

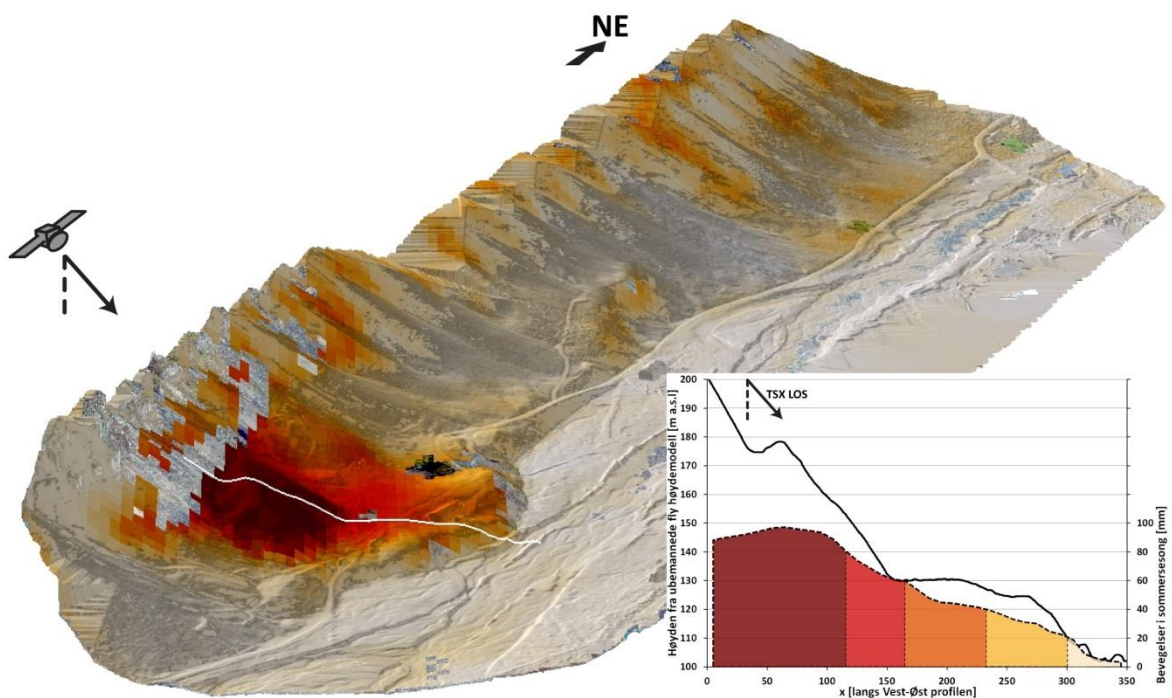
**RAPPORT**

**13/2017**

ISBN 978-82-7492-359-1

ISSN 2535-3004

# DEFORMASJONSKARTLEGGING RUNDT LONGYEARBYEN VED BRUK AV SATELLITBASERT RADARINTERFEROMETRI



**Forfattere:** Line Rouyet, Markus Eckerstorfer, Tom Rune Lauknes, Tore Riise



---

**PROSJEKTNAVN:** Kartlegging av terrengstabilitet rundt Longyearbyen    **PROSJEKTNR.:** 709

**OPPDRAGSGIVER(E):** Svalbards Miljøvernfond

---

Documentnr.: 13/2017

Dokumenttype: Rapport

Status: Åpen

ISBN:978-82-7492-359-1

ISSN: 2535-3004

Ant. Sider: 46

Prosjektleder: Tom Rune Lauknes

Dato: 05.04.2018

**FORFATTER(E):** Line Rouyet, Markus Eckerstorfer, Tom Rune Lauknes, Tore Riise

**TITTEL:** Deformasjonskartlegging rundt Longyearbyen ved bruk av satellittbasert radarinterferometri

---

### **Sammendrag:**

Områdene rundt Longyearbyen inneholder infrastruktur og mange kulturminner, spesielt knyttet til den tradisjonsrike gruveindustrien. Mange av disse kulturminnene ligger i bratte skråninger slik at kontroll og oppsyn er vanskelig. Et varmere klima vil medføre at det aktive laget blir tykkere og permafrosten varmere. Dette vil øke risikoen for setninger og skred i terrenget, noe som kan skade infrastruktur. I 2016 utførte Multiconsult på vegne av NVE en skredfarekartlegging av utvalgte områder rundt Longyearbyen. Basert på dette arbeidet ble det utarbeidet kart over ulike faresoner relatert til ulike skredtyper. I dette prosjektet har vi benyttet en moderne fjernmålingsmetode, *radar interferometri (InSAR)*, hvor bilder tatt fra en radarsatellitt kombineres slik at man kan måle endringer i terrengets overflate med stor presisjon. Denne rapporten beskriver metoder og resultater fra en analyse basert på nyere bilder fra radarsatellittene TerraSAR-X, Radarsat-2 og Sentinel-1 fra perioden 2009–2017. En feltkampanje har vært utført i september 2017 for å validere resultatene. Her ble det også benyttet ubemannede fly for å lage detaljerte overflatemodeller, samt samlet inn observasjoner fra in-situ målingsinstrumentene som tidligere er installert ved Gruve 2. Våre undersøkelser dokumenterer bevegelser av skråninger, samt infrastruktur rundt og i Longyearbyen. I et foreslått oppfølgingsprosjekt vil vi utføre mer detaljerte målinger med bakkeradar.

---

Emneord: Bakkens deformasjon, Terrengstabilitet, Kartlegging, Infrastruktur, Kulturminner, Syntetisk apertur radar (SAR), SAR interferometri (InSAR)

Noter: -

---

**UTGIVER:** Norut, Postboks 6434, 9294 Tromsø, Norway





## FORORD

Denne rapporten er sluttrapport fra prosjekt 17/59 finansiert av Svalbards Miljøvernfond. Vi er svært takknemlige for finansiering fra fondet som gjorde det mulig å gjennomføre studiet. Deler av arbeidet og satellittdata har vært finansiert av Norges Forskningsråd via prosjektene PermaSAR (NFR 212022) og FrostInSAR (NFR 263005/F50), samt European Space Agency (ESA) Prodex PermaSAT2 (C4000119115). Satellittdata fra Radarsat-2 data er stilt tilgjengelig av Norsk Romsenter/KSAT via den nasjonale Radarsatavtalen. Tilgang til TerraSAR-X er gitt av German Aerospace Center (DLR) via prosjektene GEO0565 og GEO3519. Sentinel-1 data er gjort tilgjengelig via EU sitt Copernicus program.

Tromsø, april 2018

Tom Rune Lauknes, prosjektleder



# INNHold

<b>FORORD</b> .....	<b>0</b>
<b>1 INNLEDNING</b> .....	<b>2</b>
1.1 Studieområde .....	3
1.2 Organisering av rapporten .....	3
<b>2 METODER OG DATASET</b> .....	<b>4</b>
2.1 Satellittbasert radarinterferometri (InSAR) .....	4
2.2 SAR datasett .....	7
2.3 Feltaktiviteter i september 2017 .....	10
<b>3 RESULTATER</b> .....	<b>12</b>
3.1 Oversikt over bevegelser i studieområde .....	12
3.2 Hotspots identifikasjon & tolkning av bevegelse .....	15
3.2.1 ZOOM1: Longyeardalen: .....	16
(A) Rasområde ved kirkegården .....	17
(B) Sverdrupbyen steinbre og gruvedeponi .....	18
(C) Sprekker / Jordskred i Lia .....	20
(D) Sprekker i Gruvedalen .....	21
(E) Gruvedeponi i Vannledningsdalen .....	21
(F) Gruve II: Fjellknatter og gruvedeponi .....	22
(G) Larsbreen steinbre og morene .....	23
(H, I, J) Tundra i Longyeardalen og øst av UNIS .....	23
(K) Hundegården .....	23
3.2.2 ZOOM2: Skytebanen og bjørndalen .....	25
(L) Skytebanen cirque .....	26
(M, N) Bjørndalen .....	27
3.2.3 ZOOM3: Isdammen og Endalen .....	27
(O, P) Isdammen og Soliflusjon .....	27
3.3 InSAR Tidsserier .....	29
3.4 Bruk av UAV for å lage ortofoto og høydemodell .....	30
3.4.1 Plattform og datainnsamling .....	30
3.4.2 Dataprosessering .....	31
3.5 In-situ måleinstrumenter ved Gruve II .....	33
<b>4 DISKUSJON OG KONKLUSJON</b> .....	<b>34</b>
4.1 Bevegelser i dalbunnen og påvirkning av infrastruktur .....	34
4.2 Bevegelser av skråninger og påvirkning av infrastruktur .....	35
4.3 InSAR som overvåkingsverktøy .....	35
<b>REFERANSER</b> .....	<b>38</b>
<b>VEDLEGG</b> .....	<b>40</b>



# 1 INNLEDNING

Longyeardalen er en isformet U-dal. Etter isens tilbaketrekning har mange prosesser som ras, flomskred, jordsig/solifluksjon og skred omformet dalsidene. Områdene rundt Longyearbyen inneholder mange kulturminner, spesielt knyttet til den tradisjonsrike gruveindustrien. Noen av de mest synlige teknisk industrielle kulturminnene fra bergverksdrift er taubanebukker, taubanesentralen, samt ulike daganlegg for gruvedrift. Mange av disse kulturminnene ligger i bratte skråninger slik at kontroll og oppsyn er vanskelig, spesielt med tanke på sikkerhet for personell.

Nesten all infrastruktur i Arktis er fundamentert på påler. Et varmere klima vil medføre at permafrosten blir varmere og det aktive laget tykkere. Dette vil føre til økte setninger i terrenget, noe som kan skade installasjoner, samt øke skredfare i bratt terreng. Svalbard opplever for tiden en dramatisk temperaturøkning (Førland et al., 2011) som påvirker permafrostforhold (Isaksen et al., 2007). Det vil både kunne føre til skader på infrastruktur, men også øke hyppigheten av ulike skredhendelser. Det er derfor viktig med god kjennskap til dagens forhold slik at man med rutinemessig overvåking kan følge med og foreta eventuelle forebyggende tiltak.

Det finnes i dag en rekke metoder for å måle bevegelser i terrenget. En relativt kostbar metode som gir gode resultater er å benytte permanente GNSS-stasjoner (GPS og Galileo). Andre velprøvde feltbaserte metoder er målinger ved bruk av strekkstag mellom sprekker i terreng og avstandsmålinger (laser eller totalstasjon). Felles for disse målingene er at de krever installasjon av instrumenter i felt, noe som kan medføre betydelige kostnader dersom store arealer skal dekkes. En annen begrensende faktor er at metodene kun gir punktmålinger, noe som ikke nødvendigvis representerer alle terrengetyper.

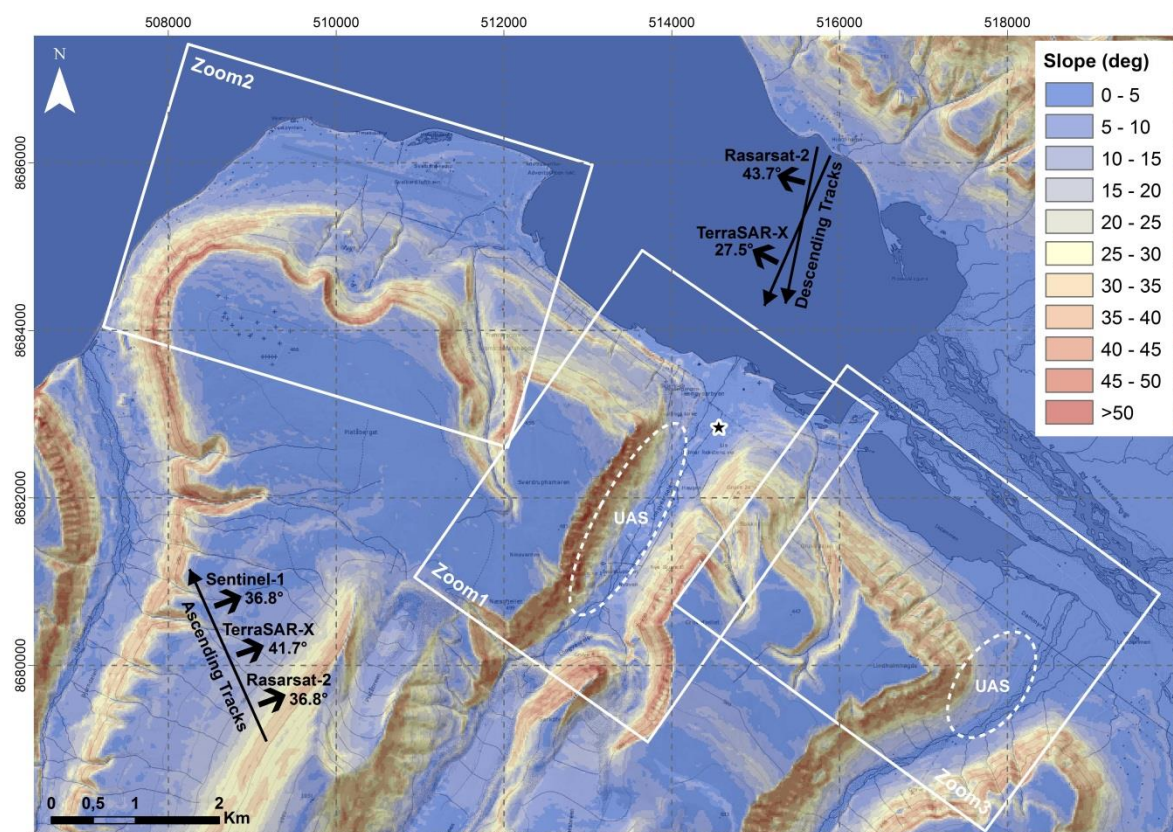
Fjernanalyse av flybilder og satellittdata er kostnadseffektivt da store arealer kan dekkes. Høyoppløselige optiske flybilder kan manuelt inspiseres for å se etter sprekkesystemer, mens satellittbasert radarinterferometri (InSAR) kan gi svært presis informasjon om både romlig og tidsmessig bevegelseshastighet av ulike landformer og infrastruktur (Massonnet & Feil, 1998). I fastlands Norge har InSAR vært bruk i mer enn 10 år for å kartlegge fjellskred (Lauknes, 2010; NGU, 2011; NRS, 2014; NGU, 2016; Norut, 2015).

I dette prosjektet ønsket vi å teste ut InSAR-metodikken for å studere terrengstabilitet rundt Longyearbyen. Vårt arbeid er en naturlig videreføring av tidligere prosjekt hvor tradisjonelle metoder slik som feltarbeid, kjennskap til historiske hendelser, analyse av optiske satellitt- og flybilder, samt utløpsmodellering er brukt for å definere faresoner basert på ulike skredtyper rundt Longyearbyen (rapporter NVE, 2016 og Multiconsult, 2017).

## 1.1 STUDIEOMRÅDE

Denne studien fokuserer på området rundt Longyearbyen der infrastruktur og kulturminner kan være direkte påvirket av bakkens deformasjon.

Figur 1 viser utstrekningen av området som ble valgt ut for InSAR analysen. Hovedfokus er Longyeardalen men områdene vi har studert dekker fra Bjørndalen i vest til Endalen mote øst. Vi har delt området inn i 3 delområder (hvite rektangler) som presenteres i Kapittel 3. Sikteretning og satellittbaner for de ulike radargeometriene er illustrert med svarte vektorer. Informasjon om satellittgeometri og hvordan det påvirker InSAR målinger diskuteres i Kapittel 2. Områdene som har vært kartlagt ved bruk av ubemannede fly vises også som stiplede sirkler med akronym UAS for ‘Unmanned Aircraft Systems’.



**Figur 1:** Oversiktskart med skråningsvinkel i bakgrunn (rektangler: zoom brukt i Kapittel 3; sirkler: ubemannede fly kartlegging; pilene: orientering av satellittsporene og sikteretning av sensorene).

## 1.2 ORGANISERING AV RAPPORTEN

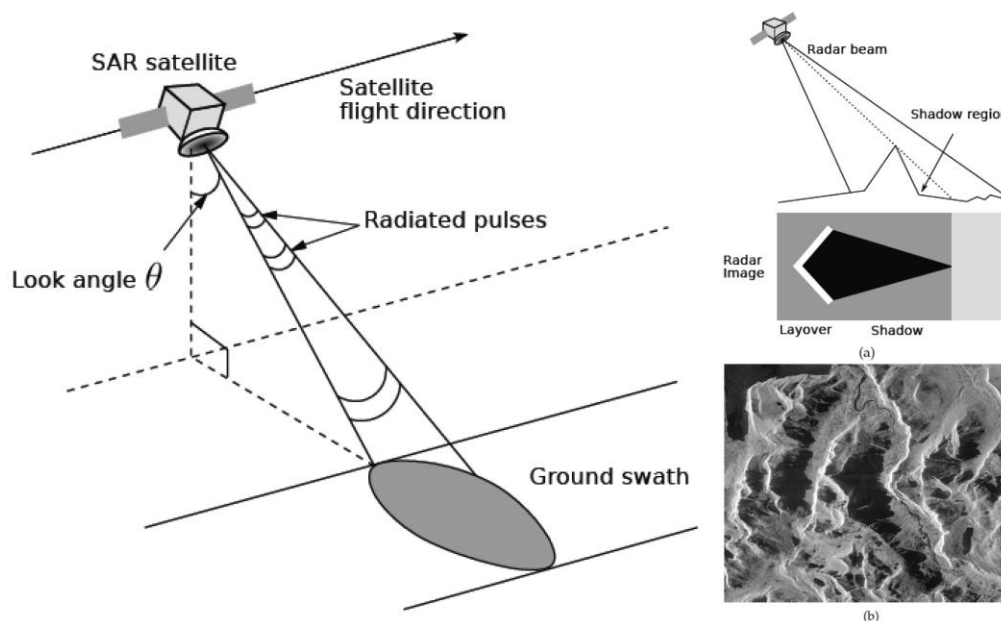
Kapittel 2 inneholder metodebeskrivelse av satellitt InSAR og UAV-basert fotogrammetri, oversikt over tilgjengelige datasett, samt beskrivelse av feltaktiviteter. I kapittel 3 presenterer vi resultater fra de ulike analyser. I kapittel 4 diskuterer vi resultatene og kommer med noen anbefalinger.

## 2 METODER OG DATASETT

### 2.1 SATELLITTBASERT RADARINTERFEROMETRI (INSAR)

Ved radarbasert fjermmåling benyttes en aktiv sensor som genererer elektromagnetiske bølger. Når disse bølgene reflekteres fra terrenget så registreres dette ombord i satellitten. Siden vi kjenner posisjonen til satellitten så kan vi utnytte ekkoet fra bakken til å si noe om avstand (fase til signalet) og egenskaper ved terrenget (energien av returnert signal). Radarsatellitter tar bilder over jorden for å skaffe informasjon over et stort område ved bruk av bølgelengder på cm-nivå. I forhold til optiske instrumenter har radarsensorene den fordel at de kan se gjennom skyer. Radarsatellitter er spesielt godt egnet for overvåking av arktiske områder da de også kan benyttes i den delen av året med mørketid.

**Syntetisk Aperture Radar (SAR)** er en radarteknologi som gjør oss i stand til å lage bilder med god romlig oppløsning. Geometrien i en typisk SAR-avbildning er illustrert i *Figur 2 (til venstre)*. Når satellitten beveger seg langs sin satellittbane så 'belyser' den et område ('swath') på jordens overflate ved å sende en rekke av elektromagnetiske mikrobølgepulser. Vinkelen mellom radarstrålen og vertikal kalles 'look angle', mens vinkelen mellom radarstrålen og overflatenormalen (litt større på grunn av jordens krumning) kalles 'incidence angle' eller 'innfallsvinkel'. På grunn av radaren sin skrå belysningsvinkel vil det være en forskjell mellom den avstand som radar måler og virkelig avstand på bakken ('foreshortening'). I områder med kompleks topografi og høye fjell kan signalet være vanskelig å analysere på grunn av denne effekten. I ekstreme tilfeller får man noe som kalles 'layover' som påvirker bratte skråninger orientert mot radaren og man kan også ha radarskygge på baksiden av fjell, se *Figur 2, til høyre*.

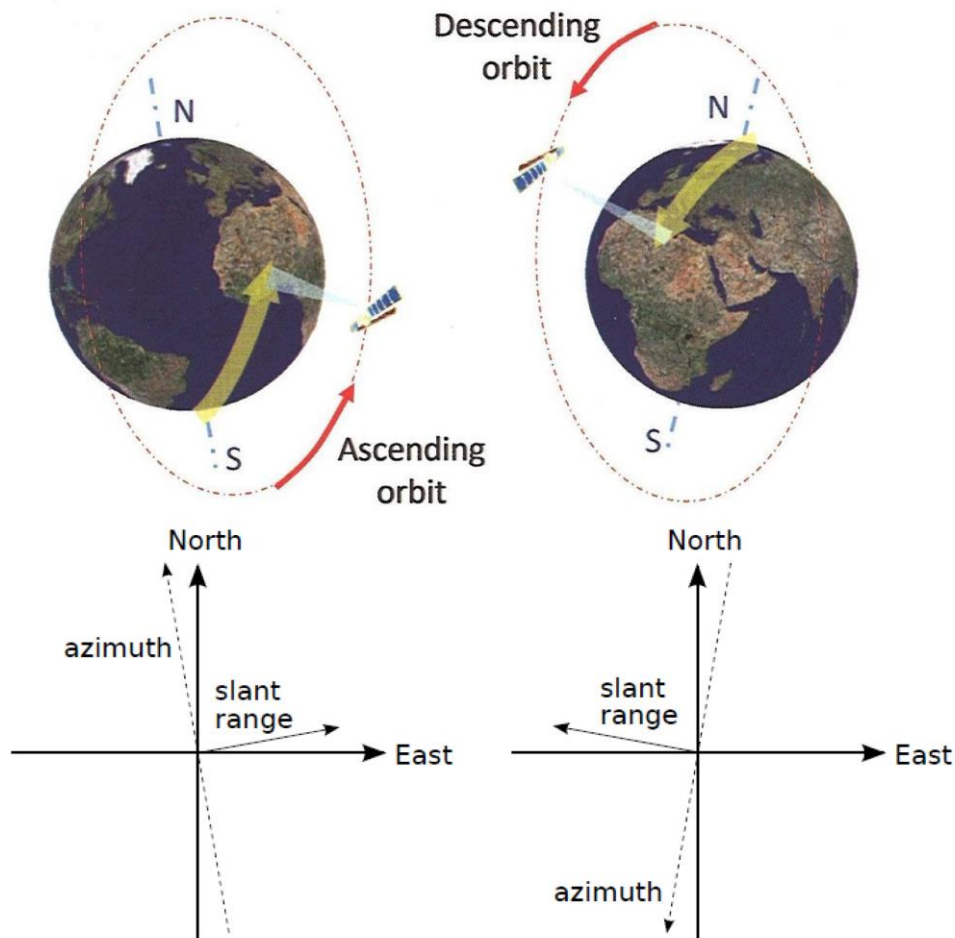


**Figur 2:** Til venstre: forenklet geometri av et Syntetisk Aperture Radar (SAR) system. Til høyre: a) eksempel av geometriske skjevheter og b) hvordan det ser ut på et SAR bilde (hvite områder: layover, svarte områder: skygge). Fra Lauknes et al., 2010.

