0001
Maks. tidssteg (s)	0.1/0.2
Simuleringstid (s)	70 – 210
Bed friction coefficient, $\mu_s$	0-0.1
Initial CFL nummer	0.8/0.5

### 5.1.3 Sammenligning av RAMMS og MoT-Voellmy

Som en del av valideringen av MoT-Voellmy ble tilbakeberegning av to skredhendelser simulert i både RAMMS og MoT-Voellmy. Resultatet ble deretter sammenlignet. For å kunne sammenligne resultatene fra de to modellene, ble MoT-Voellmy kjørt med filene fra RAMMS.

Det bemerkes at formålet med denne oppgaven var å gjengi kjente skredhendelser, og vurdere hvordan simuleringsmodellene håndterer komplekst terreng, ikke å bestemme de fysiske parameterne. De utarbeidede friksjonskoeffisientene fra simuleringene i RAMMS antas å ikke være de mest optimale for skredhendelsen i Makunosawa og Rigopiano (Tabell 7).

Skredet i Makunosawa ble i etterkant av hendelsen estimert til å ha en bruddhøyde på 1.5 m. For skredhendelsen i Rigopiano ble bruddhøyden estimert til å være mellom 1.25 og 2.0 m. For å kompensere for medrivning, ble bruddhøyden ved begge skredhendelsene økt med 0.5 m. Begge hendelsene ble simulert med en returperiode på 300 år og angitt som skred av størrelsesorden 'stort'. Bruddhøyden og friksjonskoeffisientene ble testet systematisk for å oppnå tilnærmet lik utløpslengde som de observerte skredene (Vedlegg A). Dette ble basert på informasjon fra detalj-, - og flyfotoinformasjonen. De presenterte verdiene i Tabell 7 for  $\mu$  og  $\zeta$  er verdiene som ga et resultat som fulgte kartlagt skredbane i stor grad, og utgjør det beste simuleringsresultatet.

Tabell 7: Best tilpassede verdier for tilbakeberegningen av skredhendelsen i Makunosawa, 2008 og Rigopiano, 2017. Presentert  $\mu$ - og  $\zeta$ -verdi er hvor mye de henholdsvis måtte reduseres og økes i forhold til anbefalte verdier i hver høydekategori for å oppnå tilsvarende resultat som observert skredhendelse.

Område	Bruddhøyde (m)	Terrenghøyde (moh.)					
		Over 1500		1000-1500		Under 1000	
		$\Delta\mu$	$\Delta\xi$ (m/s <sup>2</sup> )	$\Delta\mu$	$\Delta\xi$ (m/s <sup>2</sup> )	$\Delta\mu$	$\Delta\xi$ (m/s <sup>2</sup> )
Rigopiano	2.5	-0.02	+400	-0.02	+400	-0.02	+400
Makunosawa	2.0	-0.02	+400	-0.04	+400	-0.08	+400

Skogområder ble simulert med en  $\Delta\mu$  på 0.020 og en konstant  $\zeta$  på 1000 m/s<sup>2</sup> ved alle tilfellene.

### Makunosawa, 2008

Den utførte simuleringen i RAMMS, hvor  $\zeta$  ble økt med 400 m/s<sup>2</sup> og  $\mu$  redusert med 0.020 og 0.08 i forhold til de anbefalte verdiene (Tabell 7), fulgte den kartlagte skredbanen i stor grad, bortsett fra i utløpsområdet. Simuleringsresultatet i utløpsområdet ga en underestimering av utløpslengden og ble ikke simulert inn i sederskogen (Figur 53).

Når det kommer til sammenligningen av resultatet mellom de to modellene, RAMMS og MoT-Voellmy (Figur 53 og Figur 54), viste resultatet at MoT-Voellmy simulerte et bredere skredløp og kortere utløpsområde. RAMMS hadde et noe høyere hastighetsforløp og flythøyder sammenlignet med MoT-Voellmy. Heller ikke MoT-Voellmy nådde sederskogen som det reelle skredet ødela.



Figur 53: Simuleringsresultatet fra RAMMS, med modellerte hastigheter (m/s) fra tilbakeberegning av skredhendelsen i Makunosawa, Japan 2008. Rosa område viser observert skredutløp. RAMMS klarte ikke å simulere skredet inn i sederskogen.



Figur 54: Simuleringsresultatet fra MoT-Voellmy, med modellerte hastigheter (m/s) fra tilbakeberegning av skredhendelsen i Makunosawa, Japan 2008. Rosa område viser observert skredutløp. MoT-Voellmy klarte ikke å simulere skredet inn i sederskogen.

Simuleringen utført i MoT-Voellmy ble kjørt med de forhåndsinnstilte verdiene, samt med endrede parametere vist i Tabell 8.

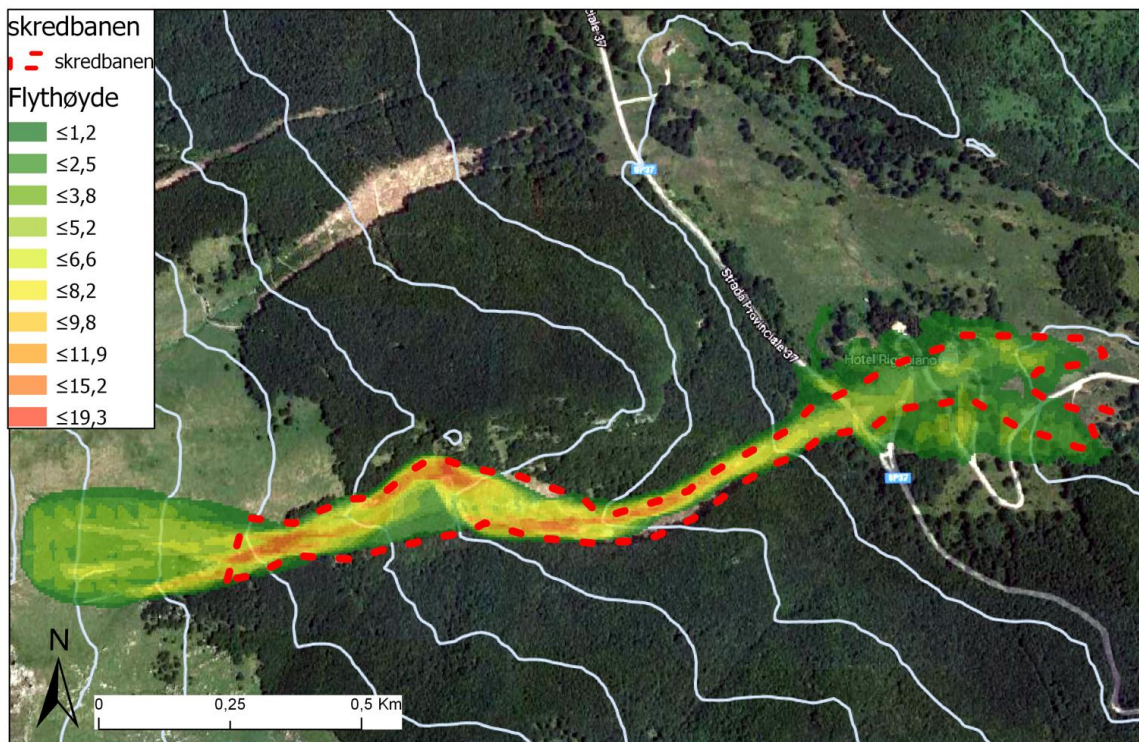
Tabell 8: Oversikt over innparametere som ble endret i styringsfilen

Parameter	Verdi
Medrivningsmodul	None
Jordtrykkskoeffisient	0.75
Min. tidssteg (s)	0.0001
Min. flythøyde (m)	0.01
Simuleringstid (s)	90

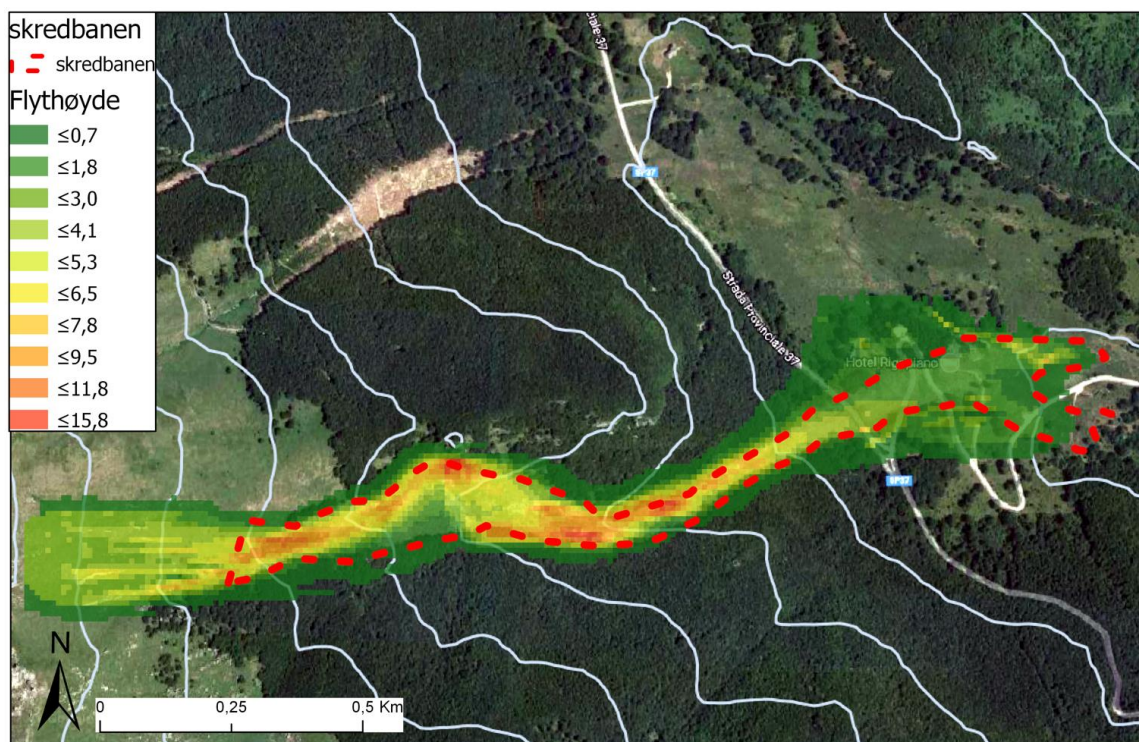
## Rigopiano, 2017

Den utførte simuleringen i RAMMS, hvor  $\zeta$  ble økt med  $400 \text{ m/s}^2$  og  $\mu$  redusert med 0.020 i forhold til de anbefalte verdiene (Tabell 7), fulgte den kartlagte skredbanen i stor grad, bortsett fra i utløpsområdet, hvor massen fløt noe utover (Figur 55). Den opptegnede stiplede linjen utgjorde skredbanen. Opptegning av nedre del av skredbanen, som utgjorde utløpsområdet, var vanskelig å angi korrekt ettersom flyfotoet ikke viste i like stor grad skadene fra skredet og eksakt hvor skredet stoppet. Skredets bevegelse i utløpsområdet er derfor noe usikkert. Flythøyder under 10 cm ble ekskludert fra simuleringen i den visuelle fremstillingen.

Når det kommer til sammenligningen av resultatet mellom de to modellene, RAMMS og MoT-Voellmy, observeres det at MoT-Voellmy simulerte et bredere skredløp og fløt mer utover i utløpsområdet enn tilsvarende simulering utført i RAMMS (Figur 55 og Figur 56). Simuleringsresultatet fra MoT-Voellmy viste noen numeriske artefakter.



Figur 55: Simuleringsresultatet fra RAMMS, med modellerte flythøyder (m) fra tilbakeberegning av skredhendelsen i Rigopiano, Italia, 2017. Stiplet rød linje utgjør fokusområdet.



Figur 56: Simuleringsresultatet fra MoT-Voellmy, med modellerte flythøyder (m) fra tilbakeberegning av skredhendelsen i Rigopiano, Italia, 2017. Stiplet rød linje utgjør fokusområdet.

Simuleringen utført i MoT-Voellmy ble kjørt med de forhåndsinnstilte verdiene samt med endrede parametere vist i Tabell 9.

Tabell 9: Oversikt over innparametere som ble endret i styringsfilen

Parameter	Verdi
Medrivningsmodul	None
Jordtrykkskoeffisient	0.4
Min. tidssteg (s)	0.0001
Min. flythøyde (m)	0.01
Simuleringstid (s)	100
Initial CFL nummer	0.7

## 5.2 Validering av NAKSIN

Valideringen av NAKSIN har bestått av over 300 simuleringer. Grunnet omfattende testing og mangel på tid ble utløsningssannsynlighetene beregnet med kun 10 000 Monte Carlo-simuleringer, i stedet for 1 million, som er det vanlige.

### 5.2.1 Verifikasjon av modellen

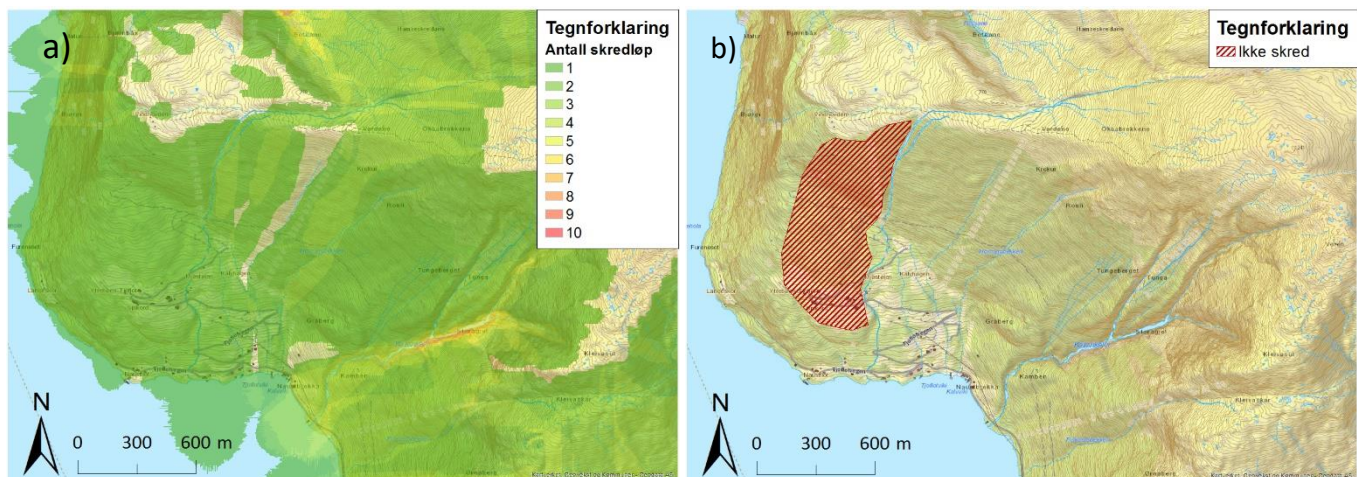
Som beskrevet i Kap. 3.2.1 ble det i steg 1 av valideringen utført en grunntest med de opprinnelig fastsatte parametere i verktøyet (Tabell 10).

Tabell 10: Oversikt over de forhåndsinnstilte parametere i NAKSIN.  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget og  $\rho_w$  er tettheten til det svake laget.  $\tau_r$  er referanseskjærstyrken og  $TA$  er den gjennomsnittlige vintertemperaturen i luften. For utledning av  $\rho_s$ , se ligning 19.

$\tau_r$ (Pa)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Stigningstall	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )
2500	maks (200, min (400, 320 + 20TA))	0.14	0.80 $\rho_s$

Basert på lokal informasjon, faresonekartlegging og flyfoto, ble en sammenligning mellom det simulerte og kartlagte område utført ved Tjoflotviki (Figur 57). Simuleringene med de angitte parametere (Tabell 10) genererte skred som dekket hele kartleggingsområdet (Figur 57a). Basert på detaljer fra faresonekartlegging (Figur 57b) var det ikke forventet skred i det skraverte området.





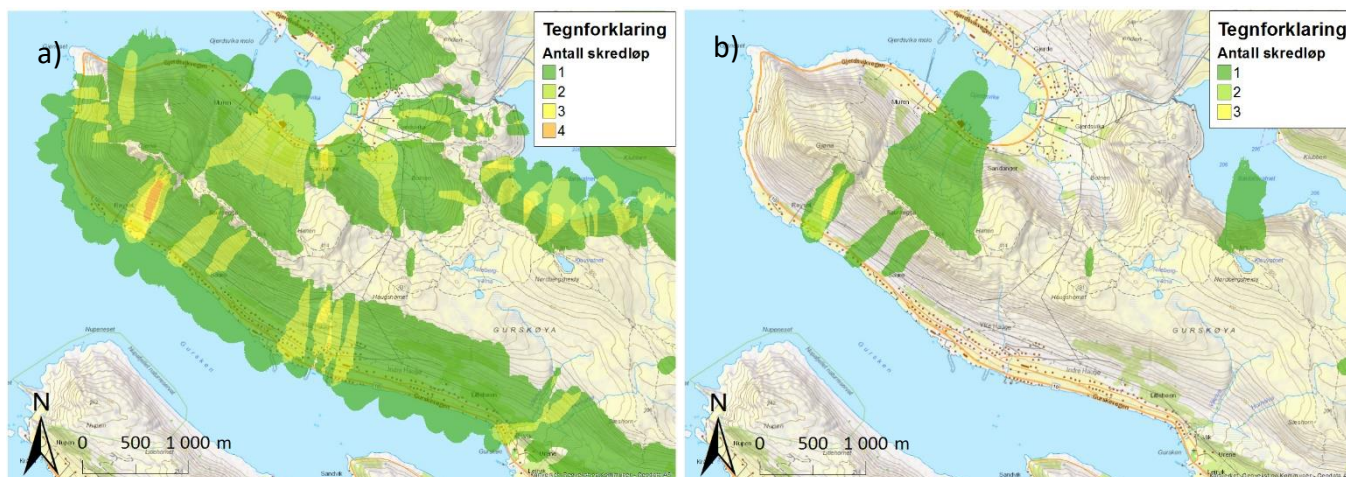
Figur 57: a) simulert i NAKSIN med forhåndsinnstilte verdier fra Tjoflotviki. Skravert område i b) er basert på informasjon fra utført faresonekartlegging av Tjoflotviki (Brattlien et al., 2018) og angir området hvor det **ikke** forventes noen skred. Utløsningsområder er ikke presentert. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en sannsynlighet på minst 0.001 per år.

I den videre grunntesten av NAKSIN ble referanseskjærstyrken ( $\tau_r$ ) systematisk testet, mens tettheten ble holdt konstant (Tabell 11).

Tabell 11: Oversikt over de forhåndsinnstilte parameterne i NAKSIN, men justering av referanseskjærstyrken.  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget og  $\rho_w$  er tettheten til det svake laget.

$\tau_r$ (Pa)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Stigningstall	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )
1500, 1800, 2100, 2500	maks (200, min (400, 320 + 20TA))	0.014	0.80 $\rho_s$

NAKSIN genererte flest skred ved lav referanseskjærstyrke, og skredforekomsten var avtagende ved økende skjærstyrke. Med en referanseskjærstyrke på 1500 Pa i NAKSIN, ble det generert skred i 60% av utløsningsområdene tilhørende maritimt klima (eksempelvis ved Sande) (Figur 58a). Med en referanseskjærstyrke på 2100 Pa genererte NAKSIN skred i 7% av utløsningsområdene med maritimt klima (Tabell 12 og Figur 58b). Settes referanseskjærstyrke til 1500 Pa i kontinentalt klima (eksempelvis Lom) genererte NAKSIN skred i 20% av utløsningsområdene. Ved å øke referanseskjærstyrken til 2100 Pa genererte NAKSIN ingen skred i kontinentalt klima (Tabell 13).



Figur 58: Simuleringsresultat fra NAKSIN i maritimt klima (her vist for Sande). Simuleringene er kjørt med opprinnelige parameterne. a) simulert med 1500 Pa i skjærstyrke. b) simulert med 2100 Pa i skjærstyrke. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en sannsynlighet på minst 0.001 per år.

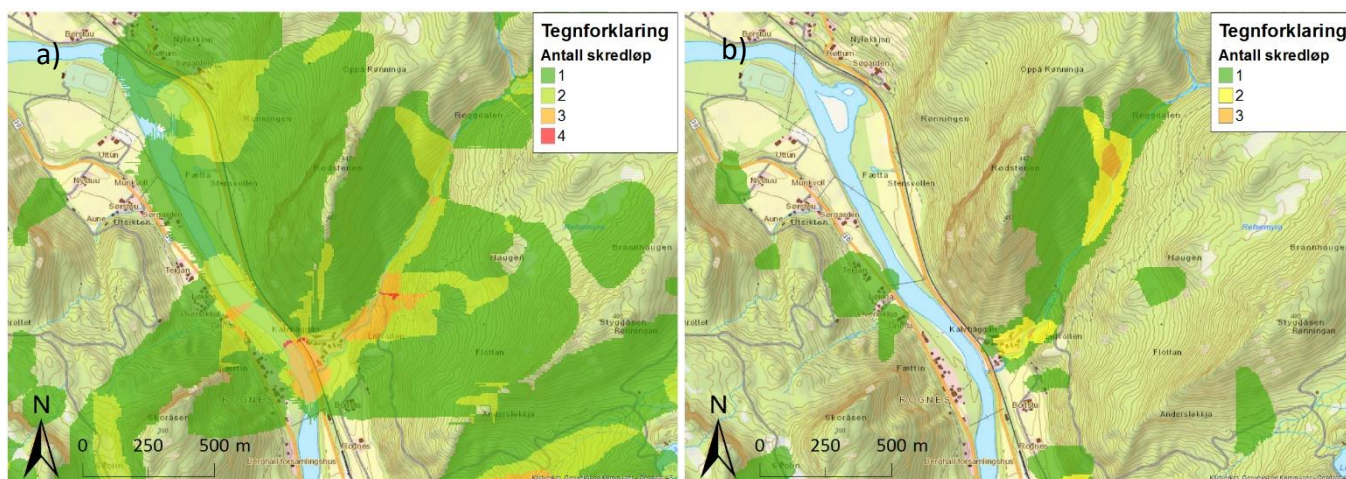
Tabell 12: Resultat fra simuleringer utført for område med maritimt klima (Sande) med ulike referanseskjærstyrker. Årlig sannsynlighet er sannsynligheten for skred fra tilhørende utløsningsområde.

	Referanseskjærstyrke (Pa)				
	1500	1800	2000	2100	2500
Antall skred	68	18	9	9	7
Bruddhøyder (m)	0.64-1.93	0.92-2.09	1.3-2.0	1.3-2.0	1.3-2.0
Årlig sannsynlighet	0.12-0.0017	0.08-0.0018	0.04-0.0014	0.03-0.002	0.02-0.002

Tabell 13: Resultat fra simuleringer utført for område med kontinentalt klima (Lom) med ulike referanseskjærstyrker. Årlig sannsynlighet er sannsynligheten for skred fra tilhørende utløsningsområde.

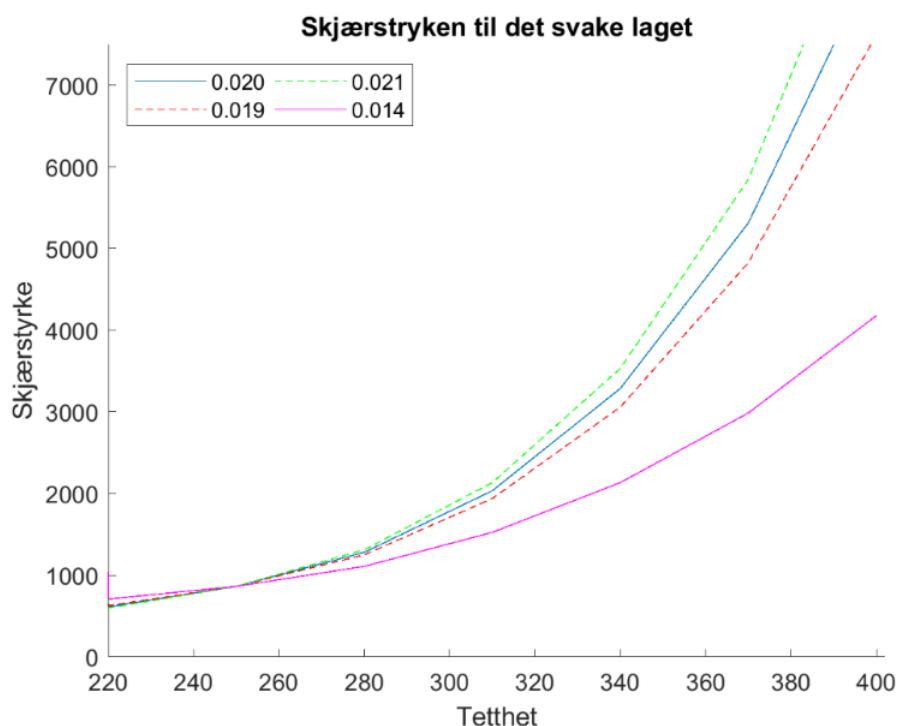
	Referanseskjærstyrke (Pa)				
	1500	1800	2000	2100	2500
Antall skred	38	12	Ingen skred	Ingen skred	Ingen skred
Bruddhøyder (m)	0.49-0.63	0.47-0.70	-	-	-
Årlig sannsynlighet	0.01-0.001	0.004-0.001	-	-	-

En grunntest ble også utført for å se hvordan simuleringsresultatet endret seg fra å simulere med og uten SR16-skogdataene. Simulering i NAKSIN uten skog genererte skred i nesten hele Gauldalen (Figur 59a), mens ved anvendelsen av SR16-dataene i NAKSIN førte til en reduksjon av genererte skred (Figur 59b).



Figur 59: Oversikt over simuleringsresultat fra NAKSIN kjørt med og uten skog i Gauldal, Sør-Trøndelag. a) simulert uten skog. b) simulert med SR-16-skogdata. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en sannsynlighet på minst 0.001 per år.

I henhold til Kap. 3.2.2 ble stigningstallet ( $1/\rho_r$ ) i ligning 21 forandret fra  $0.014 \text{ m}^3/\text{kg}$  til  $0.020 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Endringen gir noe mindre skjærstyrke ved en lav tetthet og skjærstyrken øker eksponentielt ved økende tetthet (Figur 60).



Figur 60: Graf som viser hvordan skjærstyrken forandrer seg fra et stigningstall ( $1/\rho_r$ ) på  $0.014 \text{ m}^3/\text{kg}$  (rosa linje) og til et stigningstallet satt til  $0.020 \text{ m}^3/\text{kg}$  (blå linje). Ved en høyere tetthet vil skjærstyrken bli høyere ved å sette stigningstallet til  $0.020 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $0.019 \text{ m}^3/\text{kg}$  og  $0.021 \text{ m}^3/\text{kg}$  er de avleste minimum- og maksimumsverdiene.

## 5.2.2 Kalibreringsresultat

Kalibreringen av NAKSIN ble utført som beskrevet i Kap. 3.2.3. Tyinstølen (Kap. 4) ble valgt som kalibreringsområde og tetthetens ( $\rho_s$ ) minimumsverdi ble økt systematisk med  $20 \text{ kg/m}^3$  og temperaturavhengigheten i steg på  $10 \text{ kg}/(\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C})$  (Tabell 14). Utløpsdistansen fra det kartlagte skredet fra 2008 ble målt til en horisontal utløpsdistanse på 607 m. Denne ble brukt som sammenligningsgrunnlag for de simulerte skredene fra NAKSIN. I tillegg ble forventet returperiode ( $\sim 300$  år) sammenlignet med estimert returperiode fra NAKSIN.

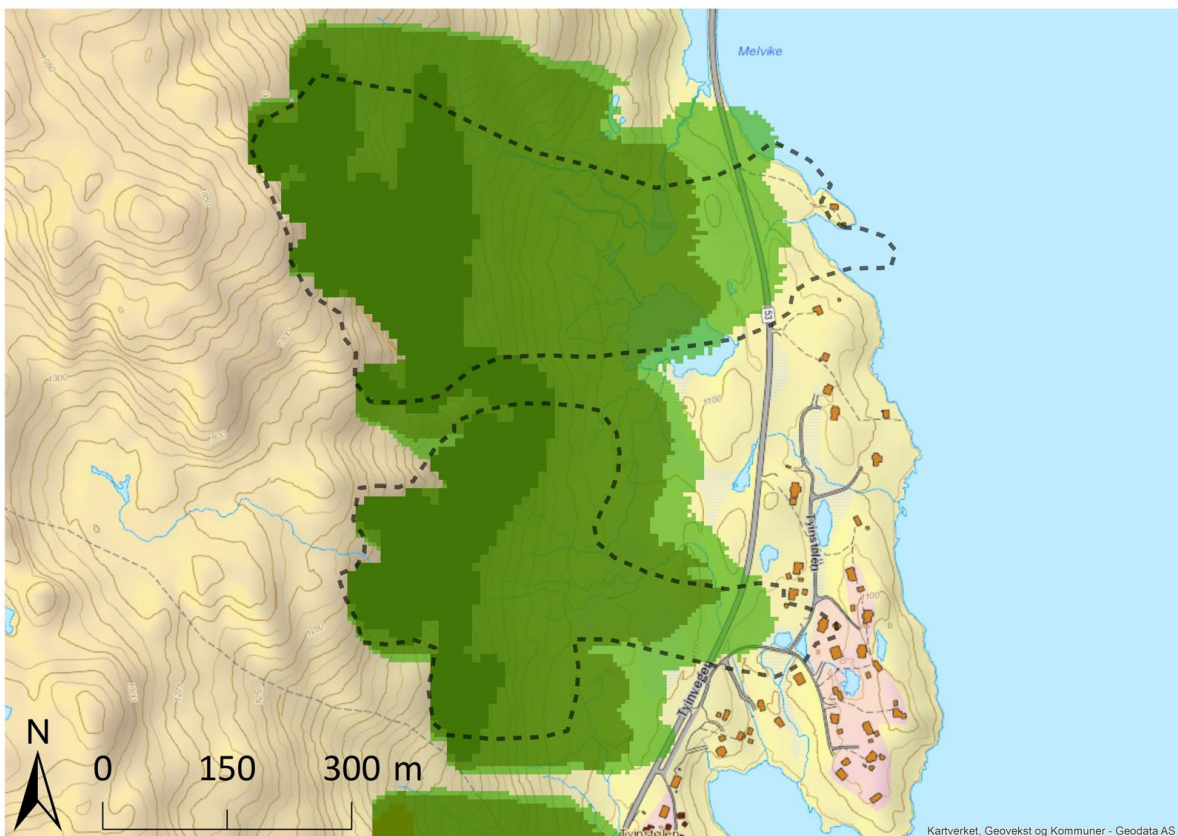
Tabell 14: Oversikt over kalibreringsresultatet, med tilhørende bruddhøyder og utløpslengder (L). R er sannsynligheten for skred fra utløpsområdet. Utløpsdifferansen ( $\Delta L$ ) er differansen mellom simulert utløpslengde (L) og kartlagt skred (horisontal utløpsdistanse).  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget, TA er lufttemperatur og  $\tau_r$  er referanseskjærstyrken.

$\tau_r$ (Pa)	$\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	L (m)	$\Delta L$ (%)	Bruddhøyde (m)	R
1800	maks (200, min (400, 340+20TA))	452	-25.5	0.54	0.69
1900		457	-24.7	0.57	0.61
2000		462	-23.9	0.61	0.52
2100		471	-22.4	0.64	0.45
1800	maks (200, min (400, 340+30TA))	424	-30.1	0.48	0.94
1900		454	-25.7	0.52	0.75
2000		461	-24.1	0.53	0.73
2100		468	-22.9	0.58	0.68
1800	maks (220, min (400, 340+20TA))	475	-21.8	0.62	0.46
1900		475	-21.7	0.64	0.37
2000		477	-21.4	0.66	0.35
2100		484	-20.3	0.72	0.31
1800	maks (220, min (400, 340+30TA))	471	-22.4	0.61	0.50
1900		478	-21.2	0.65	0.39
2000		479	-21.1	0.67	0.37
2100		484	-20.3	0.72	0.31
1800	maks (240, min (400, 340+20TA))	502	-17.3	0.78	0.20
1900		507	-16.4	0.82	0.15
2000		522	-14.0	0.87	0.13
2100		532	-12.4	0.91	0.11
1800	maks (240, min (400, 340+30TA))	502	-17.3	0.78	0.23
1900		507	-16.4	0.82	0.16
2000		522	-14.0	0.86	0.14
2100		532	-12.4	0.91	0.13

Tabell 14 viser 24 simuleringer med ulike referanseskjærstyrker og tetthet. En økning i skjærstyrke og tetthet førte til økt bruddhøyde. Økning i bruddhøyden resulterte i økt utløpslengde. Returperioden økte også med økende skjærstyrke, men var altfor høy i forhold til forventet returperiode på 300 år.

