

RAPPORT

Kilvik, Meløy kommune – Skredfarevurdering

UTREDNING AV SKREDFAREN I REGULERINGS-OMRÅDET

DOK.NR. 20170780-02-R REV.NR. 1/2018-08-03

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT 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 tredjemann 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.

Prosjekt

Prosjekttittel:	Kilvik, Meløy kommune – Skredfarevurdering
Dokumenttittel:	Utredning av skredfaren i reguleringsområdet
Dokumentnr.:	20170780-02-R
Dato:	2018-07-06
Rev.nr. / Rev.dato:	1 / 2018-08-03

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver:	Norconsult AS
Kontaktperson:	Soia Rahasindrainy
Kontraktreferanse:	Signert oppdragsbekreftelse 2017-12-05

for NGI

Prosjektleder:	Dieter Issler
Utarbeidet av:	Peter Gauer og Dieter Issler
Kontrollert av:	Ulrik Domaas

Sammendrag

Reguleringsområdet ved Kilvik i Meløy kommune ble undersøkt i henhold til skredfaren gjennom befaring, helikopterflyvning, numeriske snøskredsimuleringer med modellen SAMOS-AT og generell vurdering av terreng, klima og geomorfologiske forhold. Snøskred er den dimensjonerende skredfaren nesten i det hele reguleringsområdet, sørpeeller flomskred er en fare kun i små deler av området. Mens betydelige deler av reguleringsområdet er trygge for den fastere delen av snøskred, kan snøskyer med årlig sannsynlighet på 1/100 eller mindre nå hele området, uten nødvendigvis å gjøre skader. Ved liberal tolkning av Plan- og bygningsloven og tilhørende Tekniske forskrift TEK17, kan et begrenset areal i den nordlige og vestlige delen av reguleringsområdet anses som trygt for bygg i sikkerhetsklasse S1, og et større areal kan brukes til bygg i sikkerhetsklasse S1, S2 eller S3 dersom bygningene dimensjoneres for de tilsvarende lastene fra snøskyer. Ved den mest restriktive tolkningen av loven kan derimot reguleringsområdet ikke brukes til byggeformål. En omfattende sikring med støtteforbygninger nedenfor Svartisen vil være svært kostbar. En ledevoll i det sørvestlige hjørnet av reguleringsområdet vil kunne redusere trykket fra snøskyer, men det trengs en mer detaljert utredning for å avklare effekten på snøskyer og kostnadene. Hvor stort areal som kan sikres med vollen, avhenger kritisk av tolkning av lovverket.

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT	Hovedkontor Oslo
NGI.NO	PB. 3930 Ullevål Stadion
	0806 Oslo

Avd. Trondheim T 22 02 30 00 PB. 5687 Sluppen F 22 23 04 48 7485 Trondheim NGI@ngi.no

BANK KONTO 5096 05 01281 ORG.NR 958 254 318MVA FS 32989/EMS 612006

ISO 9001/14001 CERTIFIED BY BSI

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 4

Innhold

1	Innle	edning	5
	1.1	Oppdrag	5
	1.2	Metodikk	6
	1.3	Forbehold	7
2	Bak	grunn	8
	2.1	Historiske data	8
	2.2	Topografi, geologi og vegetasjon	9
	2.3	Klima	11
	2.4	Observasjoner fra befaring	14
	2.5	Numeriske simuleringer	16
3	Skre	dfarevurdering – enkelte skredtyper	21
	3.1	Snøskred	21
	3.2	Snøskyer (skredvind)	22
	3.3	Sørpeskred	24
	3.4	Flomskred og jordskred	25
	3.5	Steinsprang/steinskred	26
	3.6	Samlet skredfare	26
4	Konl	klusjon	27
	4.1	Avgrensning av faresoner	27
	4.2	Mulige sikringstiltak	31
5	Litte	ratur	34

Vedlegg

Vedlegg A	Krav til sikkerhet mot skred
Vedlegg B	Modellbeskrivelser
Vedlegg C	Faresonekart

Kontroll- og referanseside

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 5

1 Innledning

1.1 Oppdrag

Meløy kommune har satt i gang prosessen for regulering av et område ved Kilvik til næringsformål, se Figur 1 Denne prosessen krever utredning av skredfaren. Hele reguleringsområdet er markert som utsatt for snøskred i NVEs aktsomhetskart. I tillegg er deler av området vist som potensielt utsatt for steinsprang (ved den sørlige kanten av reguleringsområdet) og/eller jord- og flomskred. Store deler på den nordlige siden er merket av som flomutsatt, og hele reguleringsområdet er innenfor den marine grensen, slik at forekomst av kvikkleire ikke kan utelukkes.



Figur 1 Oversikt over området (tatt fra Teknisk notat 20170780-01-TN). Arealet som er tenkt regulert til næringsformål er vist med røde linjer (tilsendt NGI av Norconsult AS Bodø den 8. august 2017). Omtrentlig målestokk.

Med dette som utgangspunkt anmodet Norconsult AS i Bodø v/Soia Rahasindrainy NGI om en utredning av skredfaren på vegne av Meløy kommune. Siden snøskred fra Svartisen sør for reguleringsområdet representerer den største faren, ble det i et første trinn, med hjelp av numeriske modeller og uten befaring i terrenget, undersøkt om det finnes områder som kan være tilstrekkelig trygge for (den fastere delen av) snøskred. Dette er en forutsetning for at en nærmere utredning skal være meningsfull. I Teknisk notat

20170780-01-TN konkluderte NGI med at "Arealet som oppfyller kravene for sikkerhetsklasse S2 (eneboliger, fritidsboliger m.fl.) ift. snøskred er begrenset til en stripe mellom Storelva og Rv 17, fra det nordøstlige hjørnet av det vestre reguleringsområdet omtrent til midten av den nordlige delen av det østre reguleringsområdet." Det ble også henvist til at snøskya i store snøskred kan nå vesentlig lengre enn den fastere delen og derfor må utredes nærmere sammen med andre mulige skredtyper før en endelig konklusjon kan tas. Med ovennevnte som utgangspunkt, bestemte Meløy kommune seg for å gå videre med skredfareutredningen. På vegne av kommunen, gjennom oppdragsbekreftelse undertegnet 2017-12-05, gav Norconsult AS i Bodø NGI oppdrag om skredfarevurdering for reguleringsområdet. Dette arbeidet omfatter alle typer skred, inkludert utredning av snøskyskred. Detaljert kartlegging er basert på befaring, inspisering av potensielle utløsningsområder med hjelp av helikopter og mer avanserte og detaljerte beregninger enn i den første fasen. Resultatene presenteres i den foreliggende rapporten.

1.2 Metodikk

Fremgangsmåten i den foreliggende vurderingen tilsvarer vanlig metodikk:

- Terrenganalyse ut fra kart (topografisk, løsmasser, skog)
- **7** Feltarbeid
- **▼** Klimaanalyse
- **•** Beregninger
- Ekspertvurdering av alle momenter, utarbeidelse av kart
- Rapportering

Arbeidet i fase 1 var allerede basert på en terrenganalyse, som i store trekk er beskrevet i Teknisk notat 20170780-01-TN og utdypes i spesifikke hensyn i denne rapporten. Befaringen, samt helikopterflyving for å undersøke de mulige utløsningsområdene for snøskred, ble gjennomført 2018-03-22 av P. Gauer, NGI, og T. Skoglund som representant av Meløy kommune. Klimaanalyser for dette området ble utført av NGI tidligere og igjen med de nyeste metodene i Teknisk notat 20170780-01-TN. Vi støtter oss på de nevnte rapportene i det foreliggende arbeidet og gir et sammendrag av hovedpunktene.

Vurderingene i fase 1 var basert på numeriske simuleringer av den fastere delen av snøskred fra Svartisen med modellen RAMMS (Christen m.fl., 2010) for å se om det finnes et tilstrekkelig stort areal i reguleringsområdet som er trygt nok ift. denne faretypen. Til nå vurderes snøskyen fra snøskred kun kvalitativt fordi skredmodellene som brukes ikke kan simulere snøskya. I det foreliggende tilfellet er en slik fremgangsmåte imidlertid ikke tilstrekkelig fordi det er behov for å vite hvor stort trykket fra snøskya er i ulike deler av reguleringsområdet. Hvor dette trykket er lavt nok, kan Plan- og bygningslovens krav om sikkerhet mot skred eventuelt oppfylles ved å forsterke bygningene slik at de tåler skredtrykket. For å kunne tallfeste skredtrykket, ble den østerrikske modellen SA-MOS-AT brukt i den foreliggende vurderingen (Sampl og Granig, 2009; se også Vedlegg B). Den beregner bevegelsen av både den fastere delen til snøskredet og snøskya. For å sikre at de nye beregningene er konsistente med de tidligere, sammenlignet vi resultatene (utløpsdistanse, hastighet) mellom RAMMS og SAMOS-AT. I tillegg ble

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 7

snøskyskred fra Stordalsfjellet på nordsiden av reguleringsområdet også simulert fordi snøskya muligens kan nå dette området, selv om den fastere skredsnøen stopper utenfor. Ekspertvurderingen omfatter en kritisk gjennomgang av simuleringsresultatene, deriblant sammenligning med kjente snøskyhendelser under lignende forhold andre steder (spesielt i NGIs forsøksfelt Ryggfonn på Strynefjellet, i Romsdalen og i Alpene) og et estimat av sannsynligheten av de simulerte scenariene. Det sistnevnte er nødvendig for å bestemme faresoner som tilsvarer kravene til sikkerhet mot skred i Plan og bygningsloven og Byggeteknisk forskrift – TEK 17 (se Vedlegg A for beskrivelse av sikkerhets-klasser).

Vurderingen i denne rapporten skiller seg fra vanlige skredfarevurderinger i det at kart med trykkverdier for snøskyer med nominell årlig sannsynlighet på 1/100, 1/1000 og 1/5000 ble utarbeidet i tillegg til de vanlige faresonekart. Byggeteknisk forskrift - TEK 17 åpner for muligheten til å bygge i et område som oppfyller kravene til den nest lavere sikkerhetsklassen dersom bygget dimensjoneres på det påregnelige skredtrykket (og dersom dette trykket ikke overskrider ca. 50 kPa). For å kunne planlegge et bygg, er det derfor nødvendig å ha kunnskap om de påregnelige lastene fra snøskyer.

1.3 Forbehold

Vurderingen er gjort på bakgrunn av dagens terreng- og vegetasjonsforhold. Klimaendringer og menneskelige inngrep i terreng og vegetasjon i det tilgrensende området til planområdet, for eksempel etablering av skogsveg, snauhogst og skogplanting, kan endre forutsetningene for vurderingene. Dette gjelder særlig i områder brattere enn 30°.

Metodikken for å bestemme skredfaresoner omfatter til dels kvalitative vurderinger i tillegg til kvantitative beregningsmetoder og kan generelt ikke oppfattes som endelige, men kan bli endret i lys av nye opplysninger og kunnskap.

Hele reguleringsområdet ligger nedenfor den marine grensen, og forekomst av kvikkleire kan derfor ikke utelukkes. Ved planlegging av bygg bør det vurderes å utføre detaljerte grunnundersøkelser.

Rapporten vurderer heller ikke faren for fjellskred (steinskred med volum på mer enn $100\ 000\ m^3$) fordi dette ville kreve en omfattende geologisk og geoteknisk undersøkelse av et stort område. Slike skred – også hvis de skjer lenger ute i Holandsfjorden – kan forårsake flodbølger som da kunne true deler av reguleringsområdet. Slik fare utredes imidlertid ikke i skredfarerapporter på reguleringsplannivå, men på fylkes- eller regionalt nivå. Det er ikke kjent for NGI at det finnes såpass store ustabile fjellsider i nærheten at flodbølger kan utgjøre en fare for reguleringsområdet.

2 Bakgrunn

2.1 Historiske data

NGI har tidligere utarbeidet følgende rapporter om skredfaren i regionen, som ble benyttet i dette arbeidet, både ift. historiske skred og klima:

- Skredundersøkelser for Kystriksveien, parsell Glomfjord–Bjærangsdalen– Nordfjord, Rapport 78435-1, 1978
- Rv 17 Kilvik–Sneland. Snøskredsikring i Rondalene. Skredoverbygg med ledevoller/murer for alternative veitraseer. Rapport 83434-1, 1984
- Rv 17 Kilvik–Sneland. Østre (Indre) Rondalen. Utretting av skredløp. Rapport 83434-2, 1984.
- Rv 17 Kilvik–Sneland, Vestre (Ytre) Rondalen. Kontroll av ledevoll. Rapport 83434-3, 1985
- Transformatorstasjon Holandsfjord (Svartisen). Vurdering av skredfare. Teknisk notat 20130340-01-TN, 2013
- Vurdering av skredfare ved høyspentmaster. Teknisk notat 20140192-01-TN, 2014
- Vurdering av skredfare ved kraftlinje trasé. Teknisk notat 20140192-02-TN, 2014
- Vurdering av skredfare ved høyspentmaster Storvik. Teknisk notat 20140192-03-TN, 2014

NVEs skredatlas (<u>https://atlas.nve.no</u>) viser flere snøskredhendelser i Ytter- og Innerrondalen, dvs. ca. 1 km vest for reguleringsområdet, hovedsakelig i årene 2011 og 2013, men det ble også noen hendelser registrert i 2002, 2010 og 2016. I desember 2013 og desember 2016 løsnet to løsmasseskred i nærheten av Fv 17 (tidligere Rv 17) ca. 250 m nordvest for det nordvestlige hjørnet av reguleringsområdet og skadet veien ifølge registreringen fra SVV. I selve reguleringsområdet er ingen skredhendelser registrert.

Under befaringen ble Walter Kilvik kontaktet, som vokste opp på 1940-tallet på en av gårdene nord for reguleringsområdet ved foten av Stordalsfjellet og har bodd på Storjord lenger oppe i dalen i lang tid. Han opplyste om hyppige skredhendelser i Rondalene, som førte til nestenulykker i hans ungdomstid. Derimot har han ikke minner om skred med snøsky fra Svartisen.

I tidlig april 2013 utløste et isfall fra Svartisen et snøskred som fraktet til dels store isblokker (opptil 2 m³) og stoppet rett ved det sørøstlige hjørnet av reguleringsområdet. Nærmere opplysninger finnes i NGI Teknisk notat 20130340-01-TN. Denne er den eneste hendelsen fra Svartisen vi har kunnskap om, men det må antas at lignende skred har forekommet av og til, uten å bli registrert.