Det eksisterer mange satellitter som benytter SAR teknologien. Bildene vi bruker i dette prosjektet er fra tre forskjellige sensorer: TerraSAR-X (TSX) en tysk satellitt, Radarsat-2 (RS2) en kanadisk satellitt, Sentinel-1 (S1) en europeisk (ESA – Copernicus program) satellitt.

SAR satellitter flyr i en polar bane over jordens overflate. Jordens rotasjon og satellittbevegelsen fører til en oppadgående (‘ascending’) og nedadgående (‘descending’) geometri. I en ascending bane krysser satellitten ekvatoren fra sør mot nord og siden radaren ser på skrå mot høyre så peker ‘sikterretningen’ eller ‘line-of-sight (LOS)’ østover. Med en descending bane går fra nord mot sør og LOS peker vestover (Figur 3). I praktisk bruk betyr det at forskjellige geometriske effekter påvirker de to geometriene og at de to datasettene er ofte veldig komplementære, da man behøver begge geometriene for å dekke mest mulig av terrenget.

**SAR Interferometri (InSAR)** er en teknikk som analyserer faseskift i det mottatte signalet mellom to SAR bilder. Forskjellen mellom to SAR bilder kalles for et *interferogram*. Om man kombinerer bilder tatt på forskjellige tidspunkt kan man med svært høy nøyaktighet si noe om hvordan terrenget har beveget seg i radaren sin sikteretning (Figur 4).

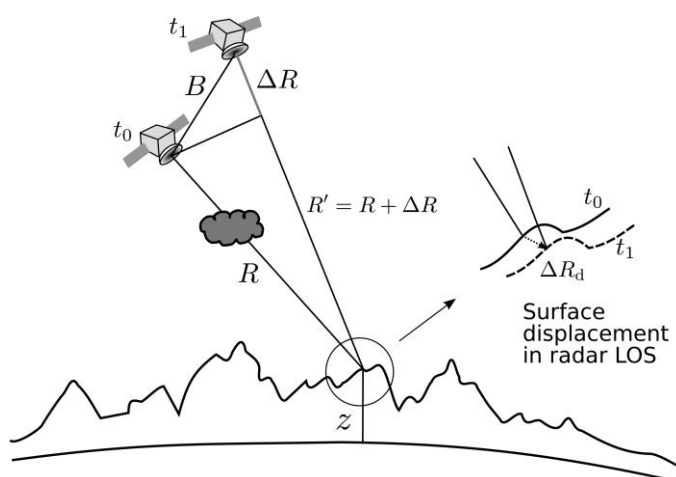


**Figur 3:** Oppadgående (‘ascending’) og nedadgående (‘descending’) satellittbaner og avbildingsgeometrier. Endret fra Ferretti, 2014 og Lauknes, 2010.



Når man skal analysere InSAR resultater er det er del effekter man må være klar over:

- Bevegelsesmålinger er ikke tredimensjonale, det er en måling av avstandsforskjell langs sikteretning, såkalt 'line-of-sight' (LOS) som avhenger av 'innfallsvinkel' (Figur 2) og banegeometri/målingsretning (Figur 3). Det betyr at InSAR har kun sensitivitet for bevegelser som har en komponent i LOS-retning (Figur 4). En brattere innfallsvinkel fører til større sensitivitet for vertikale bevegelser. Videre så er en sensor som peker mot vest (descending geometri) bedre egnet for å se på vestvendte skråninger og ascending geometri er best egnet til å se på østvendte skråninger. På grunn av satellittenes polare baner så er sensitivitet til horisontal bevegelse i nord-sør retning lav.
- InSAR signalet er sammensatt av mange ulike kilder. For å kunne utnytte dette til å si noe om bevegelse av terrenget må man fjerne uønskede komponenter. Eksempler på dette kan være atmosfæriske effekter som kan påvirke resultater på grunn av signalforsinkelse (se Figur 4) eller andre støykilder. Dersom signalet er for ulikt mellom de to bildene som sammenliknes, for eksempel på grunn av endringer av bakkens egenskaper (vegetasjon, fuktighet, erosjon, snø, osv.) vil man få støy og dermed ikke kunne si noe om bevegelse. Vi benytter kun bilder tatt i antatt snøfri sesong.
- Satellittbilder fra forskjellige satellitter, geometrier eller moder har ikke samme egenskaper slik som radarfrekvens, geometri, oppløsning, repetisjonstid mellom to påfølgende bilder, osv. Dette gjør at ulike resultater ikke nødvendigvis kan sammenliknes direkte. Tabell 1 presenterer en oversikt over de ulike sensorer benyttet i studien.
- InSAR er en relativ målingsteknikk. Det betyr at alle målinger er relatert til et punkt med antatt kjent bevegelse (stabilt). For dette studiet har vi valgt samme referansepunkt for alle datasett slik at de relativt sett kan sammenliknes.



**Figur 4:** Deteksjon av bakkens bevegelser ved InSAR. Et område på bakken er avbildet på to forskjellige tidspunkter  $t_0$  og  $t_1$ . Bakkens deformasjon inntreffer mellom de to bildene. Interferometrisk faseskift er målt og kan relateres til forskjellen av avstanden  $\Delta R_d$  i sikteretning (LOS). Skyen ved  $t_0$  illustrerer at atmosfæriske effekter kan påvirke resultater på grunn av signalforsinkelse. Fra Lauknes et al., 2010.

**Tabell 1:** Egenskaper av SAR satellitter og virkninger på målinger.

SAR egenskaper	Relatert til	Virkninger
Sensor bølgelengde	Radarfrekvens i bruk	Lengre bølgelengder er mer tolerant for endringer av terrenget (mindre støy). Kortere bølgelengder har høyere presisjon.
Romlig oppløsning	Sensorparametre	Med god oppløsning kan man studere endringer på liten romlig skala. Lavere oppløsning gir mulighet til større dekning.
Romlig dekning	Sensorparametre	Størrelse av område som kan studeres.
Sikteretning (line-of-sight, LOS)	Satellittbane, innfallsvinkel	Sensitivitet til å måle ekte bevegelse. Geometriske effekter som begrenser områder hvor teknikken kan benyttes.
Temporal oppløsning	Repetisjonstid av satellitten	Antall målepunkter i tid innenfor en sommersesong. Generelt ønskes en kort repetisjonstid. Dette gir mere data og mulighet til å detektere raskere bevegelse. Lang repetisjonstid gir mere støy.

## 2.2 SAR DATASETT

Hovedkarakteristikkene av satellittdatasettene er beskrevet i *Tabell 2*. Prosessering av data har blitt utført ved bruk av GSAR (Norut utviklet programvare, Larsen et al., 2005).

Resultater presentert i Kapittel 3 (avsnitter 3.1 og 3.2) har blitt framskaffet ved å bruke en flerårig InSAR *stacking* metodikk (Sandwell & Price, 1998; Emardson et al., 2003). Metoden er basert på å beregne et vektet gjennomsnitt av utvalgte interferogrammer (kombinasjoner mellom bilder) i flere sommersesonger. Stacking-teknikken gir ingen informasjon om temporale variasjoner (tidsserier), men er en effektiv og velkjent metodikk for å få en oversikt av gjennomsnittlig deformasjon av bakken målt over flere år. Alle resultatene som presenteres er vist i total bevegelse (mm) langs radarens sikteretning 'line-of-sight' (LOS) i løpet av en gjennomsnittlig sommersesong (fra slutten av mai til slutten av september: 4 måneder/123 dager).

I tillegg har SBAS metodikk (Small BAseline Subset, Berardino et al., 2002) vært brukt for å framskaffe tidsserier, dvs. informasjon om temporale variasjoner av bevegelser. Siden vinterbilder ikke kan brukes på grunn av snø kan vi ikke kombinere data fra ulike år. Vi har derfor benyttet en Sentinel-1 tidsserie fra mai til november 2016. Eksempler av tidsserier finnes i Kapittel 3, avsnitt 3.3.

Romlig dekning av InSAR resultater vises på *Figur 5* (TerraSAR-X), *Figur 6* (Radarsat-2) og *Figur 7* (Sentinel-1). I rødt vises datadekningen fra oppadgående (ascending) satellittspor, i gult vises nedadgående (descending) dekning og i blått vises overlappende områder avbildet fra begge sporene (ascending+descending). Det er flere grunner for at noen deler av studieområdet ikke er dekket av en eller begge geometrier:

- Som forklart i avsnitt 2.1 er SAR bilder påvirket av geometriske effekter. På grunn av kompleks topografi er skråninger orientert mot radaren påvirket av "layover" (f.eks. nordvestre delen av Longyeardalen for descending TerraSAR-X og Radarsat-2 geometrier, se på *Figur 5* og *Figur 6*) og en del bratte områder orientert bort fra radar er i skygge. Det er tydelig at effektene er ulike for hver sensor på grunn av forskjellig LOS orientering og innfallsvinkel (se *Tabell 2*).
- Dekorrelasjon (støy i målinger) oppstår på grunn av endringer av egenskaper på overflaten (våt bakken, snø, for raske bevegelser, osv.). Et trinn i InSAR prosessering utvelger piksler som blir brukt for videre deformasjonsanalyse og masker ut de som har signalstabilitet under en utvalgt terskel (for eksempel på breer, på toppen av platåer eller rundt elva i Adventdalen, se på *Figur 5*, *Figur 6* og *Figur 7*).
- De forskjellige satellittene og modusene gir forskjellige utstrekninger av bilder. I dette prosjektet, dekker TerraSAR-X og Sentinel-1 bilder hele studieområdet, men en del området mot vest er ikke dekket av Radarsat-2 (se på *Figur 6*).
- På grunn av begrenset kapasitet for data lagring/nedlasting, er bilder ikke nødvendigvis tilgjengelige i alle områder. Sentinel-1 i Interferometric Wide Swath (IWS) Mode er for eksempel ikke tilgjengelig i descending geometri<sup>1</sup> (se på *Figur 7*).

**Tabell 2:** Hovedkarakteristikkene av satellittdata.

Datasett	Frekvens band (bølgelengde $\lambda$ )	Repetisjonstid [dager]	Multilooking faktor <sup>a</sup> / slutt oppløsning [m]	Tidsperiode (første-siste bilde)	Antall tilgjengelige SAR bilder	LOS orientering / innfallsvinkel <sup>b</sup> [°]
TSX StripMap ascending	X ( $\lambda$ : 3.1 cm)	11 (22)	5x5 / 10x10m	17.06.2009 -13.07.2017	83	70.9 / 41.7
TSX StripMap descending				22.06.2009 -18.07.2017	78	297.3 / 27.5
RS2 Ultrafine ascending	C ( $\lambda$ : 5.55 cm)	24 (48)	5x5 / 10x10m	14.05.2009 -22.09.2016	39	69.3 / 36.8
RS2 Ultrafine descending				15.05.2009 -08.07.2017	28	284.8 / 43.7
S1 IWS ascending	C ( $\lambda$ : 5.55 cm)	12 <sup>c</sup> (24)	8x2 / 40x40m	02.08.2015 -17.05.2017	74 (15) <sup>d</sup>	69.3 / 36.8

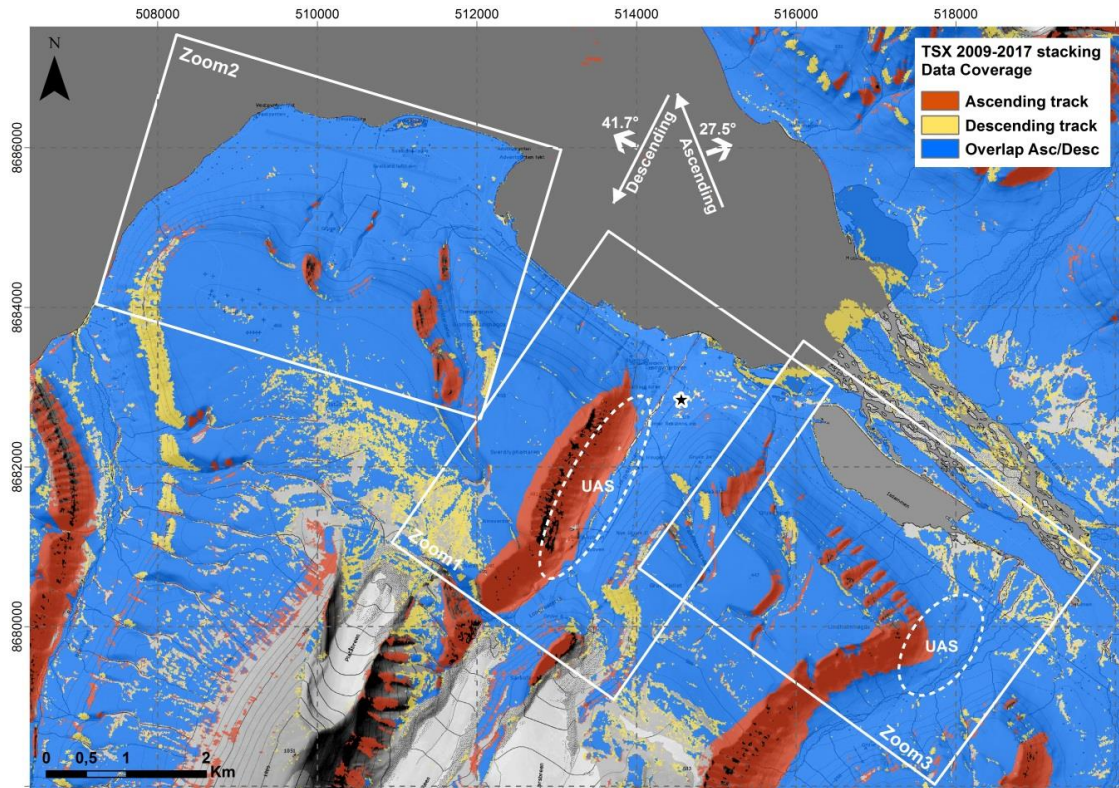
<sup>a</sup> Multilooking reduserer romlig oppløsning av resultater men øker signalstabilitet på analyserte piksler.

<sup>b</sup> LOS (line-of-sight) orientering er vinkel i Nord (0°), Øst (90°), Sør (180°), Vest (270°) referansen og vises på *Figur 5* – *Figur 7* med den fete hvite pilen. Innfallsvinkel er vinkel mellom LOS og vinkelrett av bakken (jordellipsoiden) og vises med tallen over pilen.

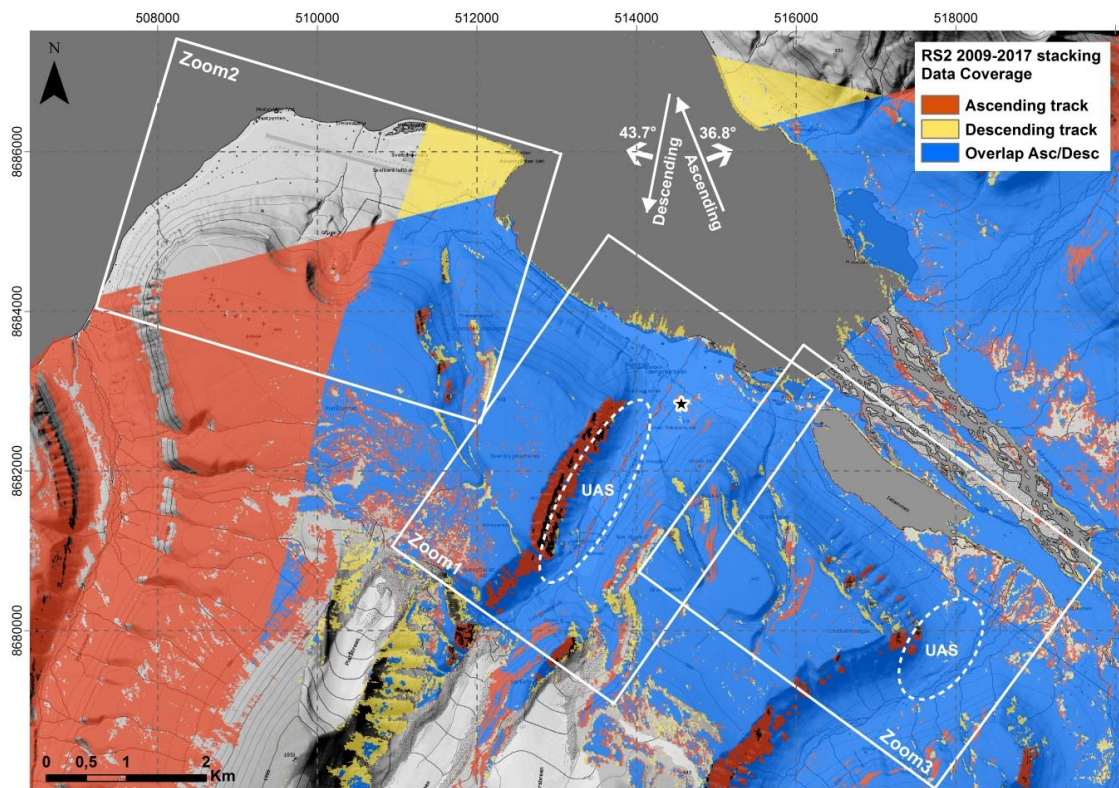
<sup>c</sup> Repetisjonstid av Sentinel-1 gikk ned til 6 dager fra 09.2016 fordi bilder fra den andre satellitten (Sentinel-1b) ble tilgjengelige.

<sup>d</sup> 74 SAR bilder fra 02.08.2015 til 17.05.2017 med vinter perioden. 15 mellom mai og oktober.

<sup>1</sup> Fra og med våren 2018 vil store deler av Spitsbergen også dekkes av descending mode Sentinel-1 IWS data.

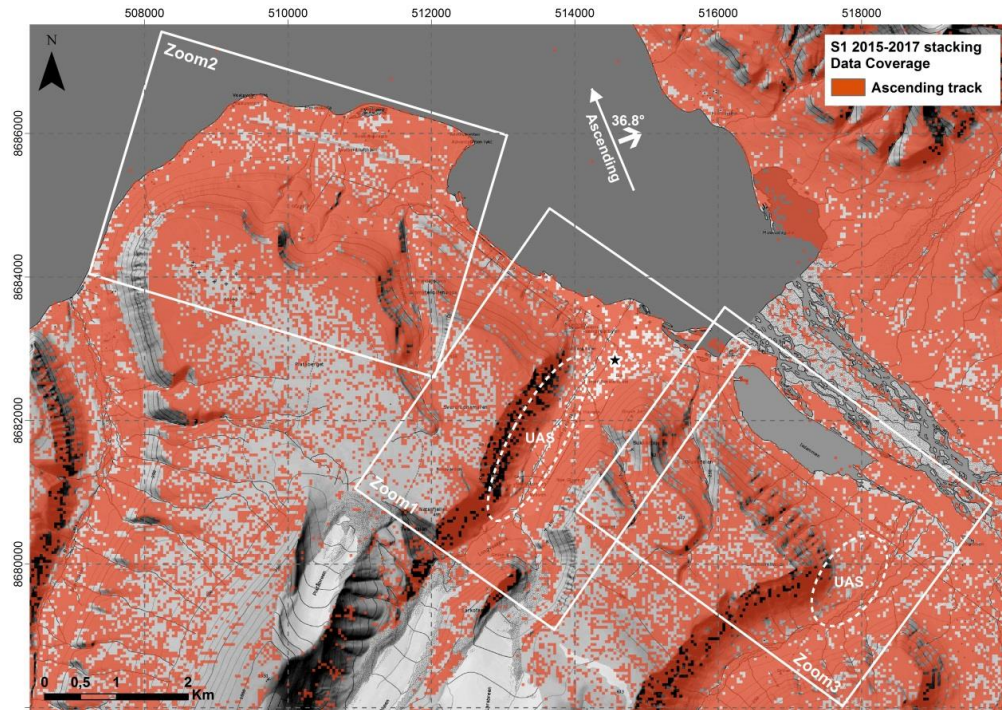


**Figur 5:** Dekning av TerraSAR-X InSAR resultater (rødt: ascending, gult: descending, blått: overlapp avbildet av begge geometriene). Merk orientering av satellittsporene og radar sikteretning og innfallsvinkel (hvite piler).



**Figur 6:** Dekning av Radarsat-2 InSAR resultater. (rødt: ascending, gult: descending, blått: overlapp avbildet av begge geometriene). Merk orientering av satellittsporene og radar sikteretning (hvite pilene).





**Figur 7:** Dekning av Sentinel-1 InSAR resultater (rødt: ascending). Descending Sentinel-1 geometrien var ikke tilgjengelig på Svalbard. Merk orientering av satellittsporet og radar sikteretning (hvite pilene).

### 2.3 FELTAKTIVITETER I SEPTEMBER 2017

Prosjektet inkluderte en feltkampanje mellom 3.–6. september 2017 som tok på sikte å:

- Undersøke på felt noen utvalgte plasser i studieområdet for å sjekke satellittresultater og dokumentere områder med tegn til deformasjon av bakken (*Figur 8a*);
- Laste ned data og opprettholde in-situ målingsinstrumenter installert ved Gruve II. Temperatursensorer som måler luft, snø og istemperatur på forskjellige dybder ble installert i utvalgte sprekker i løpet av sommer 2012. I tillegg er det installert akselerometer som måler rystelser for å detektere hoved deformasjonsperioder (*Figur 8b*);
- Ta opp bilder på utvalgte områder med ubemannede fly (*Figur 8c*) for å lage høyoppløselige ortofoto og detaljerte høydemodeller.