Negative verdier viser prosentvis underestimering av utløpslengde ( $\Delta L$ ). Resultatet som ga lavest prosentvis differanse i utløpslengde, samt lavest returperiode, samstemte best med observert skred og utgjorde de best kvalifiserte verdiene for NAKSIN. Dette tilsvarte en skjærstyrke på 2100 Pa med tilhørende tetthet på 240 kg/m<sup>3</sup> ved -5°C, og 400 kg/m<sup>3</sup> ved +3°C (Tabell 14).

Resultatet mellom største og minste prosentvis verdi i utløpslengde ga en differanse i utløpslengden på 108 m (Figur 61).



Figur 61: Resultat fra kalibreringen av NAKSIN fra området Tyinstølen. Mørkest farge representerer utløpsningsområdet, mørkegrønn farge tilsvarer dårligst tilpassede parameter og lysegrønn er best tilpassede parameter. Stiplet linje representerer skredobservasjoner.

### 5.2.3 Sensitivitetsanalyse

Valideringsområdene Aga, Lom og Sande ble brukt i sensitivitetsanalysen, utført med de beste tilpassede verdiene fra kalibreringen. Resultatet fra sensitivitetsanalysen av NAKSIN viste at økende  $\rho_w$  gir økning i skjærstyrken (Ligning 21). Denne økningen førte til at skred gikk sjeldnere, men når de først ble utløst var de større og gikk lengre. Simuleringen for Lom utført i NAKSIN resulterte i ingen genererte skred (Tabell 15), mens for Sande ble kun skred generert ved  $\rho_w = 0.79\rho_s$  (Tabell 16). Resultatet fra sensitivitetsanalysen ved Aga ble evaluert ut fra simulert utløpslengde og kartlagt 1000-årssone (Figur 62). Best korrelerte utløpslengde i henhold til kartlagt sone ble funnet med  $\rho_w = 0.79\rho_s$  (Tabell 17 og Figur 62).

Tabell 15: Lom: resultat fra sensitivitetsanalysen av tettheten til det svake laget ( $\rho_w$ ).  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget,  $V$  er volumet og  $R$  er sannsynligheten for skred fra tilhørende utløsningsområder.

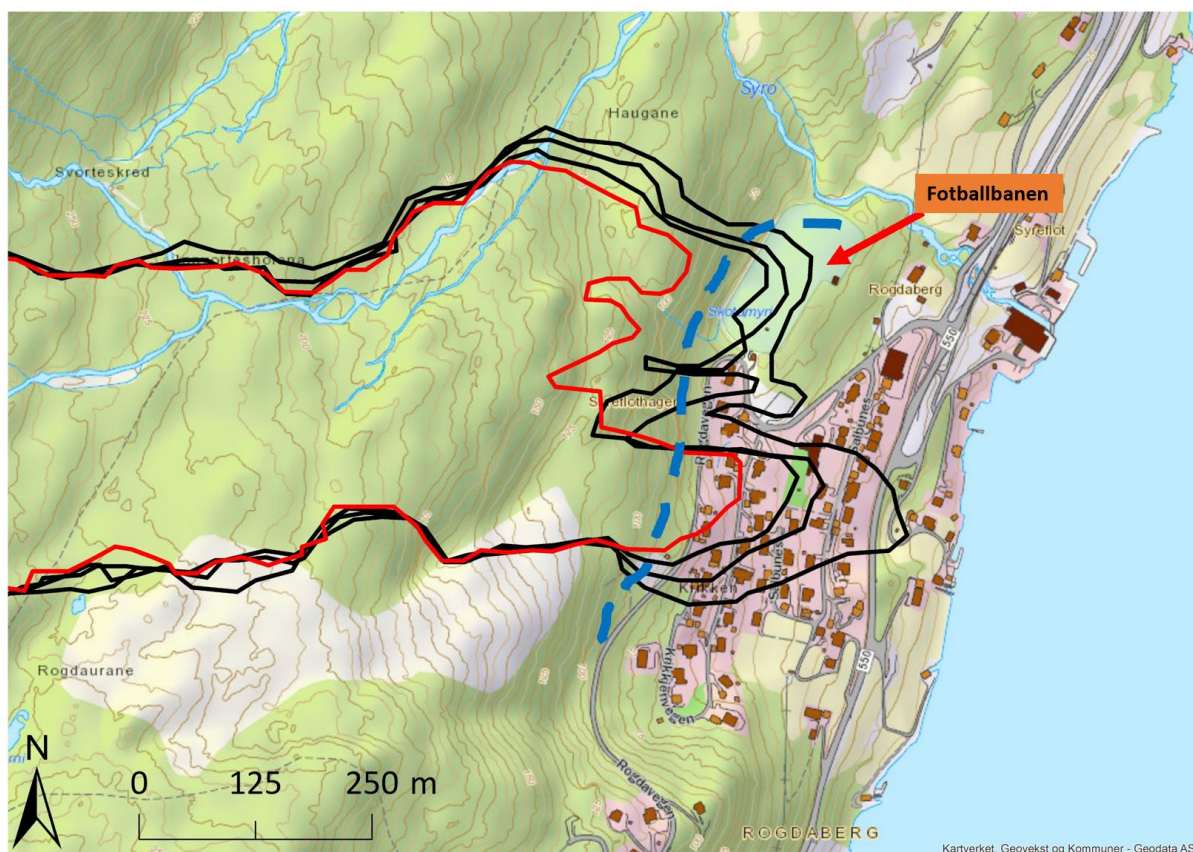
Sted	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	R	V (m <sup>3</sup> )	Beskrivelse
Lom	$0.79\rho_s$	-	-	Ingen skred
Lom	$0.80\rho_s$	-	-	Ingen skred
Lom	$0.81\rho_s$	-	-	Ingen skred
Lom	$0.82\rho_s$	-	-	Ingen skred

Tabell 16: Sande: resultat fra sensitivitetsanalysen av tettheten til det svake laget ( $\rho_w$ ).  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget,  $V$  er volumet og  $R$  er sannsynligheten for skred fra tilhørende utløsningsområder.

Sted	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	R	V (m <sup>3</sup> )	Beskrivelse
Sande	$0.79\rho_s$	0.0015; 0.0019	3102; 3091	To skred
Sande	$0.80\rho_s$	-	-	Ingen skred
Sande	$0.81\rho_s$	-	-	Ingen skred
Sande	$0.82\rho_s$	-	-	Ingen skred

Tabell 17: Aga: resultat fra sensitivitetsanalysen av tettheten til det svake laget ( $\rho_w$ ).  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget,  $V$  er volumet og  $R$  er sannsynligheten for skred fra tilhørende utløsningsområder.

Sted	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	R	V (m <sup>3</sup> )	Beskrivelse
Aga	$0.79\rho_s$	1.05	1685	Går ikke til fotballbanen
Aga	$0.80\rho_s$	0.98	1784	Ved fotballbanen
Aga	$0.81\rho_s$	0.75	1932	Over fotballbanen
Aga	$0.82\rho_s$	0.65	2004	Godt stykke over fotballbanen



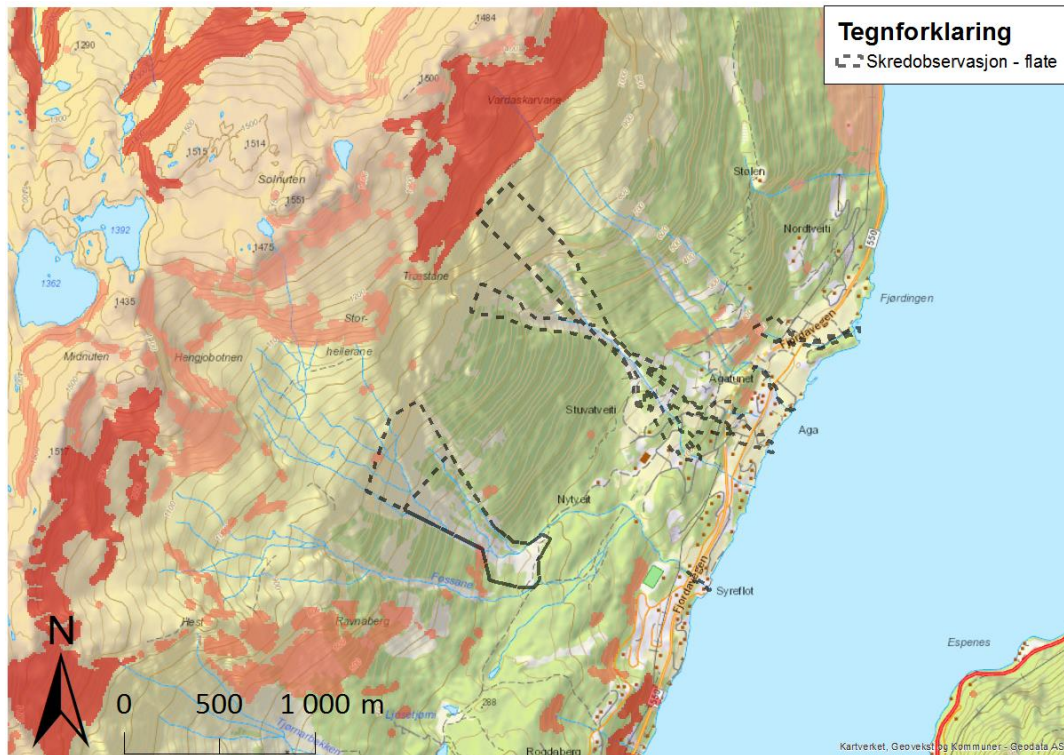
Figur 62: Aga: De svarte heltrukne linjene representerer  $\rho_w = (0.80, 0.81 \text{ og } 0.82)\rho_s$  i økende størrelse. Den røde heltrukne linjen er den best tilpassede verdien basert på utført faresonekartlegging i området og har en  $\rho_w = 0.79\rho_s$  (Brattlien et al., 2018). Kartlagt faresone 1/1000 er angitt med blå stiplede linje.

## 5.2.4 NAKSIN med nye fastsatte parametere

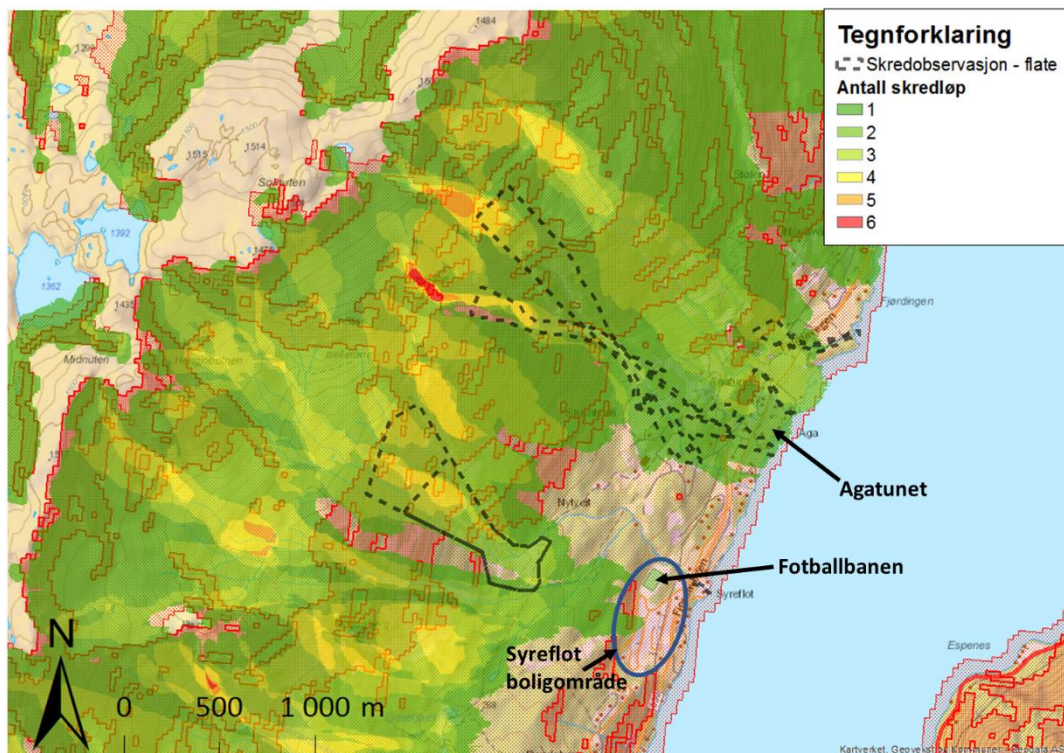
Resultatet fra kalibreringen og sensitivitetsanalysen ble videre brukt til valideringen av NAKSIN ved de utvalgte områdene Aga, Bleie, Tjoflotviki, Sande, Tromsdalen, Tyinstølen, samt Lom, og er presentert nedenfor. For bedre oppløsning av kartene se vedlegg C.

### Aga

Valget av potensielle utløsningsområder (Figur 63) er utført iht. Kap. 2.4. Simuleringene med NAKSIN fra disse utløsningsområdene ga en kortere aktsomhetssone sammenlignet med nåværende aktsomhetskart (Figur 64). Skredene som ble simulert ned til boligområdene Syreflot og Agatunet, hadde en estimert sannsynlighet på rundt 0.001/år, mens utløsningssannsynligheten for skred fra disse utløsningsområdene (Figur 63) var 3-4/år, med tilhørende bruddhøyder på 0.78 til 0.66 m.



Figur 63: Oversikt over potensielle utløsningsområder for Aga, representert ved ulike rødfnyanser. Hver enkelt rødfnyanse representerer et unikt utløsningsområde som NAKSIN generer basert på geometriske kriterier. Stiplet sort linje viser skredobservasjoner.

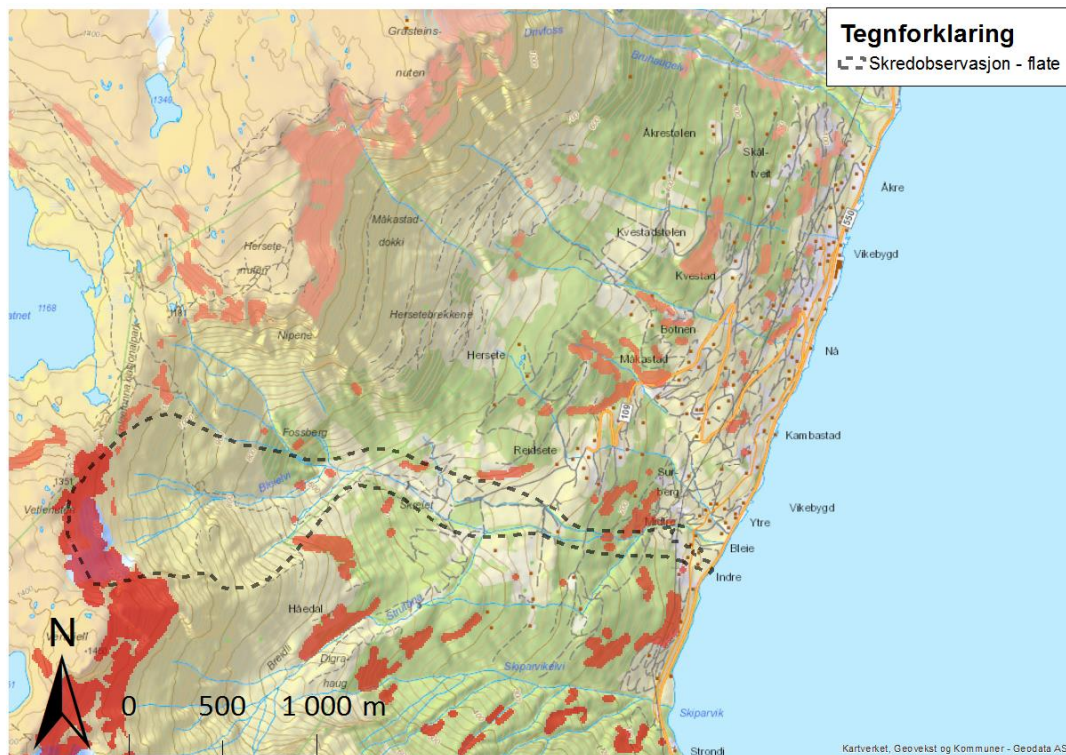


Figur 64: Sammenligning mellom nåværende aktsomhetssoner (rød skravur som går helt ned til fjorden) (NVE, 2019a) med kjøringene av NAKSIN (grønne og gule farger) for Aga. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001. Stiplet linje viser skredobservasjoner.

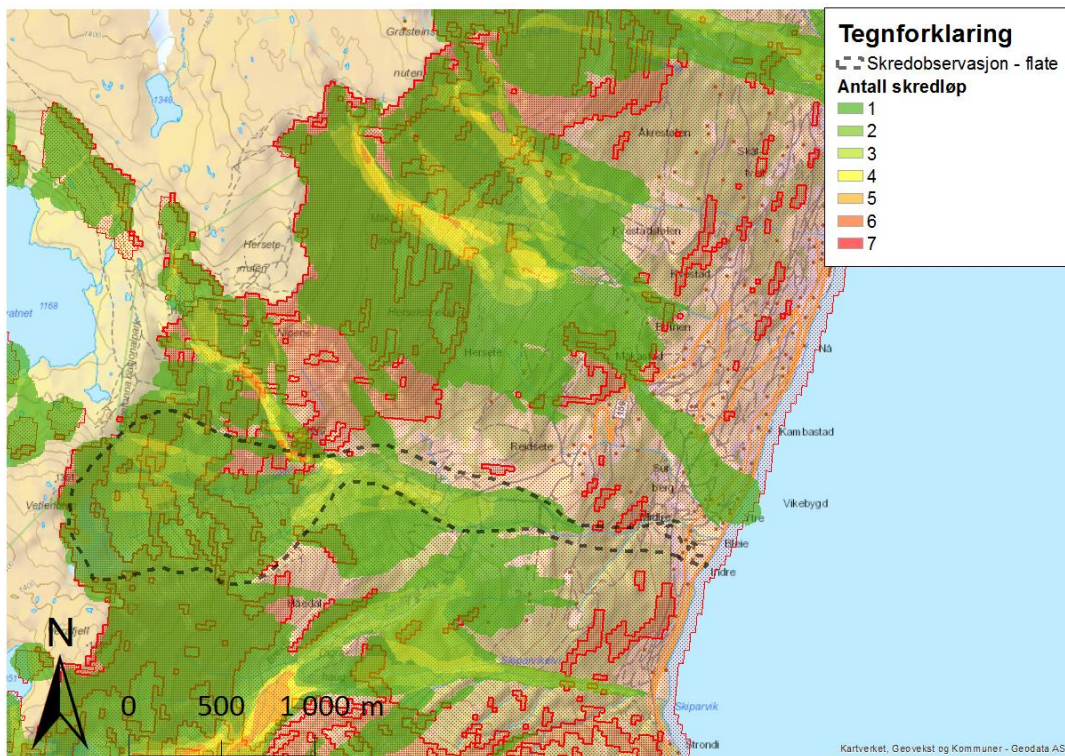


## Bleie

Valget av potensielle utløsningsområder (Figur 65) er utført iht. Kap. 2.4. Simuleringene utført i NAKSIN ga et utløpsområde som var noe underestimert sammenlignet med en observert skredhendelse fra 1994 (Figur 66, vist i stiplet linje). Simuleringen tilhørende det observerte skredet hadde en estimert bruddhøyde og volum fra NAKSIN på henholdsvis 0.71 m og 173 950 m<sup>3</sup>, mens utløsningssannsynligheten for skred fra dette utløsningsområdet var estimert til 3/år. Beregnede utløpsområder i NAKSIN utgjorde en mindre aktsomhetszone sammenlignet med nåværende aktsomhetskart (Figur 66).



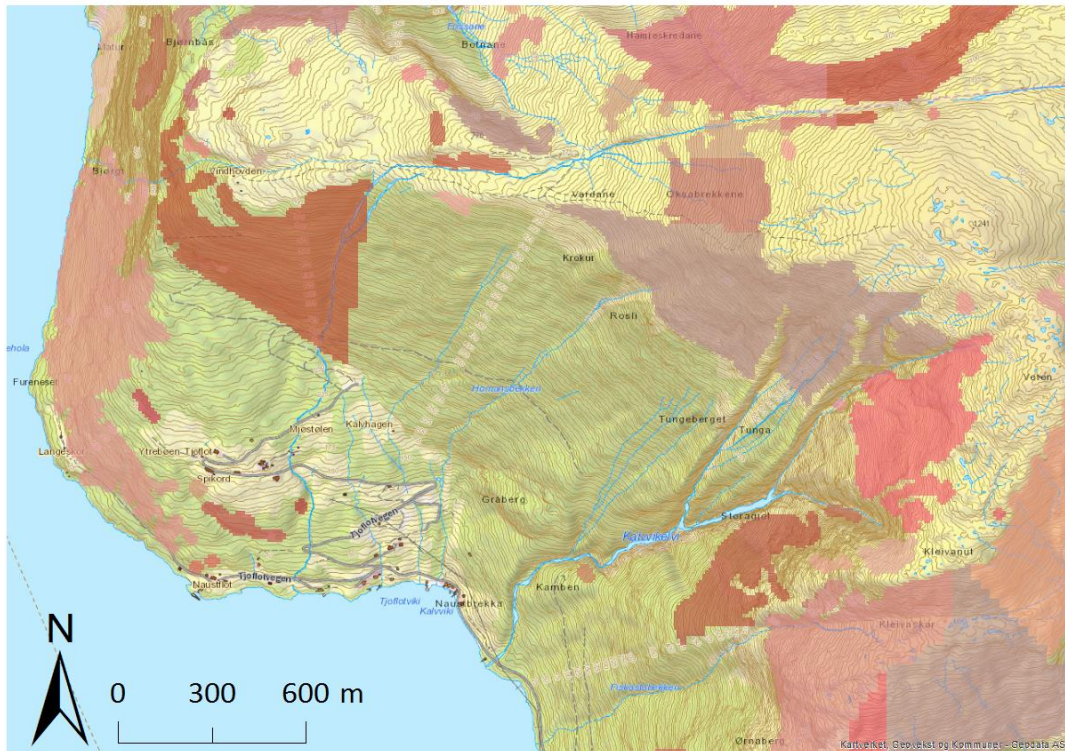
Figur 65: Oversikt over potensielle utløsningsområder for Bleie, representert ved ulike rødnyanser. Hver enkelt rødnyanse representerer et unikt utløsningsområde som NAKSIN generer basert på geometriske kriterier. Stiplet sort linje viser observert skredbane.



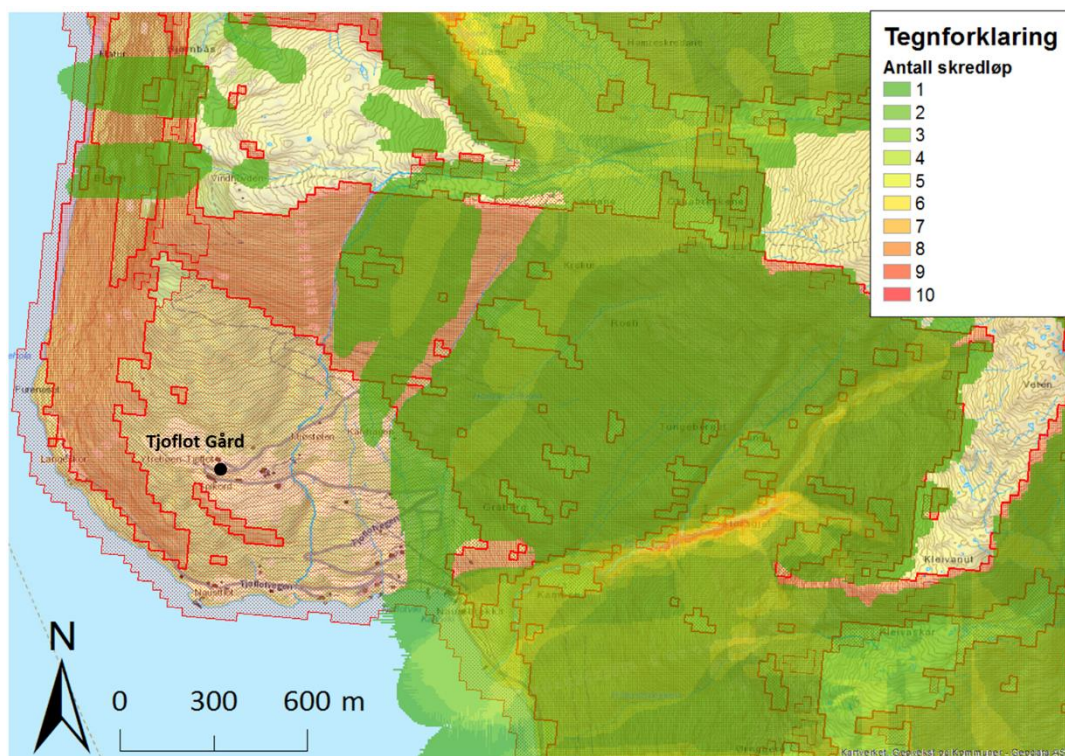
Figur 66: Sammenligning mellom nåværende aktsomhetssoner (rød skravur som går helt ned til fjorden) (NVE, 2019a) med kjøringene av NAKSIN (grønne og gule farger) for Bleie. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001. Stiplet linje er skredhendelsen fra 1994.

## Tjoflotviki

Simuleringen utført i NAKSIN for Tjoflotviki resulterte i ingen utløste skred over Tjoflot Gård. Skredene som simuleres øst for Tjoflot Gård (ved de østligste husene) løsnet fra utløsningsområder uten skog (Figur 67 og Figur 68). Disse skredene hadde en estimert sannsynlighet på 0.001/år, mens utløsningssannsynlighetene for skred fra disse utløsningsområdene var 1-3/år. Tilhørende estimert bruddhøyde var på 0.73 og 0.78 m. Beregnet utløpsområder i NAKSIN utgjorde en stedvis kortere aktsomhetszone sammenlignet med nåværende aktsomhetskart (Figur 68).



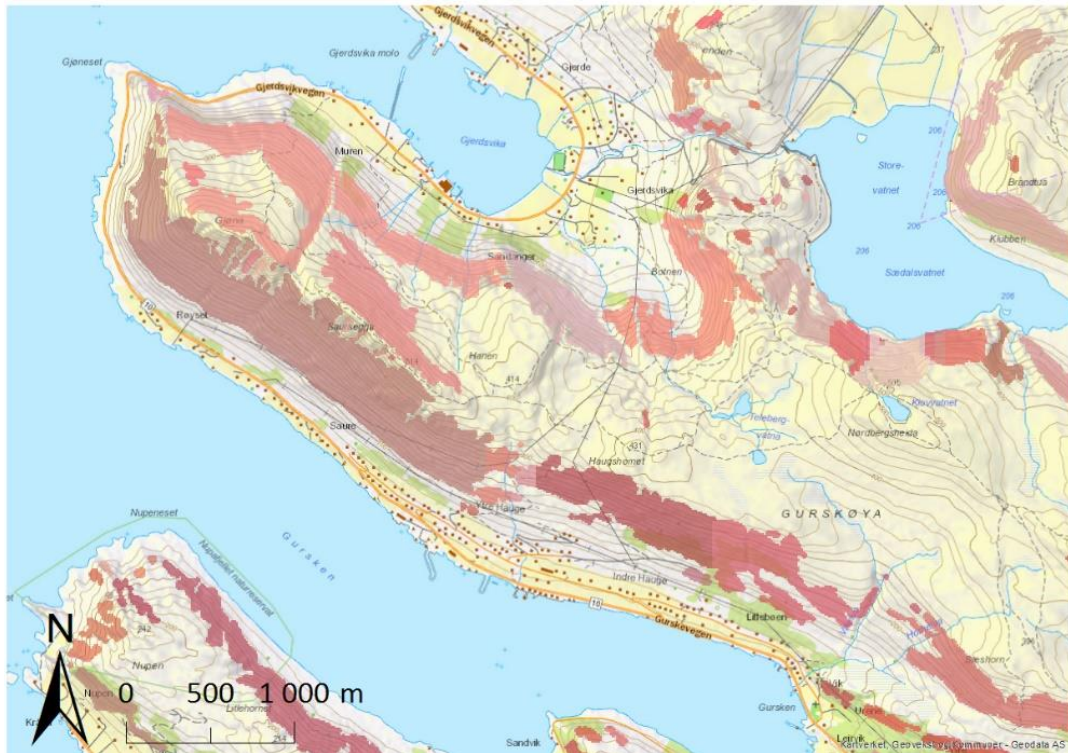
Figur 67: Oversikt over potensielle utløsningsområder for Tjøflotviki, representert ved ulike rødynanser. Hver enkelt rødynanse representerer et unikt utløsningsområde som NAKSIN generer basert på geometriske kriterier.



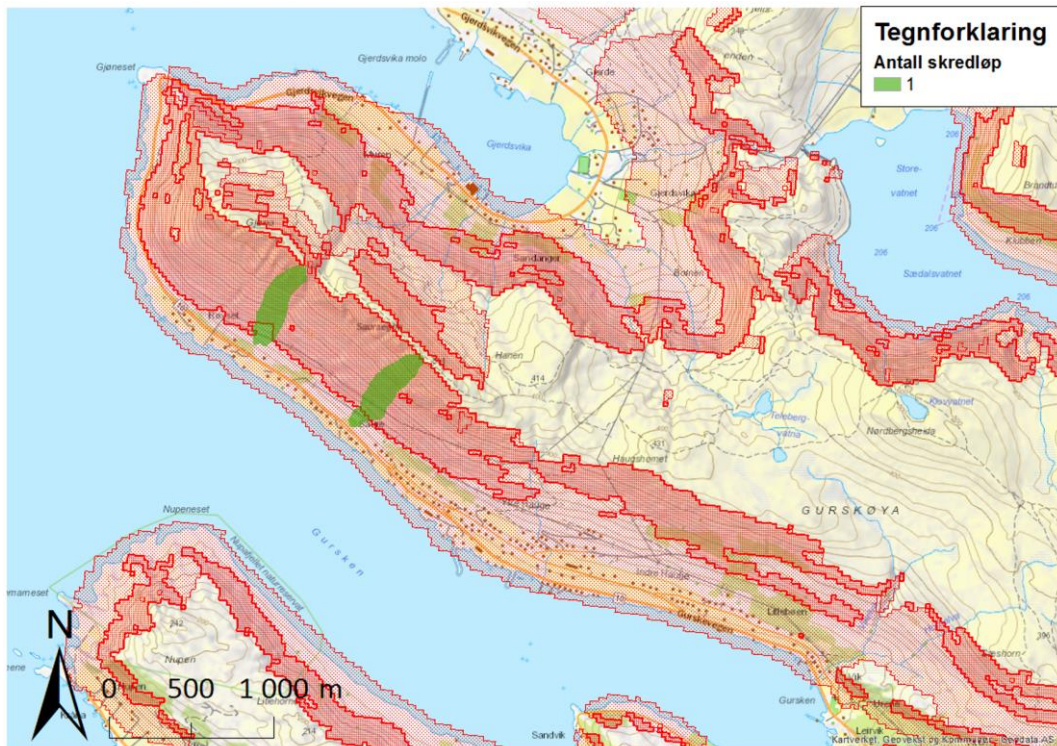
Figur 68: Sammenligning mellom nåværende aktsomhetssoner (rød skravur som går helt ned til fjorden) (NVE, 2019a) med kjøringene av NAKSIN (grønne og gule farger) for Tjøflotviki. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001.

## Sande

Basert på geometriske kriterier, ble potensielle utløsningsområder estimert i de fleste fjellssidene (Figur 69). Simuleringene med NAKSIN fra disse ga kun to skred (Figur 70). Returperioden for de to simulerte skredene ble estimert til 666 og 526 år med tilhørende bruddhøyder på 1.82 og 2.06 m (Tabell 16). Beregnede utløpsområder i NAKSIN ga en betraktelig reduksjon i aktsomhetssoner sammenlignet med nåværende aktsomhetskart (Figur 70).



