



NVE



Statens vegvesen

EKSTERN RAPPORT NR. 20 / 2025

Overflatenær fjernmåling av snødekket

Utfordringer og muligheter for stedsspesifikk skredvarsling i Norge

SKREVET AV NGI

NVE Ekstern rapport nr. 20/2025

Overflatenær fjernmåling av snødekket:

Utfordringer og muligheter for stedsspesifikk skredvarsling i Norge

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat
Forfattere: Holt Hancock og Sunniva Skuset/NGI
Omslagsbilde: Lidar i Honningsvåg. Foto: Holt Hancock/NGI

ISBN: 978-82-410-2506-8
ISSN: 2535-8235
Saksnummer: 202413830

Sammendrag: I forbindelse med utarbeidelsen av en veileder for stedsspesifikk snøkredvarsling, har NGI utarbeidet en rapport om hvordan fjernmålingsteknologier kan støtte varslingstjenesten. Notatet beskriver teori om snøfordeling og prinsipper for ulike fjernmålingsteknologier. Nytteverdien av snøfordelingsdata over ulike tidsserier er av betydelse både for daglig bruk og til sesongbasert planlegging.

Emneord: Fjernmåling, Snøkred, Veileder stedsspesifikk snøkredvarsling

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 22 95 95 95
E-post: nve@nve.no
Internett: www.nve.no

Innholdet kan brukes videre mot kreditering.

November 2025

Forord

Stedsspesifikk snøskredvarsling stiller høye krav til både kunnskapsgrunnlag og metodikk. I arbeidet med å utvikle en veileder for stedsspesifikk snøskredvarsling har Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) samarbeidet tett med bransjen for å sikre at erfaringer og beste praksis blir ivare tatt. Gjennom FoU-prosjektet «Overflatenær fjernmåling av snødekket: Utfordringer og muligheter for stedsspesifikk skredvarsling i Norge» har NGI fjernmålingsteknologier kan støtte den stedsspesifikke varslingstjenesten.

Notatet undersøker hvordan terrestrisk laserskanning (TLS) og ubemannede luftsystemer (UAS) gjør det mulig å kartlegge snøfordeling med høy romlig oppløsning, noe som kan gi verdifull innsikt i snødekket i bratte fjellsider. Slik informasjon kan støtte farevurderinger tatt i forbindelse med stedsspesifikk skredvarsling, og beslutninger om plassering av instrumentering og annen infrastruktur i fjellområder.

Prosjektet er gjennomført som en del av NVEs satsing på FoU for å øke kvaliteten og effektiviteten i forvaltningen av naturfare, i samarbeid med Statens Vegvesen. Notatet går gjennom teori om snøfordeling i terrenget og beskriver prinsippene for fjernmålingsteknologiene, samt foreslår en arbeidsflyt. Nytte-verdien av snøfordelingsdata beskrives også over ulike tidsperspektiv for skredvarsling – fra daglig operativ bruk til sesongbasert planlegging.

Førde, november 2025

Brigt Samdal
direktør
Skred- og vassdragsavdelingen

Odd Are Jensen
faggrupeleder
Seksjon for flom og skred

Dokumentet sendes uten underskrift. Det er godkjent i henhold til interne rutiner.

Til: Statens Vegvesen og Norges vassdrags- og energidirektorat
v/ Markus Eckerstorfer og Karin Bergbjørn

Kopi til:

Dato: 2025-09-15

Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Dokumentnr.: 20250210-01-TN

Prosjekt: mini-FoU stedsspesifikk snøskredvarsling

Prosjektleder: Holt Hancock

Utarbeidet av: Holt Hancock, Sunniva Skuset

Kontrollert av: Christian Jaedicke

Overflatenær fjernmåling av snødekket: Utfordringer og muligheter for stedsspesifikk skredvarsling i Norge

Innhold

1	Innledning	3
2	Snøfordeling i terrenget - bakgrunn	4
2.1	Vindtransport av snø	4
2.2	Snøfordeling i terrenget	6
3	Metoder å innhente data om snøfordeling	9
3.1	Målepinsipp	9
3.2	Operativ bruk av TLS og UAS for skredvarsling	11
4	Nytteverdi av lidar/SfM-teknologi for stedsspesifikk skredvarsling for ulike tidsperspektiv	12
4.1	Daglig	13
4.2	Ukentlig til månedlig	15
4.3	Sesongvis/planleggingsfasen	16
5	Plassering av instrumenter ved hjelp av lidar-/SfM-baserte data: anbefalinger og muligheter	17
5.1	Planlegging av og valg av metode for datainnsamling	17
5.2	Gjennomføre datainnsamling	18
5.3	Faktiske forhold på bakken	18
5.4	Behandle data / lage snøhøydekart for visualisering	19
5.5	Sammenlign med klimadata	20
5.6	Valg av plassering	21
6	Konklusjoner	23
7	Referanser	25

Kontroll- og referanseside

Sammendrag

Dette tekniske notatet undersøker hvordan fjernmålingsteknologier – særlig terrestrisk laserskanning (TLS) og ubemannede luftsystemer (UAS) – kan støtte stedsspesifikk snøskredvarsling i Norge. Slike teknologier gjør det mulig å kartlegge snøfordeling med høy romlig oppløsning, noe som kan gi verdifull innsikt i snødekket i bratte fjellsider. Slik informasjon kan støtte farevurderinger tatt i forbindelse med stedsspesifikk skredvarsling, og beslutninger om plassering av instrumentering og annen infrastruktur i fjellområder.

Notatet går gjennom teori om snøfordeling i terrenget og beskriver prinsippene for fjernmålingsteknologiene. Basert på erfaringer fra prosjekter i Longyearbyen, Honningsvåg og Tromsø, presenterer notatet videre en arbeidsflyt for bruk av TLS- og UAS-data til plassering av instrumentering i skredvarslingsprosjekter. Vi diskuterer også hvordan klimadata kan brukes som støtte for å sette observerte snødata i kontekst, samt nytteverdien av snøfordelingsdata over ulike tidsperspektiv for skredvarsling – fra daglig operativ bruk til sesongbasert planlegging. Våre vurderinger tilsier at et enkelt snøfordelingskart ved maksimal snøakkumulering, kombinert med lokal kunnskap, kan gi nytteverdi for planlegging og plassering av instrumentering for stedsspesifikk skredvarsling. Mer omfattende og kvantitative metoder bør vurderes ved større investeringer, men er ikke nødvendige for de fleste varslingsprosjekter. Bruk av fjernmålingsdata bør alltid kombineres med lokal kunnskap og andre datakilder for å danne et helhetlig datagrunnlag for stedsspesifikk skredvarsling.

Hovedanbefalinger fra rapporten er:

- *Manuelle observasjoner og/eller instrumentering bør prioriteres framfor UAS og TLS datainnhenting for daglige tidshorisonter.*
- *UAS og TLS bør betraktes som verktøy som kan supplere, men ikke erstatte, eksisterende manuelle observasjonsrutiner og instrumentering på ukentlige til månedlige tidshorisonter i skredvarslingsoppdrag.*
- *Enkelt lidar-skanning bør prioriteres i planleggingsfasen av varslingsprosjekter, særlig for prosjekter som vil innebære installasjon av instrumentering.*

1 Innledning

Snøfordeling i terrenget påvirkes av prosesser som vindtransport og fortrinnsvis avsetning av nedbør som snø (se kapittel 2), og spiller en avgjørende rolle i utviklingen av snøskredfare. Forståelse av hvordan snøen fordeles i fjellet er derfor sentralt for effektiv skredvarsling, spesielt i stedsspesifikke varslingsprosjekter hvor beslutninger ofte fattes på grunnlag av lokale forhold i utvalgte løseområder og skredbaner.

I dette notatet undersøker vi hvordan fjernmålingsteknologier som terrestrisk laser-skanning (TLS) og ubemannede luftsystemer (UAS) – med både lidar- og fotogram-metriutstyr – kan brukes til å kartlegge snøfordeling i terrenget. Slike data kan være spesielt nyttige i planleggingsfasen for å vurdere plassering av instrumentering, men også som støtte i operativ varsling og etter skredhendelser.

Selv om TLS og UAS har blitt hyppig brukt i forskningssammenheng, har operativ bruk i Norge vært mer begrenset. Synkende kostnader og økt tilgjengelighet av utstyr, kombinert med bedre programvare og erfaringsgrunnlag, har imidlertid åpnet nye muligheter for å implementere disse teknologiene i stedsspesifikke skredvarslingsprosjekter. Formålet med dette notatet er å:

- Presentere de fysiske prosessene som styrer snøfordeling i fjellområder.
- Oppsummere metoder for innsamling og behandling av snøfordelingsdata.
- Vurdere hvordan slike data kan brukes på ulike tidshorisonter i operative varslingsprosjekter.
- Presentere en praktisk arbeidsflyt for bruk av fjernmåling teknologi til plassering av instrumentering.

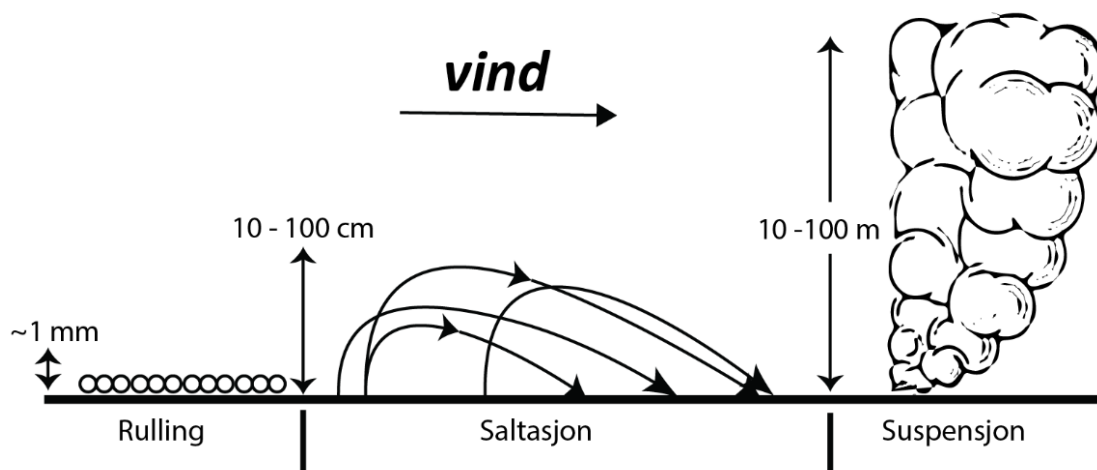
Notatet bygger på en litteraturstudie sammen med erfaringer fra Longyearbyen, Honningsvåg, og enkel testing ved Ullstinden i Tromsø kommune i vinter 2024/2025, hvor TLS-data ble brukt for å vurdere plassering av sensorer. Notatet er særlig rettet mot brukere av NVEs veileder for stedsspesifikk snøskredvarsling, med fokus på bestillere og leverandører med begrenset erfaring med bruk av UAS eller TLS for måling av snøhøyde. Notatets mål er å bidra til å fastslå for hvilke formål, og over hvilke tids-horisonter, UAS- eller TLS-metoder kan benyttes på en hensiktsmessig måte i steds-spesifikke skredvarslingsprosjekter.

2 Snøfordeling i terrenget - bakgrunn

2.1 Vindtransport av snø

Vindtransport av snø og den resulterende snøfordelingen har avgjørende betydning for å forstå skredaktivitet i alpint terreng. Vindinnlasting av snø bidrar til at flaskskred oftere utløses i leområder (Schweizer et al., 2003), og toppskavler danner seg når snø avsettes nær rygger (Montagne et al., 1968). Tidligere arbeid har mange ganger vist at skredaktivitet ofte er nært knyttet til snøtransport og vindinnlasting under store snøfall (Seligman, 1936; Atwater, 1954) og derfor er det viktig at de som jobber med skredvarsling forstår hvordan, når og hvor snøen fordeles i terrenget.

Snødrift – eller vindtransport av snø – skjer gjennom tre prosesser. De tre prosessene i snøtransport kan kalles *rulling*, *saltasjon* og *suspensjon* (Figur 2-1). Transportprosessene er primært avhengige av vindhastighet, tilfangsområde (område oppstrøms retning i forhold til avsetningsområde der vinden kan dra med seg snø), samt snøoverflatens egenskaper.



Figur 2-1 Måter vinden transporterer snø. Figuren er tilpasset etter Mellor (1965) med terminologi fra Lied og Bakkehøi (2003).