**Figur 8:** a) Feltundersøkelse rundt Longyearbyen, september 2017. b) Akselerometer som måler rystelser i en sprekke over Gruve II. c) Ubemannede fly kampanje.

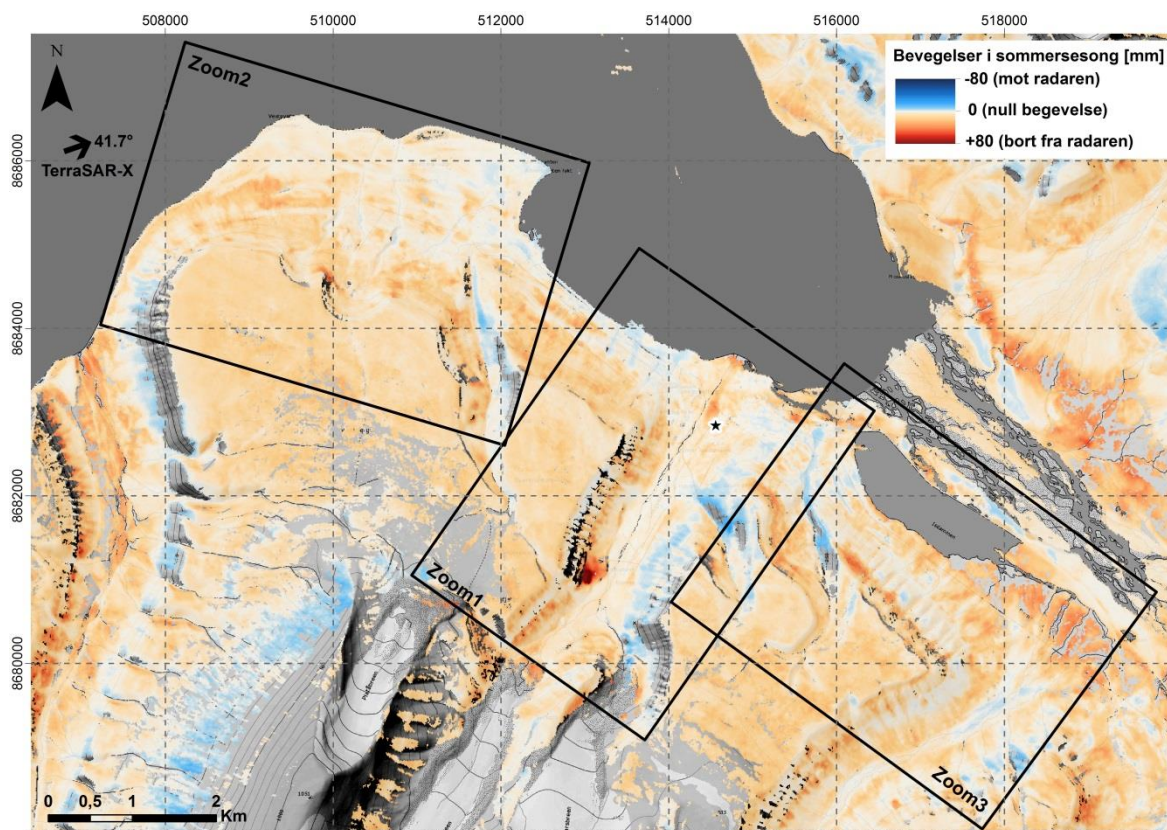


## 3 RESULTATER

### 3.1 OVERSIKT OVER BEVEGELSER I STUDIEOMRÅDE

Som forklart i avsnitt 2.2 er InSAR *stacking* kart en god måte for å visualisere romlige variasjoner av bakkens deformasjon. Resultater som presenteres heretter viser bevegelser i løpet av en gjennomsnittlig sommersesong (4 måneder).

Siden det er 5 forskjellige datasett som ble prosessert uavhengig av hverandre, er det mange resultater som kan presenteres. *Figur 9* illustrerer hvordan vi presenterer deformasjonsmålinger beregnet fra et typisk InSAR datasett. Dette eksempelet viser resultater basert på et TerraSAR-X datasett i ascending geometri (se datakarakteristikkene i *Tabell 2*). Resultater fra de andre datasettene er tilgjengelige i vedlegg (*Figur –Figur 46*). Referansepunktet er felles for alle datasett og vises med den svarte stjernen (på Kulturhuset i sentrum).



**Figur 9:** InSAR kart over studieområdet. Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i ascending geometri. Positive verdier (i rødt) viser områder der avstanden mellom bakken og satellitten øker (bort fra radaren), negative verdier (i blått) viser områder der avstanden mellom bakken og satellitten reduseres (mot radaren). Områder i hvitt viser liten eller null bevegelse. Svart stjerne: referansepunkt for InSAR analyse..

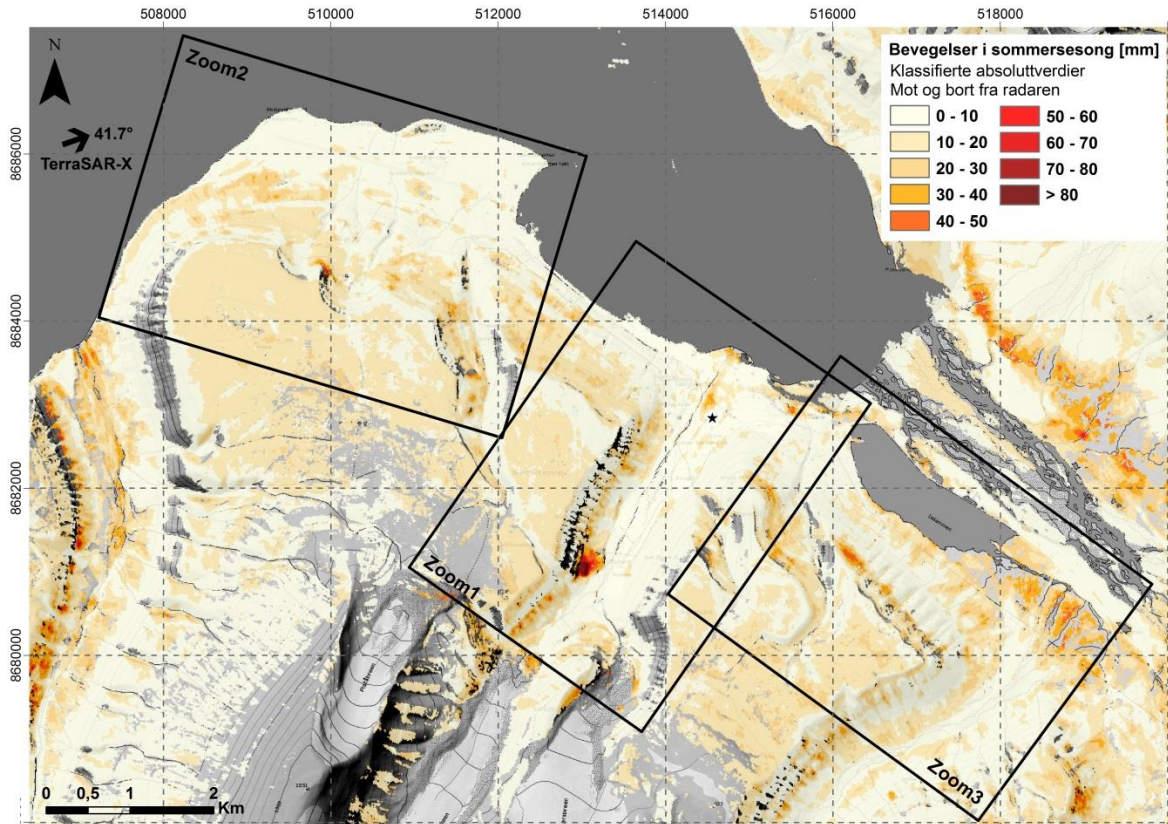
Fargeskala fremhever områder der avstanden mellom bakken og satellitten øker (fra oransje til mørkt rødt) eller reduseres (fra lys til mørkt blått) langs sikteretning (line-of-sight, LOS). Orientering av LOS vises med pilen i øvre venstre hjørnet av bildet. I praksis betyr det at områder som beveger nedover eller horisontalt mot øst (bort fra radaren) vises i oransjerødt, området som beveger oppover eller mot vest (mot radaren) vises i blått. Dersom en skråning er i bevegelse så vil den kunne ha både vertikale setninger og horisontal bevegelse. Avhengig av satellittens LOS vil dette kunne gi bevegelse både fra radar (rødt) eller mot radar (blått).

Det er tydelig fra *Figur 9* at store deler av landskapet er i bevegelse. Det gjelder særlig områder med helning (*Figur 1*) og områder som er veldig våte om sommeren. At landskapet er veldig aktivt er ingen overraskelse siden hele landskapet er dekket av permafrost (Humlum et al., 2003). Landskapsprosesser på ulike romlige skalaer i periglasielle omgivelser er hovedsakelig relatert til frysing og tining av bakken (French, 2007). Det inkluderer vekst/smelting av segregert is og tilhørende frosthevning og innsynkning. I skråninger fører dette til jordsig, samt utvikling av termisk sammentrekning av stein som fører til steinsprang og transport av stein med snøskred. I tillegg er lier i periglasielle landskaper utsatt for jordskredaktivitet som følge av vanntilføring fra snøsmelting og regn som ikke kan penetrere bakken på grunn av permafrosten.

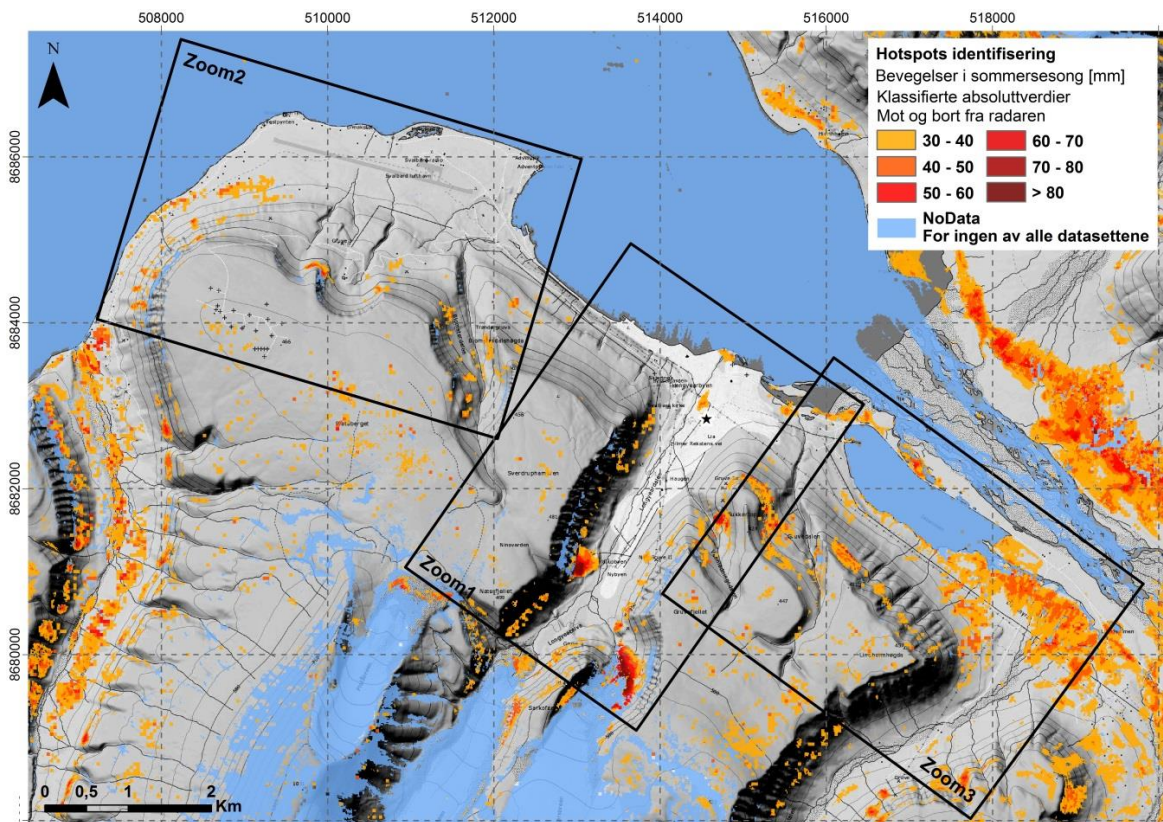
Visualisering i *Figur 9* som bruker 'rå resultater' fra InSAR prosessering er ikke alltid lett å tolke, og inkluderer informasjon som ikke er nødvendigvis nyttig for en tolkning av geofarar i regional skala. En måte å forenkle det er å visualisere resultater i absolutte verdier, og fokuserer på amplituden av bevegelser, uten detalj om retningen. Et eksempel av kart med klassifiserte absoluttverdier (fortsett fra TerraSAR-X i ascending geometri) vises i *Figur 10*.

Fra denne klassifiseringen er det mulig å maskere ut områder med lite eller ingen bevegelse for å fokusere på områder med tydelig tegn til bevegelse. Vi har derfor valgt områder med bevegelse større enn 30 mm i løpet av en sommersesong (*Figur 11*). Det kan kalles 'Hotspots identifisering'. For videre analyser i avsnitt 3.2 bruker vi resultater fra hotspots identifisering fra alle datasettene, og overlapper de 5 resultatene på samme kart. Fordelen er at det utnytter komplementaritet av flere datasett. Områder som ikke er kartlagt av en sensor på grunn av dårlig geometri eller områder hvor radar sikteretning gir dårlig sensitivitet (se forklaringer i avsnitt 2.2) kan komplementeres fra et annet datasett. Likevel kan en del informasjon forsvinne i prosessen og det er derfor nødvendig å også vurdere 'rå resultater' (*Figur –Figur 46*, i vedlegg).





**Figur 10:** Klassifisert InSAR kart over studieområdet. Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i ascending geometri. Deformasjon vises i absolutte verdier (skiller ikke bevegelser mot og bort fra radaren).



**Figur 11:** Hotspots identifisering ved å overlappere resultater fra alle sensorene og å maskere ut områder med bevegelser <30 mm. I blått: NoData (ingen informasjon for ingen av alle datasettene).

## 3.2 HOTSPOTS IDENTIFIKASJON & TOLKNING AV BEVEGELSE

Landskapet rundt Longyearbyen kan grovt deles inn i flate områder i dalbunnen og ved kysten, skråninger og plataområder. Isbreer har vi utelukket fra analysen.

Flate områder i Longyeardalen, Adventdalen, Endalen og ved flyplassen viser lite til ingen deformasjon (*Figur 9* og *Figur 10*). Det er noen områder langs bekkeløpene i Longyeardalen og Endalen som viser bevegelser opp til 50 mm i året (*Figur 11*) som er mest sannsynlig knyttet til frosthevning og innsynking av bakken. Disse områder er sammenlignbart våte og består av finkornede, fluviale- og marine sedimenter som holder mye overfladisk is. Dette fører til stor vertikal bevegelse av bakken. I tillegg finnes det mange iskiler i disse områder, særlig i Adventdalen (Christiansen, 2005). Eksempel i Longyeardalen er markert i *Figur 12*, Zoom 1, H, som er et åpent felt mellom veg 300 og Adventelva hvor det nye studentboligkomplekset er planlagt. Et annet eksempel er området J i *Figur 12*, Zoom 1, som er et veldig vått område ved siden av veg 400 til Adventdalen.

På skråninger kan områder med mest deformasjon (over 80 mm i sommersesong) forklares med skråningsprosesser (*Figur 11*). Særlig i Bjørndalen er det synlig at de utstikkende 'steinnesene' som består av hard sedimentær berggrunn (Firkanten formasjon) er ustabile og sammen med de vertikale klippene ovenfor er formidable kildeområder til steinsprang. Bevegelser er også synlige i renner mellom disse 'steinnesene' som er erosjonelle landformer og i skredviftene nedenfor, som akkumulerer stein og jord fra steinsprang, snøskred og jordskred. De fleste viftene rundt Longyearbyen er snøskredvifter som er svært aktive men vises uten bevegelse i InSAR kartet. Akkumulasjon av skråningsmaterial ved hjelp av snøskred er en prosess som foregår sakte med årlig maksimum akkumulasjon av rundt 14 mm på østsiden av Larsbreen (Eckerstorfer et al., 2013).

Steinbreer er også en del av skråningssystemet, og består av blokker og finkornet sediment i en ismatrise. Isen gjør at steinbreer siger nedover på grunn av isdeformasjon og overflateprosesser eroderer de bratte flankene. Siden steinbreer ofte dannes av rasmateriale, er de svært vanlige i området rundt Longyearbyen. I Longyeardalen finnes det minst tre kjente steinbreer: Huset steinbreen, Sverdrupbyen steinbreen (*Figur 12*, Zoom 1, B), og steinbreen ved Larsbreen (*Figur 12*, Zoom 1, G). Steinbreen ved Huset er instrumentert med borehull, temperatursensorer og deformasjonsmåleutstyr og dermed vet vi at steinbreen er aktiv. Steinbreen ved Sverdrupbyen er landformen hvor Veg 300 er bygget opp på og husene står. Sammen med steinbreen ved Larsbreen, er steinbreen i Sverdrupbyen den landformen med størst bevegelseshastighet i Longyeardalen, med hastigheter over 80 mm i året (*Figur 12*). Fra de store romlige utstrekningene av bevegelsen er det tydelig at begge steinbreer er aktive, dvs at isdeformasjon foregår. Samtidig ser vi på steinbreen ved Larsbreen og på morenen til Larsbreen at erosjon foregår i en stor grad. Derfor er det vanskelig å nøyaktig skille mellom deformasjon av hele landformen eller overflateprosesser.

Det finnes en del gruvedeponi i studieområdet som ligner på steinbreer. Disse antropogene fyllmassene som vi ser for eksempel i Vannledningsdalen (*Figur 12*, Zoom 1, E), ved Gruve II (*Figur 12*, Zoom 1, F) og over Sverdrupbyen (*Figur 12*, Zoom 1, B) er også permafrost landformer og består av ukonsoliderte sedimenter som er utsatt for deformasjon. I tillegg foregår det erosjon på de bratte flankene.

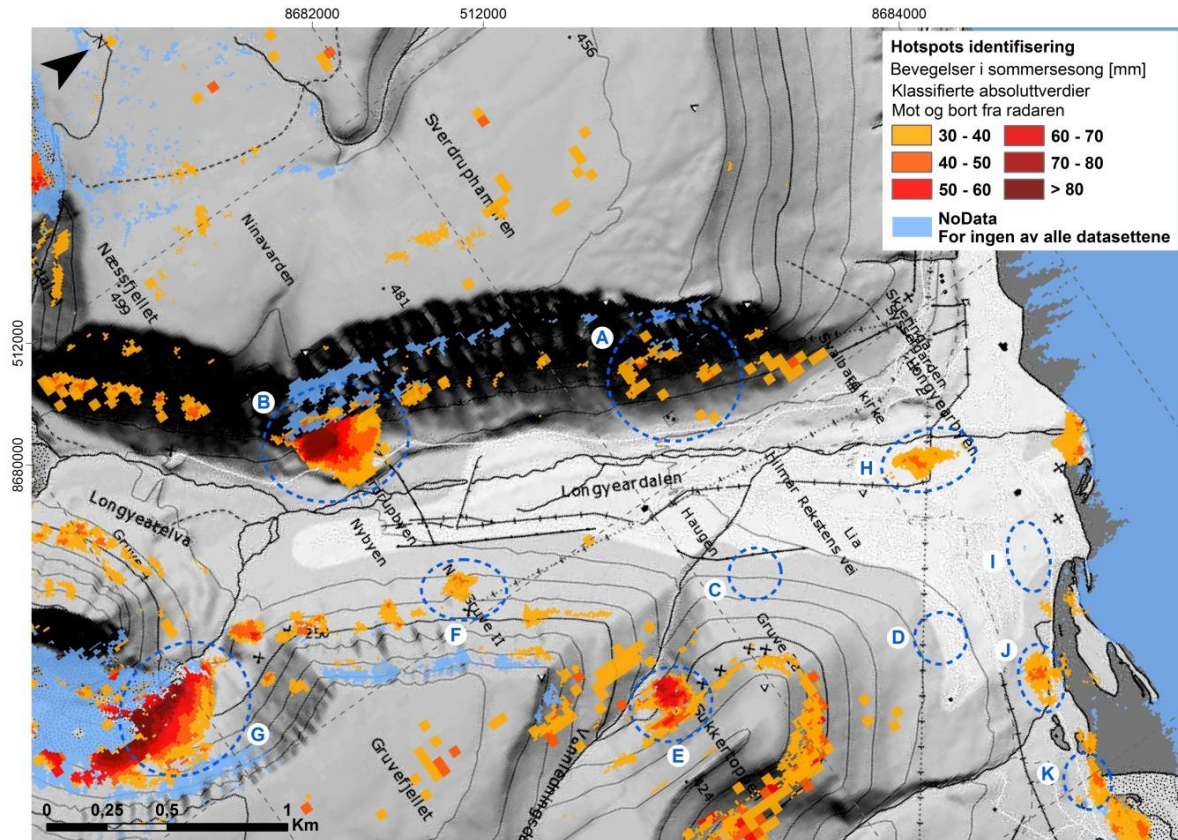
Plataåmråder rundt Longyearbyen er omfattende og en konsekvens av geologien. Disse flate områdene er dekket av blokkmark som er skarpkantete blokker som dannes ved frostsprengning (French, 2007). Det foregår derfor sesongmessig frosthevning og innsynkning, tilsvarende sortering av blokker og en langsiktig netto innsynkning av overflaten. InSAR fanger opp bevegelser opp til 30 mm i sommersesong i store homogene områder (*Figur 10* og *Figur 11*). Forskjeller i bevegelser med høy deformasjon i noen områder (*Figur 11*) skyldes vanntilføring fra differensiell snøfordistribusjon på plataene.