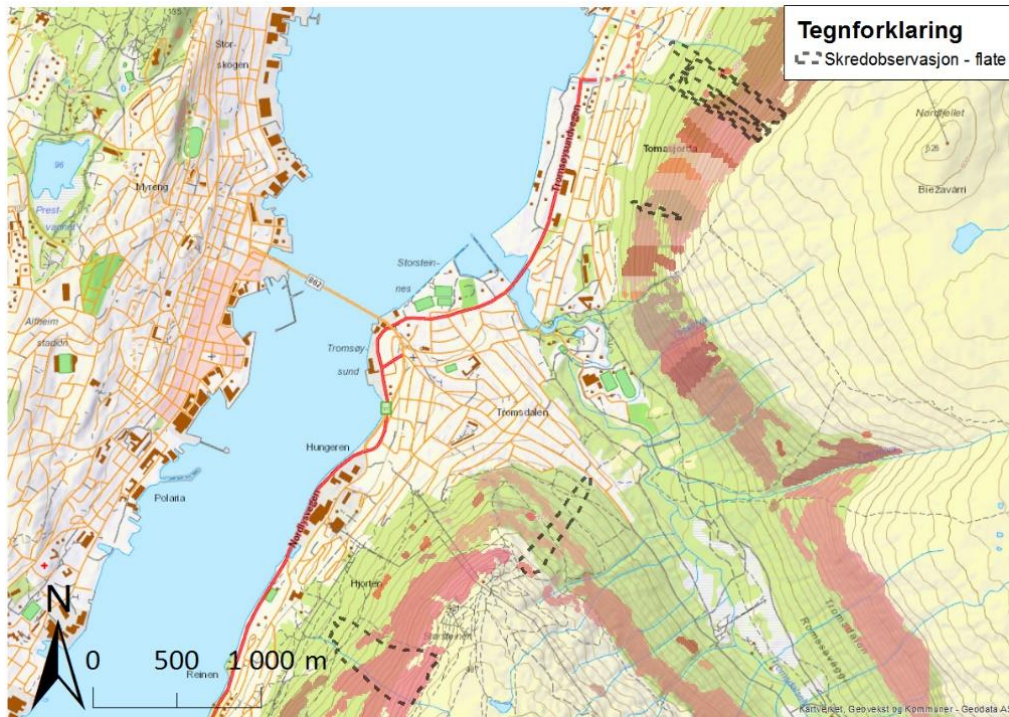
Figur 69: Oversikt over potensielle utløsningsområder for Sande, representert ved ulike rødnysner. Hver enkelt rødnysne representerer et unikt utløsningsområde som NAKSIN generer basert på geometriske kriterier.



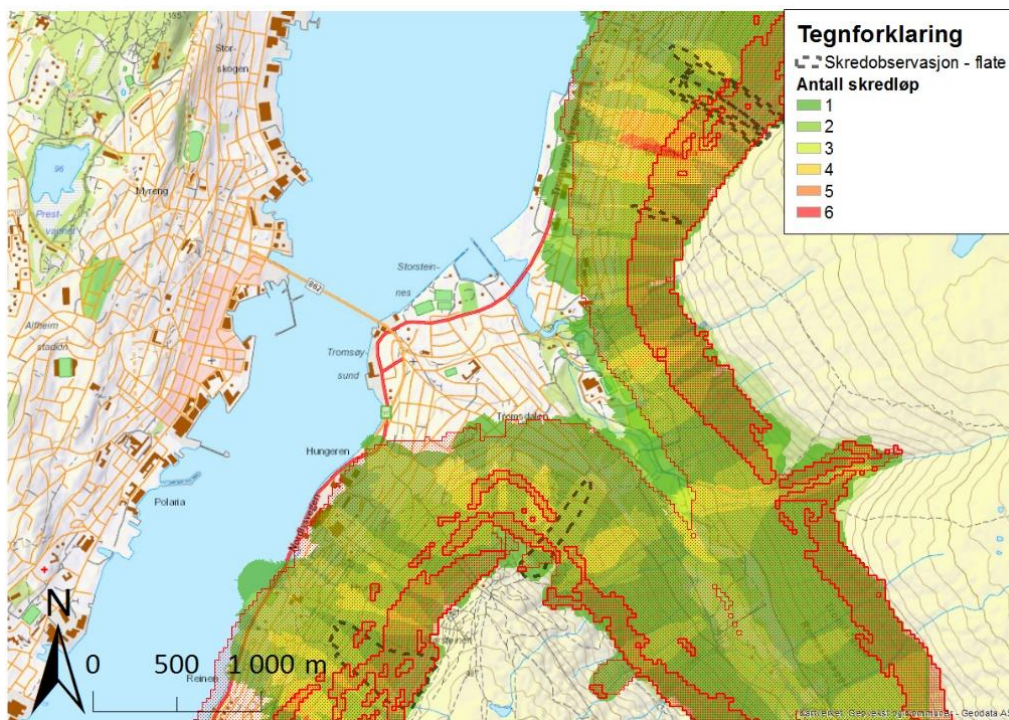
Figur 70: Sammenligning mellom nåværende aktsomhetssoner (rød skravrur) (NVE, 2019a) med kjøringene av NAKSIN (grønn farge) for Sande. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001.

## Tromsdalen

Simuleringen utført i NAKSIN for Tromsdalen ga skred i nesten alle de potensielle utløsningsområdene (Figur 71). De simulerte skredene ga en tilnærmet aktsomhetsone som nåværende aktsomhetskart (Figur 72). Høyest og lavest returperiode for simulerte skred var 934 og 50 år, med en gjennomsnittlig returperiode på 330 år. Tilhørende bruddhøyder var på 1.18 og 1.05 m.



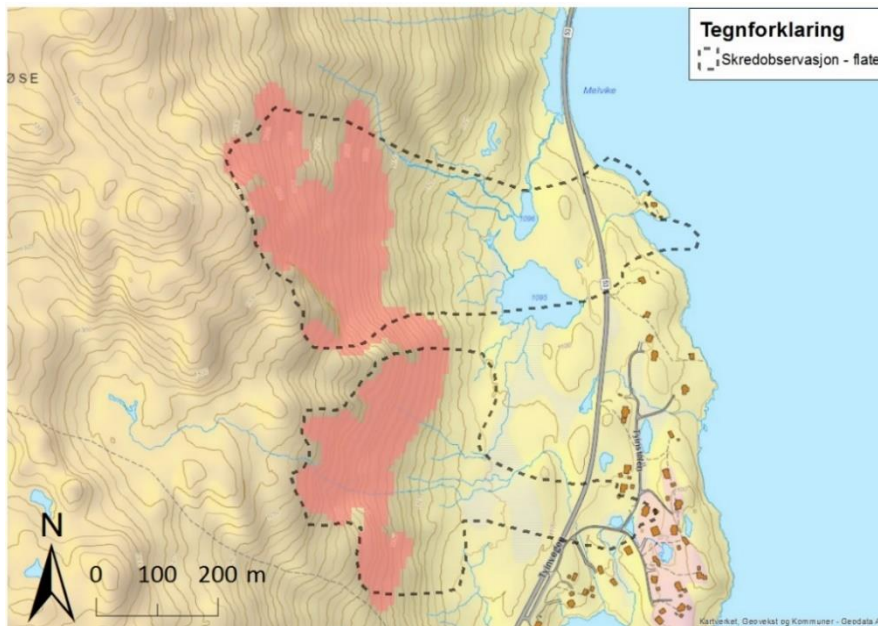
Figur 71: Oversikt over potensielle utløsningsområder for Tromsdalen, representert ved ulike rødnyanser. Hver enkelt rødnyanse representerer et unikt utløsningsområde som NAKSIN generer basert på geometriske kriterier. Stiplet linje viser skredobservasjoner.



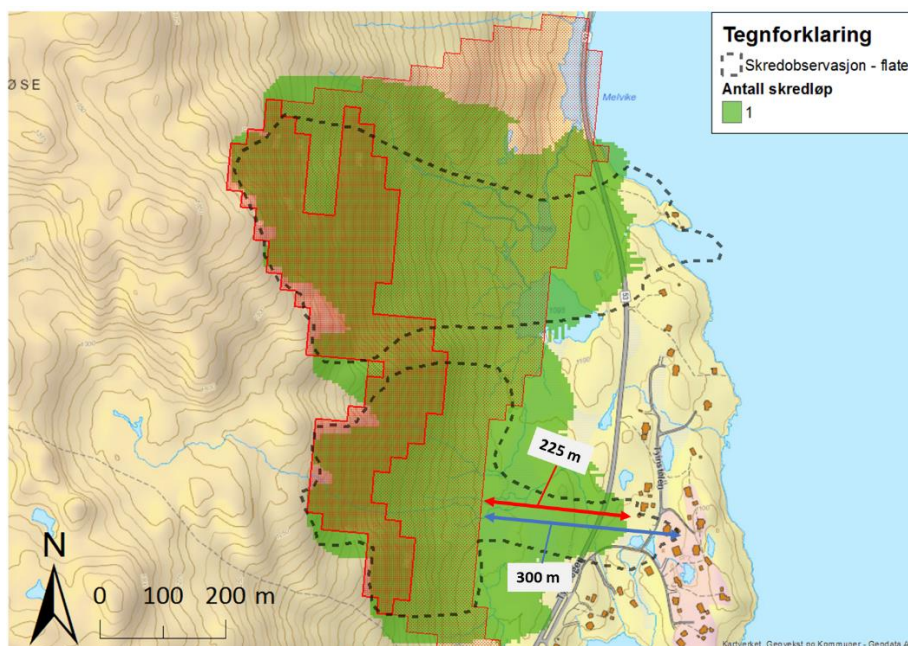
Figur 72: Sammenligning mellom nåværende aktsomhetssoner (rød skravur) (NVE, 2019a) med kjøringene av NAKSIN (grønne og gule farger) for Tromsdalen. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001. Stiplet linje viser skredobservasjoner.

## Tyinstølen

Ved Tyinstølen generer NAKSIN skred fra ett felles utløsningsområde (Figur 73). Utløsningssannsynligheten for simulerte skred fra dette utløsningsområdet var på 0.12/år og bruddhøyden 0.87 m. Simuleringen fra dette utløsningsområdet ga en forbedring fra nåværende aktsomhetskart med en differanse på 225 m (Figur 74), men underestimeres med 75 m i forhold til observert skred.



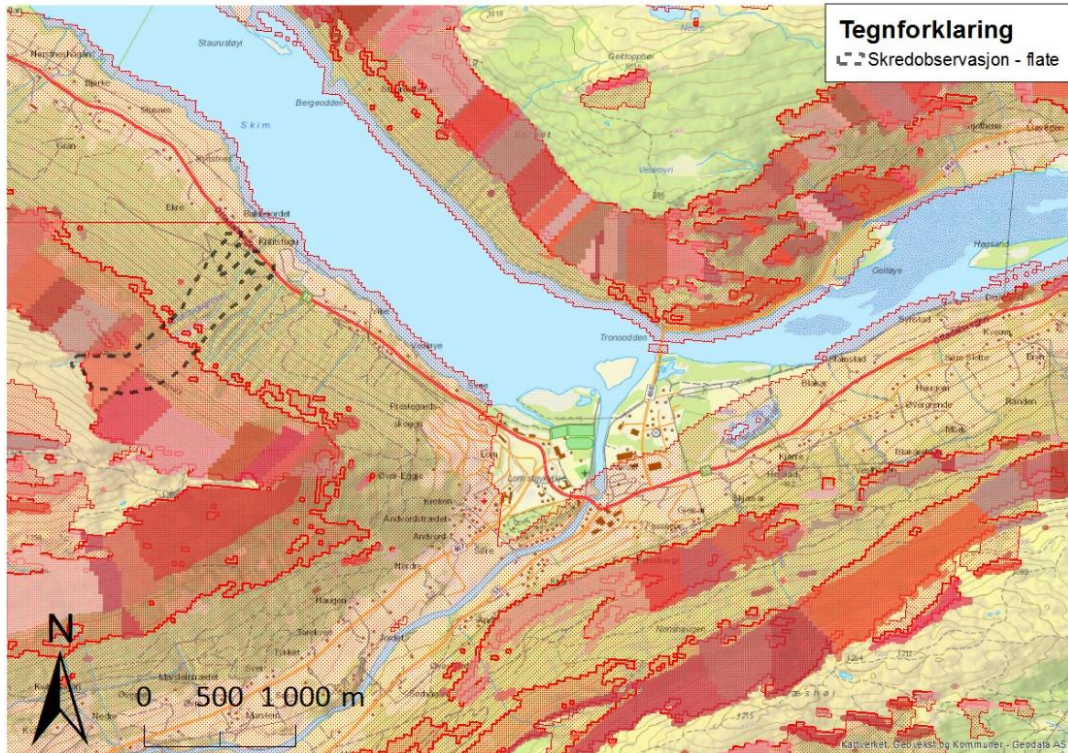
Figur 73: Utløsningsområdet generert i NAKSIN for Tyinstølen (vist i rødt). Stiplet sort linje viser observert skredhendelse fra 2008.



Figur 74: Sammenligning mellom nåværende aktsomhetssoner (rød skraver) (NVE, 2019a) med kjøringene av NAKSIN (grønn farge) for Tyinstølen. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001. Stiplet linje viser skredobservasjoner fra 2008.

## Lom

Simuleringen utført i NAKSIN genererte ingen skred i Lom. De potensielle utløsningsområdene fra NAKSIN (Figur 75) har et omtrentlig tilsvarende utløsningsområde som nåværende aktsomhetskart.



Figur 75: Oversikt over potensielle utløsningsområder for Lom, representert ved ulike rødfnyanser. Hver enkelt rødfnyanse representerer et unikt utløsningsområde som NAKSIN generer basert på geometriske kriterier. Simuleringene i NAKSIN resulterte i ingen skred. Skravert område i rødt representerer nåværende aktsomhetskart, data hentet (NVE, 2019a). Stiplet sort linje viser skredobservasjoner.



## 5.2.5 NAKSIN uten interpolering av nedbørsdata

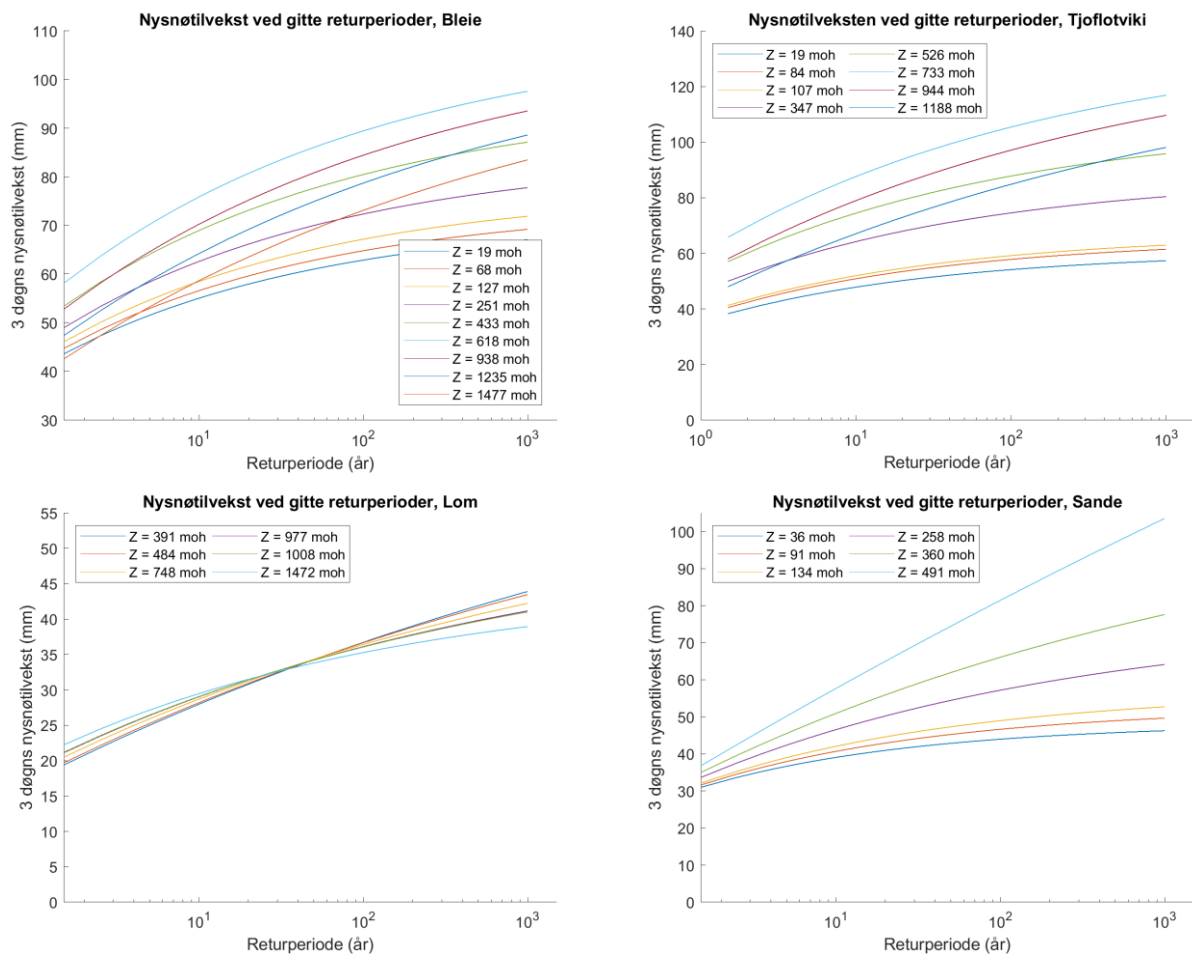
For å undersøke interpoleringsmetoden for parameterne av fordelingsfunksjonen for nedbør nærmere, ble referanseverdiene for terreng høyden ( $Z$ ), samt verdier for den lineære høydeinterpoleringen av Pareto-parameterne til nysnøtilveksten og snøhøyden hentet ut fra NAKSIN.

Tabell 18: Oversikt over referanseverdiene til høyden ( $Z_{0.9}$ ) med tilhørende Pareto-fordeling av form ( $\xi$ ) og skala ( $\sigma$ ) for nysnøtilvekst (HN) og maksimal snøhøyde (HS).

	<b>Ref. Z (moh.)</b>	<b>Pareto-fordeling, Nysnøtilvekst</b>	<b>Pareto-fordeling, Snøhøyde</b>
Bleie	Z = 19 Z1 = 68 Z2 = 127 Z3 = 251 Z4 = 433 Z5 = 618 Z6 = 938 Z7 = 1235 Z8 = 1477	$\sigma_{HN,maks} = 19.61 + 0.00763/m \cdot Z$ $\xi_{HN,maks} = -0.277 + 0.000090/m \cdot Z$	$\sigma_{HS,maks} = 0.265 + 0.00232/m \cdot Z$ $\xi_{HS,maks} = -0.491 + (-0.000188)/m \cdot Z$
Sande	Z = 36 Z1 = 91 Z2 = 134 Z3 = 258 Z4 = 360 Z5 = 491	$\sigma_{HN,maks} = 16.35 + (-0.00782)/m \cdot Z$ $\xi_{HN,maks} = -0.357 + 0.000663/m \cdot Z$	$\sigma_{HS,maks} = 0.292 + 0.00100/m \cdot Z$ $\xi_{HS,maks} = -0.614 + (-0.000979)/m \cdot Z$
Lom	Z = 391 Z1 = 484 Z2 = 748 Z3 = 977 Z4 = 1008 Z5 = 1472	$\sigma_{HN,maks} = 5.68 + 0.00225/m \cdot Z$ $\xi_{HN,maks} = -0.044 + (-0.000105)/m \cdot Z$	$\sigma_{HS,maks} = 0.213 + 0.00021/m \cdot Z$ $\xi_{HS,maks} = -0.424 + (-0.000033)/m \cdot Z$
Tjoflotviki	Z = 19 Z1 = 84 Z2 = 107 Z3 = 347 Z4 = 526 Z5 = 733 Z6 = 944 Z7 = 1188	$\sigma_{HN,maks} = 17.57 + 0.01192/m \cdot Z$ $\xi_{HN,maks} = -0.296 + 0.000143/m \cdot Z$	$\sigma_{HS,maks} = 0.238 + 0.00262/m \cdot Z$ $\xi_{HS,maks} = -0.375 + (-0.000456)/m \cdot Z$

Fremstillingen av de lineære høydeinterpolerte Pareto-parameterne til snøhøyden og nysnøtilvekst fra Tabell 18 vises i Figur 76 og Figur 77.

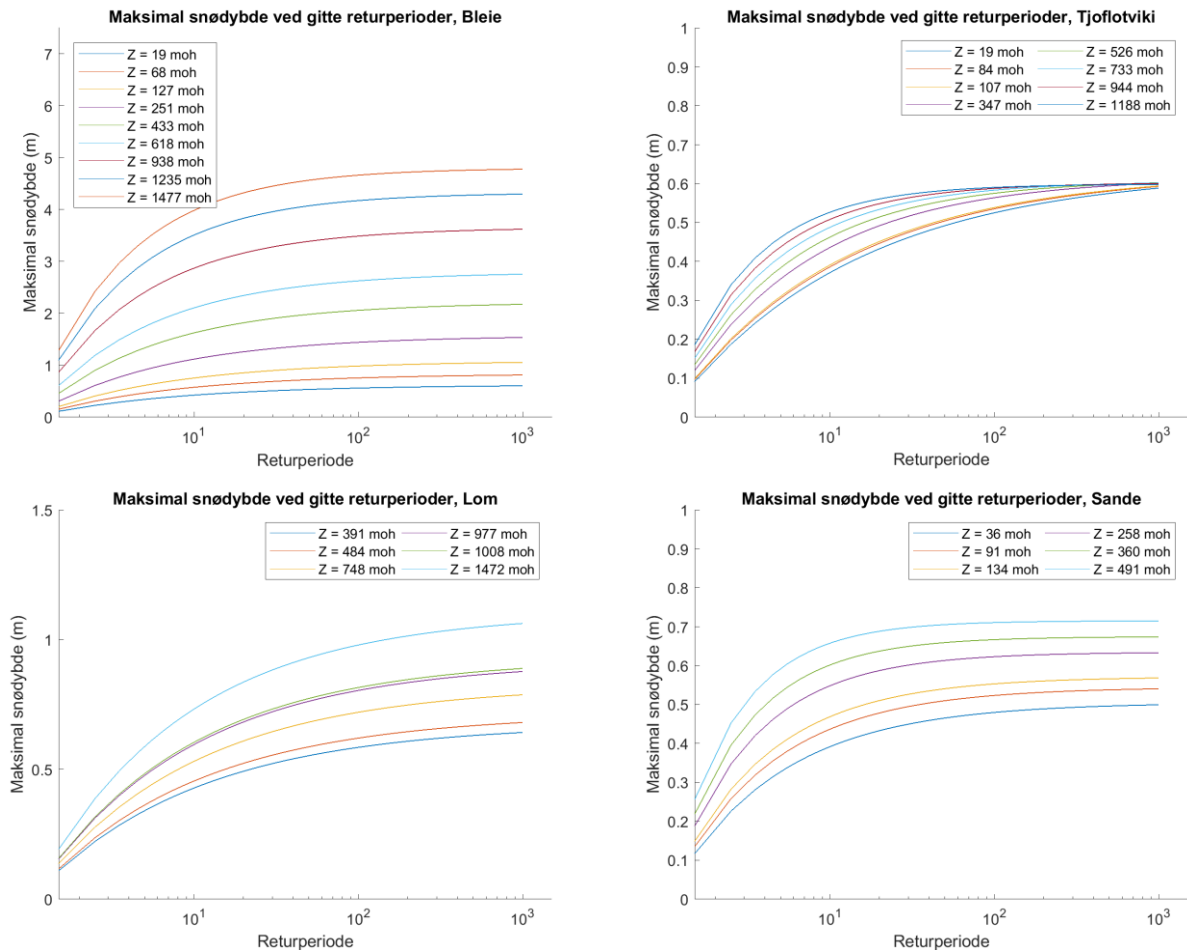
Interpolering av verdiene for Bleie, Tjoflotviki og Lom ga ved enkelte referansehøyder et større stigningstall enn ved de andre referansehøydene (Figur 76), og førte til at linjene krysset hverandre. For Lom viste resultatet en nysnøtilvekst på 44 mm ved 391 moh. med en returperiode på 1000 år. Ved 1472 moh. var nysnøtilveksten 37 mm.



Figur 76: Interpolering av nysnøtilveksten med høyden. Fordelingen har ulike stigningstall og fører til at linjene krysser hverandre.

Interpoleringen av parameterne som beskriver maksimal snøhøyde (Figur 77) ved Bleie, Tjoflotviki og Sande ga en utføring, som betyr at en returperiode på 10 år vil ha nesten lik snøhøyde som ved en returperiode på 1000 år.

Laveste referansehøyde ved Bleie ga en maksimal snøhøyde på 0.3 m og ved 1477 moh. en maksimal snøhøyde på 5 m. Tjoflotviki, som ligger i samme område, ga en mer samlet verdi for interpolering med høyden og når en maksimal snøhøyde på 0.6 m (Figur 77).



Figur 77: Interpolering av maksimal snøhøyde med høyden. Utvalgte områder ble anvendt for å se om riktig valg av interpolering var gjort.

## Simulering uten interpolering

Simuleringene utført i NAKSIN uten interpolering ga en økning i skredhendelser ved Tjoflotviki og Lom. For Sande genererte NAKSIN ingen skred. De resterende valideringsområdene fikk en liten økning i bruddhøyden og lavere returperioder.

## 5.2.6 Testing av parametersett for Lom

Hvilke parametere som må til for at NAKSIN skal generere skred i Lom, da spesielt Knutstugrovi-skredet, og hvordan disse parameterne påvirket utvalgte valideringsområder ble testet (Tabell 19).

Tabell 19: Parametere som genererte skred for Lom i NAKSIN.  $\tau_r$  er referanseskjærstyrken,  $\rho_s$  er tettheten til det gamle snølaget og  $\rho_w$  er tettheten til det svake laget. R er estimert årlig sannsynlighet for skred fra utløsningsområde til Knutstugrovi-skredet.

Område	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\tau_r$ (Pa)	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	Beskrivelse	
				Antall skred	R
Lom	maks (220, min (400, 340 + 30TA))	1900	0.81 $\rho_s$	19	0.0014
			0.82 $\rho_s$	2	0.0012

Tettheten ble satt til en lavere verdi, 220 kg/m<sup>3</sup> ved en temperatur på -4°C, og 400 kg/m<sup>3</sup> ved en temperatur på +2°C. Referanseskjærstyrken ble satt ned til 1900 Pa og  $\rho_w$  ble satt høyere til 0.82. Ved en lavere skjærstyrke og tetthet (Tabell 19), simulerte NAKSIN skred i Lom, men ga generelt kortere utløpslengde for de andre valideringsområdene. For Sande genererte NAKSIN ingen skred.

Det ble også testet med lavere  $\rho_w$  satt til 0.81. Beregnet i NAKSIN ga dette 19 skred for Lom, mens for Tjoflotviki resulterte simuleringen i skred over Tjoflot Gård. Tjoflot Gård er kartlagt som et 'ikke potensielt' skredområde (Figur 57). Generelt for begge de testede parametersettene gir det lave utløsningssannsynligheter for Knutstugrovi.

## 5.2.7 Oppsummering av resultater, NAKSIN

Resultatene fra NAKSIN ga en reduksjon i aktsomhetssonene sammenlignet med nåværende aktsomhetskart i 4 av 7 områder. Ved Tyinstølen estimerte NAKSIN en større aktsomhetssone, mens ved Lom genererte NAKSIN ingen skred. For Tromsdalen var den genererte aktsomhetssone tilsvarende som nåværende aktsomhetskart. NAKSIN ga høye returperioder og lave bruddhøyder for de fleste valideringsområdene. Resultatet fra interpoleringen av parameterne til nysnøtilveksten ga linjer som krysset hverandre. Dette viste at lavereliggende terreng fikk en høyere tilvekst av nysnø enn høyereliggende terreng. Snøhøydens fordeling viste for kort hale, som ga en omtrentlig lik snøhøyde ved en returperiode på 10 år og 1000 år. Parametersettet som ble kalibrert for Lom tilsvarte en tetthet på 220 kg/m<sup>3</sup> ved en temperatur på -4°C, og 400 kg/m<sup>3</sup> ved en temperatur på +2°C. Dette førte

til at NAKSIN genererte skred ved Lom. Ved å sette  $\rho_w = 0.82$  resulterte det i 19 skred. En  $\rho_w = 0.81$  ga 2 skred.

## 6 Diskusjon

Kapittelet inneholder diskusjon av resultatene beskrevet i kapittel 5. Diskusjonen har en oppbygging samfallende med stegene fra utførelsesprosessen, og består av to hoveddeler, MoT-Voellmy og NAKSIN. Kapittelet som omhandler valideringen av MoT-Voellmy tar utgangspunkt i valg av oppløsning og friksjonskoeffisienter for medrivning, samt tilbakeberegning av to utvalgte skredhendelser. Kapittelet om NAKSIN tar i hovedsak utgangspunkt i sammenligningen av beregnede aktsomhetssoner fra NAKSIN og nåværende aktsomhetskart. Disse resultatenes pålitelighet diskuteres på bakgrunn av utførte faresonevurderinger.

### 6.1 Validering av MoT-Voellmy

#### 6.1.1 Numerisk stabilitet og valg av oppløsning

Ved testingen av hvordan resultatet avhenger av oppløsningen i MoT-Voellmy, ga simuleringene på skråplanet lavest differanse i utløpslengde og hastighet ved en oppløsning på 5 og 10 m. Ved oppløsninger på 2, 5 og 10 m i simuleringene av skred i Bleie, observeres det at skredet følger terrenget bedre, og flyter ikke utover i like stor grad slik det gjør ved 20 m oppløsning. Resultatet støttes av andre studier. Christen et al. (2010b) undersøkte hvordan simuleringresultatet i RAMMS påvirkes av ulike oppløsninger. Studiene kom frem til at terrengdetaljer ikke blir hensyntatt i like stor grad ved lavere oppløsning. Terrengmodeller som brukes i simuleringer av snøskred er som oftest produsert uten å inkludere hvor mye snø det var i området fra før og en oppløsning på anslagsvis 1 m vil ikke være representativt for et terreng med snø. Ved å sette oppløsningen lavere vil terrenget glattes ut og gi et mer realistisk bilde av et terreng med snø. Det er også viktig å velge korrekt oppløsning når det kommer til tids- og plassbesparelse for selve kjøringen av simuleringene. Ved å utføre en reduksjon av oppløsningen med en faktor på 2, vil simuleringstiden gå ned med en faktor på rundt 10 og filstørrelsen med en faktor på 4. Basert på dette, anbefales det at MoT-Voellmy simulerer med en oppløsning på mellom 5 og 10 m.

De beregnede teoretiske hastighetene viste en tydelig forskjell fra de simulerte hastighetene. Det ble også gjort observasjoner av oppstuing av masser på 1 og 2 m oppløsning (Tabell 2). Dette er vanlig når masser beveger seg i gjel, men i dette tilfellet var terrenget åpent, og en

slik oppstuing antas å skyldes måten beregningene av massen utføres på og numeriske ustabiliteter.

Stoppekriteriet for MoT-Voellmy er simuleringstiden som brukeren definerer, samt minimum flythøyde. Stoppekriteriet påvirker utløpsdistansen og kan gi opphav til artefakter.

Simuleringene på skråplanet, spesielt ved en oppløsning på 1 og 2 m ga artefakter.

Artefaktene førte til numeriske ustabiliteter i modellen og årsakssammenhengen antas knyttet til såkalte sjakkbordoscillasjoner (*checkerboard oscillations*) (Sheu & Lin, 2003). Dette er et velkjent fenomen i slike numeriske modeller. Avlesningen av utløpslengden fra simuleringene på skråplanet ga en usikkerhet på  $\pm 300$  m. For reduksjon av slike artefakter i denne versjonen av MoT-Voellmy anbefales det å utføre to simuleringer. Ved første simulering settes det en tilstrekkelig lang simuleringstid og ved tidspunktet når ustabiliteter oppstår, noteres tiden.

Ved utførelsen av simulering nummer to anvendes notert tid og simuleringen stoppes før ustabilitetene oppstår (dette ble ikke utført for simuleringene på skråplanet). På denne måten reduseres artefakter og oscillasjonene blir mildere, men det er en tidkrevende måte å løse problemet på.

RAMMSs stoppekriterium baseres på moment, som er produktet av masse og hastighet. Det tar for seg ett og ett tidssteg, hvor RAMMS summerer momentet av alle grid-cellene og sammenligner de med maksimal moment-sum. Om denne summen er mindre enn terskelverdien, vil simuleringen stoppe opp (Bartelt et al., 2017), og medføre et simuleringresultat uten artefakter. En mulig løsning for å redusere numeriske artefakter og simuleringstid i MoT-Voellmy, kan være å tilføye et tilsvarende stoppekriterium slik som for RAMMS. Problemet er at denne terskelverdien er ganske høy, og kan muligens bedre løses i MoT-Voellmy ved å bruke ulike grid for flythøyde og hastighet, som er forskjøvet mot hverandre.