2.2 Topografi, geologi og vegetasjon

Terrengforholdene er vurdert utfra visuelle inntrykk under befaringen og helikopterflyvning samt foto, tilgjengelige kart, ortofoto og digital terrengmodell med oppløsning på 1 m (fra LiDAR-data) i de nedre delene av skredløpene og på 10 m ellers. Følgende terrengformasjoner har spesiell betydning for *snøskredfaren*:

- Ifølge helningskartet (Figur 2) er store områder nedenfor Svartisen og på den sør- og sørøstvendte siden av Stordalsfjellet potensielle utløsningsområder for snøskred som muligens kan nå reguleringsområdet.
- Nord for Storelva finnes det en 5–10 m høy rygg på kote 175 m i øst og 125 m o.h. i vest (vest for Botnhågen), som virker som en ledevoll for skred fra Stordalsfjellet. På sørsiden er denne ryggen imidlertid brattere enn 30°.
- På sørsiden ovenfor transformatorstasjonen på kote 600 m o.h. finnes det en fjellknaus som fortsetter nedover som en skulder. Denne skulderen gir transformatorstasjonen en viss beskyttelse mot snøskred. Knapt 150 m øst for denne knausen begynner en annen skulder som trekker seg fra 550 m o.h. til ca. 175 m o.h. Ledevollen mellom kote 100 m o.h. og kote 175 m o.h. er beregnet til å lede middels store skred fra skålen mellom de nevnte ryggene og den vestligste delen av store skred fra utløsningsområdet nedenfor Svartisen mot NØ.



Figur 2 Helningskart over reguleringsområdet samt potensielle utløsningsområder for snøskred (SF: Stordalsfjellet, SV: Svartisen). Steinsprang/-skred er mest sannsynlig ved helning over 45°

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 10

I undersøkelsesområdet finnes det kun et begrenset antall potensielle kildeområder for *steinsprang eller steinskred* mot reguleringsområdet, som oftest er brattere enn ca. 45° (se Figur 2).

I forhold til *flomskred* finnes det ikke store vifter som indikasjon på høy flomskredaktivitet. Den største viften i området finnes nord for den vestlige delen av Kilvikveien og er dannet av et bekkeløp som drenerer den sørsørøstlige skråningen av Stordalsfjellet; den ovennevnte terrengryggen leder bekken mot sørvest på en høyde på rundt 150 m o.h. Viften er rundt 50 m bred, mindre enn 20 m lang og maksimalt 2 m høy. Der Kilvikveien munner i Fv 17, føres bekken i rør under veien og til fjorden.

I det sørvestlige hjørnet av reguleringsområdet finnes det en viftelignende terrengformasjon med et volum i størrelsesorden 1 million m³. Den er imidlertid kunstig og består hovedsakelig av stein fra vanntunnellene i regionen.

Løsmasseskred har forekommet i nærheten av reguleringsområdet i de siste årene, se avsnitt 2.1. I reguleringsområdet finnes det ikke åpenbare spor etter løsmasseskred, men vi må ta forbehold om dette punktet fordi en nærmere undersøkelse ikke var mulig under befaringen med 0,5–1 m snø på bakken. Kart som er basert på høyoppløsende LiDARdata, viser betydelig terrengruhet på lengdeskala 2–10 m fra 200 m o.h. og oppover, som kunne tyde på terreng i bevegelse. Utfra flyfoto fra ulike kilder som ble tatt på ulike tidspunkt, er det imidlertid sannsynlig at denne ruheten skyldes først og fremst lagdelingen i berget, som enten kommer til overflate eller er kun dekket av et tynt lag med jordsmonn.

Flom: Som nevnt i 20170780-01-TN, er terskelen lav for at Storelva kan flomme over og finne seg et nytt elveleie ved punktene UTM 33N (452390, 7401940) og (452360, 7401920). På grunn av oppdemmingen av alt vann fra fjellene og isbreene er imidlertid vannføringen i Storelva regulert på lavt nivå og faren for flom sterkt redusert.

Løsmassekartet over området (Figur 3) viser at dalbunnen med reguleringsområdet består av bresjøavsetninger. Den nederste delen av skråningen mot Svartisen er skredmateriale, fulgt av bart fjell eller tynt jordsmonndekke. Øst for dalbunnen har Storelva og elvene fra Svartisen kuttet seg gjennom avsetningene fra den tidligere breelva. Skråningen nord for reguleringsområdet består derimot av forvitringsmateriale til en høyde på rundt 400 m o.h., som faller sammen med tregrensen. Høyere oppe finnes det bart fjell eller et tynt jordmonnslag.

Skoggrensen er generelt på rundt 400 m o.h., stedvis litt høyere eller litt lavere. Skogen består stort sett av løvtrær, men noen steder nedenfor ca. 200 m o.h. finnes det (plantet) granskog. De fleste potensielle utløsningsområdene for skred ligger langt ovenfor skoggrensen. Skogen kan ha en begrenset bremseeffekt på snøskred eller stein, men har ingen betydning for utløsningssannsynligheten av skred. To unntak er den sørlige skråningen av Botnhågen nord for Myrvoll og deler av foten av skråningen nedenfor Svartisen.



Figur 3 Løsmassekart over reguleringsområdet og omgivelsene. Kopiert fra NGUs nettside (<u>http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/</u>)

2.3 Klima

Med data fra SeNorge, som er interpolert fra alle tilgjengelige norske værstasjonene til et grid på 1 km², kan man få estimater om klimaforholdene ved Svartisen (1074 m o.h.) og på Frokosttinden/Stordalsfjellet (768 m o.h.) i umiddelbar nærhet til de mest relevante utløsningsområdene for snøskred. Analysen som ble gjennomført i fase 1 av prosjektet er fortsatt relevant. Vi gjentar hovedpunktene her og viser de relevante klimadiagrammene i Figur 4 og Figur 5, som er tatt fra Teknisk notat 20170780-01-TN.

2.3.1 Nedbør og temperatur

Ved klimastasjonen Svartisen er gjennomsnittlig årsnedbør på rundt 1700 mm, som kan anses som en middels stor verdi på denne høyden i fjellet. Ifølge Teknisk notat 20170192-01-TN er nedbøren på Engabreen derimot rundt dobbelt så høy. Det er mulig at nedbørmengden varierer mye på kort distanse i dette området, men det er mest plausibelt å bruke verdiene fra Svartisen stasjon som utgangspunkt for utløsningsområder både ved kanten av Svartisen og ved Stordalsfjellet.

Ifølge Figur 4a er nedbørmengdene i vintermånedene klart høyere enn om sommeren. Temperaturmålingene (Figur 4 a, c) tyder på at rundt 60 % av årsnedbøren faller som snø. Vi har ikke temperaturmålinger i dalbunnen, men ved nøytral stabilitet i atmosfæren man kan anslå at denne temperaturen er $5-8^{\circ}$ C høyere enn ved værstasjonen Svartisen.

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 12

Dette betyr at (ny-)snøen kan være tørr ned til dalbunnen i vintermånedene desember til februar, selv om den ofte vil være fuktig nedenfor skoggrensen.



Returperiode (år) Svartisen (UTM33: X454009,Y7400199,1074 moh). Dataperiode: 1958-2015. a) Månedsnedbør og -lutitemperatur. b) Returverdier (gumbelfordeling) for årlig maks snøhøyde. Daglig minimum, maksimum og gjennomsnittilg luttemperatur (c) og snøhøyde (d). Tidserier av årsnedbør (e) og årlig maks snøhøyde (f). Returverdier (peak over threshold) for 1- og 3-døgns nedbør (g) og nysnøtilvekst (h).

Figur 4 Interpolert klimadata for Svartisen (1074 m o.h.) i perioden 1958–2015, utarbeidet på grunnlag av data på SeNorge.no. (a) Gjennomsnittlig månedsnedbør og lufttemperatur. (b) Maksimal snøhøyde i avhengighet av returperiode. (c) og (d) Daglig maksimal/gjennomsnittlig/minimal lufttemperatur og snøhøyde. (e) og (f) Tidsserier av årsnedbør og maksimal snøhøyde. (g) og (h) Ekstremverdistatistikk for henholdsvis 1- og 3-døgns nedbør og 1- og 3-døgns nysnøtilvekst (vannekvivalent)

2.3.2 Snøhøyde

I utløsningsområdene på 1000 m o.h. eller høyere oppnås den maksimale snøhøyden oftest i april eller mai, med en gjennomsnittlig verdi på 2,5–3 m på Frokosttinden og 2 m på Stordalsfjellet. Som Figur 5.h viser, må det regnes med et snøfall på 1 m innen ett døgn en gang per 50 år på Svartisen, men kun en gang per 250 år på Stordalsfjellet. I

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 13

løpet av en tredøgnsperiode skjer dette i gjennomsnitt henholdsvis hvert annet år eller en gang per 5-10 år. Det maksimale ett og tre døgns snøfallet gjennom observasjonsperioden var på henholdsvis ca. 1,2 og 1,8 m på Svartisen og 0,9 og 1,3 m på Stordalsfjellet. Forskjellene mellom stasjonene er som forventet pga. høydedifferansen på 300 m.



Figur 5 Interpolert klimadata for Stordalsfjellet (768 m o.h.) i perioden 1958–2015, utarbeidet på grunnlag av data fa SeNorge.no. (a) Gjennomsnittlig månedsnedbør og lufttemperatur. (b) Maksimal snøhøyde i avhengighet av returperiode. (c) og (d) Daglig maksimal/gjennomsnittlig/minimal lufttemperatur og snøhøyde. (e) og (f) Tidsserier av årsnedbør og maksimal snøhøyde. (g) og (h) Ekstremverdistatistikk for henholdsvis 1- og 3-døgns nedbør og 1- og 3-døgns nysnøtilvekst (vannekvivalent)

De målte gjennomsnittlige maksimale snøhøydene er i godt samsvar med de målte nedbørsmengdene og temperaturene hvis man antar en gjennomsnittlig tetthet på ca. 300 kg/m³. Sammenligning av Figur 5g og h bekrefter at nysnø på fjellet ofte har en tetthet på rundt 100 kg/m³.



Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 14

Kort tid før befaringen 2018-03-22 hadde ny snø falt i dalbunnen. Snøhøyden varierte mellom 0,5 m og 1 m, og det øverste laget ble litt fuktig i løpet av dagen. Med en gjennomsnittlig lufttemperatur på rundt 0°C i dalbunnen gjennom januar/februar vil dette være en hyppig situasjon i normale vintre. I sjeldne situasjoner, der man kan forvente store snøskred, må man imidlertid anta at snøen kan være tørr og kald ned til fjorden.

2.3.3 Vind

Hovedvindretningen ved snøfall er fra nordvest. Dette har betydning for sannsynligheten for utløsning av snøskred i de ulike sidene av Bjørnskartinden, Motinden og Stordalsfjellet: Store snømengder blir ofte fraktet av vinden til de sørøstvendte skråningene i skålformede bratte områder, mens skuldre eller sørvestvendte skråninger i skålene har tendens til å bli tømt for snø. Observasjoner av nylige skred under befaringen bekreftet dette (avsnitt 2.4).

En annen værsituasjon er av betydning for den nordvendte skråningen nedenfor Svartisen: Etter en snøfallepisode kan enten sterk eller middelssterk, men langvarig vind fra sektor sørøst til sørvest frakte store snømengder fra Svartisen over brekanten til de potensielle utløsningsområdene sør for reguleringsområdet. Slike situasjoner er mindre hyppige enn snøfall under kraftig nordvestlig vind, men heller ikke sjeldne. Regionen er kjent for sterke fallvinder fra isbreene ned til dalene.

2.4 Observasjoner fra befaring

På grunn av snøforholdene var befaringen stort sett begrenset til brøytede veier (Fv 17, Kilvikveien, veier på sørsiden av Storelva mot Hellarneset og opp til Storjord). Helikopterflyvningen fulgte fjellsidene rundt dalen, slik at alle potensielle utløsningsområdene kunne ses og fotograferes fra ulike retninger.

De mest relevante observasjonene var følgende:

- To middelsstore, fuktige snøskred med begrenset hastighet hadde gått kort tid (en til to dager?) før befaringen i både Ytre og Indre Rondalen. Begge to stoppet på overbyggene over Fv 17. Det fantes også et mindre snøskred som hadde gått litt etterpå i den nordvestlige siden av Stordalen, omtrent fra 850 m o.h. til 700 m o.h.
- Et lite skred med en fallhøyde på 50–100 m ble utløst nedenfor en mindre skrent mellom Bjørnskaret og Stordalen og stoppet noe ovenfor tregrensen.
- ➡ Et middelsstort skred hadde gått tidligere i den østlige renna på østsiden av Stordalsfjellet og nådd til kote 200–250 m o.h. Slike skred, selv om de blir store, vil imidlertid ikke nå reguleringsområdet.
- Et lite skred, tilsynelatende med beskjeden flytehøyde, hadde løsnet i den midterste delen av skråningen nedenfor Svartisen.
- Så vidt det kunne gjettes uten målinger, er snøfordelingen i fjellsidene sterkt preget av nordvestvinden som frakter snøen i fjellsidene som er kjent som de



hyppigste utløsningsområdene for snøskred. Nedenfor Svartisen fantes det flere skråninger med relativt lite snø (se f.eks. Figur 6).

- Kanten av Svartisen er meget oppsprukket, slik at nedfall av istårn med varierende høyde opptil 35 m må være en vanlig hendelse, selv om vi ikke kan tallfeste sannsynligheten uten nærmere undersøkelser eller opplysninger. Når et istårn treffer snødekket nedenfor, avhenger det av snødekkets daværende oppbygging om bruddet kan forplante seg og et stort skred utløses eller om snøen kun rives med lokalt.
- Nedenfor skrenter der man kan forvente steinsprang, fantes til dels store blokker, som hadde imidlertid stoppet nokså høyt oppe i skråningen.
- Vegetasjonsmønstrene tyder på at snøskred når kote 350 m o.h. relativt ofte i den vestre delen av skråningen fra Stordalsfjellet rett øst for Stordalen og ovenfor Kilvik. Langs bekken som drenerer denne fjellsiden ser skred ut til å stoppe ofte rundt 200 m o.h., litt ovenfor Botnhågen.
- I skråningen sør for reguleringsområdet ses det åpninger eller variasjoner i skogstettheten som kan tyde på at den fastere delen av snøskred når ned til 100 m o.h. relativt ofte og at kanskje et skred har nådd dalbunnen for flere tiår siden (Figur 7).