### **3.2.1 ZOOM1: LONGYEARDALEN:**

Longyeardalen er en isformet U-dal, med bratte skråninger som overgår til en flat dalbunn. På grunn av begrenset plass er store deler av infrastrukturen bygget nært bratte, aktive fjellsider eller i det dynamiske kystområdet. Det medfører utfordringer til konstruksjon av bygninger med tanken til stabilitet (permafrostdynamikk) og sikkerhet (skråningsprosesser).

Som synlig i *Figur 9* og *Figur 10* er overflaten i hele Longyeardalen i bevegelse som funksjon av bakken som fryser og tiner. Likevel identifiserer vi med vår 'hotspots' metode noen områder som er mer aktive og har raskere bevegelser (*Figur 12*). Vi har markert disse områdene (A-K). Noen av disse områder viser bevegelser under 30 mm i sommersesong på InSAR kart. Vi har likevel inkludert dem i tolkningen fordi de viste tegn av aktivitet observert i felt.

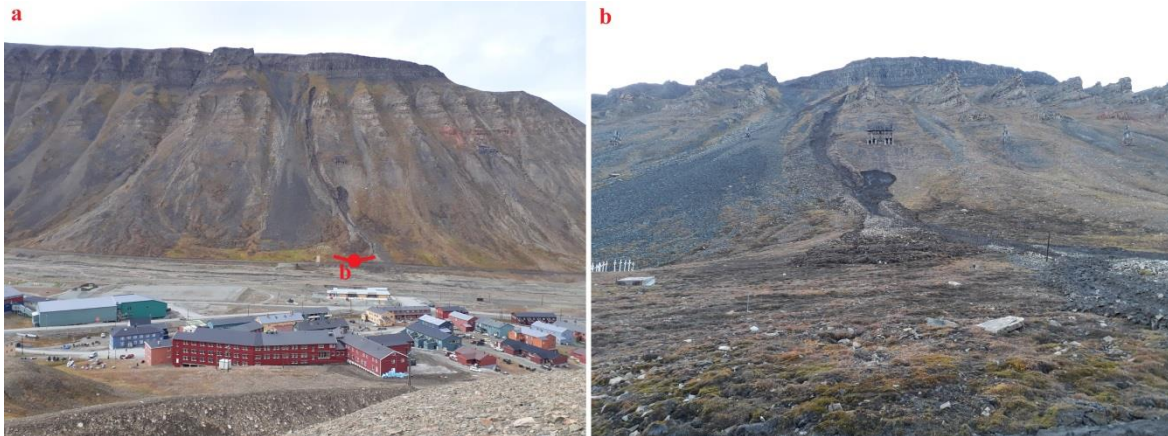




**Figur 12:** Zoom1: kombinert InSAR kart fra alle sensorene og geometriene og identifisering av hotspots med >30 mm bevegelser i løpet av sommersesong. Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i teksten.

### (A) RASOMRÅDE VED KIRKEGÅRDEN

Området er karakterisert av store snøskredvifter (*Figur 13a*) og en dominerende jordskredvifte (*Figur 13b*) som er begrenset av steinbreavsetninger på sin sørlige side. Et jordskred utløste den 14. oktober 2016 og begravet Veg 300 til Huset. Selve veien er kartlagt til å befinne seg i rød faresone med årlig nominell sannsynlighet på 1/100 (NVE, 2016). Området viser også aktivitet for steinsprang og foten av skråningen er svært påvirket av jordsig. På InSAR kart (*Figur 12*) vises det deformasjon opp til 40 mm, hvor mesteparten av deformasjon ble oppfanget i den store jordskredvifte og skyldes mest sannsynlig jordskredet fra oktober 2016. Andre, mindre områder viser deformasjon på grunn av det geomorfologiske arbeidet av snøskred som transporter stein fra toppen og avsetter ved bunnen på viftene (Eckerstorfer et al., 2013).



**Figur 13:** a) Oversiktsbilde av rasområdet Kirkegård fra Haugen. Det røde punktet angir fotostilling for b) Nærbilde av jordskredløpet fra oktober 2016.

### **(B) SVERDRUPBYEN STEINBRE OG GRUVEDEPONI**

Infrastrukturen i Sverdrupbyen er bygget på steinbreavsetninger (*Figur 14*). De bratteste delene over infrastrukturen er fyllmasse fra gruvedrift (*Figur 14a*). Vi vet fra borehull data fra steinbreen ved Huset at det foregår aktiv deformasjon. Det er derfor rimelig å anta at steinbreen i Sverdrupbyen også beveger seg. Deformasjonen består hovedsakelig av nedsynkning som kan knyttes til smelting av intern is. I løpet av sommeren 2017 oppstår det en stor sprekk på den flate delen av Sverdrupbyen, og en liten innsjø drenerte katastrofalt (*Figur 15e, f, g*). Dette er et synlig tegn for økt intern deformasjon som fører til store forandringer i overflaten og på sikt kan påvirke infrastruktur.

Dessuten finnes det overflateprosesser som er også synlige på InSAR kartene. Steinbrefronten (*Figur 14b, c*) er bratt og er derfor gjenstand til erosjon og andre bakkeprosesser.

Sverdrupbyen er nok et av de områdene i Longyeardalen med mest deformasjon knyttet til nedsynkning av overflaten. Vi bestemte oss derfor for å kartlegge området i detalj ved å bruke ubemannede fly i september 2017. Vi genererte en tredimensjonal kart av området (se avsnitt 3.4, *Figur 32*).





**Figur 14:** Sverdrupbyen steinbre og gruvedeponi. a og b) Detaljert bilde av gruvedeponi og skredvifter. c) Detaljbilde av steinbrefronten som viser overflateerosjon.



**Figur 15:** d) Oversiktsbilde av Sverdrupbyen tatt fra gruvedeponi. De røde brikkene viser detaljbilder e, f, g) av et område som kollapset og drenerte en liten innsjø.



### (C) SPREKKER / JORDSKRED I LIA

Foten av Lia nedenfor Sukkertoppen er dekket av jordskredavsetninger, tydelig fra fersk aktivitet i november 2016 (*Figur 16*). Dessuten finnes det en del sprekker som dannet seg i regnværet i november 2016, men massene utløste ikke som jordskred. Disse prosesser er for små til å bli oppdaget av InSAR derfor viser område ingen signifikant bevegelse. Men det betyr selvfølgelig ikke at jordmassene i Lia er stabile.



**Figur 16:** Oversiktsbilde av Lia på Sukkertoppen. De hvite kretsene viser a) ferske sprekker i jordoverflaten og b) en fersk jordskredavsetning fra oktober 2016.



#### (D) SPREKKER I GRUVEDALEN

Det finnes flere titalls sprekker i Gruvedalen ovenfor husene (*Figur 17*). Sprekkene befinner seg stort sett i den oransje og gule faresonen med sannsynlighet av 1/1000 og 1/5000 (NVE, 2016). Overflaten består av steinrikt sigende skråningsmateriale øverst og forvittringsmateriale og morenemateriale nederst mot husene. Området er generelt svært aktivt med mange utglidinger, sigejordstunger, store steinsprangblokker, sprekker og jord- og flomskredløp. På InSAR kartet vises det ingen sammenhengende bevegelser, men det kan forklares av orientering av skråningen som ikke er fordelaktig i forhold til satellittsikkeretninger (se Kapittel 2).



**Figur 17:** Eksempler av sprekker i jordoverflaten som dannet seg i regnværet i oktober 2016 i Gruvedalen.

#### (E) GRUVEDEPONI I VANNLEDNINGSDALEN



**Figur 18:** a) Oversiktsbilde av Vannledningsdalen som viser gruvedepoiet i den hvite kretsen. b) Detaljebilde av gruvedepoiet med synlige overflatiske jordskred.

Gruvedepoiet i Vannledningsdalen (*Figur 18a*) er ustabil som andre gruvedepoier. InSAR måler opp til 60 mm av nedsynkning. Selv om disse landformer er geologisk sett veldig unge, så inneholder de permafrost og oppfører seg som steinbreer. Flankene til gruvedepoiet er veldig bratte og sårbart for overflateprosesser som jordskred (*Figur 18b*).

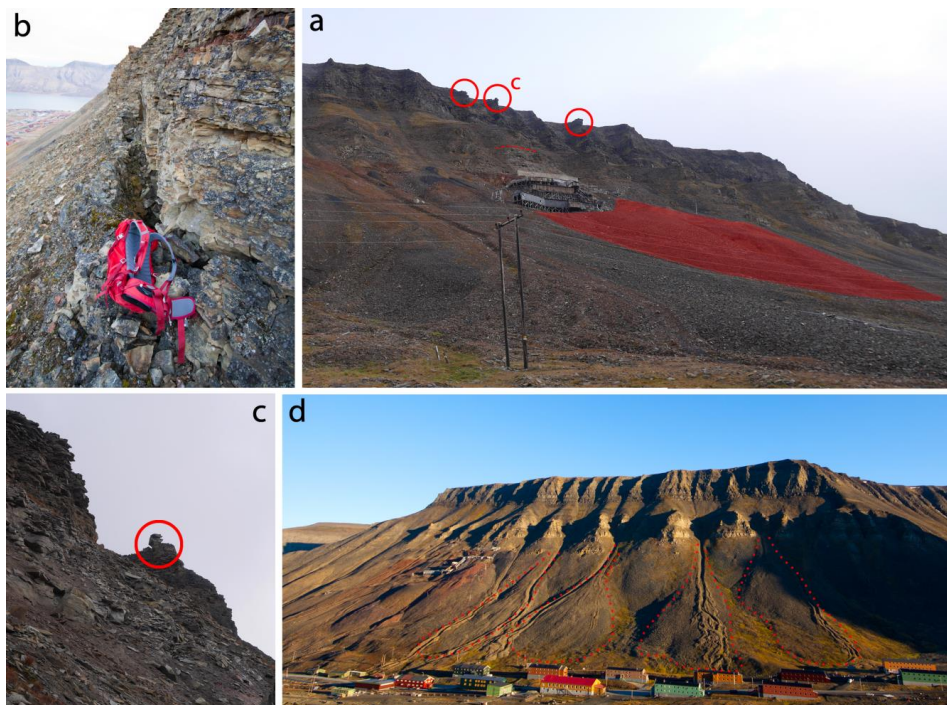


## (F) GRUVE II: FJELLKNATTER OG GRUVEDEPONI

Norges geologiske undersøkelse (NGU) har i november 2011 skrevet en bekymringsmelding til Lokalstyret, Store Norske og NVE om to potensielt ustabile områder på skråningen ved Gruvefjellet (*Figur 19a, d*). Det første området omhandler en rundt 40 m lang, 0.5–1 m bred og 1–3.5 m dyp sprekk ovenfor Gruve II (*Figur 19b*). Sprekken var allerede synlig på flybilder 1990 og ble vurdert som baksprekk av et potensielt fjellskred med 10–20000 kubikkmeter. Vi fanger ingen store bevegelser opp med InSAR, noe som tyder på at området ikke er i bevegelse som enhet (*Figur 12*). Likevel kan man konkludere at det er stor steinsprangaktivitet i området, tydelig observert av de mange steinblokker som ligger på taket til Gruve II.

Det andre området anmerket i bekymringsmeldingen omhandler potensielt ustabile fjellknatter over Gruve II og Nybyen (*Figur 19c*). Disse fjellknattene er dels overhengende og har mange tydelige sprekker. Fjellknattene representerer et farepotensiale da de kan løsne og føre til steinsprang som vil kunne nå bygninger i Nybyen. Vi fanger opp bevegelser med InSAR i områdene hvor disse fjellknattene er (*Figur 12*), men det er usikkert om vi ser bevegelser fra dem eller fra rennene innimellom. Uten tvil måler vi bevegelser av opp til 60 mm i sommersesong på de store skredviftene i Nybyen (*Figur 12* og *Figur 19d*). Det skyldes nok akkumulasjon av stein ved geomorfologiske avsetninger fra snøskred (Eckerstorfer et al., 2013).

Deformasjon med den største romlige omfangen kommer fra gruveponiet under Gruve II (*Figur 19a*), som er en ustabil men gjennomfrossen sedimentmasse som kan sammenlignes med en steinbre.



**Figur 19:** a) Oversiktsbilde av Gruve II og Gruvefjellet fjellsiden. Ustabile fjellknatter er markert med røde sirkler (ser detaljbilde c). Den stiplede linjen viser sprekkene ovenfor Gruve II (ser detaljbilde b). Gruvedeponi og antropogent material er markert i rødt. d) Hele Gruvefjellet fjellsiden med snøskredviftene markert.

### **(G) LARSBREEN STEINBRE OG MORENE**

Steinbreen og morenen ved Larsbreen består av en kompleks blanding av to landformer med forskjellig opprinnelse. Begge landformene har en intern blanding av is og sediment som i ulike grader fører til deformasjon. Morenen, som stammer fra det siste fremskrittet i den lille istiden er som helhet mer stabil enn steinbreen. Steinbreen beveger seg sakte nedover på grunn av intern isdeformasjon og særlig også på grunn av minkende volum (issmelting). Samtidig pågår den aktive akkumulasjonen i kildeområdet på grunn av det geomorfologiske arbeidet fra snøskred (Humlum et al., 2007). På *Figur 20b* er steinbreen og skredviftene som fungerer som kildeområde markert. Både kildeområdene og steinbreen selv viser store bevegelser med over 80 mm i sommersesong på InSAR kartet (*Figur 12*).

Samtidig ser vi også bevegelser på fronten av morenen på grunn av overflatiske skråningsprosesser som 'active layer detachment slides', jordskred og 'slumping' (*Figur 20a*). Disse prosessene eksponerer isen under overflaten som dermed kan smelte relativt raskt, destabilisere sedimenter og føre til mer aktivitet (positiv 'feedback loop').

Gruvedeponiet mellom Larsbreen morenen og Nybyen er også godt synlig på InSAR kartet med omfattende store bevegelser, mest sannsynlig nedsynking (*Figur 12* og *Figur 20a*).

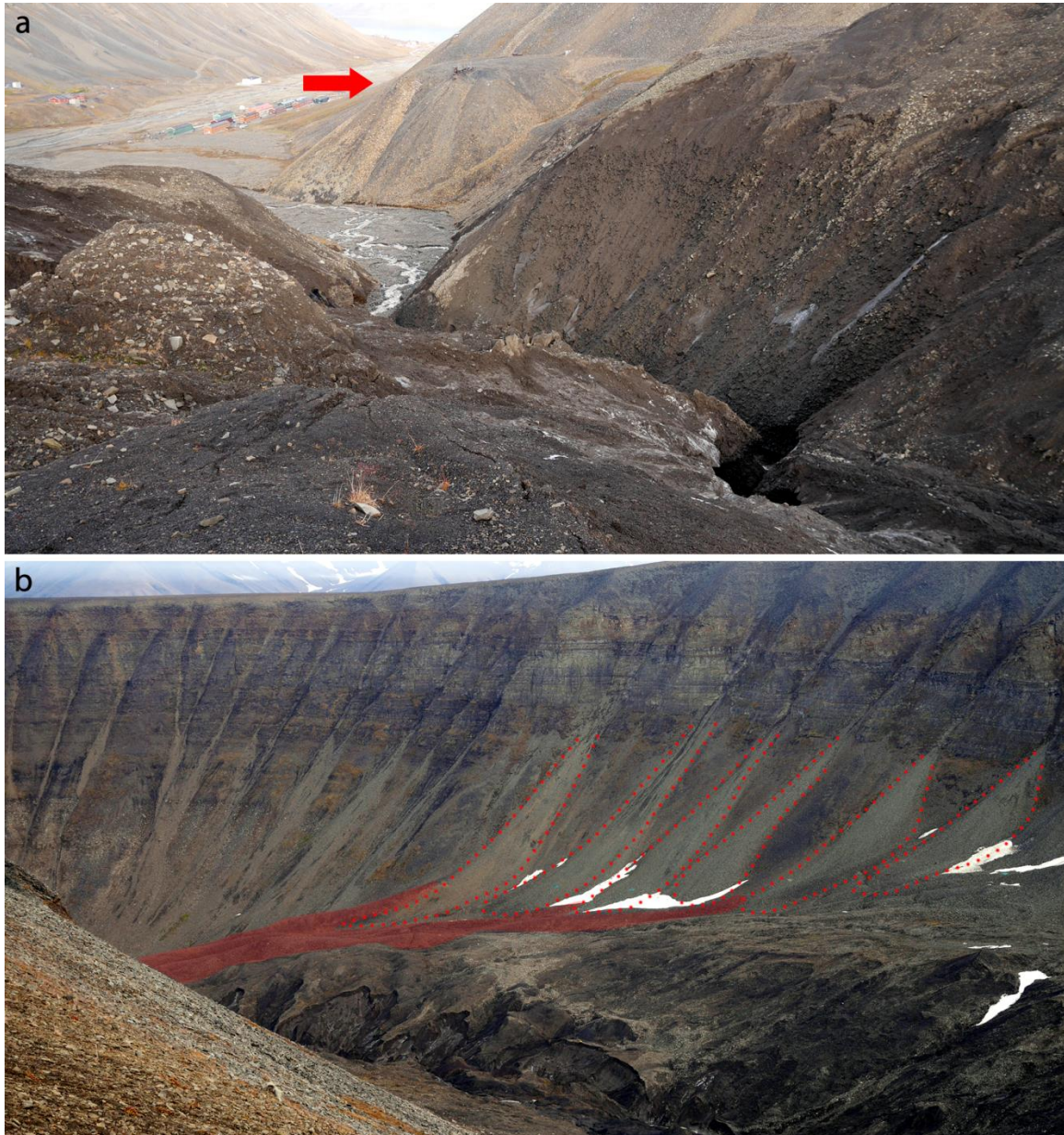
### **(H, I, J) TUNDRA I LONGYEARDALEN OG ØST AV UNIS**

To flate og våte tundraområder i Longyeardalen (*Figur 21* og *Figur 22*) viser bevegelser opp til 40 mm i sommersesong med en relativt stor romlig utstrekning (*Figur 12*). Disse områdene har sannsynligvis mye is i den øverste delen av permafrosten og er derfor utsatt for frostheving og innsynking ved tining av det aktive laget. Et område i sjøområdet viser også noen bevegelser (*Figur 12*) som kan knyttes til dynamikken av et elvedelta i periglasielle områder med sesongmessig avsmelting.

### **(K) HUNDEGÅRDEN**

Gjerdet på den nordlige delen av hundegården ble ødelagt av et jordskred som utløste den 8. november 2016 etter ekstremt regnvær (*Figur 23*). Selveste jordskredet er nok vanskelig å oppdage på InSAR kartet (*Figur 12*) som viser dekkorrelasjon på grunn av for store endringer av bakken, men bevegelser rundt hundegården kan regnes til permafrostdynamikk i tundraen, som forklart for område (H).





**Figur 20:** a) Meget aktivt front av Larsbreen morenen, med synlig is på overflaten. Den røde pilen viser et gruvedeponi. b) Larsbreen morenen og Larsbreen steinbre (markert i rødt) med snøskredviftene som kildeområdene markert med stiplet linje.



**Figur 21:** Flat og våt tundra i Longyeardalen vest av veg 500 og sør av Elvesletta





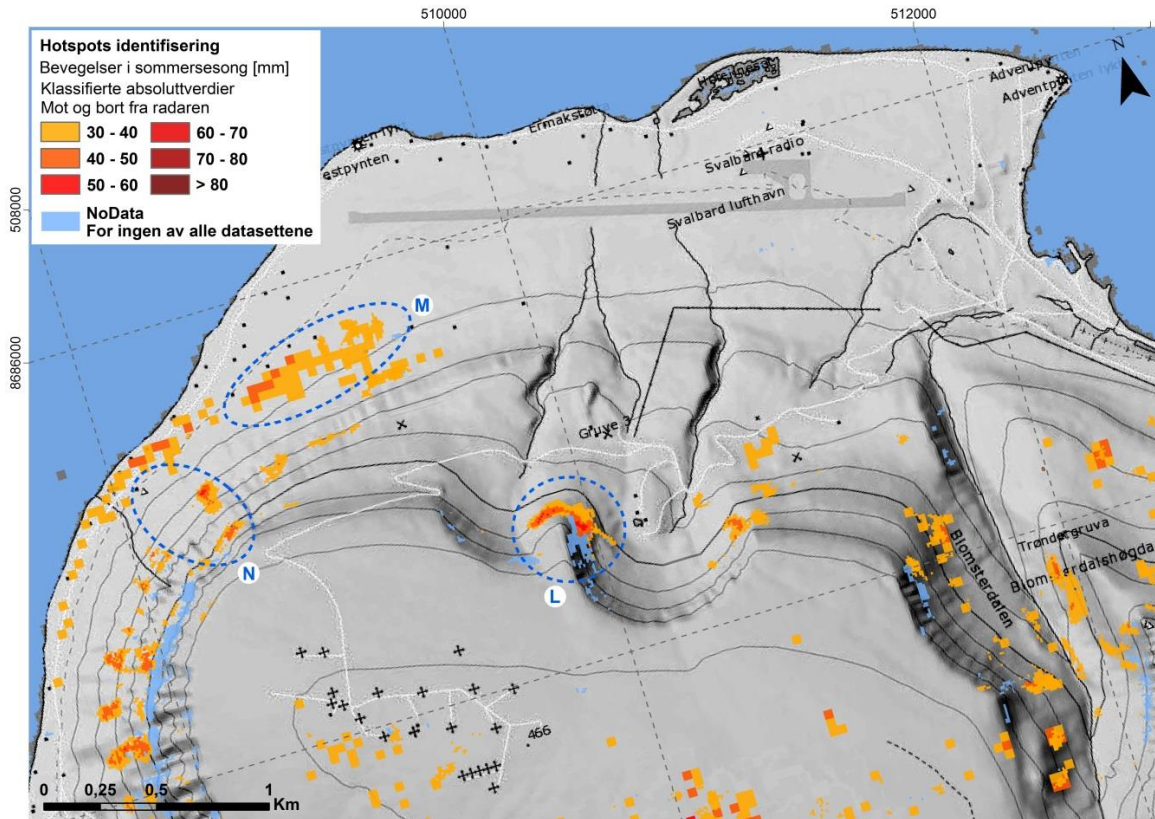
**Figur 22:** Flat og våt tundra øst av UNIS og nord av veg 400.



