



Uit

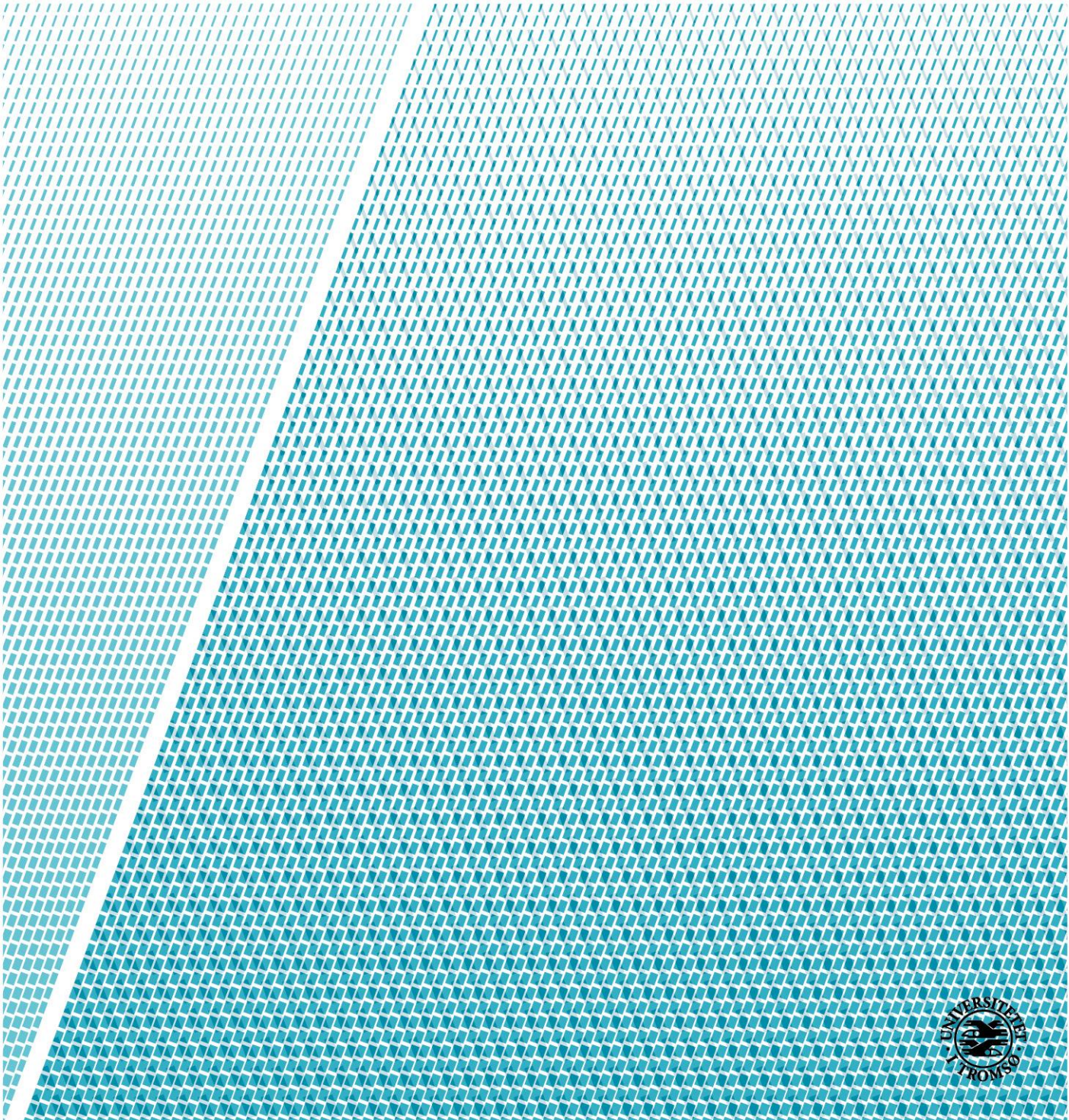
**NORGES
ARKTISKE
UNIVERSITET**

Institutt for geovitenskap

Evaluering av automatiske snøskredvarslingsanlegg

Kristin Brandtsegg Lome

Masteroppgave i GEO-3900 Geologi – Desember 2017



Sammendrag

Noen veger blir stengt på ubestemt tid på grunn av snøskredfare. Dette er frustrerende for trafikanter og det skaper økonomiske konsekvenser for næringslivet. Statens vegvesen (SVV) har testet ut to teknologier for å detektere og varsle snøskred i sanntid; doppler radar og geofoner. Radaren bruker radiobølger for å måle retning og avstand til et objekt og kan dermed benyttes til å bestemme om skredet er i bevegelse relativt i forhold til radaren. En geofon er en rystelsesmåler og kan detektere rystelser som skapes av friksjonen og støtkreftene som oppstår mellom skredmassene og grunnen. Geofonene og radarene detekterer bevegelser når et skred initieres og varsler trafikanter i form av trafikklys ved hjelp av radiokommunikasjon og avansert filtrering av signalet. Hensikten med denne oppgaven er å evaluere de første moderne varslingsanleggene til Statens vegvesen. Testsesongene til følgende anlegg blir grundig gjennomgått og evaluert: geofon- og radaranlegget ved Fv472 i Sandneslia (Nordland), radaren ved Fv337 i Utledøla (Sogn og Fjordane) og radaren ved Rv15 i Knutstugugrove (Oppland). Oppgaven sammenligner de to teknologienes fordeler og begrensninger. For å finne avstanden som kreves mellom lysskilt slik at trafikanter kan varsles i god nok tid, er skredene modellert med den dynamiske modellen RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) for å beregne skredhastighet. Både radar og geofoner har vist seg egnet for varsling av snøskred i sanntid. Deteksjonssensorene og lysskiltene er plassert hensiktsmessig i alle tre anlegg. Resultatene viser at både radar og geofoner har potensiale til å skille mellom skredtype og -størrelse. Størrelsen på signalene som skapes av et skred også vil påvirkes av de lokale forholdene og en kalibreringsperiode er derfor nødvendig for hvert enkelt anlegg. Begge teknologier har begrensninger og fordeler og bør settes opp mot behov i den enkelte situasjon for å bestemme hvilken teknologi som er mest hensiktsmessig.

Forord

For en måned siden falt sesongens første snø på Tromsøya. Den siste ukas regn hadde allerede lagt seg som snø i høyden og de ivrigste hadde for lengst tatt sin første skitur, mens jeg satt på kontoret og skrev om snø like mye som jeg fantaserte om snø.

Jeg er takknemlig for at jeg har fått skrive masteroppgave og bruke så mye tid på noe som betyr mye for meg og vil først og fremst takke veilederen min Gunne Håland. Takk for en spennende oppgave og takk for god veiledning undervegs. Takk til hele Geoteknikk og skredseksjonen i Vegdirektoratet for fire spennende sommere hvor jeg har blitt introdusert til problemstillinger jeg ikke visste fantes og har fått spennende oppgaver som har betydd mye for min faglige utvikling, og ikke minst forberedt meg på masteroppgaven. Takk til Yme Kvistedal i NGI for tour de Sandneslia i sommer, takk Kaja, Paul og pappa for korrekturlesing og ikke minst tusen takk til geokroken hos vegvesenet i Tromsø hvor jeg har tilbrakt mye tid de siste månedene. Jeg vil også takke veilederen min på UiT, Anders Schomacker for god veiledning.

Innhold

Sammendrag

Forord

Innhold

1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
2. Teori	4
2.1 Snøskred	4
2.1.1 Snø	5
2.1.2 Skredtyper	6
2.1.3 Snøskreddynamikk	11
2.2 Rapid Mass Movement Simulation RAMMS	13
2.2.1 Oppsett av RAMMS	16
2.2.2 Fremstilling av resultater	21
2.3 Beregning av avstand mellom trafikklys	22
2.4 Akseptabel risiko for skred på veg	22
2.5 Deteksjonsteknologi	24
2.5.1 Geofonanlegg	24
2.5.2 Dopplerradar	29
3. Beskrivelse av varslingsanleggene	33
3.1 Sandneslia	35
3.2 Knutstugugrove	43
3.3 Utledøla	47
4. Metode	54
4.1 Beregning av avstand mellom lysskilt	54
4.1.1 Oppsett av RAMMS	54
4.1.2 Utrekning av tid skredet bruker fra deteksjonspunkt til veg	58
4.1.3 Utrekning av tid trafikant bruker på strekningen	60
4.2 Verifisering av hendelser	60
4.2.1 Bestemmelse av skredstørrelse	61
5. Resultater	62
5.1 Oppsummering av detekterte skred og falske alarmer	62
5.1.1 Sandneslia	62
5.1.2 Knutstugugrove	65
5.1.3 Utledøla	69
5.2 Lokalisering av skred	72

5.3 Differensiering mellom skredstørrelser	73
5.4 Differensiering mellom skredtyper	74
5.5 Filtrering av signal.....	75
5.6 Plassering av deteksjonssensorer og skilt.....	76
5.7 Investeringskostnad og vedlikehold (kost/nytte)	77
5.8 Fordeler og begrensninger	77
6. Diskusjon	80
6.1 Detekterte skred og falske alarmer	80
6.2 Lokalisering av skred	84
6.3 Differensiering mellom skredstørrelse	85
6.4 Differensiering mellom skredtyper.....	86
6.5 Plassering av deteksjonssensorer og skilt.....	87
6.6 Investeringskostnad og vedlikehold (kost/nytte).....	89
6.7 Fordeler og begrensninger	91
7. Konklusjoner.....	93
8. Referanser.....	95
Vedlegg A.....	103

/1

Innledning

1.1 Bakgrunn

Bratte fjell og fjorder gjør det utfordrende å bygge veger i Norge. Kravene til vegstandard og trafikksikkerhet er høye og skredsikring er ofte en problemstilling som må tas hensyn til. I tillegg til i at det i perioden 1998-2008 ble registrert 6500 snøskred på det norske vegnettet, er vegene ofte er stengt over kortere eller lengre tid på grunn av fare for skred (Norem, 2014). I Norge er vurdering av skredfare en viktig samfunnsoppgave, men den kan være utfordrende både praktisk og økonomisk.

Folk reiser mer og aksepterer derfor i stadig mindre grad langvarige vegstengninger (Steinkogler et al., 2016). «Vegen er stengt på ubestemt tid», «Ny vurdering tas i morgen» er fraser som ofte møter trafikanten i forbindelse med skredfare. Ikke bare er denne uforutsigbarheten frustrerende for den enkelte, men en stengt veg kan også skape økonomiske konsekvenser for næringslivet. I lokalsamfunn som Veitastrond i Sogn og Fjordane kan en stengt veg føre til at melkebøndene må helle ut tusenvis av liter med melk fordi melkebilen ikke når frem (Svanes, 2011).

Med klimaforandringer kommer også endringer i skredmønstre (Martin et al., 2001; Stethem et al., 2003; Lazar & Williams, 2008), da utløsning av skred og særlig snøskred er knyttet til værforhold som nedbør, temperatur og vind (Schweizer et al., 2003; McClung & Schaerer, 2006). Tid er penger og samtidig som at det i mindre grad aksepteres at en veg er stengt, aksepteres det også mindre risiko. I kombinasjon skaper dette en situasjon hvor det er en kamp om kostnadseffektivitet for å sikre flest

mulig veger, samtidig som at skredsikringen må kunne tilpasses fremtiden og vare lenge.

I dagens samfunn blir stadig mer av hverdagen automatisert. Biler kjører snart av seg selv, fly flyr på autopilot, brød baker seg selv med brødbakemaskin, hytta er fyrst opp når vi kommer frem og så videre. Hvert år stenges norske veger på grunn av snøskred. Er det mulig å sikre vegene automatisk også?

Ny teknologi tas stadig i bruk for automatisk deteksjon av snøskred, og teknologi får nye bruksområder. Blant annet kan infralyd brukes til å detektere snøskred (Humstad et al., 2016a; Lunde, 2017), bakkebasert radar brukes til å overvåke bevegelsen i glideskred (Humstad et al., 2016b; Skrede et al., 2016) og satellittbasert radar brukes til å overvåke skredaktivitet over større områder (Eckerstorfer et al., 2017). Ingen av disse metodene kan foreløpig brukes til å varsle trafikanter om snøskred i sanntid. Geofoner og radar derimot, har vist seg å være kostnadseffektiv og pålitelig teknologi for å fjerndetekttere skredaktivitet og varsle snøskred i sanntid (Leprettre et al., 1996; Suriñach et al., 2001; Bessason et al., 2007; Meier & Lussi, 2010; Meier et al., 2016). Noen av fordelene med å bruke denne typen teknologi til sanntidsvarsling av snøskred er at det er et fleksibelt og enkelt system som kan justeres når som helst.

På bakgrunn av et økende behov for skredsikring som kan tilpasses klimaendringer og er kostnadseffektive har Statens vegvesen siden 2014 økt sin satsning på automatisk varsling av snøskred i sanntid. Hensikten med konseptet automatisk skredvarsling i sanntid er å detektere skred som har kommet i bevegelse, og varsle trafikantene med lyssignal, slik at de unngår å kjøre inn i skredområdet når et skred har løsnet opp i fjellsiden. På denne måten kortes stengetiden ned da vegen kun trenger å være stengt når det faktisk har gått skred.

1.2 Problemstilling

Målet med oppgaven er å evaluere funksjon og nytte av tre av Statens vegvesens automatiske snøskredvarslingsanlegg. Teori om snøskred og teknologi (geofon og radar) er derfor en viktig del av oppgaven. Videre vil oppgaven ta for seg en evaluering av de første sesongene i anleggene, basert på erfaringene fra de første sesongene. For å sikre at avstanden mellom lysskilt er tilstrekkelig for at en trafikant

skal komme seg forbi den skredutsatte strekningen¹ før et snøskred når vegen, er skredenes hastighet beregnet med en numerisk modell, Rapid Mass Movement Simulation (RAMMS). Det er samtidig viktig å sette lys på årsakene til at det tekniske har fungert bedre i noen anlegg enn andre slik at helhetsvurderingen av en teknologi ikke feilvurderes ut fra utfordringer med for eksempel strømtilførsel eller internettdekning. Til slutt er det forsøkt å diskutere erfaringene fra Norge mot erfaringer fra lignende prosjekter internasjonalt.

Følgende spørsmål skal besvares i oppgaven:

- Hvordan har de ulike anleggene fungert de første sesongene? Hvor mange skred har gått og hvor mange har blitt detektert?
- Hvilken teknologi (radar, geofoner) fungerer best til å skille mellom skredtyper, størrelser og dynamikk i skredene, samt lokalisering av skredene i skredbanen?
- Hvilken teknologi har best mulighet til å filtrere signaler slik at falske alarmer reduseres?
- Er deteksjonssensorene og skilt plassert riktig på de aktuelle anleggene? Vil skredet allerede ha nådd vegen før varslingen har funnet sted?
- Hva er investerings- og driftskostnadene for anleggene?
- Hvordan er kost/nytteverdien² sammenlignet med passive, tradisjonelle tiltak?
- Hvilke fordeler og begrensinger har teknologiene?

Denne masteroppgaven er i hovedsak en evaluering av de første sesongene i tre automatiske snøskredvarslingsanlegg; geofon- og radaranlegget ved Fv472 i Sandneslia (Nordland), radaren ved Fv337 i Utledøla (Sogn og Fjordane) og radaren ved Rv15 i Knutstugugrove (Oppland).

¹ En skredutsatt vegstrekning er en strekning hvor det i løpet av de siste 20 årene har vært minst 3 stengninger som følge av skred, eller minst 3 hendelser per km på strekningen.

² Med kost/nytteverdi menes her hvor nyttig anlegget er (altså i hvilken grad det reduserer skredfaren for trafikanten) i forhold til kostnaden.

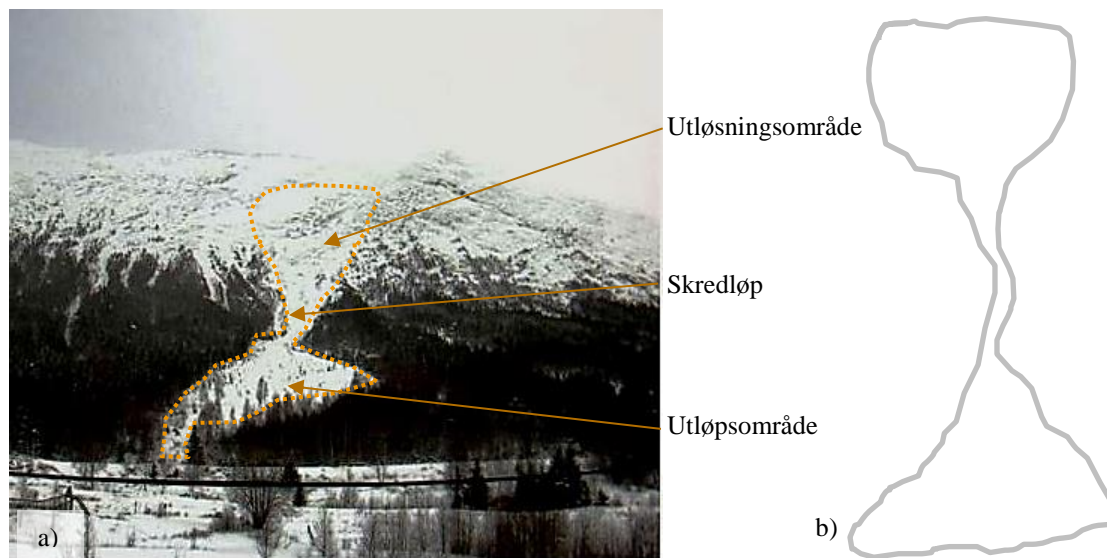
/2

Teori

2.1 Snøskred

Snøskred er en spontan forflytning av større mengder snø nedover en fjellside (Schweizer et al., 2003; Jaedicke, 2014). Snø settes som regel i bevegelse når skjærstresset overgår skjærstyrken til snøen (Schweizer et al., 2003; McClung & Schaerer, 2006; Norem, 2014). Som figur 1 viser, består av tre deler: utløsningsområde, skredløp og utløpsområde (Jaedicke, 2014; Lied et al., 2014). For at snø skal settes i bevegelse må deler av snødekket løsrive seg fra resten av snødekket og dette skjer i utløsningsområdet. Terrenget her er oftest over 30 grader bratt, men det finnes ingen nøyaktig nedre grense fordi snøforholdene og skredtypen påvirker hvilken helning som skal til for at et skred går (McClung & Schaerer, 2006; Jaedicke, 2014). Typiske utløsningsområder for skred er større botner, åpne skåler og forsengkninger, bratte elvegjel, skar og svaberg (Jaedicke, 2014). Botner, forsengkninger og skar samler mye snø fordi de ligger i le for vinden fra flere sider og vinden tar mindre tak i snøen her. I skredløpet er skredmassene i full bevegelse og kreftene er så store at skredet passerer dette området uten å legge igjen betydelige mengder masse. Terrenget i skredløpet kan være kanalisert, åpent eller en blanding. Typisk helning for skredløpet er 15-30 grader (McClung & Schaerer, 2006). I utløpsområdet slakker terrenget ut, skredet mister energi og skredmassene avsettes. Snøen avsettes ofte i form av en eller flere skredtunger (Jaedicke, 2014). I Norge

varierer høydeforskjellen fra toppen av utløsningsområde til bunn av utløpsområde fra 5 til 1500 meter (Lied et al., 2014).



Figur 1. a) Utløsningsområdet, skredløpet og utløpsområdet illustrert på et bilde fra snøskred i Knutstugugrove. Bildet er tatt av kameraet på Cautus Geo sin snøskredradar den 13. januar 2015. b) Prinsippskisse av et snøskred med utløsningsområde, skredløp og utløpsområde.

Menneskeutløste skred er en trussel for folk som ferdes i fjellet og naturlige skred truer infrastruktur (Schweizer et al., 2003). Utløsning av naturlige skred er i hovedsak avhengig av tre faktorer; snødekket, været og terrenget (Schweizer et al., 2003; Tremper, 2008). Kunnskap om dette danner dermed grunnlag for vurdering av skredfare. De mest vanlige utløsningsårsakene for naturlige skred er pålagring i form av nedbør, vind og temperaturendringer (Schweizer et al., 2003). Snødekket kan være ustabil, men om terrenget ikke er bratt nok vil ikke skjærstresset ha mulighet til å overgå skjærkreftene og snø vil ikke settes i bevegelse (Norem, 2014).

2.1.1 Snø




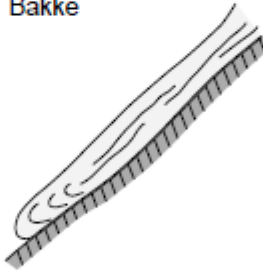
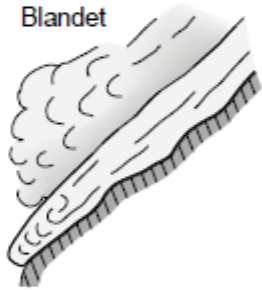
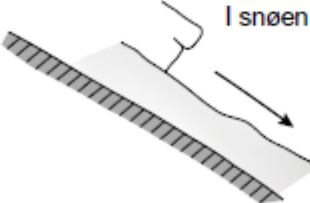
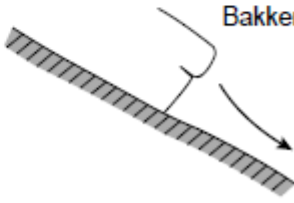
Snøkrystaller er i konstant endring fra de faller fra himmelen til de smelter bort og blir til vann (Norem, 2014). Begrepet metamorfose lånes fra geologi for å beskrive denne endringen og det skiller mellom *overflateprosesser*, *nedbrytende* -, *oppbyggende* – og *smelte-metamorfose*. Til forskjell fra geologiske materialer, eksisterer snø veldig nærme sitt eget smeltepunkt og det skal kun små endringer i trykk og temperatur til for at materialet forandres (Schweizer et al., 2003; Norem, 2014). Metamorfosen av snø styres derfor av været, og temperatur, vind, nedbør og solinnstråling påvirker

metamorfosegrad og -type. Prosessen har betydning for utvikling av snødekkets stabilitet og dermed også utviklingen av skredfarlige situasjoner. Metamorfose av snø styrer lagdelingen av snø og kan danne svake lag, glidelag og flak som er det som skal til for å danne flakskred. Svake lag kan for eksempel bestå av nedsnødd overflaterim eller kantkornet snø. Glidelaget er oftest en glatt, jevn overflate uten store ruheter, som for eksempel et skarelag. Flaket kan bestå av snø med en viss kohesjon, for eksempel vindpakket snø (McClung & Schaerer, 2006).

I likhet med geologiske materialer har også snø en intern friksjonsvinkel. Med intern friksjonsvinkel menes den bratteste gradienten en skråning bestående av løsmasser (her: snø) forholder seg stabil (Bartelt et al., 1999). Den indre friksjonsvinkelen til snø varierer med snøkorngemetri, temperatur, kohesivitet og vanninnhold (McClung & Schaerer, 2006). Eksempelvis kan sørpe ha en indre friksjonsvinkel på 15°, rundede korn kan ha rundt 35° og nysnø med forgreininger en indre friksjonsvinkel på opptil 80° (McClung & Schaerer, 2006).

2.1.2 Skredtyper

Snøskred deles vanligvis inn i flakskred og løssnøskred, se figur 2 (McClung & Schaerer, 2006; Norem, 2014). En tredje skredtype som skiller seg fra de andre er sørpeskred (Hestnes, 1985). Etter skredtype er det vanlig å klassifisere skredene etter bevegelse, om glideplanet er innad i snøpakken eller langs bakken og etter vanninnhold. Bevegelsen til skredet kan være som en snøsky hvor hele skredmassen er i suspensjon, flytende langs bakken eller en kombinasjon. Vanninnhold, eller grad av fuktighet, påvirker utløsningsmekanismene og bevegelsen til skredet (Lied et al., 2014). I skredbaner med stor høydeforskjell kan snøskred starte som et tørt skred og utvikle seg til et vått skred etter hvert som temperaturen stiger nedover i skredbanen (Steinkogler, 2015). Sørpeskred skiller seg ut fra denne typiske klassifikasjonen da vanninnholdet er ekstra høyt og dynamikken i sørpeskred derfor er ulik fra de andre snøskredtypene (Hestnes, 1985).

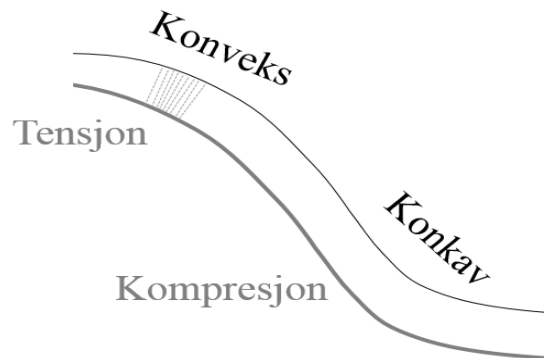
Utløsingstype	Flaskskred		Løs - skred	
				
Bevegelse	Luft	Bakke	Blandet	
				
Gildeplan	I snøen		Bakken	
				
Vann - innhold	Tørt	Fuktig	Vått	

Figur 2. Klassifisering av snøskred. Figur hentet fra Norem (2014).

Flaskskred

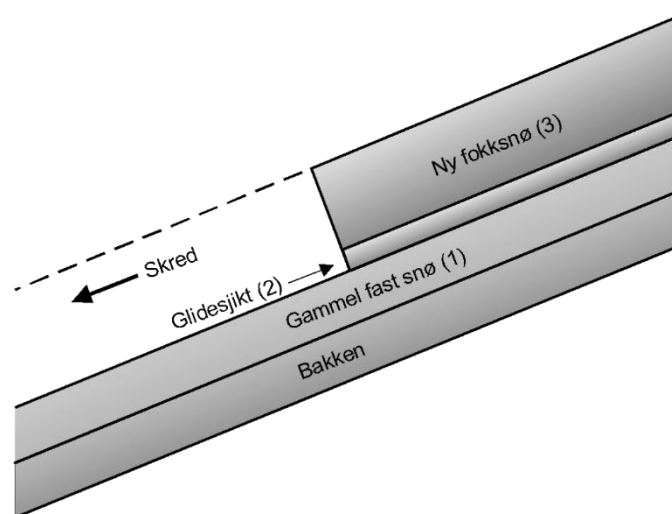
Flaskskred er den mest ødeleggende snøskredtypen (McClung & Schaerer, 2006; Lied et al., 2014). Flaskskred innebærer utløsning av et mer eller mindre sammenhengende flak av snø (for eksempel fokksnø) på et svakt lag i snødekket. Det svake laget har lav tetthet og består typisk av kantkorn (populært kalt sukkersnø) eller nedsnødd overflaterim. Når det svake laget svikter og går i brudd forplanter bruddet seg langs det svake laget. Utbredelsen og propageringsevnen til det svake laget har derfor innvirkning på hvor stort skredet kan bli. Selve kollapset av det svake laget kalles også

spontant eller progressivt skjærbrudd (Kristensen & Lied, 2003). Kollapset skaper tensjon i flaket og vil føre til et strekkbrudd der tensjonskreftene i snødekket er størst. Tensjonskreftene er ofte størst ved terrengformasjoner som konvekse partier og minst i konkave partier (figur 3) (Schweizer et al., 2003; McClung & Schaerer, 2006).



Figur 3 Viser hvordan kurvaturen av en skråning kan påvirke tensjonskreftene. Modifisert etter McClung og Schaerer (2006).

Under det svake laget ligger glidelaget, en jevn flate (figur 4). Glideflaten kan være midt i snødekket, eller det kan være helt nede ved bakken. Om glideflaten befinner seg helt nede ved bakken er den ofte langt gress eller svaberg. Årsakene til at skred løsner nede ved bakken er som oftest; (1) kollaps av et svakt lag ved bakken eller (2) smeltevann perkolerer snødekket ned til bakken og skaper mindre friksjon her. Denne typen flaskred kalles gledesred og er mest vanlig ved våte flaskred.



Figur 4 Simplifisert oppdeling av snødekket ved et potensielt flaskred. Figuren er hentet fra Jaedicke (2014).

Strekkbruddet skjer som følge av at snødekket kollapser. Det dannes en sprekk og denne sprekken utvikles til en bruddkant som avgrenser skredet i bakkant. Bruddkantens lengde kan være fra noen få meter til et par kilometer lang (Lied et al., 2014), og alt fra noen cm til flere meter høy (Norem, 2014). Volumet til flakskred kan altså variere og formen på skredet er ofte rektangulært. Blokken holder seg i praksis ikke intakt særlig lenge, men bryter opp og raser nedover fjellsiden. Kollisjon av partikler innad i skredet og mot terrenget gjør at flaket brytes opp (McClung & Schaerer, 2006).

De fleste snøskred utløses fordi styrken til et snølag overskrides av belastningen det må bære (Schweizer et al., 2003; McClung & Schaerer, 2006; Jaedicke, 2014), skjærstresset overgår skjærstyrken. Denne kritiske situasjonen oppstår når snøens styrke svekkes eller belastningen på snødekket øker. Snøens styrke kan svekkes når bånd mellom snøkrystallene smelter. Belastningen på snødekket kan for eksempel øke ved snøakkumulasjon eller en skikjører. Det finnes både våte og tørre flakskred. Mest typisk for de våte skredene er at skjærstyrken svekkes (Baggi & Schweizer, 2009), mens for de tørre skredene er det mer typisk at skjærstresset øker (McClung & Schaerer, 2006).

Skjærbruddteorien anser det svake laget som et lag uten noen tykkelse, men dette er en forenkling (Heierli et al., 2008; Simenhois & Birkeland, 2011). I virkeligheten finnes det som regel et svakt lag med en viss tykkelse og ofte høy porøsitet. I denne oppgaven er det tatt utgangspunkt i at skjærbruddteorien er en forenkling av virkeligheten, men at den tross sin enkelhet er nøyaktig nok for formålet som her er å beregne bruddhøyden til snøskred.

Statistisk sett løsner tørre flakskred vanligvis i terreng 25-55 grader bratt, men det vanligste er mellom 35 og 45 grader (McClung & Schaerer, 2006). I terreng slakere enn 25 grader vil vanligvis ikke skjærstress- og deformasjonen være stor nok til at et brudd i kan skje, og ved helning brattere enn 55 grader vil sporadiske løssnøskred (sluffing) sørge for at det ikke lagres nok snø til at det kan dannes flak (McClung & Schaerer, 2006). Ved spesielle forhold der snøen er spesielt klebrig kan større snømengder klare å legge seg terreng brattere enn 55 grader og flakskred kan løsne på denne helningen. Våte flakskred kan løsne i slakere terreng enn tørre. Våte flakskred

går som oftest første gangen snødekket blir oppbløtet, som regel på grunn av regn, solinnstråling eller temperaturstigning (NVE, 2016).

Løssnøskred

Løssnøskred starter i et punkt og beveger seg som et triangel nedover fjellsiden etter hvert som skredet river med seg snømasser og dyttes nedover (McClung & Schaerer, 2006). Prosessen initieres når kohesjonen i snøen er lav og utløsningsområdet er brattere enn den interne friksjonsvinkelen til snøen. Løssnøskred involverer som oftest kun den øverste delen av snødekket og starter i overflaten eller nær overflaten. Nysnø har lav bindekraft og følgende tilnærmet ingen friksjon. Løssnøskred vil dermed løsne etter at en tilstrekkelig mengde nysnø har lagt seg eller akkurat i det bindingene mellom snø korn har smeltet og friksjonen i dette laget av snøen er lav. Det siste skjer når den øverste delen av snødekket blir varmet opp enten av sola eller høyere lufttemperaturer.

Tørre løssnøskred forekommer ofte i områder med kaldt klima og lite vind (McClung & Schaerer, 2006). Årsaken er at kalde temperaturer svekker krystallenes evne til å binde seg sammen (sintring) og lave temperaturer favoriserer nedbrytende metamorfose slik at krystallene blir runde, uten forgreininger og ikke binder seg til hverandre like lett. Lite vind hindrer snøkrystallene i å binde seg sammen og kohesjonen er lav.

Sammenlignet med flakskred fører løssnøskred generelt til mindre ødeleggelser da de som oftest har lite volum og kort utløpsdistanse (Norem, 2014). Våte løssnøskred har høyere tetthet og har dermed større potensiale til å virke ødeleggende enn tørre løssnøskred.

Sørpeskred

Sørpeskred oppstår kun i helt vannmetta snø. Altså er snøkrystallene helt separert fra hverandre med vann, noe som skjer når ca. 15 % av volumet er vann. Regn og/eller snøsmelting kan føre til at snøpakken blir vannmetta. Høyere vanninnhold fører til en lavere indre friksjonsvinkel og sørpeskred forekommer ved helninger langt under det som er vanlig for løssnø- og flakskred (McClung & Schaerer, 2006).