Figur 6 Kanten av Svartisen. Tykkelsen på isen er opptil 35 m

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 16



Figur 7 Vegetasjonen i den nordvendte skråningen sør for reguleringsområdet kan tyde på at skred ofte når utflatningen i midten av bildet (gule piler). Ett sted (markert med rød pil) har skred muligens nådd dalbunnen for noen tiår siden

Disse observasjonene bekrefter at de sørøstvendte sidene av Stordalen og Bjørnskaret har høyest utløsningssannsynlighet blant skredløpene i dette området, i samsvar med opplysningene fra W. Kilvik og NVEs skreddatabase.

2.5 Numeriske simuleringer

Ut fra simuleringene kjørt i fase 1 og observasjonene fra befaringen er det klart at snøskred er den dimensjonerende skredfaren nesten i hele reguleringsområdet og den eneste i store deler av området. Det er derfor ikke behov for simuleringer av andre skredtyper. De tidligere simuleringene beskrevet i 20170780-01-TN gjaldt kun den fastere delen av snøskred fordi modellen RAMMS::AVALANCHE (Christen m.fl., 2010) ikke simulerer snøskya (skredvinden). For å anslå effekten av snøskyer i reguleringsområdet, brukte vi SAMOS-AT (Sampl og Granig, 2009; se også Vedlegg B) i dette arbeidet for å simulere både den fastere delen og snøskya.

De tidligere simuleringene med RAMMS::AVALANCHE i 20170780-01-TN gav et plausibelt bilde av hvor langt den fastere delen av snøskred vil kunne nå – RAMMS har blitt brukt så ofte i ulike regioner av Norge at vi har bred erfaring med parametervalg og interpretasjon av resultatene. Ved å sammenligne utløpsdistansene fra RAMMS og SA-MOS-AT får man en kontroll på om parameterne anbefalt av utviklerne til SAMOS-AT passer de norske forholdene. For alle skredløp som ble undersøkt i fase 1, kunne det

verifiseres at SAMOS-AT og RAMMS gir konsistente resultater godt innenfor den fortsatt betydelige usikkerheten når ekstremhendelser med nominell returperiode opptil 5000 år skal beregnes med få eller ingen observasjoner å sammenligne med.

Kartet i Figur 2 viser utløsningsområdene SF2 (Stordalsfjellet 2), Svartisen 1 (SV1) og Svartisen 5 (SV5) som ble brukt i de ulike simuleringene. Disse ble valgt fordi de tidligere simuleringene med RAMMS viste at disse utløsningsområdene er avgjørende for skredfaren i reguleringsområdet: Skred fra andre utløsningsområder på Stordalsfjellet går ned øst eller vest for reguleringsområdet. Vollen ovenfor transformatorstasjonen i stor grad leder skred fra SV3 eller SV4 mot øst og snøskyer som krysser vollen taper sin ødeleggende kraft mens de strømmer over stasjonens areal. Skred fra SV2 deles i to armer av en bred skulder på rundt 600 m o.h., slik at den vestre delen munner ut på samme sted som den østlige siden av skred fra SV1 og den østlige armen treffer på vollen. SF1, SV1 og SV5 ble delt opp i et øvre og nedre område fordi og kun den øverste delen (kjennetegnet *a*) brukt for snøskred med årlig sannsynlighet på 1/100 fordi disse ofte ikke omfatter det størst mulige området. For skred med årlig sannsynlighet på 1/1000 eller 1/5000 ble derimot begge deler (*a*+*b*) slått sammen til et større område.

Tabell 1 gir en oversikt over utløsningsområder og verdier av bruddhøyde (D10 for 1,0 m, D15 for 1,5 m), eroderbar snøhøyde (E10 og E25 for henholdsvis 10 cm og 25 cm) som ble brukt i de ulike simuleringene og hvilken årlig sannsynlighet vi tilordner denne kombinasjonen av parametere. Den gjennomsnittlige kornstørrelsen i snøskya er en annen parameter som brukeren kan sette; vi anser standardverdien på 0,8 mm som mest realistisk for skred med årlig sannsynlighet på 1/1000 og 1/5000 og kjørte alle simuleringene med denne verdien.

Ut fra simuleringer for årlig sannsynlighet på 1/1000 fra Stordalsfjellet ble det klart at snøskyer med årlig sannsynlighet på 1/100 fra denne siden ikke vil føre til en faresone for bygg i sikkerhetsklasse S1; derfor ble den tilsvarende simuleringen SF2_D10_E10 ikke gjennomført.

Et overraskende resultat av simuleringene var det at ulike hastigheter i de to simuleringene førte til ulike skredbaner, slik at maksimaltrykket var høyere i 1000-års skred enn i 5000-års skred i flere områder. For å unngå paradoksale dimensjoneringskrav ble trykkonturlinjene i Figur 16 modifisert slik at det dimensjonerende trykket for bygg i sikkerhetsklasse S2 alle steder er lavere enn for bygg i sikkerhetsklasse S3.

To eksempler på vertikale profiler av maksimaltrykket i et punkt vises i Figur 8. Disse profilene må imidlertid brukes med forsikt fordi SAMOS-AT ikke tar hensyn til nyere målinger fra Sveits (Schaer og Issler, 2001; Sovilla m.fl., 2015; Köhler m.fl., 2018) som gir evidens for en mer kompleks struktur av skredfronten og overgangen mellom det fastere laget og snøskya. Vi anbefaler å bruke verdiene vist i det nederste laget (0–1 m over bakken) opp til en høyde på 5 m over bakken for å ta hensyn både til snødekket, som gjør at snøskya strømmer 1–1,5 m høyere oppe, og tettere snøpakker som virvles opp i frontdelen av skredet.





Figur 8 Vertikale profiler av maksimaltrykket ved to ulike punkt i reguleringsområdet

SAMOS-AT beregner trykket i snøskya på ulike høyder over bakken. I Figur 8 vises vertikale profiler av maksimaltrykket gjennom hele simuleringen på ulike høyder over bakken for to representative punkter. Denne informasjonen kan benyttes til å dimensjonere bygg. Det er imidlertid viktig å ta høyde for begrensningene til disse simuleringene. I tillegg til usikkerhetene i skredenes startbetingelser og friksjonsparametere kommer usikkerheten pga. den forenklete modelleringen av de komplekse prosessene som foregår i snøskyer og i det øverste laget av den fastere delen, der snøskya dannes. Siden disse prosessene er kun delvis kjent og målt, er det vanskelig å verifisere modellene i detalj. Vi mener likevel at resultatene fra SAMOS-AT er plausible og gir et godt bilde av fordelingen av snøskytrykket i terrenget. Det er verdt å merke seg følgende:

Tabell 1 Oversikt over modellkjøringer med SAMOS-AT. P er den nominelle årlige sannsynligheten av en skredhendelse med de angitte parameterne. Den eroderbare snøhøyden begrenser den maksimale mengden nysnø som skredet kan plukke opp underveis. Kornstørrelsen kontrollerer hvor raskt snøkorn faller ut av snøskya.

Skredløp	Modellkjøring	<i>P</i> (år⁻¹)	Utløsnings- område	Brudd- høyde (m)	Eroderbar snøhøyde (cm)	Kornstør- relse (μm)
Stordalsfjellet 2	SF2_D10_E25	1/1000	SF2a + SF2b	1,0	25	
(SF2)	SF2_D15_E25	1/5000	SF2a + SF2b	1,5	25	
Svartisen 1	SV1_D10_E10	1/200	SV1a	1,0	10	
(SV1)	SV1_D10_E25	1/1000	SV1a + SV1b	1,0	25	800
	SV1_D15_E25	1/5000	SV1a + SV1b	1,5	25	800
Svartisen 5	SV5_D10_E10	1/200	SV5a	1,0	10	
(SV5)	SV5_D10_E25	1/1000	SV5a + SV5b	1,0	25	
	SV5_D15_E25	1/5000	SV5a + SV5b	1,5	25	

■ Trykkverdiene som SAMOS-AT beregner har to komponenter, nemlig (i) trykket pga. strømningshastigheten midlet over et tidsrom på 1–2 s og (ii) middelverdien av trykket pga. turbulens (også midlet over et tidsrom på 1–2 s). Det øyeblikkelige trykket i et punkt vil fluktuere rundt summen av disse to verdiene



på en tidsskala som er mindre enn 1-2 s. Dette har liten betydning for massive deler av en bygning, som vegger og massive dører, men kan være viktig for vinduer eller små strukturer med begrenset styrke (f.eks. skorstein eller fremstikkende takrenner).

- Avhengig av distansen i skredbanen og skredets størrelse, fraktes det en del store partikler (i noen tilfeller opptil ca. 0,5 m / 50 kg) i den nederste delen av snøskya. Når de treffer på et bygg, opptrer store lokale trykkspisser (opptil ca. 1000 kPa over få millisekunder) i små områder (Schaerer og Salway, 1980; Schaer og Issler, 2001). Betongvegger kan vanligvis uten problem dimensjoneres til å tåle slike punktlaster, men vinduer vil knuses.
- Gridcellene for beregningen av snøskya er flere meter høye selv ved bakken, slik at modellen kun gir en vertikal middelverdi for dette sjiktet. Trykket i dette laget trolig varierer sterkt med høyden. Trykkprofilene i Figur 8 bør derfor brukes som en indikasjon, men ikke som den absolutte sannheten. Trykket avtar raskt med høyden over bakken, og allerede 5 m over bakken er det omtrent likt trykket som må forventes i en sterk storm. I lyset av nye eksperimentelle resultater (Sovilla m.fl., 2015) vil vi imidlertid anbefale å bruke den største verdien (0–1 m over bakken) opptil 5 m over bakken for å ta høyde for (i) 1–1,5 m snø på bakken og (ii) intermitterende oppvirvling av soner med høyere tetthet.



Figur 9 Kombinert maksimaltrykk (i kPa) fra snøskred (fastere skreddel og snøsky) med nominell årlig sannsynlighet på rundt 1/200 fra Stordalsfjellet og Svartisen. Trykkskalaen til høyre gjelder arealet innenfor den røde rammen. Se teksten for nærmere forklaring.



Figur 10 Kombinert maksimaltrykk (i kPa) fra snøskred (fastere skreddel og snøsky) med nominell årlig sannsynlighet på 1/1000 (øverst) og 1/5000 (nederst) fra Stordalsfjellet og Svartisen

NGI

Figur 9 er et kart over det maksimale skredtrykket fra skred med årlig utløsningssannsynlighet på 1/300– 1/200. Det kombinerer resultater av to simuleringer med henholdsvis det øverste vestligste (SV1a) og øverste østligste (SV5a) utløsningsområdet. Trykkverdien tilsvarer det største av trykkene i den fastere delen og i snøskya, og i punkt som nås av snøskyene til begge skredløpene er det høyeste trykket valgt. Figur 10 er tilsvarende kart lagt ved å kombinere tre simuleringer som tilsvarer en årlig sannsynlighet på henholdsvis 1/1000 og 1/5000. Her ble utløsningsområdene SV1a+b, SV5a+b og SF1a+b brukt. De resulterende trykkartene tilsvarer imidlertid ikke direkte skredtrykk med årlig sannsynlighet på 1/5000 over reguleringsområdet fordi en stor del av området kan nås av snøskyer fra ulike skredløp. Dette gjør at den *kombinerte* sannsynligheten for denne trykkverdien er noe høyere enn 1/5000, og tilsvarende at trykket med *kombinert* årlig sannsynlighet på 1/5000 er høyere enn dette kartet viser.

3 Skredfarevurdering – enkelte skredtyper

3.1 Snøskred

Den fastere delen av snøskred fra Stordalsfjellet vil ifølge simuleringene ikke nå reguleringsområdet, men i tilfelle av skred med årlig sannsynlighet på 1/5000 må man anta at de stopper kun ved det nordøstlige hjørnet av reguleringsområdet og setter av store snømasser i Stordalselva, slik at det kunne være fare for demning av elva og en brå tapping av oppdemmet vann dersom dammen brister.

Beregningene tyder på at den fastere delen av snøskred med årlig sannsynlighet på 1/100 fra Svartisens side vil knapt nå reguleringsområdet, både omtrent i midten av det vestlige reguleringsdelområdet og i det sørøstlige hjørnet av det østlige reguleringsdelområdet. Dette stemmer godt overens med det observerte skredet i mars 2013 og støtter tolkningen av åpninger og tynnere partier i skogen som muligens forårsaket av et sjeldent snøskred for flere tiår siden.

Derimot må man forvente at den fastere delen av snøskred fra utløsningsområde SV1a+b med årlig sannsynlighet på 1/1000 når ca. 150 m inn i reguleringsområdet med en bredde på drøye 250 m. Tilsvarende snøskred fra S5a+b vil kunne nå største delen av den sørøstlige "tilhengselen" til reguleringsområdet på et areal på omtrent 100×200 m².

Enda sjeldnere skred med årlig sannsynlighet på 1/5000 fra SV1a+b anslås å oppnå en bredde på rundt 400 m og å stoppe drøye 200 m inn i reguleringsområdet. Den fastere delen av skred fra SV5a+b vil kunne dekke den hele østlige delen av det østlige reguleringsdelområdet, med en overflate på rundt $150 \times 350 \text{ m}^2$.

Arealet truet av den fastere delen av snøskred med årlig sannsynlighet på 1/100 tilsvarer det brune området i Figur 15 (øverst) og er en del av områdene med rød / oransje fylling for skred med årlig sannsynlighet på 1/1000 (Figur 15 nederst) og 1/5000 (Figur 16).

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 22

3.2 Snøskyer (skredvind)

Ifølge simuleringene (Figur 9 og Figur 10) vil selv snøskyer med en årlig sannsynlighet på 1/300–1/200 nå hele reguleringsområdet med maksimalt trykk større enn 1 kPa, unntatt et lite areal ved Hellarneset. Ved ekstrapolering fra nominell årlig sannsynlighet på 1/300–1/200 til 1/100 og sammenligning med observasjonene utvides arealet der trykket er mindre enn 3 kPa, som vist i Figur 11.

Snøskyer med årlig sannsynlighet på 1/1000 oppnår et maksimalt trykk på minst 3 kPa over hele reguleringsområdet (Figur 12, øverste kart). De fleste stedene forventes maksimalt trykk på mer enn 6 kPa. De minst utsatte områdene er langs den vestlige og nordlige grensen av det vestlige reguleringsdelområdet.

Ved årlig sannsynlighet på 1/5000, som er relevant for bygg i sikkerhetsklasse S3, må det regnes med maksimalt trykk på 10 kPa eller mer i største del av reguleringsområdet (Figur 12, nederste kart).