Rulling beskriver bevegelsen av tørre snøpartikler innenfor 1 mm fra snøoverflaten på grunn av vind. Denne prosessen involverer rullebevegelse av tørre snøpartikler som er for store til å løftes fra snøoverflaten med eksisterende vindforhold. Rulling kan danne små bølger/dyner som «forflytter seg» (de gamle eroderes, og nye dannes litt nedstrøms av den forrige) med vindretningen (Kosugi et al., 1992; Tabler, 1994). Dynene har gjerne en bratt oppstrøms side og en slakere side nedstrøms.

Ved økende vindhastighet blir enkelte partikler tatt opp i *saltasjon*. Dette innebærer bevegelse av partikler langs buede baner. Saltasjon startes når vindhastigheten overstiger en viss terskelverdi, og friksjonen fra vinden overvinner gravitasjons- og kohesjonskreftene som holder partikkelen på plass i snødekket (Pomeroy & Gray, 1990). Etter de

har løsnet, følger partikler i saltasjon en ballistisk, semi-parabolsk bane (se Figur 2-1). Etter hvert som partiklene treffer snøoverflaten vil partiklene enten sprette ut i en ny bane eller slå løs nye snøpartikler, som sendes ut i saltasjon. (Pomeroy & Gray, 1990). Feltobservasjoner indikerer at saltasjonslaget typisk ligger maksimalt 10 cm over snøoverflaten. (Kobayashi, 1972; Mellor, 1965; Pomeroy & Gray, 1990; Takeuchi, 1980).

Ved en ytterligere økning av vindhastigheten transporterer turbulente vinder snøpartikler *suspensjon* uten at de er i ytterligere kontakt med snøoverflaten (Budd et al., 1966; McClung & Schaerer, 2006; Pomeroy et al., 1993). Det er generelt akseptert at snøpartikler først må trekkes med i saltasjon før de blir suspendert av atmosfærisk turbulens. Dermed er partikler øverst i saltasjonslaget primærkilde for partikler som går over i suspensjon (Pomeroy & Male, 1992; Schmidt, 1980). Hoveddelen av snøtransport fra suspensjon skjer under en høyde på omtrent 5 m på grunn av avtagende massekonsentrasjon av snøpartikler med økende høyde (Budd et al., 1966; Mellor, 1965; Pomeroy, 1989; Schmidt, 1986), i tillegg kan sublimasjon føre til betydelig massetap når partiklene oppnår større høyde (e.g. Schmidt, 1972; Pomeroy, 1991).

Mengden snø som transporteres av vind er avhengig av vindhastigheten og egenskapene til snøoverflaten. Generelt sett øker snøtransporten i tredje potens med økende vindhastighet. I tillegg vil en mer tettpakket og kohesiv snøoverflate med sterkere bindinger mellom krystallene, kreve høyere vindhastigheter for å mobilisere snø i forhold løsere nysnø (Li & Pomeroy, 1997). Li og Pomeroy (1997) fant terskler for transport av våt snø på mellom 7 og 14 m/s (gjennomsnitt på ca. 10 m/s), og verdier fra 4 til 11 m/s (gjennomsnitt på ca. 8 m/s) for tørr snøtransport, på de kanadiske præriene. De høyeste vindhastighetene, vanligvis over 25–30 m/s, er nødvendig for å remobilisere snø fra en smelte-fryseskare (Budd et al., 1966; Mellor, 1965). Schmidt (1980) konkluderte med at terskler for vindhastigheter for en gitt snøoverflate øker med tid siden avsetning, på grunn av snøomvandling som binder snøen sammen (sintring). Vindhastigheten må også være høyere ved høyere temperaturer, høyere luftfuktighet og dersom snøen tidligere har blitt utsatt for vindtransport.

Transportprosessen er også avhengig av vindhastighet. *Rulling* kan foregå med vindhastigheter under 5 m/s, men antas å ha liten betydning for den totale massetransporten, vanligvis mindre enn 10% (Kosugi et al., 1992; McClung & Schaerer, 2006). Derfor blir rulling vanligvis ikke tatt i betraktning ved beregninger av den totale transporten og i snødriftsmodeller (Gauer, 1998; Jaedicke, 2001; Lehning et al., 2008; Liston & Sturm, 2002; Pomeroy et al., 1993). Tidligere arbeid har fastslått at mengden snø som transporteres via *saltasjon* begynner ved rundt 5 m/s for løs nysnø og øker lineært med vindhastigheten (Li & Pomeroy, 1997). En relativt høy prosentandel (>50 %) av snømassen transport skjer via saltasjon når vindhastigheten er lavere enn 10 m/s (Pomeroy, 1989; Pomeroy et al., 1997; Pomeroy & Gray, 1990). Snøtransport ved *suspensjon* er relativt ubetydelig for vindhastigheter under 10 m/s, men når vindhastighetene øker til over 15 m/s kan suspensjon utgjøre opptil 90% av den totale massetransporten (Pomeroy, 1989). Ettersom massetap av snø, på grunn av sublimering, skjer raskt i suspensjon vil en relativt høy prosentandel av den suspenderte snømassen forsvinne til

atmosfæren i stedet for å bli fordelt på nytt over landskapet (Pomeroy, 1991), avhengig av den relative fuktigheten i luften.

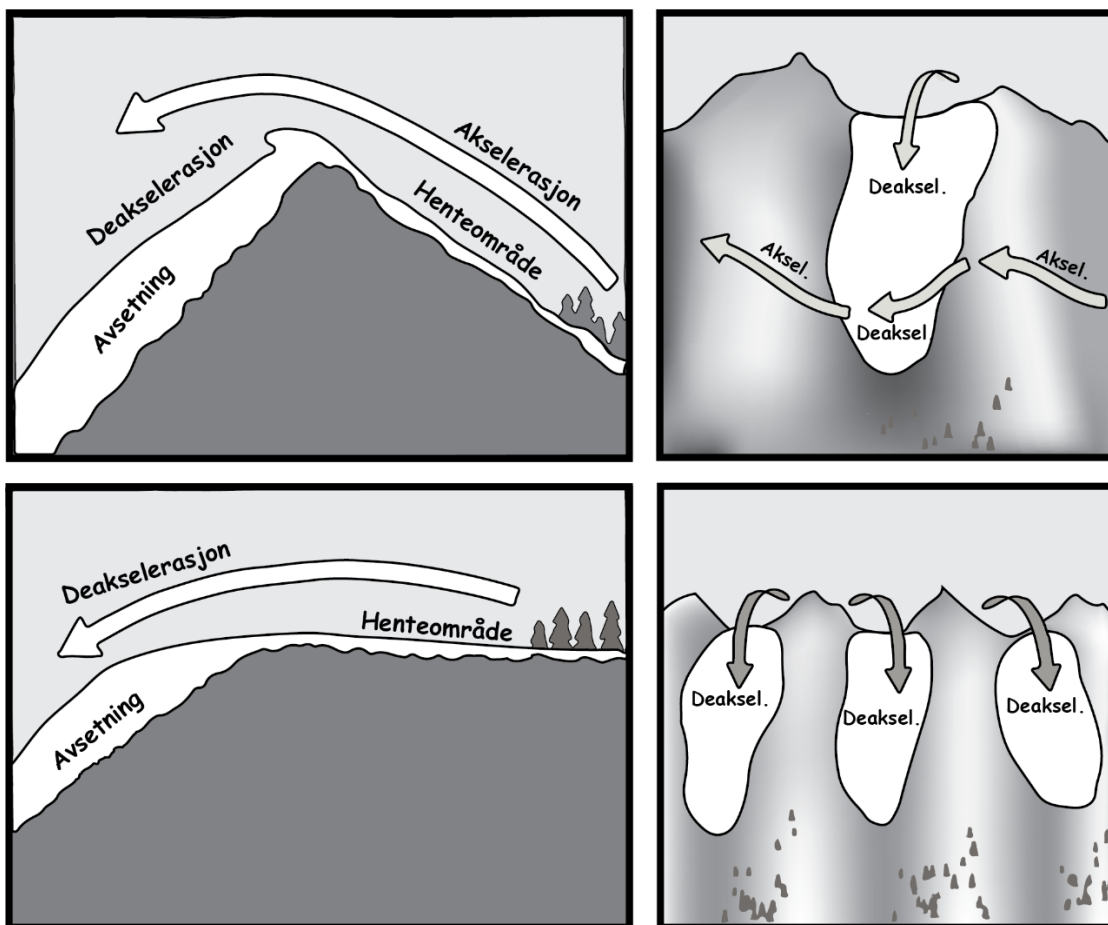
Oppsummert, skjer snødrift gjennom tre transportprosesser (rulling, saltasjon, og suspensjon). Transportprosessen er primært avhengig av vindhastighet, samt egenskapene til tilfangstområdet og snøoverflaten. Selv om det finnes betydelig variasjon i de empiriske ligningene knyttet til snøtransport i forhold til vindhastighet (se Tabler et al., 1990) har forskning vist at snøtransporten øker:

- proporsjonalt med tredje- eller fjerdepotensen av vindhastigheten;
- med økende lengde på tilfangstområdene, opp til omtrent 1000 m; og
- med mindre kohesive eller konsoliderte snøoverflateegenskaper.

2.2 Snøfordeling i terrenget

Samspillet mellom meteorologiske og topografiske variabler styrer snøfordelingen i fjellområder der vindtransport har en dominerende rolle i utviklingen av snødekket (Mott et al., 2018). Topografien har en betydelig innflytelse på lokale vindforhold, for eksempel ved at vind akselerer på losiden av rygger og avtar i leområder (Figur 2-2).

Slike vindmønstrene bestemmer hvor snøen akkumuleres og eroderes. Prosessene foregår over ulike romlige skalaer, og varierer fra hele fjellområder til enkelte rygger og fjellsider (Mott et al., 2018). I stedsspesifikk skredvarsling er prosessene som påvirker snøfordeling på lokal skala (enkelte rygger og fjellsider) mest relevant. Tidligere forskning, oppsummert av Mott et al. (2018), har pekt på tre prosesser som styrer snøfordeling på denne skalaen (Mott et al., 2014; Vionnet et al., 2017): 1) økt snøfall som følge av orografiske effekter; 2) mer snø samles i leområder og mindre snø akkumuleres (/eroderes) i leområder under et snøfall; «fortrinnsvis avsetning» («preferential deposition», Lehning et al., 2008), og 3) omfordeling av snø ved saltasjon og suspensjon.

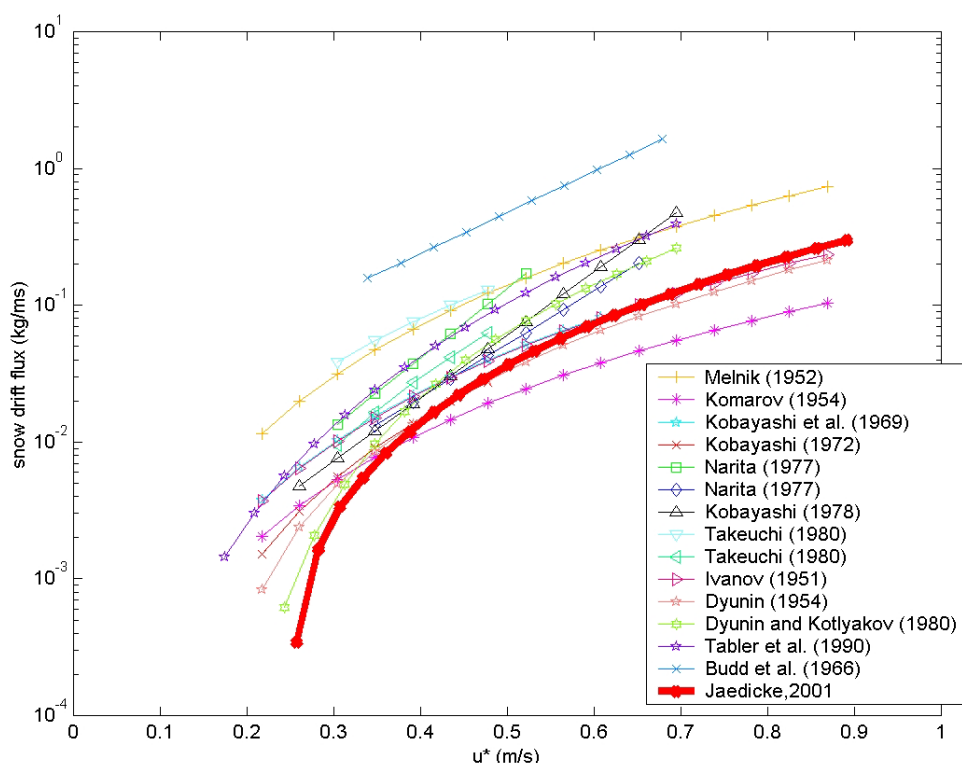


Figur 2-2 Vindforhold og snøfordeling i fjellområder. Adapted from McClung and Schaerer 2006.