2.1.3 Snøskreddynamikk

Snøskreddynamikk er læren om skredets bevegelse. Det er viktig å forstå hvordan snøskred beveger seg for å (1) beregne utløpsdistanse og utbredelse; (2) kunne tilrettelegge for deteksjon av skred og (3) bestemme parametere i snøskredmodeller på best mulig måte. I denne sammenhengen er det spesielt viktig å forstå hvordan skredene oppfører seg for at de skal kunne detekteres. Snøskreddynamikk varierer i stor grad med vanninnhold da det bestemmer tettheten på skredet og om skredet har en puddersky eller ikke (McClung & Schaerer, 2006). Derfor er dette kapittelet delt inn i våte og tørre skred.

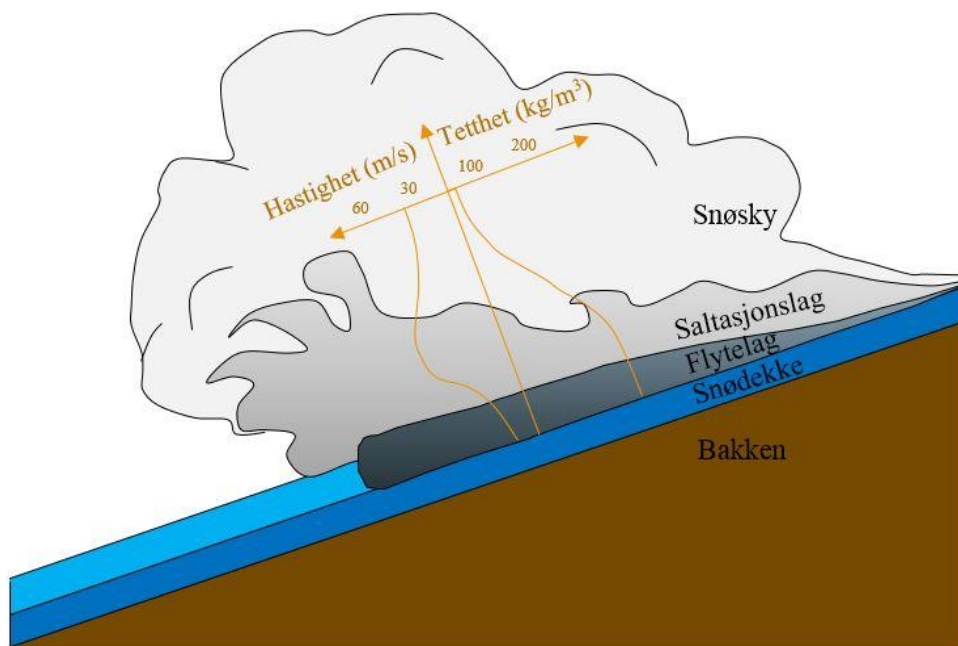
Ved deteksjon av snøskred spiller dynamikken i skredet en rolle, da det først og fremst er kjernen i snøskredet som produserer seismiske signaler (Kogelnig et al., 2011) og har høy nok tetthet til at bølgene fra radaren kan reflekteres (Gauer et al., 2007). Skred med en høytetthetskjerne, som flakskred og våte skred, vil derfor kunne detekteres. Friksjonen mot underlaget kreves for å produsere seismiske signaler. Friksjonen er høyere ved våte skred enn ved tørre skred på grunn av våte skreds høyere tetthet og dermed også bedre evne til å følge terrenget. De seismiske signalene fra våte skred vil generelt være lengre og ha høyere frekvens (Pérez-Guillén et al., 2016). Tørre skred med lavere tetthet har en mer turbulent dynamikk og interaksjonen mellom den turbulente strømmen og glideflaten til skredet vil produsere kortere signaler med lavere frekvens (Pérez- Guillén et al., 2016).

Tørre flakskred

De fleste tørre snøskred kan deles inn i tre deler; flytelag (kjerne), saltasjonslag og snøsky (figur 5) (McClung & Shaerer, 2006; Gauer et al., 2008; Kogelnig et al., 2011). Flytelaget består av ca. 90 % av massen til skredet og kalles også kjernen til skredet. Denne delen har den høyeste tettheten i skredet og består typisk av 70 % luft og 30 % snøpartikler. Laget kalles flytelag fordi bevegelsen stort sett er flytende langs bakken. Vanlig høyde på kjernen er 1-2 m og maks 5 m (McClung & Schaerer, 2006).

Deler av kjernen fluidiseres og danner et saltasjonslag med en tetthet på 30-100 kg/m³ (Gauer et al., 2008). Saltasjonslaget består av en kombinasjon av luft og snøpartikler, både klumper og snø korn som ruller og hopper. Det meste av energien rettes med fartsretningen, men i saltasjonslaget vil noe av energien til skredet vil spres til sidene og kalles fluktasjonsenergi (Bartelt et al., 2006). Så lenge skredet beveger seg raskere

enn 10 m/s, vil kjernen være omringet av en snøskye med lavere tetthet (McClung & Schaerer, 2006; Kogelnig et al., 2011). Snøskyen beveger seg som en turbulent strøm (Gauer et al., 2008). Snøskyen består av mindre snø partikler i suspensjon (kan bestå av så lite som 1 % snøpartikler) og tettheten er typisk 3-5 kg/m³. Saltasjonslaget og suspensjonslaget har den høyeste hastigheten, mens flytelaget på grunn av friksjon med underlaget beveger seg tregest (Gauer et al., 2008). Tørre flakskred kan oppnå hastigheter opp mot 60-70 m/s (Norem, 2014). Snødekkets egenskaper er viktig for hvor mye snø skredet vil rive med seg. Med rivning av snø øker skredets masse og kan føre til lengre utløpsdistanser.



Figur 5 Forenklet skisse av snøskreddynamikk. Flytelaget har den høyeste tettheten og ligger nederst i skredet, saltasjonslaget med noe lavere tetthet og høyere hastighet ligger oppå og snøskyen med lavest tetthet øverst. Figuren er modifisert etter Gauer et al. (2008); McClung & Schaerer (2006) og Pérez-Guillén (2016).

Tørrsnøskred

Tørrsnøskred beveger seg som en turbulent strøm hvor det meste av snøpartiklene er i suspensjon. De mangler kjerne og følgelig er tettheten lav, ca. 10 % av flakskred. Kraften til å ødelegge er derfor betydelig mindre (McClung & Schaerer, 2006).

Våte skred

Våte skred har generelt en lavere hastighet enn tørre skred og saltasjonslaget og snøskyen vil vanligvis være mindre, eller fraværende (Pérez-Guillén, 2016). Våte

flakskred kan ved høyt vanninnhold nå langt, men generelt har de kortere utløpsdistanse enn tørre flakskred på grunn av sin høye tetthet og dermed også høyere friksjon med underlaget. Dette gjør at de bremses fortere i utløpsområdet. Det økte vanninnholdet i våtere snømasser fører til større kohesjon innad i materialet (Håland et al., 2015). Den høye tettheten gjør at våte skred har potensiale til å påføre et stort trykk på hindringer som står plassert i skredbanen. Hastigheten til våte skred er lavere enn tørre flakskred og overstiger sjelden 40 m/s (Norem, 2014). Våte skred følger terrenget i større grad enn tørre skred og har mer kontakt med terrenget (Pérez-Guillén, 2016). Fluktasjonsenergien spiller derfor ikke en like stor rolle som i tørre skred og i de fleste tilfeller kan den sees bort fra (Bartelt et al., 2006).

2.2 Rapid Mass Movement Simulation RAMMS

RAMMS er et todimensjonalt skredmodelleringsverktøy som brukes til skredfarekartlegging, planlegging og dimensjonering av skredsikringstiltak, samt tilbakeregning av hendelser. Programmet er et hjelpemiddel designet for å være brukervennlig og enkelt å stille inn samtidig som det bruker den nyeste teknologien og forskningen på området. Skredbevegelsen til snø-, stein-, og flomskred simuleres fra et definert utløsningsområde til utløpssonen. Snøskredmodulen brukes til å simulere trykket, utløpslengden og hastigheten til store skred (Bartelt et al., 2013). Programmet ble utviklet i Sveits ved WSL institutt for snøskredforskning SLF og er kalibrert basert på observerte skred i Alpene (Bartelt et al., 2013). Målgruppen for programmet er skredingeniører og forskere. RAMMS har en praktisk tilnærming. Målene ved utviklingen av programmet var å løse begrensningene til de allerede eksisterende endimensjonale modellene, samt at resultatene skulle kunne fremstilles på kart for å øke brukervennligheten av resultatstolkningen. Utviklingen av modellen er basert på observasjoner av både naturlig og kunstig utløste snøskred.

Modellering av snøskred er først og fremst viktig for å kunne si noe om hastighet, utløpsdistanse og utbredelsen av snøskred. Denne informasjonen er igjen viktig for dimensjonering og plassering av sikringstiltak, samt faresonekartlegging. Dessuten øker vår forståelse av snøskreddynamikk ved å modellere ulike scenarioer. Ved å endre inputparameterne kan man for eksempel se hvordan fuktighet påvirker viskositeten og dermed utløpslengden og energien et skred kan oppnå. Hensikten med å bruke modelleringsverktøy i denne oppgaven er for å kunne beregne hvor lang tid

skredene bruker fra de blir detektert til de når vegen, samt utløpsdistansen til skredene. Dette er viktig for å beregne avstanden som kreves mellom trafikklysene for at en trafikant ikke skal kunne bli tatt av et skred hvis den kjører inn i området like før et skred går, men før trafikklyset viser rødt signal. Skredet vil normalt vil ha en hastighet 3-5 ganger bilens hastighet og avstanden mellom deteksjonspunkt og vegen bør derfor være minimum 5 ganger så stor som avstanden mellom lysene (Norem, 2014). Utløpsdistansen er nødvendig for å evaluere om det er trygt å stoppe ved lysskiltene. Det finnes to typer modeller, empiriske og numeriske.

I Norge har den empiriske modellen alpha-beta tradisjonelt blitt brukt til å beregne utløpsdistanse av snøskred og tegne faresoner i Norge (Derron & Sletten, 2016). I takt med at både teknologien og forståelsen for skred øker, har modellene blitt stadig mer komplekse. I 2015 ble ulike modelleringsverktøy anvendt på norske snøskred i forbindelse med naturfareprosjektet NIFS (Håland et al., 2015). Både empiriske og numeriske modeller ble sammenlignet og resultatene viste at generelt beregner de numeriske modellene for korte utløpsdistanser, mens de empiriske beregner for lange. Ved å tilpasse klimaforholdene til norske forhold ga RAMMS de mest nøyaktige resultatene. På bakgrunn av resultatene fra denne studien har det i denne oppgaven blitt besluttet å bruke RAMMS for å beregne hastigheten til skredene. RAMMS har dessuten også god brukervennlighet (Frekhaug, 2015). Med brukervennlighet menes det at modellen enkelt kan settes opp ved objektive kriterier i størst mulig grad, slik at resultater også i størst mulig grad er sammenlignbare selv om de er gjort av ulike personer.

Numeriske modeller er mer kompliserte enn empiriske og anvender matematiske ligninger til å beskrive massebevegelsen. Numeriske snøskredmodeller er basert på generell hydraulisk teori og betrakter snø som en ikke-Newtonsk væske i en åpen kanal. En ikke-Newtonsk væske er en væske hvor viskositeten er avhengig av skjærhastigheten (flytehastigheten) (Store norske leksikon, 2009b). En ikke-newtonsk væske kan sammenlignes med oppførselen til snø som raser nedover en fjellside (Håland et al., 2016). Ved å anvende matematiske ligninger og betrakte snø som en ikke-newtonsk væske, gir disse modellene informasjon om kompliserte dynamiske prosesser i skredene. Kompleksiteten til modellene varierer og mens noen modellerer i 3D (for eksempel Snow Avalanche MOdeling and Simulation SAMOS), gjør andre

det i 2D, men over et tredimensjonalt terreng (for eksempel RAMMS). Betrakningen av snøskred som et hydraulisk materiale er en forenkling, da snøskred beveger seg som et fast stoff, væske og gass (Norem, 2014).

De numeriske snøskredmodellene blir stadig mer pålitelig etter hvert som forståelsen av snøskreddynamikk og snø øker (Christen et al., 2002). Numeriske snøskredmodeller hjelper sammen med feltobservasjoner og historiske data til med å øke forståelsen av hvordan snøskred beveger seg i komplekst terreng. Selv for skredingeniører med god forståelse for skreddynamikk kan det være utfordrende å definere parameterne for modellene og dette stiller krav til at parameterne i størst mulig grad kan defineres objektivt. Dess større usikkerhet det er for valg av inputparameterne, dess større usikkerhet knyttes til resultatet av simuleringen. Økt kompleksitet av en modell vil ikke nødvendigvis bety økt nøyaktighet av resultatene (Salm, 2004).

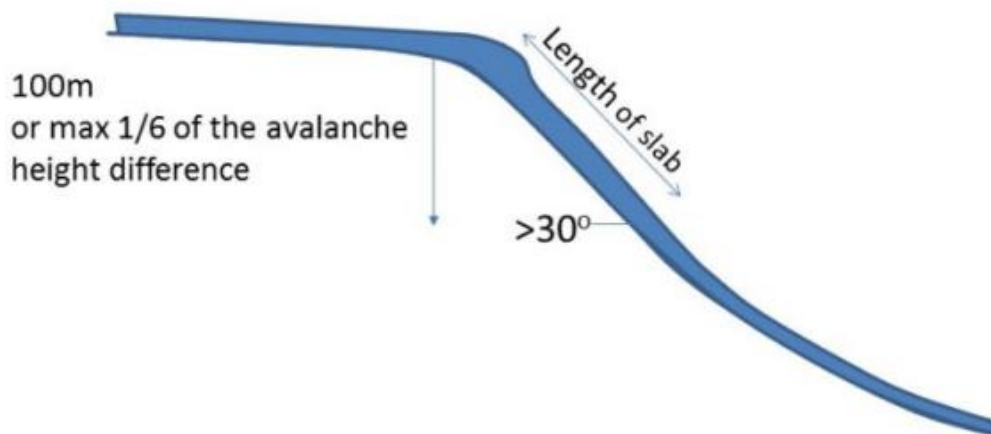
Numerisk snøskredmodellering begynte i Sveits i 1955 med Voellmy blokkmodellen (Christen et al., 2002). Målet med utviklingen av modellen var å kunne beregne utløpsdistansen til ekstreme snøskred etter en ødeleggende snøskredvinter i 1951. I modellen ble snøskred modellert som en blokk som sklir ned en fjellside hvor gravitasjon er den drivende kraften og friksjon er den tilbakeholdende kraften. Modellen tar utgangspunkt i Newtons andre lov om massebevaring. Det antas dermed at skredet ikke river med seg masser nedover i skredløpet. Friksjonen ble delt i to deler, Coulomb friksjon μ og turbulent friksjon ξ (Bartelt et al., 1999). Friksjonen i skredet varierer med tetthet, temperatur og fuktighet og RAMMS tar derfor hensyn til fluktuasjonsenergien (Bartelt et al., 2006). Friksjonsparameterne er vanskelige å måle i et virkelig snøskred og de kan til og med variere i tid i løpet av et snøskred (Bartelt et al., 2015). Senere kom Voellmy-Salm modellen som er en videreutvikling av Voellmy-modellen og etter hvert ble flere programmer utviklet, blant annet Aval-1D, RAMMS, Elba+, SAMOS AT (SLF, 2016).

2.2.1 Oppsett av RAMMS

Løsneområde

Løsneområdet defineres manuelt basert på terrengeanalyse. Det kan tegnes direkte i RAMMS eller det kan importeres som en shape fil fra ESRI ArcMap. Plassering og dimensjoner til løsneområdet er det som har størst påvirkning på resultatene og det krever erfaring for å definere dette riktig. Imidlertid finnes det noen objektive kriterier å forholde seg til:

Lengden av løsneområdet defineres ut fra antagelsen om at skred oftest løsner i leformasjoner bak rygger der det samler seg mer snø enn ellers i fjellsiden (Bakkehøi & Norem, 1994). På bakgrunn av denne antagelsen anbefaler Bakkehøi & Norem (1994) at lengden på løsneområdet ikke overstiger 100 høydemeter (lengre ned i fjellsiden er snødekket i følge Bakkehøi & Norems (1994) antagelse betydelig tynnere) forutsatt at terrenget i løsneområdet ikke blir slakere enn 30° (figur 6). Økning av skredlagets lengde vil vanligvis gi en økning i utløpsdistansen og et 100 meter langt løsneområde kan derfor gi urealistisk lange utløpsdistanser i korte skredbaner. I skredbaner med mindre enn 600 meter høydeforskjell anbefales det derfor at løsneområdets lengde tilsvare 1/6 av den totale høydeforskjellen.



Figur 6. Objektive kriterier for bestemmelse av lengden på løsneområdet. Figuren er hentet fra Håland et al. (2016).

Variasjon i terrenghelning bør ikke være større enn 5°. I følge Bakkehøi & Norem (1994) er det rimelig å anta at utløsningen av et flakskred skjer i et område med forholdsvis jevn terrenghelning.

Bruddkanten tilsvarer bredden av skredet. I kjente skredløp finnes det som oftest kunnskap om den bakre avgrensningen av løsneområdet fordi bakveggen står igjen etter at skredet har gått. Det kan likevel være utfordrende å vurdere utbredelsen av skredet da bruddforplantningen i et svakt lag varierer med snødekket og derfor kan variere noe fra gang til gang skredet går.

Bruddhøyden

Bruddhøyden har stor innvirkning på volumet av skredmassene. Det finnes flere måter å bestemme denne på. I Sveits, der RAMMS ble utviklet, brukes det data fra værstasjoner som kalibreres for å passe utløsningsområdet best mulig (Salm et al., 1990). Kalibreringen tar blant annet hensyn til akkumulert snø siste 3 døgn, høyde over havet, pålagring av vindtransportert snø og helningsvinkelen i løsneområdet. Metoden er avansert og har mange steg. Dette gjør terskelen for å gjøre feil lavere og særlig i Norge hvor det finnes langt færre værstasjoner og generelt lite datagrunnlag for bruk av en slik metode, er denne metoden lite hensiktsmessig.

Som tidligere beskrevet, løsner skred som oftest når skjærstresset (de drivende kreftene) på et svakt lag overstiger skjærstyrken (de stabiliserende kreftene) til det svake laget. Fordi skjærstresset øker med helningen til den utsatte skråningen, vil bruddkantens høyde være avhengig av terrenghelningen (Bakkehøi & Norem, 1994). En slakere skråning krever mer snø over det svake laget og dermed en høyere bruddkant for å skape nok skjærstress til å overstige skjærstyrken og omvendt. Ved å bruke metoden som beskrives nedenfor, kan bruddkanten beregnes for snøskred med antatt returperiode på over 100 år basert på terrenghelning (Håland et al., 2015).

Ved bruk av denne metoden antas det at snødekket er homogent og at skjærkraften og skjærstyrken i snøen endres lineært nedover i snødekket. Dette er en forenkling av virkeligheten, men det antas at metoden tross sin enkelhet er nøyaktig nok til dette formålet (Håland et al., 2015). På bakgrunn av dette er det bestemt at snøens fasthetsegenskaper skal betraktes etter geotekniske prinsipper i denne oppgaven og

styrken til et snølag kan dermed uttrykkes ved Mohr-Coulombs bruddkriterium (Bakkehøi & Norem, 1994):

$$\tau_{\text{styrke}} = c + \sigma_y \tan\phi \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Hvor τ_{styrke} =skjærstyrken til det svake laget [Pa], c =kohesjon [Pa], ϕ =friksjonsvinkel for materialet [°], σ_y =spenning normalt på skjærspenningsretningen

σ_y kan uttrykkes ved:

$$\sigma_y = \rho g z \cos\alpha \quad (2)$$

Hvor ρ =snøens tetthet [kg/m^3], g =gravitasjonskoeffisienten [m/s^2], z =snødybde normalt på bakken [m] og α =helningen på terrenget [°]

Skjærstresset som påvirker et snølag på en dybde, z , er:

$$\tau = \rho g z \sin\alpha \quad (3)$$

Hvor τ =skjærstress [Pa]

Skjærstresset og skjærstyrken nærmer seg hverandre med snødybden. Ved å kombinere ligning 1 og 3 kan man finne den kritiske dybden hvor skjærstresset og skjærstyrken er lik (z_{kr})

$$z_{kr} = \frac{c}{\rho g (\sin\alpha - \cos\alpha\mu)} \quad (4)$$

Hvor $\mu = \tan\phi$ (Bartelt et al., 2013)

Ved å bruke ligning 4, kan den kritiske bruddhøyden regnes ut. I følge Bartelt et al. (2013) kan μ uttrykkes som tangenten til den interne friksjonsvinkelen til snø og varierer dermed med fuktigheten i snø, som beskrevet i Kapittel 2.1.1 (McClung & Schaerer, 2006). Snøens kohesjon og tetthet kan måles direkte, eller baseres på erfaringer.

Friksjonsparameterne ξ og μ

Friksjonskoeffisientene bestemmer flyteegenskapene til et skred. Coulomb friksjonskoeffisienten μ kan i følge Bartelt et al. (2013) uttrykkes som tangenten til den interne friksjonsvinkelen. Den interne friksjonsvinkelen til snø avhenger i stor grad av vanninnhold i snøen, og det gjør altså også Coulomb-friksjonen, μ (Bartelt et al., 2013). μ dominerer når skredet er i ferd med å stoppe. Den turbulente

friksjonskoeffisienten ζ er hastighetsavhengig og dominerer når skredet er i full bevegelse (Salm, 1993). Den turbulente friksjonen har betydning for hvordan skredet påvirkes av det underliggende terrenget. Ujevnt terreng vil føre til høy skjærmotstand og en jevn flate vil gjøre skjærmotstanden minimal (Bartelt et al., 1999). Derfor kalles den turbulente friksjonen også skjærmotstanden (Bartelt et al., 1999). I RAMMS kan μ variere fra 0,14-0,47 og ζ fra 900 til 4000 (Bartelt et al., 2013).

RAMMS har to modus for bestemmelse av friksjonsparametere, konstant og variabel (Bartelt et al., 2013). Ved å bruke konstant modus definerer brukeren et sett ζ og μ verdier som brukes for hele skredområdet. Det betyr at unduleringer i terrenget ikke vil ha noe å si for friksjonen, noe det i virkeligheten har (Bartelt et al., 1999). RAMMS er kalibrert etter skred i Alpene. Ved modellering av skred på steder hvor snøforholdene er betydelig forskjellig fra Alpene, kan det derfor være en fordel for brukeren å definere friksjonsparametere selv. Dette gjelder for eksempel på Svalbard (Eiken, 2017). Ved å bruke variabelt modus defineres friksjonsparametere ut fra terrenget. En omfattende automatisk terrengeanalyse kategoriserer terrenget i skredområdet etter høyde over havet, helning, kanalisert/åpent, og skog/ikke skog (Gruber & Bartelt, 2007; Christen et al., 2008). For eksempel vil gjel utgjøre et område med høyere friksjonsverdier enn en flanke. En del av terrengeanalysen er høydejusteringen. RAMMS er kalibrert etter skred i Sveits og Alpene og høydejusteringen er ment å ta hensyn til at snøen er tørrere, og dermed også den interne friksjonen lavere, høyere opp i terrenget. I Norge er det generelt kaldere klima og derfor er snøen tørrere lengre ned i skredløpene enn i Alpene, og det gir mening å gjøre en høydejustering (Håland et al., 2015). Det er vanskelig å sette konstante verdier for hele landet fordi det er store variasjoner i klima. For å gjøre høydejusteringen mest mulig objektiv er det valgt å bruke tregrensa som referansepunkt for høydejustering. Dette ble også gjort i Håland et al. (2015), og det viste seg at RAMMS simuleringer med denne høydejusteringen til tregrensa ga bedre resultat enn uten justeringen. Grunnen til at man gjør denne justeringen er for å ta hensyn til at snøen er tørrere og den interne friksjonen dermed er mindre.

I tillegg til terrengeanalysen, tas også returperiode og størrelse på skredet med i bestemmelsen av friksjonsparametere (Bartelt et al., 2013). Hver terrengkategori og returperiode har et sett ζ og μ definert ut fra eksempelstudier av snøskred i Sveits. Før

man kjører en simulering i RAMMS velger man en returperiode og størrelse på skredet. RAMMS gir muligheten til å velge mellom 10-, 30-, 100-, eller 300-årsskred. Skredstørrelsen foreslås automatisk som *large*, *medium*, *small* eller *tiny* på bakgrunn av volumet av skredmassene som allerede er definert ut fra løsneområdet, se tabell 1.

Tabell 1 Oppsummering over skredstørrelsene og skredvolum som brukes i RAMMS (Bartelt et al., 2013)

Skredstørrelse	Skredvolum
Large (stor)	> 60 000
Medium (medium)	25 000-60 000
Small (lite)	5000-25 000
Tiny (veldig lite)	< 5000

Det er mulig å justere friksjonskoeffisientene for å ta hensyn til skog ved å øke μ med 0,05 og minke ξ betraktelig (Christen et al., 2010). Det antas at energien skredet bruker på å knekke eventuelle mindre trær og busker er liten i forhold til den samlede energien til skredet (Bartelt & Stöckli, 2001).

Digital terrengmodell (DTM)

Skredene simuleres i tredimensjonalt terreng og en digital terrengmodell (DTM) med minimum 25 m oppløsning må derfor importeres inn i RAMMS (Bühler et al., 2011). Nøyaktigheten er viktig fordi mikroterreng kan ha betydelig innflytelse på resultatene (Bühler et al., 2011) og en terrengmodell med dårlig oppløsning kan gi unøyaktige beregninger av friksjonsparameterne (Håland et al., 2015). Brukerveiledningen til RAMMS anbefaler imidlertid å bruke en nøyaktighet på 10 m ved snøskredsimuleringer fordi terrenget jevnes ut noe av snødekket (Bartelt et al., 2013). Generelt akkumuleres snø i forsenkninger, mens snødekket er tynnere ved ryggformasjoner (McClung & Schaerer, 2006). Glideflaten til snøskred er sjelden terrengoverflaten (med unntak av glideskred og svaskred), og snø som ligger under glideplanet vil bidra til å jevne ut terrenget. Terrengmodeller med en oppløsning bedre enn 5 m vil ikke forbedre simuleringsresultatene betydelig og vil dessuten gjøre at simuleringene tar veldig lang tid (Christen et al., 2008).

En DTM med tilstrekkelig oppløsning kan skaffes ved fotogrammetri eller lasercanning gjort i felt, eller direkte fra et nasjonalt geoinformasjonscenter i det

respektive landet (i Norge: Statens Kartverk). En modell med høy oppløsning (under 2 m) vil kunne påvirkes av tidligere skredmasser eller vindtransportert snø i større mengder (Bühler et al., 2011). Feil eller unøyaktigheter i en terrengmodell kan føre til unøyaktige og urealistiske skredbaner, utløpsdistanser, avsetninger og trykk. Slike feil unngår man best mulig ved å bruke en oppdatert terrengmodell med en fornuftig oppløsning i forhold til formålet. Terrengmodellen bør sjekkes for feil og at den er oppdatert da en eldre terrengmodell kan være utdatert hvis for eksempel et skred eller en flom har endret terrenget eller en skredvoll har blitt bygd (Bühler et al., 2011).

Kohesjon og tetthet

Snøens kohesjon og tetthet bestemmes manuelt i RAMMS. Økt kohesjon vil føre til økt energitap i utløpsområdet og dermed lavere skredhastigheter. Kohesjonen i snø varierer først og fremst med temperatur og har derfor størst betydning i våtere skredmasser, da snøpartiklene i større grad vil være i kontakt med hverandre, se tabell 2 (SLF, 2010; Håland et al., 2015). Tetthet varierer med temperatur og pakningsgrad av snøen. For eksempel viser en undersøkelse av 70 tørre flakskred at de fleste tetthetsmålingene av flaket hadde en tetthet mellom 100-350 kg/m³ (McClung & Schaerer, 2006).

Tabell 2. Kohesjonsverdier anbefalt for RAMMS basert på snøtype (SLF, 2010)

Type snøskred	Kohesjon (Pa)
Tørr snø	0-100
Våt snø	100-300

2.2.2 Fremstilling av resultater

Modellresultatene er lettere å tolke når de er lagt oppå kart (Christen et al., 2008). Resultatene kan eksporteres som ASCII-filer og importeres i et Geografisk Informasjonssystem (GIS), som ESRI ArcMap. Georefererte kart og ortofoto kan importeres i RAMMS og simuleringene kan kjøre med dette som bakgrunn. Resultatene blir dermed godt visualisert og lettere å tolke.

2.3 Beregning av avstand mellom trafikklys

For at et automatisk varslingsanlegg skal være velfungerende må en trafikant som kjører inn på den skredutsatte strekningen bli varslet tidsnok med et lyssignal slik at han kan komme seg ut av den skredutsatte strekningen før skredet treffer vegen. Hvis skredet bruker lengre tid fra det detekteres til det når vegen enn en bil bruker på strekningen mellom trafikklysene, er avstanden tilstrekkelig. Formel 5 brukes for å beregne tiden skredet bruker fra det detekteres og ned til vegen, og tiden en trafikant bruker på å passere den skredutsatte strekningen.

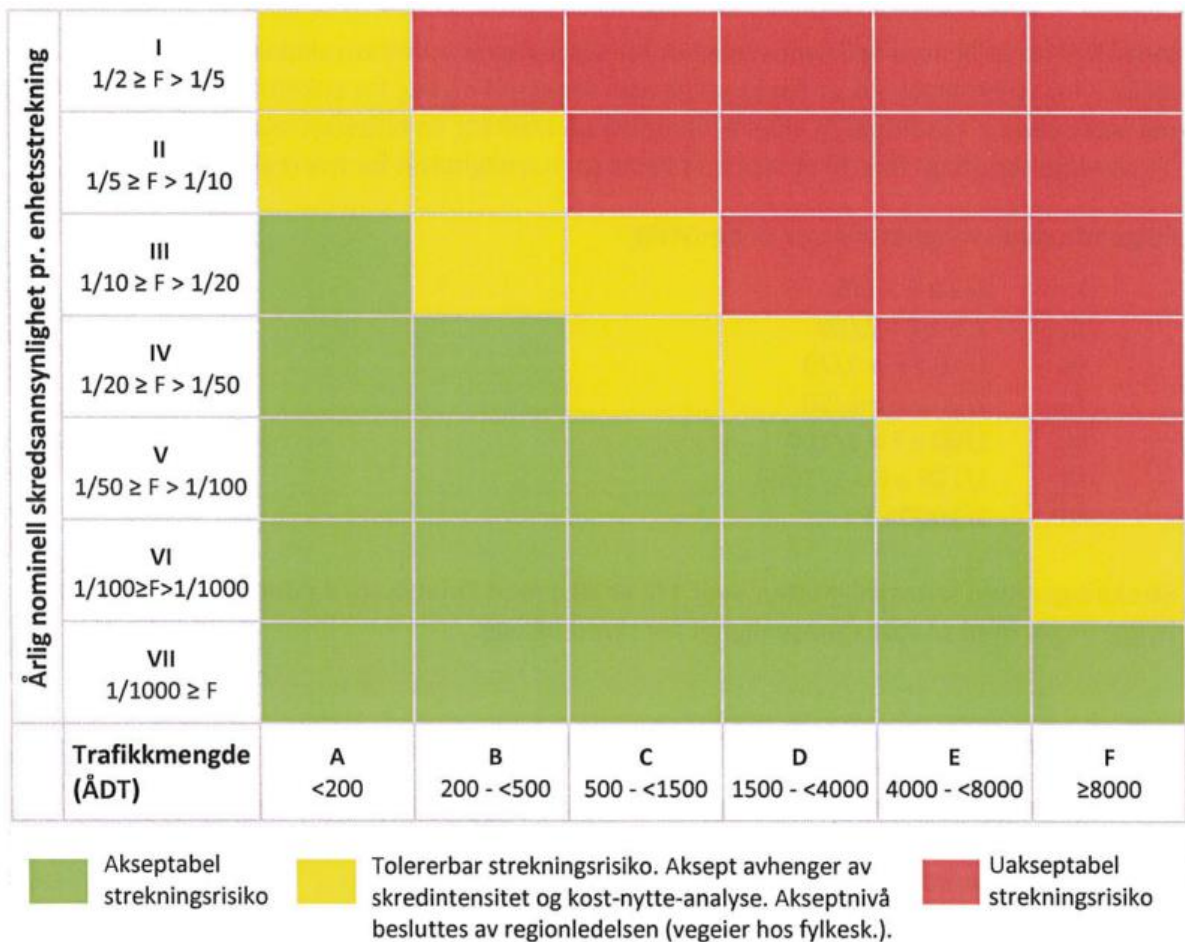
$$t = \frac{s}{v} \quad (5)$$

Hvor t = tid, s = strekning eller avstand fra deteksjonspunkt til veg og v = hastighet

2.4 Akseptabel risiko for skred på veg

Teknisk byggeforskrift (TEK17) beskriver krav til sikkerhet for bygninger mot naturfarer, men disse kravene er ikke tilpasset veg på skredutsatte strekninger og Vegdirektoratet har derfor utarbeidet egne retningslinjer for akseptabel risiko for skred på veg. Akseptabel risiko for skred på veg beskrives i rundskriv 2014/08 *Retningslinjer for risikoakseptkriterier for skred på veg* av Vegdirektoratet (Vegdirektoratet, 2014). Disse retningslinjene skal følges ved bygging av ny veg, ombygging av veg og bygging av sikringstiltak mot snø-, flom-, jord-, is-, stein-, fjellskred og steinsprang langs eksisterende veg. Ved skredpunktene som beskrives i denne oppgaven har akseptkriteriene vært veiledende for valg av sikringsnivå.

