



NVE

RAPPORT

NR. 12 / 2025

NVE Copernicustjenester

Sluttrapport for Copernicus aktiviteter i NVE 2022-2024 med anbefalinger

SKREVET AV

Liss M. Andreassen, Stefan Blumentrath, Rune V. Engeset, Sjur A. Kolberg, Kjetil Melvold,
Karsten Müller, Nils Kristian Orthe, Paul Weber, Aron Widforss og Solveig H. Winsvold

NVE Rapport nr. 12/2025

NVE Copernicustjenester. Sluttrapport for Copernicus aktiviteter i NVE 2022-2024 med anbefalinger

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat
Forfattere: Liss M. Andreassen, Stefan Blumentrath, Rune V. Engeset, Sjur A. Kolberg, Kjetil Melvold, Karsten Müller, Nils Kristian Orthe, Paul Weber, Aron Widforss og Solveig H. Winsvold
Omslag: Satellittbilder av Bergen, Folgefonna og Hardangervidda, 22. mai 2024. Fra venstre: Sentinel-3 SLSTR, Sentinel-2 MSI og Sentinel-1 SAR. Foto: Copernicus Sentineldata (2024)

ISBN: 978-82-410-2423-8
ISSN: 2704-0305
Prosjektnummer: P22-00063

Sammendrag: Med det europeiske jordobservasjonsprogrammet Copernicus har NVE og Norge fått tilgang på nøyaktig og forutsigbare data for å lage operasjonelle tjenester basert på satellittdata. Denne rapporten oppsummerer aktiviteter og leveranser gjort i prosjektet NVE Copernicustjenester 2022-2024. I tillegg gis det anbefalinger for fremtidige aktiviteter for utvikling og bruk av Copernicus i NVE. Prosjektet er delfinansiert av Norsk Romsenter gjennom bevilgninger for Nasjonal infrastruktur og tekniske aktiviteter (post-74). I prosjektperioden har NVE klart å lage innovative og stabile produksjonslinjer for deteksjon av flere produkter som er nyttige for varsling, beredskap og forskning. Grunnmuren for IT-infrastrukturen for håndtering av satellittdata i NVE nå lagt. Samarbeidspartnere i prosjektet er Norsk Regnesentral og NORCE som har bidratt med innovative resultater og algoritmer spesielt ved bruk av blant annet kunstig intelligens. I tillegg har Statens Vegvesen gitt verdifulle bidrag til prosjektet, samt Bouvet og Geodata.

Emneord: Satellittdata, Sentinel, Copernicus, naturfarer, kunstig intelligens, varsling, hydrologi, snøskred, klimaendringer

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

April, 2025



Innhold

Forord	6
Sammendrag	7
Summary	8
Liste med forkortelser	9
1 Introduksjon	10
1.1 Hvorfor Copernicus er viktig for NVE.....	10
1.2 Andre relevante prosjekter	11
2 Resultater	12
2.1 IT-infrastruktur og datahåndtering.....	13
2.1.1 Koordinering av Copernicusaktiviteter	14
2.1.1.1 Internt.....	14
2.1.1.2 Eksternt.....	14
2.1.2 Nasjonalt vitenarkiv og DOI.....	15
2.1.3 Forbedret Varsom app og Regobs for nett-dugnad	15
2.1.4 Produksjonslinje	17
2.1.5 Tidsseriedatabasen med tilhørende API.....	20
2.1.5.1 Regioner	20
2.1.5.2 Space time raster dataset.....	20
2.1.5.3 Statistikk.....	20
2.1.5.4 Tilgang til data via API	21
2.2 Snøskred	21
2.2.1 Metode	22
2.2.2 Svakheter og feilkilder	24
2.2.3 Videreutvikling – deteksjon med maskinlæring	26
2.2.4 Resultater og anvendelser	27
2.3 Snø og innsjøis	29
2.3.1 Snø	29
2.3.1.1 Snødekningsgrad med dyplæring.....	30
2.3.1.2 Forbedret skymaske for Sentinel-3.....	30
2.3.1.3 Valideringsrapport FSC	31
2.3.1.4 Videre utvikling av valideringsverktøy	34
2.3.1.5 Våtsnøprodukt	34
2.3.2 Innsjøis	35
2.3.2.1 Bruk av Sentinel-1 til iskartlegging og intensitetsbilde	35
2.3.2.2 Isdekningsgrad med dyplæring	36
2.3.2.3 Verdiøkende tjenester basert på satellitt, modell og observasjon.....	37
2.3.2.4 Tidsserieanalyser for kvantifisering av klimaeffekter	38
2.3.2.5 Overflatekorntype	38
2.4 Bre	38
2.4.1 Tidsserieanalyse av utvalgte fonner og breer	39
2.4.1.1 Kartlegging av lille istids maksimale utbredelse	39
2.4.1.2 Kartlegging av fonner som er i ferd med å forsvinne.....	44
2.4.2 Bresjøer	46

2.4.2.1	Tidsserieanalyse av utvalgte bresjøer	46
2.4.2.2	Automatisk kartlegging av bresjøer med Sentinel-2	46
2.4.2.3	Uttesting av automatisk overvåking av bresjø med Sentinel-1	53
2.4.3	Snølinjer	55
2.4.3.1	Snølinjeovervåking på bre med Sentinel-1	55
2.5	Flom.....	60
2.5.1	Bakgrunn for flomkartlegging i NVE	61
2.5.2	Kravspesifikasjon for flomareal	64
2.5.2.1	Krav og ønsker fra Skred- og vassdragsavdelingen.....	64
2.6	Nye muligheter for bruk i NVE	66
2.6.1	Deteksjon av jord- og sørpeskred med Sentinel-1 og -2 data.....	66
2.6.2	Endringsdeteksjon for konsesjonsbehandling, beredskap og tilsyn	69
2.6.2.1	Overvåking av vegetasjonsdekke som del av konsesjons- og tilsynsarbeid.....	70
2.6.2.2	Overvåking av grunnbevegelse ift. damsikkerhet	72
2.6.3	Mulighetsstudie ROSE-L, CIMR, LSTM og S2NG	72
2.6.4	Kartlegging av jordfuktighet med Sentinel-1	73
2.7	Tilgang på satellittdata og -produkter i NVE	74
2.7.1	Satskred Explorer	74
2.7.2	Varsom Xgeo/SeNorge.....	76
2.7.3	NVE Temakart	77
2.7.4	Varsom Iskart	78
2.7.5	Satellittdata og modeller under vårflom	78
2.7.6	Tidsseriedatabase og tidsserie API	79
2.7.7	Om satellittdata og fjernanalyse på nve.no	80
3	Anbefalinger for 2025-2027	81
3.1	Videreutvikle eksisterende tjenester og produkter	81
3.1.1	Kunstig intelligens.....	81
3.1.1.1	Kunstig intelligens i varslingstjenestene	82
3.1.2	Bedre modelltilstander	82
3.1.3	IT-utvikling og arkitektur	83
3.1.4	Innovasjon og FoU	84
3.1.4.1	Sørpeskred.....	85
3.1.4.2	Flomareal	85
3.1.4.3	Jordfuktighet.....	85
3.2	Utforske mulighetene i nye tjenester og nye sensorer og satellitter	86
3.3	Utvikle NVEs evne og kompetanse på anvendelse og data fra tjenestene	90
3.3.1	Utvikle bruk av data fra tjenestene	90
3.3.1.1	Innarbeide bruk av eksisterende satellittdata og -produkter	90
3.3.1.2	Standardisert brukerdokumentasjon	91
3.3.1.3	Avholde interne kurs	91
3.3.2	Snøskred	91
3.3.3	Snø	92
3.3.4	Innsjøis	93
3.3.5	Bre	94
4	Anbefalinger for aktiviteter fra 2028	96

5	Konklusjon	98
6	Referanser	99
7	Vedlegg	104

Forord

Prosjektet NVE Copernicustjenester har i perioden 2022-2024 hatt som mål å videreutvikle og effektivisere bruken av jordobservasjonsdata fra Copernicus-programmet i Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE). Gjennom prosjektet har NVE bygget en solid IT-infrastruktur og utviklet tjenester basert på data fra Sentinel-1, -2 og -3 satellittene, noe som gir grunnlag for forbedret beslutningsgrunnlag for blant annet varslingstjenestene, beredskap og forskning. I denne rapporten gir NVE anbefalinger for aktiviteter i neste prosjektperiode 2025-2027. Prosjektet er delfinansiert av Norsk Romsenter gjennom bevilgninger for Nasjonal infrastruktur og tekniske aktiviteter (post-74). Samarbeidspartnere i prosjektet er Norsk Regnesentral og NORCE som har bidratt med innovative resultater og algoritmer spesielt ved bruk av blant annet kunstig intelligens. I tillegg har Statens Vegvesen, Bouvet og Geodata gitt verdifulle bidrag til prosjektet.

Hovedfokus har vært på å utnytte Sentinel-satellittene til å utvikle operasjonelle og pre-operasjonelle tjenester som leverer pålitelige data til bruk i naturfarevarsling, beredskap og forskning. Prosjektet er bygget opp i delprosjekter hvor arbeidet er ledet og utført av fagfolk fra Skred- og vassdragsavdelingen (SV), Hydrologisk avdeling (H) og avdeling for IKT og informasjonsforvaltning (IKTI). I tillegg har fagfolk fra avdeling for Tilsyn og beredskap og avdeling (TB) for Energi og konsesjon (EK) bidratt i innsiktsarbeidet for å kartlegge arbeidsmetoder og behov for satellittdata. Xgeo- og SeNorge-teamene har også vært viktige i å gjøre satellittdata og -produkter tilgjengelige for brukere. Vi ønsker å rette en stor takk til alle som har vært involvert i prosjektet i NVE. Gjennom kunnskapssamarbeidet med Universitetet i Oslo og Meteorologisk institutt har NVE fått viktig faglig og teknisk støtte.