Til sammen fører disse tre prosessene til at fallende snø og vindtransportert snø samles i leområder der topografien lokalt induserer nedbremsing av vindhastigheten (Figur 2-2). Forskning viser at fortrinnsvis avsetning kontrollerer romlig variabilitet på en større skala (hundrevis til tusenvis av meter), mens saltasjon og suspensjon spiller en større rolle på mindre skaler (få til hundrevis av meter). For eksempel, mens snøfallet pågår, bestemmer fortrinnsvis avsetning det generelle avsetningsmønsteret langs lesiden av større topografiske formasjoner (til venstre i Figur 2-2) (Mott et al., 2014; Vionnet et al., 2017). Etter snøfallet, spiller saltasjon og suspensjon en større rolle i snøfordelingen over mindre områder, som enkelte fjellsider; (e.g. Mott et al., 2010; Schön et al., 2015). Dette fører til gjenkjennelige mønster som sidelasting (oppe til høyre i Figur 2-2). Her styrer vedvarende vinder genererte av terrenget erosjon og avsetning av snøen (Aksamit & Pomeroy, 2018), men for å skille ut de ulike bidragene fra fortrinnsvisavsetning, saltasjon og suspensjon kreves høyoppløselige data – i både rom og tid – som ikke nødvendigvis er tilgjengelig (Kirchner et al., 2014).

Tidlig forskning på snøtransport fokuserte på observasjoner av snødrift både i felt (Mellor, 1960; Schmidt, 1986; Takeuchi, 1980) og i laboratorier (Kikuchi, 1981). Disse observasjonene ble etter hvert brukt som delvis grunnlag for semi-empiriske modeller,

som ble basert på vertikal integrert parameterisering av snøtransport i luften over flate, relativt homogene overflater (Pomeroy et al., 1993; Liston & Sturm, 2002). Enkelte eksempler er vist i Figur 2-3. For å ta bedre hensyn til mer komplekse vind-snø koblinger i fjellområder, har nyere modelleringsforsøk brukt modeller som fanger opp mer kompliserte samspill mellom terreng, atmosfære og, i noen tilfeller, snø (Gauer, 2001; Mott et al., 2010; Schneiderbauer & Prokop, 2011; Vionnet et al., 2017). Selv om disse nyere modellene i større grad reproduserer snøfordeling i komplekst terreng enn de enklere semi-empiriske modellene, krever de betydelig mer ressurser for å gjennomføre beregningene. I tillegg kommer det ytterligere krav til valideringsdata med høy romlig oppløsning ved bruk av mer komplekse modeller. Det har vært økende bruk av terrestrisk laserskanning eller andre former for lidar datainnhenting for å lage valideringsdatasett av snøfordeling (Schneiderbauer & Prokop, 2011; Mott et al., 2010; Vionnet et al., 2014; A. Voordendag et al., 2024). Disse metodene er beskrevet i neste kapittel.



Figur 2-3 Eksempler fra noen av de empiriske relasjonene mellom vindhastighet [m/s] og snødrifttransport [kg/ms] som er gitt i litteraturen.

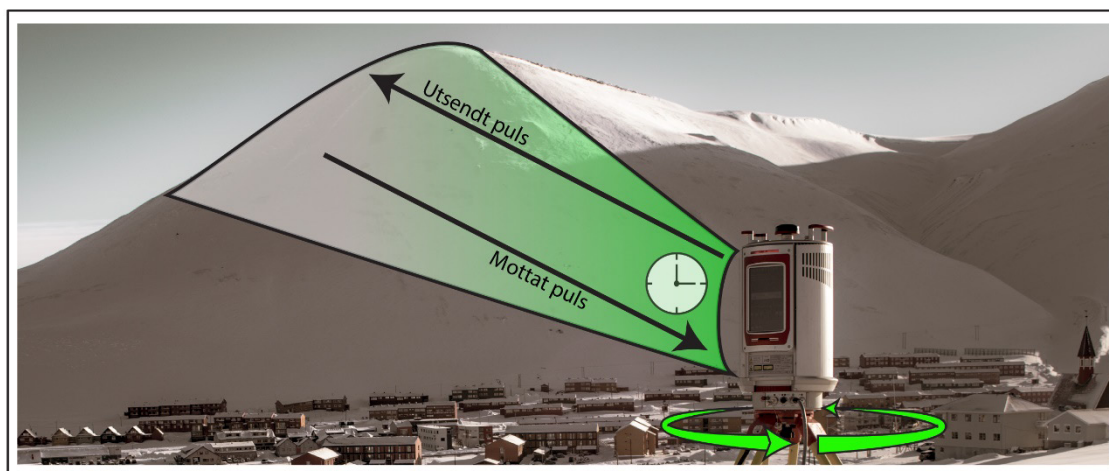
3 Metoder å innhente data om snøfordeling

3.1 Målepinsipp

Det finnes ulike metoder å samle inn data om snøfordeling i terrenget. Nylig har disse to metodene vist seg å være mest lovende: (1) *lidar-data* innhentet enten ved hjelp av uncrewed aerial systems (UAS; drone) eller bakkebaserte lidar systemer (TLS – «terrestrial laser scanning»), og (2) *Structure-for-motion (SfM)*, som baseres på bilder fra UAS.

Lidar er en fjernmålingsteknikk som måler avstander med lyspulser og lager nøyaktige 3D-representasjoner av måleoverflaten. Lidar er en aktiv fjernmålingsteknologi som sender ut en lyspuls, som så reflekteres av måleoverflaten og sendes tilbake til enheten. Lidar-enheten måler nøyaktig tiden den utsendte pulsen bruker til måleoverflaten og tilbake. Denne toveis reisetiden, i kombinasjon med informasjon om retningen pulsen ble sendt ut i, kan brukes til å bestemme den nøyaktige plasseringen av et punkt på overflaten.

Ved UAS-baserte systemer, er lidar-enheten montert på en drone som flys over terrenget. TLS er et bakkebasert system der skanneren roterer og ser gjennom et «skannevindu» på en vertikal akse, og registrerer posisjonen til millioner av punkter (Figur 3-1). Det endelige resultatet fra en lidardata-innhetning er en tett punktsky som representerer den målte overflaten og kan brukes til 3D-modellering av overflater.

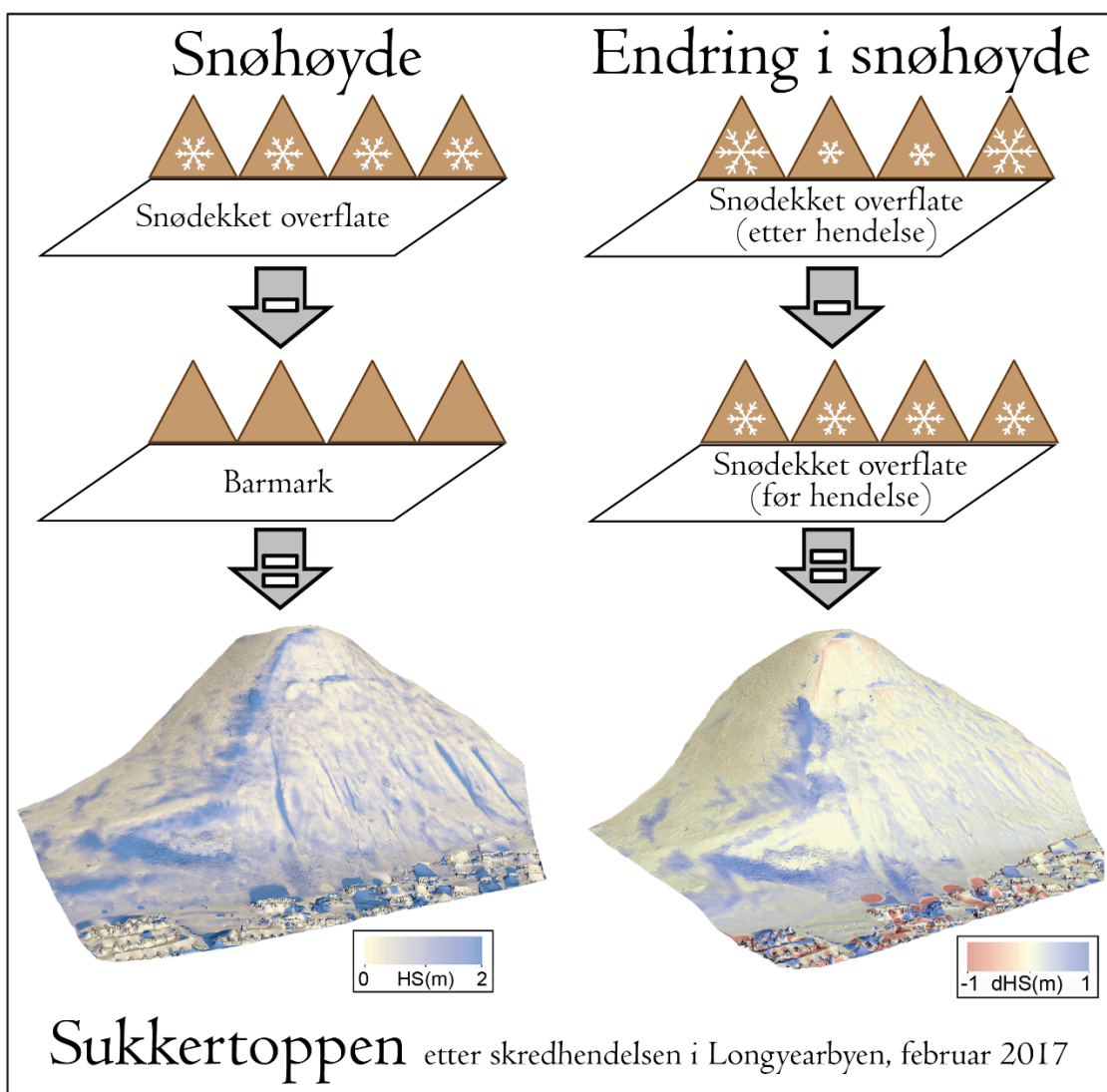


Figur 3-1 Målingsprinsipp for terrestrisk laser skanning. Tilpasset etter Hancock (2021).

«Structure from Motion» (SfM) er en fotogrammetrisk teknikk som også resulterer i en punktsky som representerer den målte overflaten. SfM er en fotogrammetrisk teknikk som benyttes for å rekonstruere 3D-strukturer fra bildesekvenser, hvor bildene er tatt fra ulike synsvinkler. SfM estimerer både kameraets posisjon, orientering og 3D-strukturen på måleoverflaten samtidig (Remondino & El-Hakim, 2006; Westoby et al., 2012). Metoden benytter seg av deteksjon og matching av visuelle nøkkelpunkter på tvers av bildene, og deretter løses geometriske relasjoner gjennom «bundle adjustment» (en

optimaliseringsteknikk som minimerer reprojeksjonsfeil) for å oppnå nøyaktige 3D-koordinater og kameramodeller (Westoby et al., 2012). SfM har bred anvendelse innen geofag, hvor overlappende bilder fra UAS kan brukes å lage en modell av overflaten og terrenget. UAS-basert SfM som metode er et veletablert, billigere alternativ til lidar for datainnhenting av informasjon om snøhøyde og snøfordeling (e.g. M. S. Adams et al., 2018; Bühler et al., 2016; Salazar et al., 2024).

Innhenting av informasjon om snøfordeling i terrenget har blitt brukt i økende grad siden TLS for første gang var testet for bruk på snødekte overflater, for snart 20 år siden (Prokop, 2008). Både lidar- og SfM-metoder benytter samme prinsipp: gjentatte skanninger av, eller flygninger over, det samme området, som gjør kvantifisering av endringer i snødekket mulig ved å differensiere samregistrerte overflater. Produktet er enten et bearbeidet dataprodukt, som en digital høydemodell, eller selve punktskyen. Et vanlig sluttprodukt er et snøhøydekart. Dette blir laget ved å først interpolere digitale høydemodeller (DTM-er) fra georefererte rå punktskyer, innhentet da overflaten var snøfri, og sammenligne med DTM-er som er innhentet på tidspunkter med snødekke. De resulterende DTM-ene representerer overflatehøydene uten snø (barmark) og overflatehøydene til snødekte overflater. Snøhøyden beregnes deretter for hvert samlokaliserte rutenett punkt i DTM-ene ved å trekke barmarkhøydene fra høydene til den snødekte overflaten. Differensielle produkter med snøhøydedata kan på lignende måte lages ved å beregne høydeforskjeller mellom snødekte overflater tatt på forskjellige tidspunkt. Slike produkt kan være nyttige for å undersøke virkningen av hvordan for eksempel spesifikke meteorologiske forhold, eller skredaktivitet, har på snøfordelingsmønstre (f.eks. skredet vist i Figur 3-2 og snøhøydedata fra Ullstinden vist senere i rapporten i Figur 4-1).