Figur 11 Påregnelige maksimaltrykk (i kPa) nær bakken fra **snøskyer** med årlig sannsynlighet på omtrent 1/300–1/200

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 23



Figur 12 Påregnelige maksimaltrykk (i kPa) nær bakken fra **snøskyer** med årlig sannsynlighet på 1/1000 (øverst) og 1/5000 (nederst)

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 24

Ut fra rapportforfatternes erfaringer fra eksperimenter i forsøksfeltet Vallée de la Sionne i Sveits, må vi anse disse simuleringsresultatene som realistiske: Naturlig og kunstig utløste skred i vinter 1999 oppnådde maksimalt trykk på mellom 10 og 70 kPa tre ganger ved observasjonsbunkeren, som ligger ca. 50 m høydemeter ovenfor dalbunnen i den motsatte skråningen. Skredbanen i Vallée de la Sionne er noe større enn skredbanene nedenfor Svartisen, men i gjengjeld trenger skredene fra Svartisen ikke å klatre opp motbakken.

En helt ny statistisk undersøkelse av ca. 100 tørre snøskred med betydelig snøsky fra Østerrike, Sveits og Norge (Gauer, 2018) gjør det mulig å anslå den betingede sannsynligheten for at ei snøsky i en skredbane med gjennomsnittlig helningsvinkel β når et punkt med utløpsvinkel α , under forutsetning av at et skred utløses. I tilfelle av skred fra utløsningsområde SV1a eller SV1a+b vurderer vi den årlige utløsningssannsynligheten for snøskred å være i størrelsesorden 1/50. Ved $\beta = 30,3^{\circ}$ og en betinget utløpssannsynlighet på 0,5, som til sammen gir en årlig sannsynlighet på 1/100, får man $\alpha \approx 25^{\circ}$. Denne verdien er i god overensstemmelse med 3 kPa-konturlinjen i Figur 11. Med en betinget utløpssannsynlighet på 0,05 (tilsvarende årlig sannsynlighet på 1/1000) får man derimot $\alpha \approx 21^{\circ}$, som ligger et stykke nord for reguleringsområdet. Dette er igjen i overensstemmelse med simuleringen og med det øverste kartet i Figur 12.

3.3 Sørpeskred

Sørpeskred kan i prinsippet oppstå alle stedene der smelte- eller regnvann i snødekket demmes opp og forårsaker høyt poretrykk, som f.eks. i bekkeløp eller i utflatinger. Det finnes så langt ingen etablert metodikk for å anslå hyppigheten av sørpeskred i ulike steder. Vurderingen vår er derfor basert på (i) erfaring fra andre steder i Norge, (ii) at vi ikke har fått opplysninger om tidligere sørpeskredhendelser i området og (iii) at vi ikke har oppdaget tydelige spor av slike hendelser under befaringen.

De mest sannsynlige kildene til sørpeskred i området er følgende:

- Bekkeløpet som drenerer den sørvendte skråningen av Stordalsfjellet og som ledes mot sørvest ved Botnhågen
- **7** Bekkeløpene gjennom den nordvendte skråningen nedenfor Svartisen
- Utflatingen i den nordvendte skråningen nedenfor Svartisen på ca. 100 m o.h.

Sørpeskred fra det førstnevnte bekkeløpet vil ikke nå reguleringsområdet fordi sørpen vil avsettes på enga nord for Fv 17, som i tillegg danner en ca. 2 m høy voll.

Blant bekkene eller elvene ved foten av Svartisen vurderer vi først og fremst de som relevante som munner i det vestlige reguleringsdelområdet. For disse virker deponiet av stein fra vanntunnellene som en stor voll. Den østlige delen er skilt fra fjellfoten av transformatorstasjonen med ca. 200 m, som vi anser som tilstrekkelig for at sørpen settes av før den når reguleringsområdet. Elveløpet langs det sørøstlige hjørnet av den østlige delen av reguleringsområdet er ikke et typisk sted for sørpeskred, men det kan ikke utelukkes.

Figur 13 Faresonekart kun for sørpeskred

Ut fra dette og i lys av at det finnes verken observasjoner eller spor i terrenget etter sørpeskred, vurderer vi faren for sørpeskred som vist i Figur 13. Det er en smal sone med fare med årlig sannsynlighet på 1/1000 langs den sørlige grensen, en litt bredere sone med årlig sannsynlighet på 1/5000 i det samme området og en sone med årlig sannsynlighet på 1/5000 i det samme området.

3.4 Flomskred og jordskred

Ettersom det ikke finnes vifter i eller nær reguleringsområdet og at mengden av løsmasser i bekkeløp er begrenset sør for den vestlige delen av reguleringsområdet, konkluderer vi med at man kan se borte fra flomskredfaren i denne delen. Derimot finnes det elveløp og ei vifte ved østsiden av reguleringsområdet der man må forvente at stor vannføring pga. av lokal begrenset sterknedbør kan mobilisere løsmassene og danne flomskred. Mangel på vegetasjon og størrelsen av blokkene på vifta (vurdert utfra flyfoto siden området var snødekket og ikke tilgjengelig under befaringen) tyder på at flomskred hender med høyere årlig sannsynlighet enn 1/100. Se Figur 14 for faresonekartet **kun for flomskred**.

Jordskred anses som ikke relevante i reguleringsområdet, som i største delen er for slakt for slike skred. Selv om de forekom, ville rekkevidden være langt mindre enn faresonene pga. snøskred.

Figur 14 Faresoner kun for flomskred

3.5 Steinsprang/steinskred

Selv om det finnes mange til dels store steinblokker nedenfor skrenter i omgivelsene, er faren for steinsprang/steinskred meget begrenset i reguleringsområdet. På nordsiden er det en betydelig distanse med flatt terreng mellom reguleringsområdet og foten av Stordalsfjellet. Også distansen mellom det sørøstlige hjørnet av reguleringsområdet og skrentene nedenfor Botntinden og Frokosttinden er for lang for at steinblokker kan overvinne den slake skråningen med elvavsetninger som demper sprangene. Den gjennomsnittlige helningen mellom skrentene nedenfor Svartisen og den vestlige delen av reguleringsområdet er på rundt 25°; det finnes skog og en løsmassedekke som demper sprangene. Det er derfor lite sannsynlig at selv relativt store blokker vil nå reguleringsområdet. Utløsningssannsynligheten (per 30 m bredde) for kjempeblokker som kan nå så langt er etter vår vurdering mindre enn 1/5000 pr. år.

3.6 Samlet skredfare

Tørre snøskred med snøsky er den avgjørende skredfaretypen i hele reguleringsområdet. Beregningene med SAMOS-AT tilsier at alt areal kan nås av snøskyer, til dels fra mer enn ett skredløp. I begrensede områder langs kanten av reguleringsområdet kan man ikke se bort fra faren for enten sørpeskred eller flomskred.

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 27

Teknisk forskrift TEK17 må tolkes slik at det ikke er den dominerende, men den *samlede* skredfaren som bestemmer utstrekningen av faresonene for sikkerhetsklasser S1, S2 og S3 i areal som kan nås av flere skredtyper. Det finnes imidlertid ikke en enkel og etablert metodikk for å beregne den romlige fordelingen av den samlede skredsannsynligheten ut fra faresonene for hver enkelte skredtype og hver sikkerhetsklasse, som er resultatet av beregninger med ikke-probabilistiske modeller som f.eks. SAMOS-AT.

I den foreliggende vurderingen er dette problemet håndtert etter skjønn: Hvis faresonen for sikkerhetsklasse Sn (der n = 1, 2 eller 3) fra skredløp eller skredtype A ligger innenfor den tilsvarende faresonen fra skredløp eller skredtype B, anslås sannsynligheten fra skredløp eller skredtype A ved noen punkter på kanten av faresonen fra B og omvendt. I alle disse punktene er sannsynligheten større enn grenseverdien for sikkerhetsklasse Sn, men verdiene på grenselinjen fra A er større enn de på grenselinjen fra B. Grenselinjen fra B forskyves utover bare litt hvis sannsynlighetsdifferansene er store, og noe mer hvis de er små. Gitt de fortsatt store usikkerhetene i beregning av rekkevidden til skred med gitt (lav til meget lav) årlig sannsynlighet, anser vi denne fremgangsmåten som adekvat.

4 Konklusjon

4.1 Avgrensning av faresoner

Skredfarevurdering for reguleringsplaner eller byggesaker i Norge må følge føringene i Plan- og bygningsloven (https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71/), i Bygg-teknisk forskrift TEK17 (https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840/KAPIT-TEL_7#KAPITTEL_7) og i Veiledning til Byggteknisk forskrift TEK17 (https://dibk.no/globalassets/byggteknisk-forskrift-tek17/veiledning-til-byggteknisk-forskrift-tek17-01.07.2017_oppdatert-15.09.2017.pdf). Vanlig praksis har vært at:

- Alt areal som kan treffes av skred med årlig sannsynlighet større enn grenseverdien i en av sikkerhetsklassene kan i utgangspunktet ikke brukes for bygg som faller inn under denne sikkerhetsklassen.
- For likevel å kunne bruke slikt areal for bygg i denne sikkerhetsklassen, må sikringstiltak iverksettes som reduserer skredsannsynligheten i arealet under grenseverdien.

For det aktuelle reguleringsområdet ved Kilvik er det snøskred og snøskyer som er den avgjørende (og i store deler den eneste) skredfaren. Bygg som faller under sikkerhetsklasse S3 og S2 vil ikke kunne bygges uten sikringstiltak. Det er svært kostbart og i mange tilfeller ikke praktisk gjennomførbart å fullstendig sikre et areal mot snøskyer, som det kommer fram av laboratorieundersøkelser, f.eks. (Keller og Issler, 1996). Grunnen er at snøskyer lett kan klatre over store voller og i ekstreme tilfeller 500 m opp motbakker.

NGI

Lovteksten og TEK17 er imidlertid formulert på en måte som åpner for flere muligheter enn det som tilsvarer vanlig norsk praksis så langt. Punktene som er relevante i det foreliggende tilfellet, der en del av arealet kan nås kun av snøskyer, er følgende:

- 1. "Byggverk skal plasseres, prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet mot skade eller vesentlig ulempe fra naturpåkjenninger."
- 2. I areal som ikke oppfyller kravene til bygg under sikkerhetsklasse S3 (S2), kan slike bygg likevel tillates dersom
 - arealet av bygget og dets uteareal oppfyller minstekravene til sikkerhetsklasse S2 (S1) *og*
 - bygget dimensjoneres slikt at det tåler de påregnelige skredlastene fra skred med årlig sannsynlighet tilsvarende grenseverdien i sikkerhetsklasse S3 (S2), dvs. 1/5000 (1/1000) og
 - o det påregnelige maksimaltrykket ikke overstiger ca. 50 kPa.

Punkt 1 er viktig i sonen som kan nås av snøskyer, men der trykket er relativt lavt, som i mange tilfeller kan være et betydelig areal. Etter vår kunnskap finnes det ingen spesifikke grenseverdier for "skadelige effekter". Vi mener imidlertid at skredlaster opptil de påregnelige vindlastene i den aktuelle regionen (typisk 1–3 kPa) burde bli godtatt, ikke minst fordi det ikke er mulig å bestemme en objektiv grense for utbredelsen av snøskyer. I det spesifikke tilfellet av reguleringsområdet Kilvik utgjør dette imidlertid lite, som man kan se fra Figur 9 og Figur 10.

Punkt 2 er derimot av potensiell betydning for Kilvik. I deler av reguleringsområdet er maksimaltrykket fra snøskyer lavt nok for at bygg kan på rimelig måte konstrueres til å tåle de påregnelige skredlastene, selv for snøskyer med årlig sannsynlighet på 1/5000. Den kritiske delen av betingelsene under punkt 2 ovenfor er imidlertid at bygningsarealet samt tilhørende uteareal skal oppfylle minstekravene til henholdsvis sikkerhetsklasse S1 (for bygg i sikkerhetsklasse S2) eller S2 (for bygg i sikkerhetsklasse S3). Dersom man legger kun den fastere delen av snøskred til grunn for hvilket areal som oppfyller minstekravene for S1 eller S2, er det et relativt stort areal som kan reguleres til bygge-formål under betingelsen av tilstrekkelig dimensjonering. Ved en mer restriktiv tolkning av teksten, der også snøskyer går inn i minstekravene til sikkerhet i utearealet, avhenger det derimot av hvilken trykkgrense som legges til grunn. Ved en trykkgrense på 3 kPa er det intet areal som oppfyller minstekravene for bygg i sikkerhetsklasse S3 (dvs. area-let skal være trygt mot skred med årlig sannsynlighet på 1/1000 eller høyere) og kun et lite areal langs den vestlige og nordlige kanten av reguleringsområdet for bygg i sikkerhetsklasse S2 (areal trygt for skred med årlig sannsynlighet på 1/100 eller høyere).

Det har så langt vært få tilfeller i Norge der disse unntaksreglene har blitt anvendt. Derfor er det lite praksis i tolkning av bestemmelsene, og NGI kan ikke gi et entydig svar på spørsmålet om hvor bygg som faller under sikkerhetsklasser S1, S2 eller S3 kan godkjennes med forbehold om tilstrekkelig dimensjonering. Skredfarevurderinger for reguleringsplaner må godkjennes av både fylkesmannen og NVE, og det kan være ulik praksis i ulike fylker. Vi anbefaler derfor Meløy kommune å be fylkesmannen og NVEs regionskontor om å ta stilling til disse spørsmålene tidlig i prosessen.

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 29

Figur 15 Samlet fare for skred med årlig sannsynlighet på 1/100 (øverst) eller 1/1000 (nederst) **uten hensyn til snøskyer**. Forventet maksimaltrykk (i kPa) i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet er vist med brune/røde konturlinjer

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 30

Figur 16 Samlet fare for skred med årlig sannsynlighet på 1/5000 **uten hensyn til snøskyer**. Forventet maksimaltrykk (i kPa) i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet er vist med gule konturlinjer

For å gi et tilstrekkelig grunnlag for myndighetenes vurdering av dette spørsmålet ble det utarbeidet faresonekart for to tolkninger: (1) Snøskya går ikke inn i vurdering av trygghet av uteareal, og (2) areal med snøskytrykk < 3 kPa anses som trygt nok. Skulle myndighetene bestemme seg for å sette et annet trykkriterium, kan tilsvarende kart utarbeides. Figur 15 og Figur 16 viser den samlede skredfaren i reguleringsområdet, utarbeidet fra kartene Figur 9–Figur 12 etter fremgangsmåten angitt ovenfor og ved bruk av tolkning (1). For å kunne vise det forventede snøskytrykket på en oversiktlig måte, ble særskilte kart lagd for årlig sannsynlighet på henholdsvis 1/100, 1/1000 og 1/5000. Derimot er Figur 17 det tilsvarende kartet ved bruk av tolkning (2), med alle tre faresonegradene vist på samme kart. Kartene er også del av den elektroniske leveransen, slik at de kan vises forstørret ved behov. (Forstørring øker imidlertid ikke nøyaktigheten av vurderingene som ligger til bunns.)