### **6.1.2 Valg av friksjonskoeffisienter for medrivning**

Det var et mål å identifisere hvor mye friksjonskoeffisientene må endres basert på om det skal simuleres med eller uten medrivning i MoT-Voellmy. Et av hovedproblemene ved å rekalkibrere snøskredmodeller er, som nevnt tidligere, at det finnes kun en håndfull skredhendelser der den eroderte massen og snøegenskapene (høyde, tetthet og skjærstyrke) er kjent. RAMMS kompenserer for medrivning ved å øke volumet, som fører til endring av  $\mu$  og  $\zeta$ . Problemet er at medrivningsmassen, som skal legges til, ofte ikke er kjent. Ved å gjøre den

eroderbare massen og snøegenskapene kjent, vil en recalibrering være mulig. Det ble derfor simulert skred hvor disse egenskapene ble fastsatt i et kjent miljø. Simuleringer uten medrivning, som utgjorde det 'observerte' skredet, ble brukt til å finne parameterne som gir samme utløpsdistanse med medrivning.

Ved recalibreringen av friksjonskoeffisientene ga 33 av 48 simuleringer ingen medrivning. Av de uttestede skjærstyrkene på 700 og 900 Pa ga ingen simuleringer medrivning. Årsaken til dette ligger i at skjærstyrken var satt for høyt til å kunne overskrides, og dermed ble erosjonsraten null. En annen årsak var numeriske ustabiliteter, hvor tidssteget falt under nedre grenseverdi, som førte til at beregningene ble avsluttet. Selv om de numeriske parameterne ble satt så lavt som mulig, klarte ikke simuleringen å overkomme 'problemet'.

I Tabell 5 er de foreslåtte friksjonskoeffisientene fra SLF presentert, sammen med best tilpassede verdiene fra recalibreringen. De oppnådde verdiene er statistisk sett ikke nok til å kunne konkludere rundt validiteten. De gir derimot en god indikasjon vedrørende friksjonskoeffisienter som bør anvendes ved simulering med medrivning i MoT-Voellmy for en type forhold. Simuleringene ved bruk av medrivningsmodellen IsJo (Issler & Jóhannesson, 2011), ga generelt en overestimering av utløpslengden i forhold til simuleringene utført uten medrivning. En økning av  $k$  måtte til for at utløpsdistansen i simuleringene med medrivning skulle ha tilsvarende utløpsdistanse. Basert på de utførte simuleringene med og uten medrivning må de originale parameterne endres med:

$$S_{um}(\mu, k) = S_{mm}(\mu, k + \Delta k), \quad (35)$$

Hvor  $\Delta k = 0.001-0.002$ .  $S_{um}$  er simulering uten medrivning, mens  $S_{mm}$  representerer simulering med medrivning.

Simuleringsproblemene som oppstod underveis skyldtes hovedsakelig at massen fløt ut i bredden og ikke i lengden. I noen tilfeller var denne effekten så stor at skredet gikk ut av den tilklippede DTMen.



### 6.1.3 Tilbakeberegning av to veldokumenterte skredhendelser

#### **Makunosawa, 2008**

Simuleringene i RAMMS ga innsikt i hvor stor grad friksjonskoeffisientene måtte justeres i forhold til anbefalte verdier. Ved å redusere nedre høydekategori (under 1000 moh.) med 0.08 (som er veldig lavt og tilsvarer verdier for simulering for sørpeskred), klarte ikke RAMMS å simulere hverken full utløpslengde eller den delen av skredet som ødela sederskogen. Ved bruk av en vanlig Voellmy-modell (RAMMS og MoT-Voellmy) ga ingen av simuleringene skred inn i sederskogen. At skredet ikke simuleres inn i sederskogen kan mest sannsynlig skyldes utarbeidelsen av terrengmodellen. DTMen er ikke utarbeidet med den snøhøyden området hadde før skredet gikk, og kan dermed føre til at områder med forsenkinger ikke gattes ut. En slik forsenking finnes i området før sederskogen, og kan utgjøre en mulig årsak til hvorfor det ikke var mulig å simulere skredet inn i sederskogen.

En annen mulig årsak kan være at områdene som underestimeres ble truffet av den fluidiserte delen av skredet. Dette er noe de to modellene RAMMS og MoT-Voellmy ikke tar hensyn til.

Tilsvarende simulering utført i programmet MoT-Voellmy viste forskjeller i simuleringsresultatet mellom programmene. MoT-Voellmy simulerte en bredere skredbane og en noe kortere utløpsdistanse sammenlignet med det tilbakeberegnete skredet i RAMMS (Figur 53 og Figur 54).

Det fremkommer også fra simuleringsresultatet i MoT-Voellmy at programmet har numeriske ustabiliteter i form av at simuleringen avsluttes ettersom den faller under nedre grenseverdi. For at simuleringen skulle gjennomføres måtte jordtrykkskoeffisienten i styringsfilen settes til 0.75. Disse numeriske ustabilitetene observeres også ved de tidligere valideringsstegene av MoT-Voellmy.

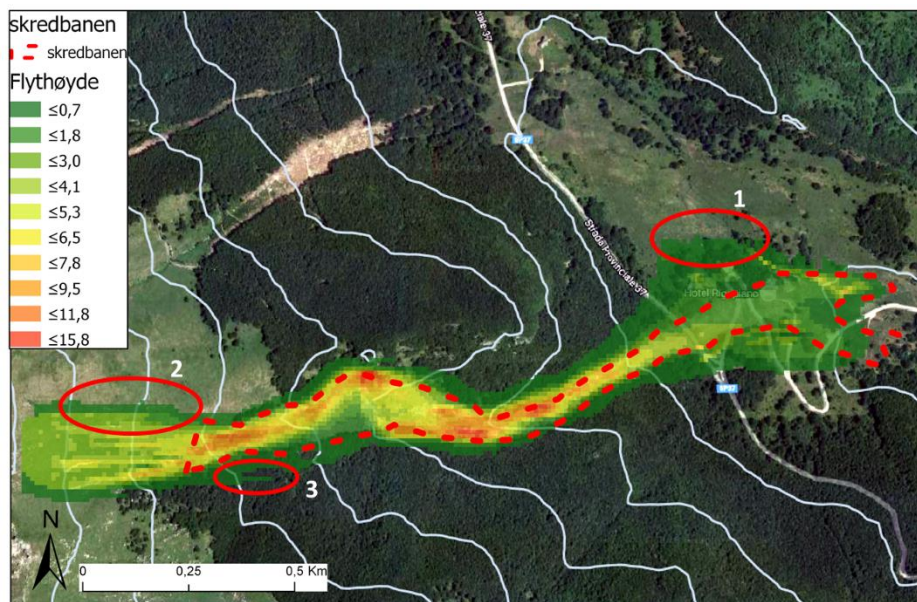
#### **Rigopiano, 2017**

Med de anvendte friksjonskoeffisientene (Tabell 7) var RAMMS i stand til å simulere skredhendelsen i Rigopiano, 2017. De komplekse terrengdetaljene, hvor skredet måtte simuleres over en 20 m høy naturlig voll, samt bevege seg inn i en skarp høyresving, ble suksessivt simulert. At skredet flyter noe ut i utløpsområdet er mest sannsynlig en konsekvens av at terrengmodellen ikke tar hensyn til hvor mye snø det var i området fra før av. Om terrengmodellen hadde blitt utarbeidet med for eksempel 3 m snø ville terrengformasjonene

ha blitt glattet mer ut. I tillegg ville skredet kunne grave seg dypere ned, og en like stor utflytning i utløpsområdet ved Rigopiano ville mest sannsynlig ikke kunne skje.

Ved simulering i MoT-Voellmy hadde programmet trolig problemer med å simulere skredet gjennom den skarpe svingen, ettersom simuleringen avsluttet etter noen få sekunder. I styringsfilen måtte jordtrykkskoeffisienten settes til 0.4 for at programmet skulle klare å gjennomføre simuleringen. Dette førte til en av de numeriske ustabilitetene til programmet.

Som observert fra simuleringen av Makunosawa, kan lignende tendenser observeres i simuleringene utført for Rigopiano. Simulering i MoT-Voellmy ga en bredere skredbane, samt at skredet flyter mer ut i utløpsområdet enn i RAMMS. Det observeres også numeriske ustabiliteter i form av artefakter (Figur 78).



Figur 78: Rigopiano, 2017. Simulering utført i MoT-Voellmy. Simuleringen viser tre problemområder. Område 1 viser at MoT-Voellmy har en større spredning enn det som forekommer i RAMMS, og flyter ut av DTMen. Område 2 og 3 viser numeriske ustabiliteter.

## Ulikheter mellom modellene

Målet med oppgaven har ikke vært å forklare årsaken bak de ulike fysiske problemene. Ut ifra ulikhetene som fremkommer i resultatet mellom programmene, kan mulig årsak ligge i måten programmene beregner det hydrostatiske trykket av massene. I resultatet fra MoT-Voellmy kom det frem ved begge tilfeller at programmet hadde numeriske ustabiliteter. I noen situasjoner førte det til at programmet stoppet simuleringen fordi tidssteget falt under en gitt grenseverdi.

I beregningen av Voellmy-Salm ligningen inngår jordtrykkskoeffisienten, som er med på å kontrollere hvordan masser flyter utover og bygges opp. Jordtrykkskoeffisienten har en forhåndsinnstilt verdi på 1 og ved begge tilfellene måtte denne settes lavere enn den forhåndsinnstilte verdien for at simuleringene kunne gjennomføres i MoT-Voellmy. Ved å sette denne koeffisienten lavere reduseres trykket fra nabocellene, dvs. bevegelsen er mindre følsom for store lokale forskjeller i flythøyden. Med dette 'trikset' kan vanskelige simuleringer likevel gjennomføres i visse tilfeller.

MoT-Voellmy ga noe lavere hastighet og flythøyder enn RAMMS, men utløpsdistansen var stort sett tilsvarende.

## 6.2 Validering av NAKSIN

For å vurdere om NAKSIN er egnet til sitt formål, ble verktøyets egenskaper verifisert gjennom en grunntest.

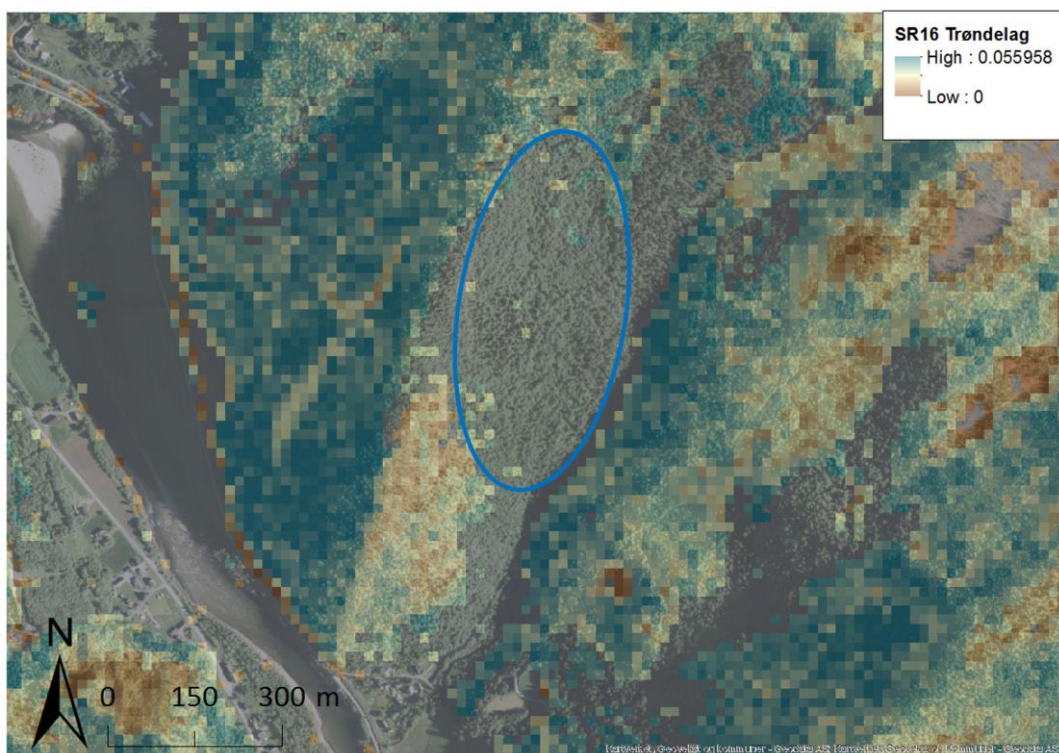
Den første verifikasjonen av NAKSIN med forhåndsinnstilte parametere ble utført ved hjelp av simuleringer i Tjoflotviki. Simuleringsresultatene fra Tjoflotviki ble evaluert ved hjelp av tidligere utført faresonekartlegging (Brattlien et al., 2018).

Historisk informasjon viser at Tjoflot Gård består av eldre bebyggelse (eldre enn 300 år). I tillegg viste faresonekartleggingen av Tjoflotviki at Tjoflot Gård ikke ligger innenfor noen av de kartlagte faresonene (Brattlien et al., 2018). Flyfotoet av området viste tett skog i utløsningsområdet ovenfor gården og reduserte utløsningspotensialet for snøskred (Figur 31). Basert på dette burde området rundt Tjoflot Gård ikke inngå som skredfarlig terreng, så lenge skogen ikke blir hugget. Simuleringsresultatet fra grunntesten med de fastsatte parametere (Tabell 10) genererte skred i hele kartleggingsområdet ved Tjoflotviki, også over Tjoflot gård (Figur 57). Dette indikerer at de forhåndsinnstilte parametere NAKSIN tar utgangspunkt i, ikke gir en optimal fremstilling av de faktiske forhold. Dette synliggjør behovet for å forbedre NAKSIN før brukerne kan ta verktøyet i bruk. Dette underbygges også fra en tilsvarende grunntest for simuleringene ved Sande (Figur 58).

Utløsnings sannsynligheten styres i mange tilfeller av skog. Grunnlagsdatasettets kvalitet er derfor viktig. Skogdatasettet SAT-SKOG (NIBIO, 2010), er tilgjengelig for store deler av landet og utgjør i de fleste stedene det eneste tilgjengelige datasettet, men er dog ikke av ypperste kvalitet. SR16-data (NIBIO, 2015), som representerer det nye skogdatasettet, er av

mye bedre kvalitet, men er i skrivende stund kun tilgjengelig for Trøndelag og deler av Sør-Norge.

For Gauldalen ble det utført en grunntest hvor simuleringer ble kjørt med SR16-data. Resultatene avdekket uoverensstemmelser mellom skogdata og flyfoto. Ifølge flyfoto er området dekket av tett skog, mens samme område er definert som skogfritt ifølge SR16 (Figur 79). Det er meget viktig at brukeren som utarbeider et aktsomhetskart, kvalitetssikrer skogdatasettet for hvert område. Det må også legges til at ved utarbeidelsen av aktsomhetskart er det tatt utgangspunkt i hvordan situasjonen var i daværende prosesseringstidspunkt. All type hogst kan derfor utgjøre grunnlag for nye potensielle faresoner og utarbeidelse av nytt aktsomhetskart bør vurderes deretter.



Figur 79: Flyfoto med SR16-data lagt over. Uoverensstemmelse mellom flyfoto og SR16-data (blå sirkel). Flyfotoet viser et område dekket i tett skog, mens dette området ikke er blitt inkludert i utarbeidelsen av SR16. Det er viktig at brukeren ser gjennom datasettet og kontrollerer at dette stemmer.

### 6.2.1 Fastsetting av parametere i NAKSIN

I kalibreringen av NAKSIN ble ulike kombinasjoner av referanseskjærstyrke og tetthet testet. Tettheten ( $\rho_s$ ) og referanseskjærstyrken ( $\tau_r$ ) ble økt systematisk, hvor en økning av disse parameterne krever mer snø for at skred skal bli utløst. Når skredet først går, vil volumet være større og utløpslengden lengre. Lengst utløpslengde og lavest estimert returperiode ved

kalibreringsområdet Tyinstølen ble simulert med en tetthet på  $240 \text{ kg/m}^3$  ved  $-5^\circ\text{C}$  og  $400 \text{ kg/m}^3$  ved  $+3^\circ\text{C}$ . Simuleringsresultatet viste at en tetthet på  $240 \text{ kg/m}^3$  ved  $-3^\circ\text{C}$  og  $400 \text{ kg/m}^3$  ved  $+2^\circ\text{C}$  ga tilsvarende resultat i utløpslengden. Dette kalles ‘problem of equifinality’, som betyr at selv med ulike innparameter-kombinasjoner, kan målet bli nådd gjennom ulike måter (Beven, 1993). Med en så kompleks modell, vil ulike parametere avhenge av hverandre og kombinasjonsmuligheter som kan gi det ‘gode’ svaret, kan forbli uprøvd.

Basert på studier av løsmasseskred utført av McKinnon (2010) ble en klassifisering av hvor god en simulering er utført, se avsnitt 3.2.3 for metodikk. Om simuleringene gir en differanse på under 30 % fra det observerte skredet, er det en god simulering, mens under 10 % vil det være en veldig god simulering. Samtlige simuleringer fra kalibreringen, utenom en, ligger innenfor en differanse på 30%, mens det utvalgte parametersettet ga en simulering på rundt 10 % (Tabell 14). Dette beviser at de uttestede parametersettene fra kalibreringen gir gode nok resultater i forhold til observert skred. Formålet ved utarbeidelsen av nye aktsomhetskart er derimot at verktøyet genererer aktsomhetssoner som er mest mulig tilnærmet virkeligheten. Derfor ble parametersettet med differanse nærmest 10 % valgt.

Sammenlignet med det observerte skredet fra 2008 ved Tyinstølen, som gikk 300 m lengre enn nåværende aktsomhetskart, ga simuleringen fra det valgte parametersettet en forbedring i aktsomhetssonen på 225 m (Figur 74). Sammenlignet med alfa-beta-modellen har den observerte skredhendelsen en utløpsdistanse på 5 standardavvik, mens den simulerte utløpsdistansen på 4 standardavvik.

## 6.2.2 Sensitivitetstesting

Påvirkning av den simulerte utløpslengden kan skyldes ulike faktorer. En av de medvirkende faktorene er valg av oppløsning, men utløpslengden kan også knyttes til tettheten av det svake laget,  $\rho_w$ .  $\rho_w$  inngår i beregningen som til slutt utgjør utløpslengden. Sensitivitetstesting av  $\rho_w$  viser en økning i utløpslengder når  $\rho_w$  settes høyere. Dette skyldes at skjærstyrken i det svake laget økes, og dermed må det en større snøhøyde til for at skred skal genereres. Som det fremkommer av sensitivitetstesting er det ikke alltid en fordel å sette  $\rho_w$  høyt. Det hyppigste skredet i Sande, hadde en estimert returperiode på 666 år ved  $\rho_w = 0.79\rho_s$ , men ved økning av  $\rho_w$  hadde alle skredene returperioder på mer enn 1000 år. Dette skyldes at ved en økning vil skredene gå sjeldnere, og i dette tilfellet overgikk utløsningssannsynligheten den valgte terskelverdien (1/1000). Området ble derfor ekskludert.

Fra overnevnt diskusjon, samt resultat fra sensitivitetstesten ved Aga, hvor best tilpassede utløpslengde iht. kartlagt 1000-årssone ble funnet ved  $\rho_w = 0.79\rho_s$ , ble det fastsatt, med utgangspunkt i de kalibrerte parameterne, at NAKSIN gir best tilpasning ved  $\rho_w = 0.79\rho_s$ .

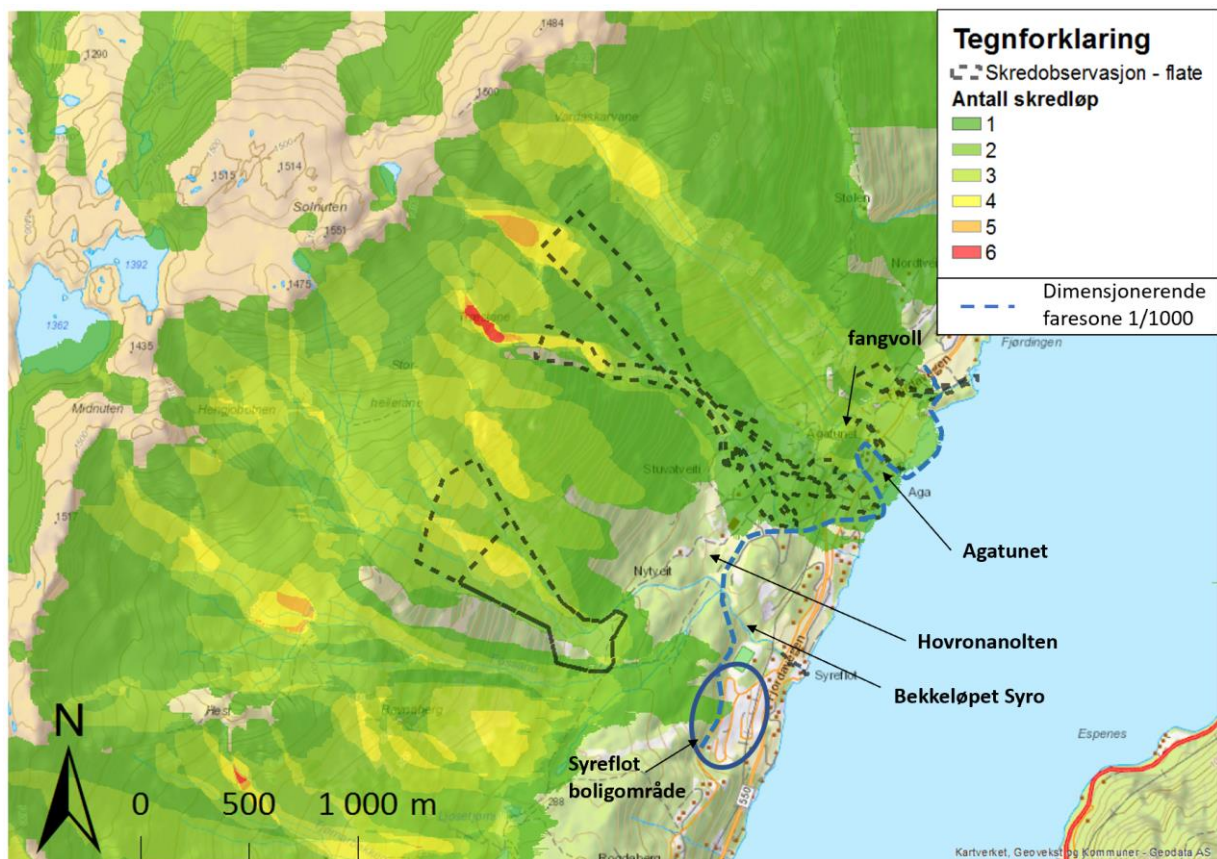
Det fremkom også fra sensitivitetstestingen at NAKSIN er sensitiv for endring av  $\rho_w$ . Ved det foreslåtte parametersettet til Lom (Kap. 5.2.6) vil en endring av  $\rho_w$  fra 0.81 til 0.82 gi en forskjell i antall genererte skred på henholdsvis 19 og 2.

### 6.2.3 NAKSIN med nye fastsatte parametere

NAKSIN ble testet med de nye fastsatte parameterne i utvalgte områder. Det er derfor hensiktsmessig å diskutere hvert enkelt område separat, ettersom områdene avdekker ulike typer problemer med verktøyet. Resultatet fra valideringen av NAKSIN, med parameterne verifisert gjennom kalibreringen, viste at 6 av 7 områder ga god overensstemmelse mellom simulert utløpslengde og faresonekartlegging for de gitte områdene.

#### Aga

Den nye aktsomhetssonen, beregnet fra NAKSIN, utgjorde en kortere aktsomhetssone enn nåværende og er med på å 'friskmelde' noen av boligområdene (Figur 64). Det ene bekkefarete er dekket i aktsomhetssoner fra nåværende aktsomhetskart, men inngår ifølge faresonekartlegging ikke som dimensjonerende faresone. I selve faresonekartleggingen beskrives dette området med at det er større sannsynlighet for at flomskred og sørpeskred vil følge løpet til bekken Syro og ned til sjøen (Brattlien et al., 2018). Den modellerte aktsomhetssonen fra NAKSIN dekker ikke dette bekkefarete. Sammenlignet med den dimensjonerende faresonen (1/1000), er den modellerte sonen fra NAKSIN noe underestimert ved Hovronanoltet (Figur 80). Ved Agatunet er den dimensjonerende faresonen lagt ovenfor boligområdet. Fra simuleringen utført i NAKSIN dekkes tilsvarende område i aktsomhetssone. Mulig årsak til dette er at det ikke tas hensyn til oppført fangvoll ovenfor, og skred treffer derfor boligområdet Agatunet (Figur 80).

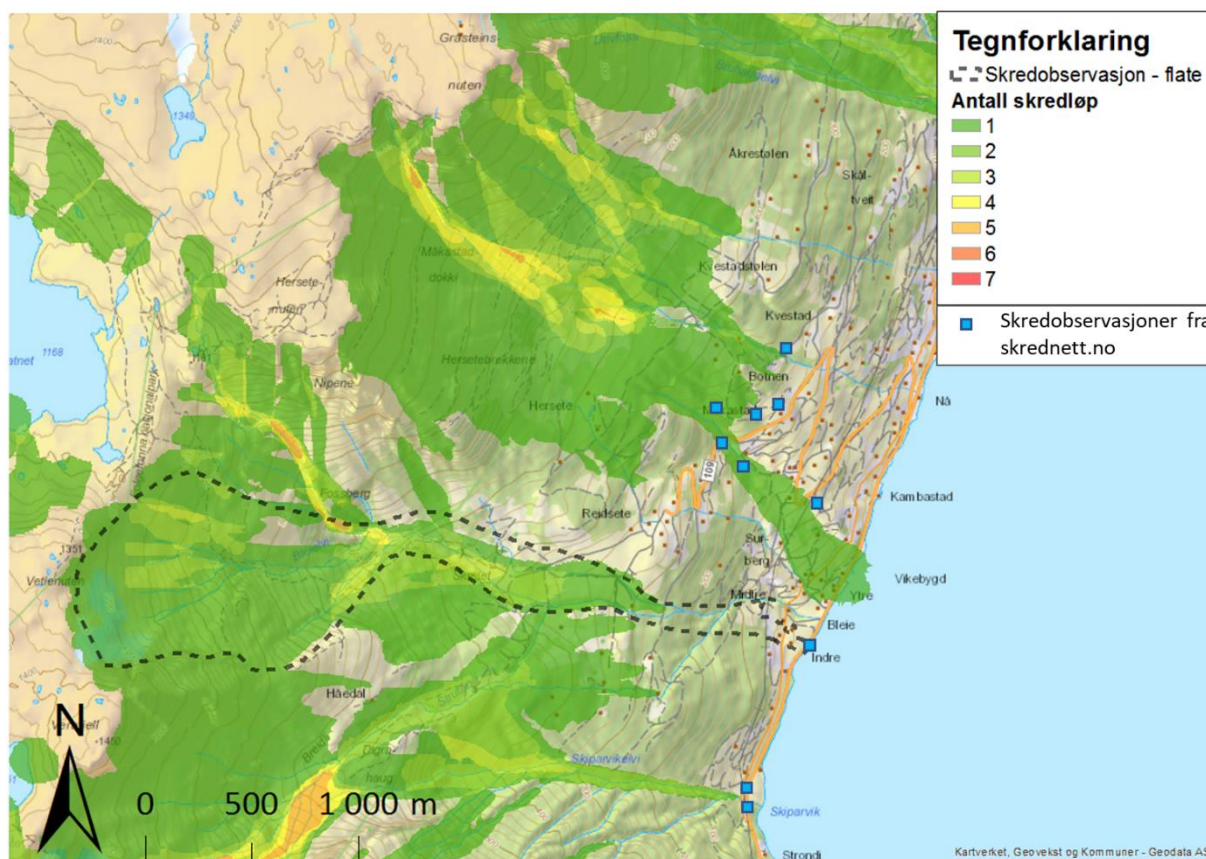


Figur 80: Modellert aktsomhetssone i NAKSIN sammenlignet med dimensjonerende faresone (stiplet linje i blått). Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0,001.

Sett bort fra områdene som er noe underestimert og overestimert, viser valideringsområdet Aga en aktsomhetssone som ser ut til å stemme godt overens med faresonekartleggingen. Problemet NAKSIN har, er at returperioden overestimeres og bruddhøyden underestimeres. Skredene som simuleres ned til boligområdene Syreflot og Agatunet (vurdert størrelsesorden 1/1000 år) hadde en estimert bruddhøyde på 0.78 og 0.66 m, med skred som utløses i disse banene 3 til 4 ganger pr. år. Selv om utløsningssannsynligheten for skred fra disse utløsningsområdene er 3-4/år, betyr det ikke at skredene når boligområdene så ofte (Figur 64). Med så lave bruddhøyder og hyppig skredfrekvens, kan problemet trolig skyldes hvordan NAKSINs tetthetsligning ble utarbeidet. En feil i tetthetsligningen vil kunne medføre feil i skjærstyrken, hvor skjærstyrken inngår som en del av beregningen for både bruddhøyden og utløsningssannsynligheten.

## Bleie

Valideringsområdet Bleie viste en aktsomhetssone som ser ut til å stemme godt overens med tidligere utført faresonekartlegging av området (Kronholm, 2016), samt registrerte skredhendelser fra skrednett.no (Figur 81) (NVE, 2019b). Enkelte skredløp ser ut til å være noe underestimert sammenlignet med kartlagte skredhendelser (Lied et al., 1998).



Figur 81: Oversikt over de simulerte skredene som utgjør aktsomhetssonen for Bleie. Tallene i tegnforklaringen representerer antall skredløp som treffer et punkt med en årlig sannsynlighet på minst 0.001. Stiplet linje representerer en observert skredhendelse fra 1994. Firkanter vist i blått representerer skredhendelser (snøskred) basert på data fra skrednett.no (NVE, 2019b).

Ett av de underestimerte skredløpene i NAKSIN har blitt verifisert mot en skredhendelse som skjedde vinteren 1994. Skredet fra 1994 hadde en utløpssone som gikk helt ned til gården Bleie, og med en forventet returperiode på 1000 år. Den beskrevne skredhendelsen fra 1994 (Kap. 4) utgjør et veldig komplekst problem for NAKSIN å løse, grunnet de lave friksjonsverdiene snøen hadde hele veien ned til gården Bleie.

Utfordringen med at utløpslengdene underestimeres ved Bleie kan også skyldes at utløsningsområdet fra det kartlagte skredet ligger i en østvendt helning som førte til stor akkumulasjon av vindtransportert snø. Ettersom NAKSIN ikke inkluderer vind, kan dette ha bidratt til underestimering av bruddhøyder. I tillegg ble utløsningsområdet i detaljbeskrivelsene av skredhendelsen anslått til å ha dekket et areal på 360 000 m<sup>2</sup> og med et totalt volum på 1 million m<sup>3</sup> snø (Lied et al., 1998). NAKSIN beregnet dette til å være ~245 000 m<sup>2</sup> og ~174 000 m<sup>3</sup>, hvor arealet var over 100 000 m<sup>2</sup> mindre enn skredmassens anslåtte areal. Dette betyr at NAKSIN fant en 1000-års bruddhøyde på kun 0.7 m, som utgjør en massiv underestimering av bruddhøyden. Ved en bruddhøyde på ~1.5 m antas det at skredet vil ha nådd fjorden.



Det kan også tenkes at kartlagt utløsningsareal kan være feilestimert og at NAKSIN beregner riktig utløsningsareal, men at skredvolumet estimert for skredet i 1994 (Lied et al., 1998) innebar sterk grad av medrivning, noe NAKSIN ikke inkluderer.

Valideringen av NAKSIN indikerer utfordringer med underestimering av bruddhøyde, overestimering av returperiode, utløpslengde, skredenes utløsningsareal og skredvolum. Basert på de plottede verdiene av interpoleringen av nedbør fra seNorge (NVE, 2019c), er den estimerte snøhøyden med en returperiode på 1000 år satt til 5 m og en 3-døgns nysnøtilvekst på 100 mm. Dette er verdier som i teorien skal kunne gi høyere bruddhøyde enn 0.71 m. Underestimeringen av bruddhøyden kan skyldes hvordan NAKSINs tetthetsligning er utarbeidet ettersom ligningen påvirker utløsningssannsynligheten og bruddhøyden.

## **Tjoflotviki**

Lokale problemer med NAKSIN oppstod i form av simulerte skred over Tjoflot Gård ved bruk av grunntesten (Figur 57). Dette problemet ble løst med parameterne brukt fra kalibreringen.