Vi takker Copernicus-programmet og den Europeiske romfartsorganisasjonen (ESA) for gratis og åpne satellittdata. Takk også til det nasjonale bakkesegmentet i regi av Norsk Romsenter, som driftes av Meteorologisk institutt, som sikrer tilgang til disse dataene. Vi ønsker også å uttrykke vår takknemlighet til Kartverket for deres bidrag til kommunikasjon om produkter og kvalitetssikring.

Rapporten er skrevet for NVE, Norsk Romsenter, universiteter, institutter, organisasjoner og andre interessenter som er opptatt av NVEs bidrag til nasjonale Copernicus-produkter og -tjenester innen kryosfære, hydrologi og naturfarer.

Oslo, april 2025

Hege Hisdal
direktør
Hydrologisk avdeling

Rune Engeset
seksjonssjef
Seksjon for bre, is og snø

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

Sammendrag

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) har siden 2015 brukt jordobservasjonsdata fra Copernicus-programmet for overvåkning og kartlegging. Copernicus leverer satellittdata fra Sentinel-satellittene, noe som gir NVE tilgang til nøyaktige og forutsigbare data for å gjøre bedre beslutninger i varsling av naturfarer, risikovurderinger og beredskap. Mange av produktene og tjenestene som NVE tilbyr basert på Copernicusdata, danner grunnlaget for lengre tidsserier som gjør det mulig å vurdere effektene av klimaendringer over tid.

I prosjektet NVE Copernicustjenester (2022–2024) har NVE bygget en stabil IT-infrastruktur og utviklet produksjonslinjer som gjør det mulig å prosessere store datamengder effektivt, basert på Sentinel-satellittene. Resultatene inkluderer tjenester som overvåker eller kartlegger snøskred, snødekning, innsjøis, breer og flom, i tillegg til å utforske ny bruk av satellittdataene. NVE har også gjennom prosjektet forbedret sine publikumstjenester, som Varsom-appen og Regobs, for å forenkle datainnsamling i felt. Resultater fra Copernicus-aktivitetene i NVE er med på å informere publikum om omfang og konsekvenser av klimaendringer og naturfarer.

For perioden 2025-2027 har NVE identifisert tre arbeidspakker: innovasjon og IT-utvikling, mulighetsstudier av kommende satellitter, og anvendelse og opplæring. Anbefalingene inkluderer videreutvikling av IT-infrastruktur for å håndtere nye satellittdata og integrasjon av kunstig intelligens, som for eksempel utvikling av hydrologiske modeller med KI for bedre simulering av for eksempel vannføring og dermed flom. NVE planlegger også å utforske bruken av satellittdata for å forbedre eksisterende modeller og produkter, blant annet gjennom arbeid med multisensorprodukter. Det anbefales å forberede seg på fremtidige satellitter fra Copernicus ved å benytte forløperdata fra liknende satellittsensorer tilgjengelig i prosjektperioden. I tillegg foreslås en egen arbeidspakke for å styrke opplæringen internt i NVE, som skal bidra til økt bruk av satellittdata i operative tjenester, spesielt innen varslingstjenestene for snøskred, innsjøis, flom, samt overvåkning av breer i Norge.

Etter 2028 forventer NVE å ha opparbeidet god kunnskap og gjort forberedelser til å kunne ta i bruk nye type satellittsensorer fra Copernicus Sentinel Expansion Missions. Dette vil støtte varsling, beredskap og forskning, og gi økt mulighet for integrering av satellittdata i tilsynsoppgaver, konsesjonsbehandling og energiforvaltning. NVE ser også et behov for styrket samarbeid med andre nasjonale aktører for å håndtere den økte datamengden.

Summary

Since 2014, the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) has used Earth observation data from the Copernicus program for monitoring and mapping. Copernicus provides satellite data from the Sentinel satellites, giving NVE access to accurate and reliable information for improved decision-making in natural hazard warnings, risk assessments, and preparedness. Many of NVE's products and services based on Copernicus data contribute to long-term data series, which enable assessments of climate change effects over time.

In the NVE Copernicus Services project (2022–2024), NVE established a stable IT infrastructure and developed production lines to efficiently process large data volumes from the Sentinels. The results include services that monitor or map snow avalanches, snow cover, lake ice, glaciers, and floods, while also exploring new uses of satellite data. The project has enhanced NVE's public services, such as the Varsom app and Regobs, to streamline field data collection. The insights gained from Copernicus activities help inform the public about the extent and impact of climate change and natural hazards.

For 2025-2027, NVE has outlined three focus areas: innovation and IT development, exploration of new satellite opportunities, and applications and training. The recommendations involve further IT infrastructure development to handle new satellite data and integrate artificial intelligence, such as developing AI-based hydrological models for improved simulations of water flow and flooding. NVE also plans to explore the use of satellite data to improve existing models and products, including work with multisensor products. Preparing for future Copernicus satellites by utilizing similar precursor satellite data available during the project period is recommended. Additionally, a dedicated work package is proposed to strengthen internal training at NVE to increase the use of satellite data in operational services, particularly the warning services on snow avalanche-, lake ice- and flood forecasting, in addition to glacier monitoring.

From 2028, NVE aims to be well-prepared to adopt new types of satellite sensors from the Copernicus Sentinel Expansion Missions. These sensors will support warnings, preparedness, and research, and enhance the integration of satellite data into regulatory, licensing, and energy management tasks. NVE also sees a need for strengthened collaboration with other national actors to manage the increased data volumes.

Liste med forkortelser

BSI	Bare Soil Index
CDSE	Copernicus Data Space Ecosystem
CIMR	Copernicus Imaging Microwave Radiometer
CSW	Catalogue Service for the Web
DIAS	Copernicus Data and Information Access Services
KI	kunstig intelligens
LSTM	Land Surface Temperature Monitoring
MLOps	machine learning operations / maskinlæringsoperasjoner
NBF	Nasjonalt brukerforum for Copernicus
NDSI	Normalized Difference Snow Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
ROSE-L	Radar Observing System for Europe in L-band
STAC	SpatioTemporal Asset Catalog
STRDS	space time raster datasets
FSC	Fractional Snow Cover
SCA	Snow Cover Area
SCDA	Simple Cloud Detection Algorithm
SWA	Snow Water Equivalent
DOI	Digital Object Identifier

1 Introduksjon

Jordobservasjonsdata er en viktig kilde til informasjon over store områder, spesielt der det ikke finnes målinger eller overvåkning på andre måter. Med det europeiske jordobservasjonsprogrammet Copernicus har NVE fått tilgang til nøyaktig og forutsigbare data for å lage operasjonelle tjenester basert på satellittdata som dekker hele landet. Copernicus er en stor satsning for å øke forståelsen av naturen, klimaforandringer og miljøet vårt. Det at Norge er med i Copernicus gjør at vi kan påvirke dataleveranser, produkter og tjenester de leverer. Programmet er i stadig utvikling, i samarbeid med blant annet European Space Agency (ESA), EU-kommisjonen, medlemslandene og det europeiske miljøbyrået EEA. Satellittdataene består av Sentinel-1, -2, og -3. I tillegg følger NVE med på tjenester levert av Copernicus sentralt som snø- og isprodukter (CLMS, 2024), samt katastrofehandtering (CEMS, 2024). NVE har blant annet nasjonalt ansvar for skred og hydrologi i Norge, og gjennom Varsom varsles snøskred, flom, jordskred og innsjøis (varsom.no, 2024).

NVE har lang tradisjon med å bruke satellittbilder. Siden 1990-tallet har jordobservasjonsdata blitt brukt for støtte til varslingstjenester og til forskningsformål. Dagens operasjonelle tjenester bygger på mange års utvikling av satellittjenester og produkter (for eksempel Andreassen m.fl., 2021b). I NVE er det også pre-operasjonelle tjenester, som betyr at de er under utvikling men har stort potensiale for å bli operasjonelle. NVEs Copernicus-aktiviteter har blitt delfinansiert av Norsk Romsenter i første fase av Copernicus, og i inneværende fase 2 kalt NVE Copernicustjenester 2022-2024. I tillegg har NVE samarbeid med forskningsinstituttene Norsk Regnesentral og NORCE om algoritmeutvikling. Statens vegvesen har også bidratt på NVE Copernicustjenester 2022-2024 spesielt med tanke på snøskredkartlegging (Satskred).

I denne rapporten dokumenteres hovedresultatene for NVE Copernicustjenester for hvert delprosjekt basert på definerte leveranser i prosjektet (vedlegg 1 «Leveranseliste»). Rapporten beskriver også anbefalinger for neste prosjektperiode 2025-2027 av NVE Copernicustjenester. Videre skisseres aktiviteter NVE ser for seg som reelle i budsjettfase 3 i EUs jordobservasjonsprogram Copernicus 2028-2035. Disse anbefalingene ses i sammenheng med Stortingsmeldingen for skred og flom (Energidepartementet, 2024) og med offentlig samarbeid på kunstig intelligens, samt prosessering og håndtering av satellittdata (for eksempel det nasjonale bakkesegmentet, www.satellittdata.no). Mengden av data fra Copernicus øker enormt i årene fremover mot 2030 og det forventes at dette utnyttes til bedre prosesser i det offentlige. Dette er noe NVE tar på alvor. NVE har laget innovative og stabile produksjonslinjer for deteksjon av flere produkt nyttige for naturfarevarsling, beredskap og forskning. Gjennom dette arbeidet har NVE etablert en grunnmur for IT-infrastruktur for håndtering av satellittdata.

1.1 Hvorfor Copernicus er viktig for NVE

Over mange år har NVE opparbeidet seg kunnskap om håndtering av satellittdata. Etter at Sentinel-data ble tilgjengelige i 2015 har NVE laget operasjonelle tjenester på disse dataene. Tilgjengeliggjøring av tjenestene og produktene bidrar til at NVE gjør bedre beslutninger i snøskred-, flom-, jord-, og isvarsling, risikovurderinger knyttet til naturfarer, beredskapssituasjoner, saksbehandlingsprosesser og feltplanlegging. I tillegg kan produktene og tjenestene bidra til bedre forskning, prosessforståelse og kartgrunnlag. Etter hvert danner de også grunnlaget for lengre tidsserier for å utforske effekter av klimaendringer. I

stortingsmeldingen for flom og skred (Energidepartementet, 2024) belyses viktigheten av arbeidet NVE gjør med Copernicusdata.