Uansett hvilken tolkning av lovverket som myndighetene legger til grunn, kan disse kartene brukes til dimensjonering av byggverk mot skredlaster. Trykkverdiene i kartet tilsvarer maksimalverdien i et punkt, som vanligvis oppnås nær bakken. Et inntrykk av den vertikale fordelingen av lastene kan fås ved å skalere trykkprofilene i Figur 8 med den lokale verdien av maksimaltrykket.

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 0 Side: 31

Figur 17 Samlet fare for skred **med hensyn til snøskyer**. Faresonen for skred med årlig sannsynlighet på 1/5000 sammenfaller med den for årlig sannsynlighet på 1/1000 og omfatter hele reguleringsområdet. Forventet maksimaltrykk i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet kan bestemmes ut fra Figur 15 og Figur 16

4.2 Mulige sikringstiltak

Dersom sikringstiltak reduserer den nominelle årlige skredfaren til de lovpålagte grenseverdiene på 1/100, 1/1000 eller 1/5000 i deler av reguleringsområdet, kan dette arealet reguleres til byggeareal for bygg i den tilsvarende sikkerhetsklassen. I det foreliggende tilfellet vil sikringstiltak først og fremst gjelde snøskred. (Dersom man ønsker å sikre arealet mellom Fv 17 og Storelva, må også sikringstiltak mot flom/flomskred vurderes og utredes.) Slike sikringstiltak føller inn i to kategorier:

- 1. Støtteforbygninger (stålgjerder eller nett) i utløsningsområdene, som forhindrer at skred utløses, og
- 2. Konstruksjoner i skredbanen, som voller eller bremsekjegler, som stopper, bremser eller leder skredet bort slik at det ikke kan skade liv og materielle verdier.

Hva som kan være hensiktsmessige tiltak, avhenger sterkt av sikkerhetsnivået som skal oppnås, skredstørrelsen og verdien (antall utsatte personer eller materielle verdier som kan bli tapt, og/eller nyskapte muligheter for økonomisk gevinst). Vi antar at arealet ikke skal brukes til boliger, men til næringsformål. Da vil kommunen i hvert enkelte tilfelle måtte avgjøre hvilken sikkerhetsklasse som skal anvendes.

Støtteforbygninger

Støtteforbygninger kan gi meget god beskyttelse mot utløsning av snøskred og brukes i stor grad i Alpene for å sikre tettsteder og viktig infrastruktur. For reguleringsområdet ville slik sikring være mest aktuell for skråningen under Svartisen, sør for det vestlige reguleringsdelområdet. Fullstendig sikring vil kreve anslagsvis 7–10 rekker med støtteforbygninger over en bredde på 300–400 m, eller 2–4 km. Byggekostnadene for en slik støtteforbygning vil da være i størrelsesorden 30–80 millioner kroner (MNOK), og de årlige vedlikeholdskostnadene 0,3–1 MNOK. Trolig er et slikt tiltak ikke lønnsomt med mindre reguleringsområdet kan utvikles med bedrifter med høy verdiskapning og det ikke finnes andre egnete steder som er mindre utsatt for skred.

Eventuelt kan en løsning vurderes der kun den øverste delen av utløsningsområdet sikres med støtteforbygninger, slik at snøskred fortsatt kan utløses i den nederste delen av utløsningsområdet, men har mindre utløsningssannsynlighet, mindre størrelse, mindre rekkevidde og langt mindre trykk i snøskya. Dersom en slik løsning skulle være aktuell, kan man også undersøke om kombinasjon med en fang- eller ledevoll kan gi bedre forhold mellom nytte og kostnader.

Det finnes imidlertid flere problempunkt som vil kreve en grundig utredning:

- I den østlige delen av utløsningsområdet kan isfall fra Svartisen ødelegge støtteforbygningen. Slike skader vil trolig inntreffe relativt ofte og øke vedlikeholdskostnadene massivt.
- **■** Isfall er også en stor fare for byggemannskapet og krever en grundig utredning.
- Grunnforholdene kan være vanskelige hvis det er oppsprukket eller forvitret berg eller permafrost.

Konstruksjoner i skredbanen

En fang- eller ledevoll vil ikke kunne stoppe snøskyer, men kan likevel redusere faren fra snøskyer til en viss grad, særlig hvis støtsiden av vollen er bratt: Snøskyen "skyter opp" ved vollen og blander inn mye luft, en prosess som reduserer både tettheten og hastigheten og derved trykket. I tillegg, hvis den fastere delen av skredet stopper eller snur i en annen retning, avtar trykket i snøskya raskere med distansen. På denne måten kan arealet utvides der trykket fra snøskyer med årlig sannsynlighet på 1/1000 er lavere enn en grenseverdi (mellom 1 og 3 kPa). I dette arealet kan bygg i sikkerhetsklasse 3 tillates dersom de er dimensjonert å tåle lasten fra skred med årlig sannsynlighet på 1/5000.

Det å finne den optimale plasseringen til en voll og å dimensjonere den er ikke en enkel oppgave i dette tilfellet fordi man bør undersøke ulike kombinasjoner av fang- og/eller ledevoller med og uten bremsekjegler (som reduserer skredets hastighet). Den nødvendige vollhøyden for å stoppe eller avlede den fastere delen kan beregnes utfra Figur 5.11 i (Jóhannesson m.fl., 2009). Derimot for å finne høyden som er nødvendig for å oppnå den ønskede trykkreduksjonen i snøskya i deler av reguleringsområdet vil det være nødvendig å kjøre en rekke 3D simuleringer med ulike vollhøyder. Det finnes for tiden ikke

nok empirisk kunnskap om virkningen av voller på snøskyer (Keller og Issler, 1996) for å kunne unngå slike simuleringer.

Vi har oversiktsmessig vurdert flere plasseringer av voller:

- I utflatingen på kote 100−115 m o.h. sør for det vestlige reguleringsdelområdet bremses skredene litt, og det finnes topografiske forhold som kan gi mulighet for å bygge en fangvoll. Avhengig av hvor stort areal som skal sikres, ville vollen ha en lengde på 250−400 m. Simuleringene med RAMMS i fase 1 (20170780-01-TN, Figur 7) viser imidlertid at hastigheten til den fastere eller fluidiserte delen av skredene med årlig sannsynlighet på 1/1000 er over 30 m/s, som vil kreve en voll på rundt 30 m høyde (eller ca. 20 m med bremsekjegler) for at den største delen av skredmassen skal kunne stoppes. To problemer til er den begrensede lagringskapasiteten bak vollen og den geotekniske stabiliteten av den bratte skråningen nedenfor 100 m o.h. under lasten av en svær voll.
- Med en ledevoll plassert mellom ca. 200 og 75 m o.h. og med en lengde på ca. 300 m får man den fastere delen av snøskred fra utløsningsområde SV1 til å snu mot nordvest og forbi reguleringsområdet. Ved en treffvinkel på 25° og en hastighet på 35 m/s vil vollhøyden være anslagsvis 15–18 m, avhengig av terrenghelningen. Det bratte terrenget vil by på både geotekniske og byggetekniske utfordringer.
- Ved å plassere ledevollen på deponiet av vanntunnelstein i det sørvestlige hjørnet av reguleringsområdet og å bygge den av materiale som tas ut ovenfor vollen vil man kunne oppnå en virksom vollhøyde på 15–18 m på en effektiv måte. Vollens lengde vil være omtrent 300 m. Det beskyttede arealet kan muligens utvides ved å bygge en fangvoll på ca. 150 m lengde og 8–10 m høyde i den østlige tredjedelen av det vestlige reguleringsdelområdet for å stoppe den vestlige armen av snøskred fra utløsningsområde SV2.

Blant disse tre løsningene anser vi den sistnevnte som den mest fordelaktige fordi terrenget og stedlige materialer (av antageligvis god kvalitet) kan utnyttes på den beste måten. Det er lettest å bygge vollen i relativt slakt terreng, og grunnforholdene er sannsynligvis gode. Det åpne spørsmålet er om en tilstrekkelig trykkreduksjon i snøskyer med årlig sannsynlighet på 1/1000 kan oppnås i et tilstrekkelig stort areal nord for ledevollen.

På grunn av mange ulike varianter, mangel av kunnskap om grunnforholdene, usikkerheten forbundet med vollens virkning på snøskya og uten et definert mål for hvor stort område som skal sikres, er det ikke mulig å gi et realistisk estimat på kostnadene. Ut fra erfaring med mange sikringsprosjekter tror vi imidlertid at kostnadene vil være mye lavere enn ved å bygge støtteforbygninger og grovt anslå en kosteramme på 5–15 MNOK.

Under visse forutsetninger kan det være interessant å utrede en tredje tilnærming: Detaljerte simuleringer av en snøsky mot et bygg (Rauter og Fellin, 2017) tilsier at trykket

bak bygget kan være mye lavere enn støttrykket på frontsiden. Uteområdet til et næringsbygg er ofte først og fremst plassen mellom tilkomstveien og bygningen. Bygget selv kan derfor under visse betingelser virke som sikringstiltak for uteområdet sitt:

- Tilkomstområdet må ligge bak bygget (i dette tilfellet nord for bygget).
- Uteområdet kan ikke være lengre (i skredretningen) enn anslagsvis 1–2 ganger byggets høyde.
- Bygget må være høyt nok i forhold til snøskya og mye bredere (på tvers av skredretningen) enn uteområdets lengde (i skredretning).
- Bygget må tåle lastene fra snøskya. Dette innebærer bl.a. restriksjoner på antall, størrelse og utforming av vinduer og dører mot skredretningen.

Så langt finnes det ikke enkle regler for å anslå trykkreduksjonen bak bygget i forhold til støttrykket på frontsiden, lengden av den beskyttede sonen, den nødvendige høyden på bygget m.fl. Metodikken bør utvikles ytterligere til den kan effektivt anvendes i designprosessen, men vi forventer at dette vil skje i løpet av de neste få årene. I reguleringsområdet kan slik sikring muligens være den mest kostnadseffektive løsningen.

5 Litteratur

Christen, M., Kowalski, J. og Bartelt, P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology* **63**(1–2), 1–14 (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X10000844)

Gauer, P. (2018, under publisering). Estimates on the reach of the powder part of avalanches. *I:* Proceedings of the International Snow Science Workshop, Innsbruck, 2018

Jóhannesson, T., Gauer, P., Issler, D. og Lied, K. (utg.) (2009). The design of avalanche protection dams – Recent practical and theoretical developments. Europeisk Kommisjon, Generaldirektorat for forskning, Miljødirektorat, Project Report EUR 23339, DOI: <u>https://doi.org/10.2777/12871</u>

Keller, S. og Issler, D. (1996). Staublawinen über Dämme und Mauern im Labor: Zusammenstellung aller Resultate und Auswertung. Bericht zuhanden des Schweiz. IDNDR-Komitees. Internal Report 697, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, Sveits

Rauter, M. og Fellin, W. (2017). Estimation of powder snow avalanche impact pressures with Open-FOAM. Poster, tilgjengelig på <u>https://www.researchgate.net/publication/319140813_Estimation_of_Powder_Snow_Avalanche_Impact_Pressures_with_OpenFOAM</u>

Sampl., P. og Granig, M. (2009). Avalanche simulation with SAMOS-AT. *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos 2009*, sider 519–523 (<u>http://arc.lib.montana.edu/snow-science/ob-</u> jects/issw-2009-0519-0523.pdf)

Schaer, M. og Issler, D. (2001). Particle densities, velocities, and size distributions in large avalanches from impact-sensor measurements. *Annals of Glaciology* **32**, 321–327

Sovilla, B., McElawaine, J. N. og Louge, M. Y. (2015). The structure of powder snow avalanches. *Comptes Rendus Physique* **16**, 97–104

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 1 Vedlegg A, side: 1

Vedlegg A

KRAV OM SIKKERHET MOT SKRED

Innhold

1	Fors	krift om sikkerhet mot skred i TEK17	2	2
	1.1	Sikkerhetsklasse S1	2	2
	1.2	Sikkerhetsklasse S2	2	<u>)</u>
	1.3	Sikkerhetsklasse S3	3	;

1 Forskrift om sikkerhet mot skred i TEK17

I forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift TEK17) i Plan- og bygningsloven er krav til sikkerhet mot skred for nybygg følgende:

§ 7-3. Sikkerhet mot skred

- (1) Byggverk hvor konsekvensen av et skred, herunder sekundærvirkninger av skred, er særlig stor, skal ikke plasseres i skredfarlig område.
- (2) For byggverk i skredfareområde skal sikkerhetsklasse for skred fastsettes. Byggverk og tilhørende uteareal skal plasseres, dimensjoneres eller sikres mot skred, herunder sekundærvirkninger av skred, slik at største nominelle årlige sannsynlighet i tabellen nedenfor ikke overskrides.

Sikkerhetsklasse for skred	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet
S1	liten	1/100
S2	middels	1/1000
S3	stor	1/5000

Tabell 1: Sikkerhetsklasser ved plassering av byggverk i skredfareområde

Loven gir mulighet for å ta i bruk fysiske sikringstiltak for bygg og uteareal for å øke sikkerheten.

1.1 Sikkerhetsklasse S1

Sikkerhetsklasse S1 omfatter tiltak der et skred vil ha liten konsekvens. Dette kan eksempelvis være byggverk der det normalt ikke oppholder seg personer og der det er små økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser. Eksempler på bygg som inngår i denne sikkerhetsklassen er garasje, uthus, båtnaust, mindre brygger, lagerbygninger med lite personopphold og enkelte mindre tilbygg og påbygg).

1.2 Sikkerhetsklasse S2

Sikkerhetsklasse S2 omfatter tiltak der et skred vil føre til middels konsekvenser. Dette kan eksempelvis være:

- enebolig, tomannsbolig og eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med maksimum 10 boenheter,
- arbeids- og publikumsbygg/brakkerigg/overnattingssted hvor det normalt oppholder seg maksimum 25 personer
- driftsbygning i landbruket, parkeringshus og havneanlegg.