Den nye aktsomhetssonen, beregnet i NAKSIN har ‘friskmeldt’ områder som utgjorde en del av den nåværende aktsomhetssonen (Figur 68). De ‘friskmeldte’ områdene, har tilhørende potensielle utløsningsområder generert i NAKSIN (Figur 67). At skred ikke simuleres fra disse utløsningsområdene, kan mest sannsynlig skyldes at utløsningsområdene er dekket i skog, som er noe NAKSIN tar hensyn til. Om skogen blir hugget, kan dette området utgjøre skredfare og aktsomhetskartene bør produseres på nytt.

Områdene som var dekket i aktsomhetssone før, inngår ifølge faresonekartlegging ikke som dimensjonerende faresone (Brattlien et al., 2018). Resultatet fra NAKSIN gir en god overensstemmelse mellom generert aktsomhetssone og utført faresonekartlegging, og kan trolig utgjøre en mer plausibel aktsomhetssone enn nåværende aktsomhetssone. Problemet NAKSIN har er at returperiodene overestimeres og bruddhøydene underestimeres. Dette kan mest trolig skyldes feil i hvordan NAKSINs tetthetsligning er utarbeidet.

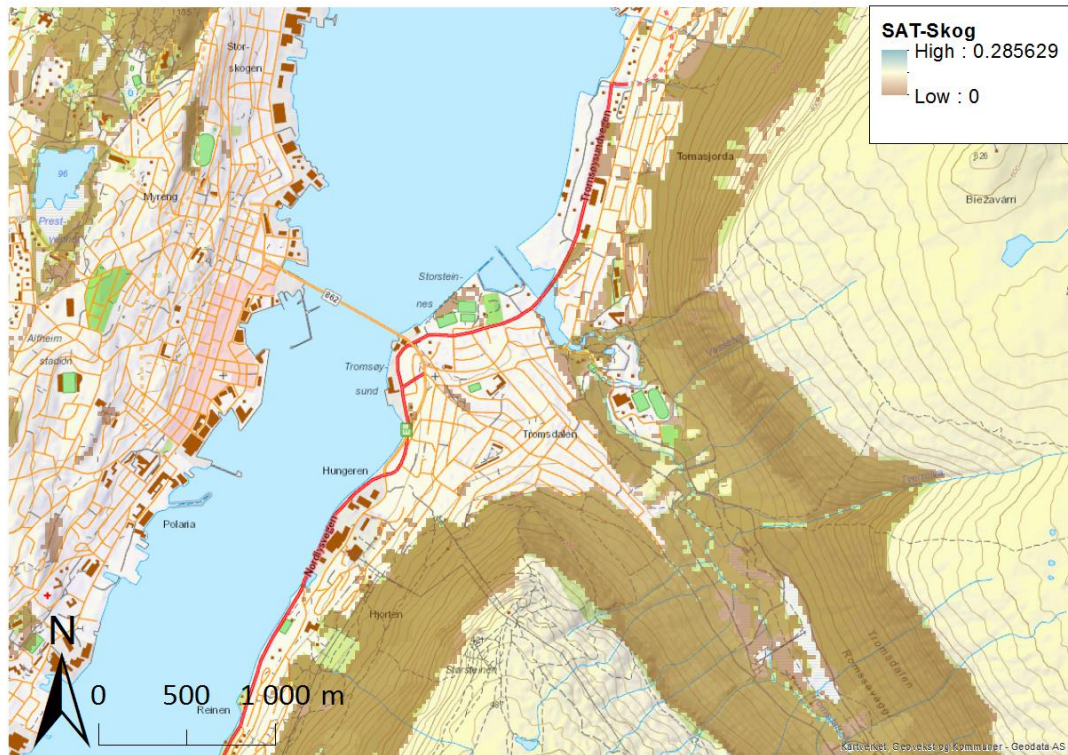
## **Sande**

Sande utgjør ett av de 7 valideringsområdene som mest sannsynlig har en tilnærmet korrekt simulert returperiode og bruddhøyde. Simuleringene ga 2 skred, noe som passer med historisk informasjon og tilgjengelig klimastatistikk. De nye aktsomhetssonene, beregnet fra NAKSIN, 'friskmeldte' store områder som tidligere utgjorde aktsomhetsområder (Figur 70). Dette simuleringsresultatet støttes av lokal klimastatistikk som viser at Sande stort sett får nedbør i form av regn (Kap. 4). Simuleringsresultatet støttes også av historisk informasjon fra stedet og dimensjonerende faresone 1/1000 (Gisnås et al., 2019), hvor generert skred fra NAKSIN samfaller med beskrevet skredhendelse. Det genererte skredet i NAKSIN hadde en estimert årlig sannsynlighet på 0.0015, som er sammenfallende med vurdert størrelsesorden 0.001.

## **Tromsdalen**

Modelleringen i NAKSIN av Tromsdalen viser sterk korrelasjon med allerede eksisterende aktsomhetskart (Figur 72), både når det gjelder utløpslengde og bredde. Dette utgjør derfor et interessant resultat. Terrenget og snøtilveksten gjennom en sesong i Tromsdalen er tilsvarende som for andre validerte kystområder lengre sør, og det er derfor rimelig å anta at forskjellen mellom områdene ligger i vegetasjonen. Antakelsen legges til grunn ettersom områder nord for polarsirkelen har en mye lavere tregrense, dette gjør at utløsningsområdene ligger høyere over skogen, og bremseeffekten av skog er mindre. Selv om flyfoto viser tett skog i nedre del av fjellsiden, karakteriserer skogdatasettet SAT-SKOG skogen med en lav skogtetthet (Figur 82). Dette gjør at effekten av skog i simuleringene ikke vil være av stor betydning. De nåværende aktsomhetskartene ble produsert uten skog, og de ovennevnte forholdene kan derfor være utslagsgivende for at man observerer tilsvarende like forhold.

Basert på de estimerte bruddhøydene og returperiodene antas det at Tromsdalen ikke har et like utpreget problem med overestimering av returperioder og underestimering av bruddhøyder som andre valideringsområder. Estimerte verdier for gjennomsnittlig returperiode er 330 år, med minimums- og maksimums returperioder på henholdsvis 50 til 934 år. Selv om returperioden viser at skredene går sjeldent, er området preget av å ha noe overestimerte utløpslengder ifølge detaljert faresonekartlegging (Sandersen, 2016). Mest sannsynlig skyldes dette at simuleringen ikke tar stor nok hensyn til skog basert på beregnet skogtetthet i SAT-SKOG (Figur 82).



Figur 82: Tromsdalen vist med skogdatasettet SAT-SKOG. Den brune fargen representerer lav tetthet av trær

## Tyinstølen

Sammenlignet med resultatet fra kalibreringen endret ikke simuleringresultatet seg ved innsetting av  $\rho_w = 0.79\rho_s$ . Selv om utløpsdistansen underestimeres, gir resultatet fra NAKSIN iht. alfa-beta-modellen, lengder på 4 standardavvik, noe som er ekstremt i seg selv. Det er derfor rimelig å anta at NAKSIN, om andre områder skal tas hensyn til, ikke vil klare å simulere fulle utløpslengder på 5 standardavvik som kartlagt skredhendelse fra 2008 er beregnet til. Grunnen til underestimeringen antas å ligge i feil estimeringen av returperioder og bruddhøyder, som muligens kan skyldes feil i hvordan NAKSINs tetthetsligning er utarbeidet. Om denne forbedres vil resultatet kunne endres, og sannsynligheten for å nå full utløpslengde sammenlignet med observert skredhendelse øker.

En annen faktor som bidrar til underestimering av bruddhøyder er tilførsel av snø fra vind. Tyinstølen ligger i høyfjellet og kan ha mye vind. Orienteringen til utløpsningsområdene ligger i le for nedbørsførende vindretning og store mengder snø vil kunne akkumuleres. Akkumuleringen fører til økt bruddhøyder, som er en effekt verktøyet NAKSIN mangler og vil dermed gjøre utløpslengder kortere.

## Lom

Det avvikende området, Lom, er et kaldt og nedbørsfattig område. Selv med de beste tilpassede parameterne fra kalibreringen, genererte NAKSIN ingen skred i Lom.

Kalibreringens høye fastsatte skjærstyrke krever store mengder snø for å utløse skred. Dette blir et problem ved områder med lave nedbørsverdier, som ikke vil kunne nå terskelen for utløsning når skjærstyrken er høy.

Knutstugrovi-skredet går nesten hvert andre år ned til Rv15 og indikerer at store mengder snø akkumuleres med vinden, til tross for at Lom er et svært nedbørsfattig område. Vindrosen fra Lom (Kap. 4) har flest årlige prosentvise vindhastigheter på mellom 10-15 m/s. Med slike vindhastigheter viser studier at snødrift skalerer eksponentielt (Lied & Kristensen, 2003) og kan etablere en skredsituasjon i løpet av et døgn. At vind ikke er implementert i NAKSIN vil kunne bidra til at områder som Lom får en underestimert mengde faktisk snømengde.

Et forslag til parametere ble fremlagt i resultatene (Kap. 5.2.6). En lavere skjærstyrke og tetthet ble foreslått. Dette reduserer mengden snø som må til for å overgå skjærstyrken og terskelen for at snøen går i brudd. Bruken av disse parameterne vil ha effekt på resultatet fra de 6 andre områdene, hvor blant annet utløpslengdene blir kortere. Ved bruk av en  $\rho_w = 0.82\rho_s$  vil dette gi to simulerte skred ved Lom, som antas å være langt færre enn i virkeligheten. Settes  $\rho_w = 0.81\rho_s$ , gir det flere skred ved Lom, men da vil også skred gå over Tjoflot Gård, noe som ikke samsvarer med utført faresonekartlegging (Brattlien et al., 2018).

Det fremkommer også av simuleringene at returperioden underestimeres kraftig (~ 800 år) ettersom Knutstugrovi-skredet utløses hvert andre år. Trolig skyldes dette mengden snø som inkluderes i beregningene i NAKSIN, hvor en kombinasjon av lav skjærstyrke og mer snø vil kunne gi hyppigere skredforekomst.

### 6.2.4 Interpolerte nedbørsdata

En lineær interpolering av nedbørsdataene er utført med Pareto-fordeling, som ble valgt på grunnlag av at den var enklest å implementere i verktøyet. En lineær interpolering av temperatur ser ut til å gi et tilfredsstillende resultat, men bruk av lineær interpolering av parameterne til nysnøtilvekst og snøhøyde ser ikke ut til å være ideelt. Dette vises blant annet ved plotting av snøhøyden, hvor det kommer frem at fordelingen ikke har lang nok hale, med

unntak av Lom (Figur 77). At fordelingen til verdiene ikke har lang nok hale gjør at snøhøyden ved en returperiode på 10 år vil være tilsvarende som ved 1000 år.

Tjoflotviki, er et tilsvarende snørikt område som Bleie, og ligger i samme fjord. De interpolerte verdiene av snøhøyden er imidlertid forskjellige. Snøhøyde med en returperiode på 1000 år er estimert til 0.6 m i Tjoflotviki, noe som er en meget lav snøhøyde for et så snørikt område. Dette indikerer at den lineære interpoleringsmetoden med stor sannsynlighet er feil å bruke for parameterne av fordelingsfunksjonen for nedbørsdata.

I de plottede verdiene for nysnøtilvekst krysset linjene hverandre ved interpoleringen med de ulike referanse-terrenghøydene (Figur 76). Dette førte til at lavereliggende terreng fikk større tilvekst av snø enn høyreliggende terreng. Dette viser at formparameteren mest sannsynlig ikke burde blitt interpolert med høyden. Et mulig forslag kan være å først utføre en separat interpolering av ekstremverdiene fra nedbørsdataene til den aktuelle terrenghøyden,  $Z$  for returperioder på 10, 100 og 1000 år.

### **Simulering uten interpolering**

Simuleringer uten interpolering av nedbørsdata ble utført ved å bruke punktverdier fra seNorge (NVE, 2019c). Simuleringene viste en økning i antall genererte skred ved Tjoflotviki og Lom, mens for Sande forsvant de to simulerte skredene. Testingen viste at interpoleringen burde brukes videre i NAKSIN, men indikerte også at interpoleringsmetoden bør forbedres. Aktsomhetskart er kun en tilnærming av virkeligheten, men danner et vurderingsgrunnlag for videre utredning. Ved simulering uten interpolering vil aktsomhetskartet for blant annet Sande ikke vise skred og kan følgelig tolkes som at det ikke er noen potensiell fare. Økningen i skred Tjoflotviki fikk i simuleringene uten interpolering, er ifølge faresonekartleggingen ikke dimensjonerende for snøskred, men er kartlagt som steinsprang.

## **6.3 Usikkerheter og feilkilder**

Ved fastsettelsen av oppløsning som skal benyttes i MoT-Voellmy er det knyttet usikkerheter til avlesningen av utløpslengdene. Simuleringene førte til numeriske artefakter, som gjorde en korrekt avlesning av utløpslengdene ved 1, 2 og 5 m oppløsning vanskelig.

I de anbefalte friksjonskoeffisientene for medrivning ble simuleringene anvendt med et sett av utvalgte friksjonskoeffisienter (anbefalte verdier fra SLF). I tillegg ble de anbefalte

friksjonskoeffisientene for medrivning kun utført i en type topografi og tre bestemte skjærstyrker. Parameterstudiet ble ikke utført med flere ulike kombinasjoner av de overnevnte, noe som vil kunne påvirke resultatets robusthet. I tillegg ble simuleringene kun utført ved å variere  $k$  og holde  $\mu$  konstant. De rekalkulerte friksjonskoeffisientene for medrivning vil derfor kun representere en type forhold.

Det er viktig å definere hvilken fremgangsmåte som anvendes for vurdering av resultatene fra modellen NAKSIN. Dette er viktig for å sikre grunnlag for videre arbeiders sammenligning innen NAKSIN. Ulike metoder eksisterer og kan føre til ulike resultat.

Kalibreringen av NAKSIN ble utført på en objektiv måte ved å kvantifisere resultatet. Valg av best tilpassede parametere for NAKSIN ble basert på dette. Selv om utvelgelsen av parametere ble utført objektivt, ble punktutvelgelsen av oppmålingen for den horisontale utløpsdistansen utført på en subjektiv måte. Denne subjektive utvelgelsen utgjør derfor usikkerheten.

Når det kommer til evalueringen av valideringsresultatet knyttes det også usikkerheter til dette. Fremgangsmåten for vurderingen av resultatet fra sensitivitetsanalysen og valideringen ble utført ved å anvende en kvalitativ vurdering av de visuelle fremstillingene. Ved en kvalitativ vurdering av resultatet kan det kun fastslås at det er en forskjell. Hvor god eller dårlig simuleringen er baseres på den enkeltes subjektive vurdering. Ved å utføre en vektlegging av valideringsresultatet kan resultatenes pålitelighet kategoriseres på en kvantitativ måte (dette ble ikke utført i denne oppgaven).

Usikkerheter knyttes også til utført faresonekartlegging, som brukes til å evaluere resultatene fra NAKSIN. En faresonekartlegging baseres på en god del subjektiv vurdering i felt og den dimensjonerende faresonen har derfor usikkerheter knyttet til seg.

Det er knyttet en viss usikkerhet til tetthetsligningen. 10 % avvik i tettheten vil kunne medføre 50 % avvik i skjærstyrken. Dette vil kunne gi større feil i den videre beregningen av både bruddhøyden og utløsningssannsynligheten, siden skjærstyrken inngår i ligningene. Tetthetsligningen har ikke blitt testet mot observasjoner.

Bruken av datasettet SAT-SKOG i NAKSIN utgjør en vesentlig kilde til usikkerhet. Usikkerheten knyttes til kvaliteten av skogdatasettet og utgjør en viktig faktor for utløsningssannsynligheten.

## 7 Oppsummering og konklusjoner

Etter utført validering av MoT-Voellmy ble det funnet at simuleringsresultatet utarbeides mest effektivt og gir best resultat ved en oppløsning på 5 og 10 m. Det fremkommer fra samtlige valideringssteg av MoT-Voellmy at modellen gir numeriske ustabiliteter. De numeriske ustabilitetene ble avdekket i form av at tidsstegene faller under nedre grenseverdi og den pågående simuleringen ble dermed avsluttet. Artefakter ble også avdekket og bidrar til usikkerheter i resultatet.

I rekalkibreringen av friksjonskoeffisientene for medrivning ( $S_{mm}$ ) fremkommer det at  $k$  måtte økes for at medrivningsmodellen (IsJo) skulle simulere tilsvarende utløpsdistanse som simulert skred uten medrivning ( $S_{um}$ ). For en fullgod kalibrering av MoT-Voellmy med medrivning ville krevd mange flere simuleringer utført med andre parameterverdier for å kunne gi en fullgod anbefaling for valg av  $\Delta k$ . Under disse forutsetningene er det utførte parameterstudiet kun en forstudie av hvordan man kan komme frem til anbefalte verdier for medrivning. Under presenteres de kalibrerte verdiene for en type forhold:

$$S_{um}(\mu, k) = S_{mm}(\mu, k + \Delta k),$$

hvor  $\Delta k = 0.001-0.002$ .

To veldokumenterte snøskredhendelser ble tilbakeberegnet med de to ulike simuleringsmodellene RAMMS og MoT-Voellmy (på like betingelser). Fra sammenligningen av de to Voellmy-modellene kan funnene kort oppsummeres i følgende punkter:

- RAMMS estimerer større flythøyder og hastigheter enn MoT-Voellmy. MoT-Voellmy simulerer et bredere skredløp enn RAMMS.
- MoT-Voellmy inneholder numeriske ustabiliteter.
- Jordtrykkskoeffisienten i styringsfilen til MoT-Voellmy måtte settes til 0.75 ved Makunosawa-skredet og 0.4 ved Rigopiano-skredet for at simuleringen skulle gjennomføres.

Sett fra et overordnet nivå, gir ikke MoT-Voellmy like store numeriske problemer ved alle tilfeller. Det har blitt kjørt over tusen simuleringer med en jordtrykkskoeffisient lik 1 i NAKSIN uten nevneverdige problemer eller store artefakter. De overnevnte problemene kan derfor mest trolig knyttes til simuleringer som er utført ved høye oppløsninger i kombinasjon

med høy friksjon. I tillegg knyttes problemene til simuleringer utført i komplekst terreng, med skarpe svinger og høy hastighet, som observert ved Makunosawa og Rigopiano.

NAKSIN er kun en tilnærming av virkeligheten, men også et verktøy som bidrar til å forbedre aktsomhetskartleggingen, og vil derfor forbedre vurderingsgrunnlaget for videre utredning. For å sørge for god kvalitet av aktsomhetskartene, er det viktig med en terrengmodell som tar hensyn til flest mulige potensielle utløsningsområder. Dette gjøres ved å velge en DTM med høyere oppløsning (10 m), og terrenget vil tas mer høyde for.

Den utførte valideringen av NAKSIN viste at verktøyet ga forholdsvis gode resultater sammenlignet med observerte skred og faresonekartlegging, men har problemer med korrekt estimering av returperiode og bruddhøyde. Enkelte valideringsområder ga en konsekvent over- og underestimert returperiode og bruddhøyde. Dette skyldes mest trolig hvordan parameteriseringen av snøens tetthet og skjærstyrke, som en funksjon av gjennomsnittlig vintertemperatur, er utarbeidet. Dette bidrar til mindre gode tilnærminger, noe som påvirker utløsningssannsynligheten og bruddhøyden.

De kalibrerte parameterne til NAKSIN førte til at det ikke simuleres skred i Lom. Tyinstølen har et mer semi-kontinentalt klima, hvor NAKSIN forutsier at det går skred ved Tyinstølen. Dette indikerer at problemet ikke knyttes til simulering i semi-kontinentalt klima, men av den begrensede mengden snø som tilføres (nedbør), noe som er typisk for et kontinentalt klima. De kalibrerte parameterne gir best tilpasset resultat for semi-kontinentalt til maritimt klima, hvor man kan oppnå stor snøhøyde og stor nysnøtilvekst i løpet av en sesong.

NAKSINs manglende evne til å håndtere kontinentalt klima med lite nedbør kan alternativt løses ved å foreslå anbefalte intervaller for skjærstyrken tilhørende kontinentalt og maritimt (og semi-kontinentalt) klima. På bakgrunn av utført grunntesting av de valgte simuleringssområdene, anbefales det et skjærstyrkeintervall fra 1500 Pa til 1900 Pa for kontinentalt klima, og et intervall fra 1900 Pa til 2100 Pa for maritimt klima (semi-kontinentalt klima).

At vind ikke inkluderes i NAKSIN ser ut til å medføre mindre gode tilnærminger i resultatet, hvor bruddhøyder underestimeres, som igjen fører til at utløsningssannsynlighetene underestimeres og faller under valgt terskelverdi. Dette fører til at skred ikke simuleres. Dette har stor betydning i nedbørsfattige områder, hvor snødrift kan gi tilvekst av store snømengder.



Simuleringene viste tydelig at en lineær interpolering med høyden over havnivå av parameterne i en utvidet Pareto-fordeling for maksimal årlig snøhøyde og 3-døgns nysnøtilvekst ikke er god nok. Dette vises gjennom de feilestimerte bruddhøydene fra simuleringen for de ulike valideringsområdene, men også fra plottingen av nysnøtilvekstens og snøhøydens fordeling. Fordelingen av verdiene til snøhøyden viste at de hadde for kort hale. Plottingen av de høydeinterpolerte verdiene av nysnøtilvekst, viste at disse krysset hverandre, noe de ikke burde gjøre, og at formparameteren ikke burde interpoleres med høyden. Valg av lineær interpolering av nysnøtilveksten og snøhøyden ser heller ikke ut til å stemme med klimadata for de ulike områdene, og en ny interpoleringsmetode bør vurderes.

Metodikken i NAKSIN, hvor det tas hensyn til mer komplekst terreng, skog og lokalklima, ser ut til å gi forbedrede aktsomhetskart, tross de overnevnte problemene. Det er også viktig å understreke at de utførte modifikasjonene i NAKSIN førte til et mindre pålitelig resultat ved Lom enn det som er presentert i nåværende aktsomhetskart. Ved bruk av verdier med 'klimatilpasning' for referanseskjærstyrken kan problemet løses for Lom. Kvalitativt vises graden av forbedring i NAKSIN ved at de simulerte aktsomhetssonene gir en god overensstemmelse med de utførte faresonekartleggingene. Dette har resultert i at de nye aktsomhetskartene 'friskmelder' områder som før var dekket av aktsomhetssoner. I tillegg finnes det områder i nåværende aktsomhetskart som har en underestimert av aktsomhetssonen, slik som ved Tyinstølen. Dette problemet ser ikke ut til å være like stort ved bruk av NAKSIN.

De nye aktsomhetskartene og faresonekartleggingen viser seg å ha god overensstemmelse. Dette viser at NAKSIN er egnet til sitt formål og at programmet produserer kart som i mange tilfeller er atskillig bedre enn de nåværende aktsomhetskartene, spesielt om de foreslåtte 'klimatilpasningene' for referanseskjærstyrken anvendes. Hovedgrunnen til at NAKSIN bidrar til bedre aktsomhetskart skyldes hovedsakelig modellens kompleksitet ved bruk av flere ulike tilleggs momenter og dynamisk simuleringsmodell.

NAKSIN er et forbedret verktøy for generering av aktsomhetssoner og fremstår som egnet til sitt formål når NAKSIN har blitt kalibrert og validert. For at NAKSIN skal være et optimalt verktøy, bør de overnevnte problemene løses.

## 7.1 Konklusjoner

### MoT-Voellmy

- Numeriske ustabiliteter i MoT-Voellmy er et gjentakende problem ved mer komplekse simuleringer. Modellens svakhet ser ut til å være knyttet til måten jordtrykkskoeffisienten beregnes på.
- Simuleringsresultatet fra MoT-Voellmy utarbeides mest effektivt og gir best resultat ved en oppløsning på 5 til 10 m.
- Funnene fra forstudiet for recalibrering av friksjonskoeffisienter for simulering med medrivning ble funnet ved:  $S_{um}(\mu, k) = S_{mm}(\mu, k + \Delta k)$ , hvor  $\Delta k = 0.001-0.002$ . Dette representerer kun en type forhold.
- MoT-Voellmy håndterer skred i komplekst terreng, men med noen ulikheter sammenlignet med RAMMS.

### NAKSIN

- De kalibrerte parameterne gir best tilpasset resultat for semi-kontinentalt til maritimt klima, hvor man kan oppnå stor snøhøyde og stor nysnøtilvekst i løpet av en sesong. Det anbefales å velge et skjærstyrkeintervall fra 1500 Pa til 1900 Pa for kontinentalt klima, og et intervall fra 1900 Pa til 2100 Pa for semi-kontinentalt til maritimt klima.
- De nye aktsomhetssonene fra NAKSIN ga i 6 av de 7 valideringsområdene god overensstemmelse med detaljkartlagte skred og/eller utført faresonekartlegging.
- 5 av 7 områder hadde problemer med korrekt estimering av returperiode og bruddhøyde. Årsaken til disse avvikene antas å ligge i den utarbeidede parameteriseringen av snøens tetthet og skjærstyrke som funksjon av gjennomsnittlig vintertemperatur. I tillegg kan avvikene knyttes til den implementerte lineære interpoleringsmetoden for klimadata med høyden, som med stor sannsynlighet ikke burde anvendes på parameterne av fordelingsfunksjonen for nedbørsdata.
- Metodikken bak tredjegerasjons aktsomhetskart, som tar hensyn til mer komplekst terreng, samt skog og lokalklima, bidrar til generering av forbedrede og mer nøyaktige aktsomhetskart sammenlignet med nåværende aktsomhetskart.

## 8 Forslag til videre arbeid

MoT-Voellmy har potensiale for videre utvikling. MoT-Voellmy har numeriske ustabiliteter, hvor det gjentakende problemet er artefakter og at tidssteget faller under nedre grenseverdi. Dette er problem som fremkommer fra samtlige valideringssteg av MoT-Voellmy. Det er derfor nødvendig å revidere og forbedre den numeriske koden, slik at avvikene kan reduseres. Et stoppekriterium bør utvikles for å redusere numeriske artefakter.

Et videre studie av friksjonskoeffisienter tilhørende medrivning bør gjennomføres med ulike skredstørrelser, friksjonsparametere tilsvarende skred med forskjellige returperioder, ulike verdier av skjærstyrke og topografi. I tillegg burde det også testes for endringer i  $\mu$ , mens  $k$  holdes konstant, eller til og med endringer av både  $\mu$  og  $k$ . Ved utførelse av dette kan en mer sammensatt parameterstudie for valg av friksjonsparametere ved ulike forhold supplere allerede eksisterende funn. Dette vil kunne forbedre modellen og bidra til et mer korrekt estimat av hastighet og flythøyder, som er viktig ved dimensjonering av sikringstiltak.

I oppgaven var det også planlagt å recalibrere friksjonskoeffisientene for skred gjennom skog i MoT-Voellmy. I RAMMS skilles det bare mellom skog/ikke skog, mens i MoT-Voellmy kan skogen klassifiseres basert på volum, treslag, alder. Grunnet begrenset tid er ikke disse simuleringene gjennomført. Tilhørende dataene som klassifiserer de ulike skogtetthetene ( $nD$ ), samt utarbeidete filer for skjærstyrken basert på terrenget og eroderbar snøhøyde for Rigopiano er tilgjengelig for videre arbeid (Vedlegg A). Grunnet funnene i sammenligningen mellom de to Voellmy-modellene av Makunosawa-skredet, var det ikke hensiktsmessig å validere skogsmodellen som inngår i MoT-Voellmy. Filer som inngår i skogsmodellen til MoT-Voellmy er derfor ikke utarbeidet for Makunosawa.

Når det kommer til videre arbeid for NAKSIN anbefales det først å forbedre tetthetsligningen. Ettersom tettheten forandrer seg med terrenghøyden og ligningen ikke er testet mot observasjoner, vil en analyse av slike data (forutsatt at de finnes) kunne forbedre tetthetsligningen. Korrekt estimering av bruddhøyder og utløsningssannsynlighet knyttes også til den lineære høydeinterpoleringen av formparameteren av fordelingsfunksjonen for nedbørsdata. Det anbefales derfor å se på en bedre interpoleringsmetode for nedbørsdataene.

For et lengre og mer tidskrevende prosjekt bør en modul for vind i NAKSIN utarbeides. Om vind blir implementert i NAKSIN bør de overnevnte stegene som beskriver hvordan NAKSIN valideres, gjennomgås på nytt.

Til slutt kan det være interessant å teste NAKSIN med de rekalkulerte friksjonskoeffisientene for medrivning funnet fra valideringen av MoT-Voellmy. Det krever da en relasjon mellom gjennomsnittlige vintertemperatur og snøens skjærstyrke.

# Litteraturliste

- Ancey, C. & Bain, V. (2015). Dynamics of glide avalanches and snow gliding. *Reviews of Geophysics*, 53(3), 745-784. <https://doi.org/10.1002/2015RG000491>
- Bader, H. P. & Salm, B. (1990). On the mechanics of snow slab release. *Cold Regions Science and Technology*, 17(3), 287-300. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(05\)80007-2](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(05)80007-2)
- Bakkehøi, S. (1987). Snow avalanche prediction using a probabilistic method. *IAHS Publ*, 162. Hentet fra [http://hydrologie.org/redbooks/a162/iahs\\_162\\_0549.pdf](http://hydrologie.org/redbooks/a162/iahs_162_0549.pdf)
- Bartelt, P., Bühler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Salz, M., Schneider, M. & Schumacer, L. (2017). *RAMMS User Manual v1.7.0 Avalanche*. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. Hentet fra [http://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS\\_AVAL\\_Manual.pdf](http://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_AVAL_Manual.pdf)
- Beven, K. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in water resources*, 16(1), 41-51. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(93\)90028-E](https://doi.org/10.1016/0309-1708(93)90028-E)
- Bozhinskiy, A. N. & Losev, K. S. (1998). *Fundamentals of avalanche science* Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung.
- Brattlien, K., Domaas, U., Gauer, P. & Gislås, K. (2018). *Ekstern rapport NVE: Skredfarekartlegging I Ullensvang Herad* (Rapport nr. 4/2018). Hentet fra [http://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2018/eksternrapport2018\\_04.pdf](http://publikasjoner.nve.no/eksternrapport/2018/eksternrapport2018_04.pdf)
- Busengdal, M. & Issler, D. (2018). *Kildekode til NAKSIN*. NGI Teknisk notat 20150457-08-TN. Norges Geotekniske Institutt (NGI): Oslo, Norge.
- Christen, M., Bartelt, P. & Kowalski, J. (2010b). Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: interpretation of model results. *Annals of Glaciology*, 51(54), 161-168. <https://doi.org/10.3189/172756410791386553>
- Christen, M., Kowalski, J. & Bartelt, P. (2010a). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1-2), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
- De Quervain, M. R., De Crecy, L., La Chapelle, E. R., Losev, K. & Shoda, M. (1973). Avalanche classification. *Hydrological Sciences Bulletin*, 18(4), 391-402. <https://doi.org/10.1080/02626667309494054>
- Derron, M. H. & Sletten, K. (2016). *Method for the susceptibility mapping of snow avalanches in Norway, Technical report*. (Rapport nr. 2016.032). Geological Survey of Norway (NGU) and Institute of Geomatics and Risk Analysis (IGAR): University of Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- eKlima.no. (2019). Meteorologisk institutts klimadatabase. Hentet 17.02.2019 fra [http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?\\_pageid=73,39035,73\\_39049&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://sharki.oslo.dnmi.no/portal/page?_pageid=73,39035,73_39049&_dad=portal&_schema=PORTAL)
- Engeset, R. (2013). National avalanche warning service for Norway—established 2013. *Proc. of the Intl. Snow Science Workshop ISSW '13, Grenoble, Chamonix Mont-Blanc* (s. 301-310).
- Engeset, R. (2016). *Hvordan lages vær- og snødata for seNorge.no og XGEO.no*. Hentet fra [https://www.nve.no/Media/4813/weatherandsnowdata\\_v2\\_no.pdf](https://www.nve.no/Media/4813/weatherandsnowdata_v2_no.pdf)
- Esri. (2018). ArcGIS Pro. Hentet fra <https://pro.arcgis.com/>
- Gauer, P. (2016). *Forest cover within Nye aktsomhetskart snøskred i Norge (NAKSIN)*. NGI Teknisk notat 20150457-04-TN. Norges Geotekniske Institutt (NGI): Oslo, Norge.
- Gauer, P., Issler, D., Lied, K., Kristensen, K. & Sandersen, F. (2008). On snow avalanche flow regimes: Inferences from observations and measurements. *In Proc. of the Intl. Snow Science Workshop ISSW '08, Whistler, B.C., Canada* (s. 717-723).