Risiko er summen av konsekvens og sannsynlighet og oppsummeres i en risikomatrise, figur 7. I de fleste tilfeller vil det ikke være mulig å beregne en reell sannsynlighet for at skred skal inntreffe. I både TEK17 og i *Retningslinjer for risikoakseptkriterier for skred på veg*, benyttes begrepet nominell sannsynlighet som betyr at det blir brukt faglig skjønn, erfaringer og teoretiske beregningsmetoder for å beregne sannsynligheten. Årsdøgntrafikk (ÅDT), et gjennomsnittstall for daglig trafikkmengde, brukes som et mål på konsekvensen av at et skred treffer et skredpunkt. Ved skredpunkt på en veg med lav ÅDT vil sannsynligheten for at en trafikant blir truffet av et skred være mindre enn på et skredpunkt på en veg med høyere ÅDT. Konsekvensen av at et skred treffer et skredpunkt med lav ÅDT er derfor sannsynligvis mindre enn hvis et skred treffer et skredpunkt med høy ÅDT.



Figur 7. Risikomatrix for skred på en vegstrekning. Grønn, gul og rød angir akseptnivået. Figuren er hentet fra Vegdirektoratet (2014).

Begrepet returperiode, eller årlig nominell skredsannsynlighet, brukes for å beskrive hvor ofte et skred av en gitt størrelse vil inntreffe i et gitt skredløp. For eksempel vil et skred med en frekvens på 100 år, statistisk sett inntreffe en gang hvert per 100 år og sjansen for at et skred av den størrelsen inntreffer er 1 % hver dag. Returperiode beregnes vanligvis ut fra historiske hendelser. Kilden til informasjon om historiske hendelser er ofte geomorfologisk kartlegging, lokal erfaring/historisk informasjon fra kirkebøker, avsetninger, skredatlas og «stille vitner» som veltede trær (McClung & Schaerer, 2006). Begrepene returperiode og skredfrekvens brukes om hverandre. Generelt sett er det en sammenheng mellom skredfrekvens og utløpsdistanse (Norem, 2014).

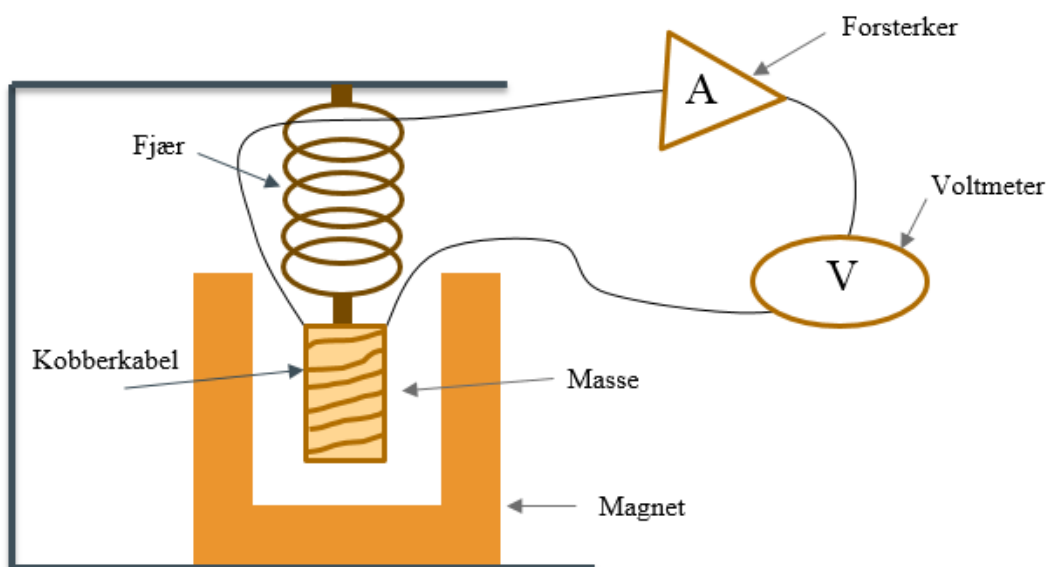
2.5 Deteksjonsteknologi

I Norge er det foreløpig blitt testet ut to teknologier for å detektere og varsle snøskred i sanntid; geofoner og dopplerradar. Begge teknologiene er i stand til å detektere når et skred initieres og bruker den resterende reisetiden til å varsle trafikanter. Avhengig av topografi og snøskredtype vil tiden tilgjengelig til varsling variere, men generelt er den relativt kort (sekunder-få minutter). Derfor stilles det høye krav til teknologien som skal detektere skredene, prosessere data og videresende signaler. Både geofonene og radaren benytter prinsippet fjernmåling. Radaren og geofonene står i trygg avstand til skredbanen noe som sørger for at systemene er robuste og at det ikke trengs vedlikehold etter hver hendelse.

2.5.1 Geofonanlegg

En geofon er en mikrofon som måler lydbølger utviklet for seismiske undersøkelser (Mares, 1984; Store norske leksikon, 2009a). Tradisjonelt er geofoner brukt til å undersøke lagdeling av undergrunnen. Kunstige sprengninger blir utført på bakkenivå og geofonen måler hvordan bølgene som skapes av disse sprengningene reiser tilbake til geofonen (Mares, 1984).

Geofoner er enkle, men samtidig geniale. De konverterer seismisk energi til elektrisk spenning som er mulig å måle. En blokk (masse) henger på en fjær med en kabel tvinnert rundt (figur 8) (Mares, 1984; Reynolds, 2011). Kabelen består av kobber eller et annet materiale med høy konduktivitet som dermed leder strøm godt. Ved rystelser generert av skred eller andre kilder vil bakken bevege seg, mens det antas at blokken forholder seg i ro fordi den henger fritt, som beskrevet av Newtons første lov: «an object at rest tends to stay at rest». Prinsippet er det samme som når bakken beveger seg ved et jordskjelv og seismografen forholder seg i ro relativt til bakken. Rundt denne kabeltvinnede blokken er det en magnet som er festet til bakken. Når bakken beveger seg, beveger magneten seg opp og ned rundt massen. Magnetfeltet som skapes av den bevegende magneten produserer en spenning i kabelen som måles. Spenningen er liten og må amplifiseres før den kan måles av et voltmeter. Spenningen som måles av voltmeteret er proporsjonal med hastigheten bakken beveger seg (Mares, 1984; Reynolds, 2011).



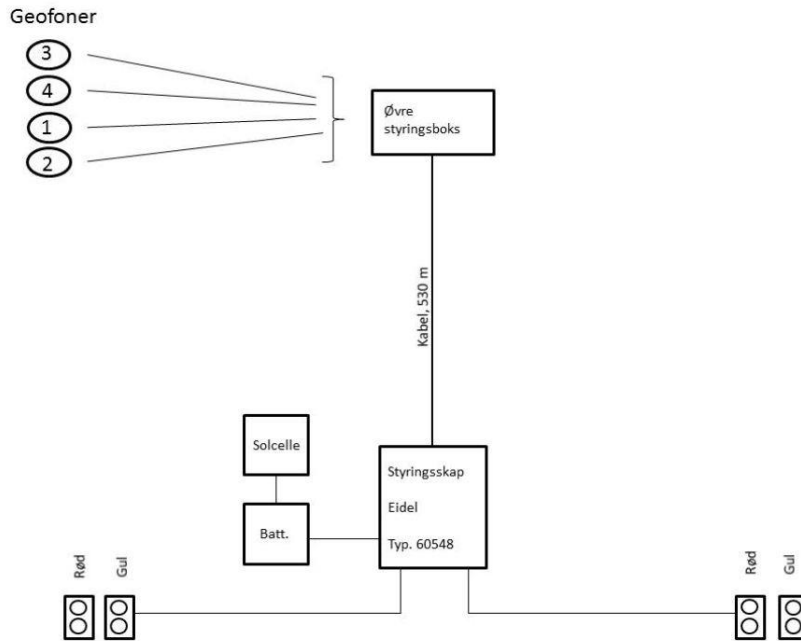
Figur 8. Prinsippskisse av hvordan en geofon fungerer. Når jorda beveger seg vil magneten bevege seg i forhold til massen som henger i ro. Bevegelsen amplifiseres før den måles av voltmeteret.

På grunn av friksjonen og støtkreftene som oppstår mellom skredmassene og grunnen når et skred raser nedover en fjellside, vil det genereres vibrasjoner i grunnen som kan detekteres av geofoner (Pérez-Guillén, 2016). En av de tidligste seismiske vinterundersøkelsene gjort for å finne ut om snøskred kan generere tilstrekkelige seismiske signaler til å kunne registreres av geofoner ble gjort av St. Lawrence og Williams vinteren 1974-75 (Lawrence & Williams, 1976). Deres erfaringer og resultater viste at signaler fra snøskred har karakteristiske seismiske signaler som er forskjellig fra seismiske signaler fra andre kilder, noe som gjør det mulig å differensiere mellom snøskred og støy. Til forskjell fra tidligere studier, ble geofonene til Lawrence & Williams plassert i løsnedområdet til snøskred heller enn i utløpssonen fordi signalene fra et snøskred i løsnedområdet er lettere å differensiere fra støy enn signalene et snøskred lager i en utløpssone. Dette var starten på bruk av geofoner som deteksjonsteknologi for snøskred.

Våte snøskred genererer generelt kraftigere signaler enn tørre skred (Biescas et al., 2003), men av de tørre snøskredene genererer flakskred tydeligere signaler enn løssnøskred (van Herwijnen & Schweizer, 2011). De seismiske signalene øker når snømassene treffer hinder i terrenget (Suriñach et al., 2000). Vibrasjoner fra et

snøskred vil kunne generere signal i geofonene allerede før selve skredet passer geofonen, så lenge friksjonen er stor nok til å danne vibrasjoner som kan oppfattes av geofonen (Kogelnig et al., 2011). Dette er fordi signalene reiser raskere gjennom grunnen enn snøskredet selv. Signalene som skapes av skredet forplanter seg med lydets hastighet. Lydhastigheten varierer mellom 3000 m/s (sandstein) og 7500 m/s (ultramafisk) avhengig av bergartstype, grad av oppsprekking og vanninnhold (Elvebakk, 2011). Signalene kan forplante seg over flere kilometers avstand (Leprettre et al., 1996; van Herwinjen & Schweizer, 2011).

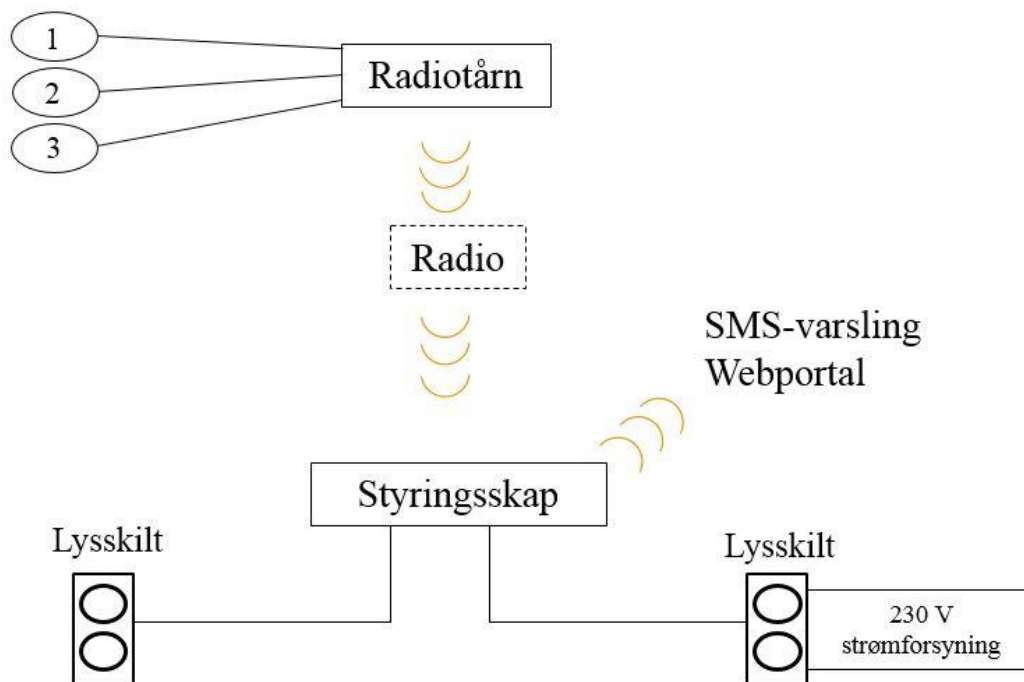
Geofoner har vært brukt til å varsle skred i Norge siden 1980-tallet (Håland, 2013). Statens vegvesen har i dag tre analoge fungerende geofonanlegg knyttet til deteksjon av steinsprang og flomskred som alle ligger i Telemark. De eldre, analoge geofonanleggene hadde en del utfordringer. Det var vanskelig å stille inn følsomheten på geofonene, noe som førte til en rekke falske alarmer. Ved skredhendelser kunne det blir brudd i kablene mellom geofon og øvre styringsboks, samt mellom øvre styringsboks og styringskap ved vegen (figur 9). Teknologien i de analoge anleggene er utdatert og det finnes få personer i Norge med nok kompetanse om anleggene til å reparere utstyr som blir ødelagt. Det finnes ingen form for automatisk varsling på sms/e-post når det går alarm i disse anleggene. Fordelene med de analoge anleggene er imidlertid at de ikke krever programvare som kan være ustabil og må oppdateres jevnlig.



Figur 9. Prinsippskisse av de eldre geofonanleggene. Figuren er hentet fra Håland (2013).

Geofonsystemene for skredvarsling er enkle, robuste og billige system. NGI og SVV har derfor utviklet en ny type geofonsystem som løser de fleste utfordringene ved de gamle anleggene. Det nye systemet har trådløs overføring fra skredløp til vegen, ny digital prosessering av signalene og automatisk varsling til entreprenør/SVV på sms/e-post ved alarm, som vist på figur 10. Høsten 2015 ble Statens vegvesens første geofonanlegg med trådløs overføring og automatisk varsling av snøskred i sanntid satt opp i Sandneslia, Fv427. Det nye systemet har en kameraløsning for verifikasjon av hendelser og det finnes tilkoblingsmuligheter til PC via VPN³ for å hente ut eller se på deteksjonsresultater.

³ VPN står for Virtual Private Network og er betegnelsen på et bedriftsinternt telenett mellom geografisk spredte enheter (Store norske leksikon, 2009c).



Figur 10. Prinsippkisse av det nye geofonanlegget med trådløs overføring fra radiotårn ved skredbanen og ned til styreskap ved veien.

Geofonene kan potensielt detektere alle typer rystelser (som for eksempel jordskjelv, tungtrafikk, jagerfly, dyretråkk og steinsprang) og signalene må derfor filtreres slik at det kun er snøskred som trigger en alarm. Ved hjelp av prosesseringsteknikker for skred kan signalet fra geofonene filtreres og dermed fjerne falske alarmer. Dette er også en oppgradering fra de eldre analoge anleggene.

Størrelsen på signalene som skapes av skred som skal varsles vil være forskjellig fra skredløp til skredløp og avhenger også av skredtypen (Suriñach et al., 2000). Derfor vil det være behov for en kalibreringsperiode ved oppsett av geofonanlegg for skredvarsling slik at geofonene kan filtrere bort falske alarmer og små skred. Kalibreringsperioden skal styrke kunnskapen om sammenheng mellom signalstyrke og skredstørrelse, og definere kriterier for varsling av skred slik at små skred som ikke når veien, i minst mulig grad stenger veien.

Tidligere erfaringer med geofoner som deteksjonssensorer for skred tilsier at geofonene bør plasseres utenfor skredløpet for ikke å bli revet med av skredet (Håland, 2013). Det er også viktig å påse at det ikke eksisterer store sprekker i berggrunnen som kan forstyrre signalet i å nå frem (Elvebakk, 2011). For at geofonene skal kunne

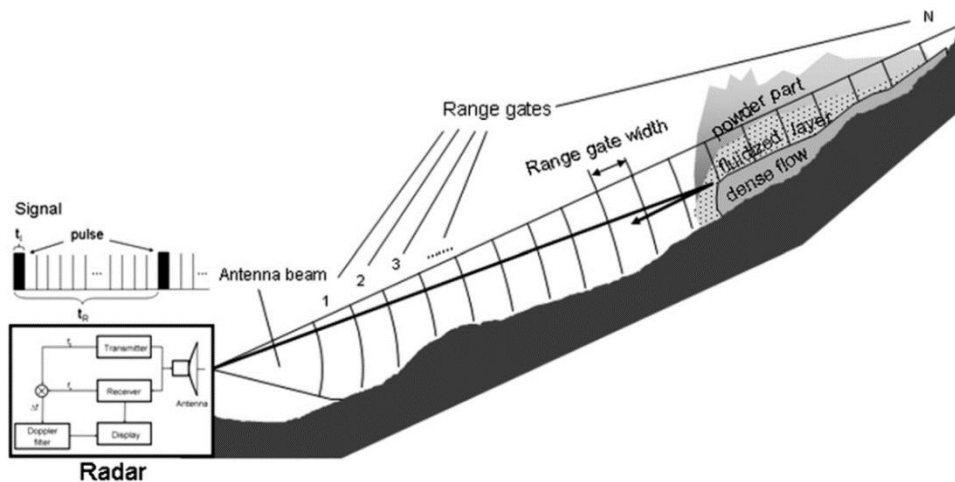
plasseres utenfor skredløpet er det en fordel at skredløpet er markert slik at plasseringen blir riktig, og geofonene ikke blir plassert i fare for å bli tatt med av skred. Samtidig bør sensorene plasseres nærme nok skredløpet slik at signalene fra skredet kan forbindes til det enkelte skredløpet. Kablene fra geofonene til radiomast kan med fordel graves ned i løsmasser eller torv for å hindre ytre påvirkninger og skader på kabler. Geofonene bør monteres i nærheten av områder der skredet møter motstand og derfor vil skape store vibrasjoner (Suriñach et al., 2000; Suriñach et al., 2001). Tørre snøskred og skred som løsner langt oppe i snødekket kan gi for svake seismiske signaler til å bli detektert av en geofon (Pérez-Guillén, 2016). Snø er et porøst medium med lagvise endringer i materialeegenskaper som kan svekke det seismiske signalet (Pérez-Guillén, 2016). Det er også kjent at vegetasjon mellom berg og skredbevegelsen kan absorbere noe av intensiteten til de seismiske signalene (Pérez-Guillén et al., 2016).

2.5.2 Dopplerradar

Radar er en forkortelse for Radio Detection and Ranging. En dopplerradar bruker radiobølger for å måle retning og avstand til et objekt og kan dermed brukes til å bestemme om et objekt er i bevegelse relativt til radaren. Denne typen radar har flere bruksområder, blant annet hastighetsbestemmelse til biler, fly og raketter.

Radar har blitt brukt til deteksjon av snøskred siden 1980-tallet (Gubler & Hiller, 1984; Salm & Gubler, 1985). Da blant annet i forbindelse med verifisering av modeller ved å sammenligne modellert hastighet med observert hastighet (Salm & Gubler, 1985), verifikasjon av sprengning i perioder uten sikt og for å øke forståelsen av snøskreddynamikk, problemstillinger som stadig er relevant (Gauer et al., 2007; Fischer et al., 2014). De første radarene som tok i bruk doppler-effekten til å bestemme hastighet og utbredelse til snøskred ble utviklet av Austrian Institute for Avalanche and Torrent Research (AIATR) (Schreiber et al., 2001) og ble testet på 90-tallet. Schreiber et al. (2001) foreslår allerede i 2001 å bruke dopplerradar til snøskredvarsling i sanntid og for stengning av veger og jernbane.

En dopplerradar sender ut radiobølger med en konstant frekvens⁴ og mottar ekkonet av disse bølgene etter at de har blitt reflektert ved et gitt mål med en kjent avstand (deteksjonsområdet). Ekkonet avhentes i bestemte tidsintervaller sammenfallende med bestemte distanseintervaller (range gates, avstandsceller), se figur 11. En endring i synsfeltet til radaren vil detekteres av radaren ved at de reflekterte bølgene har en annen frekvens enn de som ble sendt ut. Analyseenheten til radaren finner hastigheten og utbredelsen for hver enkelt avstandscelle. Styrken til skredet, eller signal/støy forholdet mellom skredet og området rundt, kan også finnes for hver enkelt avstandscelle. Ikke alle leverandører av dopplerradar måler og bruker denne parameteren. Verdiene analyseres fortløpende mot gitte varslingskriterier. Utstrekning (m) viser avstand fra radar til objektet i bevegelse i radarens siktelinje og forteller dermed noe om omfanget av skredet. Hastighet (m/s) viser hastighet/hastighetsøkningen til hver avstandscelle. Hastigheten måles i retning rett mot radaren. En negativ hastighet betyr at skredet beveger seg mot radaren.



Figur 11. Skisse av hvordan en dopplerradar fungerer. Skredbanen er delt inn i "range gates", eller avstandsceller på norsk. Ekkosignalet fra skredbanen sendes tilbake til radaren ved bestemte tidsintervaller som svarer til en range gate i avstand. Figuren er hentet fra Gauer et al. (2007).

Radaren benytter seg av dopplereffekten for å bestemme hastigheten til snøskredet. Dopplereffekten er frekvensskiftet mellom de utsendte og reflekterte bølgene (Gauer

⁴ Frekvens er et mål på hvor mange ganger et fenomen gjentas per tidsenhet (Store norske leksikon 2017a).

et al., 2007). Frekvensskift er altså at antallet bølgelengder mellom reflektoren og radaren endres som en effekt av at reflektoren beveger seg mot radaren. Om reflektoren, i dette tilfellet snøen, i det forhåndsbestemte deteksjonsområdet, beveger seg i forhold til radaren vil dopplereffekten finne sted. Frekvensskiftet mellom den utsendte og den reflekterte bølgen er proporsjonal med den skredets relative hastighet.

Ved å sammenligne de to signalene kan hastigheten til snøskredet bestemmes ut fra ligning 6 (Schreiber et al., 2001).

$$f_{Doppler} = \left(\frac{2f_0}{c}\right)v \quad (6)$$

Hvor $f_{Doppler}$ er dopplerfrekvensen (dopper skiftet), f_0 er frekvensen til den utsendte bølgen, v er hastigheten til skredet og c er hastigheten til lys.

En dopplerradar kan operere med ulik frekvens ut fra hva den skal detektere. Høy frekvens (35-40 GHz) er nødvendig for å detektere løssnøskred, men vil da også stå i fare for å gi falske alarmer ved snøstorm eller tett snødrev (Schreiber et al., 2001; Gauer et al., 2007). For eksempel vil en radar med en frekvens på 35,8 GHz ha en bølgelengde på 8 mm og dermed kunne detektere partikler på den størrelsen, typisk for partikler i løssnøskred eller pudderskyen i et skred med en høytetthetskjerne (Gauer et al., 2007). En frekvens på 4-8 GHz vil være passende for en radar satt opp for å detektere et skred med en kjerne med høyere tetthet, og fortsatt driftssikker ved tett snøvær (Schreiber et al., 2001). For eksempel vil en radar med en frekvens på 5,8 GHz ha en bølgelengde på 0,05 m og dermed kunne detektere partikler på den størrelsen og større, typisk for klumper i saltasjonslaget (Gauer et al., 2007).

Flere leverandører leverer spesialbygde system for snøskreddeteksjon og systemene består typisk av en eller to antenner for utsending og reflektering av radiobølger, prosesseringsenhet og en pc som samler data og videre prosesserer signalene (Meier et al., 2016). Hvis anleggene skal brukes til varsling i sanntid, består systemet også av lysskilt. I tillegg er det også vanlig med en webløsning hvor data fra radaren loggføres, ofte sammen med bilder tatt av kamera i nærheten av radaren.

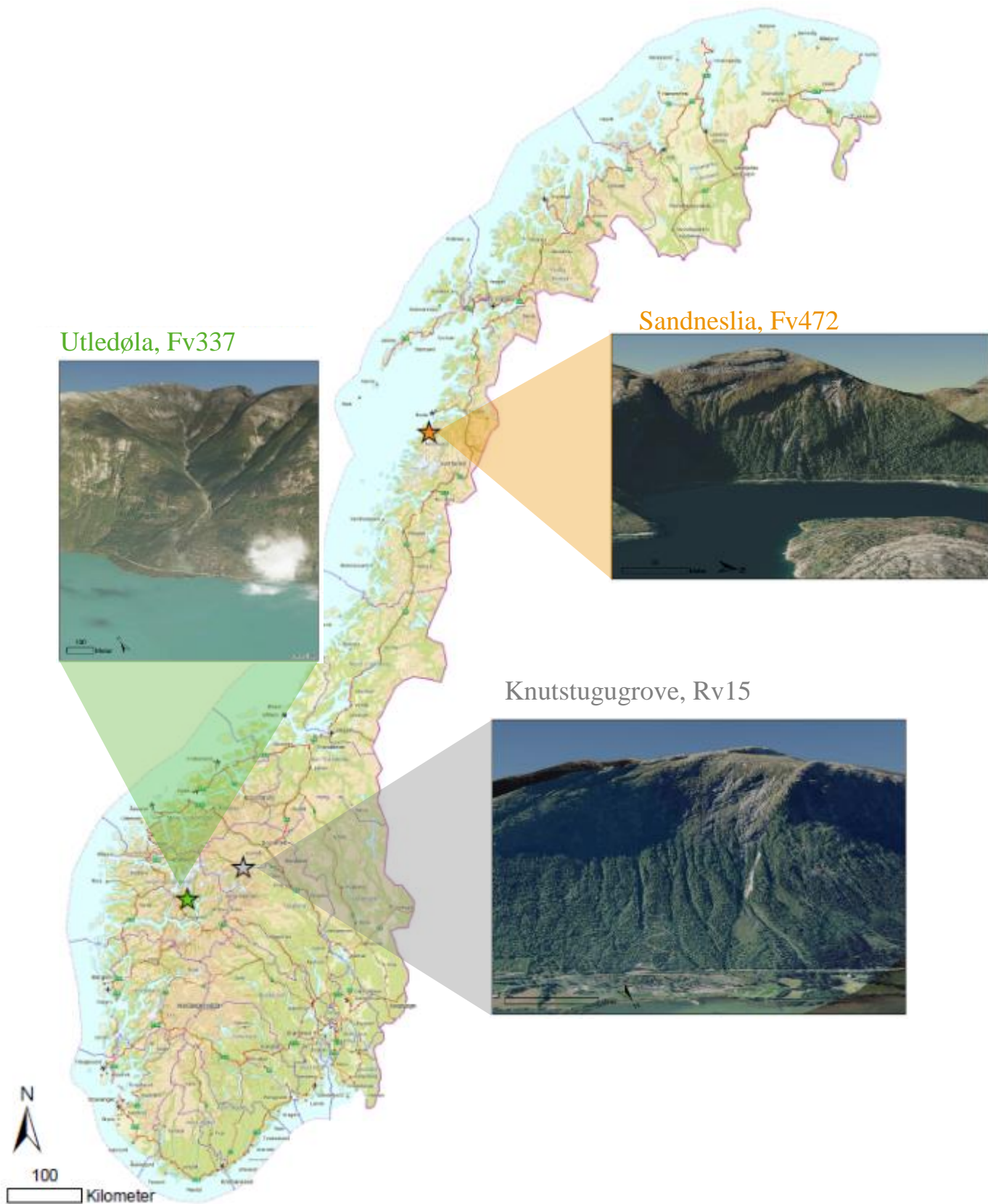
Dopplerradaren har en begrenset rekkevidde og vinkel den kan detektere skred på. Deteksjonen avhenger av reflektert signal fra snøskredet, og ved økende avstand blir dette svakere (Hutter & Kirchner, 2013). I dag finnes radarer med en mulig

deteksjonsavstand på 2 km (Schimmel et al., 2017). Radarteknologien er i stadig utvikling og den mulige deteksjonsavstanden øker.

/3

Beskrivelse av varslingsanleggene

Studieområdet består av tre varslingsanlegg. Dette kapittelet beskriver de tre varslingsanleggene Sandneslia, Knutstugugrove og Utledøla (figur 12).



Figur 12. Landsdekkende kart som viser plassering av varslingsanlegg.

3.1 Sandneslia

Geofonanlegget i Sandneslia ligger langs Fv472 i Gildeskål kommune, Nordland (figur 12). Strekningen har en ÅDT på 410 (Statens vegvesen, 2017). Fv472 er den eneste ferjefrie vegen til de bebygde områdene på Sandhornøya hvor det bor ca. 345 innbyggere (Thorsnæs, 2016). Det er dårlig med omkjøringsmuligheter og det er derfor spesielt viktig at stengningstiden på nettopp denne strekningen er så kort som mulig. Normalt går det flere skred i Sandneslia årlig, men ikke alle er så store at de treffer vegen. Den skredutsatte strekningen er i underkant av 1 km. I skredsikringsplanen⁵ for region nord er det foreslått at Sandneslia sikres med fangvoll, fanggrøft og utlegg av veg. Kostnadsoverslaget for disse tiltakene er på 30 millioner. Bergarten i Sandneslia er oppsprukket kalkspatmarmor (NGU, 2017) som har en lydshastighet på 3500 m/s (Kvistedal, 2016).

Den skredutsatte strekningen ved Sandneslia er en prioritert strekning for skredsikring. Fra midten av 90-tallet til 2001 ble skredene varslet i sanntid med et eldre geofonsystem. Dette systemet var installert også med automatisk varsling, men ikke med tilkobling til VTS⁶. Anlegget er ikke lengre i drift på grunn av utdatert teknologi.

Det er totalt seks skredløp på strekningen som er nummerert fra en til seks fra nord mot sør (figur 13). Alle skredløpene har potensiale til å nå vegen. Egenskapene til skredløpene er oppsummert i tabell 3. Skredene er som oftest våte og løsner på svaet, men det kan gå tørre skred som løsner over skredløp 2 (figur 13). Skredløp 3 og 4 er sammensatt og bør egentlig betraktes som et system, heller enn to separate skredløp. De våte skredene går som oftest på våren og de tørre snøskredene går tidligere på sesongen og løsner høyere opp. Snøskredfrekvensen varierer mellom de ulike skredløpene og -typene. I følge Larsen & Bakkehøi (1995) er det skredløp 2 som har den høyeste frekvensen hvor de hevder det går skred til vegen omtrent hvert år (figur 14). Larsen & Bakkehøi (1995) beskriver skredløp 1 som det nest mest aktive, hvor skred treffer vegen hvert 3.-10. år. Tørre snøskred som løsner over skredløp 2 har en

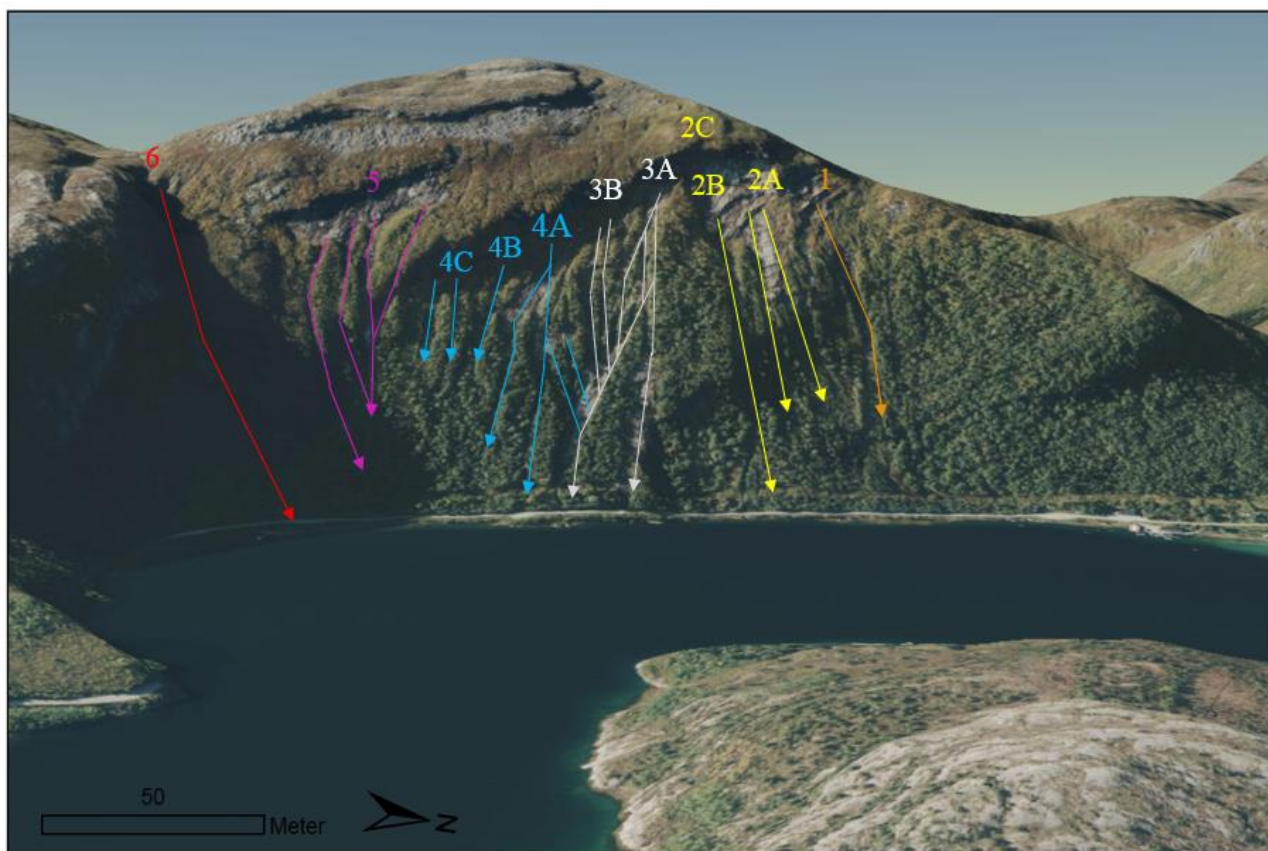
⁵ Skredsikringsplan er en plan utarbeidet for hver region i SVV hvor det kommer frem hvilke skredutsatte punkt som finnes i regionen med forslag til hvordan punktene med høyest prioritet kan sikres.