For bygninger som inngår i sikkerhetsklasse S2 kan kravet til sikkerhet for tilhørende uteareal reduseres til sikkerhetsnivå angitt for sikkerhetsklasse S1 (1/100). Dette fordi eksponeringstiden for personer og dermed faren for liv og helse normalt vil være vesentlig lavere utenfor bygningene.

1.3 Sikkerhetsklasse S3

Sikkerhetsklasse S3 omfatter tiltak der et skred vil føre til store konsekvenser. Dette kan eksempelvis være byggverk der det normalt oppholder seg mer enn 25 personer og/eller der det er store økonomiske eller andre samfunnsmessige konsekvenser. Dette kan eksempelvis være:

- eneboliger i kjede/rekkehus/boligblokk/fritidsbolig med mer enn 10 boenheter
- arbeids- og publikumsbygg/brakkerigg/overnattingssted hvor det normalt oppholder seg mer enn 25 personer
- skole, barnehage, sykehjem og lokal beredskapsinstitusjon

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-08-03 Rev.nr.: 1 Vedlegg B, side: 1

Vedlegg B

BESKRIVELSE AV BEREGNINGSMODELLER FOR SNØSKRED

Innhold

B1	Innledning	2
B2	Statistisk-empirisk modell (α-β modell)	2
B3	RAMMS::AVALANCHE og MoT-Voellmy	4
B4	SAMOS-AT	8
B5	Referanser	12

B1 Innledning

De mest brukte modellene for utløpsberegninger i Norge er den topografisk-statistiske alfa-beta-modellen (Lied og Bakkehøi, 1980; Lied og Toppe 1989), blokkmodellen PCM (Perla, Cheng og McClung 1980), den én-dimensjonale modellen NIS (Norem, Irgens og Schieldrop 1989) og den to-dimensjonale modellen RAMMS (Christen m.fl., 2010). I dette prosjektet har vi brukt alfa-beta-modellen og RAMMS i den første fasen og SAMOS-AT i den andre fasen. SAMOS-AT inneholder en to-dimensjonal modell for den tette delen av et snøskred og en tre-dimensjonal modell som kan beregne hastighets-fordeling, spredning og strømningsretning i snøskya.

SAMOS-AT har gått gjennom en lang prosess av uttesting og kalibrering mot målinger og observasjoner av snøskred i Alpene (mest i Østerrike). I tillegg har NGI utført kontrollberegninger mot målinger fra NGIs forsøksfelt Ryggfonn på Strynefjellet og observasjoner fra noen kjente norske skredhendelser med betydelig snøsky.

B2 Statistisk-empirisk modell (α-β modell)

Den statistiske/topografiske α/β -modellen er utviklet ved NGI og gir maksimal utløpsdistanse utelukkende som en funksjon av topografi (Lied og Bakkehøi, 1980). Likningene for utløpsdistanse er funnet ved regresjonsanalyse, og korrelerer den lengste registrerte utløpsdistansen i mer enn 200 skredbaner med et utvalg av topografiske parametere. Parameterne som har vist seg å være mest betydningsfulle er gitt i Tabell B1, jfr. Figur B1.

Figur B1 Topografiske parametere som beskriver terrengprofilet

Symbol:	Parameterbeskrivelse:
β (°)	Gjennomsnittlig helning av skredbanen mellom øvre del av utløsningsområ-
	det og "fjellfoten" (punktet med 10° helning i skredbanen)
θ (°)	Helning av de øverste 100 høydemeter av utløsningsområdet
H (m)	Total høydeforskjell mellom øverste del av utløsningsområdet og det laveste punktet langs best tilpassede parabel $y = c_2x^2+c_1x+c_0$, der c_0 , c_1 og c_2 er konstanter
	stanter
y″ (m⁻¹)	y" = 2c ₂ , beskriver krumningen av skredbanen.

Tabell B1 Topografiske parametere for beregning av maksimal utløpsdistanse

 β -vinkelen har vist seg å gi den beste beskrivelsen av helningen i skredbanen, og regresjonsanalyse har vist at β -vinkelen også er den eneste statistisk viktige terrengparameteren. Modellen aksepterer kun β -punkt som er innenfor den delen av skredbanen der tangenten til den best tilpassede parabelen har en helning mellom 5° og 15°.

Helningen θ av de øverste 100 høydemetrene i utløsningsområdet bestemmer indirekte bruddhøyden og derved skredets tykkelse, som er større i slake helninger enn i bratte helninger. Lavere verdier av θ gir således lengre utløpsdistanser, dvs. lavere gjennomsnittlig helning av den totale skredbanen, α .

Lavere verdier av produktet Hy" betyr lavere verdier av β . I teorien resulterer dette i lengre utløp (lavere α -verdier), fordi skredene går med lavere hastighet og har et mindre energitap gjennom hastighetsavhengig friksjon. Topografien, bredden og graden av sideveis avgrensning i utløsningsområdet, samt transport av fokksnø inn i utløsningsområdet, har liten innflytelse på utløpsdistansen. Det er ikke noe som tyder på at en innsnevring i skredbanen gir lengre utløp.

Modellen er best egnet for analyse av utløpsdistanse langs skredbaner som er konkave i lengderetningen. De beregnede utløpsdistansene er de som kan forventes under snøforhold som favoriserer lange utløp (dvs. tørr og lett snø i hele skredbanen).

Antagelsen om at det er små variasjoner i de fysiske snøparameterene som gir de lengste utløpsdistansene, er kun gyldig innenfor én klimasone. Det benyttes derfor en annen relasjon mellom α og β på Island eller i Østerrike enn i Norge.

NGIs skreddatabase inneholder i dag ca. 230 skredobservasjoner. Både de statistiske og de dynamiske modellene blir i blant oppgradert. Den mest brukte formen av α/β -modellen er i dag $\alpha = 0.96\beta - 1.4^{\circ}$. Standardavviket er 2.3° og korrelasjonskoeffisienten er 0.92.

Rekkevidden for mange skredbaner med årlig sannsynlighet 1/1000 samsvarer godt med middelverdien av α der skredbanen er en jevn parabel. Ved spesielt store skred kan α -verdien med fratrekk av ett standardavvik (2.3°) være brukt.

B3 RAMMS::AVALANCHE og MoT-Voellmy

RAMMS:: AVALANCHE og *MoT-Voellmy* er fluidmekaniske modeller, utviklet henholdsvis ved SLF i Sveits fra omtrent 1995 til 2010 og ved NGI i 2011/2012. Modellene er meget like og beskrives derfor sammen her. De beskriver skredet som en spesiell væske som har både friksjon som et fast materiale og viskositet som en væske. Denne friksjonsloven går tilbake til en modell fra 1950-tallet (Voellmy, 1955) som er i stor grad basert på klassisk hydraulikk. Den samme friksjonsloven ble senere brukt i kontinuumsmekaniske modeller i én dimensjon (Briukhanov m.fl., 1967; Christen m.fl., 2002. Alle disse modellene forutsetter konstant skredtetthet ρ og beskriver bevegelsen av skred"væsken" gjennom balanseligninger for masse (eller flytehøyde *h*) og impuls $h\mathbf{u} = (hu, hv)$ i retningene *x*, *y* parallell med bakken:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial v} = w_e,$$
$$\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial (hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = hg_x + \frac{\partial (h\bar{\sigma}_{xx})}{\partial x} - \frac{\sigma_{xz}^b}{\rho},$$
$$\frac{\partial (hv)}{\partial t} + \frac{\partial (huv)}{\partial x} + \frac{\partial (hv^2)}{\partial y} = hg_y + \frac{\partial (h\bar{\sigma}_{yy})}{\partial y} - \frac{\sigma_{yz}^b}{\rho}.$$

 $\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z)$ er tyngdeakselerasjonen i et lokalt koordinatsystem der *x* og *y* er parallell med bakken og *z* er i rett vinkel med bakken. σ_{xx} og σ_{yy} er normalspenningene i retning *x* og *y*, og σ_{xz}^{b} og σ_{yz}^{b} beskriver friksjonen av skredet på snødekket. Det finnes noen forskjeller mellom RAMMS og MoT-Voellmy i disse termene:

RAMMS:

■ Normalspenningene er proporsjonale med det hydrostatiske trykket,

$$\bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = k_{a/p}\bar{\sigma}_{zz} = \frac{k_{a/p}}{2}\rho h(|g_z| + \kappa \mathbf{u}^2).$$

og skjærspenningen på bunnen er

$$\frac{\sigma_{xz}^b}{\rho} = \operatorname{sgn}(u) \left[\mu h(|g_z| + \kappa \mathbf{u}^2) + \frac{g}{\xi} u \sqrt{u^2 + v^2} \right],$$

og tilsvarende for σ^{b}_{yz} .

- $k_{a/p} = \tan^2(45^\circ \mp \frac{\phi}{2})$ er den aktive/passive jordtrykkskoeffisienten og brukes dersom skredet strekker seg/presses sammen. ϕ er den indre friksjonsvinkelen i skredsnøen, som ofte settes til 30° slik at $k_a = 1/3$ og $k_p = 3$.
- **7** κ (målt i 1/m) er terrengets krumning i strømningsretning; denne termen beskriver ekstra friksjon pga. sentrifugalkraften.
- **7** Friksjonsparameterne er μ for den hastighetsuavhengige Coulomb-friksjonen og g/ξ for den "turbulente" motstanden. ξ har enhet m/s².
- \neg $w_e = 0$ i den kommersielle versjonen, dvs. ingen erosjon/medrivning.

MoT-Voellmy:

- Istedenfor g/ξ brukes den dimensjonsløse parameteren $k \equiv g/\xi$ i formelen for σ_{xz}^b .
- **7** Det settes $k_{a/p} = 1$, dvs. man antar hydrostatisk trykkfordeling i skredet.
- Brukeren har valget mellom (i) ingen medrivning ($w_e = 0$), (ii) $w_e = c |\mathbf{u}| en$ formel som fantes i en tidligere spesialversjon av RAMMS eller (iii) en fysikalsk basert formel beskrevet av Issler og Jóhannesson (2011). I tilfellet (ii) styrer parameteren *c* hvor raskt snøen eroderes. Teorien av Issler og Jóhannesson (2011) indikerer at $c \approx k$. I tilfellet (iii) finnes det ingen slik parameter, men brukeren må lage rasterfiler med fordeling av den eroderbare (ny-)snøhøyden og skjærstyrken (i pascal) av den eroderbare snøen.

Mens RAMMS løser ligningene med et numerisk skjema av andre orden, benytter MoT-Voellmy et enklere skjema av første orden.

En stor forskjell i forhold til enklere modeller er at både skredets lengde, bredde og høyde forandrer seg langs banen. Denne forandringen beregnes ved å dele opp skredbanen i små celler (typisk $5 \times 5 \text{ m}^2$) og å samtidig beregne hvordan massen (og derfor flytehøyden) i en celle endrer seg pga. ulikhet mellom innstrømning og utstrømning, og hvordan hastigheten endrer seg pga. gravitasjon, friksjon og trykk fra massene i nabocellene. Dette fører bl.a. til det at hastigheten ved skredets "hale" er lavere enn ved fronten, i overensstemmelse med målingene.

Felles for modellene er at de tar hensyn både til startmassen gjennom startlengde, -bredde og -høyde, og til variasjoner i terrenget. Friksjonsparameterne μ og k (eller ξ) må velges av brukeren i hvert enkelt tilfelle. I begge modellene kan brukeren fastsette ulike verdier for friksjonsparameterne i ulike deler av skredbanen. Dette gjør det mulig å ta hensyn til ujevnhet av terrenget eller skog. Modellen RAMMS ble testet og kalibrert i Sveits mot skredhendelser i Alpene på lignende måte som alfa-beta-modellen (avsnitt B2) i Norge. Det finnes en tabell med anbefalte verdier for friksjonsparameterne i forhold til skredstørrelse, høyde over havet, kanaliseringsgrad og frekvensen av skredet (SLF, 2016), se Tabell B2. Denne tabellen ble tilpasset norske forhold gjennom tilbakeberegning av mange kjente skredhendelser fra NGIs skreddatabase med RAMMS. De samme inngangsdataene og parameterverdiene kan også brukes i MoT-Voellmy. Direkte sammenligning av de to modellene (NGI, 2014) viste at de gir tilnærmet de samme resultatene dersom de samme inngangsdataene og parameterverdiene brukes. Merk imidlertid at denne kalibreringen gjelder simuleringer *uten medrivning*. Det finnes for tiden ingen publisert kalibrering av modellen med medrivning.

Det har imidlertid vært kjent i lang tid at Voellmys friksjonslov med de anbefalte parameterverdiene gir for lave hastigheter i store deler av skredbanen. En analyse av hastighetsmålinger av snøskred fra mange land (Gauer m.fl., 2010) viste at man oppnår betydelig bedre overensstemmelse mellom målte og simulerte hastigheter for riktig utløpsdistanse ved å velge den hastighetsuavhengige delen av friksjonen (parameter μ) større og den hastighetsavhengige delen (parameter *k* eller g/ξ) langt mindre enn anbefalt for RAMMS (SLF, 2016). For å oppnå de samme utløpsdistansene som med alfa-beta-modellen, velges $\mu \approx \tan(\alpha(\beta))$ og $k \ll 10^{-3}$ ($\xi \gg 10^4$ m/s²). Disse verdiene kan imidlertid justeres for klimaforholdene, terrengkarakteristikk, skogsvirkning og lignende faktorer.