**Figur 23:** Jordskred som raste inn i hundegården den 8. november 2016.

### 3.2.2 ZOOM2: SKYTEBANEN OG BJØRNDALEN

Det befinner seg viktig infrastruktur i området dekket av zoom 2, først og fremst Svalbard Lufthavn. Dessuten er det mange hytter på Vestpynten og i Bjørndalen samt en viktig veg som fører opp til Kongsberg Satellite Services (KSAT) sitt anlegg på Platåberget. Vi har markert tre områder med store bevegelser på InSAR 'hotspot' kartet (*Figur 24*). Flyplassen selv ligger ikke i en 'hotspot', men på InSAR oversiktskartet (*Figur 9*) samt på kart i vedlegg (*Figur 43* og *Figur 44*) ser vi at vi fanger opp små områder med bevegelser opp til 20 mm i året. Det kan assosieres med permafrostdynamikk som er selvfølgelig problematisk for flyplassen. Svalbard Lufthavn ble konstruert i perioden 1973–1975 og en del feil ble gjort i denne tiden på grunn av lite kunnskap om konstruksjon i permafrost. Rullebanen for eksempel ble kuttet i isrik permafrost uten at geoteknisk undersøkelse ble gjennomført (Instanes & Instanes, 1998). Det førte til ujevn setning av rullebanen, og man måtte fylle ut hull og setninger flere ganger gjennom årene. Likevel konkluderer Mjureke & Instanes (2010) at rullebanen kan tåle økende temperaturer i et oppvarmende klima. InSAR metodikken kan være et nyttig verktøy til å føle med på deformasjon på og rundt rullebanen i framtiden.



**Figur 24:** Zoom2: kombinert InSAR kart fra alle sensorene og geometriene og identifisering av hotspots med >30 mm bevegelser i løpet av sommersesong. Blå sirkler L-N referer til områder diskutert i teksten.

### (L) SKYTEBANEN CIRQUE

Den vestlige spissen av en ‘cirque’ over skytebanen viser bevegelser opp til 50 mm i året (Figur 24). Området som er i bevegelse en bratt ‘talus sheet’ med store ustabile blokker som er et produkt av steinsprang fra et vertikalt fjellparti ovenfor (Figur 25). Det er usannsynlig at steinsprang alene fører til et såpass stort område med bevegelser. Vi mistenker derfor at tørre steinskred skjer her som flytter hele steinmassen nedover. Samtidig kan det også ikke utelukkes at snøskred transporterer sediment nedover den bratte bakken.



**Figur 25:** Den vestlige spissen av Skytebanen ‘cirque’ med steinsprangavsetninger under et vertikalt kildeområde.



## (M, N) BJØRNDALEN

Det finnes flere titalls hytter ved Vestpynten og i Bjørndalen og mange av dem er enten utsatt for skråningsprosesser eller kysterosjon. Sist i desember 2015 ble en hytte tatt av snøskred i Bjørndalen, og etter regnvær i november 2016 ble det observert jordskredløp som truet noen hytter (*Figur 26*). Det er også tydelig fra store blokker som er spredd mellom hyttene at steinsprang er en reell fare i Bjørndalen. I likhet til Longyeardalen finnes det en del fjellknatter med store sprekker. Samtidig vitner store snøskredvifter fra Platåfjellet om stor snøskredaktivitet som kan være potensielt ødeleggende. Dette medfører at veien fra slutten av rullebanen til gruvedeponi i Bjørndalen ligger innenfor rød faresone med 1/100 år sannsynlighet for skredhendelser (Multiconsult, 2017).

I området M (*Figur 26*) fanger vi opp bevegelser opp til 50 mm i året (*Figur 24*). Området er truet av jord- og sørpeskred, men bevegelser skyldes trolig nok jordsig. Området har litt helling og overflaten består av finkornet organiskholdig sigejord som er veldig våt i sommeren og derfor utsatt for en del frosthevning og solifluksjon ved tining om våren.

Området N (*Figur 26*) viser et eksempel av bevegelser fanget opp med InSAR (*Figur 24*) som kan knyttes til steinsprang, ustabile fjellknatter og sedimentakkumulasjon av snøskred i skråningen, og jordsig ved kysten. Særlig lengere inn i Bjørndalen finnes det mange steder hvor samme prosesser foregår som fører til store bevegelser (*Figur 11*). Det observeres også en del setninger langs med veien som fører til Bjørndalen.



**Figur 26:** venstre: Hyttfelt i Bjørndalen ved siden av rullebanen. Hyttene ligger på finkornet organisk sigejord. Høre: Hyttfelt litt lenger inn mot Bjørndalen som ligger i den røde faresonen på grunn av diverse skråningsprosesser.

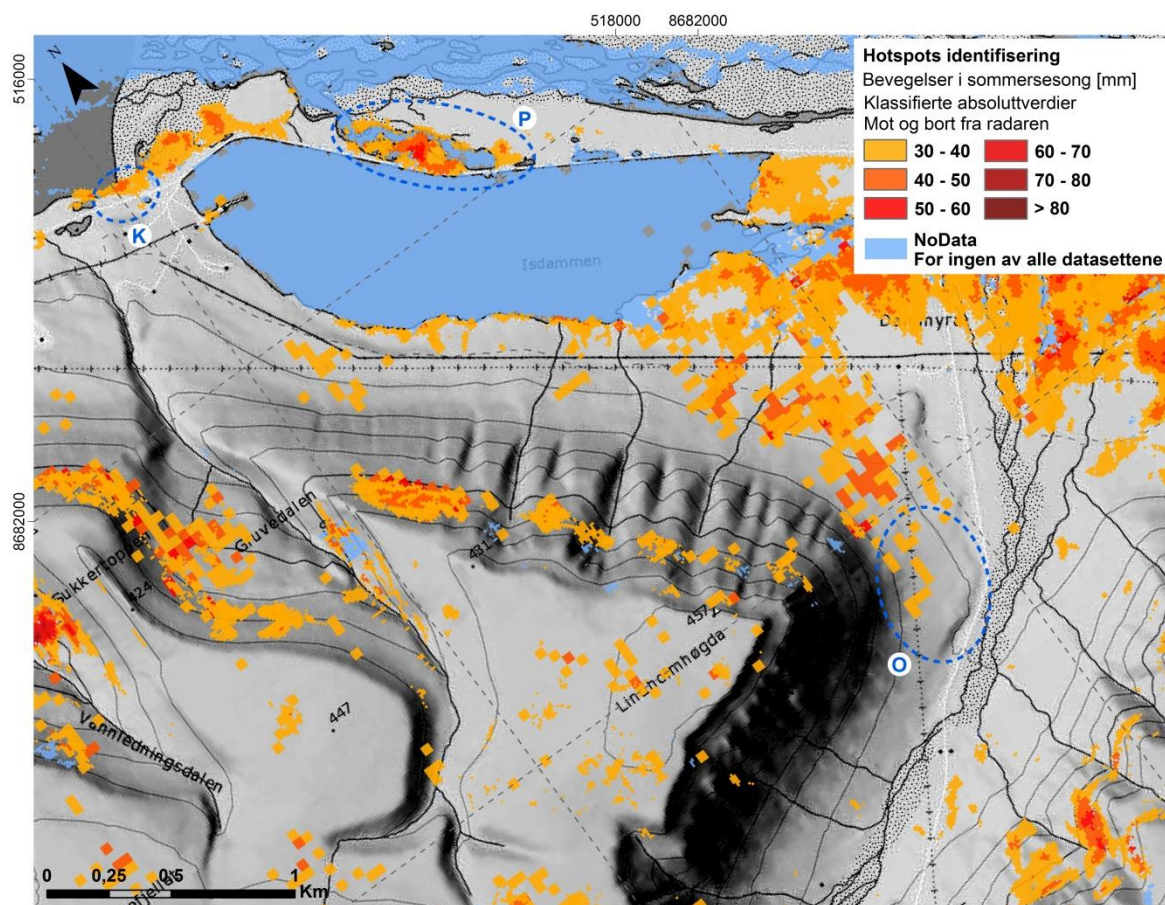
### 3.2.3 ZOOM3: ISDAMMEN OG ENDALEN

#### (O, P) ISDAMMEN OG SOLIFLUSJON

*Figur 27* viser store bevegelser i Adventdalen og Endalen, knyttet til ulike prosesser. Bevegelser rundt Isdammen og i elvedelta av Endalen skyldes permafrostdynamikken i det våte tundraområdet med sammenlignbart mye is i det aktive laget. Bevegelser som InSAR fanger opp rundt Isdammen (område P, *Figur 27*) skyldes mest sannsynlig utbedringer utført på demningen. Videre har vannet fra Isdammen også forandret elveløpet til en vis grad.

Elvedelta som nevnt tidligere er veldig dynamiske områder siden ‘discharge’ er sesongmessig med en topp når snøen smelter. Innover Endalen (området O) er det store områder med jordsig (*Figur 28*). I området O står det flere instrumenter som måler jordsig/solifluksjon (Harris et al., 2011). Harris et al., (2011) målte solifluksjon opp til 2.3 cm i 2005–2006. Med InSAR måler vi bevegelser opp til 30 mm i sommersesong (*Figur 24*), som er en god indikator at InSAR metoden er verdifull.

Med ‘hotspot’ metoden oppdager vi også store bevegelser i skråningen, særlig på den nordvendte siden av Gruvefjellet. Aktive jord- og flomskredbaner i denne fjellsiden tyder på høyt aktivitetsnivå. Mest bevegelser fanger vi nok opp i utløsningsområdene som er veldig bratte og består av steinrikt sigende skråningsmateriale, i likhet til området L ved skytebanen. Både skråningsprosesser og solifluksjon truer kulturminner som taubanebukker i Endalen (*Figur 28*).



**Figur 27:** Zoom3: kombinert InSAR kart fra alle sensorene og geometriene og identifisering av hotspots med >30 mm bevegelser i løpet av sommersesong. Blå sirkler K-P referer til områder diskuterte i teksten.

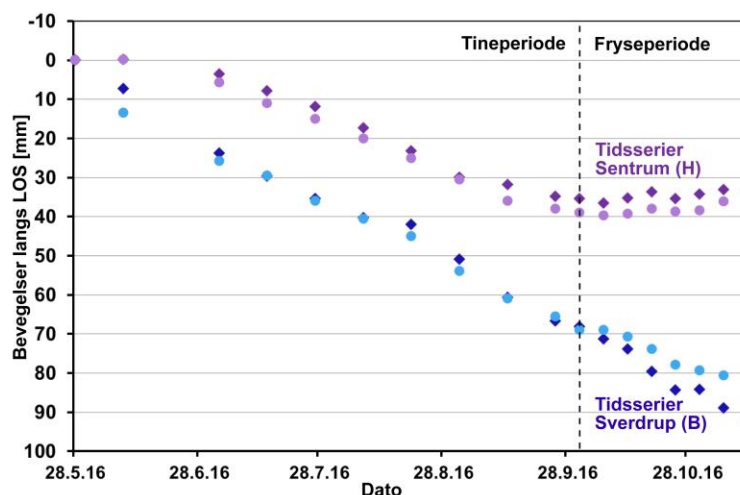


**Figur 28:** Til venstre: Taubanebukke i Endalen som er utsatt for jordsig. Til høyre: Taubanebukke i Endalen som er utsatt for jord- og sørpeskredaktivitet.

### 3.3 INSAR TIDSSERIER

Ved bruk av SBAS metodikk (Small Baseline Subset, Berardino et al., 2002), er det mulig å generere tidsserier som gir informasjon om tidsmessige variasjoner av bakkens bevegelser. På grunn av den lange vinterseasonen med snødekke som fører til dekorrelasjon, er tidsserier kun prosessert for sommersesongen 2016.

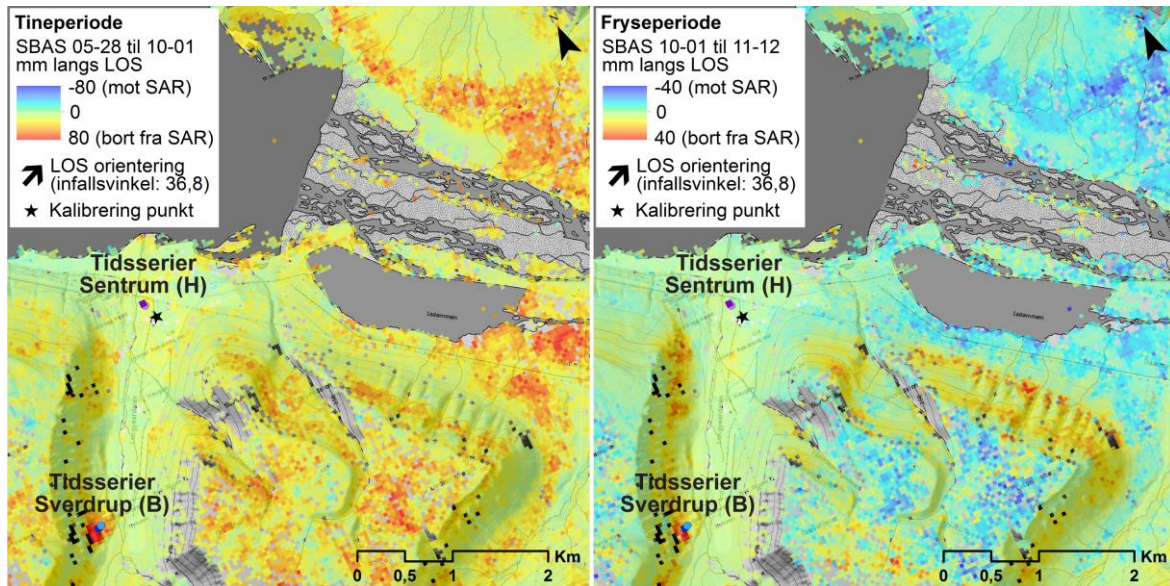
Ved bruk av Sentinel-1 data har vi prosessert SBAS tidsserier fra 28. mai til 12. november 2016. Tidsseriene viser at ulike landformer har ulike bevegelser gjennom sesongen. I *Figur 29* presenteres to eksempler: i området H (tundra i Longyeardalen) der en tydelig forskjell av trend (innsynkning/frosthevning) er målt mellom tineperiode og fryseperiode; og i området B (steinbreen i Sverdrupbyen) der vi observerer små variasjoner i deformasjonshastighet. Deformasjon viser også tegn til å fortsette lengre, også etter at terrenget har begynt å fryse (oktober).



**Figur 29:** InSAR tidsserier fra mai til november 2016 på området H (tundra i sentrum) og B (Sverdrupbyen). Plassering av tidsserier vises på *Figur 30*.



På landskapskala er det en tydelig forskjell mellom tineperiode der overflaten er mest påvirket av innsynkning (mai–oktober) og frostheving (oktober–november) på flate områder (Figur 30).



**Figur 30:** InSAR kart for tineperioden (mai–oktober) og fryseperioden (oktober–november) som viser en tydelig endring av trend i studieområdet.

### 3.4 BRUK AV UAV FOR Å LAGE ORTOFOTO OG HØYDEMODELL

I september 2017 gjennomførte vi en kampanje hvor vi benyttet UAV<sup>1</sup> for å skaffe mer detaljert informasjon om utvalgte områder.

#### 3.4.1 PLATTFORM OG DATAINNSAMLING

Systemet som ble brukt er en kommersiell UAV av typen DJI Inspire 1. Dette er et lett multikopter på ca 3 kg som kan utstyres med flere forskjellige typer sensorer, men hovedsakelig benyttes den til flyfotografering. I dette tilfellet ble det benyttet et kamera av typen DJI X3. Kameraet har oppløsning på 12.4 megapiksel, har en fast brennvidde på 20 mm og er montert på en gyrostabilisert 3-akse gimbal. Multikopteret har GPS med standard navigasjonspresisjon og er styrt av en flightcontroller. Det er støtte for å forhåndsplanlegge oppdrag som multikopteret kan gjennomføre autonomt. Man kan programmere veipunkter, høyde og posisjoner for fotografering.

<sup>1</sup> UAV - Unmanned Aerial Vehicle. Ubemannet luftfartøy, også kalt “drone”.

Ved denne typen datainnsamling tas det bilder rett ned og gyrostabiliseringen sørger for at bildene blir tatt nadir<sup>1</sup> uavhengig av flymaskinens pitch og roll. Ruten som multikopteret flyr under datainnsamlingen er forhåndsprogramert og utregnet enten manuelt eller ved hjelp av egnet programvare. Effektiv flytid for dette multikopteret er ca 15 minutter avhengig av temperatur og vindforhold. Avhengig av ønsket bakkeoppløsning vil man eventuelt måtte gjennomføre flere flyturer for å dekke større områder. Som et eksempel er modellen av Longyeardalen (*Figur 31*) konstruert av 3 separate flyturer.

### 3.4.2 DATAPROSESSERING

Et tett nettverk av overlappende bilder i to forskjellige områder (vestsiden av Longyeardalen, og solifluksjonsområdet i Endalen) har vært tatt opp for å lage høyoppløselige ortofotoer og høydemodeller. Teknikken for å lage disse modellene er basert på såkalt structure-from-motion (SfM) utført via programvaren Pix4D<sup>2</sup>. Modellene produseres ved å estimere tredimensjonale strukturer fra todimensjonale bildesekvenser. Dette gjøres ved å analysere de todimensjonale bildene etter gjenkjennbare punkter som kan knytte bildene sammen. Ved å så benytte kjente posisjoner, avstander og vinkler, kan man generere nøyaktige punktskyer som kan konverteres til høydemodeller.

For å få tredimensjonale modeller av akseptabel kvalitet er det viktig med høy overlapp i bildesekvensene, minimum 75 %. I denne datainnsamlingen ble det benyttet 80 % overlapp. Oppløsningen på de ferdige modellene avhenger av flere faktorer, bl.a motion blur, sensorens/kameraets oppløsning og relativ høyde over bakken. Det ble flydd i forskjellige høyder på de forskjellige stedene, basert på vurderinger av topografien og krav til resultat, men i snitt foregikk flygningene mellom 80 og 120 meter over bakkenivå. Endelig bakkeoppløsning er 8.8 cm for Longyeardalen og 6.5 cm for Endalen.

Multikopteret benytter standard GPS-posisjon i luften for å georeferere bilder, dette gir en absolutt nøyaktighet på ca 1–10 meter i modellen avhengig av bl.a atmosfæriske forhold og andre feilkilder. Den relative nøyaktigheten er fortsatt meget god da feilkildene i de aller fleste tilfellene er konsistente i det begrensede området man gjennomfører målinger på. For å forbedre den absolutte nøyaktigheten er det benyttet GCP<sup>3</sup> som er målt inn med Topcon GR-5 GPS med CPOS korreksjoner fra Statens kartverk. Dette gir en en fast referanse i modellen som kan georefereres og korrigeres i programvaren. En absolutt nøyaktighet på cm-nivå i modellene forventes ved hjelp av denne metoden.

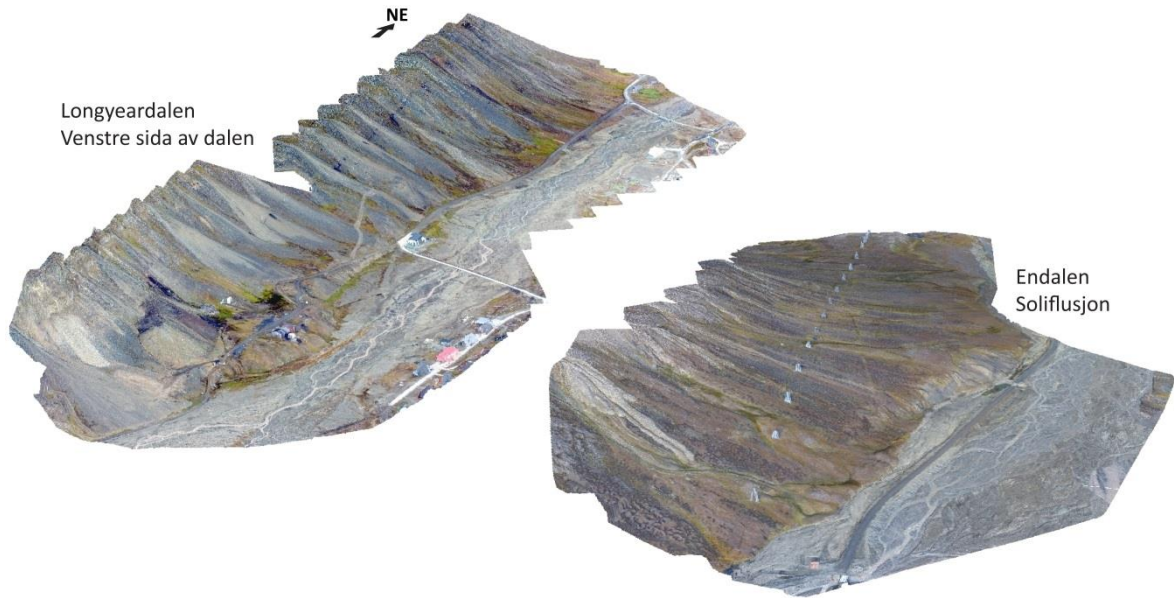
*Figur 31* viser tredimensjonal visualisering av resultater i Longyeardalen som dekker områder A/B (Zoom 1, *Figur 12*) og over solifluksjon området O (Zoom 3, *Figur 27*). Høydemodeller kan brukes for å skaffe en tredimensjonal visualisering av InSAR bevegelser, som vist på Sverdrupbyen på *Figur 32*.