Her oppsummeres samfunnsnyttene av Copernicus satellittdata i NVE:

- Satellittdataene gir bedre varsler, og evaluering av varsler, og dermed reduseres negative konsekvenser av flom-, skred- og isproblematikk
- Satellittdataene gir bedre analyser som fører til bedre beslutningsgrunnlag internt i NVE, men også for allmennheten, kommuner og offentlige og private aktører
- Satellittdataene gir bedre kartlegging av flere tema for forbedring av NVEs karttjenester som tilgjengeliggjøres i NVEs publikumstjenester, for eksempel aktsomhetskart
- Visuell representasjon av satellittdataene er med på å bevisstgjøre publikum om omfang, nytte og konsekvens av klimaendringer og naturfarer
- Satellittproduktene bidrar til faktagrunnlag om klimaendringer, og dermed økt oppslutning i befolkningen om reduksjon av klimagassutslipp, og bedre tilpasning til effektene av klimaendringene.

For å få til dette må NVE lage brukerrettede produkter og tjenester nært brukerne. Dette vil NVE gjøre ved å bruke applikasjoner som brukerne kjenner, og ikke ved å utvikle nye applikasjoner for å publisere resultater. NVE skal kunne håndtere ny teknologi, nye metoder og algoritmer, spesielt i forbindelse med kunstig intelligens. Prosessering av deteksjonsalgoritmer krever at NVE må ha innovativ IT-infrastruktur som er stabil og forutsigbar for brukerne. NVE ønsker å tilrettelegge for nasjonalt samarbeid og deling av åpne data der vi selv benytter produkter og tjenester operasjonelt. En viktig del av arbeidet med Copernicus i NVE er å være forberedt til fremtidige satellittsensorer og teknologi.

1.2 Andre relevante prosjekter

Flere andre forsknings- og FoU-prosjekter er relevante for NVE Copernicustjenester:

- InSAR Norge: Norges geologiske undersøkelse (NGU) leder dette prosjektet sammen med NVE og Norsk Romsenter. Dette er en operasjonell tjeneste som måler og publiserer overflatedeformasjoner på www.insar.no. Resultatene brukes blant annet til å identifisere ustabile fjellpartier.
- Nasjonalt bakkeselement (NBS): Ledes av Norsk Romsenter og utføres av MET. Tjenestene distribuerer satellittdata til brukere i Norge.
- ESA Foundation Models for Climate and Society: Ledes av Norsk Regnesentral hvor NVE (Skred- og vassdragsavdelingen) er med som bruker og leverer data til prosjektet. Man prøver ut nye KI-algoritmer for deteksjon av flomareal.
- MASSIVE - Maskinlæring, massebalanse for isbreer, snø, in-situ-data, volumendringer og jordobservasjon: Ledes av Universitetet i Oslo hvor hovedmålet er å lage KI-algoritmer for deteksjon av breomkrets og overflateegenskaper på breer. NVE er med som bruker og tester produkter fra prosjektet.
- FoU-prosjekt om pre-operasjonell tjeneste for flom- og jordskreddeteksjon basert på maskinlæringsalgoritme.

2 Resultater

Det har vært seks forskjellige delprosjekter i NVE Copernicusprosjektet og resultater fra disse beskrives i kapittel 2:

- DP1 Data og styring
- DP2 Snøskred (Satskred)
- DP3 Snø og innsjøis
- DP4 Bre (Copernicus bretjeneste)
- DP5 Flom (Flomtjenesten)
- DP6 Nye muligheter for bruk av Copernicusdata

Basert på mange års utvikling av produkter og tjenester har vi i dag både pre-operasjonelle og operasjonelle tjenester kjørende på NVE. I prosjektperioden 2022-2024 har det vært fokus på å tilrettelegge for stabil IT-infrastruktur for å håndtere nye algoritmer og publisering av Copernicus-produkter.

Resultater fra NVE Copernicusprosjektet er rapportert i fremdrifts- og regnskapsrapporter tre ganger årlig til Norsk Romsenter (to ganger i 2024). I rapporteringen er det detaljert beskrivelse av aktiviteter og resultater i arbeidsperiodene. I dette resultatkapittelet rapporteres leveranser for alle delprosjektene i prosjektet på en samlet form. I enkelte tekstdeler av rapporten er det benyttet et KI-basert tekstverktøy.

Tabell 2.1: Oppsummering av operasjonelle og pre-operasjonelle aktiviteter etter tema som vi har i NVE i dag. De operasjonelle tjenestene er merket i kursiv.

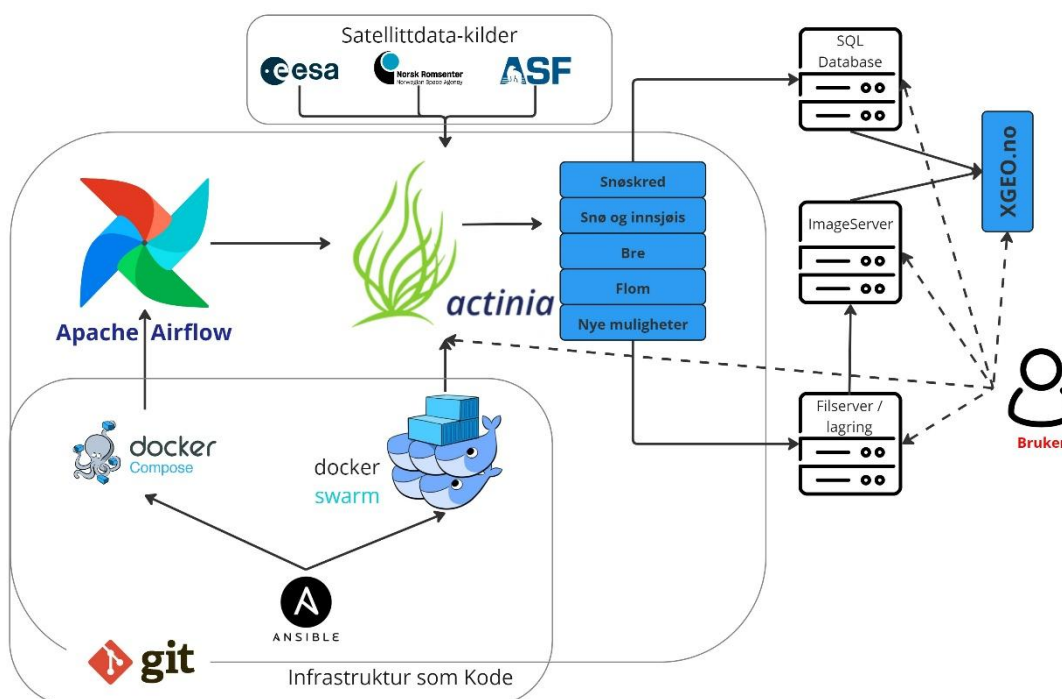
Snøskred	Snø	Innsjøis	Bre	Flomareal	Fellestjenester
<i>Satskred.nve.no</i> - Deteksjon av antall og størrelse av snøskred	<i>Snødeknings- grad, våtsnø.</i>	<i>Deteksjon av innsjøis, tidspunkt for islegging og isløsning.</i>	<i>Breareal, bresjøer, snølinjer på bre, endringer i fonner.</i>	<i>Oversvømt område (pauset fra og med 2023).</i>	<i>Skymaske, visualisering av satellittbilder (RGB), visualisering av geokodede Sentinel-1 intensitetsbilde, tilrettelagt tidsserier for analyse.</i>

I tillegg til pre-operasjonelle og operasjonelle tjenester og produkter i Tabell 2.1, følger NVE med på, og i noen tilfeller bruker Copernicusdata til informasjon om grunnvann og tørke, jordfuktighet, isganger i elver, jordskred og sørpeskred, samt snøforhold i forbindelse med vindkraftutbygging.

2.1 IT-infrastruktur og datahåndtering

Dagens operasjonelle tjenester i NVE basert på Copernicus satellittdata fra Sentinel-1, -2 og -3, har flere steg i oppbygningen av IT-infrastrukturen. Overordnet sett lastes satellittdataene ned og prosesseres slik at de kan brukes for å overvåke noe på jordoverflaten i tid, og til slutt at produkter og tjenester kan publiseres til brukeren. Vi har valgt å kalle disse tjenestene NVE Copernicustjenester, som består av flere typer operasjonelle tjenester: 1) en konstant prosess hvor en algoritme aktiveres med en gang et nytt satellittbilde er tilgjengelig, for eksempel overvåkning av snøskred, snødekningsgrad og innsjøis, eller 2) en prosess som settes i gang for definerte perioder av året, da det er mest hensiktsmessig å overvåke eller kartlegge noe, for eksempel en forespeilet algoritme for kartlegging av jord- og flomskred. Det siste alternativet, 3) er en semi-automatisk algoritme der man velger ut egnede satellittbilder for kartlegging, og en algoritme som plukker ut det ønskede området, men en analytiker justerer og kvalitetssikrer sluttproduktet, for eksempel kartlegging av breareal.

Copernicus-prosjektet er pionér for IT-infrastruktur i NVE både på grunn av håndtering av store datamengder som er tilgjengelig via Copernicus, og på grunn av at innovative algoritmer og metoder basert på forskning tas i bruk. For eksempel bruker NVE kunstig intelligens gjennom dyplæringsalgoritmer, en type maskinlæringsalgoritme som bruker kunstige nevralt nettverk (kapittel 2.2 og 2.3). En illustrasjon av systemarkitekturen for NVE Copernicustjenester beskrives i Figur 2.1. I NVE Copernicustjenester ble det valgt å standardisere produksjonslinjene på en plattform der algoritmer utviklet av forskjellige leverandører kan iverksettes på en enhetlig og sammenhengende måte.



Figur 2.1: Illustrasjon av IT-infrastrukturen for NVE Copernicustjenester.