Figur 3-2 Metodikken for å beregne snøhøyde (HS) eller endring i snøhøyde (dHS) utifra modeller av overflaten. Eksempelen fra Sukkertoppen, Svalbard viser TLS data fra skredhendelsen i februar 2017. Data og hendelsen er beskrevet i detalj i Hancock (2018).

3.2 Operativ bruk av TLS og UAS for skredvarsling

Helt siden Prokop (2008) utviklet terrestrisk laserskanning som en metode for å innhente data om snøfordeling, har teknologien blitt stadig mer brukt i forskningsarbeid innen en rekke tema. Eksempler på bruksområder for TLS-baserte dataprodukter med snøhøyde – i tillegg til valideringsdata for snødriftmodeller – inkluderer vurdering av snøsmelting i alpine områder (Egli et al., 2012), validering av parametere for dynamisk skredmodellering fra nøyaktige skredmålinger (Prokop et al., 2015), planlegging og prosjektering av sikringstiltak (Prokop & Procter, 2016), i tillegg til overvåking av toppskavler (H. Hancock et al., 2020) og glidesprekker (Dillon et al., 2025). Det fins relativt få publiserte forsøk som tester TLS i operative skredvarslingsprosjekter, med (Deems et al., 2015) som et unntak. De fant at TLS gir detaljert og tidsriktig informasjon

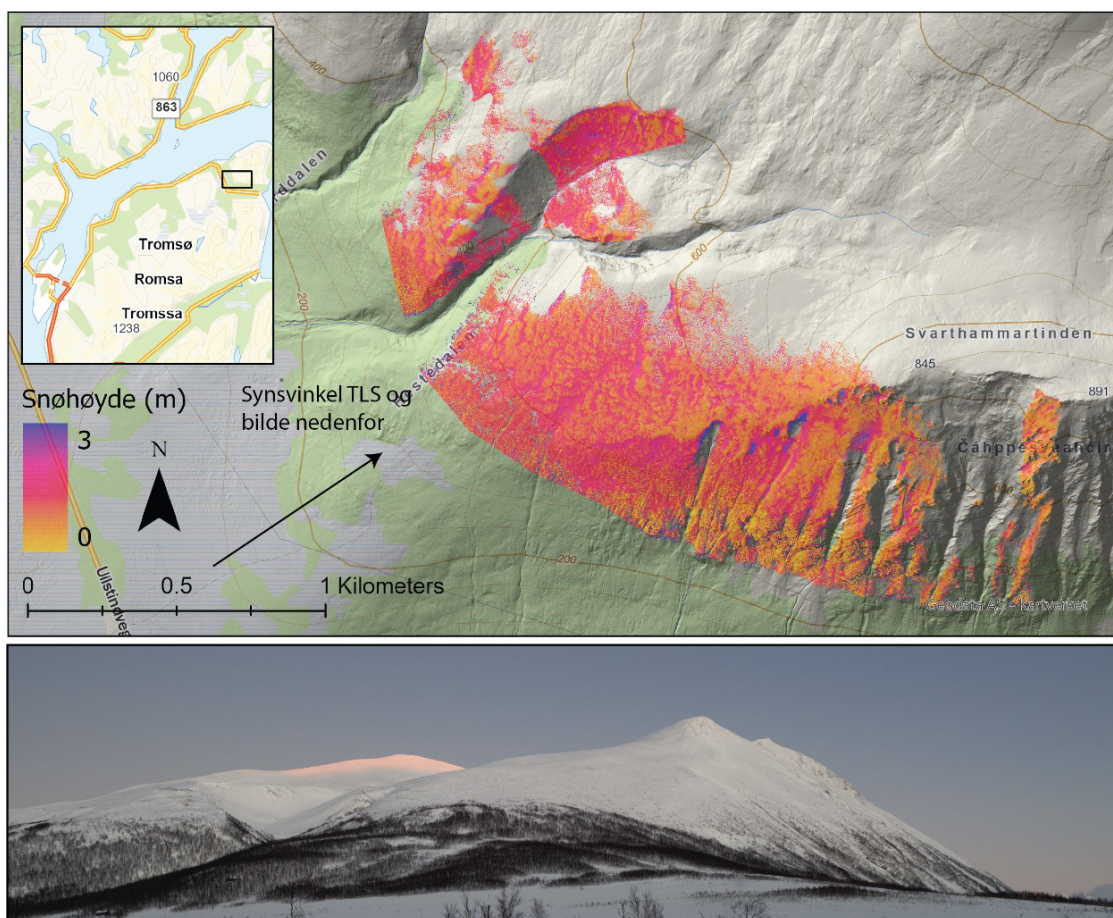
som kunne forbedre vurderingen av skredfare, og støttet en mer målrettet og effektiv kontroll av snøskred. Ulemper knyttet til avhengighet av god sikt samt krevende logistikk, i forbindelse med at TLS-en skal plasseres og styres, begrenser imidlertid mulighetene å bruke TLS for operativ skredvarsling.

UAS-basert datainnsamling har derimot blitt betydelig mer brukt og testet for operativ skredvarsling. En omfattende oversikt av UAS-teknologi og -metoder som kan brukes i vurderinger av snøskredfare finnes i Statens Vegvesen rapport nr. 958 (McCormack, 2024). Nåværende «state-of-the-art» kunnskap av UAS bruk for snøskredvarsling kommer stort sett fra GEOSFAIR-prosjektet, som er ledet av Statens Vegvesen i samarbeid med SINTEF og NGI her i Norge. En oppsummering av prosjektets hovedresultater og anbefalinger for operativ bruk finnes i McCormack et al. (2024). Det henvises til disse publikasjonene for mer inngående diskusjoner av GEOSFAIRS resultat. Spesifikke referanser fra GEOSFAIR inkluderes hvor det er relevant i diskusjoner nedenfor.

4 Nytteverdi av lidar/SfM-teknologi for steds spesifikk skredvarsling for ulike tidsperspektiv

Bruk av UAS- og/eller TLS-teknologi krever ressurser – som ofte er begrenset i varslingsprosjekter. Investering i utstyr og kompetanseutvikling krever alltid ressurser i startfasen ved bruk av ny teknologi, mens prisene på selve utstyret reduseres etter hvert. Det er derimot løpende kostnader tilknyttet datainnhenting og databehandling som er typisk avgjørende for om teknologien blir iverksatt i skredvarslingsrutinene (Deems et al., 2015; Solbakken et al., 2024). Hyppigheten til skanninger vil dermed virke kostnadsdrivende i prosjekter, og hvor ofte man skal foreta skanninger må vurderes opp mot nytteverdien dataene gir til varslingen.

I dette kapittelet blir nytteverdien av TLS- og UAS-baserte data om snøfordeling vurdert for operative stedsspesifikke skredvarslingsoperasjoner. Nytteverdien blir vurdert for kortere og lengre tidsperspektiv med relevans for varslingsprosjekt (daglig, ukentlig/-månedlig, og årlig/sesong). Vurderingene er basert på litteraturstudie, sammen med erfaringer fra forsøk der snøfordelingsdata er integrert i skredvarslingsprosjekter i Longyearbyen og Honningsvåg. Enkelte tester med TLS-metoder, i forbindelse med forskningsprosjekter denne vintersesongen i Tromsø, bidrar med noe ytterligere erfaring. Figur 4-1 viser eksempel på data fra prosjektet i Tromsø.



Figur 4-1 Eksempel på TLS-basert snøfordelingsdata fra Ullstinden, Tromsø. Snøhøydedata under skogsgrensen har blitt klippet bort ettersom TLS-data er mindre pålitelig her.

4.1 Daglig

Relativt få skredvarslingsprosjekter får inn snøfordelingsdata, fra UAS eller TLS, med daglig eller semi-daglig (2-4 dager) hyppighet. Etter det vi kjenner til er slik snøfordelingsdata mest brukt av SVV i sine varslingsoperasjoner og i Alaska (e.g. Dryer et al., 2023; Solbakken et al., 2024), Tidsforbruk og logistikk tilknyttet til datainnhenting og databehandling (e.g. Bühler et al., 2016; Deems et al., 2015), samt begrenset mulighet for datainnhenting under snøfall og sterk vind (e.g. Deems et al., 2013; McCormack, 2024), er generelt de største hindrene for at disse datakildene ikke brukes mer.

I forbindelse med det nylige GEOSFAIR-prosjektet ble integrering av UAS-baserte lidardata testet i en operativ arbeidsflyt. Testene viste at dataene kan være til nytte i en varslingsoperasjon (Haddad et al., 2023; Solbakken et al., 2024). Resultat fra Haddad et al. (2023) indikerte at skredvarsler med tilgang til lidardata varslet lavere aktsomhetsnivå enn skredvarsler uten tilgang, noe som kan bety at lidardata kan gi viktig informasjon til vurdering av skredstørrelse og skredsannsynlighet. En varsler fra NGI som var involvert i disse testene, opplevde derimot ikke at lidardataene var avgjørende

for vurderingen av skredfare og endelig varsel. Denne vurderingen skyldes mellom annet at man kan få nesten same type data fra andre kilder (for eksempel informasjon om snøfordeling fra webkamera) og at annen informasjon trolig veier tyngre (for eksempel informasjon om lagdeling). Et viktig moment kan være at testperioden, vedkommende hadde, trolig var for kort til å bli vant til bruk av lidardata. Lidardata ble imidlertid vurdert som nyttig, spesielt for forståelse av fokksnøproblemer og i situasjoner der andre datakilder ikke var tilgjengelig. Det blir til slutt påpekt at det innhentes og bearbeides informasjon fra mange ulike kilder og en enkelt kilde er sjeldent utslagsgivende.

Ved integrering av TLS-data som informasjonskilde for skredvarsling i Longyearbyen opplevde man noen av de samme utfordringene; Sterk vind og/eller stort snøfall i perioder med økt skredfare gjorde datainnhenting vanskelig, når det egentlig var stort behov for hyppig informasjon (se H. Hancock et al., 2018). Tidskrevende data-behandling gjorde i tillegg at data ikke ble levert til skredvarsler til riktig tid, og det manglet dessuten en enkel måte å dele dataene på. I tillegg var kompetansen til å bruke TLS og behandle data begrenset til enkelte personer, slik at datatilgjengelighet var personavhengig og ikke pålitelig operativ.

Fremskritt i automatisering av både UAS- (e.g. Dryer et al., 2023) og TLS-teknologi (A. B. Voordendag et al., 2021; Ruttner et al., 2025) er lovende for framtidens bruk i varslingsoperasjoner og vil løse mange av utfordringene nevnt ovenfor. Enkelte tester utført i Longyearbyen viste at automatisert TLS er operasjonelt gjennomførbart og teknisk mulig, men dyrt å iverksette og noe tvilsomt når det gjelder robusthet (M. Adams et al., 2022). Lidar-sensorer fra bilindustrien har nylig vært tatt i bruk for overvåkning av snødekket (Goelles et al., 2022; Ruttner et al., 2025). Disse systemene kan monteres på en mast som mer tradisjonelle snøhøydesensorer og kan overvåke snøoverflaten nesten kontinuerlig. Sensorene selv er relativt billig i forhold til TLS eller UAS lidar-systemer, men har betydelig begrenset rekkevidde og krever fortsatt direkte kobling til strøm. Likevel har enkelte tester i Longyearbyen integrert slike lidar-systemer i stedsspesifikk skredvarsling rutiner med lovende resultater.

Frem til automatiserte løsninger er mer omfattende testet og billigere, anbefaler vi å prioritere ressursbruk på innhenting av informasjon om snøfordeling via manuelle observasjoner, og/eller instrumentering, for daglige tidshorisonter. Særlig ettersom den erfarte nytten av lidardata er noe begrenset. Erfaringsmessig er manuelle observasjoner og instrumentering, som webkamera, oftere avgjørende for skredfarevurderinger, og kan i tillegg være billigere og dessuten gi andre fordeler enn UAS- eller TLS-data (e.g. manuelle observasjoner gir informasjon om lagdeling i snøen samt økt lokalkunnskap).

Dersom det skulle vise seg at kvantifisering av snøtransport er avgjørende for daglige vurderinger, bør instrumenter som måler snødrift direkte vurderes fremfor lidardata, da dette er billigere og leverer data automatisk (Wickström et al., 2024).