Tabell B2 Eksempel på standardverdier av friksjonsparameterne μ og ξ i modellen RAMMS for ulike returperioder, tilpasset sveitsiske forhold (fra (SLF, 2016)) RAMMS::Avalanche 1.1

Large avalanche (> 60'000 m ³)		300-Year		100-Year		30-Year		10-Year	
	Altitude								
	(m.a.s.l.)	μ	ξ	μ	ξ	μ	ξ	μ	ξ
	above 1500	0.155	3000	0.165	3000	0.17	3000	0.18	3000
	1000 - 1500	0.17	2 5 0 0	0.18	2500	0.19	2500	0.2	2500
unchannelled	below 1000	0.19	2000	0.2	2000	0.21	2000	0.22	2000
	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
hannelled:	below 1000	0.24	1 500	0.25	1500	0.26	1500	0.27	1500
	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
gully	below 1000	0.3	1200	0.315	1200	0.33	1200	0.345	1200
	1500	0.14	1000	0.15	1000	0.155	4000	0.165	4000
	above 1500	0.14	4000	0.15	4000	0.155	4000	0.165	4000
. 23	1000 - 1500	0.15	3300	0.16	3500	0.17	3500	0.18	3500
lat	below 1000	0.17	3000	0.18	3000	0.19	3000	0.2	3000
	(251000 - 601000	200	Veen	100		20.1		10.1	/
medium avaianche (25 000 - 80 000	0 195	2500	100-	-Teal	0.215	1edi	0.225	1edi 2500
	1000 1500	0.195	2300	0.205	2300	0.213	2300	0.225	2300
care la protocia II prol	1000 - 1300 bolow 1000	0.21	1750	0.22	1750	0.23	1750	0.24	1750
Inchannelled	Delow 1000	0.25	1750	0.24	1750	0.25	1750	0.20	1730
	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
hannelled	below 1000	0.28	1350	0.29	1350	0.3	1350	0.31	1350
	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
gully	below 1000	0.36	1100	0.37	1100	0.38	1100	0.39	1100
	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
ilat	below 1000	0.21	2500	0.22	2500	0.23	2500	0.24	2500
	5 65 1								
orested area (mu=delta	, xi=fix)	0.02	I 400	0.02	400	0.02	400	0.02	400

Inngangsverdier: For modeller av Voellmy-typen øker terminalhastigheten i banen tilnærmet med kvadratroten av flytehøyden og utløpsdistansen fra foten av skråningen omtrent lineært med flytehøyden. Flytehøyden for sin del er omtrent proporsjonal med bruddkanthøyden. Derfor er det viktig å anslå realistiske bruddkanthøyder og utløsningsområder som inngangsdata. En metodikk for dette ble utarbeidet av det Sveitsiske snøog skredforskningsinstituttet (Salm m.fl., 1990):

- Som utgangspunkt tar man den forventede maksimale snøhøydetilveksten innen tre døgn med en gitt returperiode T (eller årlig sannsynlighet), $\Delta h_0^*(T)$. Denne verdien gjelder målinger på flatmark, avhenger av klimaforholdene og varierer sterkt mellom regionene.
- Det tas hensyn til de lokale forholdene ved å korrigere $\Delta h_0^*(T)$ med 5 cm per 100 m høydedifferanse mellom målestasjonen og utløsningsområdet, og med opptil ±50 cm for vindeffekten.

En sentral antagelse i den sveitsiske metodikken er at et skred utløses innenfor nysnølaget i løpet av enhver tre døgns nedbørperiode med årlig sannsynlighet på 1/30 eller mindre. Utløsningssannsynligheten kan imidlertid være langt mindre enn 1 i relativt slake skråninger (dvs. med helningsvinkel nær 30°), ved relativt lave nedbørmengder eller i ujevnt terreng. Omvendt kan bruddet også skje i eller mellom gamle lag, noe som fører til større bruddkanthøyder.

Denne metoden blir mer realistisk hvis man tar hensyn til utløsningssannsynligheten. Sannsynligheten for et skred med gitt bruddhøyde d_0 er produktet av sannsynligheten $P_s(d_0)$ for snøhøydetilvekst tilsvarende bruddhøyden d_0 og utløsningssannsynligheten $P_b(d \mid d = d_0)$ ved gitt snøhøydetilvekst. I samsvar med intuisjonen viser NGIs mangeårige observasjoner fra Strynefjellet at det er store forskjeller mellom ulike skredbaner og at P_b øker kraftig med Δh fra nesten 0 ved $\Delta h < 0.3$ m til nærmere 1 ved $\Delta h > 1.5$ m.

Modellene tilbyr følgende muligheter for å ta hensyn til bremsevirkningen av skog:

- I RAMMS kan brukeren enten velge å kjøre simuleringen med de foreslåtte friksjonsparameterne (μ + 0,02, ξ = 400 m/s²) eller selv lage rasterfiler med de ønskede verdiene av μ og ξ .
- MoT-Voellmy kan selv fortløpende modifisere μ og k i forhold til lokal flytehøyde h og hastighet $|\mathbf{u}|$ dersom en rasterfil med $n \cdot D$ er tilgjengelig, der $n(\mathbf{x})$ er fordelingen av antall trær per m² og $D(\mathbf{x})$ (i meter) er den lokale gjennomsnittlige stammediameteren på brysthøyde.

B4 SAMOS-AT

SAMOS-AT, utviklet i 2007 ved AVL List GmbH i Østerrike, er etterfølgeren av SA-MOS, som var i bruk fra 1999 (Zwinger et al., 2003; Sampl og Zwinger, 2004). En kort beskrivelse av modellen finnes i (Sampl og Granig, 2009), mens Sailer m.fl. (2008) og Granig m.fl. (2009) gir informasjon om validering og eksempler. Modellen kobler sammen en kvasi-3D (dybdemidlet) modell for den tette delen av snøskred og en 3D modell for snøskya, dvs. det turbulente laget av relativt lav tetthet som utvikler seg på overflaten av tørre snøskred.

Som i RAMMS::AVALANCHE (Christen m.fl., 2010) eller MoT-Voellmy beskrives bevegelsen av *skredets fastere del* gjennom ligninger for masse- (1 ligning) og impulsbevaring (2 ligninger tilsvarende retningene langs terrengoverflaten):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial v} = \frac{j_e}{\rho} - \frac{j_s}{\rho},$$
$$\frac{\partial (hu)}{\partial t} + \frac{\partial (hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial (huv)}{\partial y} = hg_x + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (h\bar{\sigma}_{xx})}{\partial x} - \frac{\sigma_{xz}^b}{\rho} + \frac{\sigma_{xz}^s}{\rho} - \frac{F_x^{\text{obs}}}{\rho},$$
$$\frac{\partial (hv)}{\partial t} + \frac{\partial (huv)}{\partial x} + \frac{\partial (hv^2)}{\partial y} = hg_y + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (h\bar{\sigma}_{yy})}{\partial y} - \frac{\sigma_{yz}^b}{\rho} + \frac{\sigma_{yz}^s}{\rho} - \frac{F_y^{\text{obs}}}{\rho}.$$

I disse ligningene er *h* flytehøyden, $\mathbf{u} = (u, v)$ den dybdemidlede hastigheten, $\mathbf{g} = (g_{x_i}g_{y_i}g_z)$ tyngdeakselerasjonen, $\overline{\sigma}_{xx}$ og $\overline{\sigma}_{yy}$ de dybdemidlede normalspenningene langs bakken, σ_{xz}^b og σ_{yz}^b skjærspenningene langs bakken, σ_{xz}^s og σ_{yz}^s skjærspenningene langs overflaten til det tette laget. j_e og j_s er henholdsvis erosjons- eller medrivningsraten og suspenderings- eller oppvirvlingsraten (denne snøen danner snøskya) målt i kg m⁻² s⁻¹, og F^{obs} omfatter motstand fra skog eller steinblokker i banen.

Som i MoT-Voellmy, antas det at normalspenningene parallelt med bakken er lik det hydrostatiske trykket,

$$\bar{\sigma}_{xx} = \bar{\sigma}_{yy} = \bar{\sigma}_{zz} = \frac{1}{2}\rho h(|g_z| + \kappa \mathbf{u}^2).$$

Skjærspenningen langs bakken ligner på uttrykket brukt i modeller av Voellmy-type med en hastighetsuavhengig Coulomb-friksjon og en del som er proporsjonal med \mathbf{u}^2 , men det finnes flere modifikasjoner:

$$\left(\sigma_{xz}^{b},\sigma_{yz}^{b}\right) = \frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|} \left[\tau_{0} + \mu \left(1 + \frac{R_{s0}}{R_{s0} + R_{s}}\right)\overline{\sigma}_{zz} + \frac{\rho \mathbf{u}^{2}}{\left(\frac{1}{k}\ln\frac{h}{R_{D}} + B_{D}\right)^{2}}\right]$$

 τ_0 er en skjærstyrke i snøen som brukes for små skred for at de skal stoppe tidligere. Faktoren som multipliserer μ , lar Coulomb-friksjonen variere fra $2\mu\bar{\sigma}_{zz}$ ved $R_s = 0$ til

 $\mu \bar{\sigma}_{zz}$ ved $R_s \rightarrow \infty$. R_s beskriver graden av fluidisering som forholdet mellom $\rho \mathbf{u}^2$ og σ_{zz}^b , med antagelsen at $\rho \mathbf{u}^2$ er proporsjonal med det dispersive trykket som skyldes sammenstøt mellom snøpartikler pga. tøyning i skredet. I den siste termen erstattes g/ξ i RAMMS (eller k i MoT-Voellmy) med et fluiddynamisk uttrykk for motstandskoeffisienten til en turbulent grenselagsstrømning over en ru overflate. k = 0,43 er von Kármáns konstant, R_D overflateruheten (en lengde), og B_D en empirisk konstant. Parameternes standardverdier er $\tau_0 = 0, \mu = 0,155, R_{s0} = 0,222, R_D = 0,1 \text{ m og } B_D = 4,13$. Med disse verdiene er koeffisienten til den turbulente motstanden (siste term i ligningen) lik 0,011 ved h =1 m og 0,0068 ved h = 2 m.

Sett fra snøskya, virker den tette delen som en ru overflate i bevegelse. Med dette og en antatt logaritmisk hastighetsprofil i den laveste delen av snøskya er skjærspenningen $(\sigma_{xz}^s, \sigma_{yz}^s)$ gitt av et uttrykk som ligner på $(\sigma_{xz}^b, \sigma_{yz}^b)$. Lufttettheten brukes imidlertid istedenfor den tette delens tetthet, og hastighetsdifferansen $\Delta \mathbf{u}$ mellom snøskya på en referansehøyde *y* ovenfor grenseflaten og hastigheten i den tette delen brukes istedenfor den dybdemidlede hastigheten i den tette delen:

$$\left(\sigma_{xz}^{s},\sigma_{yz}^{s}\right) = \frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|} \frac{\rho_{a}(\Delta \mathbf{u})^{2}}{\left(\frac{1}{k}\ln\frac{y}{R_{P}} + B_{P}\right)^{2}}.$$

For R_P brukes en formel med tre empiriske konstanter for å ta med effekten av overflateruheten og av hoppende snøpartikler. Konstanten B_P er satt til 8,5.

I SAMOS-AT er medrivning av snødekket lokalisert ved fronten av skredet, og erosjonsdybden spesifisert av brukeren. Den eroderte massen fordeles mellom den tette delen og snøskya i forhold til Froude-tallet og flytehøyden (for detaljer se (Sailer m.fl., 2002)). Den tette delen mister også masse pga. suspendering til snøskya, som antas å være proporsjonal med skjærspenningen σ^s , konsentrasjonsdifferansen mellom det tette laget og snøskya, Δc , og motstandskoeffisienten av snøpartiklene, $C_d \sim 3$, men invers proporsjonal med hastighetsdifferansen mellom lagene, $\|\Delta \mathbf{u}\|$, og partikkelstørrelsen, $d_p \sim 0.8$ mm:

$$j_s = -\alpha \frac{\parallel \boldsymbol{\sigma}^s \parallel}{\parallel \Delta \mathbf{u} \parallel} \frac{C_d}{d_p}.$$

Proporsjonalitetskoeffisienten er satt til 0,01 m. Modellen tillater imidlertid suspendering av snøpartikler kun hvis overflaten av det tette laget er ristet sterkt nok; betingelsen er at partiklenes Froude-tall, $Fr_p = \mathbf{u}^2/|g_z|$, er større enn ca. 400.

Motstanden fra trær eller steinblokker i banen beregnes som

$$\mathbf{F}^{\mathrm{obs}} = \frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|} c_w n D h \rho \frac{\mathbf{u}^2}{2},$$

med konstant motstandskoeffisient c_w , som gjelder tilnærmet ved høye Reynolds-tall, men trolig ikke i granulære masser.

Snøskya behandles som en to-fasers blanding av luft og ispartikler. SAMOS-AT beregner bevegelsen av luften og av partiklene separat. For luften løses massebevaring og Navier–Stokes-ligningen for middelverdiene av tetthet og hastighet, med et stort bidrag fra turbulensen til den effektive viskositeten, η_{eff} :

$$\partial_t \rho + \partial_j (\rho u_j) = 0 ,$$

$$\partial_t (\rho_a u_i) + \partial_j (\rho_a u_i u_j) = \rho g_i - \partial_i p + \partial_j [\eta_{\text{eff}} (\partial_j u_i + \partial_i u_j)] - f_i^{\text{obs}} - f_i^p$$

(For enkelhets skyld brukes det tensornotasjon med implisitt summering over like indekser.) Turbulens er simulert gjennom *k*- ε -modellen med to ligninger for den turbulente kinetiske energien, *K*, og dissipasjonen, ε ; for detaljer om denne turbulensmodellen se f.eks. (Rodi, 1984). Sammen med den molekylære viskositeten av luft, $\eta_a \sim 2 \times 10^{-5}$ kg/(m s), og konstanten $C_{\mu} = 0,09$ resulterer

$$\eta_{\rm eff} = \eta_a + C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon}.$$

For motstanden av objekter som trær brukes en analog formel som for den tette delen, men med luftens tetthet istedenfor skredets:

$$f_i^{\text{obs}} = \frac{\mathbf{u}}{\|\mathbf{u}\|} c_w n D \rho_a \frac{\mathbf{u}^2}{2}.$$

Relativbevegelsen mellom luft og partikler fører til en volumkraft f_i^p som henger sammen med den gjennomsnittlige motstanden av en partikkel, \mathbf{F}_p (omtalt lenger nede), gjennom den volumetriske partikkelkonsentrasjonen *c* og partikkelvolumet V_p som

$$\mathbf{f}^p = \frac{c}{V_p} \mathbf{F}_p$$

Skjærspenningen σ^s og suspenderingsraten j^s/ρ_p brukes som randbetingelser.

For snøpartiklene i snøskya løses bevegelsesligningene for punktmasser, men hvert simulert massepunkt tilsvarer et ensemble av partikler med en samlet masse på typisk 100 kg eller omtrent 10⁹ snøpartikler:

$$m_p \frac{\mathrm{d}\mathbf{v}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{F}_p + m_p \mathbf{g}$$

Motstandskraften på en partikkel beregnes fra

$$F_p = \frac{1}{2} C_d \rho_a (\Delta \mathbf{v})^2 \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{\Delta \mathbf{v}}{\| \Delta \mathbf{v} \|}.$$

Relativhastigheten mellom luft og partikkel fluktuerer pga. turbulens. Ved å dele opp **u** i middelverdi og fluktuasjon, $\mathbf{u} = \mathbf{\bar{u}} + \mathbf{u}'$, finner man $(\Delta \mathbf{v})^2 = (\mathbf{\bar{u}} + \mathbf{u}' - \mathbf{v})^2 = (\mathbf{\bar{u}} - \mathbf{v})^2 + \mathbf{u}'^2$ $= (\mathbf{\bar{u}} - \mathbf{v})^2 + 2K/3$. SAMOS-AT implementerer i tillegg en innviklet metode med tilfeldig valg av en fluktuasjons- eller virvelhastighet og –retning som partiklene følger over en (relativt kort) tid (Sampl og Granig, 2009).