I denne plattformen orkestrerer Apache Airflow produksjonslinjene og starter jobbene basert på tid eller oppdatering av datakilder. Selve jobbene i produksjonslinjene utføres i all hovedsak av prosesseringsmotoren actinia, der selve algoritmene er implementert. Plattformen er satt opp med «Infrastruktur som kode» som gjør det lettere å skalere regnekraft etter behov. I tillegg er det gunstig hvis man ønsker å flytte hele plattformen til sky-ressurser i framtiden hvis eller når dette blir hensiktsmessig, for eksempel kan dette bli nødvendig med Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE). Både Apache Airflow og actinia er verktøy med åpen kildekode som bidrar til å redusere kostnader ved å redusere behov for vedlikehold av egen eller konsulent-utviklet kode. Samtidig sikrer disse åpne tilgjengelige løsningene reproduktibilitet av produksjonslinjene. Dette er aktuelt hvis det kommer nye justeringer på algoritmer eller nye versjoner av satellittdataene.

Tilgjengeliggjøring av produktene til sluttbruker skjer i størst mulig grad gjennom de verktøyene brukerne i NVE er kjent med og bruker i arbeidshverdagen (kapittel 2.7). Det gjelder særlig ArcGIS ImageServer for leveranse av bildedata og Xgeo (i framtiden SeNorge) for tilgjengeliggjøring av bildedata i nettleseren og blant annet gi mulighet til å navigere gjennom tidsserier. Nye tilgangsmåter som ble satt opp gjennom NVE Copernicustjenster er muligheter for videre prosessering av rom-tidsseriedata i actinia, en tidsseriedatabase med API for aggregert statistikk avledet fra Sentinel-1, -2 og -3, samt mulighet for uthenting og visualisering av data ved hjelp av Jupyter Notebooks og/eller Shiny Apps.

2.1.1 Koordinering av Copernicusaktiviteter

2.1.1.1 Internt

I NVE har en fastgruppe for fjernanalyse med medlemmer fra avdelingene Skred og vassdrag, Hydrologi og Energi og konsesjon. Gruppen ble opprettet i 2016 og er et forum for å koordinere aktiviteter og prosjekter rundt fjernanalysedata, og for å sikre informasjonsflyt og planlegge aktiviteter som for eksempel drone-, fly-, og satellittseminaret «NVEs øyne i lufta» i november 2024. Gruppen gir innspill på prosjektenes produkter og tjenester, og at disse tilgjengeliggjøres i samsvar med brukerønsker der det har stor nytteverdi. Det diskuteres også brukerbehov for lagring av fjernanalysedata til NVEs IT-avdeling (IKTI) som innebærer spesielt Copernicusdata og arkivering av dronedata (de som kan brukes for analyse). I tillegg gjør gruppa noe innsiktsarbeid ved å samle inn informasjon via blant annet spørreundersøkelser.

2.1.1.2 Eksternt

NVE har aktiviteter og møter med flere andre offentlige etater. NVE ønsker å bruke det Nasjonale bakkesegmentet (NBS) som kilde for nedlastning av satellittdata. NBS eies av Norsk Romsenter (NRS) og driftes av MET. I Copernicus-prosjektet har NVE hatt to årlige koordineringsmøter med NBS. Denne aktiviteten hører til leveranse 1c i prosjektet, «Inkluder og vise Sentinel-1-data fra NBS i NVEs tjenester (snøskred, snø, is, flom og bre)». Nasjonalt bakkesegment leverer ikke geokodet Sentinel-1 data via sine tjenester i dag, men NVE prosesserer disse internt og visualiserer det i våre tjenester (se kapittel 2.3.2.1). Når leveranse av geokodet Sentinel-1 er klart kan NVE migrere til nedlastning av disse produktene via NBS.

NVE har siden 2009 vært medlem og engasjert seg i Norge Digitalt faggruppe for satellittdata og samarbeidet om bruk av Copernicus satellittdata nasjonalt. I tillegg har NVE bidratt på flere seminar i regi av Norsk Romsenter om nye Copernicus-satellitter (ROSE-L og CRISTAL/CIMR). NVE har videre bidratt på arbeidsmøte og innspill til rapporten om «Veikart for nasjonal styrking av

tverrfaglig forskning, utvikling og bruk av jordobservasjoner fram mot 2030 (VEIKARTJO2030)» (Johannesen, m.fl. 2024).

NVE er medlem av Nasjonalt brukerforum for Copernicus (NBF) som Norsk Romsenter og Miljødirektoratet holder i.

2.1.2 Nasjonalt vitenarkiv og DOI

For hjelp med å tilgjengeliggjøre resultater fra Copernicus-prosjektet og systematisere lagringen av disse, kontaktet vi NVEs fagbibliotek. Denne aktiviteten hører til leveranse 1d i prosjektet, «DOI og handle for data (permanent, unik ID og versjonskontroll.». Prosjektet NVE Copernicustjenester hadde behov for å kunne gi publiserte dokument en fast identitet ved bruk av DOI (digital object identifier) – en internasjonal standard for presis sitering og etterprøvbarhet av forskningsresultat. DOI er den foretrukne måten å gi publikasjoner en varig lenke, og er langt på vei forventet brukt ved publisering av forskningsresultat. En DOI kan tillegges ulike typer elektroniske publikasjoner som tekst-, bilde-, lyd- og videofiler, samt programvare. Lenken leder direkte til det publiserte dokumentet.

Ved oppstart av NVE Copernicustjenester hadde ikke NVE tilgang til å lage DOI. For å imøtekomme nasjonale mål og retningslinjer for åpen tilgang til vitenskapelige artikler (Kunnskapsdepartementet, 2017), ble forskningsresultater tilgjengeliggjort i vitenarkivet Brage. Løsningen støttet imidlertid ikke tildeling av DOI, så problemstillingen ble presentert for Sikt, leverandøren av tjenesten. I Sikt var de allerede godt i gang i arbeidet med å utvikle en Nasjonalt vitenarkiv for å samle lokale vitenarkiv og Cristin i én portal. Her skulle man også kunne tilegne dokument DOI. For å komme raskt i gang ble NVE invitert til å være pilot i overføring av poster til Nasjonalt vitenarkiv, og samlingen i Brage ble overført våren 2023 (NVA, 2024).

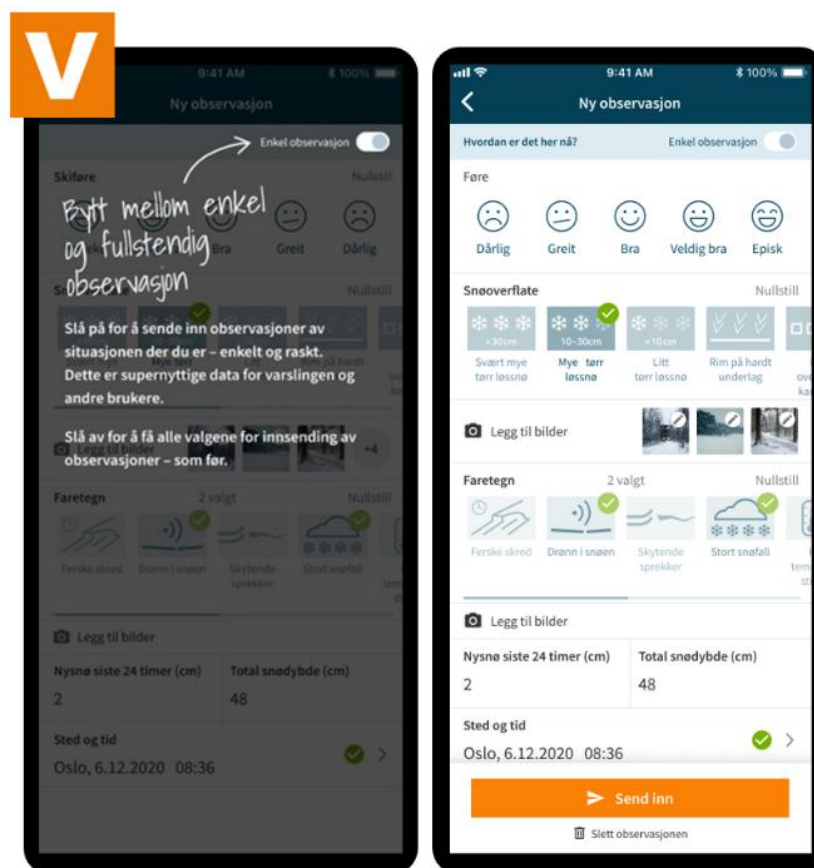
En forbedring i Nasjonalt vitenarkiv er en versjonskontroll lagt til. Versjonskontrollen gjør det lettere å oppdage om et dokument allerede er registrert, enn hva tilfellet har vært før. Slik unngår man å registrere dubletter, som lett kunne oppstå ved registrering av publikasjoner utgått fra samarbeidsprosjekt mellom ulike institusjoner. Tidligere har man kunnet oppleve å finne samme publikasjon registrert i flere av de samarbeidende institusjonenes samlinger. Nå er det lagt til rette for at et dokument registreres kun én gang.

Nasjonalt vitenarkiv forventes lansert innen utgangen av 2024, men NVEs og flere andre institusjoners samlinger er allerede ferdig overført og søkbare. I utgangen av oktober 2024 er det registrert tolv datasett, to rapporter og én konferansepresentasjon fra NVE Copernicustjenester i vitenarkivet.