4.2 Ukentlig til månedlig

Mange av de samme utfordringene ved bruk av TLS- og UAS-data i daglig varslingsgjelder også med tanke på bruk for et lenger tidsperspektiv, uker til måneder. Et lengre tidsperspektiv gir imidlertid bedre mulighet å planlegge datainnhenting i perioder med gunstige værforhold. Gitt at prosjektet har råd til å innhente og behandle data, betyr dette at man kan forvente brukbare data. Dataene kan være nyttig for planlegging og tolking av manuelle observasjoner, danne et helhetlig bilde av snø- og skredforhold i området, og ellers planlegge skredkontroll. Relativt få skredvarslingsprosjekter i Norge får inn regelmessig UAS- eller TLS-baserte data. Et unntak er skredvarslingsoppdraget til SVV på Haukelifjellet, som får SfM-data ukentlig. Dette hjelper å danne et helhetlig bilde av situasjonen, men er ikke avgjørende for vurdering av skredfare. Ellers er UAS og TLS stort sett brukt sporadisk og vanligvis i forbindelse med fotografering i etterkant av skredhendelser.

TLS- og UAS-baserte snødata gir hovedsakelig informasjon om snøoverflaten. Fram til UAS, som kan «se» inn til snøen ved hjelp av radar (e.g. Dupuy et al., 2024), er bedre utviklet, er man derfor avhengig av manuelle observasjoner for å hente informasjon om lagdelingen i snøen. Tilgang til ukentlig eller månedlig snøfordelingsdata vil kunne bidra til å planlegge målrettede observasjoner. Dette er spesielt relevant i stedsspesifikk skredvarslings, der snøforholdene i spesifikke løseområder og skredbaner vil påvirke den overordnede farevurderingen. Snøfordelingsdata kan for eksempel målrette observasjoner til områder med tynnere snødekke, eller områder som har nylig fått pålagring fra fokksnø. Ettersom en observatør med god lokalkunnskap relativt lett kan målrette observasjoner på samme måte, har snøfordelingsdata muligens mest nytte for visualisering, samt oppskalering av punktmålinger fra en snøprofil til hele fjellsiden. Vi er likevel ikke kjent med varslingsoperasjoner som formalisert bruker snøfordelingsdata på denne måten.

Snøfordelingsdata kan muligens brukes til å få bedre forståelse av skredets flaktykkelse. Nylig har snøfordelingsdata fra lidar blitt brukt til å bestemme dynamiske skredmodelleringsparameter i RAMMS som støtte til skredfarevurderinger i Canada (Sharp et al., 2024). Bruddhøyden i denne studien var imidlertid bestemt empirisk fra total snøhøyde. I teorien kan man i enkelte situasjoner følge med på flaktykkelse over et kjent svakt lag gjennom hyppig innhenting av snøfordelingsdata. Dersom man for eksempel har informasjon om en smelte-fryseskare som blir nedsnødd, kan man følge med tykkelsen av flaket som blir liggende ovenfor et eventuelt svakt lag rett over eller under skaren. I dette eksempelet er man likevel avhengig av manuelle observasjoner for å vite om et svakt lag har faktisk utviklet seg.

Vår anbefaling at UAS og TLS bør betraktes som et verktøy som kan supplere, men ikke erstatte, eksisterende manuelle observasjonsrutiner og instrumentering på ukentlige til månedlige tidshorisonter i skredvarslingsoppdrag. Om man likevel har ressurser å iverksette bruk av UAS eller TLS i et prosjekt, så kan ukentlig eller månedlig levering av snøfordelingsdata i tillegg være gunstig for opplæring av skredvarslerne. Disse data-produktene kan også hjelpe til med beslutninger i planleggingsfasen.

4.3 Sesongvis/planleggingsfasen

For lengre perioder (en sesong) kan snøfordelingsdata fra TLS eller UAS være avgjørende for beslutninger tilknyttet risikostyring i forbindelse med snøskred. Tidligere forskning, som inkluderte hyppig innhenting av TLS-data over flere sesonger, viste at ved sesongens maksimale snøhøyde er snøfordelingen i større grad lik fra sesong til sesong (Schirmer et al., 2011). Enkelte større snøfall med sterk vind kan føre til ulike mønstre av snøavsetning, men sesongvis snøfordeling styres av få, større værmønstre med like egenskaper (vindretning osv.). Dette betyr at man med relativt få, velplanlagte datainnsamlingskampanjer kan danne en forståelse av vedvarende snøfordelmønstre og avsetningsstrukturer i en fjellside. Dette kan utgjøre et grunnlag for mer detaljert innsikt i fjellsidens oppførsel under ulike vær- og skredsituasjoner. Dette vil være nyttig for operativ skredvarsling, men kanskje enda viktigere; et nyttig verktøy for gunstig plassering av sikringstiltak og instrumentering tilknyttet til håndtering av skredfare.

Sjeldnere datainnsamling på sesongbasis krever mindre ressursbruk og enklere logistikk enn hyppigere datainnhenting, og kan gi viktig informasjon om snøforhold som er ellers vanskelig å oppnå. Kostnaden for å utføre sesongvis lidar-datainnsamling – som kan fort ligge over 50.000 NOK avhengig av området og prosjektskompleksitet – fra en fjellside er berettiget i forhold til fordelene. Dette gjelder spesielt for prosjekter med større investeringsbehov, der man også for eksempel skal bestemme plassering av sikringstiltak eller instrumentering. Som et eksempel fra Honningsvåg vinteren 2022, ble én enkelt TLS-skann gjennomført for å validere snøhøydesensorer ([Honningsvåg - snødata 2022](#)). Dataene ble brukt for å omplassere noen av sensorene til gunstigere plasseringer til neste sesong, men ble også nyttige for prosjektering av nye støtteforbygninger. TLS-data har også vært brukt i forprosjekteringsfasen for sikringsløsningen i Mosjøen. Prosjektering av fysiske permanente sikringstiltak er imidlertid utenfor rammen av denne rapporten.

Vi anbefaler at en enkelt lidar-skanning bør prioriteres i planleggingsfasen av varslingsprosjekter, særlig for prosjekter som vil innebære installasjon av instrumentering. Manglende kunnskap om snøfordeling kan føre til uheldige konsekvenser for instrumenter, blant annet feilplassering. En enkelt skanning utført ved sesongens maksimale snøhøyde, vanligvis i april, vil gi viktig informasjon om snøfordeling. Ressursbruken kan forsvares sammenlignet med kostnader for ødelagt eller feilplassert instrumenter. Dette krever at planleggingsfasen starter tidlig nok – i forkant av sesongen før varslingsoppstart. Som en ekstra fordel, kan snøfordelingsdata brukes i oppstartsfasen for operativ skredvarsling, ved å hjelpe varslerne med å danne et mentalt bilde av snøen i fjellsiden.

Videre, viser Jones et al. (2023) hvordan lidar-data kan integreres i planleggingsfasen for RACS. Lidar-data er likevel erfaringsmessig betydelig mindre avgjørende for RACS plassering enn parametere som grunnforhold, påvirkningsareal og kunnskap med det aktuelle RACS-systemet som skal plasseres. Derfor bør lidar-data ses som tilleggsinformasjon, men ikke nødvendige data, som kan utvide beslutningsbasis i prosjektering av RACS.

5 Plassering av instrumenter ved hjelp av lidar-/SfM-baserte data: anbefalinger og muligheter

I dette kapittelet presenterer vi en praktisk anvendbar arbeidsflyt for bruk av enten lidar- eller SfM-baserte snøfordelingsdata til plassering av instrumenter i forbindelse med stedsspesifikk snøskredvarsling. Den presenterte arbeidsflyten her er tilrettelagt for praktisk bruk av skredvarslingsoperasjoner i Norge, som kan ha begrenset tilgang til UAS (eller TLS), og vil bruke teknologien i forbindelse med plassering av instrumenter.

Arbeidsflyten bygger på arbeid med TLS og instrumentering gjort i Longyearbyen ([Sensors as a risk management tool](#)) og Honningsvåg, sammen med erfaring fra implementering av en lignende arbeidsflyt ved Ullstinden, Tromsø, denne vinteren. Arbeidsflyten består av følgende steg:

1. Planlegge datainnsamling ut ifra problemstilling og prosjektsbegrensinger
2. Gjennomføre datainnsamling
3. Skaffe informasjon om faktisk situasjon med manuelle observasjoner og eksisterende lokalkunnskap
4. Databehandling og kartproduksjon
5. Sammenligne med klimadata
6. Velge plassering basert på en skjønsmessig vurdering av snøfordeling, databehov i prosjektet, og begrensende faktorer (tilgjengelighet i terreng, kommunikasjon, etc)

Mer detaljerte, kvantitative og deterministiske metoder for datainnsamling, behandling, og analyser finnes (Welch et al., 2013; Bühler et al., 2024), og bør vurderes for prosjekter med større investering i infrastruktur. Disse metodene vurderes dog å være utenfor rammen for dette notatet og vil sannsynligvis kreve betydelig mer ressursbruk enn det som vanligvis er tilgjengelig for de fleste stedsspesifikke skredvarslingsprosjektene.

5.1 Planlegging av og valg av metode for datainnsamling

Med de ulike metodene for datainnsamling (lidar med TLS eller UAS, eller SfM med UAS) kommer ulike fordeler, men også en god del begrensinger (Tabell 5-1). Begrensningene kan være knyttet til logistikk (f.eks. tilgjengelighet av utstyr og personell, flyplanlegging, tilgjengelighet til feltlokasjoner, strøm- og/eller batteritilgjengelighet), forskrifter og sikkerhet (f.eks. flyforbudsoner, begrensninger i synsfelt, øyesikkerhet), og vær- og lysforhold. Disse begrensningene bør tas grundig i betraktning når man planlegger datainnsamling, og er like viktige å vurdere som det ønskede resultatet gitt problemstillingen. Slik kan man prioritere hvilke data som kan samles inn med UAS/TLS, og hvilke data som krever andre metoder. Som regel vil de fleste prosjekter bare ha tilgang til én, kanskje to, av metodene som er oppsummert i tabellen, noe som begrenser valgmulighetene.

Ved å ha en idé om hvor utstyr skal plasseres allerede i planleggingsfasen kan datainnsamlingen fra UAS/TLS målrettes mot områdene som er av størst interesse. Vanligvis vil dette innebære å bestemme utløsningsområder eller skredbaner der man

ønsker å etablere instrumentering (eller RACS), og i tillegg optimalisere flygeplaner eller TLS-skanningssteder for å sikre datainnsamlingen.

Tabell 5-1 Oppsummering av fordeler og ulemper sammen med helhetlig vurdering av anvendelighet for stedsspesifikk skredvarsling.

Målingsmetoder	Fordeler	Ulemper	Beste for:
Bakkebasert lidar (TLS)	Lang rekkevidde Nøyaktige data Uavhengig av lysforhold	Dyre instrument Risiko for øy Det kreves høy kompetanse for å oppnå en arbeidsflyt som gir tilstrekkelig nøyaktighet Krever godt vær	Store områder Flyforbudsoner, Andre områder med krevende dronelogistikk
UAS - lidar	Nøyaktige data Billigere enn TLS Stadig flere med UAS kompetanse Uavhengig av lysforhold	Begrenset rekkevidde for det fleste operatører Krevende logistikk / kreves høy kompetanse ved vanskeligere datainnhenting Krever godt vær	De fleste varslingsoppgaver som må balansere ressursbruk og data-nøyaktighet
UAS - SfM	Relativt billig Kan utføres med de fleste droner	Mindre nøyaktig data i de fleste omstendigheter Krever godt vær og lysforhold Begrenset rekkevidde for de fleste operatører	Oppgaver som trenger snøfordelingsdata på billigste mulig måte

5.2 Gjennomføre datainnsamling

Anbefalinger for tekniske parametere og spesifikke datainnsamlingsprosedyrer er avhengig av målemetode og teknologien som brukes. Det GEOSFAIR-prosjektet ga anbefalinger for UAS-baserte lidarundersøkelser for kartlegging av snøfordeling (Salazar et al., 2024)., mens anbefalinger som er nyttige for UAS-baserte SfM-snøundersøkelser er gitt i Miller et al. (2022). Et kommende teknisk notat fra NGI vil gi detaljerte anbefalinger for TLS-basert datainnsamling.

Uavhengig av hvilken teknologi som brukes, anbefaler vi å utføre undersøkelser i perioden med maksimal årlig snøakkumulering for å få mest mulig representative snøhøyder for plassering av instrumenter. For å sikre et tilstrekkelig værvindu, bør feltkampanjer planlegges over flere dager dersom det er langt å reise til området som skal undersøkes.