---

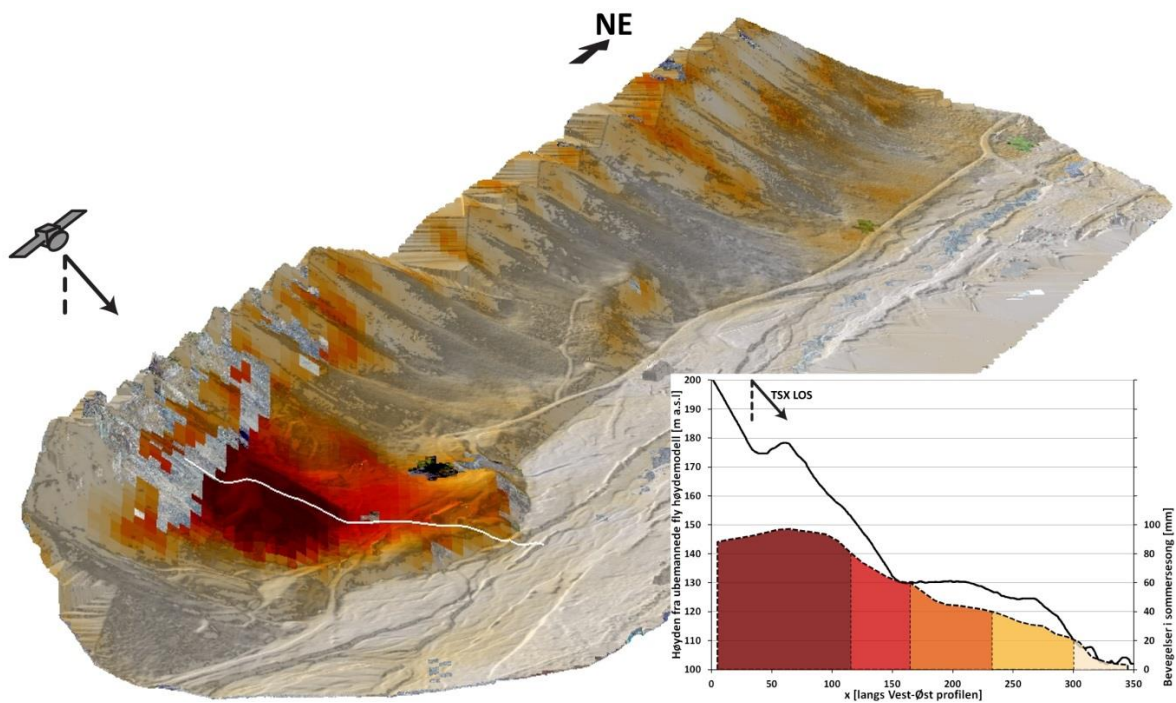
<sup>1</sup> NADIR - 90 grader rett ned. I linje fra observasjonspunktet til planetens sentrum.

<sup>2</sup> Pix4D. <https://pix4d.com/about-us/> Programmwareleverandør for produksjon av orthomosaikk, 3D-modeller og høydemodeller.

<sup>3</sup> Ground Control Points. Bakkekontrollpunkter. Er punkter som legges ut på bakken før datainnsamling. Disse blir så målt inn og de innmålte data tilføres modellen i forbindelse med dataprosesseringen.



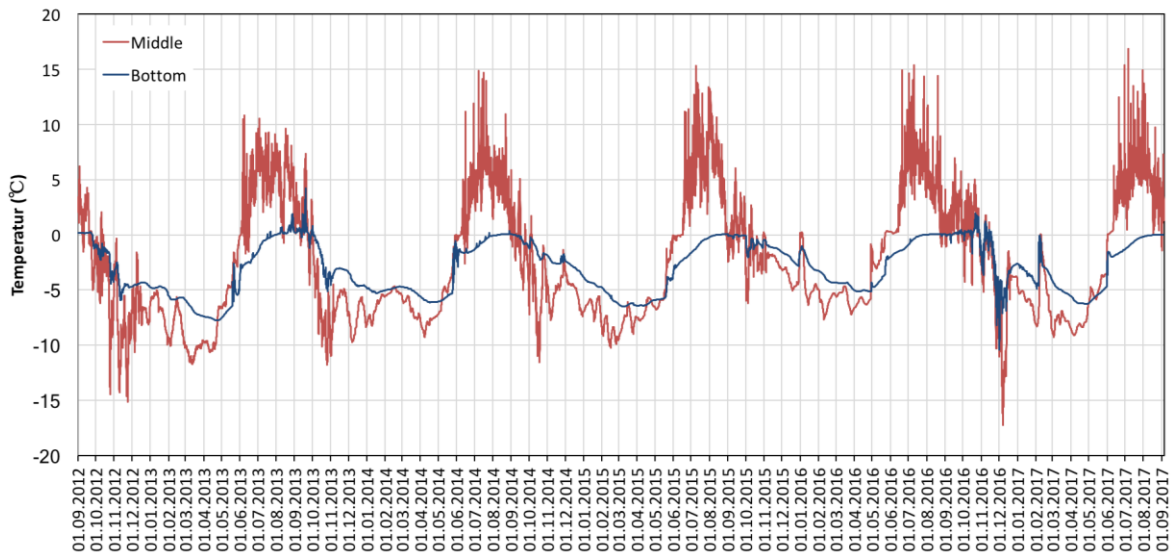
**Figur 31:** Ubemannede fly ortofotoer på vestsiden av Longyeardalen (til venstre) og i Endalen (til høyre).



**Figur 32:** Tredimensjonal oversikt av Sverdrupbyen og venstre siden av Longyeardalen fra ubemannede fly høydemodellen og InSAR resultater fra TerraSAR-X StripMap mode i ascending geometri. Profilen hvis høyden (svart linje) og gjennomsnitt bevegelser i sommersesong (stiplede linje med farge per klasse av deformasjon, hver 20 mm).

### 3.5 IN-SITU MÅLEINTRUMENTER VED GRUVE II

Etter bekymringsmeldingen fra NGU i 2011 installerte UNIS temperatursensorer i sprekken over Gruve II. Figur 33 viser denne tidsserien for to ulike sensorer, hvor den blå linjen viser målinger fra bunnen av sprekken og den røde linjen viser målinger fra omtrent halvveis opp i sprekken. Sprekken fyller seg komplett med snø i vinteren og dermed flater begge temperaturkurvene ut og blir liggende under 0°C. Når snøen smelter, begynner termometermåleren på toppen måle lufttemperatur som fluktuerer mye, mens måleren på bunnen blir stortsett under 0°C. Det betyr at det er såpass kaldt i sprekken at det danner seg is, som er synlig når man står i sprekken. Det er nok rimelig å anta at isen som danner seg stabiliserer sprekken. Men samtidig ser man også at lufttemperaturen øker stadig i Longyearbyen.



**Figur 33:** Temperaturserie fra 2012 til 2017 fra sprekken over Gruve II.



## 4 DISKUSJON OG KONKLUSJON

### 4.1 BEVEGELSER I DALBUNNEN OG PÅVIRKNING AV INFRASTRUKTUR

Totalt 40 % av Svalbards landmasser er dekket av permafrost, resten er dekket av isbreer. Permafrostområdene er såkalte periglasiale områder, påvirket av periglasiale prosesser, dvs. relatert til fryse- og tineprosesser som påvirker terrenget. Dette medfører en sesongmessig dynamikk hvor terrenget synker etter snøen har smeltet og det aktive laget i permafrosten tiner og hever seg igjen når terrenget fryser igjen om høsten. Dersom det aktive laget består av mye isholdig materiale så betyr dette at det er mye vann tilgjengelig. Slike områder er mer utsatt for heving og synking av bakken på grunn av vannutvidelse under frysing. Det betyr at våte områder danner mer is i det aktive laget enn tørre områder, gitt at disse områder består også av frostfølsomme sedimenter. InSAR metoden egner seg veldig godt til å oppdage disse sesongmessige bevegelsene, dersom områdene hvor heving og synking foregår er sammenhengende og av en viss utstrekning med relativt like bevegelseshastigheter.. I studieområdet rundt Longyearbyen finnes det en del områder som faller i denne kategorien, særlig på nordsiden av Adventdalen. Her finnes det store, våte områder med iskiler. Andre eksempler er elvedelta i Endalen og mindre tundraområder i Longyearbyen. De utgjør ingen umiddelbar fare med tanke på infrastrukturbygging, siden det finnes ulike løsninger hvordan man bygger i permafrost. Men det finnes nok en del gammel infrastruktur som ikke er bygget etter dagens standard, som er mer utsatt for endringer i permafrost som kan medføre setningsskader. Infrastrukturen som kanskje er mest utsatt for den slags permafrostdynamikk er veinett og rullebanen ved Svalbard Lufthavn, som vi har vist i rapporten. Noen utbedringsarbeider foregår nesten hver sommer for å holde veinettet i stand. Det er rimelig å anta at vedlikeholdsfrekvens vil øke i et varmere klima.

Permafrost er først og fremst et klimatologisk fenomen. Det betyr forenklet at endringer i klima fører til endringer i permafrostfordistribusjon, permafrosttemperatur og dybden av det aktive laget. Av hensyn til stabiliteten av infrastruktur er tynning av permafrost (degradering) og fortykning av det aktive laget det største problemet. Det finnes målinger av tykkelsen til det aktive laget over nesten 15 år fra UNIS CALM i Adventdalen som viser en jevn økning av tykkelse over tid (Christiansen et al., 2010). Samtidig viser permafrost borehull rundt Longyearbyen stadig høyere permafrost temperaturer (Isaksen et al., 2013). Disse utviklingene påvirker terrengstabilitet og fører til netto innsynkning av bakken, som fører som en konsekvens til infrastrukturproblemer (Harris et.al., 2009).

## 4.2 BEVEGELSER AV SKRÅNINGER OG PÅVIRKNING AV INFRASTRUKTUR

Bevegelser i skråninger kan grovt differensieres av bevegelsesmåten. Sakte bevegelser oppstår på grunn av krypende bevegelser i permafrosten. Frossen grunn kan deformeres under påvirkning av tyngdekraften, dette er mest effektivt når isrike sedimenter er til stede. Eksempler av landformer med krypende bevegelser er steinbreer, jordsigtunger eller områder med jordsig. Jordsig er kjent til å forårsake problemer for infrastruktur, tydelig fra de skrånende stolper fra gamle hus ved kirkegården i Longyearbyen eller fra de skjeve taubanebukkene i Endalen. Steinbreer utgjør vanligvis ingen umiddelbar risiko, hvis ikke de krypende bevegelser går over til kollaps av deler av steinbreen (for eksempel fronten som sett på Larsbreen steinbre). Begge landformer er relativt enkle og godt egnet å overvåke med InSAR også over lengere tid for å fange opp en økning i bevegelse over tid.

Snøskred og jordskred faller under raske massebevegelser som flyter nedover skråningen. Begge prosessene er viktige for massetransport av sedimenter, tilgjengelig etter en isbre har trukket seg tilbake. Kvantifisering av hvor mye sediment snøskredene eller jordskredene transporterer gjennom tiden er vanskelig, men det er i hvert fall mulig å bruke InSAR for å dokumentere overflatebevegelser av de løse sedimenter som akkumuleres på skredviftene som befinner seg i den nedre delen av skråningene. Det betyr at disse prosessene er svært aktive i landskapet rundt Longyearbyen og både snø- og jordskred er en risiko for samfunnet.

Steinsprang er den siste bakkeprosessen som blir nevnt her, en prosess hvor stein først faller, deretter hopper og ruller nedover. Det medfører lange utløpsområder og dermed økt potensial for ødeleggelse. Vi ser med InSAR at de fjellknattene som finnes i Longyeardalen og Bjørndalen er svært ustabile. En kollaps av slike fjellknatter kan føre til signifikant steinsprang.

## 4.3 INSAR SOM OVERVÅKINGSVERKTØY

Flesteparten av studiene utført for å undersøke terrengstabilitet bruker tradisjonelle, feltbaserte observasjoner og målinger. I de siste årene har InSAR teknologien blitt brukt til deteksjon av nedsynking av bakken på grunn av tining og frysing av det aktive laget i områder med permafrost (Liu et al., 2012). InSAR har også blitt brukt til overvåking av bakkeprosesser som steinbreer (Bardoux et al., 2015; Liu et al., 2013; Eriksen et al., 2017). Med fri tilgjengelighet av store satellittdatasett (som fra Sentinel-1 satellittene i EUs Copernicus-program) åpner det seg store muligheter for at InSAR metoden kan brukes også for *operasjonell* overvåking. Samtidig øker lengden på tidsseriene av disse datasettene som gjør dem aktuelle for klimarelaterte studier.

I dette prosjektet har vi demonstrert at InSAR er verdifull for 1) å kartlegge distribusjon av bevegelser på regional skala, 2) å måle temporal utvikling av bevegelser i løpet av sesong (tidsserier), og 3) å identifisere 'hotspots' som kan være et viktig bidrag inn i geofarekartlegging. Begrensninger ved InSAR teknikken er relatert til:

- (1) Noen landformer kan bevege eller begynne å bevege seg så raskt at de ikke kan fanges opp av satellittbasert InSAR.
- (2) Målinger er kun mulig i den snøfrie delen av året.
- (3) Tolkning av bevegelse fra ulike InSAR geometrier krever stor kompetanse. Da InSAR kun måler deformasjon i terrengets overflate er det fortsatt viktig med feltundersøkelser eller tradisjonelle flybildeanalyser for å dokumentere styrende strukturer.

Mulige løsninger for å overvinne utfordringene er:

- (1) Satellittbasert InSAR overvåking kan kombineres/komplementeres med målinger fra flere SAR sensorer, for eksempel ved bruk av bakkebasert radarteologi. Bakkebaserte radarsystemer gir oss mulighet til selv å velge observasjonsgeometri og systemet kan brukes til å følge med på svært raske bevegelser, som demonstrert fra en steinbre i Skibotndalen i Nord-Norge (Eriksen et al., 2017).
- (2) Kombinasjon av InSAR med SAR for kartlegging av innfrysing og tining av overflaten. Ved bruk av tilbakestrålingsinformasjon i SAR bilder er det mulig å fastslå når bakken er frossen, når snø ligger på bakken og om bakken eller snø er tørr eller våt (Eckerstorfer et al., 2017). Med denne tilleggsinformasjonen kan man enklere finne periodene som egner seg til InSAR analyse, samtidig får man mer kunnskap av bakkeegenskaper som er nyttig for geomorfologiske tolkninger. Om man ønsker å følge med på enkeltobjekter er det også mulig å installere såkalte *radarreflektorer* der man kan studere bevegelse også om vinteren. Dette brukes operasjonelt av NVE på fastlandet for overvåking av fjellskred. Ved å benytte Sentinel-1 får man målinger (minst) hver 6. dag, også om vinteren.
- (3) Permafrost og dens dynamikk kan bare indirekte observeres ved bruk av satellittdata. Det kreves derfor feltarbeid og prosesskunnskap for å kunne tolke bevegelser som vi har vist her i denne rapporten. Men det finnes muligheter til å konvertere InSAR bevegelser til fysiske variabler relatert til bakketemperatur, is/vann innhold i bakken eller dybden av det aktive laget. Liu et al. (2012) estimerte aktive lag tykkelse fra InSAR målinger av nedsynking av bakken ved antagelsen at denne nedsynking skyldes hovedsakelig faseendringen av is til vann i bakken. Bruk av InSAR for å bedre forstå permafrostprosesser er en del av et pågående PhD prosjekt ved Norut.

Et naturlig oppfølgingsprosjekt vil være å kombinere bakke – og satellittbasert InSAR for å øke forståelsen av de sesongsmessige deformasjonssignalene, samt å karakterisere spesielt rask bevegelse som ikke kan fanges opp av satellittbasert InSAR. Det bør også vurderes bruk av satellittreflektorer for overvåking av spesielt viktige områder.



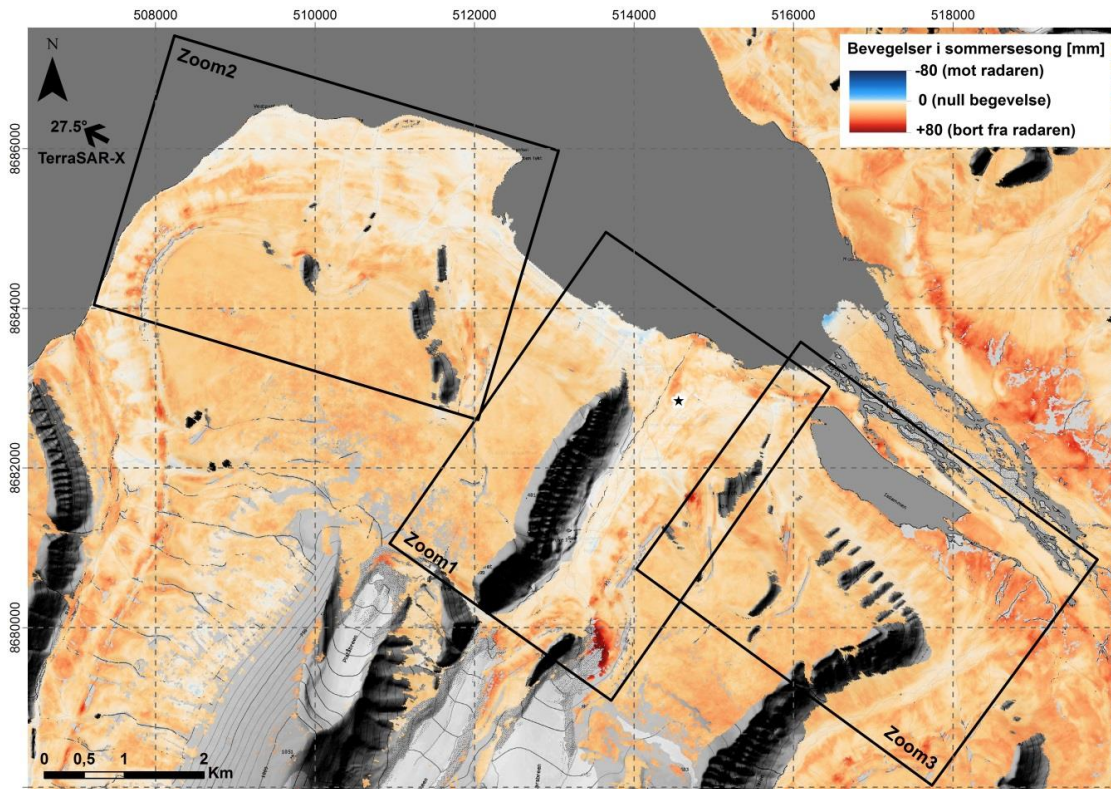


## REFERANSER

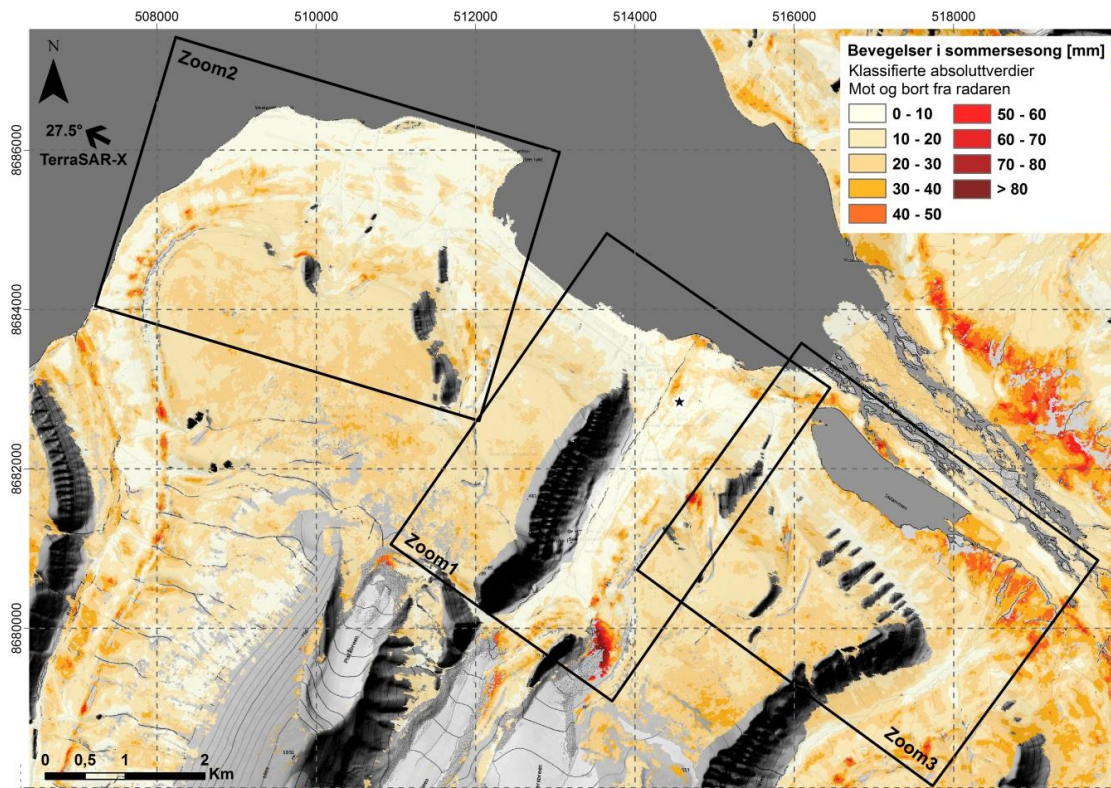
- Almaviva, 2016. Skredsikring og fundamentering i permafrost. Case: Arktiske strøk - Longyearbyen, Svalbard. Kompendium: 2016-12.
- Bardoux, C., Strozzi, T., Delaloye, R. Wegmüller, U. & Collet, C. 2015. Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 109, 178-192. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.09.010.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. & Sansosti, E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11), 2375–2383. doi:10.1109/TGRS.2002.803792.
- Christiansen, H.H. 2005. Thermal regime of ice-wedge cracking in Adventdalen, Svalbard. *Permafr. Periglac. Process.* 16, 87–98. doi:10.1002/ppp.523.
- Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Isaksen, K., Juliussen, H., Farbrot, H., Humlum, O., Johansson, M., Ingeman-Nielsen, T., Kristensen, L., Hjort, J., Holmlund, P., Sannel, A.B.K., Sigsgaard, C., Åkerman, H.J., Foged, N., Blikra, L.H., Pernosky, M.A. & Ødegård, R.S. 2010. The thermal state of permafrost in the nordic area during the international polar year 2007-2009. *Permafr. Periglac. Process.* 21, 156–181. doi:10.1002/ppp.687.
- Eckerstorfer, M., Christiansen, H.H., Rubensdotter, L. & Vogel, S., 2013. The geomorphological effect of cornice fall avalanches in the Longyeardalen valley, Svalbard. *The Cryosphere* 7, 1361–1374. doi:10.5194/tc-7-1361-2013.
- Eckerstorfer, M., Malnes, E., Christiansen, H.H., 2017. Freeze/thaw conditions at periglacial landforms in Kapp Linne, Svalbard, investigated using field observations, in situ, and radar satellite monitoring. *Geomorphology* 293(B), 433–447. doi:10.1016/j.geomorph.2017.02.010.
- Emardson, T.R., Simons, M. & Webb, F.H. 2003. Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *Journal of Geophysical Research* 108(B5), 2231. doi:10.1029/2002JB001781.
- Eriksen, H.Ø. 2017. Combining Satellite and Terrestrial Interferometric Radar Data to Investigate Surface Displacement in the Storfjord and Kåfjord Area, Northern Norway. *PhD thesis*, UiT – The Arctic University of Norway. 191.
- Eriksen, H.Ø., Lauknes, T.R., Larsen, Y., Corner, G.D., Bergh, S.G., Dehls, J.F., 2017. Visualizing and interpreting surface displacement patterns on unstable slopes using multi-geometry satellite SAR Interferometry (2D InSAR). *Remote Sens. Environ.* 191, 297–312. doi:10.1016/j.rse.2016.12.024.
- Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR Data, Reservoir Monitoring from Space*. DB Houten, The Netherlands: EAGE Publications, Education Tour Series.
- French, M.H., 2007. The periglacial environment. John Wiley & Sons.
- Førland, E. J., Benestad, R., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J. E., & Skaugen, T. E. 2011. Temperature and precipitation development at Svalbard 1900–2100. *Advances in Meteorology* 2011. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/893790>
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Käab, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matusoka, N., Murton, J.B., Nötzli, J., Philips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. & Vonder Mühll, D. 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth Sci. Rev.* 92, 117-171.
- Harris, C., Kern-Luetschg, M., Christiansen, H.H. & Smith, F., 2011. The Role of Interannual Climate Variability in Controlling Solifluction Processes, Endalen, Svalbard. *Permafr. Periglac. Process.* 22, 239–253. <https://doi.org/10.1002/ppp.727>.
- Humlum, O., Christiansen, H.H. & Juliussen, H., 2007. Avalanche-derived rock glaciers in Svalbard. *Permafr. Periglac. Process.* 18, 75–88. doi:10.1002/ppp.580.