2.1.3 Forbedret Varsom app og Regobs for nett-dugnad

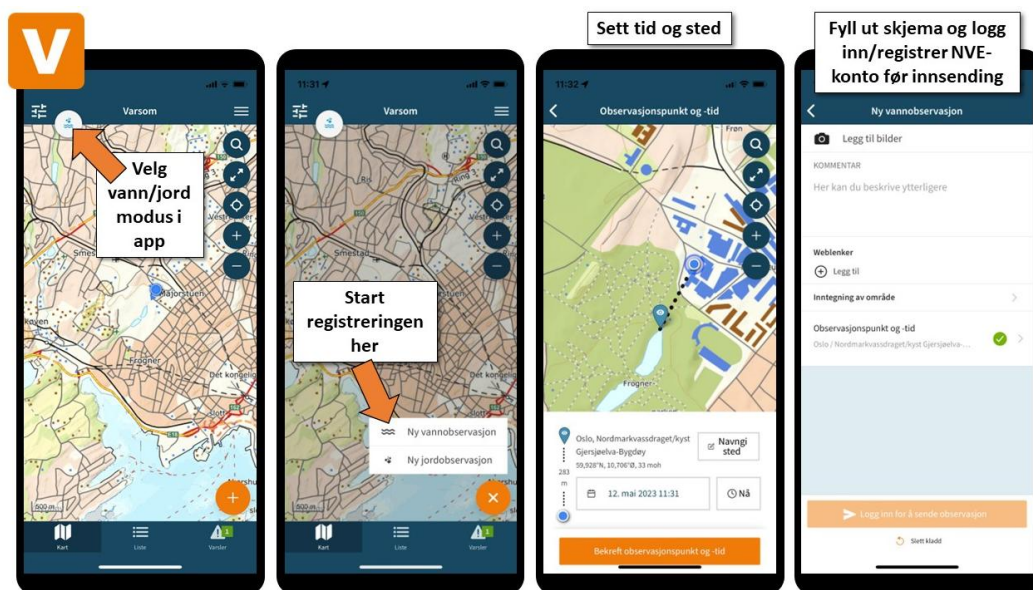
Varsom appen og Regobs er en kritisk støtte for varslingstjenestene, men brukes også for kartleggingsformål, som turplanleggingsverktøy, og i rednings- og beredskapssituasjoner. I tillegg til snø sendes det inn mange observasjoner relatert til innsjøis, jord og vann. Observasjoner på temaet jord og snø sendes også inn via integrasjonsløsninger fra for eksempel Statens Vegvesen eller fylkeskommunene. Det er mange som har bidratt til at Varsom appen og Regobs har blitt en kjempesuksess siden konseptet tok form i 2010, både for faglig personell og for allmennheten. Antall observasjoner ligger jevnt på litt mer enn 20 000 i året, men vi ser at snøobservasjonene har mer informasjon og flere utfylte skjemaer enn tidligere.

Gjennom NVE Copernicustjenester har vi forenklet nett-dugnaden (engelsk «crowd sourcing») ytterligere og lagt enda mer til rette for folkeforskning. Denne aktiviteten hører til leveranse 1e i prosjektet, «Forbedret Regobs for crowd sourcing (polygoner for skred/flom, enkel obs.». Figur 2.2 viser hvordan forenklingen av snø-skjemaet ser ut, der brukeren kan velge mellom to modus «enkel» og «avansert» observasjon. Statistikk fra vintersesongen 2023/2024 viser ca. 14 000 innsendte snøobservasjoner, hvor 1646 av disse ble sendt inn som «enkel observasjon». Det vil si at 12 % av registreringene har vært startet med enkel observasjon eller sendt inn i sin helhet via den forenklete løsningen.

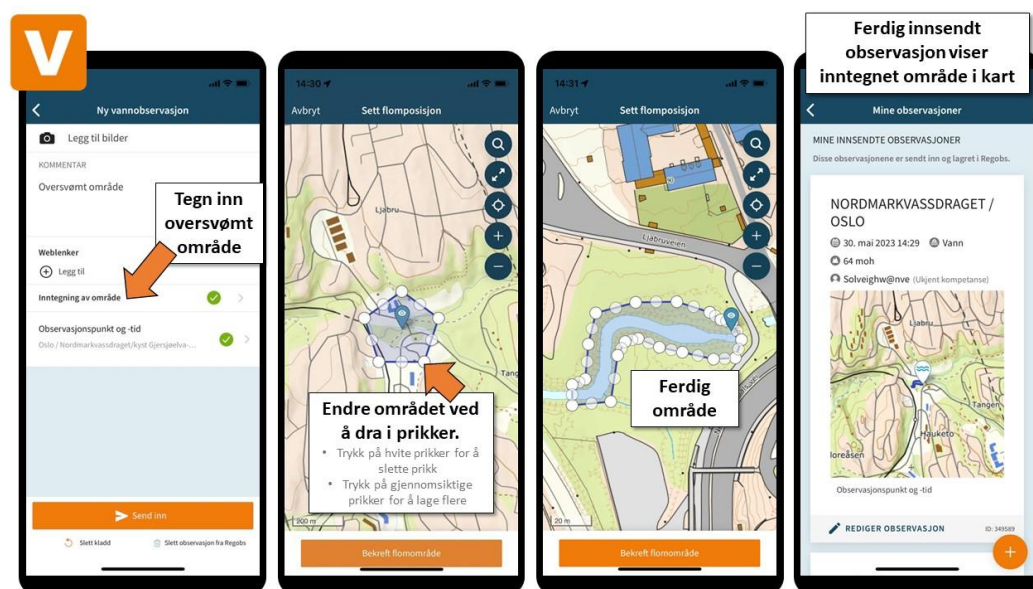


Figur 2.2: Enkel innsending av snøobservasjon.

Figur 2.3 viser forenklingen NVE har gjort på vannskjemaet. Innsendinger på vann har økt etter forenklingen ble gjort i mai 2023. I 2023 implementerte vi en funksjonalitet for å kunne tegne inn et snøskred eller jordskred med tilhørende løсне- eller utløpsområder. Denne funksjonaliteten er også tilpasset til vannskjemaet for å tegne inn oversvømt område i en overvann- eller flomsituasjon (Figur 2.4). Disse endringene gjør at vi kan samle inn mange flere data med enda mer relevant informasjon for bruk i validering av satellittbaserte data.



Figur 2.3: Enkel innsending av vannobservasjon.



Figur 2.4: Inntegning av polygoner av oversvømt område. Dette er også tilgjengelig for inntegning av snøskred og jordskred.

2.1.4 Produksjonslinje

Siden 2022 har algoritmene oppført i Tabell 2.2 blitt iverksatt i den nye Copernicus-plattformen i NVE. I motsetning til de tidligere løsningene utviklet før NVE Copernicustjenester, kjennetegnes de nåværende produksjonslinjene av at disse er modulisert. Dette innebærer at produksjonslinjene er delt inn i steg som bygger på hverandre slik at flere produkter kan bruke samme utgangspunkt uavhengig av leverandør av algoritme. Et eksempel er geokodede data fra Sentinel-1 som brukes i både Satskred, Våt-snø-deteksjon, kartlegging av innsjøis og snølinjeovervåking på bre.

Tabell 2.2: Oversikt over algoritmer mottatt i prosjektperioden med implementeringsstatus i Copernicus plattformen i NVE og tilgang til produktene

Algoritme	Delprosjekt	Leverandør	Status	Tilgjengelig via
Sentinel-1 radar «backscatter» intensitet	DP 2 Snøskred, DP 3 Snø og innsjøis, DP4 Bre, (DP 5 Flom)	NORCE	I produksjon	actinia API, ImageServer, xGeo, Iskart
Satskred med Unet	DP 2 Snøskred	NORCE	I produksjon	SatskredExplorer
Skydekke fra Sentinel-3 SLSTR med dyplæring	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon	actinia API, ImageServer, xGeo, Tidsserie API
Snødekningsgrad fra Sentinel-3 SLSTR med dyplæring (FSC-DL-F2) og S4S + 3 og 5 dagersprodukter	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon. Under implementering (S4S), 3 og 5 dagers produkter	actinia API, ImageServer, xGeo, Tidsserie API
Innsjøis med Sentinel-1	DP 3 Snø og innsjøis	NORCE	I produksjon	actinia API, Tidsserie API, Jupyter
Våtsnøkartlegging med Sentinel-1	DP 3 Snø og innsjøis	NORCE	Under implementering	actinia API, ImageServer. Xgeo, Iskart
Sentinel-2 fargebilder (naturlig og turkis)	DP 3 Snø og innsjøis DP4 Bre DP6 Muligheter	NR/NVE	Under implementering, Brukerne ønsker tekniske forbedringer	ImageServer, XGeo, Temakart, Iskart, seNorge
Utvikling av Sentinel-1 «back-scatter» intensitet for bre-linjer og bresjøer over tid	DP4 Bre	UiO/Hydrologisk avdeling i NVE	I produksjon	actinia API, Jupyter, Tidsserie
Bresjø-overvåking med Sentinel-2	DP4 Bre	Hydrologisk avdeling i NVE	I produksjon	actinia API, Jupyter

Tabell 2.3: Oversikt over algoritmer mottatt i tidligere prosjekter med implementeringsstatus og tilgang til produktene.

Algoritme	Delprosjekt	Leverandør	Status	Tilgjengelig via
Flomtjeneste med Sentinel-1	DP 5 Flom	NR	I produksjon fram til 2023, historiske produkter	ImageServer, xGeo
Snødekningsgrad Fra Sentinel-3 SLSTR og OLCI Salamon and Appel (SA)	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelige miljø, fases ut	ImageServer, XGeo
Sentinel-3 SLSTR fargebilder	DP3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelig miljø over føres til nytt miljø, nytteverdi må avklares	Imageserver, xgeo, iskart
Sentinel-3 OLCI fargebilder (naturlig og turkis)	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelige miljø, nytteverdi må avklares	ImageServer, XGeo, iskart
Sentinel-3 OLCI innsjøistype, også 3 og 5 dagers	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelige miljø, overføres til nytt miljø	ImageServer, XGeo
Sentinel-2 Snødekning SCA, innsjøisdekning binært	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelig miljø, kan overføres til ny hvis skymaske blir forbedret	
Valideringsprodukt S3vsS2 snø og is	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelig miljø, kan overføres til ny hvis skymaske blir forbedret	
Binært snødekke (SCA) Sentinel-SLSTR Snomap-Klein	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelig miljø, nyttverdi må avklares	
Sentinel-3 SLSTR Snøtemperatur og Kornstørrelse	DP 3 Snø og innsjøis	NR	Settes på vent til behov melder seg	
Sentinel-3 SLSTR Innsjøtemperatur	DP 3 Snø og innsjøis	NR	I produksjon i opprinnelig miljø, nyttverdi må avklares	

Tabell 2.3. Så lenge algoritmene fremdeles er i produksjon, krever disse en oppdatering av produksjonslinjene når det nasjonale bakkeselementet (NBS) går over til ny nedlastingsløsning mot slutten av 2024. Videre ønsker brukerne en teknisk forbedring for Sentinel-2 bildene i forbindelse med kontrast i bildene og ytelse i bildevisning via ArcGIS ImageServer. Produktene fra flomtjenesten har hatt uklar nytteverdi for brukerne. En teknisk feil i valg av referansebildene fra og med midten av 2023 reduserer dessuten kvaliteten i flomdeteksjon i nyere bilder. Uavhengig av denne tekniske feilen må nytteverdien i produktet avklares før produksjonslinjen rettes og flyttes til ny plattform. Flomtjenesten er nå satt på pause. I tillegg er det en rekke andre produkter i opprinnelig miljø som trolig vil bli overført til ny produksjonslinje, og det vurderes fortløpende hvilke som blir videreført (oversikt i Tabell 2.3).