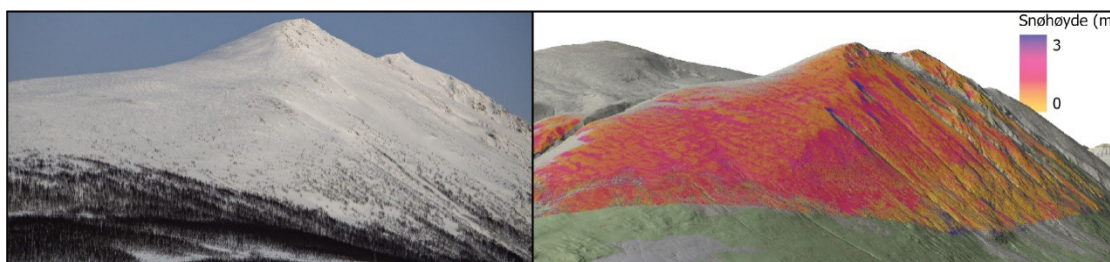
5.3 Faktiske forhold på bakken

Selv om kvantitative snøfordelingsdata i seg selv gir nyttig informasjon å basere plassering av instrumenter på, er bakkekontroll av fjernmålingsdata også viktig. Dette kan også tas inn som en del av grunnlagsinformasjonen som skredvarslere bygger sin lokale kunnskap på. Bakkekontroll innebærer å bevege seg rundt i terrenget og manuelt måle snøhøyden, vanligvis med søkestang, på forskjellige steder. Områder med merkbar

snøakkumulasjon (eller erosjon) og snøformasjoner, i tillegg til markerte snøfrie elementer, bør dokumenteres med foto. Dette kan også hjelpe til i databehandlingsfasene. Noe av målet med bakkekontrollen er å etablere et generelt inntrykk av snøforholdene på stedet, samt at datainnsamlingen samsvarer med virkeligheten. Manuelle målinger av snøhøyde kan i tillegg gir ekstra informasjon om snøfordeling i området. For eksempel, målinger tatt med søkestang 2025-04-24 på en tur som kunne tilsvare til en rask observasjonstur kan brukes sammen med lidar-data fra tidligere i sesongen for å forstå vedvarende snøfordelingstrekk i området. Klimadata kan brukes for å studere utviklingen mellom TLS-datainnsamling tidlig i sesongen og de manuelle verdiene samlet ved maksimum snøhøyde (se avsnitt 5.5).

5.4 Behandle data / lage snøhøydekart for visualisering

Det finnes mange forskjellige måter å behandle data på og lage snøhøydekart. Uansett metode kreves det en overflate med snø og en snøfri overflate (se Figur 3.1). I prinsippet vil dette kreve en feltkampanje i april/maksimal snøakkumulering og en feltkampanje om sommeren for å foreta en skanning på barmark. Hvis det ikke er mulig å foreta en skanning på barmark, kan bruk av fritt tilgjengelige lidardata fra NDH (Nasjonale Høydedata) fungere som et alternativ. Selv om dette resulterer i redusert i nøyaktighet, erfaringer fra slik behandling av data fra Ullstinden i dette prosjektet viste at sammenligning av TLS-avledede snøoverflater med NDH-lidardata gitt snøhøyder med nøyaktighet på under 20 cm, over et relativt stort område. For beslutninger knyttet til instrumentering er dette nøyaktighetsnivået sannsynligvis akseptabelt, og kan være et billig alternativ til en barmarksskanning.



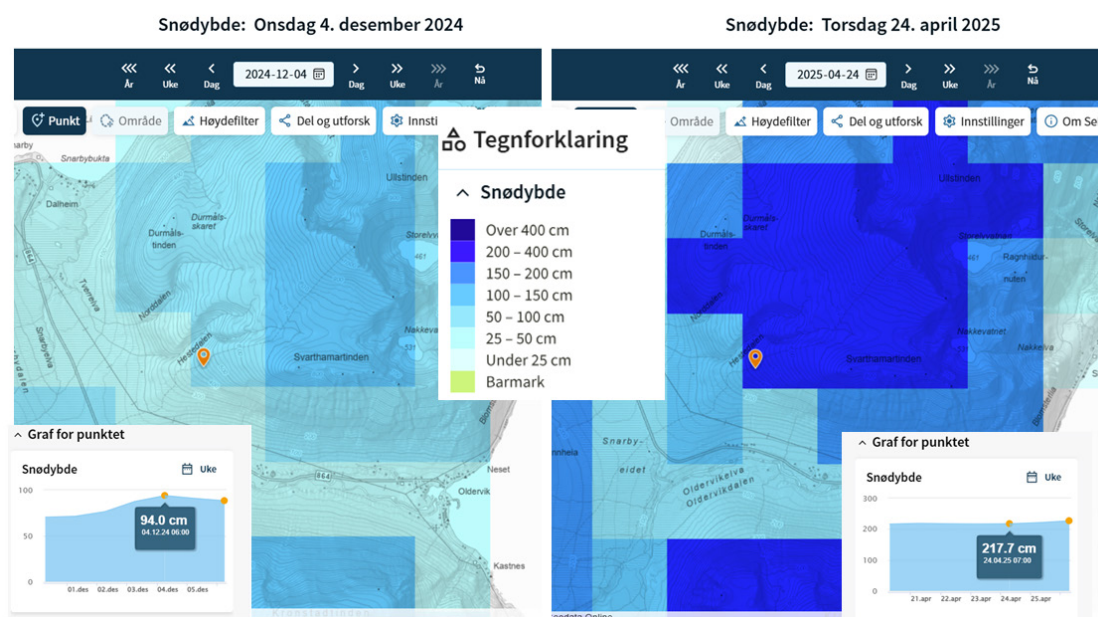
Figur 5-1 Snøfordeling på Ullstinden. TLS-basert snøhøydedata til høyre hentet 2024-12-04.

Etter databehandlingen, anbefaler vi bruk av både et vanlig snøhøydekart (2D – se Figur 4-1) og i tillegg en 3D-fremstilling av snøhøydedataene (Figur 5-1) for å danne en god forståelse av snøfordelingen. Vår erfaring er at interaktive verktøy, for eksempel 3D-framvisning på ArcGIS Online, gir bedre oversikt og inntrykk av snøfordelingen. Kartet gir kvantitativ snøhøydeinformasjon og gjør det mulig å se vedvarende snøfordelingstrekk, som vil være nøkkelen i valg av plassering av instrumentering eller infrastruktur i fjellsiden.

5.5 Sammenlign med klimadata

Skanning av snødekket representerer ett enkelt tidspunkt. Man kan forvente betydelige variasjoner i observerte snøhøyder fra år til år og også i løpet av én enkelt sesong. Derfor må man ta hensyn til klimadata for å bedre forstå hvordan observert snøfordeling gjenspeiler områdets klima og sammenligne observerte snømengder med maksimum snøhøyde som kan forventes i området. En enkel måte å gjøre dette på er ved bruk av seNorge-data (Figur 5-2).

For eksempel burde TLS data fra 2024-12-04 tatt tidlig i snøsesongen ikke betraktes som maksimum snøhøyde for området (Figur 5-1). Gridcellene i seNorge, som tilsvarer området dekket av skanning, viser mellom 90 og 130 cm snø på bakken, som stemmer overens med data fra TLS data. Dette tilsvarer ca. 50% av 30-års gjennomsnitt maksimum snøhøyde (ca. 180 cm) i seNorge-modellen. Manuelle snøhøyde målinger tatt med søkestang 2025-04-24 (langs ruten vist i Figur 5-3) viste snøhøyder litt over doble av det som ble målt fra TLS den 2025-12-04 (Figur 5-1, Figur 5-3). Dette gjenspeiles i seNorge snøhøydene (Figur 5-2).



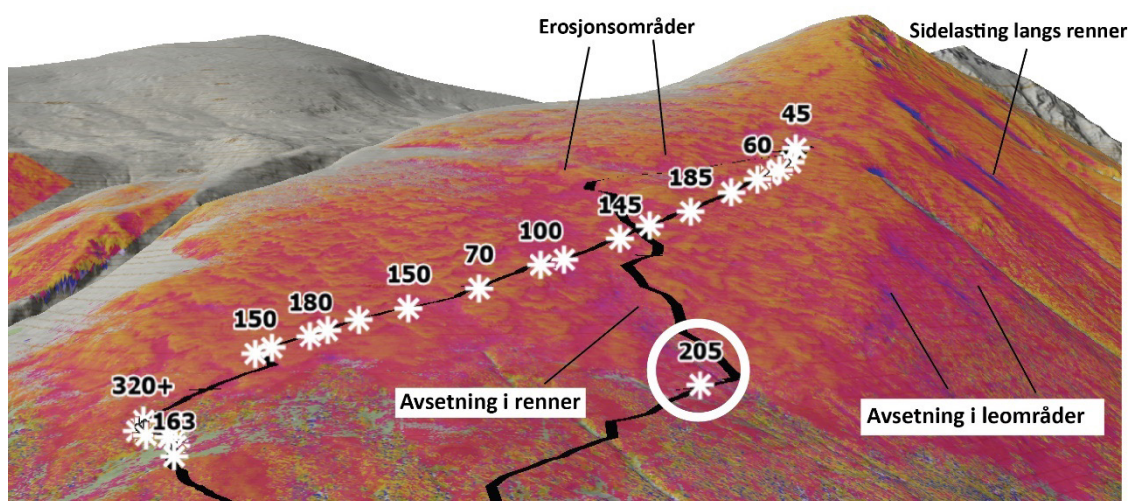
Figur 5-2 T.v.: Snøhøyde fra seNorge for 2024-12-04 (dato for TLS skanning) og t.h. 2025-04-24 (dato for manuelle målinger). seNorge-data viser ca. 40% av vintersesongens snøhøyde lå på bakken 2024-12-04, mens på 2025-04-24 var snøhøydene faktisk over gjennomsnittet i perioden 1991-2020.

Snøhøyder vil ikke være fordelt jevnt over terrenget slik seNorge-dataene indikerer, spesielt ettersom forsenkninger, som søkk og renner, fylles med snø. Likevel kan klimadata brukes som en grov metode for å sette observerte snødybder i kontekst innenfor forventet snøakkumulering. Detaljert modellering av vind- og snøfordeling kan være nødvendig for mer kostbare og omfattende prosjekter, men en skjønnsmessig vurdering

av klimadataenes påvirkning på snøfordeling kan være tilstrekkelig for installering av enkelte værstasjoner.

5.6 Valg av plassering

Plassering av instrumenter i stedsspesifikke skredvarslingsprosjekter bør baseres på lokal erfaring og klimadata sammen med, ideelt sett, en skjønsmessig vurdering av fjernmålte snøfordelingsdata. Kvantitativ informasjon om snøfordelingen fra TLS- eller UAS-baserte data kan brukes for å bedre plassere instrumenter og RACS innenfor rammeverket for instrumenteringsmål (f.eks. hvilke data man vil få ut fra instrumenteringen) og begrensinger (f.eks. hvilken type og mengde instrumentering som er tilgjengelig).



Figur 5-3 Eksempel som viser hensynene som er tatt i valg av plassering av en enkel snøsensord på Ullstinden. TLS-basert snøhøyder er fra 2024-12-04. Det svarte sporet viser ruten som ble gått 2025-04-24. Snøhøyder (i centimeter) målt manuelt med søkestang markert i hvite. Den store hvite sirkelen viser utvalgt plasseringen som: 1) ligger i et leområde hvor snøen avsettes utover sesongen, 2) er representativ av sørøstvendte leområder ved og litt ovenfor tregrensen av interesse for gjeldende forskningsprosjektet, 3) får ikke snøhøyder mye utover 2 m til tross for en snørike vinter, 4) ligger utenfor skredterreng slik at man kan få tilgang utover sesongen ved god sikkerhetsmargin.

Erfaringsmessig bør følgende faktorer vurderes, sammen med instrumenteringsmål og begrensinger, ved plassering av instrumentering:

- **Vedvarende snøfordelmønstre:** Bruk av snøhøydekart og 3D-visualiseringer for å støtte bilder og lokalkunnskap til å finne snøfordelmønstre som kan tolkes om vedvarende. Her bør man se etter akkumulasjons- og erosjonssoner på større skala, i tillegg til enkelte snøformasjoner – for eksempel mindre skavler i forbindelse med sidelasting – som kan påvirke plassering av instrumentering (Figur 5-3). Snøhøydekart fungerer som et nyttig visualiseringsverktøy, og gir i tillegg kvantitativ informasjon om snøhøyder. Både

visualisering og kvantifisering av snøfordeling kan, sammen med bilder og lokalkunnskap, gir et godt grunnlag for å forstå fjellsidens snøfordeling og jobbe videre med plassering av instrumenter.