- Gisnås, G. K., Høydal, Ø. A. & Sverdrup-Thygeson, K. (2019). *Ekstern rapport NVE: Faresonekartlegging i Sande kommune* (Rapport nr. 20180278-01-R). Norges vassdrag- og energidirektorat (NVE).
- GNU. (2018). GNU Octave, Version 4.4.1. Hentet fra <https://www.gnu.org/software/octave/>
- Haefeli, R. (1939). *Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik* ETH Zurich.
- Hopfinger, E. J. (1983). Snow avalanche motion and related phenomena. *Annual review of fluid mechanics*, 15(1), 47-76. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.000403>
- Håland, G., Orset, K. I., Frekhaug, M. & Norem, H. (2015). *Sammenligning av modelleringsverktøy for norske snøskred* (Rapport nr. 107/2015). Hentet fra [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015\\_107.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_107.pdf)
- Issler, D. (1998). Modelling of snow entrainment and deposition in powder-snow avalanches. *Annals of Glaciology*, 26, 253-258. <https://doi.org/10.3189/1998AoG26-1-253-258>
- Issler, D. (2003). Experimental information on the dynamics of dry-snow avalanches. I *Dynamic Response of granular and porous materials under large and catastrophic deformations* (s. 109-160). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Issler, D. (2016). *Forslag til en modulær oppbygging av ny metodikk for aktsomhetskart*. NGI Teknisk notat 20150457-01-TN. Norges Geoteknisk Institutt (NGI): Oslo, Norge.
- Issler, D. (2018). *Field Survey of the 2017 Rigopiano Avalanche*. NGI Teknisk notat 20170131-02-TN. Norges Geotekniske Institutt: Oslo, Norge.
- Issler, D. & Gauer, P. (2008). Exploring the significance of the fluidized flow regime for avalanche hazard mapping. *Annals of Glaciology*, 49(1), 193-198. <https://doi.org/10.3189/172756408787814997>
- Issler, D., Gauer, P., Gisnås, G. K. & Domaas, U. (under utarbeidelse). Approaches to including forest effects in avalanche hazard indication maps in Norway.
- Issler, D., Gauer, P., Schaer, M. & Keller, S. (1996). Staublawinenerignisse im Winter 1995: Seewis (GR), Adelboden (BE) und Col du Pillon (VD). *Eidg. Institut für Schnee-Lawinenforschung. Interner Bericht*, 694.
- Issler, D. & Jóhannesson, T. (2011). *Dynamical Consistency Constraints on Entrainment and Deposition in Depth-Averaged Models of Snow Avalanches and Other Gravity Mass Flows*. NGI Teknisk notat 20110112-00-1-TN. Norges Geoteknisk Institutt (NGI): Oslo, Norge.
- Jaedicke, C., Solheim, A., Blikra, L. H., Stalsberg, K., Sorteberg, A., Aaheim, A., ... Mestl, H. (2008). Spatial and temporal variations of Norwegian geohazards in a changing climate, the GeoExtreme Project. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(4), 893-904. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-893-2008>
- Jamieson, B. & Johnston, C. D. (2001). Evaluation of the shear frame test for weak snowpack layers. *Annals of Glaciology*, 32, 59-69. <https://doi.org/10.3189/172756401781819472>
- Jensen, O. A., Devoli, G., Rustad, B. K., Verhage, A., Viklund, M., Larsen, J. O. & Kristensen, L. L. (2015). *Terminologi for naturfare* (Rapport nr. 90/2015). Hentet fra [https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2497116/rapport2015\\_90.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2497116/rapport2015_90.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Kogelnig, A., Suriñach, E., Vilajosana, I., Hübl, J., Sovilla, B., Hiller, M. & Dufour, F. (2011). On the complementariness of infrasound and seismic sensors for monitoring snow avalanches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2355-2370. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2355-2011>
- Kronholm, K. (2012). *Tyinkryset, Vang - Skredfare og mulige tiltak* (Rapport nr. 20110966-00-2-R). Oslo, Norge: Norges Geotekniske Institutt (NGI).
- Kronholm, K. (2016). *Ekstern rapport NVE: Skredfarekartlegging i Vikebygd, Ullensvang herad* (Rapport nr. 22/2016). Hentet fra [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016\\_22.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_22.pdf)

- LeVeque, R. J. (2002). *Finite volume methods for hyperbolic problems*. University of Washington: Cambridge University Press.
- Lied, K. & Bakkehøi, K. (1980). Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. *Journal of Glaciology*, 26(94), 165-177. <https://doi.org/10.3189/S0022143000010704>
- Lied, K., Instanes, B., Domaas, U. & Harbitz, C. B. (1998). Snow avalanche at Bleie, Ullensvang, January 1994. *Norges Geotekniske Institutt (NGI) - 25 Years of Snow Avalanche Research*, 203, 175-181.
- Lied, K. & Kristensen, K. (2003). *Snøskred - Håndbok om snøskred*. Oslo: Vett & viten AS i samarbeid med NGI, Norges geotekniske institutt.
- Margreth, S. (2007). Defense structures in avalanche starting zones. Technical guideline as an aid to enforcement. *Environment in Practice*, (0704), 134.
- McClung, D. & Schaerer, P. (2006). *The Avalanche Handbook* (3. utgave. utg.). Seattle, Washington: Mountaineers Books.
- McDougall, S. (2006). *A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain* (PhD-avhandling). University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0052928>
- McKinnon, M. (2010). *Landslide runout: statistical analysis of physical characteristics and model parameters* (Masteroppgave). University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0052933>
- Mellor, M. (1975). A review of basic snow mechanics. *Snow Mechanics (Proceedings of the Grindelwald Symposium April 1974)*, 114, 251-291, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Mellor, M. & Smith, J. H. (1966). Strength studies of snow. In *International Symposium on Scientific Aspects of Snow and Ice Avalanches, 5-10 April 1965, Davos, Switzerland: reports and discussions*, 69, 100-113, Intl. Association of Hydrological Sciences, IAHS.
- NGI. (2014). *Results 2014 from SP 4 FoU Snøskred: Work Package 1 - Ryggfonn and Avalanche Dynamics. D1.3 Recommendations for the use of the quasi-3D code MoT-Voellmy* (Årsrapport). NGI, Oslo.
- NIBIO. (2010). SAT-SKOG: Kart over skogressurser. Hentet fra <https://www.nibio.no/tema/skog/kart-over-skogressurser/satskog>
- NIBIO. (2015). SR16 - Skogressurskart. Hentet fra <https://www.nibio.no/tema/skog/kart-over-skogressurser/skogressurskart-sr16>
- NVE. (2019a). NVE Atlas - Aktsomhetskart for snøskred. Hentet fra <https://gis3.nve.no/link/?link=SnoskredAktsomhet>
- NVE. (2019b). NVE Atlas - Skredhendelser. Hentet 26.02.2019 fra <https://gis3.nve.no/link/?link=SkredHendelser>
- NVE. (2019c, 2016). seNorge. Hentet 24.02.2019 fra <http://www.senorge.no>
- Olje - og energidepartementet. (2012). *Hvordan leve med farene - om flom og skred* (Meld. St. 15 (2011-2012)). Hentet fra <https://www.regjeringen.no>
- Plan- og bygningsloven. (2008). Lov om planlegging og byggesaksbehandling (Plan- og bygningsloven) Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>
- Ragulina, G. & Taurisano, A. (2014). *Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller?* (Rapport nr. 22/2014). Hentet fra [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2014/rapport2014\\_22.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2014/rapport2014_22.pdf)
- Salm, B. (1993). Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. *Annals of Glaciology*, 18, 221-226. <https://doi.org/10.3189/S0260305500011551>

- Sandersen, F. (2016). *Ekstern rapport NVE: Skredfarekartlegging i Tromsø kommune* (Rapport nr. 17/2016). Hentet fra [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016\\_17.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_17.pdf)
- Savage, S. B. & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of Fluid Mechanics*, 199, 177-215. <https://doi.org/10.1017/S0022112089000340>
- Schaer, M. & Issler, D. (2001). Particle densities, velocities and size distributions in large avalanches from impact-sensor measurements. *Annals of Glaciology*, 32, 321-327. <https://doi.org/10.3189/172756401781819409>
- Schaerer, P. A. & Salway, A. A. (1980). Seismic and impact-pressure monitoring of flowing avalanches. *Journal of Glaciology*, 26(94), 179-187. <https://doi.org/10.3189/S0022143000010716>
- Schraml, K., Thomschitz, B., McArdell, B. W., Graf, C. & Kaitna, R. (2015). Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(7), 1483-1492. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1483-2015>
- Sheu, T. W. H. & Lin, R. K. (2003). An incompressible Navier-Stokes model implemented on nonstaggered grids. *Numerical Heat Transfer. Part B: Fundamentals*, 44(3), 277-394. <https://doi.org/10.1080/713836379>
- SLF/WSL. (2017). RAMMS::AVALANCHE, Version 1.7.20. Hentet fra [http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=60&Itemid=77](http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=60&Itemid=77)
- Takeuchi, Y. & Hirashima, H. (2013). Snowpack estimations in the starting zone of large-scale snow avalanches in the Makunosawa valley, Myoko, Japan. *Annals of Glaciology*, 54(62), 19-24. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A155>
- Takeuchi, Y., Nishimura, K. & Patra, A. (2018). Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches. *Annals of Glaciology*, 1-9. <https://doi.org/10.1017/aog.2018.22>
- Takeuchi, Y., Torita, H., Nishimura, K. & Hirashima, H. (2011). Study of a large-scale dry slab avalanche and the extent of damage to a cedar forest in the Makunosawa valley, Myoko, Japan. *Annals of Glaciology*, 52(58), 119-128. <https://doi.org/10.3189/172756411797252059>
- Taurisano, A. & Øydvin, E. K. (2011). *Plan for skredfarekartlegging - Delrapport snøskred og sørpeskred* (Rapport nr. 18/2011). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat, NVE.
- TEK17. (2017). Forskrift om teknisk krav til byggverk (byggteknisk forskrift) Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>
- Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, 73, 159-165, 212-217, 246-249, 280-285. <https://doi.org/10.5169/seals-61903>



# Vedlegg

## **Vedlegg A: MoT-Voellmy**

A1 – Tabell over simuleringer med medrivning

A2 – Tabell over simuleringer utført i RAMMS

A3 – Henvisning til fillokasjon over utarbeidet data for bruk i skogsmodellen

## **Vedlegg B: Dokumentasjon av NAKSIN**

B1 – Tabell over simuleringer utført i kalibreringen

B2 – Tabell over sensitivitetstesting

B3 – Tabell med valideringsresultatet

B4 – Tabelloversikt for testingen av de foreslåtte verdiene for Lom

## **Vedlegg C: Kart utarbeidet i NAKSIN**

## **Vedlegg D: Manual for NAKSIN**

# Vedlegg A – MoT-Voellmy

Dette vedlegget inneholder en oversikt over simuleringer utført i MoT-Voellmy, samt en tabell over utarbeidede data som kan brukes i en recalibrering av skogmodellen i MoT-Voellmy.

## A1: Tabell over simuleringer med medrivning

<b>Sim.</b>	<b>k</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau_w</math> (Pa)</b>	<b>Medrivning</b>	<b>Endring av k</b>
1	0.001	0.15	500	Nei	-
2	0.002	0.15	500	Ja	0.002
3	0.003	0.15	500	Ja	0.005
4	0.004	0.15	500	Ja	0.006
5	0.001	0.15	700	Nei	-
6	0.002	0.15	700	Nei	-
7	0.003	0.15	700	Nei	-
8	0.004	0.15	700	Nei	-
9	0.001	0.15	900	Nei	-
10	0.002	0.15	900	Nei	-
11	0.003	0.15	900	Nei	-
12	0.004	0.15	900	Nei	-

<b>Sim.</b>	<b>k</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau_w</math> (Pa)</b>	<b>Medrivning</b>	<b>Endring av k</b>
13	0.001	0.20	500	Ja	0.002
14	0.002	0.20	500	Ja	0.004
15	0.003	0.20	500	Ja	0.004
16	0.004	0.20	500	Ja	0.003
17	0.001	0.20	700	Nei	-
18	0.002	0.20	700	Nei	-
19	0.003	0.20	700	Nei	-
20	0.004	0.20	700	Nei	-
21	0.001	0.20	900	Nei	-
22	0.002	0.20	900	Nei	-
23	0.003	0.20	900	Nei	-
24	0.004	0.20	900	Nei	-

<b>Sim.</b>	<b>k</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau_w</math> (Pa)</b>	<b>Medrivning</b>	<b>Endring av k</b>
25	0.001	0.30	500	Ja, men går ut av sin bredde	0.001
26	0.002	0.30	500	Ja	0.002
27	0.003	0.30	500	Ja	0.003
28	0.004	0.30	500	Ja, men går ut av sin bredde	0.004
29	0.001	0.30	700	Nei	-
30	0.002	0.30	700	Nei	-
31	0.003	0.30	700	Nei	-
32	0.004	0.30	700	Nei	-
33	0.001	0.30	900	Nei	-
34	0.002	0.30	900	Nei	-
35	0.003	0.30	900	Nei	-
36	0.004	0.30	900	Nei	-

<b>Sim.</b>	<b>k</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau_w</math> (Pa)</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Endring av k</b>
37	0.001	0.40	500	Ja, men går ut av sin bredde	0.002
38	0.002	0.40	500	Ja, men går ut av sin bredde	0.002
39	0.003	0.40	500	Nedre grenseverdi	-
40	0.004	0.40	500	Nedre grenseverdi	-
41	0.001	0.40	700	Nei	-
42	0.002	0.40	700	Nei	-
43	0.003	0.40	700	Nei	-
44	0.004	0.40	700	Nei	-
45	0.001	0.40	900	Nei	-
46	0.002	0.40	900	Nei	-
47	0.003	0.40	900	Nei	-
48	0.004	0.40	900	Nei	-

## A2: Utførte simuleringer i RAMMS

Skredløp	h (m)	V (m <sup>3</sup> )	Kategori	$\mu$	$\xi$ (m/s <sup>2</sup> )
Makunosawa	1.5	158 668	300, L	-0.02	200, 400
Makunosawa	1.5	158 668	300, L	-0.04	200, 400
Makunosawa	2.0	211 558	300, L	-0.02	200, 400
Makunosawa	2.0	211 558	300, L	-0.04	200, 400

Skredløp	h (m)	V (m <sup>3</sup> )	Kategori
Rigopiano	1.75	107198	300, L
Rigopiano	2.30	140889	300, L
Rigopiano	2.50	153140	300, L

Skredløp	Bruddhøyde (m)	$\mu$	$\xi$ (m/s <sup>2</sup> )
Rigopiano	2.50	-0.02	+200
Rigopiano	2.50	-0.02	+400

## A3: Utarbeidede data for simulering med skog- og medrivningsmodellen i

### MoT-Voellmy (Rigopiano)

Datatype	Beskrivelse	Fillokasjon
Skog	Skogtetthet	P:\2017\01\20150431\Beregninger\Voellmy\Rigopiano\nd.asc
Medrivning	Skjærstyrke	P:\2017\01\20150431\Beregninger\Voellmy\Rigopiano\tauc.asc
	Eroderbar snøhøyde	P:\2017\01\20150431\Beregninger\Voellmy\Rigopiano\bb.asc

# Vedlegg B – Dokumentasjon av NAKSIN

Dette vedlegget inneholder en oversikt over tilhørende filer fra de ulike stegene i valideringen av NAKSIN og filplassering på NGI sin server (P:/). Mappene inneholder en styringsfil, filen 'release\_area\_properties.txt' som gir detaljinformasjon om hvert potensielt utløsningsområde, filer for maksimal flythøyde og hastighet, samt aktsomhetskart som kan analyseres i GIS.

## B1: Kalibrering av NAKSIN

<b>Sted</b>			
Tyinstølen			
<b>Filnavn</b>	<b>Skjærstyrke</b>	<b>Tetthetsfunksjon</b>	<b>Fillokasjon</b>
Run_09	1800		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_09
Run_10	1900	maks (200, min (400, 340+20TA))	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_10
Run_11	2000		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_11
Run_12	2100		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_12
Run_13	1800		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_13
Run_14	1900	maks (200, min (400, 340+30TA))	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_14
Run_15	2000		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_15
Run_16	2100		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_16
Run_17	1800		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_17
Run_18	1900	maks (220, min (400, 340+20TA))	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_18
Run_19	2000		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_19
Run_20	2100		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_20
Run_21	1800		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_21
Run_22	1900	maks (220, min (400, 340+30TA))	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_22
Run_23	2000		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_23
Run_24	2100		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_24
Run_25	1800		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_25
Run_26	1900	maks (240, min (400, 340+20TA))	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_26
Run_27	2000		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_27
Run_28	2100		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_28

Run_29	1800		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_29
Run_30	1900	maks (240, min (400, 340+30TA))	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_30
Run_31	2000		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_31
Run_32	2100		P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstolen\Run_32

## B2: Sensitivitetstesting

Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Lom	0.79	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_23
Lom	0.80	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_22
Lom	0.81	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_25
Lom	0.82	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_24

Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Sande	0.79	2 skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_28
Sande	0.80	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_27
Sande	0.81	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_29
Sande	0.82	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_30

Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Aga	0.79	Ovenfor fotballbanen	P:\2015\04\20150457\Testareas\Aga\Run_23
Aga	0.80	På fotballbanen	P:\2015\04\20150457\Testareas\Aga\Run_22
Aga	0.81	Over fotballbanen	P:\2015\04\20150457\Testareas\Aga\Run_24
Aga	0.82	Over fotballbanen	P:\2015\04\20150457\Testareas\Aga\Run_27

### B3: Validering av NAKSIN med nye fastsatte parametere

Område	Fillokasjon
Aga	P:\2015\04\20150457\Testareas\Aga\Run_23
Bleie	P:\2015\04\20150457\Testareas\Bleie\Run_06
Sande	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_28
Tjoflotviki	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tjoflotviki\Run_16
Lom	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_23
Tyinstølen	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstølen\Run_33
Tromsdalen	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tromsdalen\Run_10

### B4: Parametersett for Lom

$\rho_o = \text{maks}(220, \text{min}(400, 340 + 30TA))$

Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Lom	$0.79\rho_o$	87 skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_11
Tjoflotviki	$0.79\rho_o$	Skred over Tjoflot Gård.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tjoflotviki\Run_06
Sande	$0.79\rho_o$	1 skred.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_08

$\rho_o = \text{maks}(220, \text{min}(400, 340 + 30TA))$

Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Lom	$0.80\rho_o$	40 skred. Skredet ved Knutstugrovi gjekk halvveis ned.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_17
Sande	$0.80\rho_o$	Ingen skred.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_12
Tjoflotviki	$0.80\rho_o$	Skredet gikk over Tjoflot Gård. Utløsningssannsynligheten for skredet over gården er 5 ganger i året.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tjoflotviki\Run_09
Tyinstølen	$0.80\rho_o$	Kortere utløpslengde.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstølen\Run_08

---


$$\rho_o = \text{maks}(220, \text{min}(400, 340 + 30TA))$$


---

Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Lom	$0.81\rho_o$	19 skred. Knutstugrovi-skredet gikk ikke. Lav utløsningssannsynlighet.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_12
Sande	$0.81\rho_o$	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_10
Tjoflotviki	$0.81\rho_o$	Skredet går over Tjoflot Gård og ut i fjorden. Kvart 200 år.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tjoflotviki\Run_07

---

---


$$\rho_o = \text{maks}(220, \text{min}(400, 340 + 30TA))$$

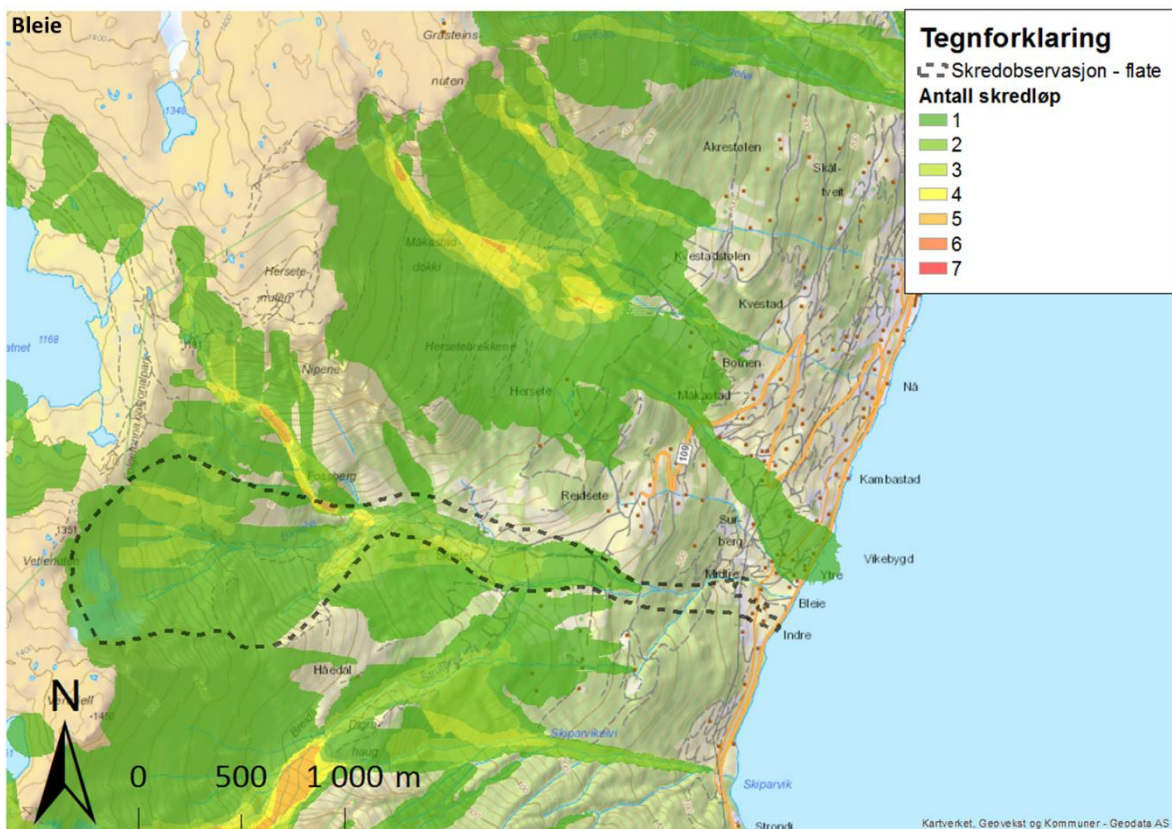
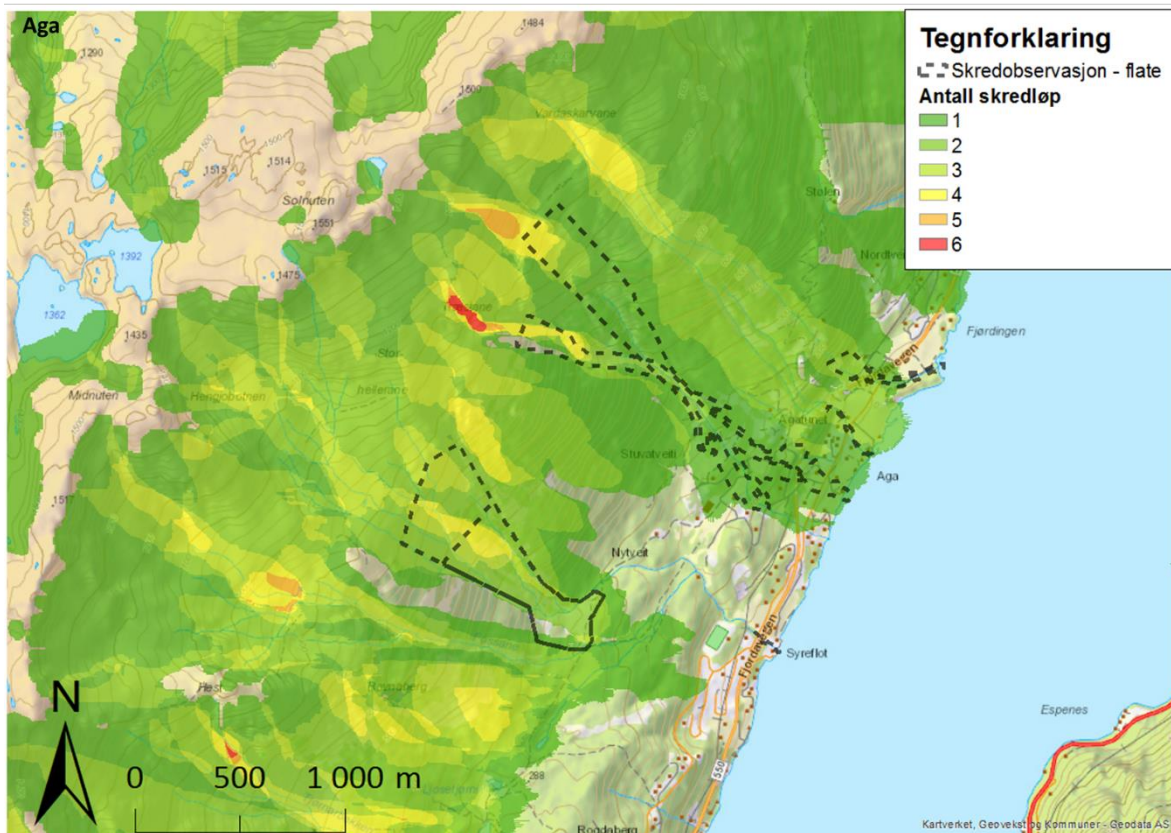

---

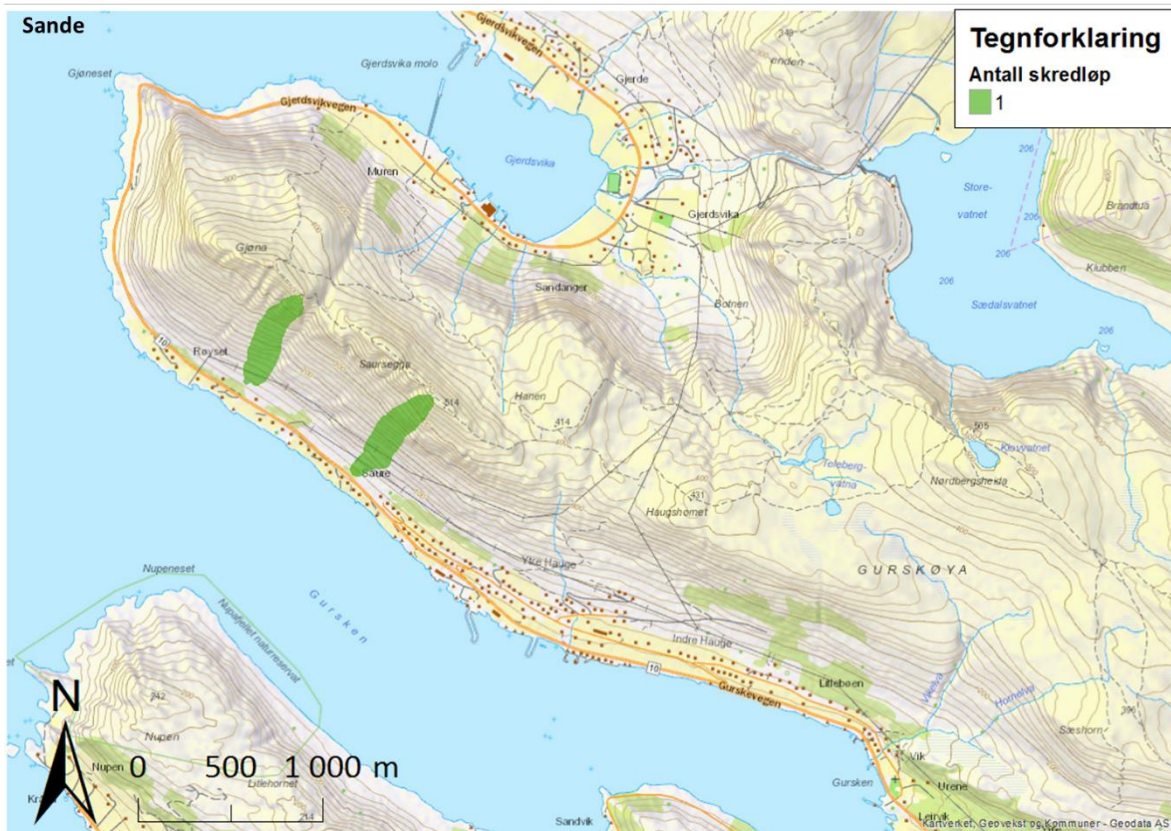
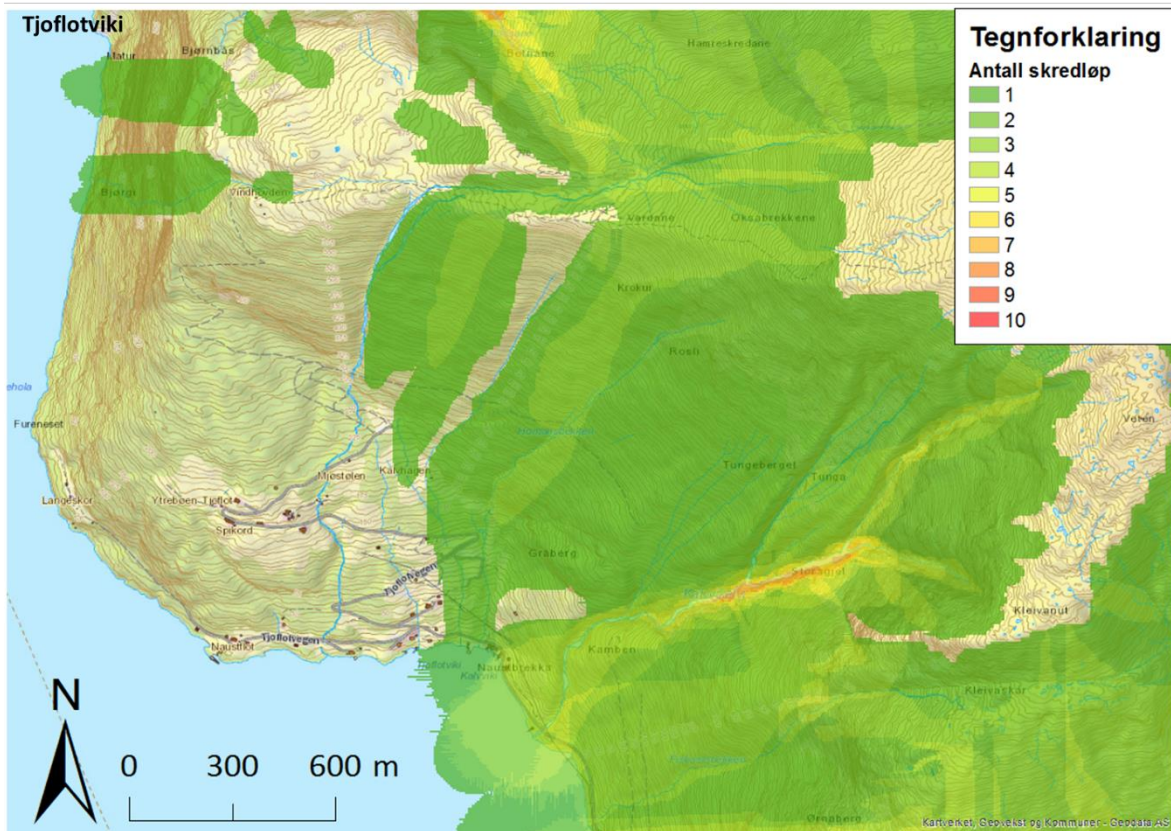
Område	$\rho_w$	Beskrivelse	Fillokasjon
Tjoflotviki	$0.82\rho_o$	Skredene går hyppig. Skred går ikke over Tjoflot Gård.	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tjoflotviki\Run_05
Sande	$0.82\rho_o$	Ingen skred	P:\2015\04\20150457\Testareas\Sande\Run_09
Lom	$0.82\rho_o$	To skred, lav utløsningssannsynlighet	P:\2015\04\20150457\Testareas\Lom\Run_10
Aga	$0.82\rho_o$	Kortere utløpslengde	P:\2015\04\20150457\Testareas\Aga\Run_13
Tyinstølen	$0.82\rho_o$	Kortere utløpslengde	P:\2015\04\20150457\Testareas\Tyinstølen\Run_06