2.1.5 Tidsseriedatabasen med tilhørende API

Det har blitt lagt til rette for at brukerne skal kunne hente ut aggregerte verdier fra Sentinel-1, -2 og -3. Denne aktiviteten tilsvarer leveranse «1f Utvikle system for aggregering av satellitt-, modell-, terreng- og feltdata for sammenlikning og validering av data», samt leveranse «3j Verdiøkende tjenester basert på satellitt, modell og observasjoner» (se vedlegg 1). actinia har en rekke innebygde funksjoner for å ta ut aggregert statistikk fra Copernicusdata som brukerne kan benytte seg av etter behov. Disse prosessene kan imidlertid være relativt tidkrevende særlig for lange tidsserier. Tidsseriedatabasen med tilhørende API for uthenting av data, muliggjør det å forhåndsberegne og lagre statistikk, slik at særlig regelmessig brukte aggregeringer kan hentes ut raskt av brukerne. Tidsseriedatabasen er bygd med inspirasjon i CF-konvensjonen og SensorML og inneholder metadata knyttet til både underliggende Copernicusdata, aggregerte serier og observasjoner som trengs for å forstå datainnhold.

Statistikk for tidsserier av rasterdata lagres i en for formålet designet database. Denne databasen inneholder informasjon om de tidsserier som lagres i den, de geografiske områdene seriene dekker, og den aggregerte statistikken for ulike tidspunkt. Dataene kan brukes for å finne informasjon om hvordan parametere er endret over tid, for eksempel snødekningsgrad, skydekke og isdekning.

2.1.5.1 Regioner

Hver serie er knyttet til en region, som er et geografisk avgrenset område i x-, y- og z-ledd. Disse er ofte hentet fra en ekstern kilde og er spesifikke for den typen data som samles inn. En region kan inneholde en annen region som har en avgrensning som er fullstendig innafor den ytre regionen. Dette kan blant annet brukes for å ha en geografisk avgrenset region som har underregioner som er delt opp i høydenivåer. Man kan også tenke seg en mindre oppdeling i x- og y-ledd, for eksempel kommuner innen fylkeskommuner.

2.1.5.2 Space time raster dataset

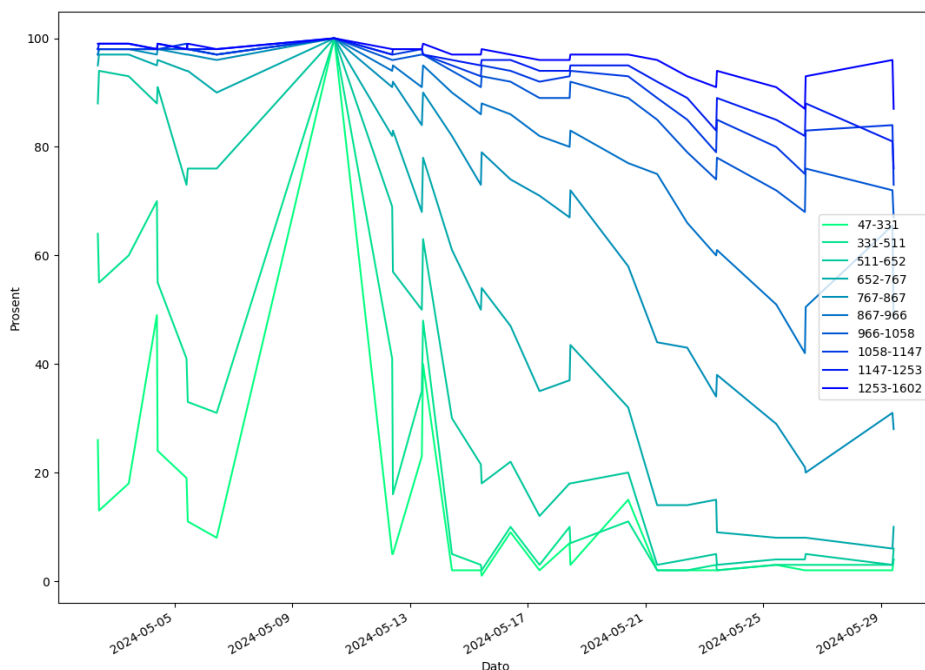
All data i databasen er aggregert statistikk av rasterprodukter. Databasen har en representasjon som heter space time raster dataset (strds), som beskriver hvilken sensor som samler inn dataene, hva datasettet beskriver, og i hvilken enhet det er representert i.

2.1.5.3 Statistikk

Statistikken som blir aggregert for hvert tidssteg i serien inneholder en rekke parametere, for eksempel gjennomsnitt, persentiler og varians. I tillegg registreres metadata, for eksempel antall gyldige celler, antall celler med skyer og så videre.

2.1.5.4 Tilgang til data via API

Data fra tidsseriene er offentlig tilgjengelige fra <https://copernicustimeseries.nve.no/v1/>. For å hente data må brukeren sende med en API-nøkkel som fås ved etterspørsel. Når dataene er hentet kan de analyseres på den måten som brukeren ønsker. I Figur 2.5 er snødekningsgrad over Vossavangen plottet etter at dataene er hentet ut fra tjenesten.



Figur 2.5: Snødekningsgrad i Vossavangen nedbørfelt per hypsografisk fordelt høydesone. Snødeknningen er angitt i prosent. Hendelsen 2024-05-10 er trolig en feildeteksjon av skyer. Dataene er hentet ut fra tidsseriedatabasen.

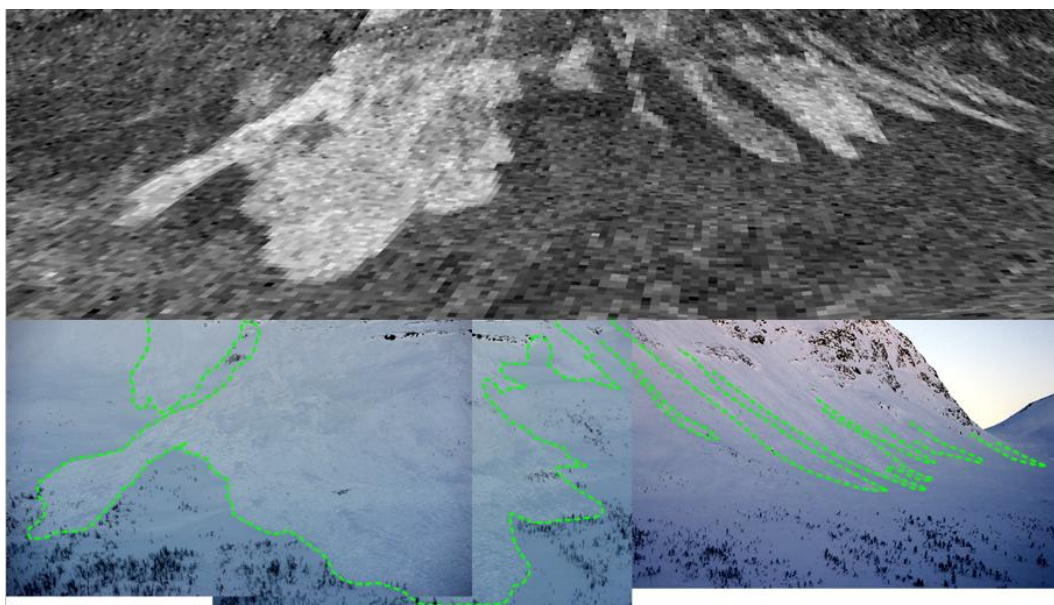
2.2 Snøskred

Snøskred er en av de hyppigste naturfarene i Norge. Snøskredfare er potensialet for at ett, eller flere snøskred kan forårsake skade på noe av verdi (Statham m.fl., 2018). Hver vinter går det flere tusen skred i norske fjell, men det eksakte antallet er vanskelig å måle. Antall og størrelse på skred som oppstår innenfor en viss periode og område omtales som skredaktivitet. Sannsynligheten for skade som følge av snøskred øker med økende skredaktivitet. Det er derfor viktig å kartlegge områder med høy skredaktivitet for å planlegge og prioritere sikringstiltak, overvåking og varsling. Per i dag kan dette kun gjøres i felt eller ved hjelp av fly eller helikopter, og er derfor begrenset til gitte tidsperioder og mindre områder. Satellittdata gir oss muligheten til å måle og overvåke skredaktivitet over store deler av landet med høy tidsmessig oppløsning. Kartleggingen av aktsomhetsområder vil bli mer nøyaktig, og i tillegg kan informasjonen brukes til å forbedre utløps- og varslingsmodeller, noe som vil bidra til bedre og mer effektiv varsling og sikring mot snøskred.