- Humlum, O., Instanes, A. & Sollid, J.L., 2003. Permafrost in Svalbard: a review of research history, climatic background and engineering challenges. *Polar Res.* 22, 191–215.
- Instanes, D. & Instanes, A. 1998. Frozen ground temperature profiles at Svalbard airport, Spitsbergen. *Proceedings of the International Conference on Permafrost and Actions of Natural and Artificial Cooling. International Institute of Refrigeration, Orsay, France, October 21–23, 1998*, pp. 229–236.
- Isaksen, K., Sollid, J.L., Holmlund, P. & Harris, C. 2007. Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2). doi:10.1029/2006JF000522.
- Isaksen, K., Eitzelmüller, B., Vikhamar Schuler, D. & Nordli, Ø., 2013. 15-years of permafrost monitoring on Janssonhaugen, Svalbard; new insights into permafrost response and sensitivity to climate change. EGU General Assembly Conference Abstract, EGU2013-11158.
- Larsen, Y., Engen, G., Lauknes, T. R., Malnes, E., & Høgda, K.-H. 2005. A generic differential SAR processing system, with applications to land subsidence and SWE retrieval. *Proc. ESA Fringe 2005, ESA ESRIN, Frascati, Italy, November 28–December 2*.
- Lauknes, T. R. 2010. Rockslide mapping in Norway by means of interferometric SAR time series analysis. *Ph.D. Thesis*, University of Tromsø, Norway.
- Liu, L., Schaefer, K., Zhang, T. & Wahr, J. 2012. Estimating 1992–2000 average active layer thickness on the Alaskan North Slope from remotely sensed surface subsidence. *J. Geophys. Res.* 117, F01005. doi:10.1029/2011JF002041.
- Liu, L., Millar, C.I., Westfall, R.D. & Zebker, H.A. 2013. Surface motion of active rock glaciers in the Sierra Nevada, California, USA: inventory and a case study using InSAR. *The Cryosphere* 7, 1109–1119. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1109-2013>.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. 1998. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics* 36(4), 441–500.
- Mjurreke, D. & Instanes, A. 2010. Svalbard airport runway. Performance during a climate-warming scenario. Fieldguide for excursions EUCOP III Svalbard, NGU Report nr 2010.031. 18–27.
- Multiconsult. 2017. Skrefarekartlegging Svalbard. Forfattere: Maria Hannus, Mariia Pihlainen, Jan Otto Larsen. *Rapport Multiconsult*. Dokumentkode: 713525-RIGberg-RAP-001.
- NGU. 2011. ROS Fjellskred i Troms, status og analyser etter feltarbeid 2010. *Rapport 2011.031. Norges geologiske undersøkelse*. Forfattere: Halvor Bunkholt, Per Terje Osmundsen, Tim Redfield, Thierry Oppikofer, Trond Eiken, Jean-Sebastien L'Heureux, Reginald Hermanns, Tom Rune Lauknes. ISSN: 0800-3416.
- NGU. 2016. Geologisk modell og fare- og risikoklassifisering av det ustabile fjellpartiet Gamanjunni 3 i Mandalen, Troms. *Rapport 2016.031. Norges geologiske undersøkelse*. Forfattere: Martina Böhme, Halvor Bunkholt, John Dehls, Thierry Oppikofer, Reginald L. Hermanns, Einar Dalsegg, Lene Kristensen, Tom Rune Lauknes, Harald Øverli Eriksen. ISSN: 2387-3515.
- Norut. 2015. Spaceborne radar interferometry (InSAR) for natural hazards, landslides and infrastructure: limitations and potential. *Rapport 05/2015. Norut Northern Research Institute*. Authors: Line Rouyet, Tom Rune Lauknes, Kjell-Arild Høgda. ISSN: 1890-5226.
- NRS. 2014 Kartlegging og overvåking av skredfare og infrastruktur ved bruk av radarsatellitter og InSAR-metodikk. *Rapport(2014)2. Norsk Romsenter*. Redaktør: Guro Dahle Strøm, Dag Anders Moldestad, Eli Katrina Øydvinn, John Dehls, Heidi Bjordal, Per Anton Fevang.
- NVE. 2016. Skredfarekartlegging i utvalgte områder på Svalbard. *Rapport nr 91-2016. Norges vassdrags- og energidirektorat*. Redaktør: Maria Hannus / Multiconsult. ISSN: 1501-2832.
- Sandwell, D.T. & Price, E.J. 1998. Phase gradient approach to stacking interferograms. *Journal of Geophysical Research* 103(B12), 30,183–30,20.

# VEDLEGG

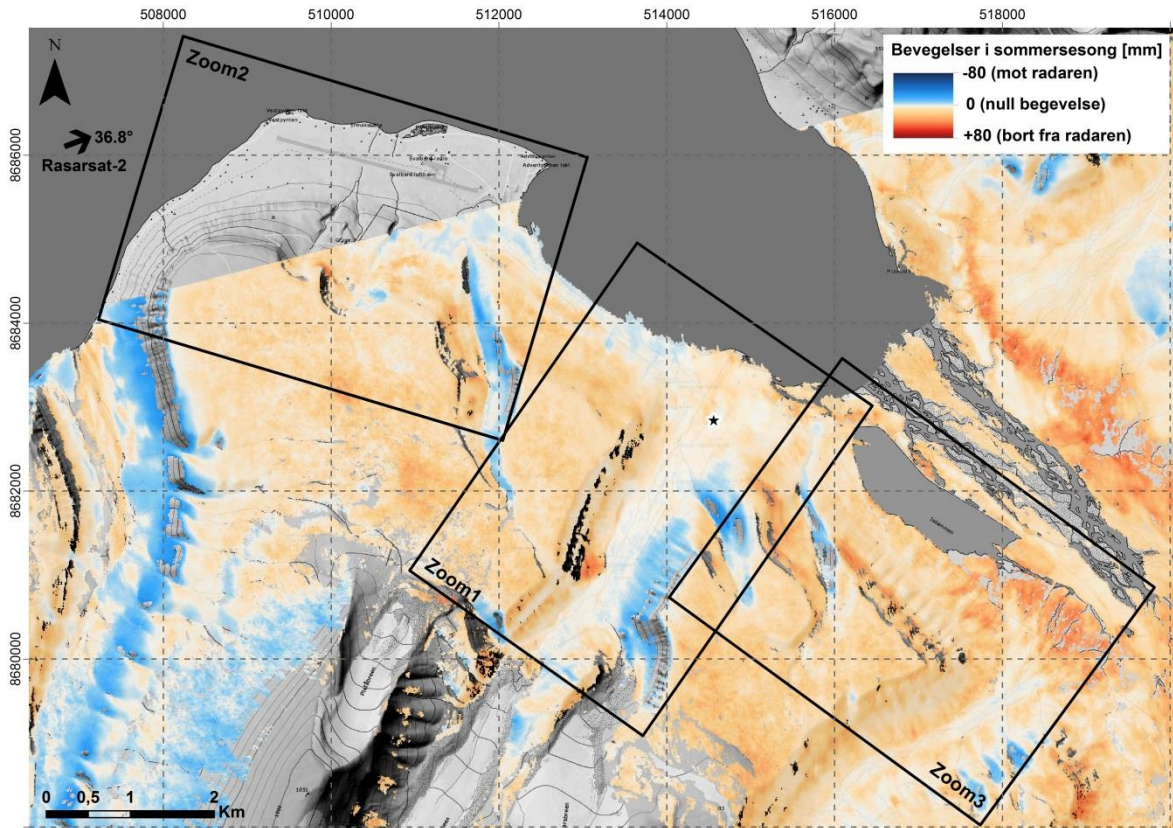


**Figur :** InSAR kart over studieområdet. Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i descending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren).

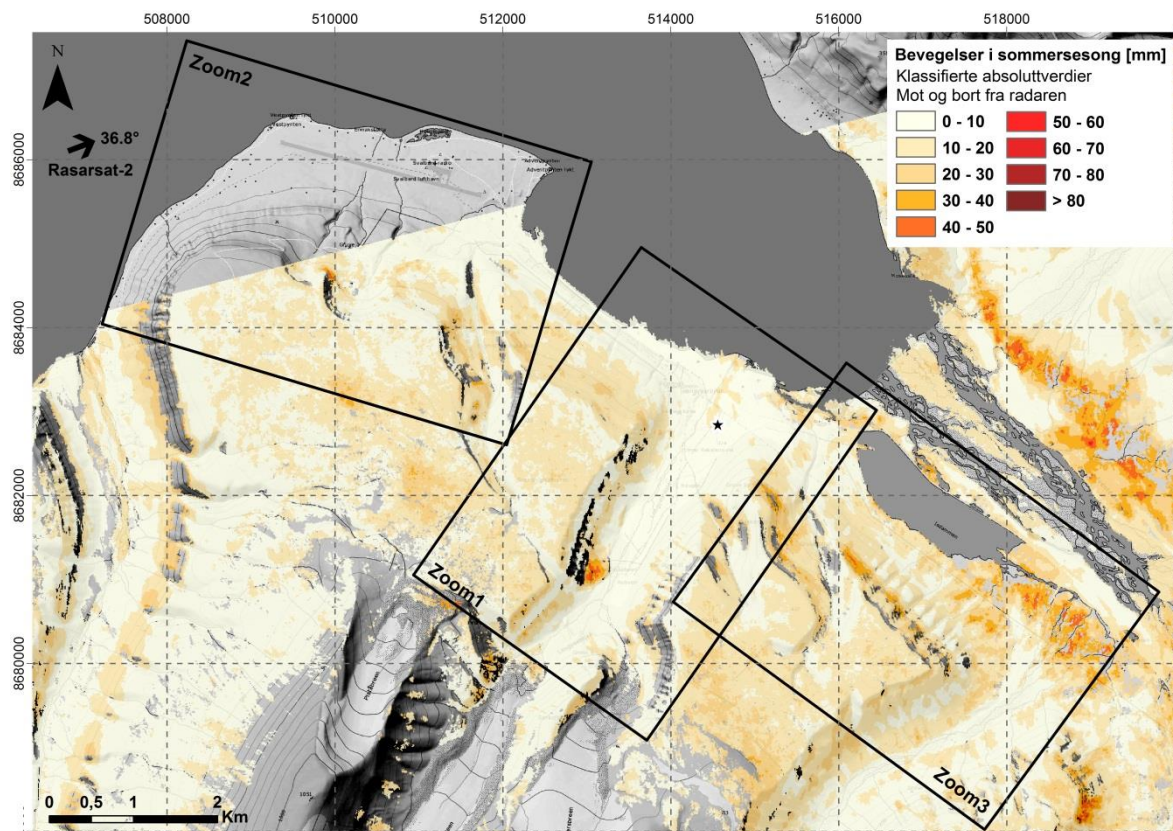


**Figur 34:** Klassifisert InSAR kart over studieområdet. Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i descending geometri. I absolutte verdier (skilles ikke bevegelse mot og bort fra radaren).



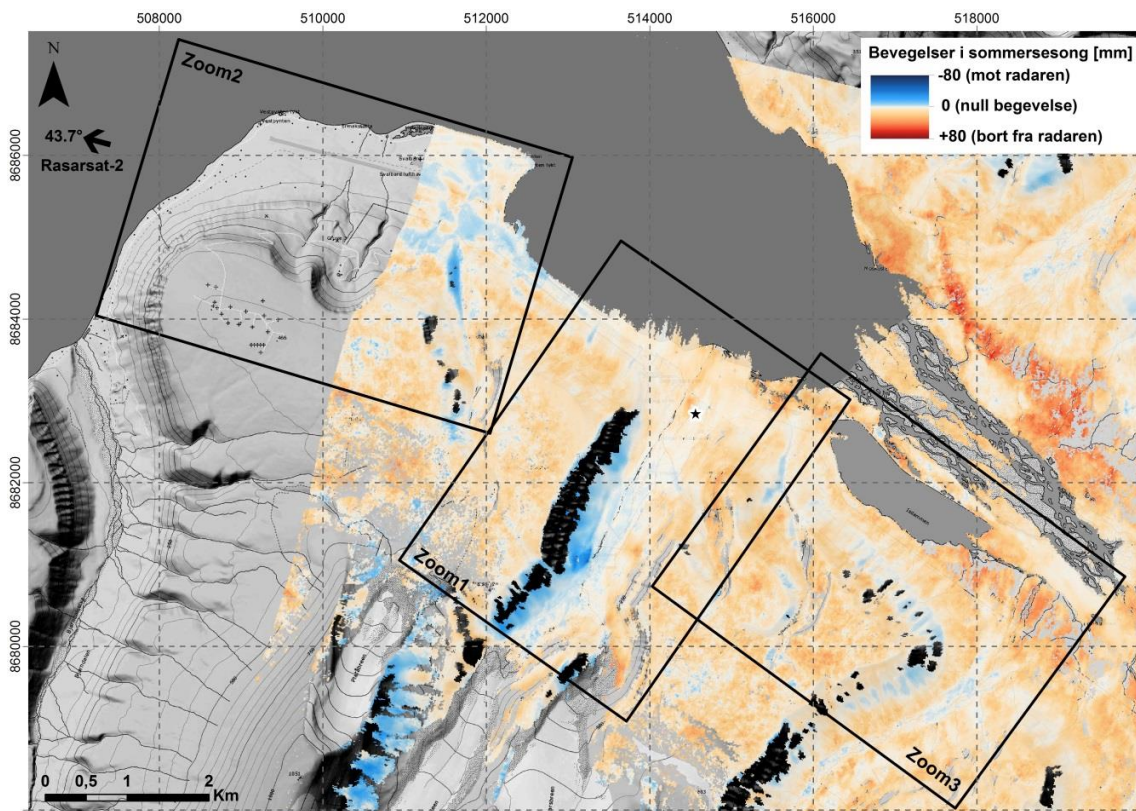


**Figur 35:** InSAR kart over studieområdet. Resultater fra Radarsat-2 Ultrafine i ascending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren).

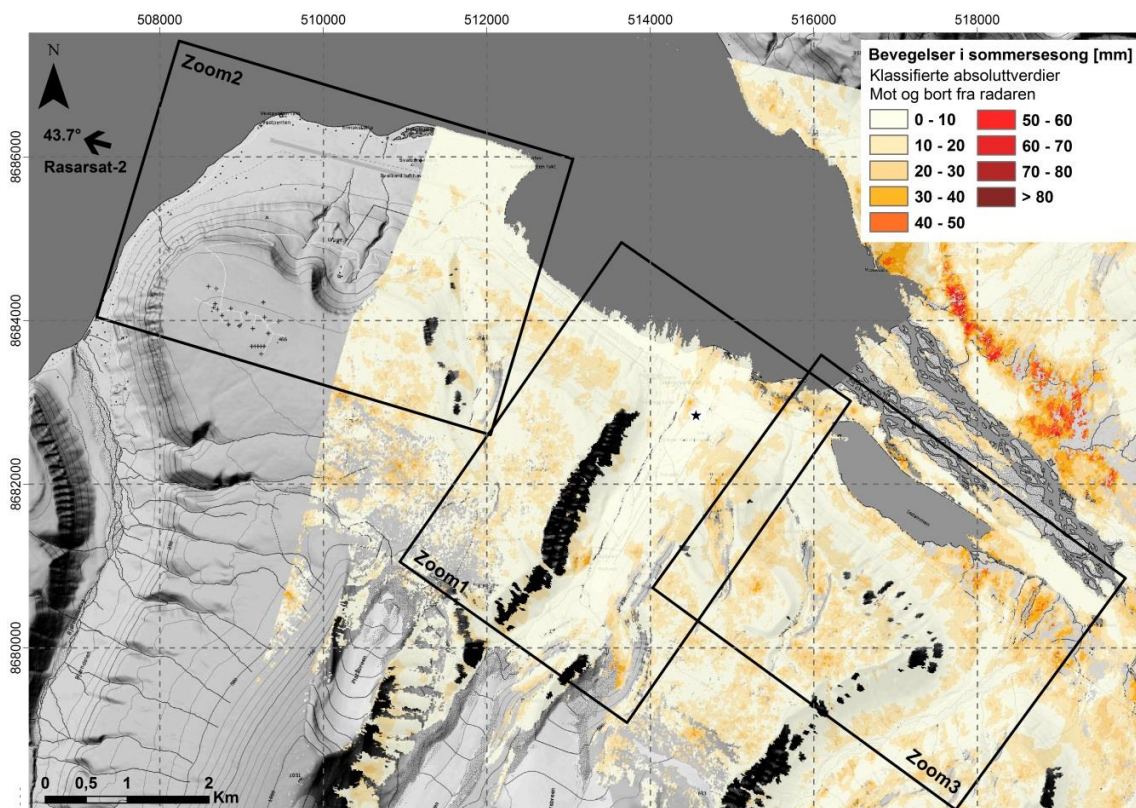


**Figur 36:** Klassifisert InSAR kart over studieområdet. Resultater fra Radarsat-2 Ultrafine i ascending geometri. I absolutte verdier (skilles ikke bevegelser mot og bort fra radaren).



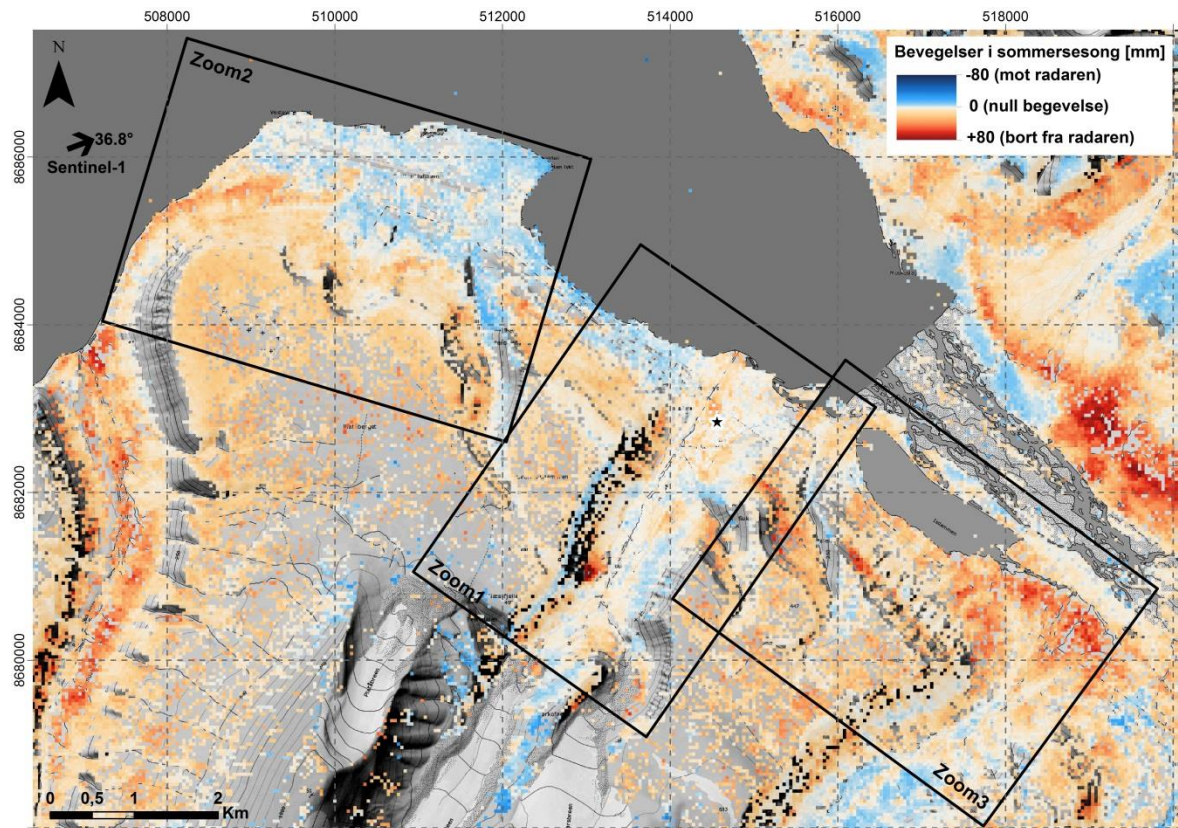


**Figur 37:** InSAR kart over studieområdet. Resultater fra Radarsat-2 Ultrafine i descending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren).