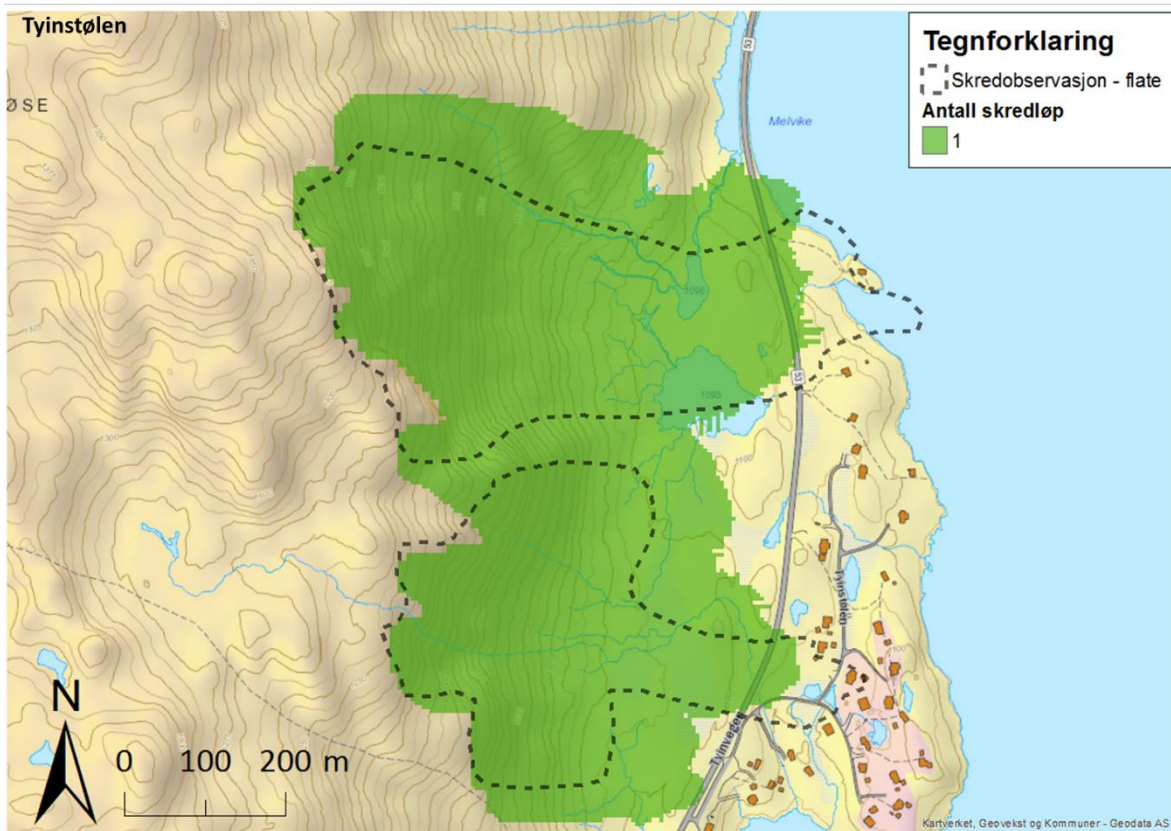
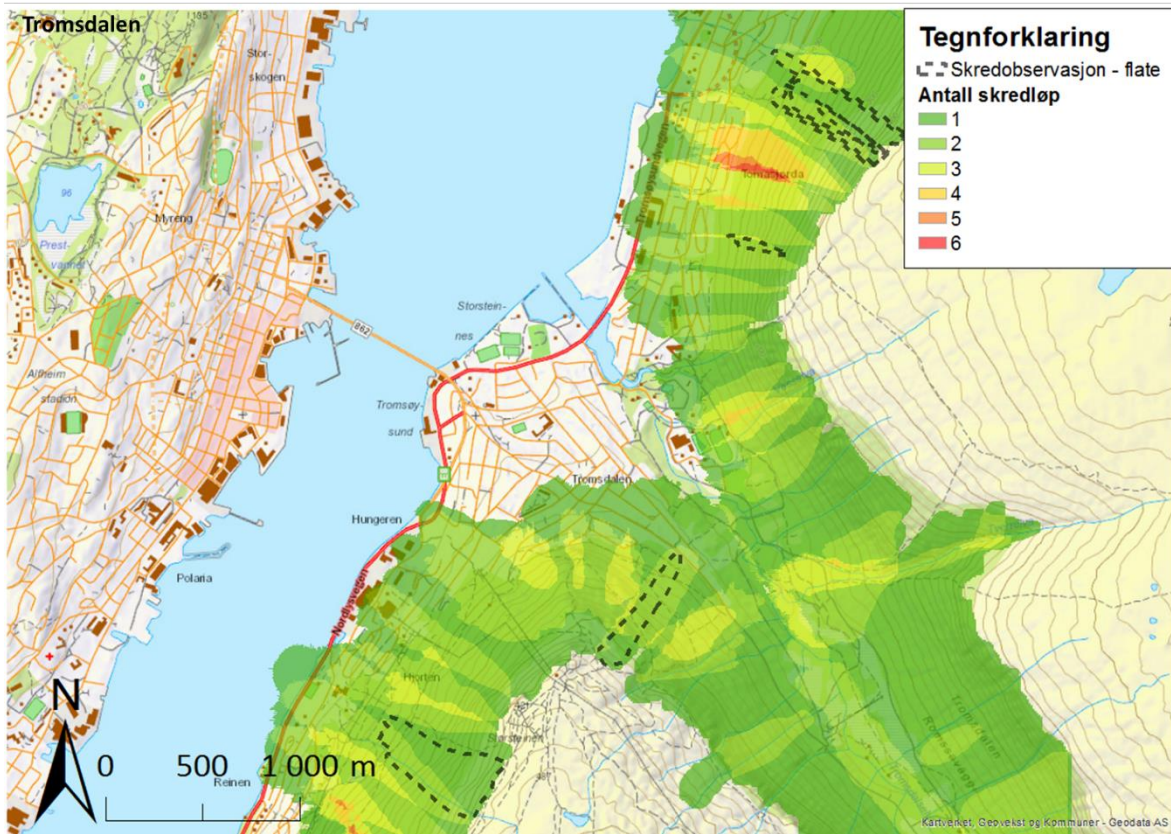
---



# Vedlegg C – Kart utarbeidet i NAKSIN







# **Vedlegg D – Manual for NAKSIN**

Til: Norges Vassdrags- og Energidirektorat  
v/ Eli Katrina Øydvin  
Kopi til:  
Dato: 2018-10-01  
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /  
Dokumentnr.: 20150457-07-TN  
Prosjekt: Nye aktsomhetskart snøskred  
Prosjektleder: Ulrik Domaas  
Utarbeidet av: Katrine Mo, Kjersti Gisnås, Marte Flaate Busengdal og Dieter Issler  
Kontrollert av: Ulrik Domaas

---

## Brukermanual for NAKSIN versjon 2018-09-30

### Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Oversikt over NAKSIN-systemet</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Klargjøring av data</b>	<b>4</b>
3.1	Kartleggingsområde	5
3.2	Tilrettelegging av raster-data	6
<b>4</b>	<b>Hvordan sette opp en simulering i NAKSIN?</b>	<b>10</b>
4.1	Klargjøring for programkjøring	10
4.2	Klargjøring av prosjektinformasjon	11
4.3	Start programmet	16
<b>5</b>	<b>Visualisering av data i ArcGIS</b>	<b>19</b>

### Kontroll- og referanseside

## 1 Introduksjon

Denne brukermanualen gjelder for NAKSIN (Nye Aktsomhetskart for Snøskred i Norge) beta-versjon og inkluderer en rask introduksjon til klargjøring av input data i ArcMap, kjøring av programmet og visualisering av resultater. For at brukeren skal ha en forestilling av hva som foregår "bak kulissene", beskrives det i korte trekk i avsnitt 2 hvordan NAKSIN finner mulige utløsningsområder, beregner utløsningsssannsynligheter og simulerer utløpsdistansene for å så komme til et samlet faresonekart.

Gjennom hele manualen brukes det typewriter font for å vise input fra brukeren. Enter-knappen indikeres med <Enter>. <Ctrl>+Z betyr at man skal holde ned Ctrl-knappen og skrive Z. Navn til mapper skrives med kursiv skrift (*Tjoflotviki*).

## 2 Oversikt over NAKSIN-systemet

NAKSIN (Nye AktsomhetsKart for Snøskred I Norge) er en metodikk og et program for å lage aktsomhetskart for snøskred i et begrenset område (typisk 10–100 km<sup>2</sup> om gangen). Formålet er å lage et kart som gir et mer realistisk bilde av snøskredfaren enn de nåværende kartene, som ble utarbeidet etter en fullstendig automatisert GIS-analyse for omtrent ti år siden og refereres til som AKS2009. I NAKSIN genereres aktsomhetskartet semi-automatisk, dvs. brukeren (en snøskredeksper) bestemmer en rekke parametere i starten, deretter kjøres programmet uten videre input fra brukeren til det ferdige resultatet. Dersom simulering av visse skred endte med feil, får brukeren mulighet til å rette feilene manuelt før kartet genereres.

De hovedsakelige forskjellene mellom metodikken til det nåværende, landsdekkende aktsomhetskartet og NAKSIN er følgende:

- AKS2009 benytter utelukkende terrengegenskaper, mens NAKSIN tar hensyn til klima og vegetasjon gjennom utløsningsssannsynligheten for snøskred og skogens bremseeffekt på snøskred i bevegelse.
- Istedenfor den statistisk-topografiske utløpsmodellen  $\alpha$ - $\beta$  brukes den dynamiske, kvasi-3D modellen MoT-Voellmy. Dens friksjonsparametere avhenger bl.a. av klimaforholdene og skogegenskaper.

NAKSIN er i stor grad uavhengig av plattform (datamaskinens driftssystem kan være GNU/Linux, MS Windows eller MacOS X<sup>1</sup>) og GIS. Programmeringsspråket er Python 3, og det brukes kun OpenSource programvare med unntak av det grunnleggende C-biblioteket MSVCRTxy.dll, som er fritt nedlastbar fra Microsofts nettsted, og skreds-  
imuleringsprogrammet MoT\_Voellmy, som eies av NGI men leveres som kjørbart fil som en del av NAKSIN. Til forberedelse av inngangsdata til NAKSIN og til utarbeidelse av symbolisert aktsomhetskart med bakgrunnskart vil brukeren benytte seg av et GIS. NAKSIN leser og skriver rasterdata i publiserte formater (ESRI ASCII Grid eller

---

<sup>1</sup> Foreløpig ikke testet.

BinaryTerrain 1.3), som kan behandles i de fleste kommersielle så vel som OpenSource GIS.

Arbeidsflyten til et aktsomhetskart for et avgrenset område består av følgende steg:

*Steg 0: Forberedelser (utenfor NAKSIN)*

- Tilrettelegging av området som skal kartlegges (polygon i ESRI shapefile-format)
- Avgjørelse om størrelsen av prosessområdet (omfatter alle skredbanene som muligens kan true kartleggingsområdet)
- Tilrettelegging av klimadata og tilstrekkelig store utsnitt av digital høydemodell (DTM) og skogsdata
- Valg av verdiene til en rekke parametere som skrives i en styringsfil (i ren tekstformat) etter en mal

*Steg 1: Innhenting av simuleringsparametere*

- De nødvendige bibliotekene og modulene lastes inn
- Styringsfilen leses og kontrolleres

*Steg 2: Prosessområde*

- Kartleggingsområdet leses inn
- Terrengmodell, klimadata og skogsdata klippes ut for kartleggingsområdet med en buffersone som brukeren hadde valgt i Steg 0.
- Klimadata nedskaleres fra SeNorge-griddet (1 km<sup>2</sup>) til DTM-griddet (typisk 100 m<sup>2</sup>)

*Steg 3: Finne potensielle utløsningsområder*

- Alt terreng med helning og krumning mellom grenser valgt av brukeren
- Celler i utløsningsområdet der kronedekning er større enn en helningsavhengig grenseverdi utelukkes.
- "Utstikkere" og "flaskehals" elimineres i en iterativ prosess.
- Små "hull" i utløsningsområdene fylles.
- Sammenhengende arealer identifiseres og nummereres.
- Områder som er mindre enn en nedre terskelverdi valgt av brukeren elimineres.
- Områder som er større enn en øvre terskelverdi valgt av brukeren deles opp etter nedbørfelt.
- Sammenhengende arealer identifiseres og nummereres på nytt.

*Steg 4: Estimat av utløsningssannsynlighet og bruddhøyde for hvert utløsningsområde*

- Sannsynlighetsfordelingsfunksjoner (PDFer) for skjærstyrke i det svake laget, posisjon av det svake laget i snødekket, snøhøyde og nysnømengde på tre døgn settes opp, med parametere som avhenger av det regionale klimaet og høyde over havet.

- Et enkelt bruddkriterium basert på helning, skjærstyrke og last pga. gammel snø ovenfor det svake laget og nysnø brukes for å finne utløsnings sannsynlighet og bruddhøyde (for et skred med gitt frekvens – vanligvis 0,001 pr. år). Det brukes Monte Carlo-teknikker og parallel prosessering (dersom datamaskinen har flere prosessorkjerner) til å beregne disse verdiene.
- Alle utløsningsområdene med lavere frekvens enn nevnt terskelverdi elimineres.

#### *Steg 5: Simulering av skredutløp*

- For hvert utløsningsområde som er igjen etter Steg 4 settes det opp inngangsdata for simulering med MoT-Voellmy.
- Simuleringer med MoT-Voellmy utføres med parallel prosessering.

#### *Steg 6: Oppbygging av aktsomhetskart*

- For hver gridcelle i prosessområdet legges rasterfilene fra simuleringene med MoT-Voellmy over hverandre og telles det i hvor mange simuleringer den maksimale flyte- eller avsetningshøyden er større enn en terskelverdi (typisk 0,1 m) valgt av brukeren. Celler med summert verdi 0 treffes ikke av snøskred med den gitte årlige sannsynligheten. Celler med summert verdi større enn 1 kan treffes av skred fra flere utløsningsområder.
- En rasterfil med antall treff i hver celle skrives ut i ESRI ASCII Grid eller BinaryTerrain 1.3 format.

#### *Steg 7 (utenfor NASKIN): Ferdigstilling av aktsomhetskartet*

- Brukeren kombinerer rasterfilen fra NAKSIN med det foretrukne bakgrunnskartet og symboliserer kartet som ønsket.
- Brukeren kontrollerer utstrekningen av fareområdene kritisk på grunnlag av skredfaglig kompetanse og lokalkunnskap, særlig i lys av kjente skredhendelser i området. Ved behov korrigeres kartet.

## **3 Klargjøring av data**

Før klargjøringen av data begynner, sett opp en ryddig og oversiktlig mappestruktur for området du skal kartlegge. I dette eksempelet er det *Tjoflotviki* som skal undersøkes, og en mappe med navn *Tjoflotviki* lages under mappen *Aktsomhetskart*. Under denne mappen skal inputdata og simuleringresultater lagres. Selve NAKSIN programmet (naksin.py) samt skredsimuleringsprogrammet MoT-Voellmy.2016-06-23.exe (MS Windows) eller MoT-Voellmy.2016-06-23 (Linux, MacOS X) eller ligger i mappen *NAKSIN*.

Data som skal brukes i NAKSIN må først klargjøres, og dette skjer enklest i GIS. For brukere av ESRI ArcMap gis det et sammendrag av hvordan dette kan gjøres. Alternative GIS-løsninger har tilsvarende metoder. Input-dataene inkluderer:

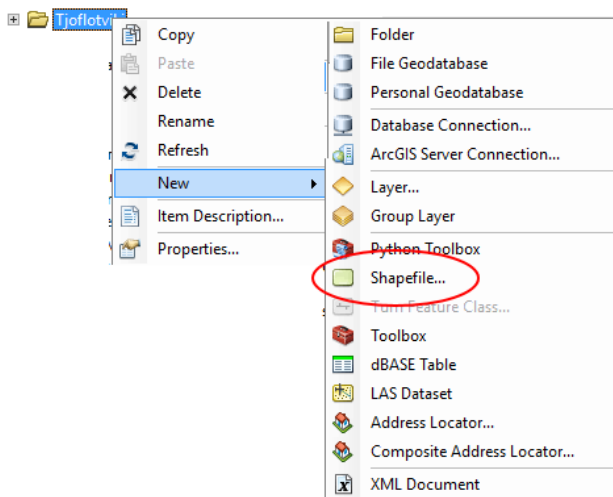


- **Kartleggingsområde** i form av et polygon lagret som shape-fil. I dette eksempelet heter den HMA.shp.
- **Digital terrengmodell** (DTM) som dekker et område på 1–3 km rundt kartleggingsområdet. Danner grunnlag for å finne mulige utløsningsområder og kjøring av snøskredmodell. I dette eksempelet heter filen dem.asc.
- **nD-raster** (tetthetsverdier for skog, landsdekkende). Brukes i utløpsberegninger. I dette eksempelet heter filen nd.asc.

### 3.1 Kartleggingsområde

I første steg lages et polygon for området det skal lages aktsomhetskart for.

Opprett en ny shape-fil i prosjektmappen (her: *Tjoflotviki*). I ArcMap: Høyreklikk på den aktuelle mappen i Catalog-fanen. Velg "New" og "Shapefile" (figur 1) og pass på at det er huket av for polygon-shapefil.



Figur 1. Opprett en ny shape-fil i kartleggingsmappen

Høyreklikk på laget når det dukker opp i "Table of contents"-menyen til venstre, og trykk "Start Editing". Tegn så området det skal lages aktsomhetskart for (Figur 2).



Figur 2. Polygon rundt Tjøflotviki for å avgrense kartleggingsområdet. Polygonet lagres som en shape-fil

## 3.2 Tilrettelegging av raster-data

Det finnes ulike kilder til de dataene som NAKSIN trenger:

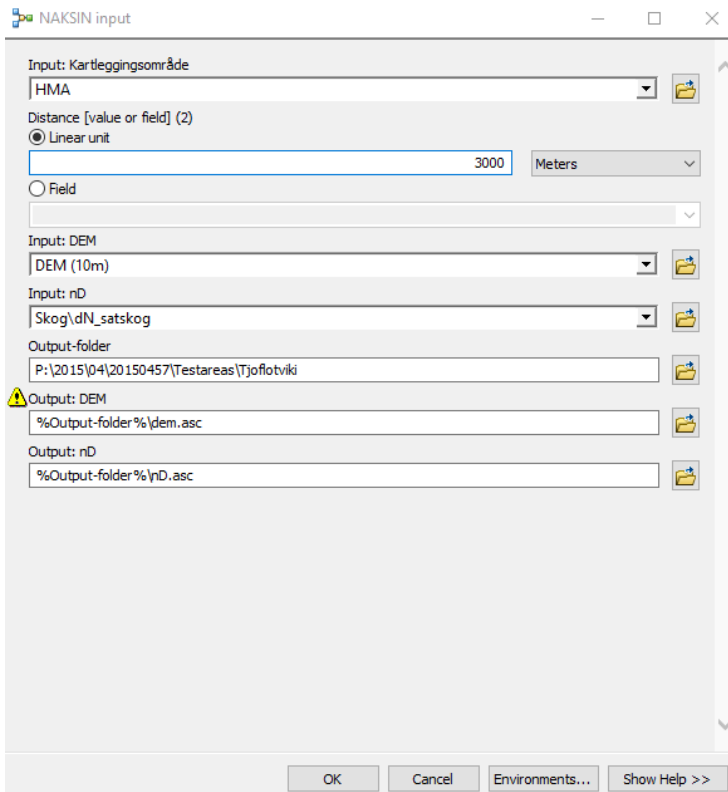
- Ulike terrengmodeller kan brukes, enten landsdekkende 10 m terrengmodell, eller terrengmodeller basert på LiDAR data for det aktuelle området.
- Landsdekkende skogdata (unntatt Finnmark) med oppløsning på 25 m × 25 m finnes i SAT-SKOG datasettet. Basert på dette, har NGI lagt til rette en rasterfil i ESRI ASCII Grid-format for variabelen nD (antall trær per m<sup>2</sup> × gjennomsnittlig stammediameter på brysthøyde i meter). SAT-SKOG dataene har imidlertid store usikkerhet og i tillegg er de utdatert. Data av mye bedre kvalitet finnes i SR-16 datasettet (oppløsning 16 m × 16 m), som i skrivende stund er tilgjengelig kun for Trøndelag og Østlandet, men utvides fortløpende. I dette datasettet finnes det også lag med gjennomsnittlig stammediameter. Det ble imidlertid funnet tilfeller der SR-16 dataene er i motstrid med aktuelle flyfoto.
- Klimadata for gjennomsnittlig lufttemperatur om vinteren (desember t.o.m. februar), statistikk for maksimal årlig snøhøyde, HSmax, og statistikk for tredøgns vannekvivalent av nysnø, HNW3d, ble tilrettelagt av NGI på grunnlag av SeNorge-datasettet.

NAKSIN kan ikke fange opp alle muligheter på hvordan disse dataene er tilgjengelige i brukernes systemer (enkle rasterfiler, lokal geodatabase, geodatabseserver). Det forutsettes at rasterdataene er klippet til rette for området og lagret som rasterfiler i ESRI ASCII Grid-format. For enklere utklipping i ArcMap har NGI tilrettelagt et enkelt ArcGIS-verktøy, **NAKSIN input**, der hele prosessen er integrert og beskrevet. Flytskjema for hele prosessen er vist i Figur 4. Tilsvarende verktøy kan lages for andre GIS.

Disse dataene klippes før modellkjøring, for et område (Area of Interest, AoI) som dekker kartleggingsområdet med en buffersone i alle fire retninger (**NAKSIN input**: Buffer (3000 m)). I utgangspunktet velges AoI så stor at man er sikker på at alle snøskredene som potensielt kan treffe kartleggingsområdet omfattes av buffersonen. Interpolering av klimadata fra SeNorge-oppløsning på 1 km til DEM-oppløsning (f.eks. 10 m) over hele AoI krever at terrengmodellen må dekke alle SeNorge-cellene som delvis ligger innenfor AoI. Derfor må utklippet være minst 1 km større i alle fire retninger enn AoI. For eksempel, hvis skred kan starte opp til 1400 m fra kartleggingsområdet, vil man velge buffersonen for AoI på 1500 m og klippe ut med en buffersone på 2500 m i **NAKSIN input** (se Figur 3).

Rasterfilene med selve klimadata har en oppløsning på 1 km<sup>2</sup> og er små nok for ikke å måtte tilretteklippes. Det kan være hensiktsmessig å lagre dem i den overordnede mappen som heter *Aktsomhetskart* i dette eksempelet, slik at de er tilgjengelige for alle områdene som skal vurderes (f.eks. *Aktsomhetskart\Tjoflotviki*, *Aktsomhetskart\Oslo*, ...).

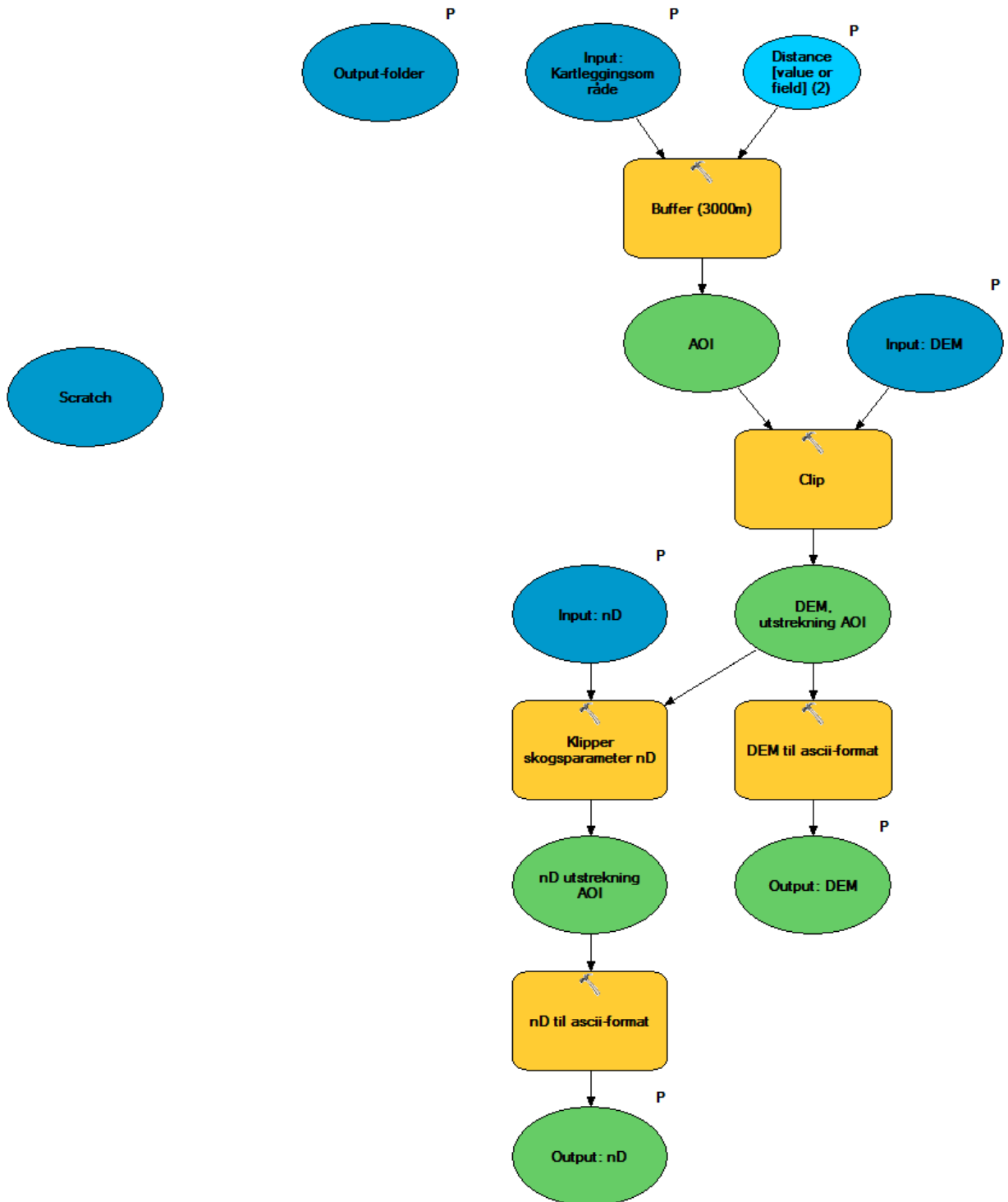
Til slutt eksporteres alle rasterdatasettene til den valgte prosjektmappen (her: *Tjoflotviki*), med standard filnavn. (ArcGIS-funksjon: **RasterToASCII**). Standard filnavn er *DEM.asc*, *nD.asc* (se Figur 3). Andre filnavn kan også brukes, men må angis tilsvarende i styringsfilen til NAKSIN (se avsnitt 4.2).



*Figur 3: DEM klippes til og rasterdatasettene eksporteres til valgt prosjektmappe. I ESRI ArcMap kan denne prosessen utføres med ArcGIS-verktøyet NAKSIN input*

Dersom man ønsker å kjøre en simulering uten skog i skredløpet må det lages et raster med verdi 0 for hele utstrekningen. I ArcMap kan dette gjøres ved å bruke "Raster Calculator" og multiplisere nD-rasteret med 0. Deretter eksporterer man som beskrevet over ved hjelp av funksjonen RasterToAscii.

**Obs.:** Skredsimuleringsmodellen MoT-Voellmy, som skal bruke disse dataene, er kompilert med punktum som desimalskilletegn. Det er viktig at man setter GIS til å bruke desimalpunktum også når man klargjør rasterfilene. Hvis dette ikke lar seg gjøre, er det nødvendig å erstatte komma med punktum i DEM.asc og nD.asc. Dette kan gjøres enkelt i et editorprogram som Notepad ved å bruke "Søk og erstatt"-funksjonen.



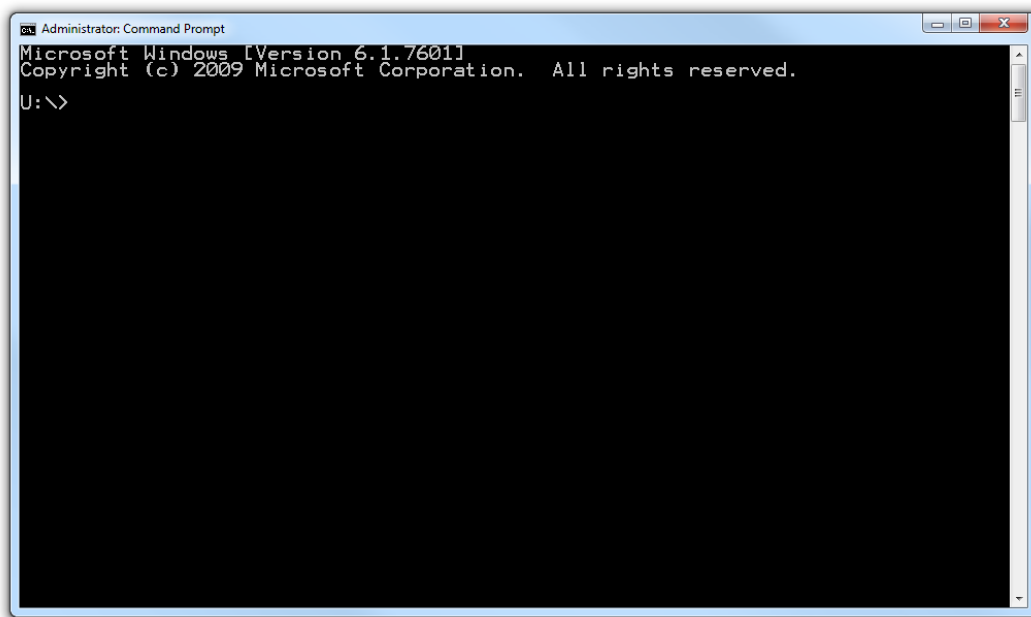
Figur 4: Flytskjema for ArcGIS-verktøyet NAKSIN input som tilrettelegger data for simulering med NAKSIN

## 4 Hvordan sette opp en simulering i NAKSIN?

### 4.1 Klargjøring for programkjøring

Programmeringsspråket Python 3 må være installert for å kjøre NAKSIN. NAKSIN har blitt utviklet og testet under versjon 3.5, 3.6 og 3.7, men vil muligens også fungere med tidligere versjoner av Python 3 (men ikke med Python 2).

Python 3 installeres automatisk med alle populære distribusjonene av GNU-Linux (Ubuntu, Debian, Fedora, SUSE...) i en aktuell versjon. Under MS Windows er dette vanligvis ikke tilfellet. For å sjekke at Python er installert og hvilken versjon det er, skriv `python` i kommandovinduet. Python med medfølgende versjon vil da vises. Deretter bruk `quit()` for å komme ut av Python igjen. (Man kan åpne et kommandovindu f.eks. ved å gå til søkelinjen under "Start-menyen" og å skrive `cmd.exe`. Utgangspunktet skal nå se ut som i Figur 5.)



Figur 5. Standard visning i et kommando-vindu i MS Windows.

Dersom Python 3 mangler, kan programmet for MS Windows lastes ned fra denne siden: <https://www.python.org/downloads/> eller fra <https://www.anaconda.com/download/>. Dersom spørsmålet kommer opp under installeringen om stien til Python skal tilføyes omgivelsevariabelen PATH, kryss av for det.

Under MS Windows er det også nødvendig å ha Microsoft Visual C++ Runtime Environment i en versjon som er tilpasset Windows-versjonen og Python-versjonen 14.0; den tilsvarende filen heter `MSVCRxy.dll`, der `xy` er relatert til versjonen. Hvilken versjon

som er påkrevd, vil vises i feilmeldingen. Velg den riktige pakken på Microsofts nedlastingsside: <https://support.microsoft.com/en-us/help/2977003/the-latest-supported-visual-c-downloads>. Nyttig informasjon finnes også på siden <https://stackoverflow.com/questions/41501636/how-to-install-pip3-on-windows>.