⁶ VTS står for Vegtrafikksentralen. VTS trafikkovervåker alle tunneler og vegstrekninger tilknyttet sentralen og kommuniserer informasjon til trafikanter.

frekvens på 1/10 (Larsen & Bakkehøi, 1995), se figur 15. Det antas at hyppigheten av skred lengre sør (skredløp 3-6) er mindre enn 1/10).

Tabell 3 Oppsummering av egenskapene til skredløpene i Sandneslia

Skredløp	Underlag løsneområde	Høyde løsneområde (moh.)	Høydeforskjell skredløp (m)	Frekvens på veg	Vanlig skredtype
1	Sva	375-425	425	1-3/10	Vått
2	A Sva	400-450	450	-	Vått
	B Sva	400-450	450	10/10	Vått
	C Lyng/gress	500-550	550	1/10	Tørt/vått
3	A Sva	400-450	450	<1/10	Vått
	B Sva				Vått
4	A Sva	325-375	375	<1/10	Vått
	B Sva				Vått
	C Sva				Vått
5	Sva	400-450	450	<1/10	Vått
6	Sva	350-450	450	<1/10	Vått



Figur 13. Plassering av skredløp i Sandneslia. Skredløpene er tegnet inn etter observerte skred og Kvistedal (2016).

Nærmeste værstasjon ligger på Våtvikfjellet ca. 4 km nordvest for Sandneslia, på 600 moh. I vinterhalvåret ligger temperaturen for det meste rundt noen få minusgrader. I følge værstasjonen på Våtvikfjellet ligger årsnedbøren i Sandneslia på 1800 mm nedbør og ca. halvparten faller som snø (Larsen & Bakkehøi, 1995). Potensialet for akkumulering av snømengder i lia er derfor stort. Snødybden er vanligvis høyest (ca. 40 cm) i mars og det er på denne tiden av året de hittil største skredene har blitt registrert. Temperaturene oppe i lia er generelt litt lavere enn nede ved fjorden så skred kan starte som tørre øverst og ende som våte snøskred ved vegen.

Dominerende vindretning er fra sør og sørøst og mye snø samles nedenfor den langsgående skrenten ved ca. 400 moh., der snøskredene i Sandneslia ofte løsner. Sandneslia er en bratt, nordøstvendt skråning bestående av områder med sva og bekkefar med vegetasjon mellom. Snøskredene som går i lia følger stort sett områdene med sva og de er derfor nokså godt definert (figur 13).



Figur 14. Bilder fra et SVV notat (Rostad, 1997) om et vått snøskred som gikk i skredløp 2b den 5. mai 1997. Løsneområde er indikert med rød sirkel.



Figur 15. Bilde fra tørt flakskred i 2013. Skredet løsnet over skredløp 2 og løснеområdet er indikert med rød sirkel. Bildet er tatt av Jeanette Kvalvågnes i SVV region nord i forbindelse med befaring etter at skredet gikk.

Historiske hendelser i Sandneslia er oppsummert i tabell 4. Informasjonen i tabell 4 er hentet fra skredatlasen til NVE (NVE, 2017). Flere årsaker fører til at tabellen ikke gir et fullstendig bilde av historiske hendelser, blant annet underregistrering av hendelser på grunn av varierende grad av registrering fra entreprenør og manglende fullstendige prosedyrer for digitalisering av data hos vegvesenet. Det er også noe usikkert hvilket skredløp skredene har tatt. Skredløp er derfor bestemt etter registrert veg referanse.

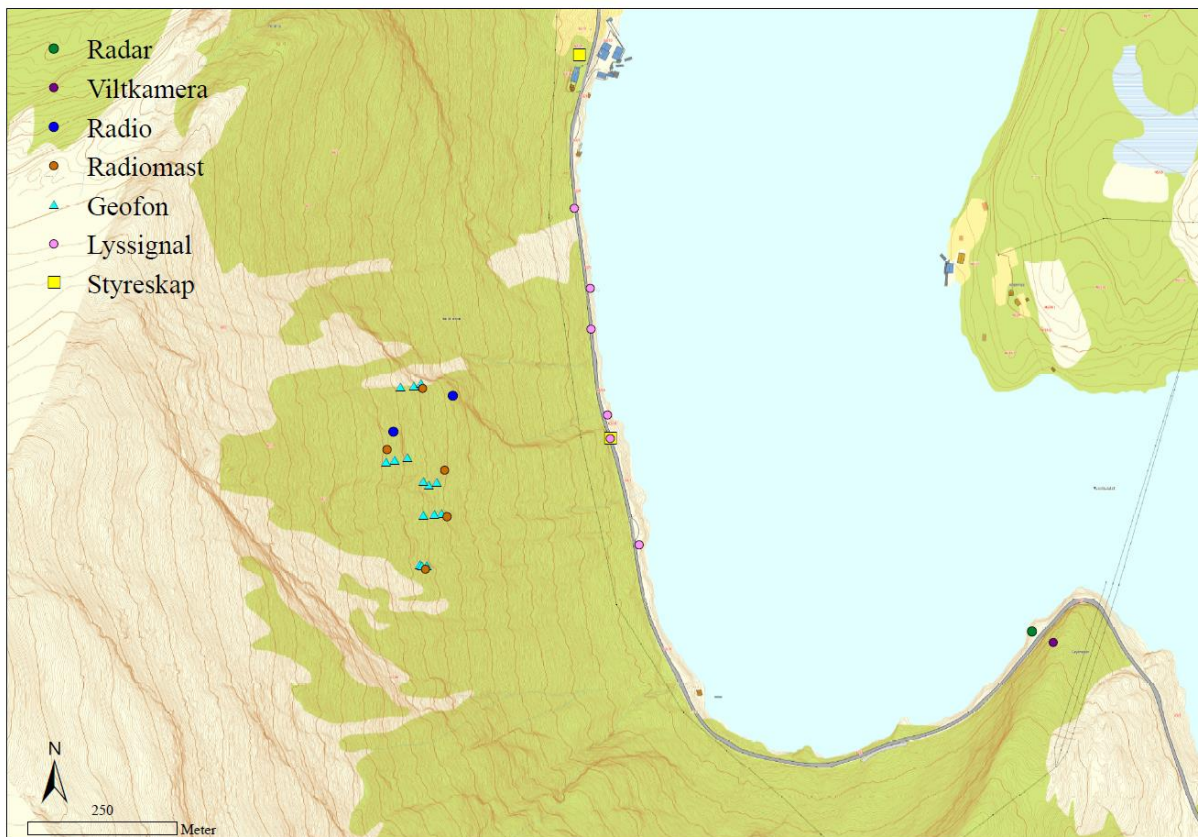
Tabell 4. Oppsummering av historiske skredhendelser i Sandneslia

Dato	Skredtype	Skredløp
05.05.1997	Vått løssnøskred	2B
19.11.1999		3
24.01.2002		4
24.01.2011		6
10.04.2011		1
01.04.2013		2B
07.03.2013	Tørt flakskred	2C
30.12.2014		2B

Instrumentering

Geofonanlegg

Geofonanlegget i Sandneslia er utviklet av NGI og ble installert sommeren 2015. Det består av 15 geofoner, fem radiomaster, et sensornettverk med to radioer, to styringsskap og seks varsellys (figur 16). Det finnes også to kameraer som tar bilder av lia for verifikasjon av hendelser. Det ene kameraet er plassert på radaren og det andre i lia, like ovenfor radaren (viltkamera). En av radiomastene med tre tilhørende geofoner ble montert sommeren 2017 for å varsle skred i skredløp 4.



Figur 16. Kart over instrumenteringen i Sandneslia. Radiomastene er nummerert etter hvilket skredløp de tilhører, hvor 2.1 er den nordligste, 3.1, 3.2 og 3.2 tilhører skredløp 3 og 4.1 er den sørligste som tilhører skredløp 4.

Hver sensorgruppe med geofoner har en tilhørende radiomast med elektronikkhus. I disse radiomastene er det plassert mikrokontroller med dataloggere/radionoder for trådløs signaloverføring. Mikrokontrollene som brukes i Sandneslia heter Giant Gecko og er fra Silicon labs. De ble blant annet valgt fordi de kan logge store mengder data og har lavt strømforbruk. Gjennomsnittlig strømforbruk ligger på rundt 0,7 mW/t og kan dermed operere sammenhengende i flere år på samme batteri. Den trådløse

overføringen av signal er en forbedring fra det eldre anlegget hvor det var en kabel fra radiotårn til styringsskap. Denne kabelen røk ved flere anledninger (Rostad, 1997). Mastene er plassert i utkant av selve skredløpene og står ikke i fare for å bli tatt av skred. De er designet for å tåle snøsig og er derfor montert normalt på skråningen (figur 17).

Prosesseringen er todelt, hvor en del foregår i mikrokontrollene i radiotårnene og den andre delen foregår ved en pc i styringsskapet ved veien. Pc-en kjører en programvare som heter RMAD signallys (Realtime microseismic avalanche detection). Programvaren vurderer varighet, omfang og lokasjon ved å prosessere mottatt informasjon fra radioene. For at varslingen av skred skal kunne skje i sanntid må mikrokontrollene kunne prosessere data raskt. Mikrokontrollene ligger i dvale/strømsparemodus frem til rystelser detekteres.



Figur 17. a) Geofon montert i berget med kabel til radiotårn. b) Radiotårn med prosesseringsenhet og trådløs overføring til styreskap ved veien. Begge bildene er tatt på befaring av forfatteren i Sandneslia sommeren 2017.

For å sikre stabil signaloverføring fra geofonene til styringsskap nede ved veien (topografi kan være i veien) er det også plassert to repeater radioer for å forbedre de trådløse linkene. Disse radioene danner et nettverk som kan motta og videresende informasjon fra radiomastene og andre radioer til styringsskapet nede ved veien. Signalet fra radiomastene overføres dermed den korteste/enkleste veien til

styringsskapet. Dette gjør at informasjon kan overføres over lengre avstand enn rekkevidden til en enkelt radio eller radiomast.

De 15 geofonene er montert direkte i fjell med fjellbolter. De er som nevnt fordelt på fem sensorgrupper tilhørende hver sin radiomast og er plassert i utkanten av skredløpene. Skredene varsles i de løpene hvor signalet er sterkest og hendelsen først registreres. Geofonanlegget er montert primært for å detektere skred i skredløp 2 og 3 fordi det er i disse skredløpene skred treffer vegen med høyest frekvens. Geofonene kan detektere skred fra andre skredløp enn det de er montert nærmest til. Sensorene er plassert nærmest skredløpene 2B, 3A, 3B og 4. Både sør og nord for disse skredløpene (altså 1, 5 og 6) vil ikke systemet klare å lokalisere skredene nøyaktig.

Styringsskapet og seks varsellys er plassert nede ved vegen. De seks varsellysene dekker tre og et halvt av totalt seks skredløp og sørger for at tre delstrekninger kan stenges. Trafikanter kan dermed potensielt sperres inne mellom to skred i to ulike løp. Stoppestedene for trafikantene skal være utenfor skredfare slik at trafikantene ikke indirekte blir utsatt for økt risiko.

Verdiene for styrke og lengde av signalene som genereres av snøskredene brukes for å bestemme varslingskriteriene. I tillegg må minst to geofoner i samme skredløp (sensorgruppe) registrere rystelser for å trigge et varsel. Filtreeringsalgoritmene vil filtrere bort rystelser forårsaket av ytre påkjenninger som vind, regn eller dyretråkk. Et jordskjelv vil, med sin signatur og utbredelse, kunne etterligne et snøskred og kan være vanskelig å filtrere bort.

Geofonanlegget fungerer på følgende måte:

1. Mikrokontrollene i alle fire radiomaster befinner seg i strømsparemodus og lytter etter signaler fra geofonene.
2. Et skred genererer rystelser og signal i geofon i en sensorgruppe.
3. Mikrokontrollene i radiomasten som er tilknyttet sensorgruppen hvor rystelsene detekteres vekkes fra strømsparemodus, og prosesseringen starter.
4. Mikrokontrolleren logger data fra alle geofonene i sensorgruppen og gjør en statistisk evaluering (hvert sekund) for å bestemme om det skal sendes alarm videre til styringsskap nede ved vegen eller ikke. For at det skal

sendes alarm må intensiteten av vibrasjonene overstige en gitt terskelverdi, samt at rystelsene må detekteres i flere enn en geofon og aktiviteten må vedvare i flere sekunder etter hverandre.

5. Det logges kontinuerlig helt til rystelsene stopper og det sendes beskjed videre fra radiomast til styringsskap hvert sekund.
6. Når rystelsene har avtatt går mikrokontrollen tilbake til strømsparingsmodus og lytter etter signaler fra geofonene ved hjelp av analoge komparatorer.

Dopplerradar

I mars 2017 ble det montert en dopplerradar som supplement til geofonanlegget (figur 18). Radaren er levert av Geopraevent. Radaren er satt opp for å detektere skred i alle seks skredløp og varsler trafikanter ved signaloverføring via kabel til lysskilt. Avstanden fra radaren til løснеområdene er 1,4 – 1,2 m. Radaren opererer på en frekvens på 10,1-10,5 GHz.



Figur 18. Dopplerradar fra Geopraevent i Sandneslia. Strømskap til høyre. Bildet er tatt av forfatteren under befaring i Sandneslia sommeren 2017.

Etter hvert skal lysskiltene i Sandneslia tas i bruk og da kan radar- og geofonteknologien brukes sammen. For å bruke tiden tilgjengelig til varsling best mulig, vil melding sendes til varslingsliste (SVV, entreprenør) og VTS med en gang det registreres aktivitet. Basert på tiden aktiviteten varer, vil enda en melding sendes

til varslingsliste. Denne meldingen brukes som en validering på om skredaktiviteten vedvarer en viss tid (geofoner) eller har en viss utstrekning (radar) og dermed også sannsynligvis vil nå vegen. Hvis aktiviteten stopper og ikke defineres som skred av verken geofon eller radar, kan ny melding sendes til varslingsliste og VTS og lys skrues av.

3.2 Knutstugugrove

Knutstugugrove ligger ved Rv15 mellom Lom og Skjåk i Oppland fylke (figur 12). Rv15 nordvest fra Lom sentrum er en viktig ferdselsåre mellom Østlandet og Sunnmøre med en ÅDT på 2272 (Statens vegvesen, 2017). Anslått omkjøringslengde på den skredutsatte vegen er 570 km (Håland & Tveit, 2013). Knutstugugrove var sikret med et analogt geofonanlegg fra 1992-2012. Anlegget fungerte ikke tilfredsstillende på grunn av utdatert teknologi. I skredsikringsplanen for region øst er det gjort et kostnadsoverslag på 65 millioner kroner for å sikre Knutstugugrove med overbygg med ledevoller.

Meteorologisk institutt sin nærmeste værstasjon heter Skjåk II og ligger ca. 4 km nordvest for Knutstugugrove på 474 moh. Gjennomsnittlig årlig nedbør ligger på 278 mm som er det laveste i hele landet (Andersen & Pedersen, 2013). Det er flere løснеområder for store snøskred i Knutstugugrove. Figur 19 viser med oransje hvor de største tørre flakskredene løsner. Størrelsen på løснеområdet kan variere. Løснеområdene er nordøstvendt og ligger i le for en langsgående ryggformasjon fra cirka 1280 moh. til 900 moh. Dette medfører at området ligger i le for vind fra hele sektoren sørøst til vest. Denne ryggformasjonen forlenges av en løsmasserygg (figur 19) lengre ned i skredløpet som kan kanalisere skredmassene i bekkeløpet Knutstugugrove før skredet brer seg ut i vifteform lengre ned. Selv om Knutstugugrove ikke ligger i et område med mye nedbør, kan det være kraftig vind som frakter med seg store mengder snø ut i løснеområdene. De største snøskredene

løsner bak den øvre ryggformasjonen hvor det bygger seg opp mengder med snø ved østavær.



Figur 19. Skredløpet Knutstugugrove. Løsneområdet er markert i oransje og skredløpet er markert i grønt. En øvre langsgående rygg langs løsneområdet gjør at det ligger i le og en langsgående løsmasserygg i utløpsområdet kanalisere skredløpet.

I Knutstugugrove er skredbanen parabolisk noe som gjør at skredet kan beholde skredhastigheten i lengre tid og skredet har potensiale til å få en lang utløpslengde og høye hastigheter selv når skredvolumet er lite (McClung & Schaerer, 2006). Den bratte helningen i starten av skredløpet sørger for at skredet kommer opp i høy hastighet kort tid etter at det har løsnet.

Det samler seg snø i løsneområdene hver vinter, og det går årlig snøskred. Hvert 5.-10. år blir skredet så stort at det krysser vegen. Både våte og tørre snøskred når vegen. Skredløpet i Knutstugugrove kanaliseres som nevnt av en ryggformasjon og våte skred vil sannsynligvis i større grad la seg styre av denne. De våte skredene går gjerne mot slutten av sesongen, i mai. Dette bekreftes av bildene tatt av kameraet ved radaren og samtale med lokale (T. Garmo, personlig kommunikasjon, 2. oktober 2016) og byggeleder (O. Hagen, personlig kommunikasjon, 3. august 2016).

Noen av de største snøskredene som har gått i Knutstugugrove har nådd helt ned til elva (Håland & Tveit, 2013). De største hendelsene skjedde i 1943, 1956, to ganger

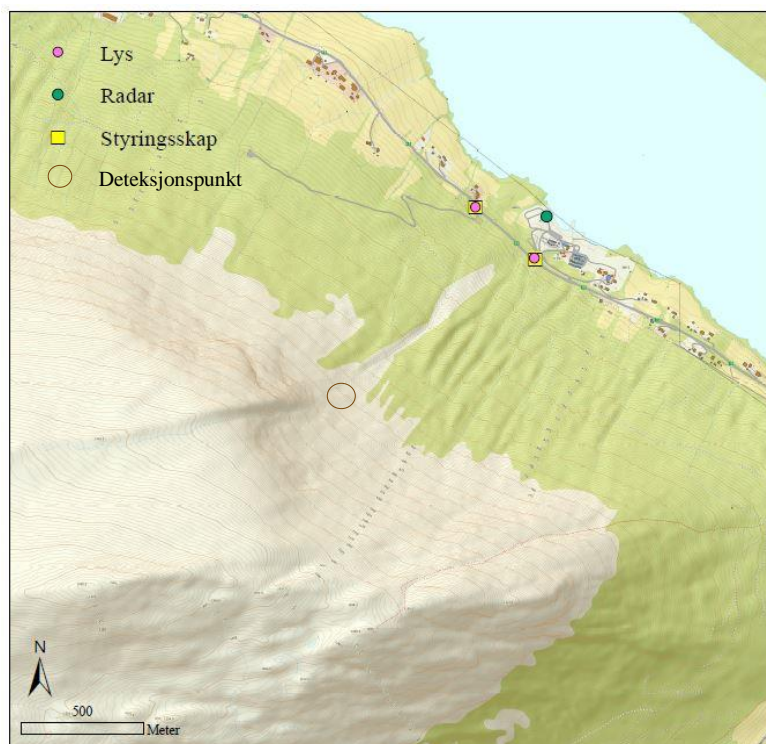
på 60-tallet, 1992 og det seneste ble detektert av radaren i 2015 (tabell 5). Som i tabellen over historiske hendelser i Sandneslia, kan tabellen over historiske hendelser være ufullstendig.

Tabell 5. Oppsummering av historiske skredhendelser i Knutstugugrove

Dato	Skredtype
1943	Tørt flakskred
1956	Tørt flakskred
196?	
196?	
1992	Vått
2005	
17. januar 2007	
12. januar 2015	Tørt flakskred
13. januar 2015	Tørt flakskred

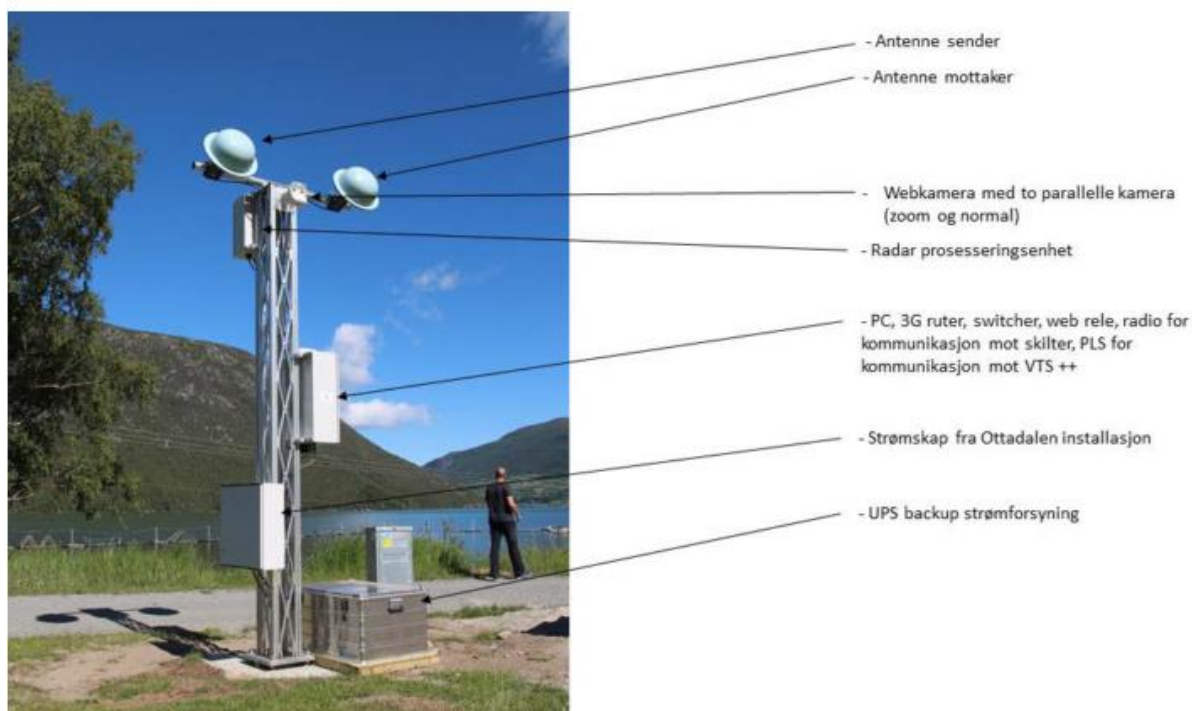
Instrumentering

Radaranlegget i Knutstugugrove består av en dopplerradar fra leverandøren Cautus Geo, to varslingslys og et styreskap (figur 20). Installasjonen foregikk over to perioder, hvor den ene var i juni 2014 og den andre i desember 2015.



Figur 20. Kart over instrumenteringen i Knutstugugrove.

Målestasjonen ble installert i 2014 og består hovedsakelig av komponentene som figur 21 viser. Radaren består av to antenner som er montert med 1,2 meters avstand. I styringsskapet finnes det blant annet radio for å sende signal til lysskilt og data med 3G ruter for å kunne sende signal til entreprenør og byggeleder (figur 21). I tillegg er det montert kamera på radarmasta for verifisering av hendelser, en med zoom og en normal. En strømforsyningsbackup (UPS) som består av to batterier som kan holde anlegget gående i 48 timer er også en del av installasjonen. Radaren er stilt inn til å detektere skred i henhold til skredsakkyndige i SVV sin kunnskap om hvor store skred pleier å passere. Antennene er derfor stilt inn med en retningsvinkel på 224 grader og tiltet 23 grader oppover. Åpningsvinkelen er 10 grader. Avstanden fra radar til fjellsiden er 1900 m.



Figur 21. Radaren i Knutstugugrove. Figuren er hentet fra installasjonsrapporten for radaren (Krangnes, 2016).

Lysskiltene ble installert i desember 2015 på de eksisterende skiltrørene fra det gamle geofonanlegget. Lysskiltene har strømtilførsel via det lokale strømmettet. På det østre lyset er det montert styringsskap, rød blink, webkamera, informasjonsskilt og antenne. Det vestre lyset har styringsskap, rød blink, informasjonsskilt og antenne. Styringsskapene er satt opp med radiokommunikasjon til radaren og styringsenhet til lysregulering. Webkameraet overvåker begge kjørebaneer og kan brukes til verifisering

av om skredet har nådd vegen. Antennen er montert for å kunne motta signal om å sette på rødblink fra målestasjonen. Anlegget kostet 2 millioner kroner å sette opp og 150 000 kr i driftskostnader hvert år.

Radaranlegget fungerer på følgende måte:

1. Radaren måler kontinuerlig forskjellen mellom det utsendte og mottatte signalet og analyserer mot gitte terskelverdier for utstrekning, hastighet og styrke på skredene.
2. Hvis endringene er store nok og defineres som *skredaktivitet* ut fra forhåndsinnstilte varslingskriterier, sendes det advarsel til varslingsliste (entreprenør, leverandør og SVV). Stopplys blir ikke aktivert. *Skredaktivitet* varsles når en eller to av tre varslingskriterier overstiges.
3. Ved deteksjon av større snøskredaktivitet, *skred*, blir alarm sendt til varslingsliste og stopplys aktiveres. *Skred* varsles når alle tre varslingskriteriene overstiges.
4. Entreprenør (Mesta) er ansvarlig for å bekrefte/avkrefte om et skred har nådd vegen og eventuelt slå av lys om skredet ikke nådde vegen. Entreprenøren har helkontinuerlig vakt og lys kan styres fra en pc. Hvis det er lyst kan kamera 2 brukes til å validere om skredet har nådd vegen, men hvis det er mørkt eller på en annen måte ikke er verifiserbart må entreprenør dra til Knutstugugrove og inspisere.

3.3 Utledøla

Bygda Veitastrond i Sogn og Fjordane er omkranset av Jostedalsbreen på tre kanter. Den eneste vegen til bygda og de 123 innbyggerne som bor der er den 27 km lange Veitastrondvegen (Fv337) med en ÅDT på 150 (Statens vegvesen, 2017). Veitastrondvegen går fra Hafslo til Veitastrond og er svært rasutsatt. I Veitastrond pendler innbyggerne som ikke driver med landbruk, daglig til jobb og skole. I 2001 fikk Veitastrond luftputebåt for å frakte folk og utstyr til og fra Veitastrond på Veitastrondsvatnet. Når bygda isoleres av skred står melkebøndene i fare for å måtte helle ut tusenvis av liter med melk (Svanes, 2011).

Fv337 har flere skredutsatte punkter og er ofte stengt på grunn av skred eller fare for skred. Flere av disse skredutsatte punktene er allerede sikret ved hjelp av overbygg, tunnel og skredvoll. Et av de skredutsatte punktene er Utledalen der elva Utledøla munner ut i Veitastronddalen og møter vegen. Her går det flere store snøskred årlig og om lag hvert 5. år treffer skredmassene vegen (Region vest, 2006). I skredsikringsplanen for Vestlandet er det foreslått å bygge en skredvoll anslått til å koste 12 millioner kroner som skredsikringstiltak for skredpunktet. Skredmassene som når vegen ved Utledøla ble i 2008 omtalt som Europas største snøskred på trafikkert veg og er så enorme at det i 1976 ble bygget tunnel gjennom de for å redusere mengden snø som må ryddes (figur 22). Etter initiativ fra den lokale skredsikringsgruppa i Veitastrond, ble det i 2012 bestemt at radar var et godt og mer kostnadseffektivt alternativ for sikring av skredpunktet Utledøla. Cautus Geo fikk tildelt prosjektet etter to avlyste utlysninger. Høsten 2014 ble radaranlegget ved Utledøla montert.

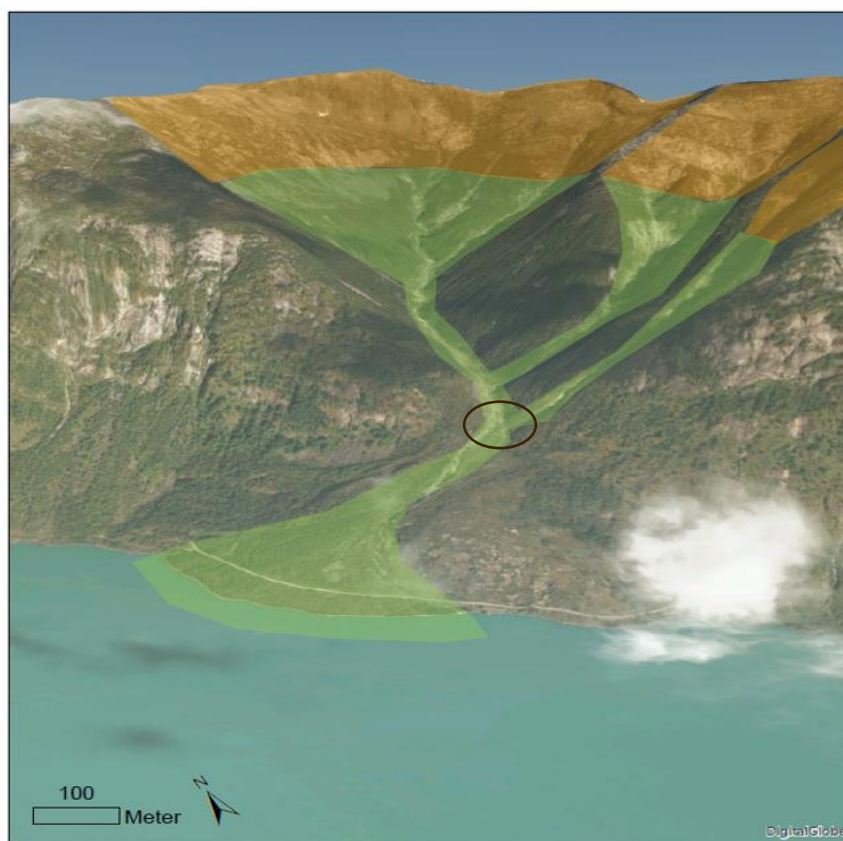


Figur 22 På 1970-tallet ble det bygget en snøtunnel for å redusere ryddearbeidet og gjøre det tryggere for ryddemannskapet i Utledøla. Bildet er hentet fra NRK (Uglum, 2008).

Utledalen består av et komplekst skredterreng (figur 23 og 24). Det er flere løснеområder som kan danne store skred. Løснеområdene er sva og det er lite vegetasjon i de øvre delene av skredløpene. Alle større skred vil gå gjennom det samme punktet, et smalt elvegjel med høye vegger der elva Utledøla renner gjennom (figur 24). Skredløpene kanaliseres mot dette punktet. Terrengen nedstrøms for gjelet er formet som en skredvifte med en helning på ca. 20-25 grader. Her kan dyr lett bevege seg og det finnes blant annet hjort og sau i området. Terrengen på skredvifta er undulerende og det er repeterende smårygger/raviner og forsenkninger i lengderetningen. Vegstrekningen er uoversiktlig fordi den buer seg rundt skredvifta som gjør at sikten fra mellom lysskiltene og de trygge stoppeplassene er dårlig.