- **Representativitet:** Instrumentering bør gir målinger som er representativ for den stedsspesifikke skredvarslingsproblemstillingen. Et typisk eksempel er plassering av instrumentering i eller nær et løснеområde som leverer data om snøhøyden. Bruk av et snøfordelingskart sørger for at plasseringen foregår i et område hvor snø samles på en måte representativ av det aktuelle løснеområdet. *OBS: Hyppigere datainnsamling gir mye nytteverdi med tanken på representativitet fordi man kan følge med hvordan snøen samles i løснеområdet oppfordrer seg under ulike værforhold.* Snøfordelingskartet kan i tillegg brukes for å vurdere områder som er mindre skredutsatt, slik at det er mindre sannsynlig at instrumentering eller RACS blir tatt av et snøskred.
- **Unngå at instrumenter ble nedsnødd eller utsatt for snøsig:** Plassering av instrumentering bør unngå områder hvor instrumenter sannsynligvis vil bli fullstendig begravd (Figur 5-4) eller unødvendig utsatt for snøsig eller skred. Lidar eller SfM data gir kvantitativ informasjon om snømengdene som kan brukes for finjustering av plassering gitt begrensinger av et bestemt instrument. For eksempel ved plassering av en enkel værstasjon i nærheten av et løśnieområde, kan kvantitativ snøfordelingsdata brukes til å velge en plassering, hvor det både samles nok snø for at stasjonen kan fange opp endringer i snøhøyden over sesongen (typisk 1-2 m ved maksimal snøhøyde), men samtidig ikke vil bli helt begravd (avhenger av instrumenterings spesifikasjoner). Om enklere værstasjoner skal plasseres i brattere terreng (over 20°, for eksempel), er snøsig en begrensende faktor dersom maksimal snøhøyde ovenfor er ca. 2-2.5 m. Her bør områder med mindre snø eller slakere terreng vurderes for plasseringen.



Figur 5-4 Eksempel på en nedsnødd snøsensor fra Lavangsdalen i vinteren 2024/2025. Plassering av sensoren ble valgt uten tidligere kunnskap om snøfordeling eller systematisk bruk av klimadata og lokalkunnskap.

- **Tilgjengelighet:** Plassering bør muliggjøre vedlikehold, feilsøking, og eventuelt visuell inspeksjon (f.eks. via webkamera eller tilkomst). Om det er ønskelig med fysisk tilgang til instrumentene i løpet av vintersesongen i forbindelse med akutt vedlikehold eller feilsøking, bør man velge den minste skredutsatte plasseringen som fortsatt gir data av tilstrekkelig representativitet.

For større prosjekter eller prosjekter med høyt investeringsbehov (f.eks. installasjon av langvarig sikringstiltak eller dyre, permanente værstasjoner), kan det være hensiktsmessig å utføre mer avanserte analyser, inkludert modellering av vindfelt, snøtransport og snøskreddynamikk. For de fleste prosjekter vil det imidlertid være tilstrekkelig med en systematisk, skjønnsmessig vurdering basert på tilgjengelige fjernmålingsdata og lokal kunnskap.

6 Konklusjoner

Dette tekniske notatet har vurdert hvordan overflatenære fjernmålingsteknologier – TLS og UAS-baserte metoder – kan støtte stedsspesifikk snøskredvarsling, med særlig fokus på kartlegging av snøfordeling og valg av instrumentplassering. Først ble relevant forskning som gir innsikt i prosessene som styrer snøfordeling i fjellområder oppsummert. Deretter ble litteraturstudie, erfaring fra tidligere arbeid i Longyearbyen og Honningsvåg og noen enkelte tester i Tromsø i vinter 2024/2025 brukt til å vurdere nytten av TLS- og UAS-baserte metoder over ulike tidsperspektiver, og videre skissere en enkel arbeidsflyt for å benytte tilsvarende dataprodukter for plassering av instrumenter.

Nytteverdien av disse dataproduktene for ulike tidshorisonter er vurdert som følgende:

- *Daglig bruk* av TLS- eller UAS-data med dagens teknologi, vil i det fleste operative skredvarslingsoperasjoner være av begrenset nytte på grunn av ulemper knyttet til logistikk, kostnader og værbegrensninger. I tillegg er enklere og billigere datakilder – som webkamera, bilder og manuelle observasjoner – som regel tilgjengelig og kan pålitelige lignende data.
- Over *ukentlig til månedlige* tidshorisonter kan TLS- og UAS-baserte metoder supplere, men ikke erstatte, eksisterende manuelle observasjonsrutiner og instrumentering. Dette forutsetter at om det finnes tilstrekkelige ressurser i varslingsprosjektet å utføre TLS- eller UAS-datainnhenting.
- *Sesongvis, eller i planleggingsfasen*, kan et enkelt snøfordelingskart, basert på data fra maksimal snøakkumulering, være et kostnadseffektivt verktøy for å redusere feilplassering av instrumenter eller infrastruktur, og for å øke forståelsen av snøfordeling i varslingsoperasjonen.

En praktisk anvendbar arbeidsflyt, som benytter et snøfordelingskart laget av TLS- eller UAS-dataprodukter ble presentert. Den kan brukes i planleggingsfasen av varslingsprosjekter med begrensede ressurser. For prosjekter med store investeringsbehov, bør mer detaljerte analyser og modellering av snøtransport og vindfelt vurderes.

Framtidige muligheter for overflatenære fjernmålingsmetoder inkluderer automatisering av datainnsamling, forbedret brukervennlighet i programvare og økt integrering av snøfordelingsdata i beslutningsstøttesystemer. Fremveksten av rimeligere sensortechnologi kan gjøre TLS, og særlig UAS, mer tilgjengelig og tippe kost-nyttebalansen mot fordelene for flere aktører. Videre tilpasning og utvikling av billigere lidar-sensorer fra bilindustrien som kan monteres fast utover vinteren gir videre mulighet for bruk av lidar-data i flere varslingsoperasjoner. I mellomtiden, aktører med tilstrekkelig kompetanse og ressurser bør fortsette å jobbe med integrering av snøfordelingsdata i sine varslingsoperasjoner. Dette vil føre til økt kompetanse og kunnskap med bruk av disse dataproduktene, som kan spre seg videre i miljøet mens teknologien også blir bedre. Foreløpig bør de fleste varslingsoperasjonene prioritere god lokalkunnskap, solide rutiner for manuelle observasjoner, og tilstrekkelig instrumentering. Når dette er på plass, kan ytterligere ressurser gå til UAS- og TLS-metoder å forbedre datagrunnlaget.

7 Referanser

- Adams, M., Hancock, H., & Voordendag, A. (2022). *Longyearbyen snow and avalanche monitoring with automated terrestrial laser scanning* (Arctic Field Grant Report RiS ID: 11630). UNIS. blob:<https://www.researchinsvalbard.no/771d9d1e-9bfa-40fe-8f60-d703d89ab32b>
- Adams, M. S., Bühler, Y., & Fromm, R. (2018). Multitemporal Accuracy and Precision Assessment of Unmanned Aerial System Photogrammetry for Slope-Scale Snow Depth Maps in Alpine Terrain. *Pure and Applied Geophysics*, 175(9), 3303–3324. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1748-y>
- Aksamit, N. O., & Pomeroy, J. W. (2018). Scale Interactions in Turbulence for Mountain Blowing Snow. *Journal of Hydrometeorology*, 19(2), 305–320. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0179.1>
- Atwater, M. M. (1954). Snow avalanches. *Scientific American*, 190, 26–31.
- Budd, W. F., Dingle, W. R. J., & Radok, U. (1966). The Byrd snow drift project: Outline and basic results. In *Studies in Antarctic Meteorology* (Vol. 9, pp. 71–134). AGU.
- Bühler, Y., Adams, M. S., Bosch, R., & Stoffel, A. (2016). Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): Potential and limitations. *The Cryosphere*, 10(3), 1075–1088. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1075-2016>
- Bühler, Y., Stoffel, A., & Liechti, D. (2024). Where to put the weather station? Optimizing the location for automated snow depth measurements based on remote sensing, avalanche modeling and terrain characteristics. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2024, Tromsø, Norway*, 1054–1060.
- Deems, J. S., Gadowski, P. J., Vellone, D., Evanczyk, R., LeWinter, A. L., Birkeland, K. W., & Finnegan, D. C. (2015). Mapping starting zone snow depth with a ground-based lidar to assist avalanche control and forecasting. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.09.002>
- Deems, J. S., Painter, T. H., & Finnegan, D. C. (2013). Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59(215), 467–479. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J154>
- Dillon, J., Peitzsch, E., Miller, Z., Bartelt, P., & Hammonds, K. (2025). Documenting, quantifying, and modeling a large glide avalanche in Glacier National Park, Montana, USA. *Cold Regions Science and Technology*, 231, 104412. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2024.104412>
- Dryer, P., Glassett, T. D., Marlow, R., & McKee, M. (2023). Unmanned aerial systems for avalanche monitoring and mitigation: a collaborative approach by Alaska DOT&PF and Alaska Railroad. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2023, Bend, Oregon*. International Snow Science Workshop, Bend, Oregon.
- Dupuy, B., Chatel, M., Grøver, A., Garambois, S., Lee, M., Tobiesen, A., Dahle, H., Salazar, S., Frauenfelder, R., Hendrikx, J., & Humstad, T. (2024). UAV-borne ground penetrating radar for avalanche forecasting. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2024, Tromsø, Norway*. International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway.
- Egli, L., Jonas, T., Grünwald, T., Schirmer, M., & Burlando, P. (2012). Dynamics of snow ablation in a small Alpine catchment observed by repeated terrestrial laser scans. *Hydrological Processes*, 26(10), 1574–1585. <https://doi.org/10.1002/hyp.8244>
- Gauer, P. (1998). Blowing and drifting snow in Alpine terrain: numerical simulation and related field measurements. *Annals of Glaciology*, Vol 26, 1998, 26, 174–178.
- Gauer, P. (2001). Numerical modeling of blowing and drifting snow in Alpine terrain. *Journal of Glaciology*, 47(156), 97–110. <https://doi.org/10.3189/172756501781832476>
- Goelles, T., Hammer, T., Muckenhuber, S., Schlager, B., Abermann, J., Bauer, C., Expósito Jiménez, V. J., Schöner, W., Schratter, M., Schrei, B., & Senger, K. (2022). MOLISENS: MOBILE LIDAR SENSOR SYSTEM to exploit the potential of small industrial lidar devices for geoscientific applications. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 11(2), 247–261. <https://doi.org/10.5194/gi-11-247-2022>
- Haddad, A., Hendrikx, J., Humstad, T., Solbakken, E., Johnson, J., & Sproles, E. A. (2023). Quantifying the impact of new data streams in avalanche forecasting. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2023, Bend, Oregon*. International Snow Science Workshop, Bend, Oregon.
- Hancock, H., Eckerstorfer, M., Prokop, A., & Hendrikx, J. (2020). Quantifying seasonal cornice dynamics using a terrestrial laser scanner in Svalbard, Norway. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20(2), 603–623. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-603-2020>