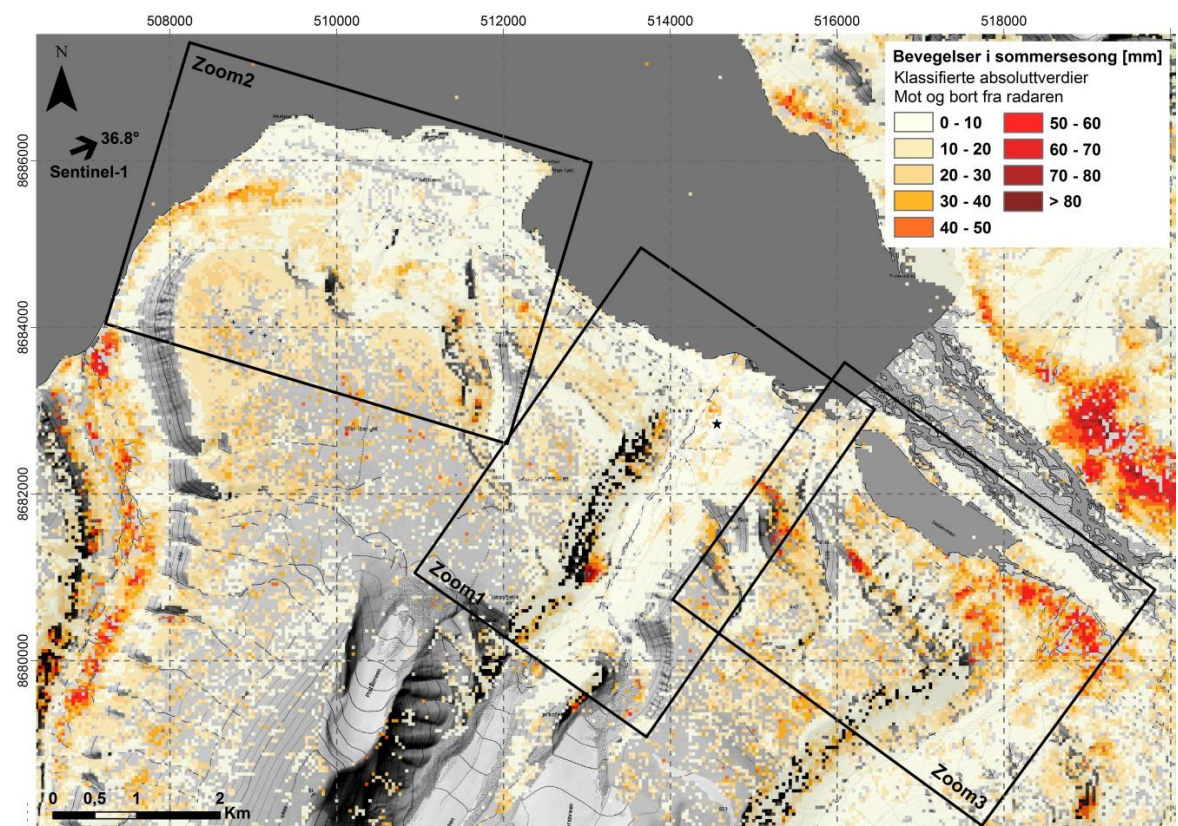


**Figur 38:** Klassifisert InSAR kart over studieområdet. Resultater fra Radarsat-2 Ultrafine i descending geometri. I absolutte verdier (skilles ikke bevegelser mot og bort fra radaren).



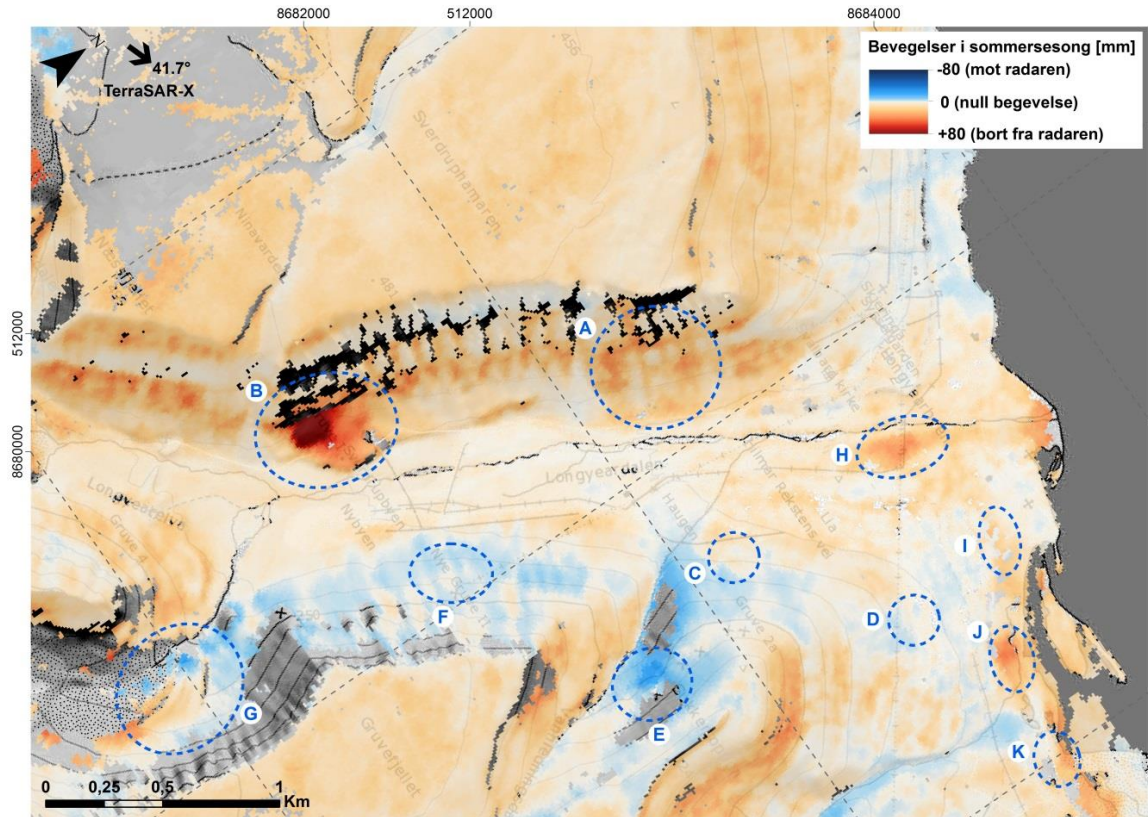


**Figur 39:** InSAR kart over studieområdet. Resultater fra Sentinel-1 IWS i ascending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren).

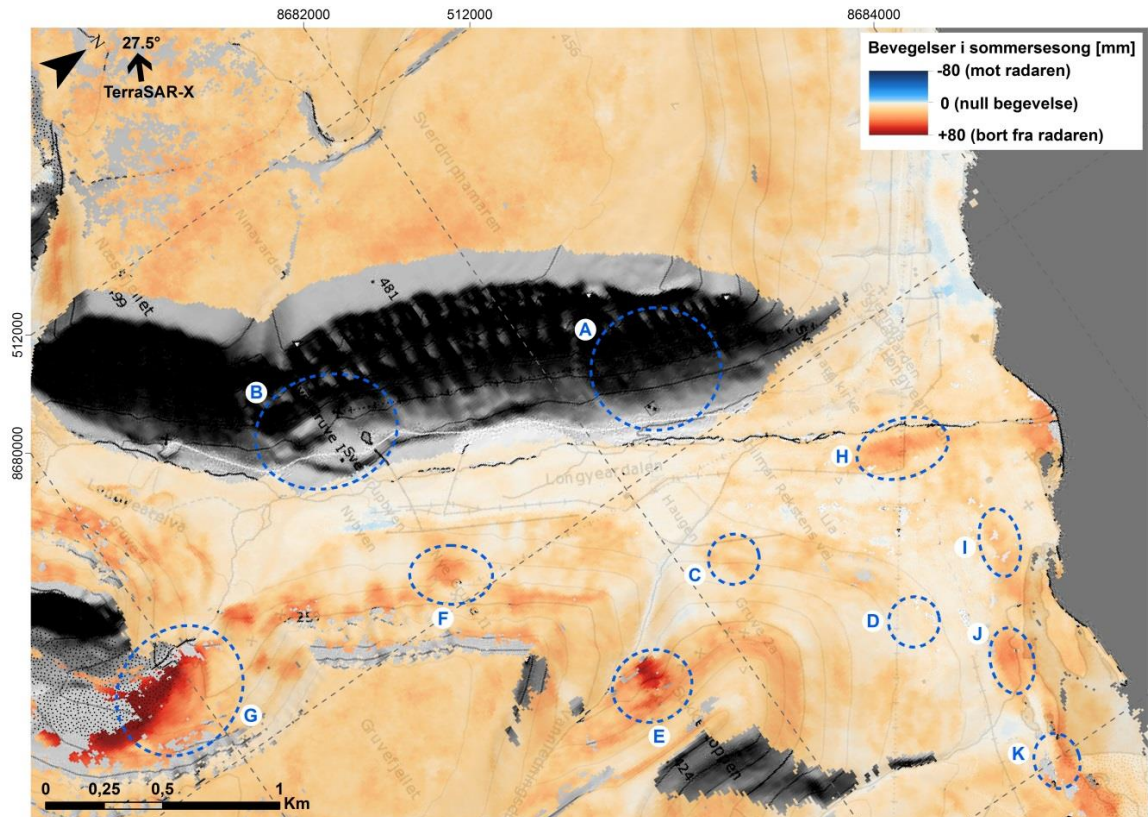


**Figur 40:** Klassifisert InSAR kart over studieområdet. Resultater fra Sentinel-1 IWS i ascending geometri. I absolutte verdier (skilles ikke bevegelser mot og bort fra radaren).



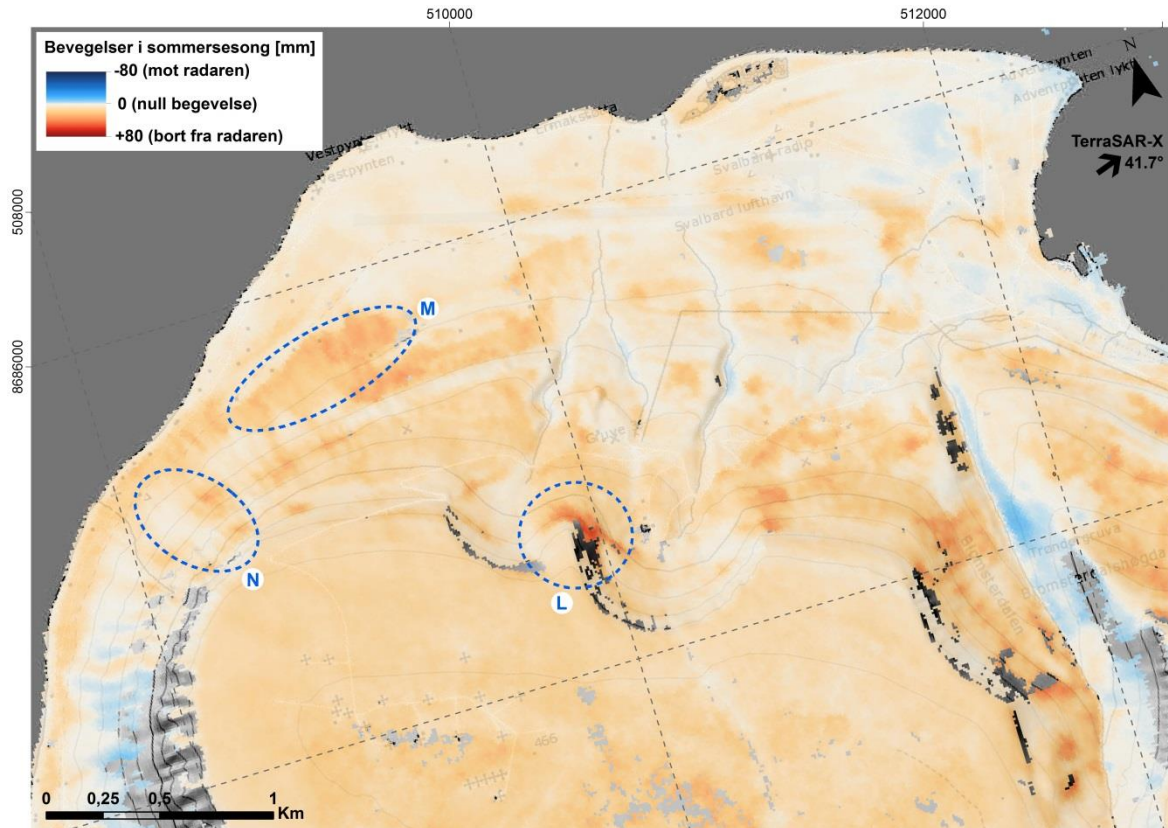


**Figur 41:** Zoom1: Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i ascending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren). Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i Kapittel 3.

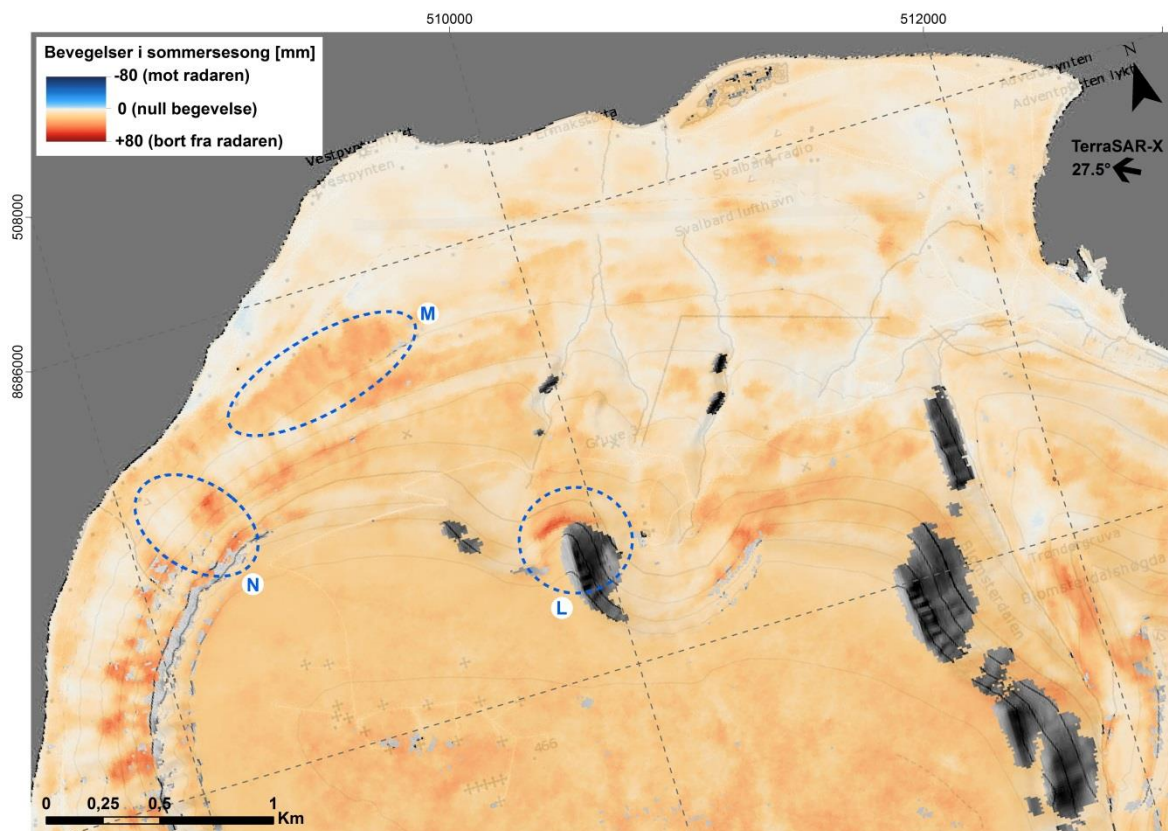


**Figur 42:** Zoom1: Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i descending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren). Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i Kapittel 3.



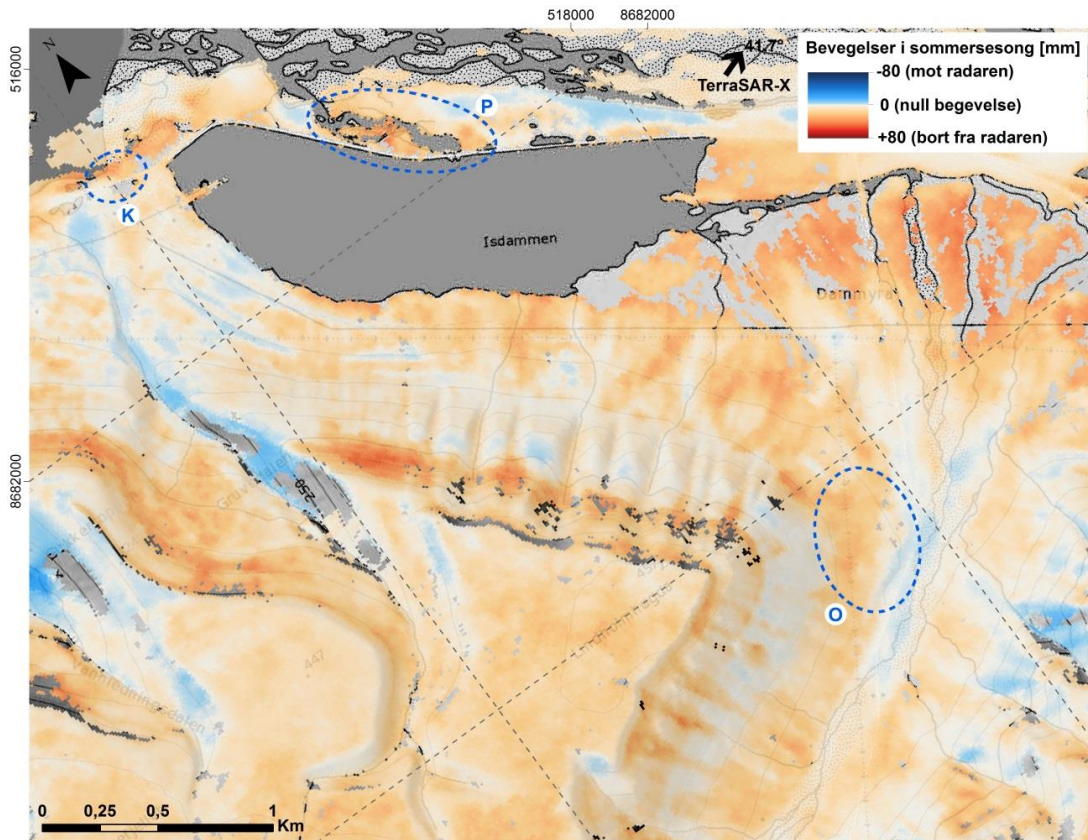


**Figur 43:** Zoom2: Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i ascending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren). Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i Kapittel 3.

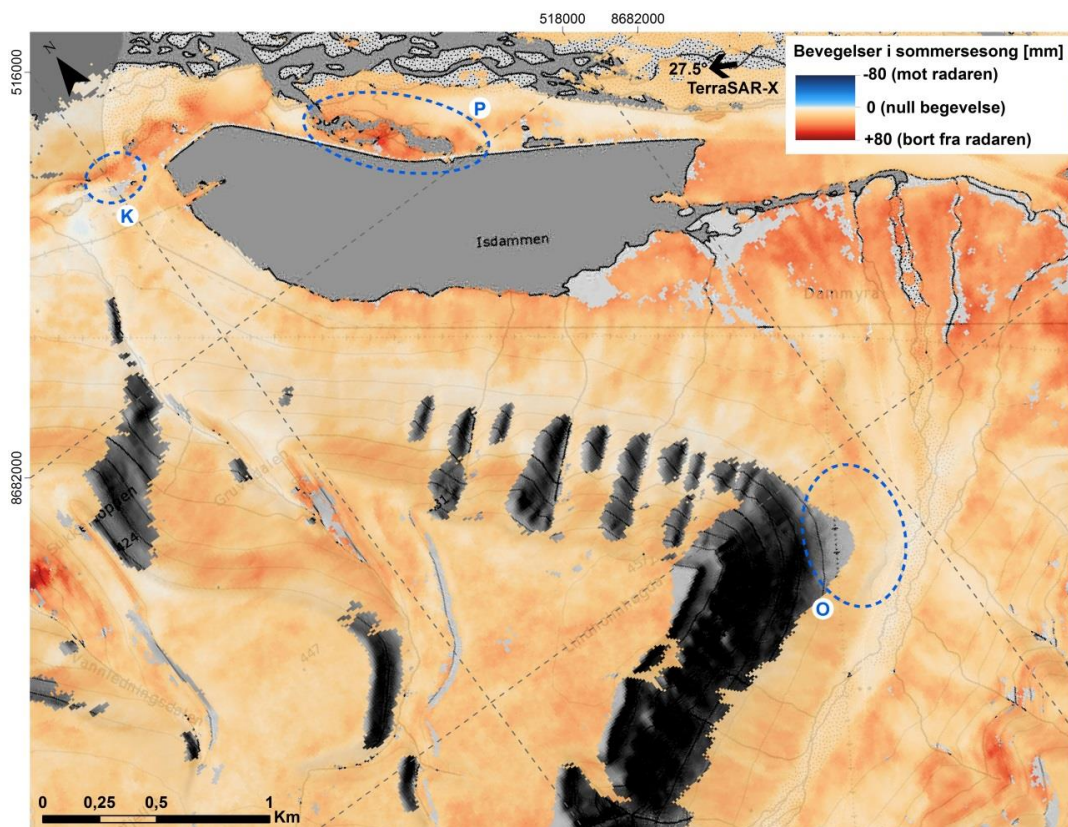


**Figur 44:** Zoom2: Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i descending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren). Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i Kapittel 3.





**Figur 45:** Zoom3: Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i ascending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren). Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i Kapittel 3.



**Figur 46:** Zoom3: Resultater fra TerraSAR-X StripMap Mode i descending geometri. Verdier langs LOS (positive/negative verdier: bort fra / mot radaren). Blå sirkler A-K referer til områder diskuterte i Kapittel 3.