Figur 23. Det kompliserte skredterrengen i Utledøla. Foto: Jan Helge Aalbu 03.03.2017.



Figur 24. Det kompliserte skredterrenget i Utledøla. Potensielle løsneområder er markert med oransje, skredløp er markert med grønt. Elvegjelet, der alle skredløpene krysser, er markert med en brun sirkel.

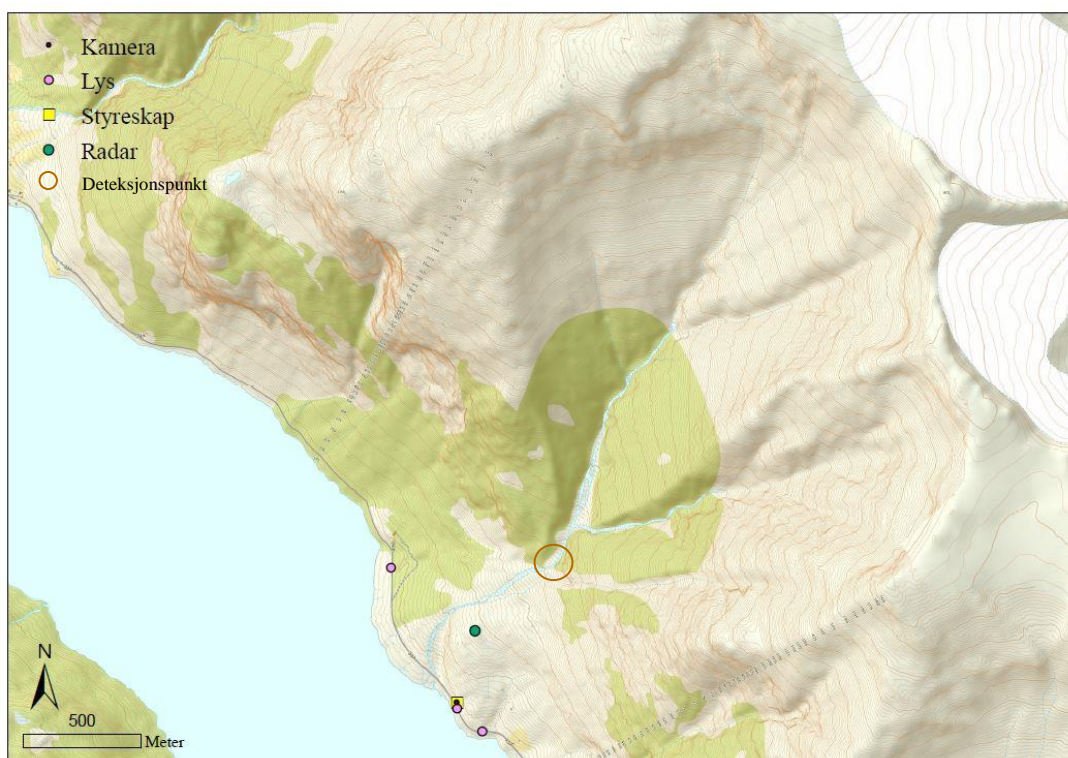
Skredene som når vegen ved Utledøla, dekker ofte vegen i en bredde på 300-400 m. De er som regel våte snøskred som går når snødekket er bløtt, ofte pga. regn. De fleste store skredene går i forbindelse med mildværømslag mellom januar og mars. Tabell 6 oppsummerer kjente skredhendelser som har nådd vegen i Utledøla. Som i tabellen over historiske hendelser i Sandneslia og Knutstugugrove, kan tabellen over historiske hendelser være ufullstendig.

Tabell 6. Oppsummering av historiske skredhendelser i Utledøla.

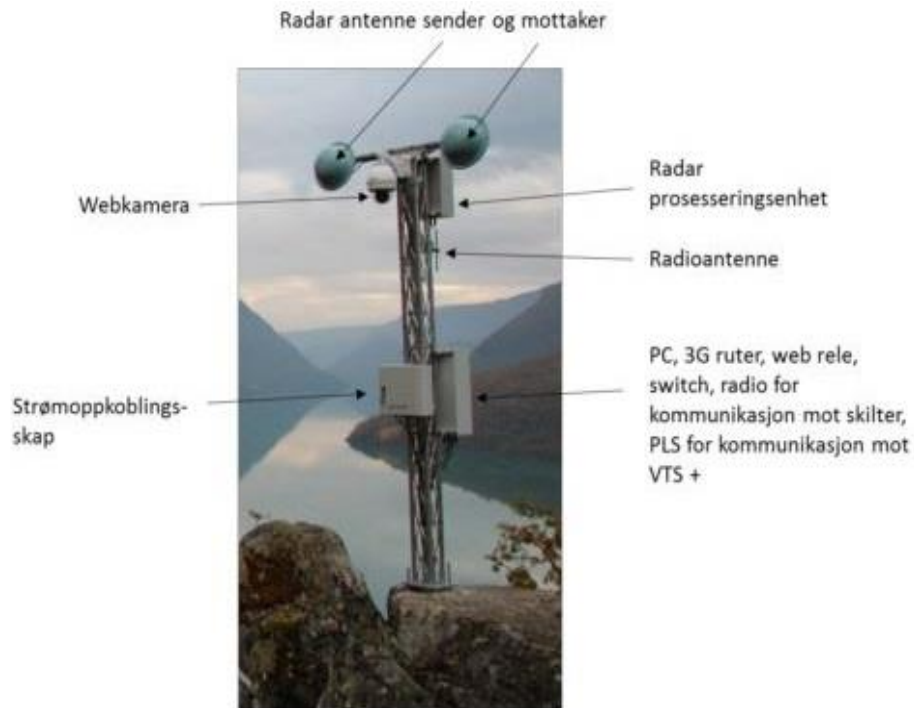
Dato	Kommentar
1976	Bygget snøtunnel i skredmassene
22.02.1989	-
22.02.1997	-
29.03.2000	-
16.01.2008	-
28.01.2008	Dekket vegen i en høyde på 8 m.
24.01.2008	-
21.03.2011	Dekket vegen i en høyde på 10 m
08.01.2013	«Europas største snøskred på trafikkert veg», ifølge Bergens Tidene 08.01.2013

Instrumentering

Installeringen av radaranlegget i Utledøla ble som nevnt ferdig i desember 2014 og er det samme systemet som brukes i Knutstugugrove. Anlegget består av en radar, to kameraer og tre lys- og skiltmaster (Walberg et al., 2015). Figur 25 viser plasseringen av instrumenteringen. Radaren er plassert på en forhøyning i terrenget der det er forventet at den vil stå sikkert i forhold til snøskred, og sikter på deteksjonsområdet, se figur 26 for detaljer og komponenter. Lysskiltene og radaren er tilkoblet strømskap. Strømskapet er montert på en radiomast noen meter fra radaren. På grunn av at vegstrekningen er lite oversiktlig og relativt lang (800 m) er det satt opp to lysskilt i sørlige del, figur 27 viser ett av de. Trafikanter kan dermed varsles allerede ved det sørligste lyset som er plassert der det er enklere å stoppe og snu.



Figur 25. Kart over instrumenteringen i Utledøla. Brun sirkel indikerer deteksjonspunkt.



Figur 26. Radaren og tilhørende komponenter i Utledøla. Bildet er hentet fra sluttrapporten for installeringen av radaren ((Walberg et al., 2015)



Figur 27. Kamera for verifisering av skredmasser på veg er plassert på toppen av vegskjæringen til høyre. Lysskilt for varsling av trafikanter på høyre side av vegen. Bildet er tatt på befaring av forfatteren sommeren 2016.

Radaranlegget fungerer på følgende måte:

Forhåndsinnstilte varslingskriterier for utstrekning, hastighet og styrke på skredene danner grunnlaget for varsling. Radaren i Utledøla er oppkoblet mot VTS og kan utløse tre ulike alarmer (1-3) basert på tiden varslingskriteriene overstiges og om aktiviteten oppstår flere ganger i løpet av et gitt tidsrom.

1. Skredaktiviteten varer mindre enn 15 minutter: Meldingen «*Utledøla Skredvarsling – Skredsensor – Skredaktivitet Detektert*» registreres som «informasjonsmelding» i Vegvokteren⁷. Etter 10 minutter uten mer aktivitet, tilbakestilles skredalarmen automatisk og lysene skrur av. VTS er ikke innblandet.
2. Skredaktiviteten varer mer enn 15 minutter: Meldingen «*Utledøla Skredvarsling – Skredsensor – Skred detektert*» registreres som informasjonsmelding i vegvokteren. VTS varsler byggherre og entreprenør på strekningen. Entreprenør er ansvarlig for å sjekke skredområdet og vurdere situasjonen. Hvis skredet ikke nådde vegen og vegen skal åpnes igjen gir byggherre beskjed til VTS og VTS tilbakestiller skredalarm og loggfører hendelsen.
3. Ved gjentakende skredaktivitet (minst tre alarmer i løpet av seks timer): Meldingen «*Utledøla Skredvarsling – Skredsensor – Gjentakende skredaktivitet*» registreres som informasjonsmelding i Vegvokteren. VTS varsler byggherre og prosedyrene følger punkt nummer to.

⁷ Vegvokteren er et kontrollsystem som VTS (vegtrafikksentralen) bruker til styring og overvåkning.

/4

Metode

4.1 Beregning av avstand mellom lysskilt

For å bestemme skredets hastighet slik at nødvendig avstand mellom lysskiltene kan beregnes, er skredene modellert i RAMMS. Oppsett av RAMMS for alle simuleringene beskrives i dette kapittelet, etterfulgt av eksempelutregninger for tilstrekkelig avstand mellom lysskiltene. For å bestemme om trafikanten har tilstrekkelig med tid til å komme seg forbi den skredutsatte strekningen før skredet når vegen, er tiden skredet bruker + prosesseringstid på 3 sekunder trukket fra tiden trafikanten bruker.

4.1.1 Oppsett av RAMMS

Det ble til sammen gjort fire modelleringer. En i Knutustugugrove, en i Utledøla og to i Sandneslia. Begge modelleringer i Sandneslia er gjort i skredløp 2 fordi det er størst frekvens av skred som treffer vegen i dette løpet. Den ene modelleringen skal simulere et vått snøskred som løsner under den bratte skrenten (figur 14), og den andre modelleringen skal simulere et tørt flakskred som løsner ovenfor den bratte skrenten (figur 15).

I de to første sesongene i Sandneslia har det kun gått våte løssnøskred. Likevel er det valgt å modellere både tørre flakskred og våte løssnøskred i simuleringene fordi begge skredtyper historisk sett har nådd vegen. Dessuten oppnår tørre flakskred en høyere hastighet og det vil derfor være mer konservativt å bruke hastigheten til disse skredene i utregningene.

Terrengmodell

Som nevnt tidligere trenger RAMMS en terrengmodell for å kunne kjøre simuleringer. I oppgaven har det blitt brukt terrengmodeller fra høydedata.no (Statens Kartverk, 2017). På høydedata.no har kartverket gjort terrengmodeller fra hele landet tilgjengelig. Det finnes en landsdekkende terrengmodell med oppløsning på 10 m. I tillegg finnes det en rekke prosjekter over hele landet med tilgjengelig oppløsning 0,25 m og 0,5 m. I Sandneslia og Knutstugugrove er det tilgjengelig en modell med oppløsning 0,25 m, og for Utledøla finnes det en med 0,5 m oppløsning.

Terrengmodellen lastes ned direkte som en DEM-fil som kan importeres til ESRI ArcMap. For snøskredmodelleringene ble det brukt en terrengmodell med en oppløsning på 5 m og terrengmodellene ble derfor omgjort til 5 m ved hjelp av verktøyet *resample* i ESRI Arcmap. *Resample* endrer oppløsningen av et raster datasett. RAMMS krever at terrengmodellen er i ASCII-filformat, og DEM-filene ble derfor konvertert ved hjelp av konverteringsverktøy i ESRI ArcMap, fra raster til ASCII format.

Løsneområde

Løsneområdet ble tegnet i ESRI ArcMap og eksportert til RAMMS som shapefiler. Det har blitt brukt flyfoto, 3D-bilder, helningskart, bilder fra tidligere skred og feltarbeid for å tegne løsneområdene, i tillegg til hjelp fra skredsakkyndige i SVV. 3D-bilder har vært spesielt nyttig for å definere løsneområdet da disse bildene gjør at man kan se på skredløpene som ellers er nokså utilgjengelige (gjelder spesielt Utledøla).

I Knutstugugrove overvåker radaren ett skredløp og de store skredene som radaren er satt opp for å overvåke, løsner mer eller mindre samme sted hvert år. Derfor ble det definert ett løsneområde i Knutstugugrove. I Utledøla finnes det lite gode data/bilder fra tidligere hendelser og det ble derfor valgt et stort løsneområde for å være konservativ. I Sandneslia ble det valgt to løsneområder, ett for tørre flaskred og ett for våte svaskred. Begge deler var basert på bilder av tidligere skred.

Bruddhøyde

For å regne ut den kritiske bruddhøyden for løsneområdene ble ligning 4 brukt, med helningsvinkelen til terrenget, α , som eneste ukjente. Den kritiske dybden, z_{kr} , er der

hvor skjærstresset overgår skjærstyrken til snødekket som beskrevet i Kapittel 2. Sveitsiske retningslinjer basert på tilbakeregninger av skred i Sveits, oppgir $\mu=0,202$ (Bakkehøi & Norem, 1994). Det antas at det er en viss kohesjon innad i snødekket før skredet løsner og etter de sveitsiske retningslinjene er det valgt å bruke en kohesjon på 2 kN/m^2 (Håland et al., 2015). Det er valgt å bruke de samme verdiene for beregningene i denne oppgaven. Utrekning av bruddhøyde med disse verdiene ga realistiske resultater i en norsk studie om sammenligning av skredmodeller gjort av Håland et al. (2015). Den gjennomsnittlige helningen på terrenget i løseområdet, α , ble funnet med kartverktøyet ESRI ArcMap. Ved å bruke ligning 4 fra Kapittel 2, vil det for eksempel for Sandneslia skredløp 2B si:

$$Z_{kr} = \frac{c}{\rho g (\sin \alpha - \cos \alpha \mu)} \quad (4)$$

$$Z_{kr} = \frac{2}{0,3 \text{ g/cm}^3 * 9,8 \text{ m/s}^2 (\sin 41,8 - \cos 41,8 * 0,2)}$$

$$Z_{kr} = 1,3 \text{ m}$$

At den kritiske bruddhøyden, der brudd vil skje, er 1,3 m.

Friksjonsparametere

RAMMS anbefaler å la programmet bestemme friksjonsparametere basert på terrenget og de globale parameterne om man ikke har annen informasjon. Det ble derfor valgt variabelt modus for bestemmelse av friksjonsparametere. Størrelsen på skredet ble bestemt ut fra volumet av massene (areal av løseområdet * bruddhøyden). Dette er oppsummert i tabell 7 nedenfor.

I RAMMS er det mulig å importere skog som et område med økt friksjon, men det er valgt å se bort fra skog da et skred som allerede er i bevegelse i de fleste tilfeller kun påvirkes i liten grad av skog (Bartelt & Stöckli, 2001; Bartelt et al., 2006; McClung & Schaerer, 2006). Dessuten er det ikke tett skog i noen av skredbanene.

Kohesjon og tetthet

Det finnes lite kunnskap om kohesjon i de undersøkte skredløpene med unntak av vissheten om at de våte skredene har høyere kohesjon enn de tørre (Bartelt et al., 2015). Det er valgt å se bort fra kohesjon i simuleringene i denne oppgaven på grunnlag av at; (1) Tørre flakskred er dimensjonerende for beregning av skredsikring (Norem, 2014), (2) RAMMS er kalibrert etter store, tørre flakskred og vil gi de mest nøyaktige resultatene ved simulering av denne typen skred (Steinkogler et al., 2014;) og (3) Håland et al. (2015) anbefaler å se bort fra kohesjon ved simulering av større tørre skred da det finnes lite erfaringer for å definere dette objektivt i Norge. Tetthet er satt til 300 kg/m^3 for alle simuleringer på bakgrunn av en norsk studie om sammenligning av skredmodeller gjort av Håland et al. (2015).

Tabell 7. Oppsummering over oppsettet av RAMMS simuleringene.

Skredløp	Areal løsneområde (m ²)	Helning løsne- område	Brudd- høyde (m)	Retur- periode (år)	Volum (m ³)	Størrelse	Lim1 Lim2 (moh.)
Sandneslia 2B	2 100	41,8	1,3	100	3 404	Tiny	750 250
Sandneslia 2C	10 650	30	1	100	12 400	Small	750 250
Knutstugug rove	28 550	44	1,2	100	40 768	Medium	1050 550
Utledøla	107 850	42	1,3	100	208 463	Large	1150 650

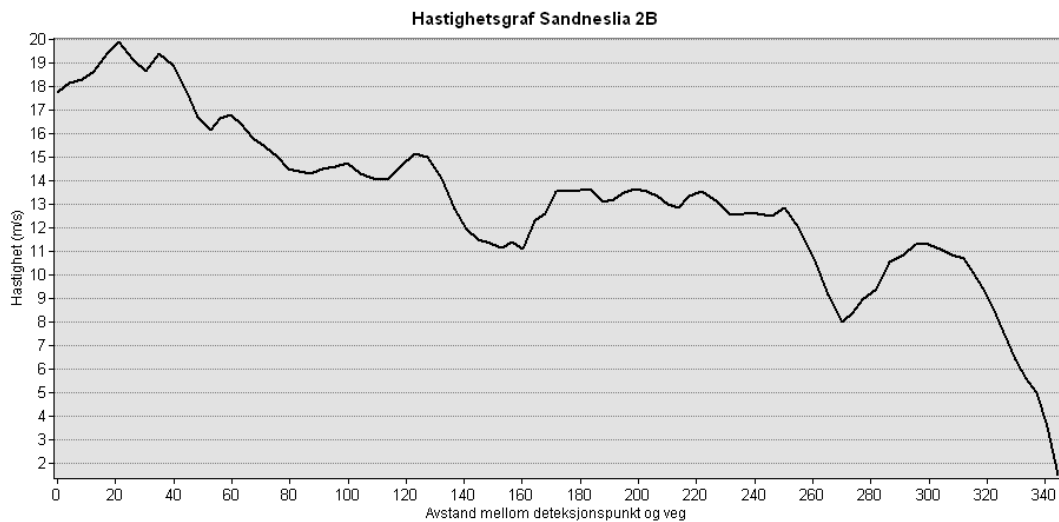
Som anbefalt av Håland et al. (2015) ble det gjort justering av høydenivå etter skoggrensen i de ulike skredløpene. I Sandneslia ligger skoggrensa på 500 moh., i Knutstugugrove 800 moh. og i Utledøla 900 moh. Lim1 og Lim2 i tabell 7 viser verdier brukt for høydejusteringer i RAMMS.

Skredene i denne oppgaven er modellert for å finne skredhastighet og det er ønskelig at denne er konservativ siden den skal brukes til beregning av nødvendig skiltavstand. Input parameterne i modelleringen er derfor vurdert etter antatt 100-års skred i alle løpene. I tillegg gir RAMMS bedre resultater ved modellering av større skred enn små skred.

4.1.2 Utregning av tid skredet bruker fra deteksjonspunkt til veg

Gjennomsnittshastigheten til skredet fra deteksjonspunkt til vegen ble funnet ut fra resultater fra hver enkelt skredsimulering gjort i RAMMS. På grunn av usikkerheten rundt eksakt deteksjonspunkt for snøskred av geofonene er det valgt å bruke punktet der snøskredet passerer geofonene. Det antas at snøskredet allerede vil ha blitt detektert ved dette punktet. Følgende ble gjort for alle skredløp:

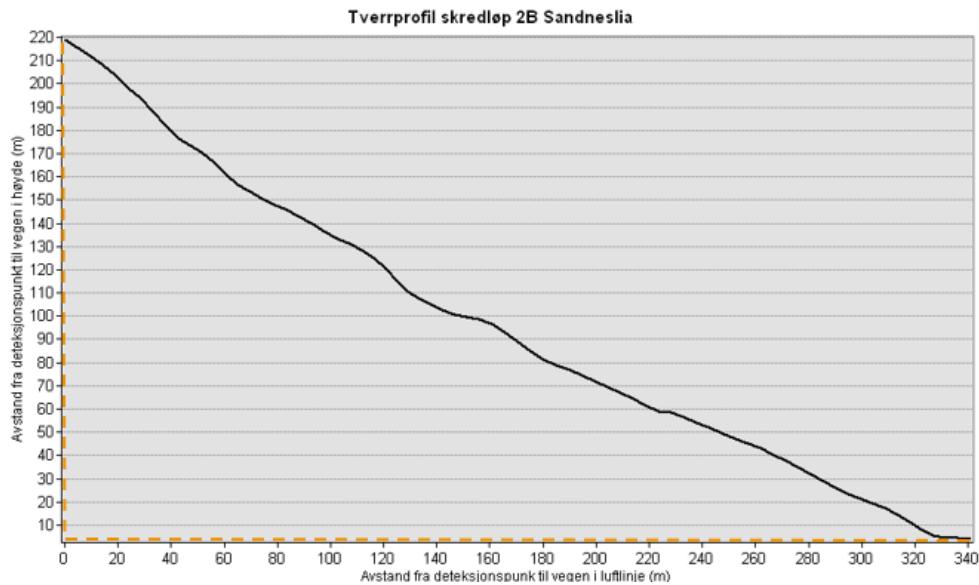
1. Resultatene for hastighet ble importert til ESRI ArcMap.
2. I ESRI ArcMap ble det gjort en 3D-analyse ved å bruke verktøyet *3D Spatial Analyst* for å få en graf for hvordan hastigheten til skredet varierte langs skredbanen (figur 28).



Figur 28. Hastighetsvariasjon langs skredløp 2B i Sandneslia.

3. Gjennomsnittshastigheten ble funnet ved å addere alle verdiene og dele på antall verdier.

4. Verktøyet *Spatial Analyst* i ESRI ArcMap ble brukt til å tegne et tverrprofil av skredbanene 2B (figur 29). Tverrsnittet viser at deteksjonspunktet i skredløp 2B i Sandneslia ligger 200 meter over havet og at det er 340 meter i luftlinje fra deteksjonspunkt til veien.



Figur 29. Tverrsnitt av skredprofilen i skredløp 2B i Sandneslia. De oransje stiplede linjene viser hvordan tverrsnittet sammen med høyden og lengden danner en rett vinklet trekant.

5. For å finne avstanden skredet reiser, langs skredbanen, ble Pytagoras' setning brukt (Store norske leksikon, 2017b). Pytagoras' setning beskriver forholdet mellom sidene i en rett vinklet trekant og på den måten kan lengden av tverrprofilet, x , finnes. For skredløp 2B i Sandneslia vil det si:

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad (6)$$

$$220^2 + 340^2 = x^2$$

$$\sqrt{220^2 + 340^2} = \sqrt{x^2}$$

$$x = 405 \text{ m}$$

At distansen skredet skal reise er 405 meter i skredløp 2B i Sandneslia.

6. For å finne tiden skredet bruker på strekningen, ble ligning 5 brukt. For skredløp 3 i Sandneslia vil det si:

$$t = \frac{s}{v} \quad (5)$$

$$t = \frac{405 \text{ m}}{13,8 \text{ m/s}} = 29 \text{ s}$$

At et skred i skredløp 2B i Sandneslia vil bruke 29 sekunder fra deteksjonspunkt til vegen.

4.1.3 Utregning av tid trafikant bruker på strekningen

Strekningen er avstanden mellom dagens trafikklys. GPS-posisjon til trafikklysene ble tatt i felt og avstanden mellom disse kan måles i ESRI ArcMap ved å bruke et måleverktøy. Ligning 5 ble brukt for å regne ut tiden en trafikant i 60 km/t (16,67 m/s) bruker på strekningen for alle skredløp. For skredløp 2B vil det si:

$$t = \frac{s}{v} \quad (5)$$
$$t = \frac{143 \text{ m}}{16,7 \text{ m/s}} = 9 \text{ s}$$

At en trafikant i 60 km/t bruker 9 sekunder på å komme seg forbi skredløp 2.

4.2 Verifisering av hendelser

Det er i hovedsak bilder som har blitt brukt for å verifisere hendelser. Den første sesongen i Sandneslia ble bilder fra viltkamera med oversikt over fire av seks skredløp brukt. Den andre sesongen ble bildene fra viltkamera supplert med et kamera montert på Geopreavents radar. I forbindelse med verifisering av hendelser i Sandneslia de første sesongene har også manuelle observasjoner og lokale vært til hjelp.

I Utledøla og Knutstugugrove er det montert kamera på radaren som overvåker skredbanen og et som overvåker vegbanen. Kameraene tar bilder en gang i timen og hyppigere ved interessante hendelser. Bildene som tas av vegbanen i Utledøla lagres hos VTS og det har ikke vært mulig å få tilgang på disse.

I forbindelse med nøye gjennomgang av bildene fra alle skredløpene har det dukket opp enkelte hendelser som ikke har blitt detektert av geofoner eller radar. Der disse hendelsene er av en størrelse som ved andre anledninger har blitt detektert, er de tatt med i resultatene for å få innblikk i konsekventheten av deteksjonen av skred av en viss størrelse. Hensikten er også å kunne si noe om skred av en viss størrelse kun vil detekteres når de har en viss dynamikk. For eksempel kan man på den måten finne ut om to små skred, henholdsvis tørt og vått, begge vil detekteres.

4.2.1 Bestemmelse av skredstørrelse

På grunnlag av at størrelsen til snøskred bestemmes av massen, hastigheten og utløpsdistansen til skredet (Biescas et al., 2003), er det gjort et forsøk på å sammenligne utløpsdistansen (fra bilder) med målte verdier av geofoner og radar. Verken geofon eller radar kan måle masse direkte. Hensikten med dette er for undersøke om det finnes en sammenheng mellom størrelsen av signalene målt av radar og geofoner og utløpsdistanse. På den måten er det mulig å se nærmere på om radar og geofon kan brukes til bestemmelse av skredstørrelse.

For å finne ut om radar kan brukes til å skille mellom skredstørrelser har fem skred i Knutstugugrove blitt sammenlignet. Grunnen til at skredene i Knutstugugrove er valgt, er at det er dette skredløpet hvor det er lettest å se størrelsen på skredene basert på utløpsdistanse da både løseområdet og hele skredbanen er synlig på bildene tatt av radaren. De fem utvalgte skredene ble valgt på grunnlag av god sikt og data fra hendelsene. For hver hendelse har det blitt bestemt en relativ størrelse i forhold til skred som går i Knutstugugrove, hvor 1 er ubetydelig/smånedfall, 2 er lite skred, 3 er middels, 4 er stort og 5 er ekstremt stort som vil nå vegen. Størrelsen er sammenlignet med målte verdier for hastighet og utstrekning.

For å finne ut om geofoner kan brukes til å skille mellom skredstørrelser har alle hendelser registrert i løp 2 og 3 i Sandneslia blitt analysert. Størrelsen er bestemt ut fra utløpsdistansen som er bestemt ut fra bilder. For hver hendelse har det blitt bestemt en relativ størrelse i forhold til skred som går i Sandneslia, hvor 1 er ubetydelig/smånedfall, 2 er lite skred, 3 er middels, 4 er stort og 5 er ekstremt stort som vil nå vegen. Størrelsen er sammenlignet med intensitet og varighet av hendelsene.

/5

Resultater

5.1 Oppsummering av detekterte skred og falske alarmer

Hvordan har de ulike anleggene fungert de første sesongene? Hvor mange skred har gått og hvor mange har blitt detektert?

5.1.1 Sandneslia

2015/2016

De seks største registrerte hendelsene fra den første sesongen i Sandneslia er oppsummert under i tabell 8. Ingen skred nådde vegen denne første sesongen som var relativt snøfattig. Det finnes ikke intensitetsdata fra geofonanlegget denne sesongen. I tillegg til hendelsene i tabellen, ble det detektert 23 mindre hendelser fra 11. mars til 30. mai. Alle disse 23 hendelsene varte i mindre enn 30 sekunder og de fleste under 10 sekunder. En av hendelsene sammenfaller med et jordskjelv like vest for Mo i Rana (NORSAR, 2017). Geofonene viste seg å være mer sensitive enn først antatt og registrerte signaler fra hendelser i skredløp 1, 4 og 6 i tillegg til 2 og 3, hvor geofonene er plassert.

I løpet av begynnelsen av april til mai ble det detektert seks mellomstore skred som har blitt verifisert ved hjelp av bilder og observasjoner (tabell 8). Av disse hendelsene var kun to store nok til at de oversteg kriteriene for skred og ville aktivert lys om lysene var tilkoblet (8. april og 28. april). De resterende fire skredene var ikke store nok til at lysene ville blitt aktivert, men SVV og NGI fikk sms/e-post om hendelsene. Alle seks mellomstore skred stoppet 50-150 meter over vegen. Natt til 28. april gikk

det to skred i Sandneslia hvorav et trigget varsel og et trigget alarm (figur 30). Hendelsen i skredløp 4A var denne sesongen utenfor anleggets varslingsområde.

Tabell 8. Oppsummering av detekterte skred i løpet av 2015/2016 sesongen i Sandneslia.

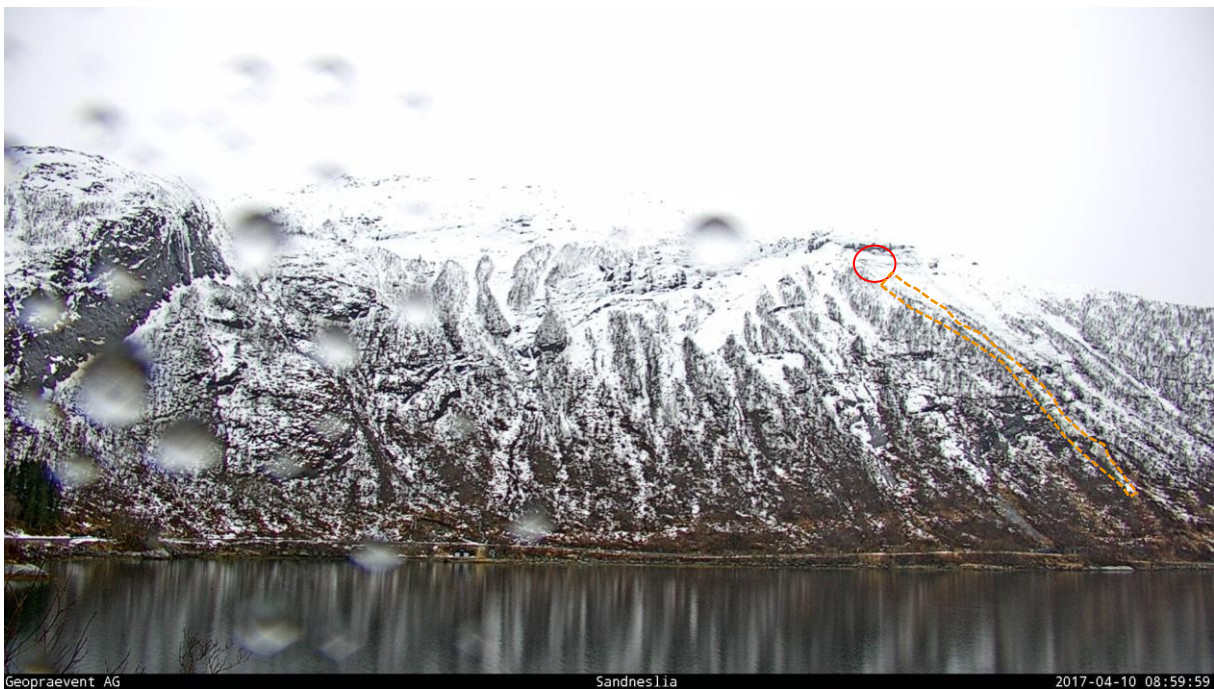
Dato	Tid	Varighet (s)	Skredløp	Plassering (mast)	Verifisering	Kommentar
5.4.16	14:11	3	5	3.3, 3.2, 2.1	Kamera	Vått skred. Finner den ikke i dataene
8.4.16	07:50	71	2B	3.3, 3.2, 2.1	Kamera	Vått skred. Alarm-stort skred
28.4.16	02:35	75	3B	3.3, 3.2, 2.1	Kamera	Vått skred. Alarm-stort skred
28.4.16	03:12	20	4A	3.3	Kamera	Vått skred. Varsel.
2.5.16	11:09	26	2A	2.1	Kamera	Vått skred. Varsel.
4.5.16	02:49	5	1	2.1	Kamera	Vått skred. Varsel.