- Hancock, H. J. (2021). *Snow avalanche controls , monitoring strategies , and hazard management in Svalbard*. UNIS.
- Hancock, H., Prokop, A., Eckerstorfer, M., & Hendriks, J. (2018). Combining high spatial resolution snow mapping and meteorological analyses to improve forecasting of destructive avalanches in Longyearbyen, Svalbard. *Cold Regions Science and Technology*, 154, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.05.011>
- Jaedicke, C. (2001). *Drifting snow and snow accumulation in complex Arctic terrain: field experiments and numerical modelling* [Doctoral]. Geophysical Institute, University of Bergen.
- Jones, K. W., Wolken, G. J., McKee, M., Bartelt, P., & Bühler, Y. (2023). Using snow remote sensing and avalanche simulations to inform the placement of remote avalanche control systems. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2023, Bend, Oregon*. International Snow Science Workshop, Bend, Oregon.
- Kikuchi, T. (1981). A wind tunnel study of the aerodynamic roughness associated with drifting snow. *Cold Regions Science and Technology*, 5(2), 107–118. [http://dx.doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90045-8](http://dx.doi.org/10.1016/0165-232X(81)90045-8)
- Kirchner, P. B., Bales, R. C., Molotch, N. P., Flanagan, J., & Guo, Q. (2014). LiDAR measurement of seasonal snow accumulation along an elevation gradient in the southern Sierra Nevada, California. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4261–4275. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4261-2014>
- Kobayashi, D. (1972). Studies of snow transport in low-level drifting snow. *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, 24, 1–58.
- Kosugi, K., Nishimura, K., & Maeno, N. (1992). Snow ripples and their contribution to the mass transport in drifting snow. *Boundary-Layer Meteorology*, 59(1), 59–66. <https://doi.org/10.1007/bf00120686>
- Lehning, M., Löwe, H., Ryser, M., & Raderschall, N. (2008). Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain. *Water Resources Research*, 44(7), W07404. <https://doi.org/10.1029/2007wr006545>
- Li, L., & Pomeroy, J. W. (1997). Estimates of Threshold Wind Speeds for Snow Transport Using Meteorological Data. *Journal of Applied Meteorology*, 36(3), 205–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036%253C0205:Eotwsf%253E2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036%253C0205:Eotwsf%253E2.0.Co;2)
- Lied, K. K., & Kristensen, K. (2003). *Snøskred. Håndbok om snøskred*. Vett & Viten as i samarbeid med Norges Geotekniske Institutt.
- Liston, G., & Sturm, M. (2002). Winter precipitation patterns in arctic Alaska determined from a blowing-snow model and snow-depth observations. *Journal of Hydrometeorology*, 3, 646–660.
- McClung, D. M., & Schaerer, P. A. (2006). *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers Books.
- McCormack, E. (Editor). (2024). *Avalanche hazard assessment supported by UAS* (958 Statens Vegvesens Rapport). Statens Vegvesen.
- Mellor, M. (1960). Gauging Antarctic drift snow. *Antarctic Meteorology. Proceedings of the Symposium Held in Melbourne, February 1959*, 347–354.
- Mellor, M. (1965). Blowing snow cold regions science and engineering (Part III). *US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire*.
- Miller, Z. S., Peitzsch, E. H., Sproles, E. A., Birkeland, K. W., & Palomaki, R. T. (2022). Assessing the seasonal evolution of snow depth spatial variability and scaling in complex mountain terrain. *The Cryosphere*, 16(12), 4907–4930. <https://doi.org/10.5194/tc-16-4907-2022>
- Montagne, J., McPartland, J. T., Super, A. B., & Townes, H. W. (1968). *The Nature and control of snow cornices on the Bridger Range, Southwestern Montana*, Alta Avalanche Study Center. Miscellaneous Report.
- Mott, R., Schirmer, M., Bavay, M., Grünwald, T., & Lehning, M. (2010). Understanding snow-transport processes shaping the mountain snow-cover. *The Cryosphere*, 4(4), 545–559.
- Mott, R., Scipión, D., Schneebeli, M., Dawes, N., Berne, A., & Lehning, M. (2014). Orographic effects on snow deposition patterns in mountainous terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(3), 1419–1439. <https://doi.org/10.1002/2013JD019880>
- Mott, R., Vionnet, V., & Grünwald, T. (2018). The Seasonal Snow Cover Dynamics: Review on Wind-Driven Coupling Processes. *Frontiers in Earth Science*, Volume 6-2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00197>

- Pomeroy, J. W. (1989). A process-based model of snow drifting. *Ann. Glaciol*, 13, 237–240.
- Pomeroy, J. W. (1991). Transport and sublimation of snow in wind-scoured alpine terrain. *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas. IAHS Publication*, 205, 131–140.
- Pomeroy, J. W., & Gray, D. M. (1990). Saltation of snow. *Water Resources Research*, 26(7), 1583–1594. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01583>
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., & Landine, P. G. (1993). The prairie blowing snow model: characteristics, validation, operation. *Journal of Hydrology*, 144(1–4), 165–192.
- Pomeroy, J. W., & Male, D. H. (1992). Steady-state suspension of snow. *Journal of Hydrology*, 136(1), 275–301.
- Pomeroy, J. W., Marsh, P., & Gray, D. M. (1997). Application of a distributed blowing snow model to the Arctic. *Hydrological Processes*, 11(11), 1451–1464.
- Prokop, A. (2008). Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements. *Cold Regions Science and Technology*, 54(3), 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.07.002>
- Prokop, A., & Procter, E. S. (2016). A new methodology for planning snow drift fences in alpine terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 132, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.010>
- Remondino, F., & El-Hakim, S. (2006). Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record*, 21(115), 269–291. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>
- Ruttner, P., Voordendag, A., Hartmann, T., Glaus, J., Wieser, A., & Bühler, Y. (2025). Monitoring snow depth variations in an avalanche release area using low-cost lidar and optical sensors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(4), 1315–1330. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-1315-2025>
- Salazar, S., Hancock, H., Frauenfelder, R., Dahle, H., Solbakken, Emil, & Humstad, T. (2024). Optimisation of UAV-Borne lidar surveys for snow distribution mapping. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2024, Tromsø, Norway*. International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway.
- Schirmer, M., Wirz, V., Clifton, A., & Lehning, M. (2011). Persistence in intra-annual snow depth distribution: 1. Measurements and topographic control. *Water Resources Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1029/2010WR009426>
- Schmidt, R. A. (1972). Sublimation of wind transported snow- a model. *U.S. Forest Service Research Paper No. RM-90, Rocky Mountain Forest Range Experiment Station, U.S. Department of Agriculture, Fort Collins, May, 0*(U.S. forest service research paper no. RM-90, Rocky Mountain forest range experiment station, U.S. department of agriculture, Fort Collins, May), 24.
- Schmidt, R. A. (1980). Threshold wind-speeds and elastic impact in snow transport. *Journal of Glaciology*, 26, 453–467.
- Schmidt, R. A. (1986). Transport rate of drifting snow and the mean wind speed profile. *Boundary-Layer Meteorology*, 34(3), 213–241.
- Schneiderbauer, S., & Prokop, A. (2011). The atmospheric snow-transport model: SnowDrift3D. *Journal of Glaciology*, 57(203), 526–542. <https://doi.org/10.3189/002214311796905677>
- Schön, P., Prokop, A., Vionnet, V., Guyomarc'h, G., Naaïm-Bouvet, F., & Heiser, M. (2015). Improving a terrain-based parameter for the assessment of snow depths with TLS data in the Col du Lac Blanc area. *Cold Regions Science and Technology*, 114, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.02.005>
- Schweizer, J., Bruce Jamieson, J., & Schneebeli, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4). <https://doi.org/10.1029/2002RG000123>
- Seligman, G. (1936). *Snow structure and ski fields: being an account of snow and ice forms met with in nature and a study on avalanches & snowcraft*. Macmillan.
- Sharp, E., Tessier, A., & Campbell, C. (2024). Enhancing operational avalanche risk assessment with RPAS LiDAR snow depth maps and avalanche simulations: a case study in Western Canada. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2024, Tromsø, Norway*. International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway.
- Solbakken, E., Dahle, H., & Humstad, T. (2024). Repeated UAS LiDAR scanning of snow surface to support site-specific avalanche warning. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2024, Tromsø, Norway*. International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway.

- Tabler, R. D. (1994). *Design guidelines for the control of blowing and drifting snow*. Strategic Highway Research Program, National Research Council.
- Tabler, R. D., Benson, C. S., Santana, B. W., & Ganguly, P. (1990). *Estimating snow transport from wind speed records: Estimates versus measurements at Prudhoe Bay, Alaska*. 51–63.
- Takeuchi, M. (1980). Vertical profile and horizontal increase of drift-snow transport. *Journal of Glaciology*, 26, 481–492.
- Vionnet, V., Martin, E., Masson, V., Guyomarc'h, G., Naaim-Bouvet, F., Prokop, A., Durand, Y., & Lac, C. (2014). Simulation of wind-induced snow transport and sublimation in alpine terrain using a fully coupled snowpack/atmosphere model. *The Cryosphere*, 8(2), 395–415. <https://doi.org/10.5194/tc-8-395-2014>
- Vionnet, V., Martin, E., Masson, V., Lac, C., Naaim Bouvet, F., & Guyomarc'h, G. (2017). High-Resolution Large Eddy Simulation of Snow Accumulation in Alpine Terrain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 11,005–11,021. <https://doi.org/10.1002/2017JD026947>
- Voordendag, A. B., Goger, B., Klug, C., Prinz, R., Rutzing, M., & Kaser, G. (2021). Automated and permanent long-range terrestrial scanning in a high mountain environment: setup and first results. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2–2021, 153–160. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2021-153-2021>
- Voordendag, A., Goger, B., Prinz, R., Sauter, T., Mölg, T., Saigger, M., & Kaser, G. (2024). A novel framework to investigate wind-driven snow redistribution over an Alpine glacier: combination of high-resolution terrestrial laser scans and large-eddy simulations. *The Cryosphere*, 18(2), 849–868. <https://doi.org/10.5194/tc-18-849-2024>
- Welch, S. C., Kerkez, B., Bales, R. C., Glaser, S. D., Rittger, K., & Rice, R. R. (2013). Sensor placement strategies for snow water equivalent (SWE) estimation in the American River basin. *Water Resources Research*, 49(2), 891–903. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20100>
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wickström, S., Walberg, N. A. K., Lohne, P., Nordbrøden, H., & Kronholm, K. (2024). Direct snowdrift measurements in site-specific avalanche warning - a case study from Jotunheimen, Norway. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2024, Tromsø, Norway*. International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway.

Dokumentinformasjon/ <i>Document information</i>		
Dokumenttittel/<i>Document title</i> Near-range remote sensing: Muligheter og utfordringer for stedsspesifikk skredvarsling i Norge		Dokumentnr./<i>Document no.</i> 20250210-01-TN
Dokumenttype/<i>Type of document</i> Teknisk notat / Technical note	Oppdragsgiver/<i>Client</i> Statens Vegvesen og Norges vassdrags- og energidirektorat	Dato/<i>Date</i> 2025-09-15
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/<i>Proprietary rights to the document according to contract</i> Oppdragsgiver / Client		Rev.nr. & dato/<i>Rev.no. & date</i> 0 /
Distribusjon/<i>Distribution</i> ÅPEN: Skal tilgjengeliggjøres i åpent arkiv (BRAGE) / OPEN: To be published in open archives (BRAGE)		
Emneord/<i>Keywords</i> Avalanche forecasting, snøskredvarsling, LiDAR, drone, terrestrial laser scanning		

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

Dokumentkontroll/ <i>Document control</i>					
Kvalitetssikring i henhold til/ <i>Quality assurance according to NS-EN ISO9001</i>					
<i>Rev/</i> Rev.	<i>Revisjonsgrunnlag/Reason for revision</i>	<i>Egenkontroll av/ Self review by:</i>	<i>Sidemanns-kontroll av/ Colleague review by:</i>	<i>Uavhengig kontroll av/ Independent review by:</i>	<i>Tverrfaglig kontroll av/ Inter-disciplinary review by:</i>
0	Originaldokument	2025-09-03 Holt Hancock	2025-09-05 Christian Jaedicke		

Dokument godkjent for utsendelse/ <i>Document approved for release</i>	Dato/<i>Date</i> 15. september 2025	Prosjektleder/<i>Project Manager</i> Holt Hancock
---	---	---

NGI – Norges Geotekniske Institutt - er et uavhengig forskningsinstitutt innen geoteknikk og andre ingeniørrettede geofag.

Vi kombinerer geokunnskap og teknologi for å utvikle smarte og bærekraftige løsninger innen infrastruktur på land og til havs, innen miljøteknologi, forurensset grunn og naturfarer som jord- og snøskred. Forskningen vår leverer kunnskap som bidrar til å løse noen av de viktigste utfordringene verden står overfor innenfor klima, miljø, energi og samfunnssikkerhet.

Samfunnsoppgaven vår er å utvikle geofagene og fremskaffe kunnskapsgrunnlaget for å bygge, bo og ferdes på sikker grunn. Dette løser vi ved å la forskning og rådgivning gå "hånd i hånd" og være brobygger mellom akademia, næringsliv og det offentlige.

Vi har kontorer i Norge, USA og Australia og vi har internasjonalt anerkjente laboratorier.

www.ngi.no

NGI – The Norwegian Geotechnical Institute – is an independent research centre in the field of geotechnical engineering and the engineering geosciences.

We combine geotechnical knowledge and technology to develop smart and sustainable solutions in infrastructure on land and at sea, in environmental technology, contaminated soil and natural hazards such as landslides and avalanches. Our research provides knowledge that contributes to solve some of the most important challenges the world faces with regards to climate, the environment, energy and societal security.

Our societal mission is to develop the geosciences and produce the knowledge basis to build, live and travel on safe ground. We solve this by combining research and consulting hand-in-hand and being a bridge-builder between academia, industry and the public sector.

We have offices in Norway, the US and Australia, including internationally recognised laboratories.

www.ngi.no

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

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





NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthuns gate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo
Telefon: (+47) 22 95 95 95