For fjernmåling av snøskred har det skjedd en stor utvikling den siste dekadene. Eckerstorfer m.fl. (2016) gir en oversikt over fjernmåling av snøskred ved bruk av optiske, lidar- og radarsensorer på terrestriske-, luftbårne- og satellittplattformer. Hvilken plattform-sensor-kombinasjon som bør brukes avhenger i stor grad av den romlige og tidsmessige skalaen for overvåkingsformålet. For regional overvåking av skredaktivitet er optiske og radarbaserte satellittdata den foretrukne teknologien. Svært høyoppløselige optiske satellittdata har blitt brukt for å oppdage

skredaktivitet etter en ekstrem skredsyklus i Sveits i januar 2018. Bühler m.fl. (2019) brukte Spot 6/7-data for manuelt å avgrense over 18 000 skred, og oppnådde høy nøyaktighet sammenlignet med observasjoner fra helikopter. Begrensing til optiske bilder er skydekke, skyggeområder og avhengighet av dagslys. I Norge og andre nordlige områder er bruken av optiske data svært begrenset gjennom lange mørkeperioder og mye dårlig vær gjennom vinteren. Radar er en aktiv målemetode som er uavhengig av daglys. I tillegg penetrerer radarbølger skyer nærmest uhindret. Dette gjør radar til det foretrukne verktøyet for kontinuerlige observasjoner over store regioner i Norge. Sentinel-1, i likhet med mange andre jordobservasjonssatellitter, går i polare baner. Dette medfører en hyppig og god dekning over polare områder.

Et snøskred løsner i en bratt fjellside og snømassene beveger seg nedover på grunn av tyngdekraften. Når friksjonen mellom snøen i skredet og underlaget blir stor nok stopper det opp. Området der snøen løsner kalles løснеområde. Området der snømassene stopper kalles avsetningen eller utløpsområdet. Snøoverflaten etter et snøskred er mye ruere og ofte tykkere enn omgivende snø. Den ruere overflaten og større massen vil føre til økt tilbakespredning av radarbølgene og fremstår dermed som «lysere» i bildet (Figur 2.6).

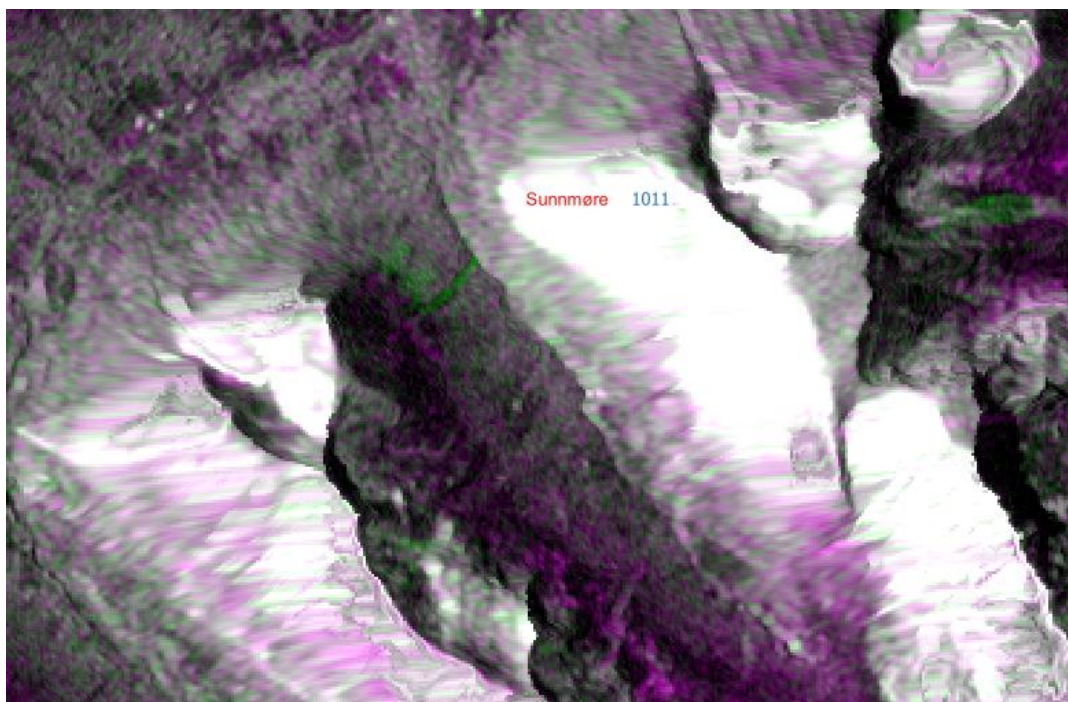


Figur 2.6: Snøskred i Lavangsdalen, Troms. Øverst: Avsetning etter et snøskred vises som lyse piksler i radarbildet. Nederst: Foto fra felt der ytterkanten av snøskredet er markert med grønn stiplet linje. Kilde: NORCE.

2.2.1 Metode

Det går mange snøskred i norske fjell i løpet av en vinter og det er ikke mulig å oppdage og markere alle skred som er synlige i satellittbildene manuelt. Vi bruker derfor en automatisk snøskreddeteksjonsalgoritme som er en videreutvikling av algoritmen presentert av Vickers m.fl. (2016 og 2017). Vickers m.fl. (2016) utviklet en algoritme basert på endringsdeteksjon for å identifisere områder med mulige skredmasser. Disse områdene ble deretter segmentert i to klasser ved bruk av en K-means ikke-veiledet klustermetode (engelsk "unsupervised clustering"), hvor klassene representerte skred- og ikke-skred-piksler i satellittbildet. Vickers m.fl. (2017) videreutviklet denne første prototypen til å bruke varierende terskelverdier for tilbakespredning fra skredmassene tilpasset gjeldende snøforhold.

Før algoritmen kan søke etter skred må radarbildene pre-prosesseres. Bildene lastes ned og geo-korrigeres, det vil si transformeres fra radarens eget koordinatsystem til et verdensomspennende koordinatsystem som UTM. Vi bruker programvaren GDAR (Larsen m.fl., 2005) til dette formålet. Deteksjonsalgoritmen ser alltid på et RGB-kompositt av to bilder (se Figur 2.7). Bildet som ble tatt før skredet løsnet kalles referansebildet, og bildet etter skredet kalles aktivitetsbildet. Når to aktive Sentinel-1-satellitter er tilgjengelige, er tidsforskjellen mellom referanse- og aktivitetsbildet 6 dager. Med kun én satellitt tilgjengelig siden februar 2021, er tidsforskjellen 12 dager. I vårt RGB-kompositt opptar referansebildet kanalene R og B, mens aktivitetsbildet opptar den grønne kanalen (G). Økt tilbakespredning, for eksempel fra skredavsetninger, vises derfor som grønne piksler i RGB-kompositten. Deteksjonsalgoritmen markerer disse "grønne" pikslene, og vi ekstraherer omrissene av sammenhengende grønne piksler og lagrer dem som polygoner i vektorformat.

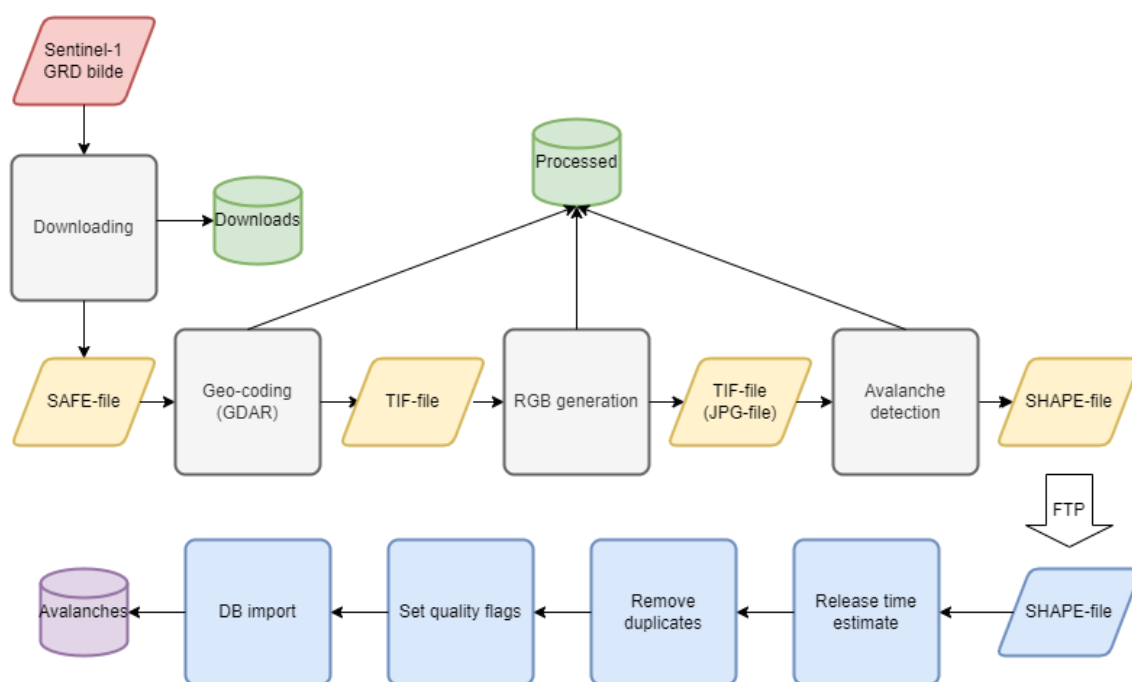


Figur 2.7: RGB-kompositt over fjell sørvest for Sæbø, Sunnmøre. Hvite områder viser fjellsider som vender mot radarsensoren, mens svarte områder ligger i skyggen og inneholder ingen informasjon. Grå områder indikerer lite endring i tilbakespredningen mellom opptakene av referansebildet 13. januar 2024 og aktivitetsbildet 25. januar 2024. Fiolette områder viser redusert tilbakespredning mellom opptakene, mens grønne områder viser økt tilbakespredning. Skredavsetninger fører til økt tilbakespredning, som kan ses i dalen omtrent midt i bildet.

Hver ny polygon sammenlignes med eksisterende polygoner i databasen for å vurdere om det er et duplikat av et allerede detektert skred. Hvis ja, slås polygonene sammen, og metadata oppdateres basert på best mulig informasjon om størrelse og tid fra hver skredpolygon. Med denne metoden er vi i stand til å estimere mulig utløsningstidspunkt mer nøyaktig enn 12 dager (tid for repeterende baner for en satellitt. Det er 6 dager med to satellitter) og få et mer korrekt areal av skredet fra forskjellige opptaksvinkler.