Figur 30. To av hendelsene som ble registrert på geofonene natt til 28. april 2016. Løsneområdene er indikert med rød sirkel, skredbanen og avsetningene er indikert med oransje stiplet linje. Skredet til høyre gikk i skredbane 3B og skredet til venstre gikk i skredbane 4A. Bildet er tatt med viltkameraet.

2016/2017

Registrerte hendelser fra den andre sesongen i Sandneslia er oppsummert i tabell 9 og inkluderer registreringer fra både geofonanlegget og radaren som ble satt opp i mars 2017. Geofonene registrerte åtte hendelser hvor seks av de var interessante hendelser og to ble klassifisert som skred, 7. og 9. april. Signalet 7. april ble registrert omtrent samtidig på samtlige geofoner. Hendelsen sammenfaller med et jordskjelv styrke 2 ved Fugløya (NORSAR, 2017), 25 km vest for Sandneslia. Geofonanlegget plasserte hendelsen i skredløp 2. Hendelsen 9. april sammenfaller med et skred i skredløp 2B, se figur 31. Geofonene har observert hendelser i skredløp 2 og 3. Geofonene detekterte alle hendelser som gikk i skredløp 2 og 3, unntatt hendelsen 21.05 07-08, som uansett var en liten hendelse. Radaren detekterte 12 hendelser i skredløp 1-5 hvor fire av de var «interessante hendelser» og åtte ble detektert som skred.



Figur 31. Skredet som trigget alarm i Sandneslia vinteren 09.04.2017. Skredet ble detektert av geofonene. Bildet er tatt av Geopreavents kamera.

Tabell 9. Oppsummering av detektert skredaktivitet i løpet av 2016/2017 sesongen i Sandneslia

Dato	Tid	Varighet (s)	Intensitet	Skred-løp	Plassering (mast)	Detektert av	Verifisering	Kommentar
07.04.17	12:00	20	26	-	2 (2.1)	Geofon	Jordskjelv.no	Falsk alarm
09.04.17	21:30	80	45	2B	2 (2.1)	Geofon (Radar)	Kamera	Alarm. Tydelig skred.
05.05.17	14:35	-	-	5	-	Radar	Kamera	Lite, men tydelig skred direkte i synsvinkelen til radaren.
07.05.17	14:43	-	-	1	-	(Radar)	Kamera	-
10.05.17	03:31	-	-	5	-	Radar	Kamera	En av de større hendelsene
13.05.17	00:07	-	-	3B	-	Geofon (Radar)	Kamera	En av de større hendelsene
13.05.17	07:10	-	-	4A	-	Radar	Kamera	-
13.05.17	12:48	12	11	3B	3 (3.2)	Radar, geofon	Kamera	-
15.05.17	06:35	-	-	5	-	Radar	Kamera	-
16.05.17	15:42	-	-	5	-	Radar	Kamera	-
16.05.17	19-20	-	-	4A-3B	-	-	Kamera	Lite skred
16.05.17	20:33	-	-	5	-	Radar	Kamera	-
17.05.17	13:12	-	-	4C	-	Radar	Kamera	-
17.05.17	23:07	9	15	2A	2 (2.1)	Geofon (Radar)	Kamera	-
18.05.17	09-10	-	-	Over 3	-	-	Kamera	Muligens for langt oppe for deteksjon
19.05.17	08:54	29	33	2	2 (2.1)	Geofon	Kamera	Lite skred som stoppet øverst i skredløp 2B
21.05.17	07-08	-	-	2	-	-	Kamera	Lite skred øverst i 2.
21.05.17	08:34	10	12,5	2B	2 (2.1)	Geofon	Kamera	Veldig lite.
21.05.17	11:29	37	23	2	2 (2.1)	Geofon	Kamera	Veldig lite øverst i 2.
26.05.17	08:01	-	-	5	-	(Radar)	Kamera	Nedfall/litt snø som glir ned øverst i 5

5.1.2 Knutstugugrove

Av konkurransehensyn er ikke resultatene for styrke fremstilt i resultatdelen for Knutstugugrove.

2014/2015

Den første sesongen med radar i Knutstugugrove ble to skred detektert, 12. og 13. januar. Trafikklysene var ikke koblet til systemet og en brøytebil kjørte rett inn i

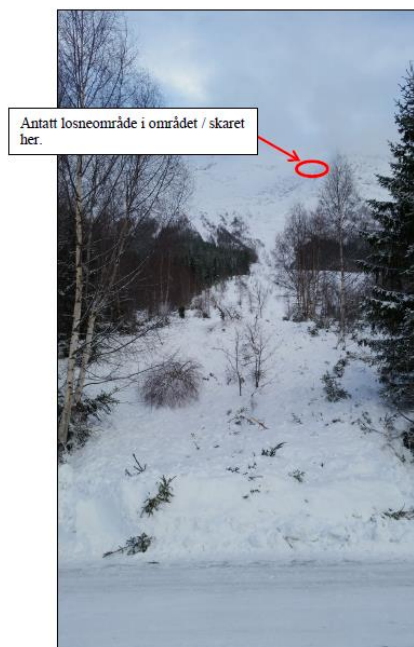
skredet den 13. januar. like etter at det hadde gått (Kind, 2015). Skredene gikk da det var mørkt og det finnes derfor ikke bilder av skredet. Det ble tatt bilder av skredmassene dagen etter, se figur 32 og 33. I tillegg til de to skredene, ble det detektert skredaktivitet (varsel) ved fem mindre hendelser, se tabell 10. Ved disse hendelsene ble to av tre varslingskriterier oversteget og det ble derfor trigget varsel, ikke alarm. Det var hastigheten som var for lav ved alle fem hendelsene.

Tabell 10. Oppsummering av detekterte skred i løpet av 2014/2015 sesongen i Knutstugugrove.

Dato	Tid	Skredtype	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Kommentar
12.01.15	21:35	Tørt flakskred	24,6	734	Alarm. Nådde ikke vegen.
13.01.15	03:57	Tørt flakskred	41	644	Alarm. Nådde vegen.
22.03.15	-	-	2,1	1274	Varsel
23.03.15	07:30	Tørt løssnøskred	5,9	1559	Varsel
21.04.15	-	Vått	2	1334	Varsel
17.05.15	-	Vått	2	959	Varsel
09.06.15	-	Vått	7,4	465	Varsel. Lite, men tydelig skred.



Figur 32. Bilde tatt av Cautus Geo sitt kamera fra synsvinkelen til radaren om morgenen den 13.01.15.



Figur 33. Avsetninger fra snøskredet 13. januar. Bildet er tatt av SVV drift fotografert fra vegen opp mot skredbanen og løseområdet.

2015/2016

Sesongen 2015/2016 var første sesong med lyssignal. Data fra 01.12.2015-01.04.2016 har liten verdi pga. interferens⁸ mellom radaren og en wifi-antenne til et kamera som ble satt opp i november 2015. I mai gikk det to skredalarmer (16. og 19. mai) der lyssignalet ikke gikk på fordi radaren ikke hadde kontakt med lysene, se tabell 11. Årsaken kan være hærverk på lys og skilt noen dager i forveien.

Tabell 11. Oppsummerer detekterte skred i Knutstugugrove i løpet av 2015/2016 sesongen.

Dato	Tid	Skredtype	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Kommentar
16.05.16	13:54	Vått skred	9,8	1439	Alarm. Verifisert med bilder.
19.05.16	00:51	Vått skred	25,7	735	Alarm. Verifisert med bilder.

2016/2017

Denne sesongen gikk det tre skred og skredaktivitet ble detektert ved to anledninger (tabell 12). Sesongens første skred var tydelig og stoppet ved toppen av skredvifta. Det gikk en gang mellom 25. og 27. desember. Denne hendelsen er verifisert ut fra bilder og ikke data fordi data fra denne hendelsen ikke finnes selv om varsling fungerte. To av hendelsene, 16. mars og 1. april, er vanskelig å verifisere ut fra bilder. Det kan skimtes noe bevegelse i deteksjonsområdet, men det er veldig lite. Skredene 17. og 31. mai er tydelige våte skred, hendelsen den 17. mai er sesongens største.

⁸ Interferens kan føre til at to eller flere bølger med samme frekvens og bølgelengde utligner hverandre (Holtebekk, 2017)

Tabell 12. Oppsummerer detekterte skred i Knutstugugrove i løpet av 2016/2017 sesongen.

Dato	Tid	Skredtype	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Kommentar
Mellom 25.12 og 27.12 2016	-	Tørt, antagelig løssnøskred	-	-	Problem med data. Verifisert.
16.03.17	10:30	Tørt, antagelig løssnøskred	9,7	1589	Alarm. Lite skred. Verifisert.
01.04.17	08:05	Antagelig vått	9,2	1409	Alarm. Lite skred. Verifisert.
17.05.17	05:36	Vått skred	25,8	600	Alarm. Når toppen av skredvifte. Verifisert med bilder.
31.05.17	04:00	Vått skred	10	434	Alarm. Verifisert med bilder.

5.1.3 Utledøla

Av konkurransehensyn er ikke resultatene for styrke fremstilt i resultatdelen for Utledøla.

2014/2015

Hendelsene fra sesongen 2014/2015 er oppsummert i tabell 13. Denne sesongens data starter 5. mars. Etter 5. mars ble det detektert to skred. I tillegg ligger det inne tre vegmeldinger i xGeo om at vegen er stengt på grunn av snøskred; 8., 15. og 29. februar 2015 (xGeo, 2017). Ut fra bildene ser det ut som det gikk skred 15. februar, men skredene 8. og 29. februar er ikke verifisert ut fra bilder, og det finnes ikke data. Derfor er de ikke tatt med i tabellen. Kameraet på radaren tok også et bilde av en tydelig snøsky den 30. januar.

Tabell 13. Oppsummering av detektert og observert skredaktivitet i løpet av 2014/2015 sesongen i Utledøla.

Dato	Tid	Skredtype	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Kommentar
30.01.14	12:54	Tørt, antagelig flakskred	-	-	Ingen data, kun bilder
15.02.15	09:58	Tørt, antagelig flakskred	-	-	Ingen data, kun bilder. Verifisert med bilder. Veg stengt.
07.03.15	-	-	12,7	1454	Verifisert med kamera
10.03.15	09:54	-	11,8	1469	Verifisert med kamera

Denne første sesongen i Utledøla var det ifølge pendlere en rekke stengninger uten at skred nådde vegen (Grotle, 2016). Hvis det gikk alarm da det var mørkt måtte ryddemannskap vente til dagen etterpå for å se om skredet hadde nådd vegen fordi de på grunn av forskrifter ikke har lov til bevege seg inn i skredutsatte området når det er mørkt. Vegen kunne dermed være stengt fra ettermiddag til morgenen etter før det ble sjekket om skred nådde vegen. Det er uvisst om denne rekken med stengninger er de tre hendelsene som er registrert på xGeo (xGeo, 2017), eller om det dreier seg om flere hendelser.

2015/2016

Radaren ble ikke satt i drift før i april på grunn av oppdateringer på selve radaren, samt forbedringer på strøm- og nettverkløsning. Denne sesongen ligger det ikke inne noen vegmeldinger om at vegen er stengt på grunn av snøskred. Det finnes data fra fire hendelser og de er oppsummert i tabell 14. Hendelsene i mai kunne ha trigget alarm og stengt vegen, men antageligvis varte ikke signalet lenge nok.

Tabell 14. Oppsummering av detektert skredaktivitet i løpet av 2015/2016 sesongen i Utleðøla.

Dato	Tid	Skredtype	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Kommentar
24.12.15		Vått	8,9	555	Verifisert ut fra bilder
02.03.16		Tørt	36,9	899	Verifisert ut fra bilder
16.05.16		-	14	1469	Ikke verifisert
19.05.16		Vått	25,7	824	Lite skred

2016/2017

Skredaktivitet ble registrert fem ganger oppsummert i tabellen under. Det ligger inne fire vegstengninger i xGeo, 25. desember, 4. januar, 25. februar, og 17. mars (xGeo, 2017). Det finnes ikke data fra hendelsen 17. mars på grunn av fullt minne på radaren, men det ble detektert skred, det gikk alarm og melding ble sendt til Vegvokteren og vegen ble stengt (xGeo, 2017). Vegen ble ikke stengt ved hendelsen 5. mai selv om varslingskriteriene ble nådd, antagelig fordi aktiviteten ikke vedvarte i 15 min.

Tabell 15. Oppsummering av detektert skredaktivitet i løpet av 2016/2017 sesongen i Utleðøla.

Dato	Tid	Skredtype	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Kommentar
25.12.16	04:44	-	10,5	405	Alarm. Verifisert med kamera
04.01.17	08:12	Tørt flakskred	8,3	764	Alarm. Verifisert med kamera
25.02.17	18:01	-	10,3	705	Alarm. Verifisert med kamera.
17.03.17	06:19	-	-	-	Alarm. Ingen data, varslingsfungerter. Verifisert med kamera
05.05.17	16:30	Vått	11,9	914	Verifisert med kamera

5.2 Lokalisering av skred

Hvilken teknologi (radar, geofoner) fungerer best til å plassere skredene i rett skredløp?

Nøyaktig plassering av skred er mest relevant Sandneslia da det er viktig at skredene plasseres i rett skredløp for at de tilhørende lysskiltene skal trigges. Radaren har ikke plassert noen hendelser rett. Geofonene har plassert alle hendelser i rett skredløp.

Tabell 16. Oppsummering av plassering av skred i Sandneslia 2016/2017 av geofoner og radar.

Dato	Tid	Detektert av	Skredløp	Plassering gjort av radar	Plassering gjort av geofon (mast)
07.04.17	12:00	Geofon	-	-	2 (2.1)
09.04.17	21:30	Geofon (Radar)	2B	-	2 (2.1)
05.05.17	14:35	Radar	5	Mellom 4A og 4B	-
07.05.17	14:43	(Radar)	1	-	-
10.05.17	03:31	Radar	5	Mellom 4A og 4B	
13.05.17	00:07	Geofon (Radar)	3B	-	-
13.05.17	07:10	Radar	4A	Krysser fra 2A til 2B	-
13.05.17	12:48	Radar, geofon	3B	Krysser fra 2A til 2B	3 (3.2)
15.05.17	06:35	Radar	5	4A	-
16.05.17	15:42	Radar	5	4B	-
16.05.17	19-20	-	4A	-	-
16.05.17	20:33	Radar	5	4B	-
17.05.17	13:12	Radar	4C	Krysser fra 3B til 4A	-
17.05.17	23:07	Geofon (Radar)	2A	-	2 (2.1)
18.05.17	09-10	-	Over 3	-	-
19.05.17	08:54	Geofon	2	-	2 (2.1)
21.05.17	07-08	-	2	-	-
21.05.17	08:34	Geofon	2B	-	2 (2.1)
21.05.17	11:29	Geofon	2	-	2 (2.1)
26.05.17	08:01	(Radar)	5	-	-

5.3 Differensiering mellom skredstørrelser

Kan radar og geofoner fortelle oss noe om størrelsen til skredene?

Radar

Ved å sammenligne målt hastighet, utstrekning og relativ størrelse på skredene (basert på utløpsdistanse fra bilder i Knutstugugrove) viser tabell 17 under at det er en viss sammenheng mellom størrelse på skredet og størrelse på registrert bevegelse av radaren.

Tabell 17. Oppsummering av hastighet, utstrekning og størrelse av fem skred i Knutstugugrove.

Dato	Hastighet (m/s)	Uttrekning (m)	Størrelse
13.01.15	41	644	5
16.05.16	9,8	1439	2
19.05.16	25,7	735	3
17.05.17	25,8	600	3
31.05.17	10	434	2

Hastighet og størrelsesforholdet stemmer for alle hendelsene. Det største skredet har også den største hastigheten og det minste skredet har den laveste hastigheten. For utstrekning har et av de minste skredene også den minste utstrekningen, men det største skredet har den nest minste utstrekningen.

Geofoner

Ved å sammenligne varigheten på signalene fra skredene og den relative størrelsen, basert på utløpsdistanse og masse fra bilder, viser tabell 18 at det er en viss sammenheng mellom størrelse og varighet. De største skredene, størrelse 3 og 4, har også generert de lengste signalene med den høyeste intensiteten. Ved de mindre skredene ser det ikke ut som det er noen klar sammenheng mellom varighet, intensitet og størrelse. De fleste av disse hendelsene kan knapt kalles skred og er derfor definert med størrelse 1, nedfall/ubetydelig.

Tabell 18. Oppsummering av varighet og relativ størrelse av ni skred i Sandneslia. Der det finnes data for intensitet er det også tatt med.

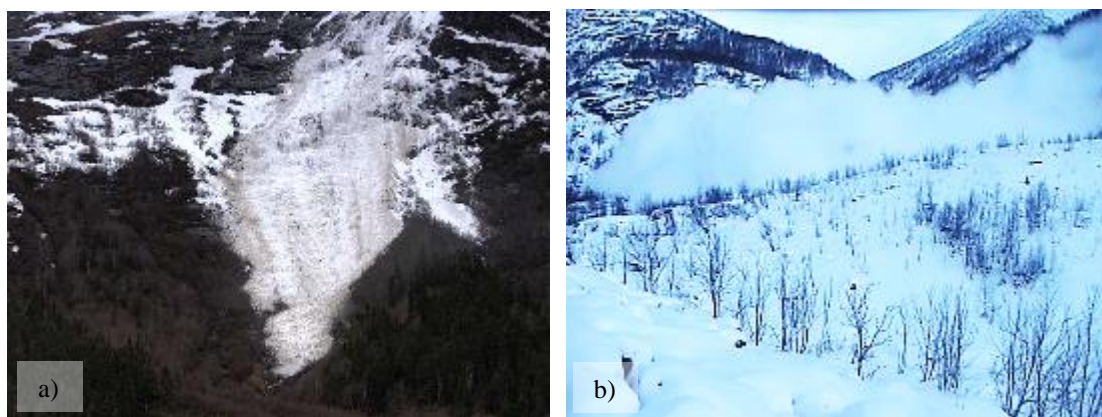
Dato	Varighet	Intensitet	Størrelse
08.04.16	71		3
28.04.16	75		3
02.05.16	26		2
09.04.17	80	45	4
13.05.17	12	11	2
17.05.17	9	15	2
19.05.17	29	33	1
21.05.17	10	12,5	1
21.05.17	37	23	1

5.4 Differensiering mellom skredtyper

Kan radar og geofoner skille mellom våte og tørre skred, og vil begge typer detekteres?

Radars

Radaren kan detektere både tørre og våte skred, se figur 34. Foreløpig er det ikke kjent at radarene evaluert i denne oppgaven kan skille mellom våte og tørre skred. Ved å sammenligne hastighet, utstrekning og skredtype er det ikke funnet noen sammenheng, se tabell 19 og 20. For eksempel har et vått skred den største utstrekningen og et tørt skred den nest største utstrekningen i Utledøla.



Figur 34. Radar kan detektere våte og tørre skred. a) Vått skred detektert i Knutstugugrove 17. mai 2017. b) Tørt skred detektert i Utledøla 4. januar 2017. Bildene er tatt av kamera på radar.

Tabell 19. Oppsummerer skredene i Utledøla som har vært mulig å verifisere som enten tørre eller våte skred.

Dato	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Skredtype
24.12.15	8,9	555	Vått
02.03.16	36,9	899	Tørt
19.05.16	14	1469	Vått
04.01.17	8,3	764	Tørt flakskred
05.05.17	11,9	914	Vått

Tabell 20. Oppsummerer skredene i Knutstugugrove som har vært mulig å verifisere som enten tørre eller våte skred.

Dato	Hastighet (m/s)	Utstrekning (m)	Skredtype
12.01.15	24,6	734	Tørt flakskred
13.01.15	41	644	Tørt flakskred
23.03.15	5,9	1559	Tørt flakskred
21.04.15	2	1334	Vått
17.05.15	2	959	Vått
09.06.15	7,4	465	Vått
16.05.16	9,8	1439	Vått
19.05.16	25,7	735	Vått
16.03.17	9,7	1409	Tørt
17.05.17	25,8	600	Vått
31.05.17	10	434	Vått

Geofoner

Alle skredene i Sandneslia var våte løssnøskred. Det finnes derfor ingen resultater fra geofonanlegget i Sandneslia som viser om signaturen til våte og tørre skred i Sandneslia er forskjellige fra hverandre og om begge typer vil detekteres.

5.5 Filtrering av signal

Hvilken teknologi har best filtreringer slik at falske alarmer reduseres?

Geofonene i Sandneslia kan filtrere signaler ved amplitude (intensitet), samt varighet av aktivitet. Varslingskriteriene i geofonanlegget er blant annet at det skal registreres rystelser på alle geofoner i samme geofongruppe og har på den måten klart å filtrere bort signaler fra ytre påkjenninger som dyretråkk og vær. Dette er bevist ut fra at alle hendelsene i Sandneslia er verifisert med kamera, observasjoner eller som jordskjelv. To jordskjelv har skapt falske alarmer i geofonsystemet i Sandneslia, noe som tyder på at dette er et utfordrende signal å filtrere bort. Bortsett fra at geofonanlegget var i

overkant sensitivt den første sesongen, har det ikke vært noen andre falske alarmer på geofonanlegget i Sandneslia.

Radaren filtrerer i hovedsak bort falske alarmer ved å bruke en hensiktsmessig frekvens og med varslingskriterier for styrke, hastighet og utbredelse. Det kan ikke sies med 100 % sikkerhet at det har vært noen falske alarmer i Knutstugugrove og Utledøla da bildene er for dårlige. Det har blitt detektert bevegelse i Utledøla flere ganger uten at bevegelse er verifisert (8. februar 2015, 29. februar 2015 og 16. mai 2016). I Utledøla i mai 2016 ble det registrert bevegelse som oversteg varslingskriteriene, men varigheten var for kort til å trigge alarm. Det tyder på god filtrering da ingen av disse registrerte bevegelsene kom fra skred som traff, eller var nære å treffe vegen.

5.6 Plassering av deteksjonssensorer og skilt

Vurderingen av plasseringen av deteksjonssensorer og skilt i de ulike anleggene er oppsummert i tabell 21. Av tabellen kommer det frem at, ifølge hastighetsberegningene gjort med RAMMS, står deteksjonssensorene og skiltene plassert med hensiktsmessig avstand slik at en trafikant som kjører inn på strekningen like etter at et skred har kommet i bevegelse, vil rekke å komme seg trygt forbi den skredutsatte strekningen. I Utledøla viser simuleringene som er gjort at lysene er plassert med trygge stoppesteder på begge sider av strekningen avgrenset av lysskiltene. I Knutstugugrove viser simuleringene som er gjort at lysene er plassert med trygge stoppesteder, men at skredmassene er veldig nærme å treffe vegen ved lysskiltene. Resultatene fra RAMMS simuleringene er fremstilt i vedlegg A. I Sandneslia viser simuleringene at skredmasser kan treffe vegen mellom skredløp 1 og 2, altså at en trafikant som blir stoppet nord for skredløp 2B, kan risikere å bli truffet av skredmasser. Derfor er det gjort en ekstra vurdering på om trafikanten rekke å komme seg forbi skredløp 1 før skredet når vegen. Det viser seg at ved et skred i skredløp 2B vil trafikanten rekke å komme seg helt forbi skredløp 2 og 1 og kan stoppe trygt nord for skredløp 1 eller sør for skredløp 2. Skred som starter høyere opp, i 2C, vil ha en høyere hastighet og trafikanten vil ikke rekke å komme seg forbi skredløp 1 og 2. En trafikant som kjører inn på strekningen under skredløp 3, vil ifølge skredsimuleringene, rekke å komme seg trygt forbi før skredet når vegen.

Tabell 21. Oppsummering av resultatene fra beregningene av lysskiltavstand. *I skredløp 3 er det brukt samme hastighet som i skredløp 2 fordi det antas at de er relativt like.

**Beregning gjort for å se om en trafikant kommer seg helt forbi skredløp 1 hvis det går skred i skredløp 2.

Skredløp	Avstand mellom lys (m)	Hastighet trafikant (km/t)	Gjennomsnittlig hastighet skred (m/s)	Avstand fra deteksjonspunkt til veg (m)	Tid skredet bruker (s)	Tid trafikanten bruker (s)	Tid til gode (s)	Tilstrekkelig avstand mellom lys
Knutstugugrove	318	60	33	1005	27	19	5	Ja
Utledøla	700	60	19	882	46	42	1	Ja
Sandneslia 2B	143	60	13,8	405	29	9	17	Ja
Sandneslia 2C	143	60	20,5	405	20	9	8	Ja
Sandneslia 3	183	60	13,8*	394	29	11	15	Ja
Sandneslia 2B	345**	60	13,8	405	29	21	5	Ja
Sandneslia 2C	345**	60	20,5	405	19	21	-5	Nei

5.7 Investeringskostnad og vedlikehold (kost/nytte)

Tabell 22 oppsummerer kostnadene for sikring av de ulike skredløpene med tradisjonelle tiltak som foreslått i skredsikringsplan og kostnadene ved sanntidsvarslingsanleggene. Kostnadene for geofonanlegget er inkludert utvikling og oppgraderinger og hadde vært mindre om det ble satt opp i dag. En stor og kostnadsdrivende faktor for samtlige anlegg er strømtilførsel, en faktor som vil variere fra prosjekt til prosjekt.

Tabell 22. Oppsummering av kostnadene for sikring av de ulike skredløpene.

Anlegg	Installasjonskostnad	Årlige driftskostnader	Andre kostnader	Estimert kostnad for tradisjonelle tiltak
Sandneslia	2,35 millioner	100 000	-	30 millioner
Knutstugugrove	2 millioner	150 000	-	65 millioner
Utledøla	3,1 millioner	150 000	600 000	12 millioner

5.8 Fordeler og begrensninger

Generelle fordeler og begrensninger (som topografi, signaloverføring, prosesseringstid, strømbruk, varsling, driftsutfordringer) med de ulike teknologiene

Fordeler og begrensninger med radar og geofoner er oppsummert i tabell 23. Både radar og geofoner krever at skredløpet er langt nok til at trafikanter kan varsles tidsnok før skredet treffer vegen. Driftsutfordringer og andre fordeler og begrensninger er oppsummert i kulepunkt for hvert anlegg.

Tabell 23. Oppsummering av fordeler og begrensninger med geofoner og radar.

Teknologi	Topografi	Signal-overføring	Prosesseringstid	Strøm-bruk
Radar	Krever fri sikt mellom radar og deteksjonsområde	Trådløs	< 3 sek	Radar og styrings skap
Geofon	Krever fri sikt fra radiomast til styringsskap	Trådløs	3 sek	Styrings skap

Sandneslia

- Kabler fra geofoner til radiomaster er sårbare, men det er i størst mulig grad prøvd å grave disse ned i løsmasser for å unngå strekkskader eller dyretråkk
- Redusert sensitivitet på antenne på grunn av nedbør, men dette skal løses til neste sesong (2017/2018)
- Anlegget har fungert som forutsett

Knutstugugrove

- Hærverk på lysskilt
- Interferens med WiFi antenne. Anlegget varslet fortsatt skred
- Lokal varsling til døgnvakt hos entreprenør har fungert bra

Utledøla

- Fullt minne på radar på grunn av begrenset kommunikasjon. Anlegget varslet fortsatt skred
- Prosedyrene den første sesongen, da det var krav om at noen fysisk måtte sjekke om skred hadde nådd vegen, førte til unødvendig lange stengninger
- Dårlig kommunikasjon mellom radar, lysskilt og VTS på grunn av dårlig dekning
- VTS. Manglende prosedyre for hva VTS og drift skulle gjøre ved alarm.

I Utledøla har det blitt gjort noen oppdateringer underveis for å løse driftsutfordringene. De inkluderer:

- Strøm ble installert helt opp til radaren i forkant av 2015/2016 sesongen. På grunn av strømbrudd sesongen 2014/2015 ble det også installert en backup strømløsning for å sikre 8 timer ekstra tid ved strømbrudd
- De batteridrevne stopplysene ble byttet ut med brenselcelledrevne lys etter at det viste seg krevende å vedlikeholde batteriene
- Bedre nettverksforbindelse ble bestilt da svært dårlig mobildekning førte til kommunikasjonsproblemer mellom radaren, VTS og Vegvokteren
- Nye prosedyrer ved alarm

/6

Diskusjon

6.1 Detekterte skred og falske alarmer

For at automatisk snøskredvarsling skal fungere som et sikringstiltak er det viktig at det ikke fører til unødvendige stengninger eller sekundære bieffekter som igjen kan øke trafikkrisikoen. Dersom anlegget stenger vegen når det ikke går skred vil det ikke bli oppfattet troverdig av trafikanter og sannsynligheten for at de ignorerer lysskilt vil øke. Det er derfor viktig å unngå å stenge vegen ved falske alarmer og i størst mulig grad ved skred som ikke når vegen. Der dette har vist seg vanskelig, kan gode prosedyrer for åpning av vegen gjøre stor forskjell. Dette har vært et problem spesielt i Utledøla hvor lysene ble koblet på allerede første sesongen, med et lite grunnlag for innstilling av varslingskriterier og prosedyrer ved alarm. Det har ført til unødvendig lange stengninger og kanskje trafikanter i en viss grad kan ha mistet tiltroen til systemet (Grotle, 2016).

I løpet av den første sesongen i Sandneslia detekterte geofonanlegget 29 skredhendelser, hvorav to av disse ble definert som skred som hadde trigget varsel. Den andre sesongen detekterte geofonanlegget 8 skredhendelser, hvor to ble definert som skred og hadde trigget varsel. Det var en betydelig reduksjon i antall registrerte hendelser av geofonanlegget fra første til andre sesong. Årsaken til reduksjonen er først og fremst innstillingen av sensitiviteten til anlegget. Den første sesongen var formålet å tilegne seg kunnskap og erfaring med anlegget og derfor var det ønsket å detektere mye aktivitet. Resultatet ble en database med aktivitet og verifiserte skred som kunne brukes til å stille inn sensitiviteten til anlegget slik at kun større hendelser ble varslet den andre sesongen. Dette er bevist ved at geofonene den andre sesongen kun detekterte skred i skredløp 2 og 3, som det opprinnelig var satt opp for å gjøre.

Den første sesongen viste geofonene seg å være mer sensitive enn først antatt (Kvistedal, 2016). Noen av de mindre isnedfallene og skredene den første sesongen ble detektert av geofoner flere hundre meter unna. Dette tyder på at geofoner kan brukes til å detektere skred over et større område, noe som samsvarer med tidligere lignende undersøkelser (Leprettre et al., 1996; van Herwinjen & Schweizer, 2011). All skredaktivitet i lia de første sesongene var direkte på berg. Årsaken til dette kan være siden berg fungerer som en naturlig forsterker av det seismiske signalet (Leprettre et al., 1996). I skredbaner der det er mer vegetasjon eller snø mellom skredbevegelsen og geofonene, kan signalet som når frem til geofonene være svakere fordi vegetasjon og snø kan absorbere noe av intensiteten til de seismiske signalene (Pérez-Guillén et al., 2016; Pérez-Guillén, 2016). Det er utfordrende å forutse hvordan de seismiske signalene eventuelt vil reise gjennom snø, da snø er et porøst medium med lagvis endringer i materialeegenskaper (Pérez-Guillén, 2016).

For at radaren ikke skal gi utslag på falske alarmer er frekvensen viktig. Schreiber et al. (2001) hevder at for å detektere snøskred med en høytetthets kjerne er frekvensen 4-8 GHz hensiktsmessig fordi man da ikke vil ha problem med at snøvær slår inn som potensiell falsk alarm. Det betyr også at deteksjon av pudderskred vil være vanskeligere, da disse vil vises ved høyere frekvens hos radaren. For å detektere pudderskred bør man ha en radar med høyere frekvens, men da vil også sjansen for falske alarmer forårsaket av snøvær være et større problem. Schreiber et al. (2001) sine anbefalinger om frekvens er imidlertid 16 år gamle, og mye har antageligvis skjedd på utviklingen av dopplerradarteologi siden 2001. Blant annet har filtreringsteknikkene blitt bedre. Snøvær har ikke ført til falske alarmer så langt på de tre anleggene beskrevet i oppgaven. Det kan tyde på at radarene har riktig frekvens. For å detektere pudderskred bør radaren ha en frekvens på 35-40 GHz (Schreiber et al., 2001).