Deretter må nødvendige Python-pakker være installert, bl.a.:

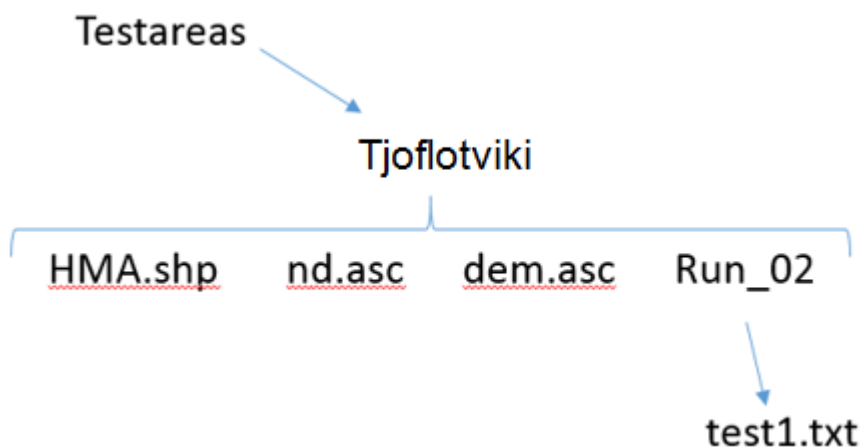
- ↗ NumPy
- ↗ SciPy
- ↗ GDAL (last ned riktig pakke for maskin og python-versjon. Dette kan være litt utfordrende i visse konstellasjoner. Dersom Python er lastet ned fra [www.python.org](http://www.python.org), kan en passende pakke lastes ned f.eks. fra <http://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/#gdal>. Med Python fra Anaconda kan GDAL installeres via kommandoen `conda install -c conda-forge gdal`.
- ↗ math
- ↗ linecache
- ↗ multiprocessing

En enkel måte å installere programpakker på er ved å bruke `pip install`:  
 Skriv f.eks.: `pip install numpy` eller `pip install GDAL-[etc.].whl`.

For å teste om pakken er installert, skriv f.eks. `import ogr` i et Python kommandovindu. Dette skal ikke returnere noe dersom pakken er riktig installert.

## 4.2 Klargjøring av prosjektinformasjon

I denne testkjøringen er det brukt følgende oppbygning som vist i Figur 6.



Figur 6. Eksempel på mulig oppbygning av mappestruktur for en kjøring i NAKSIN

Input som DEM, skogfil, klima og testområdet er allerede klargjort. Testområdet er gitt en egen mappe (*Tjoflotviki*) under mappen Testareas. Under denne mappen (*Tjoflotviki*) ligger shape-filen med polygonet av kartleggingsområdet (*hazard mapping area*, HMA.shp), skogfilen (nd.asc) og den digitale terrengmodellen (dem.asc), som er felles for alle programkjøringer for dette området. Her skal det også lagres en tekstfil som definerer denne kjøringen (*run information file*, i dette tilfellet test1.rif), der de ulike parameterne blir definert. Klimadata i dette tilfellet er plassert utenfor mappen med testareas, og under mappen NAKSIN\_input.

Parameterfilen ser ut som vist under, og kan editeres etter behovene for eksempel i notepad eller notepad++. Vær OBS på at 1) rekkefølgen av linjene ikke må endres, 2) nøkkelordene til venstre for likhetstegnet ikke må forandres, 3) likhetstegnene ikke har mellomrom til venstre.

```

NAKSIN project information file format= 2018-09-17
File name=                               test1.txt
Encoding=                                 UTF-8
Last changes (YYYY-MM-DD)= 2018-09-18
Avalanche experts=                        XYZ
#
# Project file storage
Projectfolder=   P:\2015\04\20150457\Testareas\Tjoflotviki
Map data folder=
Run folder=     Run_02
#
# External data sources
EPSG code=     25833
DEM=           ../dem.asc
Climate data folder=  ../../../NAKSIN_input
Forest data folder=  ../nd.asc
Mapped area (shape file)=  ../HMA.shp
#
# Data format of hazard map
Output format=   BinaryTerrain
#
# Release area properties
Limit annual probability (1/y)=           0.001
Min. release angle (deg)=                 28.0
Max. release angle (deg)=                 60.0
Min. release area (m2)=                   400
Max. release area (m2)=                   1000000
Max. release area altitude extent (m)=    400
Max. release area curvature (1/m)=        0.0200

```



```

Max. release area extent ratio=          5
Default release probability (1/y)=       1.0
Default release depth (m)=              1.5
#
# Friction parameter calibration
Tiny avalanche volume (m3)=             5000
Small avalanche volume (m3)=           10000
Medium avalanche volume (m3)=          25000
Large avalanche volume (m3)=           60000
Low-temperature threshold (deg C)=      -6.0
High-temperature threshold (deg C)=     -2.0
Flat-slope curvature (1/m)=             0.0000
Open-slope curvature (1/m)=            0.0020
Channelized curvature (1/m)=           0.0100
Gully curvature (1/m)=                 0.0500
#
# Parameters concerning the numerics
Comp. grid resolution (m)=              5.0
Min. timestep (s)=                     0.0010
Max. timestep (s)=                     0.2000
Min. deposit depth (m)=                 0.10
Width of buffer zone (m)=               1000.0
Max. simulation time (s)=               90.0
Number of Monte Carlo trials=          1000000
  
```

Tabell 1: Forklaring av input verdier til simulering. Verdier i blått er eksempelverdier

Nr	Navn	Default Verdi	Forklaring
1	Naksin P.I.F.F	2018-09-17	Dette tilsvarer den aktuelle versjonen
2	File name	—	<a href="#">test1.rif</a> Navn på filen. Endre den etter hva du lagrer filen som. Lurt å bruke standard navn for alle. Filen kan lagres for eksempel som en rif eller txt fil.
3	Encoding	UTF-8	<a href="#">UTF-8</a> . Til mulig fremtidig bruk.
4	Last changes	—	Sett inn dato simuleringen kjøres. I dette tilfellet <a href="#">2018-09-18</a>
5	Avalanche experts	—	Sett inn navn på person som gjennomfører simulering.
8	Project folder	—	Sti til mappen for området.
9	Map data folder	—	Sti til området der kartdata (DTM) er lagret som input til NAKSIN, relativ til <b>Project folder</b> . Kan være det samme som Project folder (betegnes med '.'), men kan like godt være forskjellig.
10	Run folder	—	Mappen der output lagres. f.eks: <a href="#">Run_02</a>

13	EPSG code	25833	EPSG = Geodetic Parameter Registry. I dette tilfellet ble koden: 25833 brukt. Denne definerer UTM-sone 33N basert på referanseramma ETRS89.
14	DEM		Her skal terrengmodellen som ble eksportert som ascii fil settes inn. Lokasjon relativt til run-folder. F.eks. <code>../DEM.asc</code>
15	Climate data folder		Klimalag som setter verdier automatisk for temperatur, snøhøyde og nysnø, relativt til run_folder. I eksempelet er klimadata lagret i en mappe som ligger tre trinn høyere i filhierarkiet enn run_folder, angitt som <code>../../Naksin_input</code> . Hvert <code>../</code> går et trinn opp i hierarkiet.
16	Forest data folder		Her skal laget for skogdata som ble eksportert som ASCII-fil angis. Lokasjon relativt til run-folder. I eksempelet ligger skogdata i project_folder et trinn høyere, dvs. <code>..</code>
17	Mapped area (shape file)		Her skal shapefilen over området som kartlegges angis. Lokasjon relativt til run-folder. I eksempelet skal kartleggingsområdet være det samme for alle kjøringer av NAKSIN, derfor legges filen i project_folder: <code>../HMA.shp</code>
20	Output format		Her kan en velge hvilket format resultatene skal skrives ut i. Enten BinaryTerrain eller ESRI ASCII Grid. Ved bruk av ESRI ASCII Grid kan informasjon leses ut. Her er det blitt brukt <code>BinaryTerrain</code> , som er mer kompakt.
23	Limit annual probability (1/y)	0.001	Gjentaksintervallet bestemmes her. I dette tilfellet er det satt til 0.001, tilsvarende en returperiode på 1000 år og grenseverdien for bygg i sikkerhetsklasse S2 jf. Plan- og bygningsloven.
24	Min Release Angle	28	Minimum helning for løsneområder. Kan varieres mellom 27° og 30°.
25	Max Release Angle	60	Maximal helning for løsneområder. Kan varieres mellom 55° og 60°.
26	Min Release Area	400.0	Minste inkluderte areal av løsneområde.
27	Max Release Area	1000000.0	Største areal av løsneområde før NAKSIN orøver å dele dem opp etter nedbørfelt.
28	Max Release Area Altitude Extent	400.0	Største utstrekning i høyde av release area. Utløsningsområder med større vertikale utstrekning begrenses fra nedsiden.
29	Max release area curvature (1/m)	0.0200	Grense for plankurvatur i utløsningsområder. Kurvatur over dette ekskluderes.
30	Max release area extent ratio	5.0	Et tall mellom 1 og 10. Bestemmer at utløsningsområder ikke skal være for brede ift. høyden eller

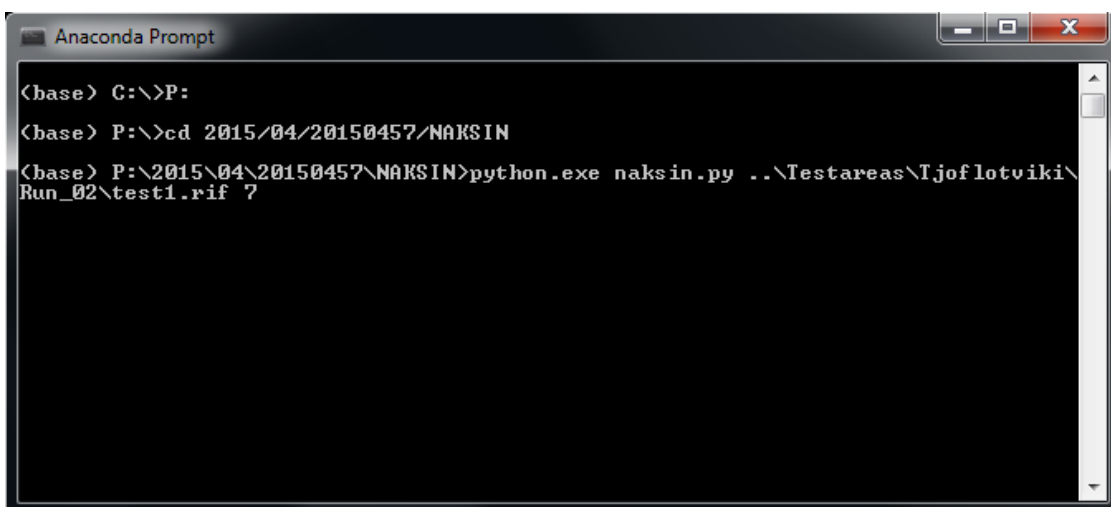
			for høye ift. Bredden. Ikke implementert i denne versjonen av NAKSIN.
31	Default release probability (1/y)	1.0	I tilfellet hvor klimadata ikke eksisterer for et utløsningsområde, så kan utløsningssannsynligheten ikke beregnes. Som default-verdi settes det at skredet er hyppig.
32	Default release depth (m)	1.5	I tilfellet hvor klimadata ikke eksisterer, settes denne verdien som default.
35	Tiny avalanche volume	5000.0	Maksimalt volum (m <sup>3</sup> ) for at et snøskred gjelder som <i>meget lite</i> . Verdien er viktig for valg av friksjonsparametrene og skal helst ikke endres!
36	Small avalanche volume	10000.0	Maksimalt volum av et <i>lite</i> snøskred. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
37	Medium avalanche volume	25000.0	Maksimalt volum av et middels stort snøskred. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
38	Large avalanche volume	60000.0	Minimalt volum (m <sup>3</sup> ) av <i>store</i> snøskred. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
39	Low-temperature threshold	-6	Nedre terskelverdi av gjennomsnittlig vintertemperatur (desember til februar, °C) er brukt til å interpolere friksjonsparameterne for temperaturer istedenfor å bruke høydesonegrenser. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
40	High-temperature threshold	-2	Øvre terskelverdi av gjennomsnittlig vintertemperatur (desember til februar, °C) er brukt til å interpolere friksjonsparameterne for temperaturer istedenfor å bruke høydesonegrenser. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
41	Flat-slope curvature	0.0	Maksimal krumning (1/m) av kotelinjene for at et utløsningsområde gjelder som plan eller konvekst. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
42	Open slope curvature	0.002	Typisk krumning (1/m) til kotelinjene av et svakt skålformet område. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
43	Channelized curvature	0.01	Typisk krumning (1/m) til kotelinjene i et kanalisert område. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
44	Gully curvature	0.05	Typisk krumning (1/m) til kotelinjene i et gjel. Verdien er viktig for valg av friksjonsparameterene og skal helst ikke endres!
47	Comp. grid resolution	5.0	Størrelse (m) på cellene i skredsimuleringen, er uavhengig av terrengmodellens oppløsning. Kan

			forandres mellom 2 og 10 m, men 5 m er vanligvis best.
48	Min. timestep	0.001	Hvis det variable tidskrittet i simuleringen faller under denne terskelverdien, anses simuleringen som mislykket. Verdien skal vanligvis ikke endres.
49	Max. timestep	0.2	Maksimalverdien til det variable tidskrittet som programmet får velge. Kan evt. tilpasses hvis Comp. grid resolution ikke er satt til 5 m.
50	Min. deposit depth	0.1	Modellen inkluderer ikke kohesjon mellom snøpartiklene, derfor er 0.1m tykkelse satt som stoppverdi for snøskredet.
51	Width of buffer zone (m)	—	Er sonen rundt kartleggingsområdet der utløsningsområder kan ligge i. Kartleggingsområdet pluss bufferen tilsvarer beregningsområdet. Dersom det er tydelig at det ikke er noen løsnedområder mer enn 1000 m fra kartleggingsområdet, kan bufferen settes lik 1000 m. Det er viktig å se på kartet for å velge en fornuftig størrelse for denne bufferen. Brukeren må imidlertid legge til rette et DTM som går minst 1 km utenfor beregningsområdet pga. av klimainterpolering.
52	Max. Simulation time	—	Maksimal simuleringstid. Den aktuelle versjonen av NAKSIN velger dette tallet automatisk for hvert utløsningsområde.
53	Number of Monte Carlo trials	1000000	Antall Monte Carlo-forsøk per utløsningsområde for å beregne utløsnings sannsynligheten. Har stor betydning for simuleringstiden, men bør helst være ca. 1 000 000 for reproducerbare resultater.

### 4.3 Start programmet

1. Skriv inn **nettverkslokasjon** hvor programmet er lagret (f.eks. C:) og trykk <Enter>. *I eksempelet vist i Figur 7 er programmet lagret under P:.*
2. Skriv `cd <sti til NAKSIN>` (`cd` = change directory; `sti` = mappen der NAKSIN er lagret på maskinen, f.eks.: `cd 2015\04\20150457\NAKSIN` (se Figur 7)). Trykk <Enter>.
3. Videre skal programmet vi skal åpne defineres i tillegg til hva vi vil kjøre det i. Vi skriver derfor inn `python.exe naksin.py ..\Testareas\Tjoflotviki\Run_02\test1.rif`. Dette betyr at det er programmet `naksin.py` vi vil kjøre i Python (se Figur 7), og at NAKSIN skal lese alle parameterverdiene fra filen `test1.rif`, som ligger i mappen `Run_02`.
4. Ved å trykke <Enter> nå, vil programmet NAKSIN åpnes og simuleringen kjøres (se Figur 8).

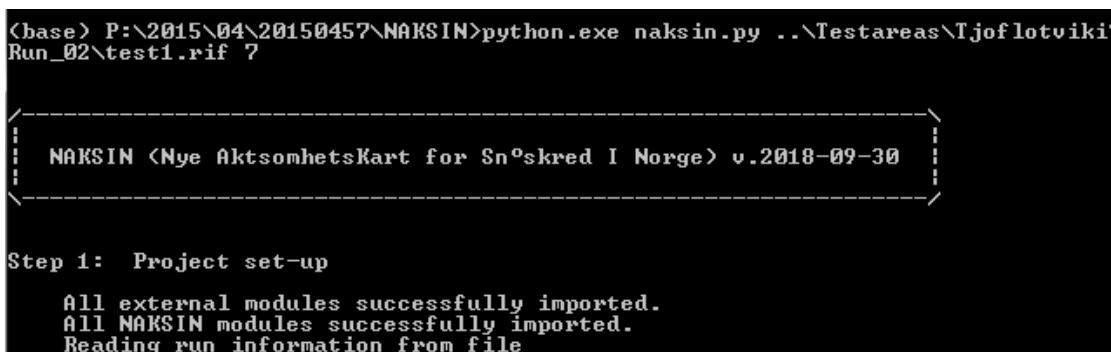
5. Obs! Som siste argument i startlinjen til NAKSIN (etter `test1.rif`) kan antall parallelle prosesser velges. Det anbefales å velge 2 eller 3 på maskiner med én prosessor med to kjerner + hyperthreading (typiske laptop). Om maskinen har fire fysiske kjerner (ved noen high-end laptop og stasjonære PCer), kan 4 være det optimale valget. Ved kraftige arbeidsstasjoner med 2 fire-kjerners prosessorer og rikelig med minne (16 GB RAM) kan man sette tallet til 7–8, avhengig av om maskinen skal brukes til annet arbeid mens NAKSIN kjøres.



```

Anaconda Prompt
<base> C:\>P:
<base> P:\>cd 2015\04\20150457\NAKSIN
<base> P:\2015\04\20150457\NAKSIN>python.exe naksin.py ..\Testareas\Tjoflotviki\
Run_02\test1.rif 7
    
```

Figur 7: Hvilket program vi vil kjøre, samt hvilken mappe filen ligger i er nå definert



```

<base> P:\2015\04\20150457\NAKSIN>python.exe naksin.py ..\Testareas\Tjoflotviki\
Run_02\test1.rif 7

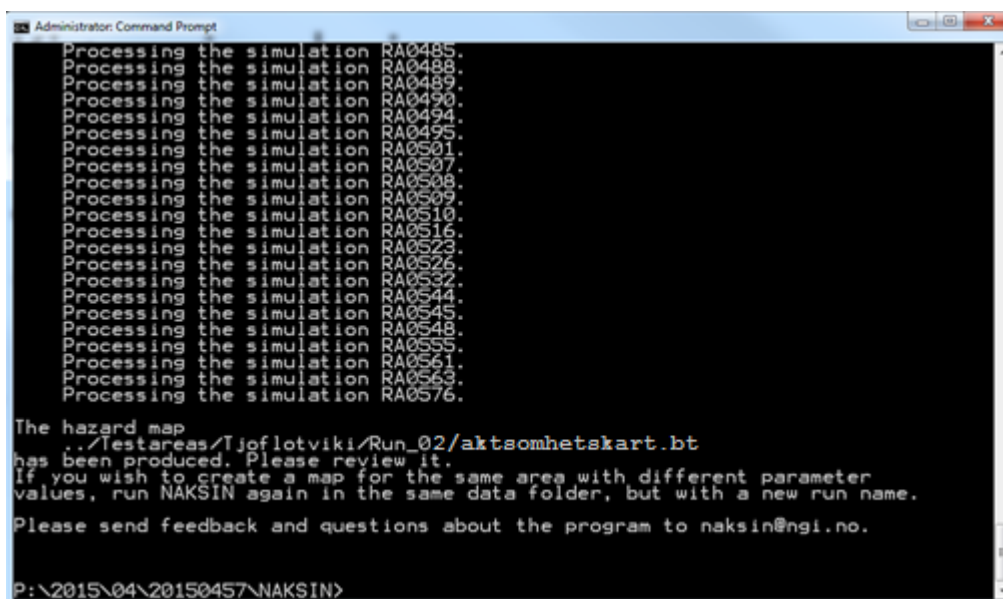
-----
NAKSIN <Nye AktsomhetsKart for Snoskred I Norge> v.2018-09-30
-----

Step 1: Project set-up

All external modules successfully imported.
All NAKSIN modules successfully imported.
Reading run information from file
    
```

Figur 8: NAKSIN er nå åpnet og simuleringene kjører

6. Når simuleringen er gjennomført, vil meldingen være som i Figur 9. Resultatfilene fra simuleringen skal nå ligge i resultatmappen, i dette eksempelet `Testareas/Tjoflotviki/Run_01`. **Aktsomhetskart.bt** er aktsomhetskartet for området, mens **allrel.asc** er en oversikt over alle løsneområder som er brukt i simuleringen. Nå kan filen med aktsomhetskartet åpnes i ArcMap eller andre GIS-programmer for visualisering.



```
Administrator: Command Prompt
Processing the simulation RA0485.
Processing the simulation RA0488.
Processing the simulation RA0489.
Processing the simulation RA0490.
Processing the simulation RA0494.
Processing the simulation RA0495.
Processing the simulation RA0501.
Processing the simulation RA0507.
Processing the simulation RA0508.
Processing the simulation RA0509.
Processing the simulation RA0510.
Processing the simulation RA0516.
Processing the simulation RA0523.
Processing the simulation RA0526.
Processing the simulation RA0532.
Processing the simulation RA0544.
Processing the simulation RA0545.
Processing the simulation RA0548.
Processing the simulation RA0550.
Processing the simulation RA0561.
Processing the simulation RA0563.
Processing the simulation RA0576.

The hazard map
../Testareas/Tjoflotviki/Run_02/aktsomhetskart.bt
has been produced. Please review it.
If you wish to create a map for the same area with different parameter
values, run NAKSIN again in the same data folder, but with a new run name.
Please send feedback and questions about the program to naksin@ngi.no.

P:\2015\04\20150457\NAKSIN>
```

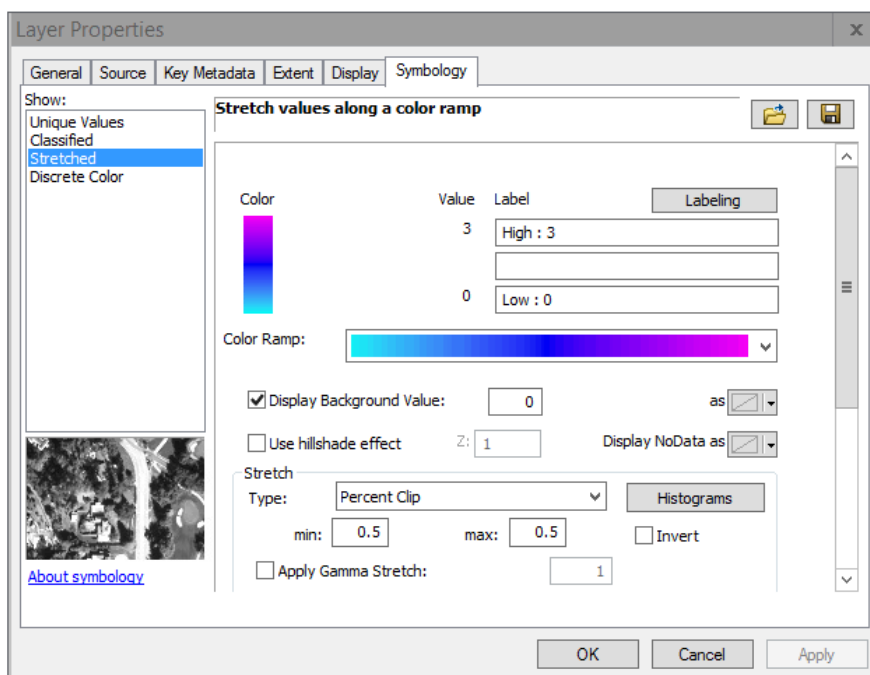
Figur 9. Aktsomhetskartet er ferdig og resultatfiler kan nå åpnes i GIS

## 5 Visualisering av data i ArcGIS

Aktsomhetskartet fra NAKSIN-kjøringen kan åpnes direkte i ArcMap (bruk Add Data eller bare dra det inn fra "Catalog").

For å få en bedre visualisering av laget, høyreklikk på kartet, velg Properties → Symbology.

1. Skru av bakgrunnsfargen ved å huke av i feltet "Display Background Value" (Figur 10).
2. Aktsomhetskartet vil vises i sort/hvitt når det legges inn. Bytt farge på kartet til en farge som er mer representativ for en aktsomhetsone.
3. Alternativt velg "Unique Values", og man vil få at ulike områder har verdier fra 1 til N. Dette viser hvor mange skredbaner fra ulike utløsningsområder som går inn i samme område. Dersom ett skred passerer vil verdien være 1. Marker verdi 0 og velg så "Remove". Dette er alle områdene hvor det ikke passerer skred.
4. Under fanen "Display" kan man sette hvor transparent kartet skal være. Ved å sette for eksempel 40–60 % transparent vil det være enklere å sammenligne resultatet med tidligere aktsomhetskart.

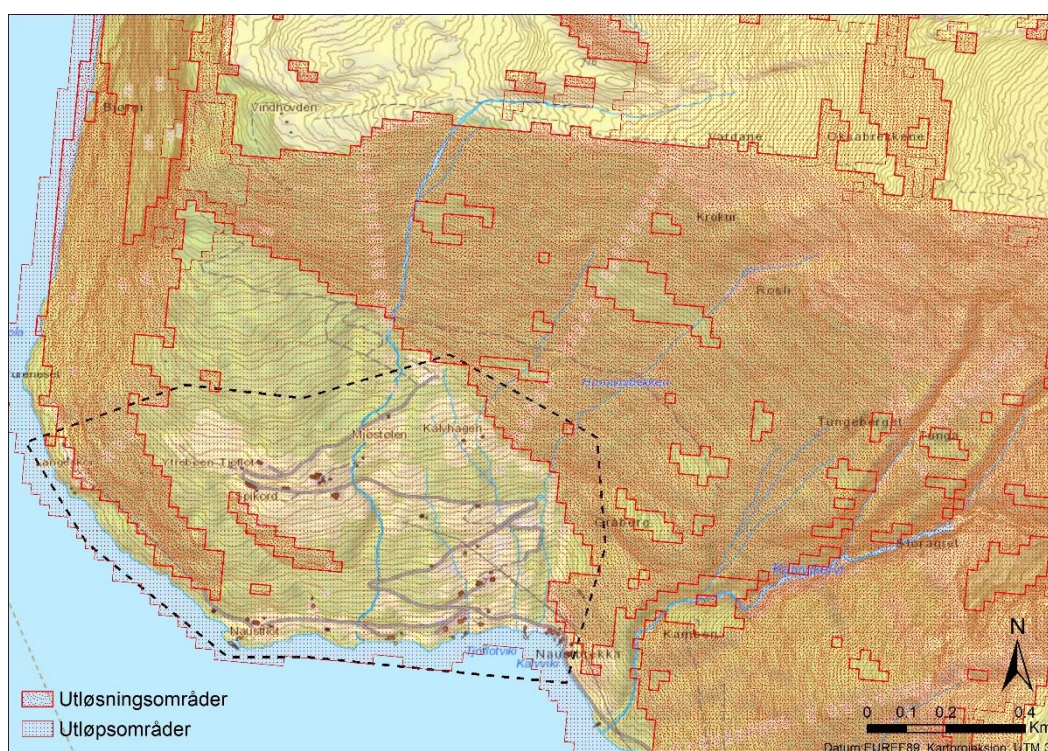


Figur 10. Huk av for "Display background value", og endre fargene.

5. Når det kommer til potensiell utløsningsområde 'allrel.asc' vil det være en fordel å endre fra sort/hvitt som det legges inn med, til å dele det inn i "Unique Values". Ved å gjøre dette får de ulike utløsningsområdene (1 til N) ulike farger. Hvor 1

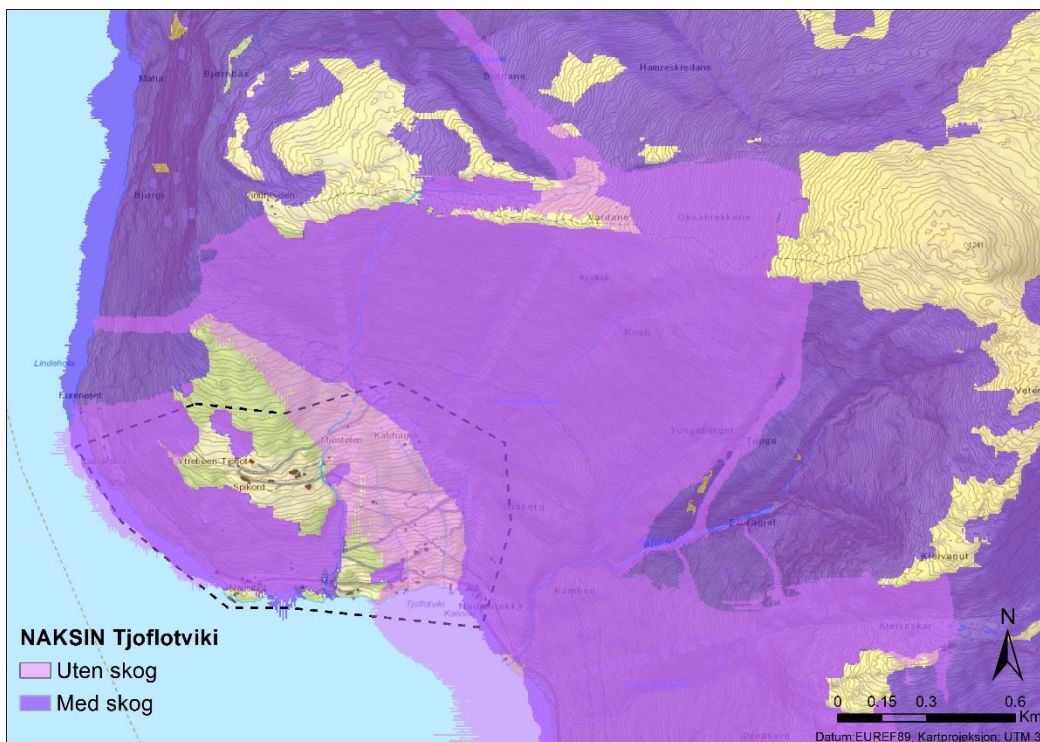
til N representerer mappene som ligger under simuleringsmappen (Run\_02). Hvor hver av disse mappene blir laget når det er tilstrekkelig utløsningssansynlighet. F.eks. kan mappen 07, 09 og 11 mangle grunnet ikke tilstrekkelig utløsningssansynlighet. Husk å markere verdi 0 og velg så "Remove".

Sammenlignet med det eksisterende aktsomhetskartet (Figur 11) er det tydelig at områdene som er utsatt for snøskred er mindre på det nye kartet (Figur 12). Der hele *Tjoflotviki* tidligere var kartlagt som utløpsområde, er det nå flere områder som er vurdert som trygge i NAKSIN. (I dette eksempelet er imidlertid utløsningssansynlighet ikke inkludert, og alle områder mellom 28° og 60° er definert som utløsningsområder.)



Figur 11: Eksisterende aktsomhetskart viser at hele Tjoflotviki er dekket av utløpsområder





Figur 12: Forslag til aktsomhetskart beregnet med NAKSIN kan gjøre at flere områder blir vurdert som trygge. Simuleringsresultatene er ikke absolutte

<b>Dokumentinformasjon/Document information</b>		
<b>Dokumenttittel/Document title</b> Brukermanual for NAKSIN versjon 2018-09-30		<b>Dokumentnr./Document no.</b> 20150457-07-TN
<b>Dokumenttype/Type of document</b> Teknisk notat / Technical note	<b>Oppdragsgiver/Client</b> Norges Vassdrags- og Energidirektorat	<b>Dato/Date</b> 2017-08-28
<b>Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/Proprietary rights to the document according to contract</b> NGI		<b>Rev.nr. &amp; dato/Rev.no. &amp; date</b> 0 /
<b>Distribusjon/Distribution</b> BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
<b>Emneord/Keywords</b> NAKSIN, aktsomhetskart snøskred		

<b>Stedfesting/Geographical information</b>	
<b>Land, fylke/Country</b>	<b>Havområde/Offshore area</b>
<b>Kommune/Municipality</b>	<b>Felt navn/Field name</b>
<b>Sted/Location</b>	<b>Sted/Location</b>
<b>Kartblad/Map</b>	<b>Felt, blokknr./Field, Block No.</b>
<b>UTM-koordinater/UTM-coordinates</b> Sone: Øst: Nord:	<b>Koordinater/Coordinates</b> Projeksjon, datum: Øst: Nord:

<b>Dokumentkontroll/Document control</b>					
<b>Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001</b>					
<b>Rev/Rev.</b>	<b>Revisjonsgrunnlag/Reason for revision</b>	<b>Egenkontroll av/Self review by:</b>	<b>Sidemanns-kontroll av/Colleague review by:</b>	<b>Uavhengig kontroll av/Independent review by:</b>	<b>Tverrfaglig kontroll av/Interdisciplinary review by:</b>
0	Originaldokument	2018-10-01 Dieter Issler	2018-10-01 Ulrik Domaas	Velg kontrolldato Ditt navn her	Velg kontrolldato Ditt navn her

<b>Dokument godkjent for utsendelse/Document approved for release</b>	<b>Dato/Date</b> 1. oktober 2018	<b>Prosjektleder/Project Manager</b> Ulrik Domaas
---	-------------------------------------	--

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 datterselskap i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

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 laboratory in Oslo, branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

[www.ngi.no](http://www.ngi.no)

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 tredjemand uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

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.