Den numeriske implementeringen av SAMOS-AT omfatter følgende elementer:

- Et regulært grid med celler på typisk 5×5 m² brukes for å representere terrenget og resultatene for det tette laget.
- Et grovere grid (typisk 15×15 m²) fra terrengmodellen, som utvides til den tredje dimensjonen med typisk 20 lag av celler benyttes for å simulere snøskya. Høyden av disse cellene øker oppover fra rundt 4 m nederst.
- Bevegelsen av den tette delen simuleres med hjelp av metoden Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), som brukes også i flere andre skredmodeller; se (Monaghan, 1992) for en beskrivelse. Strømningen simuleres ved å følge bevegelsen av representative massepakker og å interpolere feltverdiene med hjelp av såkalte kjernefunksjoner med spesifikke egenskaper. Hver representative massepakke tilsvarer typisk rundt 2000 kg av skredsnø.
- I snøskya løses ligningene for luften gjennom en implisitt finite-volum-metode og ligningene for partiklene gjennom eksplisitt tidsintegrering.

B5 Referanser

- Briukhanov, A. V., Grigorian, S. S., Miagkov, S. M., Plam, M. Ya., Shurova, I. Ya., Eglit, M. E. og Yakimov, Yu. L. (1967). On some new approaches to the dynamics of snow avalanches. *In*: Ôura, H. (utg.), Physics of Snow and Ice, Proceedings of the Intl. Conference on Low Temperature Science, Sapporo, Japan, 1966. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan. Bind. I, del 2, sider 1223–1241
- Bozhinskiy, A. N., og Losev, K. S. (1998). *The Fundamentals of Avalanche Science*. Mitteilung 55, Det sveitsiske institutt for snø- og snøskredforskning WSL-SLF, Davos Dorf, Sveits
- Christen, M., Bartelt, P., og Gruber, U. (2002). AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. International Congress INTERPRAEVENT 2002 in the Pacific Rim – Matsumoto / Japan. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT. Bind 2, sider 715–725
- Gauer, P., Lied, K. og Kristensen, K. (2008). On avalanche measurements at the Norwegian fullscale test-site Ryggfonn. *Cold Regions Science and Technology* **51**, 138–155
- Gauer, P., Kronholm, K., Lied, K., Kristensen, K. og Bakkehøi, S. (2010). Can we learn more from the data underlying the statistical α-β model with respect to the dynamical behavior of avalanches? *Cold Regions Science and Technology* **62**, 42–54
- Granig, M., Sampl, P., Tollinger, C., og Jörg, Ph. (2009). Experiences in avalanche assessment with the powder snow avalanche model SamosAT. *In:* Proceedings of the International Snow Science Workshop Davos 2009. Sider 514–518
- Issler, D. (1998). Modelling of entrainment and deposition in powder-snow avalanches. *Annals of Glaciology* **26**, 253–258
- Issler, D. (2003). Experimental information on the dynamics of dry-snow avalanches. In: Hutter, K. and Kirchner, N. (utg.), Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics bind 11. Springer, Berlin, Tyskland. Sider 109–160
- Issler, D., og Gauer, P. (2008). Exploring the significance of the fluidized flow regime for avalanche hazard mapping. *Annals of Glaciology* **49**, 193–198
- Issler, D., Gauer, P., Schaer, M. og Keller, S. (1996). Staublawinenereignisse im Winter 1995: Seewis (GR), Adelboden (BE) und Col du Pillon (VD). Intern rapport IB 694. Det sveitsiske institutt for snø- og snøskredforskning (WSL-SLF), Davos Dorf, Sveits
- Issler, D. og Jóhannesson, T. (2011). Dynamically consistent entrainment and deposition rates in depth-averaged gravity mass flow models. NGI Technical Note 20110112-01-TN, Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge
- Lied, K. og Bakkehøi, S. (1980). Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parametres. *Journal of Glaciology* **26** (94), 165–177
- Lied, K. og Toppe, R. (1989). Calculation of maximum snow-avalanche run-out. *Annals of Glac-iology* **13**, 164–169
- Monaghan, J. J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astrophysics and Astronomy* **30**, 543–574
- NGI (2014). Recommendations for the use of the quasi-3D code MoT-Voellmy. Deliverable D1.3 *i* Results 2014 from SP 4 FoU Snøskred: Work Package 1 Ryggfonn and Avalanche Dynamics. Tilgjengelig på https://www.ngi.no/download/file/10341

- Norem, H., Irgens, F. og Schieldrup, B. (1989). Simulation of snow-avalanche flow in run-out zones. *Annals of Glaciology* **13**, 218–225
- Perla, R., Cheng, T. T. og McClung, D. M. (1980). A two-parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology* **26**(94), 197–207
- Rodi, W. (1984). Turbulence Models and Their Application in Hydraulics State-of-the-Art Report. IAHR Monograph, Taylor & Francis. 104 sider
- Sailer, R., Rammer, L. og Sampl, P. (2002). Recalculation of an artificially released avalanche with SAMOS and validation with measurements from a pulsed Doppler radar. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2**, 211–216
- Sailer, R., Fellin, W., Fromm, R., Jörg, Ph., Rammer, L., Sampl, P. og Schaffhauser, A. (2008). Snow avalanche mass-balance calculation and simulation-model verification. *Annals of Glaciology* 48, 183–192
- Salm, B., Burkard, A., og Gubler, H.-U. (1990). Berechnung von Fliesslawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Mitteilung 47, Det sveitsiske institutt for snø- og snøskredforskning WSL-SLF, Davos Dorf, Sveits
- Sampl, P., og Granig, M. (2009). Avalanche simulation with SAMOS-AT. *In:* Proceedings of the International Snow Science Workshop Davos 2009. Sider 519–523
- Schaerer, P. A., og Salway, A. A. (1980). Seismic and impact-pressure monitoring of flowing avalanches. *Journal of Glaciology* **26**(94), 179–187
- SLF (2016). RAMMS Manual Ver 1.4.1. Det sveitsiske institutt for snø- og snøskredforskning (WSL-SLF), Davos Dorf, Sveits
- Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung 73, 159–165, 212–217, 246–249, 280–285

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-07-06 Rev.nr.: 1 Vedlegg C, side: 1

Vedlegg C

FARESONEKART

Innhold

C1	Kart for enkelte skredtyper	2
C2	Faresoner hvis snøsky ikke er inkludert	5
С3	Faresoner med snøsky inkludert	10

Dokumentnr.: 20170780-02-R Dato: 2018-07-06 Rev.nr.: 1 Vedlegg C, side: 2

C1 Kart for enkelte skredtyper

Kart C.1.1 Faresonekart kun for sørpeskred

Kart C.1.2 Faresoner kun for flomskred

Kartlagt område

Faresone

<all other values>

Nominell årlig frekvens

>= 1/5000 >= 1/1000 >= 1/100

Målestokk (A3): 1:4 336 Datum: Euref89, Kartprojeksjon: UTM XX

Kilvik, Meløy kommune		
Faresoner sørpeskred	Prosjektnr. 20170780	Kart nr. 08
Faresoner for sørpeskred med årlig sannsynlighet på	Utført DI	Dato 2018-05-07
1/1000 og 1/5000	Kontrollert PG	Godkjent DI
	N	G

Kartlagt område

Faresone

<all other values>

Nominell årlig frekvens

>= 1/5000
>= 1/1000
>= 1/100

Målestokk (A3): 1:4 336

Kilvik, Meløy kommune		
Faresoner flomskred	Prosjektnr. 20170780	Kart nr. 09
Faresoner for flomskred med årlig sannsynlighet	Utført DI	Dato 2018-05-07
på 1/1000 og 1/5000	Kontrollert PG	Godkjent DI
	Z	G

NGI

C2 Faresoner hvis snøsky ikke er inkludert

Kart C.2.1 Samlet fare for skred med årlig sannsynlighet på 1/100 uten hensyn til snøskyer. Forventet maksimaltrykk (i kPa) i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet er vist med brune konturlinjer

Kart C.2.2 Samlet fare for skred med årlig sannsynlighet på 1/1000 uten hensyn til snøskyer. Forventet maksimaltrykk (i kPa) i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet er vist med røde konturlinjer

Kart C.2.3 Samlet fare for skred med årlig sannsynlighet på 1/5000 uten hensyn til snøskyer. Forventet maksimaltrykk (i kPa) i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet er vist med gule konturlinjer

Kart C.2.4 Samlet fare for skred med årlig sannsynlighet på 1/100, 1/1000 og 1/5000 uten hensyn til snøskyer.

Faresone

Nominell årlig frekvens

>= 1/100

Trykksoner snøsky 100

 1
 3
 6
 10

- 15
- 20

Målestokk (A3): 1:4 000

Kilvik, Meløy kommune		
Samlet skredfare	Prosjektnr.	Kart nr.
uten snøskyer	20170780	10
Areal med samlet	Utført	Dato
skredfare (uten snøsky)	DI	2018-05-30
> 1/(100 år)	Kontrollert	Godkjent
Isolinjer av maksimaltrykk	PG	DI
fra snøsky nær bakken (kPa)	N	G

Kartlagt område

Faresone

Nominell årlig frekvens

>= 1/1000

Trykksoner snøsky 1000

- 6
- 10
- 15
- 20
- 30

Målestokk (A3): 1:4 000

Kilvik, Meløy kommune		
Samlet skredfare	Prosjektnr.	Kart nr.
uten snøskyer	20170780	11
Areal med samlet	Utført	Dato
skredfare (uten snøsky)	DI	2018-05-30
> 1/(1000 år)	Kontrollert	Godkjent
Isolinjer av maksimaltrykk	PG	DI
fra snøsky nær bakken (kPa)	Z	G

Kartlagt område

Faresone

Nominell årlig frekvens

>= 1/5000

Trykksoner snøsky 5000

- 6	
 10	
 15	
 20	
 30	

Målestokk (A3): 1:4 000

Kilvik, Meløy kommune		
Samlet skredfare	Prosjektnr.	Kart nr.
uten snøskyer	20170780	12
Areal med samlet	Utført	Dato
skredfare (uten snøsky)	DI	2018-05-30
> 1/(5000 år)	Kontrollert	Godkjent
Isolinjer av maksimaltrykk	PG	DI
fra snøsky nær bakken (kPa)	N	G

Faresone

Nominell årlig frekvens

>
>

- >= 1/5000
- 1/1000
- >= 1/100

Målestokk (A3): 1:4 000

Kilvik, Meløy kommune		
Samlet skredfare uten snøskyer	Prosjektnr. 20170780	Kart nr. 13
Areal mad comlet	Utført	Dato
skredfare (uten snøsky)	DI	2018-05-30
> 1/(100 år)	Kontrollert	Godkjent
lsolinier av maksimaltrykk	PG	DI
fra snøsky nær bakken (kPa)	N	G

C3 Faresoner med snøsky inkludert

Kart C.3.1 Samlet fare for skred **med hensyn til snøskyer**. Faresonen for skred med årlig sannsynlighet på 1/5000 sammenfaller med den for årlig sannsynlighet på 1/1000 og omfatter hele reguleringsområdet. Forventet maksimaltrykk i snøskyer med tilsvarende årlig sannsynlighet kan bestemmes ut fra Kart C.2.1, C.2.2 og C.2.3

Kartlagt område

Faresone

Nominell årlig frekvens

- >= 1/1000
- >= 1/100

Målestokk (A3): 1:4 000

Kilvik, Meløy kommune		
Samlet skredfare med snøskyer	Prosjektnr. 20170780	Kart nr. 14
	Utført	Dato
Areal med samlet skredfare inkl. snøsky	DI	2018-05-30
	Kontrollert	Godkjent
	PG	DI
	N	

NG Kontroll- og referanseside/ Review and reference page

Dokumentinformasjon/Document information					
Dokumenttittel/Document title		Dokumentnr./Document no.			
Utredning av skredfaren i reguleringsområdet		20170780-02-R			
Dokumenttype/Type of document	Oppdragsgiver/Client	Dato/Date			
Rapport / Report	Norconsult AS, Bodø	2018-07-06			
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document ac-		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date			
cording to contract		1 / 2018-08-03			
Oppdragsgiver / Client					
Distribusjon/Distribution					
BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and					
available for NGI employees					
Emneord/ <i>Keywords</i>					
Reguleringsplan, skredfarevurdering, snøskred, flom, flomskred, sørpeskred, snøsky, SAMOS-AT					

Stedfesting/Geographical information					
Land, fylke/Country Nordland	Havområde/ <i>Offshore area</i>				
Kommune/Municipality Meløy	Feltnavn/ <i>Field name</i>				
Sted/Location Kilvik	Sted/Location				
Kartblad/Map 1928-II Svartisen	Felt, blokknr./ <i>Field, Block No</i> .				
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: 33N Øst: 452 000 Nord: 7 401 600	Koordinater/ <i>Coordinates</i> Projeksjon, datum: Øst: Nord:				

Dokumentkontroll/Document control Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001						
Rev/ Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/ Self review by:	Sidemanns- kontroll av/ Colleague re- view by:	Uavhengig kon- troll av/ Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/ Interdiscipli- nary review by:	
0	Originaldokument	2018-05-31 Dieter Issler	2018-06-26 Ulrik Domaas			
1	Anmerkninger fra Norconsult v/S. Rahasindrainy	2018-07-31 Dieter Issler	2018-08-06 Ulrik Domaas			

Dokument godkjent for utsendelse/	Dato/Date	Prosjektleder/Project Manager
Document approved for release	7. august 2018	Dieter Issler

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

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

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

www.ngi.no

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

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

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

www.ngi.no

NORGES GEOTEKNISKE INSTITUTT NGI.NO

Hovedkontor Oslo PB. 3930 Ullevål Stadion 0806 Oslo

Avd. Trondheim PB. 5687 Sluppen 7485 Trondheim

 T
 22 02 30 00
 BANK
 ISO 9001/14001

 F
 22 23 04 48
 KONTO 5096 05 01281
 CERTIFIED BY BSI

 NGI@ngi.no
 ORG.NR 958 254 318MVA
 FS 32989/EMS 612006