Radaren i Sandneslia detekterte åtte skred og alle hendelsene er verifisert med kamera. Hendelsene radaren har definert som «interessante hendelser» er fordelt fra skredløp 1-5, men hendelsene definert som skred er fordelt i skredløp 3-5. Foreløpig har det ikke gått noen skred i skredløp 6. Ut fra resultatene i radarens første sesong kan det derfor med stor sannsynlighet fastslås at radaren kan detektere skred i samtlige skredløp. Imidlertid kan det virke som at radaren har en større sensitivitet for skred

direkte i radarens synsfelt da radaren detekterte små skred i sitt direkte synsfelt, og ikke større skred som gikk lengre til høyre i synsfeltet. For eksempel ble det største skredet (lengst utløpsdistanse) som gikk den andre sesongen i Sandneslia (9. april 2017) detektert som «interessant hendelse» og ikke skred av radaren. Radaren sannsynligvis vil kunne kalibreres bedre til de lokale forholdene ved ytterligere erfaring, samtidig som at teknologiutviklingen på dopplerradarer er i stadig utvikling. Ut fra resultatene den første sesongen kan det derfor virke som at radaren og geofonene supplerer hverandre godt for deteksjon av skred i skredløp 2-5.

I Utledøla har det vært utfordrende å verifisere alle skredene ut fra bilder, noe som gjør det vanskelig å si helt sikkert hvor mange av de varslede hendelsene som er på grunn av skred. Grunnen til at det er så få hendelser som har trigget alarm i Utledøla henger sammen med at det foreløpig er svært få skred som har nådd deteksjonspunktet. Dette kan tyde på at ved å kun detektere skred som når dette punktet, vil en del av de mindre skredene allerede filtreres bort naturlig. I Utledøla har vegen vært stengt sju ganger i løpet av de tre første sesongene i (xGeo, 2017). Fire av de sju alarmene er verifisert som skred som ikke nådde vegen. Tre alarmer den første sesongen er ikke verifisert, men kan ha en sammenheng med at terskelverdiene var satt lavt den første sesongen for å være på den sikre siden. Disse tre alarmene er derfor sannsynligvis ikke falske alarmer.

I Knutstugugrove er alle alarmer de to siste sesongene verifisert med kamera, noe som tyder på god filtrering. Imidlertid mangler det data fra nesten hele 2015/2016 sesongen, noe som gjør det vanskelig å vurdere denne sesongen. I sesongene med lysvarsling (2015/2016 og 2016/2017), har ikke Knutstugugrove vært stengt noen ganger og skredene har heller ikke nådd vegen eller vært nære å nå vegen.

I tillegg til antall skred og skredstørrelse, er en av årsakene til at vegen har vært stengt flere ganger i Utledøla enn i Knutstugugrove forskjellen i prosedyrene. Den første sesongen i Utledøla førte tilkoblingen mot VTS til vegmelding om stengt veg før det har blitt bekreftet om skredet nådde vegen eller ikke. De første sesongene, når varslingskriteriene var stilt inn på et tynt datagrunnlag, kan det tyde på at prosedyren i Utledøla har ført til unødvendig mange lange stengninger. Skredaktiviteten som har oversteget varslingskriteriene i Knutstugugrove har ikke ført til lange stengninger og det kan virke som om prosedyrene der er smartere. Valg av prosedyrer ved alarm

avhenger også av tilgjengeligheten, da Knutstugugrove ligger mer tilgjengelig til er det også lettere å få verifisert skred og åpnet vegen ved eventuell stengning på grunn av skred som ikke nådde vegen.

Alt som beveger seg i siktelinjen til radaren kan potensielt skape falske alarmer. Sannsynlige kilder til falske alarmer kan dermed være dyr og tett snøvær. Spesielt i Utledøla, hvor skredvifta er relativt slak og tilgjengelig, fantes det i startfasen noe bekymringer om hvorvidt hjort og sau kunne føre til falske alarmer. Dyr har imidlertid ikke vist seg som noe kjent problem i noen av skredløpene. Leverandør av radaranleggene i denne oppgaven hevder at tett snøvær ikke skal påvirke resultatene. Under deteksjon av skred 12. og 13. januar 2015 i Knutstugugrove var det snø i lufta og skred ble fortsatt detektert korrekt. Det er derfor vist at det skal mye til for å forstyrre radaren.

For at radaren ikke skal gi utslag på falske alarmer er frekvensen viktig. Schreiber et al. (2001) hevder at for å detektere snøskred med en høytetthets kjerne er frekvensen 4-8 GHz hensiktsmessig for å unngå problem med at snøvær kan slå inn som potensiell falsk alarm. Det betyr også at deteksjon av pudderskred vil være vanskeligere, da disse vil vises ved høyere frekvens hos radaren. For å detektere pudderskred bør man ha en radar med høyere frekvens, men da vil også sjansen for falske alarmer forårsaket av snøvær være et større problem. Schreiber et al. (2001) sine anbefalinger om frekvens er imidlertid 16 år gamle, og mye har antageligvis skjedd på utviklingen av dopplerradarteknologi siden 2001. Blant annet har filtreringsteknikkene blitt bedre. Snøvær har ikke ført til falske alarmer så langt på de tre anleggene beskrevet i oppgaven. Det kan tyde på at radarene har riktig frekvens. For å detektere pudderskred bør radaren ha en frekvens på 35-40 GHz (Schreiber et al., 2001).

I teorien kan flere typer rystelser som tungtrafikk, lynnedslag og jagerfly opptre som kilde til falsk alarm for geofonanlegget. Imidlertid er det foreløpig jordskjelv som har skapt falske alarmer i Sandneslia. Signalene fra et jordskjelv skal i teorien gi like store signaler og med samme varighet samtidig på geofoner som ligger i nærheten av hverandre (Leprettre et al., 1996). En metode for å skille signaler fra jordskjelv og signaler fra snøskred i Sandneslia kan derfor være å se om signalet registreres samtidig med samme intensitet og varighet på samtlige geofoner i lia. Alarmen den 7. april 2017 ble registrert omtrent samtidig på samtlige geofoner, men det var kun på

radiomast 2.1 at signalene var store nok til å overstige varslingskriteriene for skred. Å filtrere ut falske alarmer forårsaket av jordskjelv er derfor kanskje ikke like lett i praksis som i teorien beskrevet av Leprettre et al. (1996). En årsak til at intensiteten av signalene var større på radiomast 2.1 enn de andre mastene, kan være oppsprekking av fjellet som vil medføre en forsinkelse og svekkelse av det seismiske signalet (Elvebakk, 2011). Størrelsen til forsinkelsen og svekkelsen av signalet fra kilden til jordskjelvet til geofonene i Sandneslia er vanskelig å måle.

Alt som beveger seg i siktelinjen til radaren kan potensielt skape falske alarmer. Sannsynlige kilder til falske alarmer kan dermed være dyr og tett snøvær. Spesielt i Utledøla, hvor skredvifta er relativt slak og tilgjengelig, fantes det i startfasen noe bekymringer om hvorvidt hjort og sau kunne føre til falske alarmer. Dyr har imidlertid ikke vist seg som noe kjent problem i noen av skredløpene. Leverandør av radaranleggene i denne oppgaven hevder at tett snøvær ikke skal påvirke resultatene. Under deteksjon av skred 12. og 13. januar 2015 i Knutstugugrove var det snø i lufta og skred ble fortsatt detektert korrekt. Det er derfor vist at det skal mye til for å forstyrre radaren.

6.2 Lokalisering av skred

Hvilken teknologi (radar, geofoner) fungerer best til å plassere skred i rett skredløp?

Denne problemstillingen er mest relevant for Sandneslia fordi der er det flere parallelle skredløp. Leverandør for både geofon- og radaranlegg hevder at systemet skal kunne lokalisere skredet i riktig skredløp. Dette vil være viktig dersom man ønsker sanntidsvarling for hvert enkelt skredløp. Geofonanlegget skiller foreløpig hvilken skredbane skredene går i bedre enn radaren og plasserte alle hendelsene den andre sesongen i rett skredløp. Det er viktig å påpeke at radaren kun har vært operativ en halv sesong og dermed har liten erfaring i å skille skredløpene, mens geofonanlegget har vært oppe i to sesonger. Radaren har ikke plassert noen av skredene denne sesongen helt rett med unntak av noen skred som er indikert til å ha gått på kryss av to skredløp hvor det ene er rett. I følge leverandør vil plassering være på plass til neste sesong.

Leprettre et al. (1996) foreslår at et skred i ett bestemt skredløp muligens kan ha en så spesifikk seismisk signatur at det kan skilles fra skred i naboskredløp og dermed plasseres ut fra sin signatur. I tillegg kan denne signaturen brukes til å skille skred fra

andre seismiske signaler. Bessason et al. (2007) har utviklet et geofonsystem på Island som detekterer steinsprang, flomskred og snøskred. For å skille mellom ulike typer skred, skredbaner og skredstørrelse, sammenlignes hver enkelt hendelse med historiske hendelser i en database med over 6000 hendelser. Et av målene med systemet var å kunne klassifisere skredenes størrelse, -type og lokalisere hendelsene ved nærmeste-nabo metoden. Det viste seg å ikke fungere optimalt. Det kreves en stor database for at dette skal fungere, men kanskje kan det være en mulighet både for radar og geofonanlegg med mer erfaring.

6.3 Differensiering mellom skredstørrelse

Kan radar og geofoner fortelle oss noe om størrelsen til skredene?

Resultatene fra de første sesongene til varslingsanleggene viser en klar trend mot at det er en sammenheng mellom størrelsen på genererte signaler og skredstørrelse. Dette stemmer godt overens med flere andre undersøkelser, blant annet Suriñach et al. (2001) og Biescas et al. (2003).

For geofonene er det ikke et lineært forhold mellom amplituden til signalene fra vilkårlige snøskred og skredstørrelse. Amplituden til signalene avhenger også av skredløpet og egenskapene til skredmassene, spesielt tettheten (Suriñach et al., 2000; Suriñach et al., 2001). Derimot kan amplituden fra signaler generert av skred med tilnærmet lik tetthet, som går i samme skredløp, sammenlignes og brukes til bestemmelse av relativ snøskredstørrelse. For å lage en ligning for sammenhengen i Sandneslia kreves det imidlertid mer data.

I tillegg til amplituden på signalene, kan varigheten av signalene brukes for å si noe om størrelsen på skredet. For eksempel fant Biescas et al. (2003) i sin undersøkelse at store skred med høy hastighet har relativt kort signal. Pérez- Guillén et al. (2016) studerte de akustiske signalene fra 32 snøskred og fant et forhold mellom varigheten av signalene og utløpsdistansen for skred av samme type. Undersøkelser gjort av Biescas et al. (2003) og Suriñach et al. (2001) viser begge at større skred har lengre signaler og genererer signaler med høyere amplitude. For skred av samme type, kan det derfor være mulig å differensiere mellom skredstørrelser ved hjelp av geofoner i Sandneslia.

Som med de seismiske signalene, er det heller ikke helt rett frem å definere skredstørrelse ut fra de målte verdiene for hastighet og utstrekning. En viss skredhastighet korrelerer for eksempel ikke alltid til en viss skredstørrelse. Skredhastigheten varierer med lokale forhold som terreng og skredtype (McClung & Schaerer, 2006).

I Utledøla har det vært utfordrende å bestemme størrelsen på skredene som når vegen. Skred som går tidlig på sesongen fyller igjen forsenkninger i terrenget. Et mindre skred kan da få lengre utløpsdistanse i forhold til sin utstrekning fordi det kan forsere det utjevnete terrenget enklere og dermed nå lengre.

6.4 Differensiering mellom skredtyper

Geofonanlegget har foreløpig kun detektert våte skred og det er derfor ikke bekreftet om tørre skred kan detekteres eller hvordan den seismiske signaturen til tørre skred er forskjellig fra våte skred i Sandneslia. I en undersøkelse gjort av Leprettre et al. (1996) detekterte geofoner store flakskred opptil 10 km unna sensorene, men ikke mindre tørrsnøskred 200 meter unna, noe som tyder på at signalene fra de to typene er veldig forskjellig.

Biescas et al. (2003) fant i sin undersøkelse at tettheten til skredet har noe å si for signalene som genereres. De sammenlignet skred av samme størrelse, som gikk i samme skredløp og fant at tørre løssnøskred genererer kortere signaler med lav amplitude og våte skred genererer lengre signaler med betydelig høyere amplitude. De våte skredene har generelt lavere hastighet og vil derfor bruke lengre tid på å passere geofonene og signalet blir derfor lengre. Med dette som grunnlag er det sannsynlig at det vil være mulig å skille tørre fra våte skred med geofonanlegget.

Radarene i Knutstugugrove og Utledøla har detektert både tørre og våte skred, men skiller foreløpig ikke mellom dem. Dopplerradar kan brukes til å kartlegge snøskreddynamikk (Gauer et al., 2007) og det kan derfor også være mulig for radaren å differensiere mellom ulike skredtyper. Av parameterne som måles av radaren, er det hastigheten som er mest forskjellig i våte og tørre skred. Ved undersøkelser av skred under like forhold, kan det potensielt være mulig å differensiere mellom tørre og våte skred i ett skredløp basert på hastighet.

6.5 Plassering av deteksjonssensorer og skilt

I Utledøla er det kun 1 sekund til gode for trafikanter å komme seg forbi den skredutsatt strekningen. Dette er på grensen til hva som kan aksepteres. Det finnes foreløpig ingen målinger av skred som har nådd vegen, noe som gjør det vanskelig å si noe om riktigheten til den modellerte hastigheten i forhold til den reelle. Foreløpig har skred som ikke har nådd vegen hatt en hastighet på opp mot 37 m/s ved deteksjonspunktet (målt med radar), mens simuleringen viser hastighet opp mot 25 m/s ved samme punkt. Den modellerte hastigheten kan derfor være for lav. I følge RAMMS simuleringene, vil skredmassene treffe vegen på den nordlige delen av strekningen. Det anbefales derfor å flytte lysskiltet lengst sør nærmere lysskiltet lengst nord for å korte ned strekningen.

I Knutstugugrove viser simuleringene at lysskiltene er plassert helt på grensen til den maksimale utløpsdistansen for et 100-års skred. RAMMS er følsom for endringer i løsneområdet og selv små justeringer av dette kan gjøre utløpsdistansen lengre eller kortere. På bakgrunn av datagrunnlaget for inntegningen av løsneområdene i denne oppgaven, knyttes det noe usikkerhet til resultatene. For å være på den sikre siden kan det derfor vurderes å utvide den skredutsatte strekningen i Knutstugugrove. En trafikant som kjører strekningen på 318 meter mellom lysskiltene bruker 19 sekunder, og skredet bruker 27 sekunder fra deteksjonspunkt til vegen (tabell 19). Ved å flytte lysskiltene 30 meter lengre fra hverandre i hver retning vil avstanden mellom de bli 378 meter og en trafikant i 60 km/t vil bruke 22 sekunder på strekningen og dermed komme seg trygt forbi. Skredet som traff vegen i Knutstugugrove 13. januar 2015, hadde en hastighet på 41 m/s i deteksjonsområdet. Dette samsvarer bra med modellert hastighet for Knutstugugrove som er 40-45 m/s i deteksjonsområdet. Utrekningen for tiden skredet bruker fra deteksjonsområdet til vegen er derfor sannsynlig.

I Sandneslia er avstanden mellom lysskiltene for skredløp 1-3 tilstrekkelig for at en trafikant skal komme seg forbi strekningen uten å bli truffet. Skredsimuleringen i skredløp 2B viser at stoppestedet nord for skredløpet risikerer å bli truffet av skredmasser. Lysskiltene er plassert på grunnlag av lokalkunnskap om tidligere skred og viser dermed at skredmasser som treffer vegen nord for skredløp 2B ikke skjer så ofte. Antagelser om utløpsdistansen basert på observasjoner blir mindre nøyaktige for skred med lavere frekvens fordi det finnes mindre data fra disse hendelsene da de

statistisk sett skjer sjeldnere (Norem, 2014). Det er derfor mulig at et 100-års skred, som det er forsøkt å simulere i RAMMS, faktisk vil treffe vegen nord for skredløp 2B. Samtidig er skredene i Sandneslia relativt små ($< 15\,000\text{ m}^3$) i forhold til skredene RAMMS er kalibrert etter (Bartelt et al., 2013), noe som sannsynligvis vil påvirke nøyaktigheten av resultatene (Steinkogler et al., 2014). En modell kan ikke gjenspeile virkeligheten, men for å være på den sikre siden anbefales det å ikke stoppe trafikanter et sted der det er usikkert om skredmasser kan treffe vegen.

Det er knyttet en del usikkerhet til det eksakte deteksjonspunktet i Sandneslia. Når skredet passerer geofonene i det respektive skredløpet vil skredet sannsynligvis allerede ha blitt detektert. Dette kan variere fra skredløp til skredløp og skred til skred fordi tiden det tar før rystelsene når frem til geofonene blant annet vil avhenge av volumet og hastigheten til skredmassene, terrenget i skredløpet og tettheten til massene (Suriñach et al., 2001). For eksempel vil sannsynligvis skredmasser med høy tetthet og høy fart som faller ned en skrent generere rystelser store nok til at de når frem til geofonene og detekteres som skred raskere enn en mindre mengde masse som sklir. Skredene detekteres altså ved det første punktet der friksjonen og skredmassene er store nok til å generere tilstrekkelig med vibrasjoner og det er utfordrende å si akkurat hvor dette punktet er.

For å unngå at en trafikanter må stoppe på den utrygge stoppeplassen nord for skredløp 2, ble det beregnet om trafikanten rekker å komme seg forbi skredløp 1 og 2. Ved å anta at deteksjonspunktet er ved den øverste geofonen ved hvert skredløp, viste det seg at ved skred som løsner i 2B vil en trafikanter rekke å komme seg forbi skredløp 1 og 2 før skredet når vegen. For skred som løsner i 2C, vil skredet ha en høyere hastighet og dermed nå vegen før trafikanten har kommet seg forbi. Ved å flytte deteksjonspunktet lengre opp i skredbanen, kan skredet detekteres tidligere og trafikanten får lengre tid til å komme seg forbi strekningen. Skredet må detekteres minst fem sekunder før det gjør i dag for at trafikanten skal komme seg forbi. Det er imidlertid vanskelig å flytte geofoner lengre opp i skredløpet på grunn av bratt terreng og glatt svaberg.

De første seismiske signalene som når frem fra snøskredet til geofonene er i de fleste tilfeller små, men det er viktig å bruke disse signalene i varslingen slik at trafikantene får best mulig tid til å kjøre forbi den skredutsatte strekningen. Derfor er det viktig at

systemet reagerer på de første signalene selv om de er små, og heller sender en kontrabeskjed om det viser seg at signalene fra skredaktiviteten ikke oversteg varslingskriteriene.

Det har vist seg nyttig å simulere skredene fordi det blir mer nøyaktig enn om man bruker en gjennomsnittlig skredhastighet fra litteraturen. Et flakskred kan for eksempel ha en hastighet på 50 m/s (McClung & Schaerer, 2006). Skredhastigheten i Sandneslia viste seg å være en god del lavere enn dette og lysene kan dermed stå lengre fra hverandre. I Knutstugugrove som har en skredbane som en perfekt parabel og snøskredene i hovedsak er tørre, kan skredhastigheten overstige gjennomsnittlige verdier og lysene må dermed stå tettere eller skredet må detekteres tidligere.

6.6 Investeringskostnad og vedlikehold (kost/nytte)

Målet med sikringstiltak er alltid å oppnå den beste sikkerheten og fremkommeligheten for de minste investeringene. Generelt gjelder det at de mest kostbare tiltakene også gir høyest sikringseffekt. Automatiske skredvarslingsanlegg vil ikke hindre skredet i å treffe vegen, men vil kunne redusere stengningsfrekvensen. Dette gjelder imidlertid kun når anlegget fungerer som det skal og ikke genererer falske alarmer.

Automatisk sanntidsvarling egner seg på veger med lav ÅDT og høy/middels skredfrekvens. Den lave trafikkmengden hindrer oppsamling av trafikanter når vegen stenger. En høy/middels skredfrekvens vil sørge for god kalibrering av systemet. På strekninger med veldig høy frekvens for skred på veg (flere ganger årlig) vil systemet føre til mange stengninger i året, da det må regnes med at vegen stenges ved skred som når vegen og nesten når vegen.

Automatisk snøskredsikring av veger med geofoner og radar sikrer at trafikanter ikke treffes av skred, forutsatt at de oppfører seg på en gitt måte. Sikringsmetoden sørger ikke for 100 % oppetid på en veg, da vegen må stenges når den skal ryddes for skred. På lavtrafikkerte veger, som Fv337 og Fv472 gir det en god kost/nytte verdi, da en stengning ved et eventuelt skred ikke vil føre til en stor opphopning av trafikk. Det er essensielt at ryddingen er effektiv og at det finnes gode rutiner for sjekking av eventuelle falske alarmer for å sikre en best mulig oppetid av vegen. Ved skredløp med høy frekvens av skred som når vegen, kan rydding av vegen føre til flere

stengninger i året og tiltak som reduserer at skred når veg, som for eksempel overbygg eller tunnel, kan være et bedre alternativ.

Optimalt sett, ved null falske alarmer, skal vegen kun stenges når det faktisk går skred. Knutstugugrove som har en frekvens på skred som når veg hvert 5.-10. år, vil stengning av veg for opprydning statistisk sett forekomme med samme frekvens. Sikring ved passive tiltak er estimert til å koste 65 millioner kroner og vil sikre at skred ikke når vegen og 100 % oppetid. Sikring med radar som koster 2 millioner kroner (+ driftskostnader) vil statistisk sett føre til en stengning hvert 5.-10. år. Det vil si at kost/nytte verdien for radar i Knutstugugrove er god.

I Utledøla som har en frekvens på skred som når veg på 5 år, vil vegen statistisk sett være stengt hvert 5. år ved sikring av vegen med radar. Skredene som går her er ofte av en så stor størrelse at det krever flere dager med opprydning og vegen vil da være stengt i flere dager. Fv337 forbi Utledøla er lavtrafikkert, men samtidig er konsekvensene for stengning av vegen store da det fører til en isolering av bygda Veitastrond. Så langt har det vært flere problemer med skredalarmer som ikke har nådd vegen og for at kost/nytte verdien skal være god her, bør radaren være mer pålitelig.

Foreløpig har anleggene kun blitt prøvd ut med automatisk stengning, men neste vinter skal også automatisk åpning av vegen settes i gang i Sandneslia basert på varigheten av signalene. Automatisk åpning av vegen igjen gjør anleggene mer nyttig da stengetiden holdes nede ved at entreprenør eller VTS ikke trenger å reise til anlegget for å verifisere skredet. Ved automatisk åpning av vegen kan vegen stenges midlertidig (minutter) med en gang signaler fra snøskred detekteres. Den resterende tiden skredet bruker på å reise ned til vegen kan brukes til å vurdere om skredet kommer til å nå, eller har nådd vegen. Optimalt sett klarer radar og geofoner dette selv, men det krever en omfattende analyse av signalene for å kunne bestemme hvilke skred som når vegen og hvilke som ikke gjør det. Et annet alternativ kan være å sette opp en ekstra radar som detekterer aktivitet på vegen eller like over vegen og dermed kan varsle automatisk åpning hvis det ikke detekteres bevegelse her. Geofoner i utløpsområdet kunne eventuelt gjort den samme nytten.

Et stort pluss ved de automatiske snøskredsikringsanleggene er at de er fleksible, kan flyttes på og varslingskriterier kan endres. Det er spesielt viktig i forhold til klimaendringene som kan føre til endringer i skredmønstre (Martin et al., 2001; Stethem et al., 2003; Lazar et al., 2008). Passive skredsikringstiltak som skredoverbygg og skredvoller må dimensjoneres riktig om de skal hjelpe. Her har de automatiske varslingsanleggene en klar fordel.

I tillegg til å varsle snøskred i sanntid, kan data fra geofoner og radar også brukes i snøskredvarslingen. Observert skredaktivitet er den mest direkte formen for ustabilitetsdata som kan brukes til snøskredvarsling (McClung & Schaerer, 2006; Marchetti et al., 2015). For Leprettre et al., (1996), som gjorde en av de første studiene for å bruke geofoner til å detektere snøskred, var det nettopp dette som var motivasjonen. Særlig i Norge, hvor det er langt mellom observasjonene og en del områder gjerne skulle hatt høyere tetthet av observasjoner, kan geofoner og radar være et nyttig tilskudd/verktøy.

6.7 Fordeler og begrensninger

Generelle fordeler og begrensninger (som topografi, signaloverføring, prosesseringstid, strømbruk, varsling, driftsutfordringer) med de ulike teknologiene

Varsling av snøskred i sanntid gir størst sikkerhet ved lange skredløp og kort skredutsatt vegstrekning med få parallelle skredløp. For varsling med geofoner er det i tillegg en fordel at skredløpet som skal varsles er definert slik at geofonene og mastene kan plasseres på trygge steder i utkanten av skredløpet. For varsling av skred i parallelle skredløp er det også en fordel at skredløpene er definert slikt at vegen kan deles inn i trygge og utrygge soner. I Sandneslia består skredområdet av flere sva og bekkedaler, med godt definerte skredløp hvor hvert skredløp er relativt langt i forhold til vegstrekningen som kan dekkes av skredmasser nedenfor hvert enkelt skredløp. Topografien i Sandneslia er derfor godt egnet for automatisk snøskredsikring i sanntid. En utfordring i Sandneslia er imidlertid vegutformingen. Vegen er smal og det er relativt korte trygge oppholdssteder mellom skredløpene.

For radar er det viktig med fri sikt til fjellsiden slik at radaren skal kunne detektere snøskredene. Knutstugugrove er et oversiktlig skredløp med fri sikt fra radar til skredløp og skred kan derfor detekteres. I Utledøla er det fri sikt fra radaren til deteksjonspunkt, men ikke til løseområdet. Dette har ført til noe utfordringer med

verifisering av skred, da man ikke kan se løsneområdet fra kameraet på radaren. Bilder av løsneområdet kunne hjulpet til med verifisering av hendelser i kalibreringsfasen til radaren, da det i flere tilfeller er vanskelig å se om det faktisk har gått skred ut fra bildene tatt av kamera på radar.

Den begrensede deteksjonsavstanden og vinkelen til radaren gjør at den egner seg best der radaren kan plasseres rett foran skredløpet og ikke for langt unna. Mange skredutsatte strekninger i Norge ligger langs vann og fjorder, noe som gjør dette utfordrende da avstanden til andre siden av fjorden eller vannet ofte er for lang til at det er praktisk mulig for radaren å detektere snøskred. Den begrensede vinkelen til radaren gjør at radar egner seg best til deteksjon av skred i ett skredløp, heller enn et sett med parallelle skredløp. Imidlertid er radarteknologien i full utvikling og det er sannsynlig at denne begrensningen vil løses allerede neste sesong.

Signaloverføringen i geofonanlegget fra radiomast til styringssskap ved veggen har vist seg å være uproblematisk. Signal videre til varslingslys har enda ikke blitt prøvd ut. Prosesseringstid for geofonanlegget og radaranlegget har vist seg å være lik, maks 3 sekunder.

Det har vært klart mest driftsutfordringer med radarene i forhold til geofonanlegget. Årsaken til det kan være at da geofonanlegget ble lagt ut på anbud, fantes det allerede erfaringer med varslingslys av snøskred i sanntid og grunnlaget for hvordan anlegget skulle designes var større. En annen årsak kan være at geofonanleggene har hatt flere sesonger med kalibrering før lys ble satt ut, slik at treffsikkerheten på radaranleggene ble forholdsvis lavere de første sesongene.

Det skal ikke være behov for vedlikehold av geofonanlegget, mens radar må man i noen tilfeller fjerne snø/is som legger seg på radaren. Det jobbes imidlertid med en løsning for dette, noe som i så fall vil føre til at det heller ikke kreves betydelig vedlikehold av radaren. Begge anleggene krever tilkobling til strømmettet noe som i enkelte tilfeller kan medføre ekstra kostnader. Begge typer anlegg må derfor ha et backupsystem for strøm (UPS) dersom det skulle oppstå strømbrudd.



Konklusjoner

Evalueringen av de første sesongene i tre automatiske varslingsanlegg for snøskred; geofon- og radaranlegget ved Fv472 i Sandneslia (Nordland), radaren ved Fv337 i Utledøla (Sogn og Fjordane) og radaren ved Rv15 i Knutstugugrove (Oppland) kan oppsummeres i følgende punkter:

- Både radar og geofonene i de evaluerte anleggene har detektert en rekke store og små snøskred og har vist at teknologiene egner seg for varsling av snøskred i sanntid.
- På grunnlag av foreløpige data, er det vanskelig å si noe helt sikkert om hvilken type teknologi som egner seg best til å skille mellom dynamikk i skredene og skredstørrelse. Resultatene peker imidlertid mot at begge teknologier kan skille mellom type og størrelse. For begge teknologier må lokale forhold tas hensyn til, da dette kan påvirke signalene i like stor grad som en forskjell i skredtype og –størrelse kan.
- I Sandneslia er geofonene plassert på en slik måte at de kan lokalisere skredene i riktig skredløp. Det finnes foreløpig for lite data til å si noe om radar kan lokalisere skredene nøyaktig nok i Sandneslia.
- For geofonanlegget er det utfordrende å filtrere bort signal fra jordskjelv. Geofonene har flere mulige kilder for falske alarmer enn radaren har og det er derfor behov for en mer omfattende filtrering.
- Deteksjonssensorene og lysskiltene er plassert hensiktsmessig i samtlige anlegg, men det anbefales å øke avstanden mellom skiltene noe i Knutstugugrove og redusere avstanden i Utledøla. Resultatene fra

simuleringene i Sandneslia viser at skredmasser potensielt kan treffe vegen nord for skredløp 2.

- Automatiske varslingsanlegg for snøskred koster rundt 1-2 millioner kroner i tillegg til mellom 100 000 og 150 000 kroner i årlige driftskostnader. Sammenlignet med kost/nytte verdien til passive, tradisjonelle tiltak er automatiske varslingsanlegg kostnadseffektive.
- Radaren må ha klar sikt til deteksjonsområdet. Geofonanlegg er en fordel i områder der plassering av radar ved vegen er utfordrende.
- Det er en fordel med klar sikt fra radiomastene i geofonanlegget til styringsskap ved vegen, men dette kan løses med radiolinker som forsterker signalet. For skred som skal varsles med geofoner er det også antageligvis en fordel om skredene som varsles løsner på sva.
- Radaren krever mer strøm enn geofonanlegget. Geofonene og radiomastene krever minimalt med strøm og kan gå på batteri.
- Prosesseringstiden er like kort for radar og geofonsystem.
- For å unngå driftsproblemer ved fremtidige anlegg anbefales det at konkurransegrunnlaget blir utarbeidet med tverrfaglig kompetanse.
- Systemer som kan varsle snøskred automatisk i sanntid egner seg på veger med relativt lav ÅDT og høy/middels skredfrekvens.

Det er svært viktig at automatiske snøskredvarslingsanlegg i sanntid ikke fører til lange stengninger ved falsk alarm og at stengetiden holdes til et minimum ved skred som ikke når vegen. Systemet blir akseptert og mer troverdig om stengningene er korte ved alarmer fra skred som ikke når vegen. Derfor er det viktig med en god rutine/prosedyre når en alarm går. For at lange unødvendige stengninger skal unngås er det derfor viktig med:

1. God og nøyaktig filtrering for å unngå falske alarmer.
2. At VTS/entreprenør raskt kan verifisere om skredet nådde vegen.

/8

Referanser

- Andersen, A. S. & Pedersen, K. (2013). Norges våteste og tørreste steder. Hentet 26. oktober 2017 fra <http://www.yr.no/artikkel/norges-vateste-og-torrestersteder-1.11125446>
- Baggi, S. & Schweizer, J., 2009. Characteristics of wet-snow avalanche activity: 20 years of observations from a high alpine valley (Dischma, Switzerland). *Natural Hazards*, 50 (1), 97-108.
- Bakkehøi, S. & Norem, H. (1994). *Sammenlikning av metoder for beregning av maksimal utløpsdistanse for snøskred*. (NGI rapport nr 581200-30). Oslo: NGI
- Bartelt, P., Buser, O. & Platzler, K. (2006). Fluctuation – dissipation relations for granular snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 52(179), 631-643.
- Bartelt, P., Bühler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Salz, M., Schneider, M. & Schumacher, L. (2013). RAMMS User Manual v1.5 Avalanche. Davos, Switzerland: WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF. pp 110
- Bartelt, P., Salm, B. & Gruber, U. (1999). Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. *Journal of Glaciology*, 45(150), 242-254.
- Bartelt, P. & Stöckli, V. (2001). The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology*, 32, 209-216.
- Bartelt, P., Valero, V., Feistl, T., Christen, M., Bühler, Y. & Buser, O. (2015). Modelling cohesion in snow avalanche flow. *Journal of Glaciology*, 61(229), 837-850.
- Besson, B., Eiríksson, G., Thórarinnsson, Ó., Thórarinnsson, A. & Einarsson, S. (2007). Automatic detection of avalanches and debris flows by seismic methods. *Journal of Glaciology*, 53(182), 461-472.
- Biescas, B., Dufour, F., Furdada, G., Khazaradze, G. & Suriñach, E. (2003). Frequency content evolution of snow avalanche seismic signals. *Surveys in Geophysics*, (24), 447-464.

- Bühler, Y., Christen, M., Kowalski, J. & Bartelt, P. (2011). Sensitivity of snow avalanche simulations to digital elevation model quality and resolution. *Annals of Glaciology*, 52(58), 72-80.
- Christen, M., Bartelt, P. & Gruber, U. (2002). AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. *Proceedings International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim, Matsumoto/Japan October 14-18 2002*, Congress publication 2, 715-725.
- Christen, M., Bartelt, P. & Kowalski, J. (2010). Back calculation of the In Arelen avalanche with RAMMS: interpretation of model results. *Annals of Glaciology*, 51(54), 161-168.
- Christen, M., Bartelt, P., Kowalski, J. & Stoffel, L. (2008). Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. *Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop, September 21-27 2008*. 709-716.
- Eckerstorfer, M., Malnes, E. & Müller, K. (2017). A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 126-140
- Derron, M. & Sletten, K. (2016). *Method for the susceptibility mapping of snow avalanches in Norway, Technical Report*. NGU rapport nr. 2016.032. Hentet 3. November 2017 fra http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2016/2016_032.pdf
- Eiken, M. (2017). *Dynamic avalanche modelling in Svalbard's arctic environment*. Masteroppgave UiO/UNiS. 91 pp. Hentet 25. oktober 2017 fra https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/55786/Masteroppgaven_Ma ri_Eiken.pdf?sequence=1
- Elvebakk, H. (2011). *Sammenstilling av resistivitet, seismiske hastigheter og naturlig gammastråling i norske bergarter*. NGU rapport nr. 2011.042. Hentet 3. november fra http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2011/2011_042.pdf
- Fischer, J. T., Fromm, R., Gauer, P. & Sovilla, B. (2014). Evaluation of probabilistic snow avalanche simulation ensembles with Doppler radar observations. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 151-158.
- Frekhaug, M. H. (2015). *An assessment of prediction tools to Norwegian debris flows*. Masteroppgave NTNU. Hentet 4. November 2016 fra <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2350452>
- Gauer, P., Issler, D., Lied, K., Kristensen, K. & Sandersen, F. (2008). On snow avalanche flow regimes: inferences from observations and measurements. *Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop, September 21-27 2008*. 717-723
- Gauer, P., Kern, M., Kristensen, K., Lied, K., Rammer, L. & Schreiber, H. (2007). On pulsed Doppler radar measurements of avalanches and their implication to avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 50(1-3), 55-

- Grotle, E. (2016). Skredradar passerte ikkje testsesongen. *Sogn Avis* 6.2.2016. Hentet 4. mai 2017 fra <http://www.sognavis.no/article/20160206/SISTENYTT/302069992>
- Gubler, H. & Hiller, M. (1984). The use of microwave FMCW radar in snow and avalanche research. *Cold Regions Science and Technology*, 9(2), 109-119.
- Heierli, J., van Herwijnen, A., Gumbsch, P. & Karlsruhe, U. (2008). Anticracks: A new theory of fracture initiation and fracture propagation in snow. *Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop, September 21-27 2008* (9-15)
- Hestnes, E. (1985). A contribution to the prediction of slush avalanches. *Annals of Glaciology*, 6, 1-4.
- Holtebekk, T. (2017). Interferens-fysikk. *Elektronisk leksikonartikkel fra Store norske leksikon*. Hentet 5. september 2017 fra https://snl.no/interferens_-_fysikk
- Humstad, T., Sørderblom, Ø., Ulivieri, G., Langeland, S. & Dahle, H. (2016a). Infrasonndeteksjon av snøskred i Grasdalen og Indreidsdalen, Norge. *Proceedings Breckenridge 2016 International Snow Science Workshop October 3-7 2016*, 621-627.
- Humstad, T., Venås, M., Dahle, H., Orset, K. I. & Skrede, I. (2016b). Monitoring the Stabrekka glide avalanche. *Proceedings Breckenridge 2016 International Snow Science Workshop October 3-7 2016*, 514-520.
- Hutter, K. & Kirchner, N. (2013). *Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations*. 426 pp. Berlin: Springer Science & Business Media
- Håland, G. (2013). *Evaluering av geofonanlegg for detektering av skred*. Statens Vegvesens Rapporter Nr. 2014. Hentet 25. august 2016 fra https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/Publikasjoner/Statens+vegvesen+s+rappporter/_attachment/561046?_ts=142e73795a8&fast_title=SVV+rapport+204+Geofonanlegg+for+skred.pdf
- Håland, G., Orset K. I., Frekhaug, M., H. & Norem, H. (2015). *Sammenligning av modelleringsverktøy for norske snøskred*. NVE rapport nr. 107-2015. Hentet 25. August 2016 fra http://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_107.pdf
- Håland, G., Norem, H., Orset, K. I. & Frekhaug, M. H. (2016). An assessment of Run-out Models Applied to Extreme Norwegian Snow Avalanches. *Proceedings Breckenridge 2016 International Snow Science Workshop, October 3-7 2016*, 165-172.
- Håland, G. & Tveit, J. (2013). *RV15 Knutstugugrove – Alternativer for sikring mot snøskred*. Oppdragsrapport nr. 2011/044877-12 gjort av Vegdirektoratet 17.01.2013. 14 pp.

- Jaedicke, C. (2014). Snøskred. *Elektronisk leksikonartikkel fra Store norske leksikon*. Hentet 2. september 2016 fra <https://snl.no/sn%C3%B8skred>
- Kind, H., S. (2015). Brøytebilsjåfør kjørte rett inn i skred. *NRK nettavis 13.01.2015*. Hentet 23. august 2016 fra http://www.nrk.no/ho/broytebilsjafor-kjorte-rett-inn-i-skred_-_jeg-rakk-ikke-tenke-noe-1.12148558
- Krangnes, L (2016). *Installasjonsrapport snøskredradar Lom – Oppdatert versjon etter installasjon desember 2015*. Rapport fra Cautus Geo. 24 pp.
- Kristensen, K. & Lied, K. (2003). *Snøskred. Håndboken om snøskred*. Nesbru: Vett og Viten. 200 pp.
- Kvistedal, Y. (2016). *Skredvarsling i Sandneslia. Evalueringsrapport etter første sesong*. Oppdragsrapport fra NGI. 23 pp.
- Larsen, J. O. & Bakkehøi, S. (1995). *FV 472, Sandneslia skredfare og sikring*. NGI rapport nr. 954084-1. 7 pp.
- Lawrence, W. S. & Williams, T. R. (1976). Seismic signals associated with avalanches. *Journal of Glaciology*, 17(77), 521-526
- Lazar, B. & Williams, M. (2008). Climate change in western ski areas: Potential changes in the timing of wet avalanches and snow quality for the Aspen ski area in the years 2030 and 2100. *Cold Regions Science and Technology*, 51(2-3), 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.015>
- Leprettre, B. J. P., Navarre, J. P. & Taillefer, A. (1996). First results from a pre-operational system for automatic detection and recognition of seismic signals associated with avalanches. *Journal of Glaciology*, 42(141), 352-363.
- Lied, K., Domaas, U., Grimstad, E., Sandersen, F., Gregersen, O., Kvalstad, T., Høeg, K., Harbitz C. B. & Gauer P. (2014). *Skred skredfare og sikringstiltak*. Oslo: NGI & Universitetsforlaget. 256 pp.
- Lunde, S. *Infralyddeteksjon av snøskred og vurdering av konsept for automatisk integrasjon med database for snøobservasjoner*. Masteroppgave, NTNU. 105 pp. Hentet 1. november fra https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2454742/16900_FULLTEXT.pdf?sequence=1
- Marchetti, E., Ripepe, M., Uliveri, G. & Kogelnig, A. (2015). Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: towards a real-time early- warning system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (15)11, 2545-2555.
- Mares, S. (1984). *Introduction to applied geophysics*. Dordrecht, Nederland: D. Reidel Publishing Company. 581 pp.
- McClung, D. & Schaerer, P. (2006). *The Avalanche Handbook* (3. utgave). Seattle, Washington: The Mountaineers Books. 288 pp.
- Meier, L., Jacquemart, M., Blattmann, B. & Arnold, B. (2016). Real-time avalanche detection with long-range, wide-angle radars for road safety in Zermatt,

- Switzerland. *Proceedings Breckenridge 2016 International Snow Science Workshop, October 3-7 2016*, 304-308.
- Meier, L. & Lussi, D. (2010). Remote detection of snow avalanches in Switzerland using infrasound, doppler radars and geophones. *Proceedings Squaw Valley 2010 International Snow Science Workshop, October 17-22 2010*, 7-12.
- NGU. (2017) *Berggrunnsgeologisk kart*. Hentet 13. september 2017 fra http://geo.ngu.no/mapserver/BerggrunnN50WMS?VERSION=1.3.0&EXCEPTIONS=xml&REQUEST=GetFeatureInfo&SERVICE=WMS&CRS=EPSG:25833&FORMAT=image/png&TRANSPARENT=TRUE&BGCOLOR=0xffffffff&STYLES=default,&LAYERS=Bergart_flate_N50,Bergart_grense_N50&SRS=EPSG:32633&BBOX=4
- Norem, H. (2014). *Håndbok V138-Veger og snøskred*. SVV Håndbok. Hentet 22. august 2016 fra https://www.vegvesen.no/_attachment/740624/binary/1003961?fast_title=H%C3%A5ndbok+V138+Veger+og+sn%C3%B8skred.pdf
- NORSAR (Norwegian Seismic Array). (2017). NORSAR-Finn jordskjelv. Hentet 1. november 2017 fra <https://www.jordskjelv.no/jordskjelv/finn-jordskjelv/>
- NVE. (2016). Snøskredskolen. Hentet 18. november 2016 fra <http://www.varsom.no/Snoskred/Skredskolen/>
- NVE. (2017). NVE Skredatlas. Hentet 17. oktober 2017 fra <https://gis3.nve.no/link/?link=SkredHendelser>
- Pérez-Guillén, C., Sovilla, B., Suriñach, E., Tapia, M. & Köhler, A. (2016). Deducing avalanche size and flow regimes from seismic measurements. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 25-41.
- Pérez-Guillén, C. (2016). *Advanced seismic methods applied to the study of snow avalanche dynamics and avalanche formation*. Doktorgrad. Universitetet i Barcelona. 157 pp.
- Region vest, SVV. (2006). *Beredskapsplan for skred og skredfare, kontraktområde 1402 Midtre Sogn*. Intern beredskapsplan SVV, region vest. 80 pp.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2. utgave). Chichester, England: John Wiley & Sons. 796 pp.
- Rostad, H. (1997). *FV 472 Rasvarslingsanlegg Sandneslia*. Internt notat SVV. 3 pp.
- Salm, B. (1993). Flow, flow transition and run-out distances of flowing avalanches. *Annals of Glaciology*, 18, 221-226.
- Salm, B. (2004). A short and personal history of snow and avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 39(2-3), 83-92.
- Salm, B. & Gubler, H. (1985). Measurement and analysis of the motion of dense flow avalanches. *Annals of Glaciology*, 6, 26-34.
- Salm, B., Gubler, H. U. & Burkard, A. (1990). Berechnung von Fließlawinen: eine

- Anleitung für Praktiker mit Beispielen (Beregning av flakskred: en veiledning for praktikere). Rapport fra WSL (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research) nr. 47, 37 pp.
- Schimmel, A., Hübl, J., Koschuch, R. & Reiweger, I. (2017) Automatic detection of avalanches: evaluation of three different approaches. *Natural Hazards* 87(1), 83-102.
- Schreiber, H., Randeu, W. L., Schaffhauser, H. & Rammer, L. (2001). Avalanche dynamics measurement by pulsed Doppler radar. *Annals of Glaciology*, 32, 275-280. <https://doi.org/10.3189/172756401781819021>
- Schweizer, J., Jamieson, J. B. & Schneebeli, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4), 1016-1041. <https://doi.org/10.1029/2002RG000123>
- Simenhois, R. & Birkeland, K. (2011). CSI: Fracture Mechanics. The effect of changing slab thickness on fracture propagation. *The Avalanche Review*, 29(3), 23-25. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.10.008>.
- Skrede, I., Kristensen, L. & Rivolta, C. (2016). Use of ground based insar radar to monitor glide avalanches. *Proceedings Breckenridge 2016 International Snow Science Workshop, October 3-7 2016*, 51-57.
- SLF. (2010). Background information. Artikkel om bakgrunnsinformasjon om RAMMS. Hentet 23. September 2017 fra http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=5
- SLF. (2016). RAMMS kurs i forbindelse med AT-301 Arctic Infrastructure in a Changing Climate på UNiS. Longyearbyen, Svalbard.
- Statens Kartverk. (2017). Høydedata. Hentet 10. oktober 2017 fra <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/>
- Statens vegvesen. (2017). Vegdata. Hentet 2. mai 2017 fra [https://www.vegvesen.no/vegkart/vegkart/#kartlag:geodata/hva:\(~\(id:643,filter:\(~\),farge:'0_0'\)\)/@83075,6836066,11/vegobjekt:768580142:58b02c](https://www.vegvesen.no/vegkart/vegkart/#kartlag:geodata/hva:(~(id:643,filter:(~),farge:'0_0'))/@83075,6836066,11/vegobjekt:768580142:58b02c)
- Steinkogler, W., Meier, L., Langeland, S. & Wyssen, S. (2016). Operational radar and infrasound systems for avalanche detection. *Proceedings Breckenridge 2016 International Snow Science Workshop, October 3-7 2016*, 309-315.
- Steinkogler, W., Sovilla, B. & Lehning, M. (2014). Linking snow cover properties and avalanche dynamics. *Proceedings Banff International Snow Science Workshop, September 29-October 3 2014*. 151-155.
- Steinkogler, W. (2015). *Influence of snow cover properties on avalanche dynamics*. PhD fra EPFL, Universitet i Lausanne. Hentet 4. september 2017 fra https://infoscience.epfl.ch/record/204678/files/EPFL_TH6475.pdf
- Stethem, C., Jamieson, B. & Schaerer, P. (2003). Snow avalanche hazard in Canada – a review. *Natural Hazards*, 28, 487-515.

<https://doi.org/10.1023/A:1022998512227>

- Store norske leksikon. (2009a). Geofon. Elektronisk leksikonartikkel uten forfatter. Hentet 4. oktober 2017 fra <https://snl.no/geofon>
- Store norske leksikon. (2009b). Ikke-Newtonsk væske. Elektronisk leksikonartikkel uten forfatter. Hentet 29. september 2017 fra https://snl.no/ikke-newtonsk_v%C3%A6ske.
- Store norske leksikon. (2009c). VPN. Elektronisk leksikonartikkel uten forfatter. Hentet 6. november 2017 fra <https://snl.no/VPN>
- Store norske leksikon. (2017a). Frekvens. Elektronisk leksikonartikkel uten forfatter. Hentet 5. november 2017 fra <https://snl.no/frekvens>
- Store norske leksikon. (2017b). Pytagoras' setning. Elektronisk leksikonartikkel uten forfatter. Hentet 10. november 2017 fra https://snl.no/Pytagoras'_setning
- Suriñach, E., Furfada, G., Sabot, F., Biescas, B. & Vilaplana, J. M. (2001). On the characterization of seismic signals generated by snow avalanches for monitoring purposes. *Annals of Glaciology*, 32, 268-274. <https://doi.org/10.3189/172756401781819634>
- Suriñach, E., Sabot, F., Furdada, G. & Vilaplana, J. (2000). Study of seismic signals of artificially released snow avalanches for monitoring purposes. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(9), 721-727. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00092-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00092-7)
- Svanes, B. J. (2011). Veitstrond totalt isolerte. *NRK nettavis 6.2.11*. Hentet 1. september 2016 fra <https://www.nrk.no/sognogfjordane/veitstrond-totalt-isolerte-1.7495100>
- Thorsnæs, G. (2016). Sandhornøya. *Elektronisk leksikonartikkel om Sandhornøya*. Hentet 20. september 2016 fra <https://snl.no/Sandhorn%C3%B8ya>
- Tremper, B. (2008). *Staying alive in avalanche terrain* (2. utgave). Seattle, Washington: The Mountaineers Books. 284 pp.
- van Herwijnen, A. & Schweizer, J. (2011). Monitoring avalanche activity using a seismic sensor. *Cold Regions Science and Technology*, 69, 165-176.
- Vegdirektoratet. (2014). *Retningslinjer for risikoakseptkriterier for skred på veg. NA-rundskriv 2014/08*. Internt rundskriv SVV. Hentet 6. oktober 2017 fra https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/Geofag/Skred/Skredsikring/_attachm ent/653006?_ts=1470162ec30&fast_title=Retningslinjer+for+risikoakseptkri terier+for+skred+p%C3%A5+veg
- Walberg, N. A., Krangnes, L. & Svendgård, V. (2015). *Sluttrapport snøskredradar, Utledøla, 2014*. Sluttrapport fra Cautus Geo. 21 pp.
- xGeo. (2017). xGeo. Ekspertvektøy for overvåking av flom, jordskred og snøskred. Hentet 1. Oktober 2017 fra <http://www.xgeo.no/>

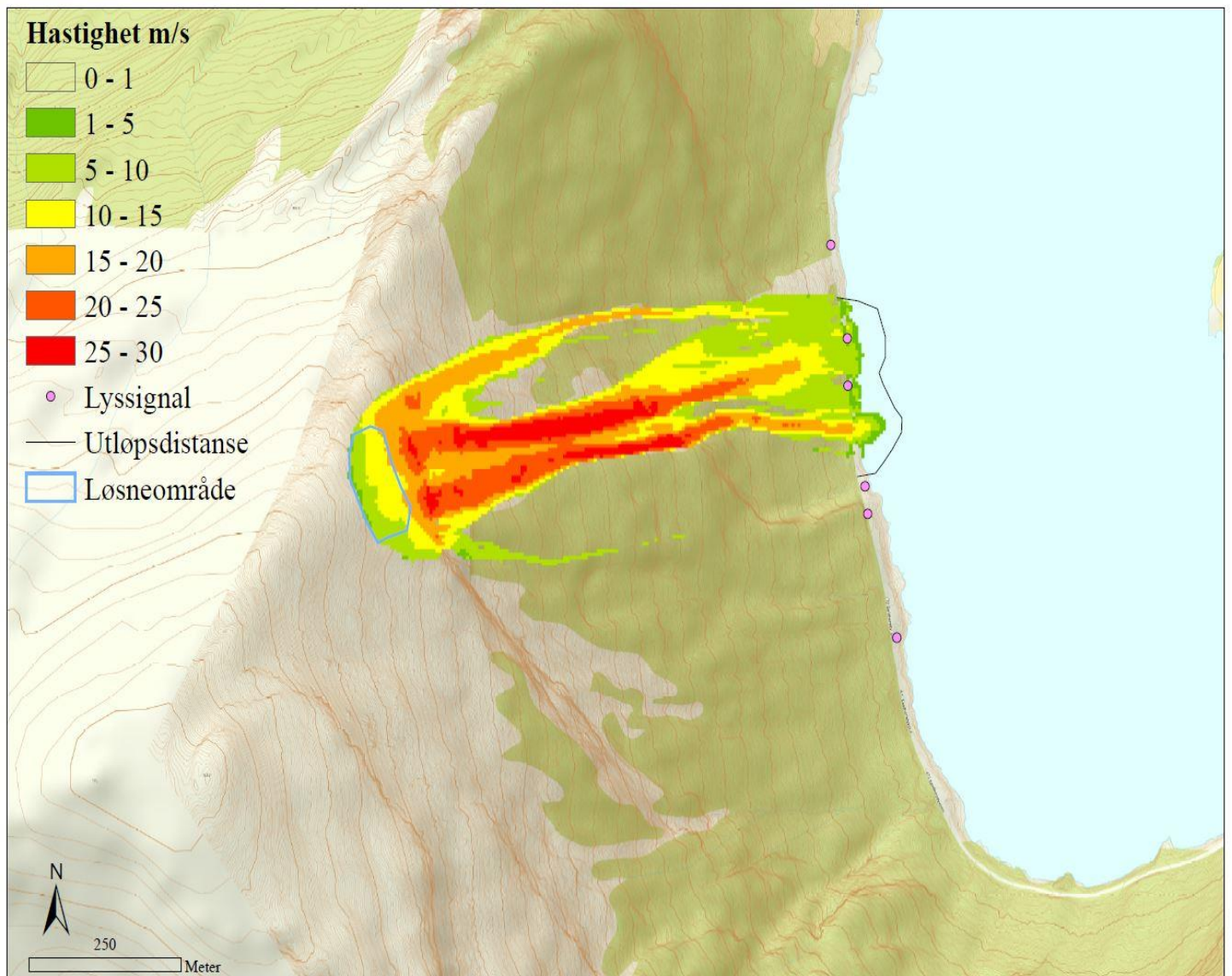
Vedlegg A



RAMMS simuleringer

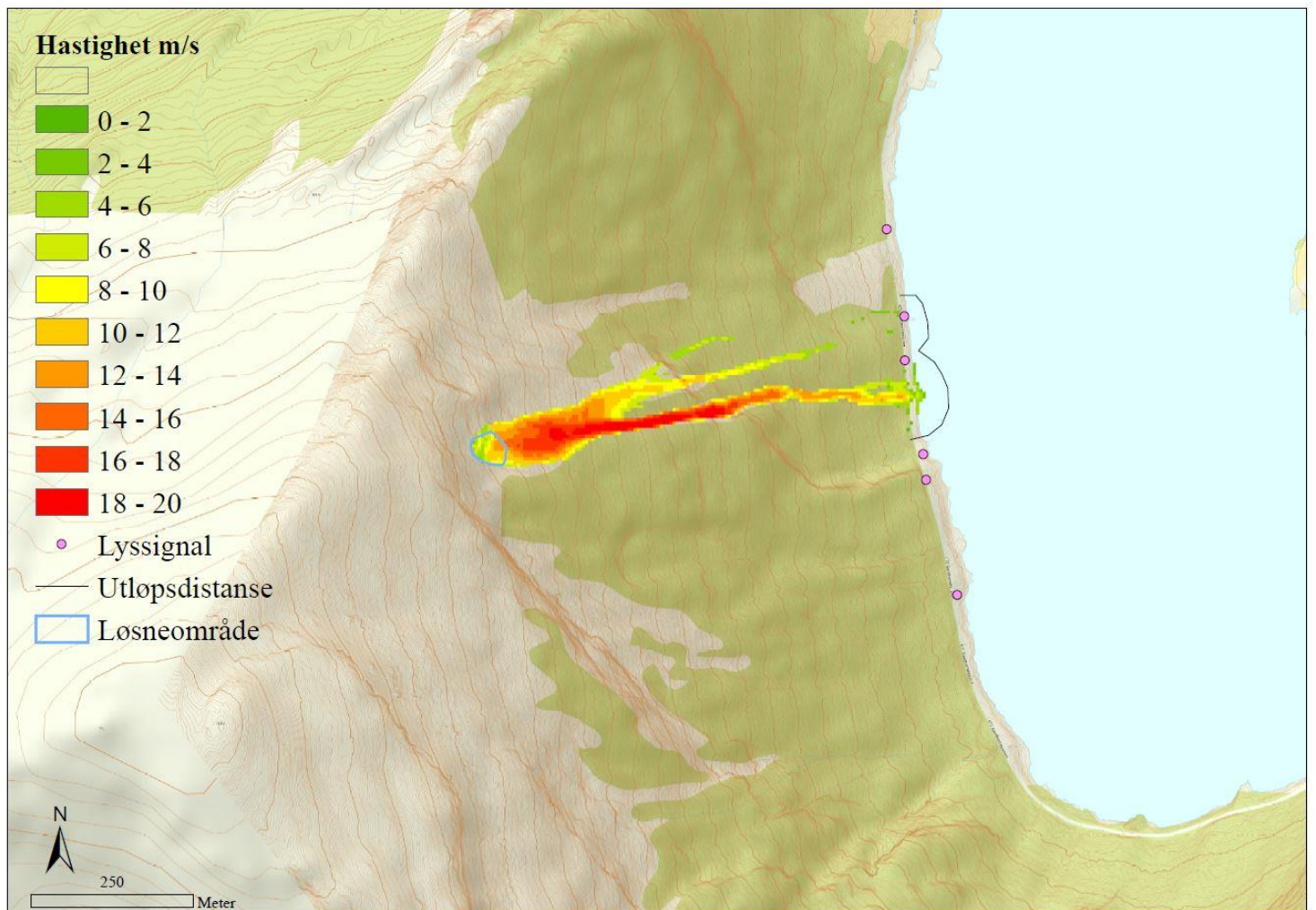
Vedlagt følger RAMMS simuleringene for Sandneslia skredløp 2B (figur A.1) og 2C (figur A.2), Knutstugugrove (figur A.3) og Utledøla (figur A.4). Utløpsdistansen er beregnet ut fra maksimalt utløp, der RAMMS resultater fra maksimum høyde av avsetningene er brukt.

RAMMS simulering Sandneslia skredløp 2C



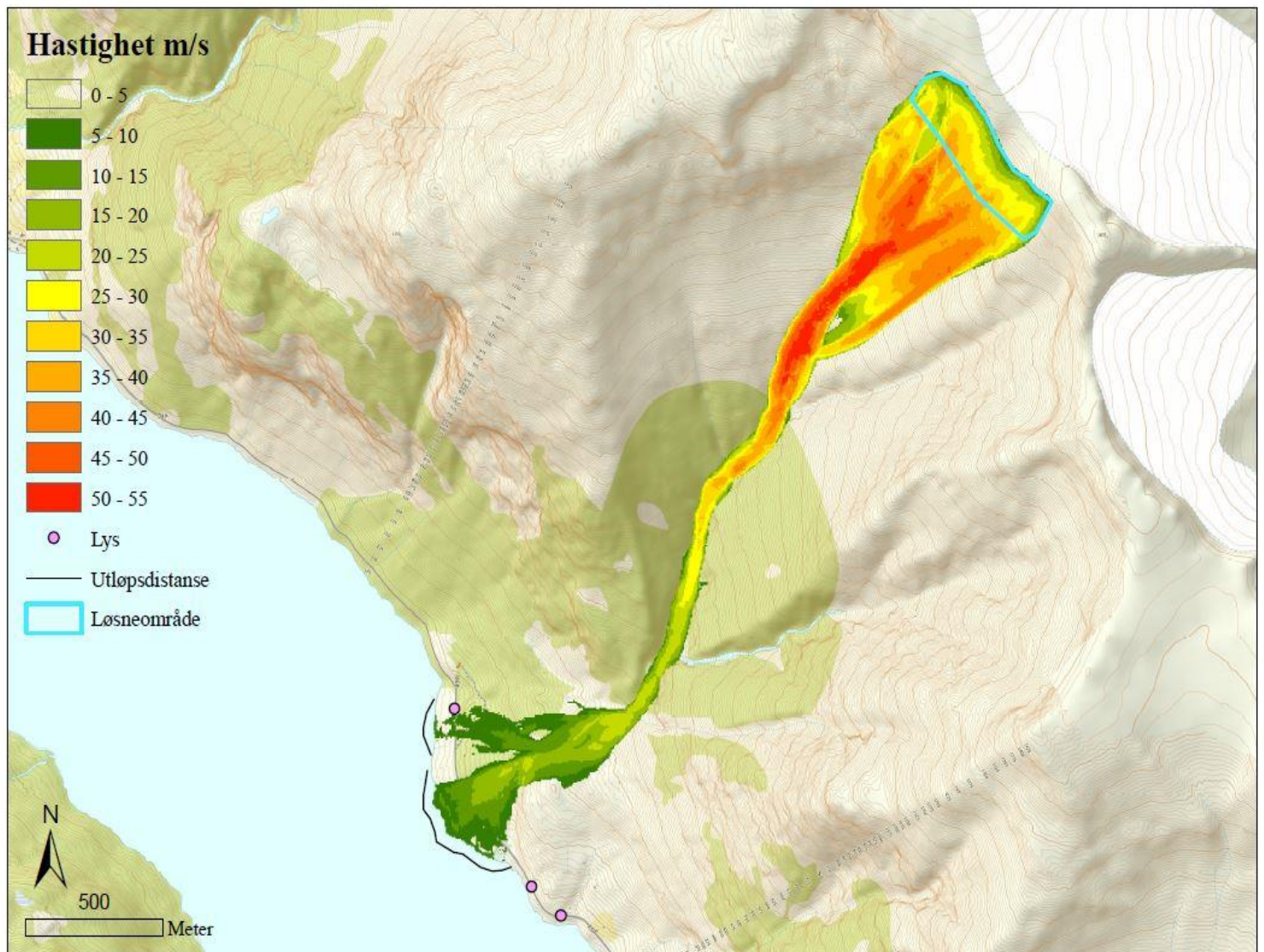
Figur A.1. Maksimal hastighet i Sandneslia skredløp 2C.

RAMMS simulering Sandneslia skredløp 2B



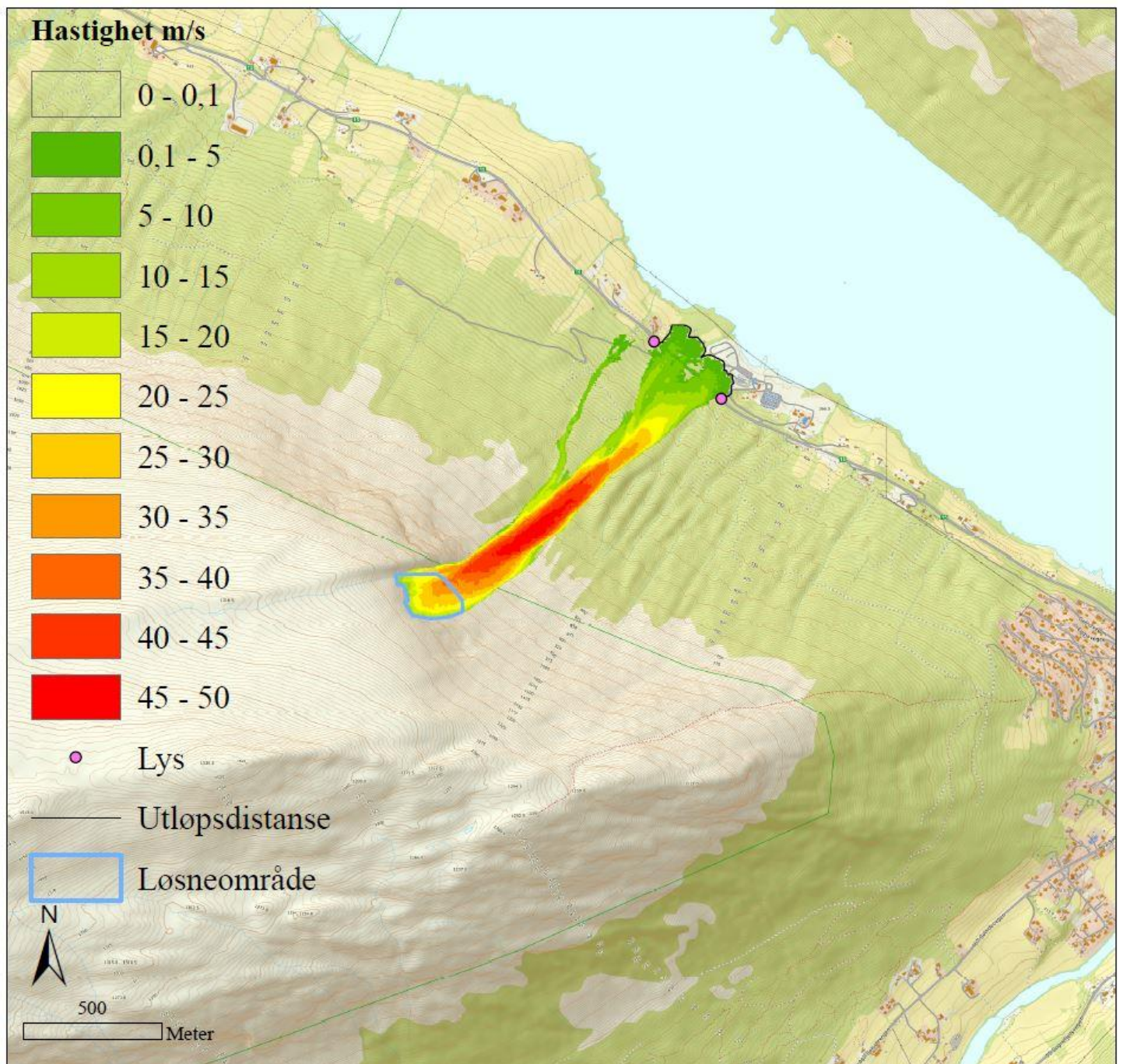
Figur A.2.. Maksimal hastighet i Sandneslia skredløp 2B.

RAMMS simulering Utledøla



Figur A.3. Maksimal hastighet i Utledøla.

RAMMS simulering Knutstugugrove



Figur A.4.. Maksimal hastighet i Knutstugugrove.