Kort kan prosessen for å ekstrahere omriss av skredavsetninger fra Sentinel-1-bilder beskrives med følgende punkter (Figur 2.8, Flere detaljer er beskrevet i Eckerstorfer m.fl., 2019.):

1. Nedlasting av Sentinel-1 GRD-produktene.
2. Geokoding av SAR-referanse og aktivitetsbildet (Eckerstorfer m.fl., 2019)
3. Generering av RGB-kompositt
4. Kjøring av deteksjonsalgoritmen på RGB-kompositten
5. Ekstrahering av potensielle skredpolygoner i vektorformat
6. Sammenligning med tidligere detekterte skredpolygoner for mer nøyaktig estimering av utløsningstidspunktet
7. Fjerning av duplikater
8. Vurdering av kvalitet ved å sammenligne overlapp med mulige feilkilder som jordbruksområder eller innsjø/elv
9. Lagring i database med metadata



Figur 2.8: Flytskjema som viser veien fra opptak av satellittbilde til lagring av et skredpolygon i databasen. Geo-koding, RGB sammensetning og skredeteksjon er basert på raster. Etter at skredet er detektert og ekstrahert blir omrisset og metadata lagret i vektorformat og post-prosessert.

2.2.2 Svakheter og feilkilder

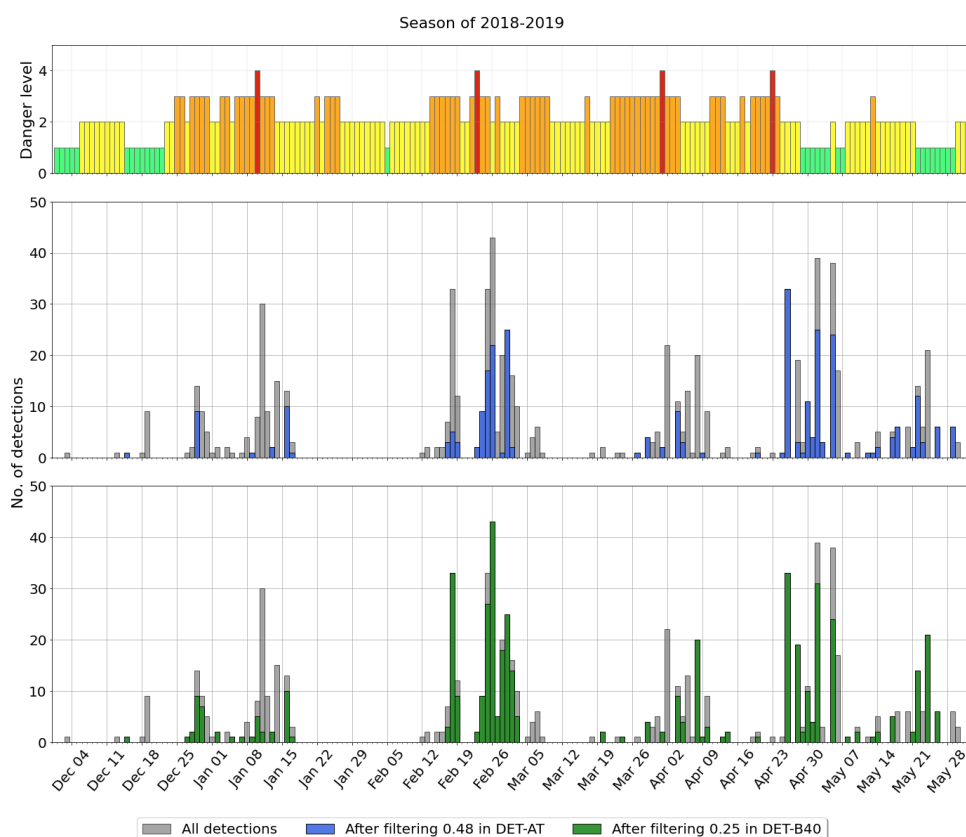
Snøskred løsner typisk i terreng med en helning brattere enn 30 grader. Rekkevidden og utløpsområder er, ved siden av snøforholdene, avhengig av fallhøyden og terrenget. Konservativt anslag av mulige utløpsområder er tilgjengelig for Norge. Vi bruker aktsomhetskart for snøskred (<https://temakart.nve.no/tema/snoskredaktsomhet>) som maske. Det betyr at vi ikke kjører deteksjonsalgoritmen utenfor skredterreng, både for å unngå falske deteksjoner og redusere beregningstiden. I tillegg blir innsjøer og hav maskert bort, fordi endring av vannoverflatens ruhet på grunn av vind kan gi økt tilbakespredning mellom referanse- og aktivitetsbilde og føre til falske deteksjoner. Til tross for disse filtrene forblir det en del begrensninger og feilkilder (Eckerstorfer m.fl., 2019):

- Skredstørrelse: Pikselstørrelsen på 20 m setter en nedre grense på hvor store skred vi kan oppdage i bildene. Vi tar utgangspunkt i at et skred må dekke minimum ti piksler

for å kunne identifiseres. Fremtidige sensorer kan oppdage mindre skred med høyere romlig oppløsning. Eckerstorfer og Malnes (2015) viste at flere og mindre skred var detekterbare i Radarsat-2 bilder med høyere oppløsning sammenlignet med Sentinel-1 bilder.

- Overgang fra våt til tørr snø: Det fleste falske positive kan knyttes til endringen i snøforhold fra vått til tørt mellom opptakene. En slik endring i snøen fører svært sjelden til naturlig utløste skred da snødekket typisk stabiliseres når den gjenfryser.
- Radar-skygge og layover-områder: I områder med svært bratt topografi, kan radar-skygge og layover redusere det detekterbare området. SAR-instrumentene ser sideveis og fjell eller andre bratte formasjoner introduserer en såkalt radar-skygge og layover i bildene. I disse områdene er snøskreddeteksjon ikke mulig.
- Kilder til falske alarmer: Radarbølger sendt fra Sentinel-1 vil i stor grad penetrere tørr snø. Tynne skred eller lite snø på bakken kan derfor være usynlig for instrumentet. Dette kan føre til falske alarmer fra endrede jordbruksområder, menneskeskapt infrastruktur, isbreer og jordskred.

Vi har undersøkt enkelte skredsykluser nærmere for å utvikle effektive filtre som kan fjerne eller i det minste redusere falske positive i datasettet (Flaten, 2023). Filtrene analyserer endringer i tilbakespredning i et RGB-kompositt over større områder og skiller mellom skredterreng og ikke-skredterreng. Dersom årsaken til økt tilbakespredning er knyttet til en generell endring i snøforhold, vil dette være synlig over større områder både innenfor og utenfor skredterreng (store "grønne" områder). Dersom et snøskred er årsaken til økt tilbakespredning, vil de "grønne" områdene derimot være mye mindre og begrenset til skredterreng.



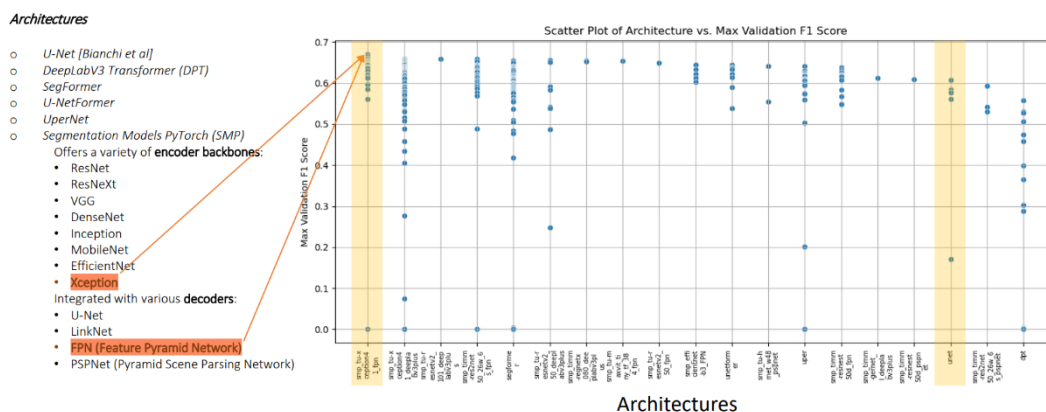
Figur 2.9: Filtrering av falske positive skreddeteksjoner over Lavangsdalen i Troms. Det øverste stolpediagrammet viser faregraden fra den nasjonale snøskredvarslingstjenesten Varsom.no for region Lyngen, der Lavangsdalen ligger. Stolpediagrammene i midten og nederst viser antall satellittdetekterte skred per dag i grått. Blå og grønne stolper representerer antall skred etter henholdsvis filtrering med to ulike filtre. Begge filtrene fjerner effektivt skred i perioder med lav skredfare. Resultatet med det grønne filteret viser noe bedre samsvar med skredaktivitet ved høye faregrader.

Flaten (2023) utviklet flere filtre basert på differanser mellom ulike områder i et RGB-kompositt. I Figur 2.9 er to forskjellige filtre anvendt, og den resulterende skredaktiviteten er sett i sammenheng med varslet faregrad for region Lyngen (varsom.no).

2.2.3 Videreutvikling – deteksjon med maskinlæring

NORCE utviklet en annen metode for å detektere snøskred i radarbilder for å forbedre noen av svakhetene beskrevet i forrige avsnitt (2.2.2). Først brukte de en U-nett-arkitektur som dyplæringsmetode (Bianchi m.fl., 2021). Bianchi m.fl. (2021) sammenlignet U-nett med terskelmetoden beskrevet i 2.2.1. Ytelsen til U-nett var allerede betydelig bedre enn terskelmetoden. Det er kun de minste skredene i valideringsdataene som U-nett har utfordringer med. F1-score steg fra 0,38 til 0,67 med det brukte datasettet (Bianchi m.fl., 2021). F1-score er et mål som brukes i maskinlæring for å vurdere nøyaktigheten til en klassifiseringsmodell. Det gir et balansert bilde av modellens evne til korrekt identifisering av positive tilfeller. F1-score varierer mellom 0 og 1, der 1 indikerer perfekt ytelse.

NORCE har testet mange forskjellige dyplæringsarkitekturer etter suksessen med U-nett (se Figur 2.10).

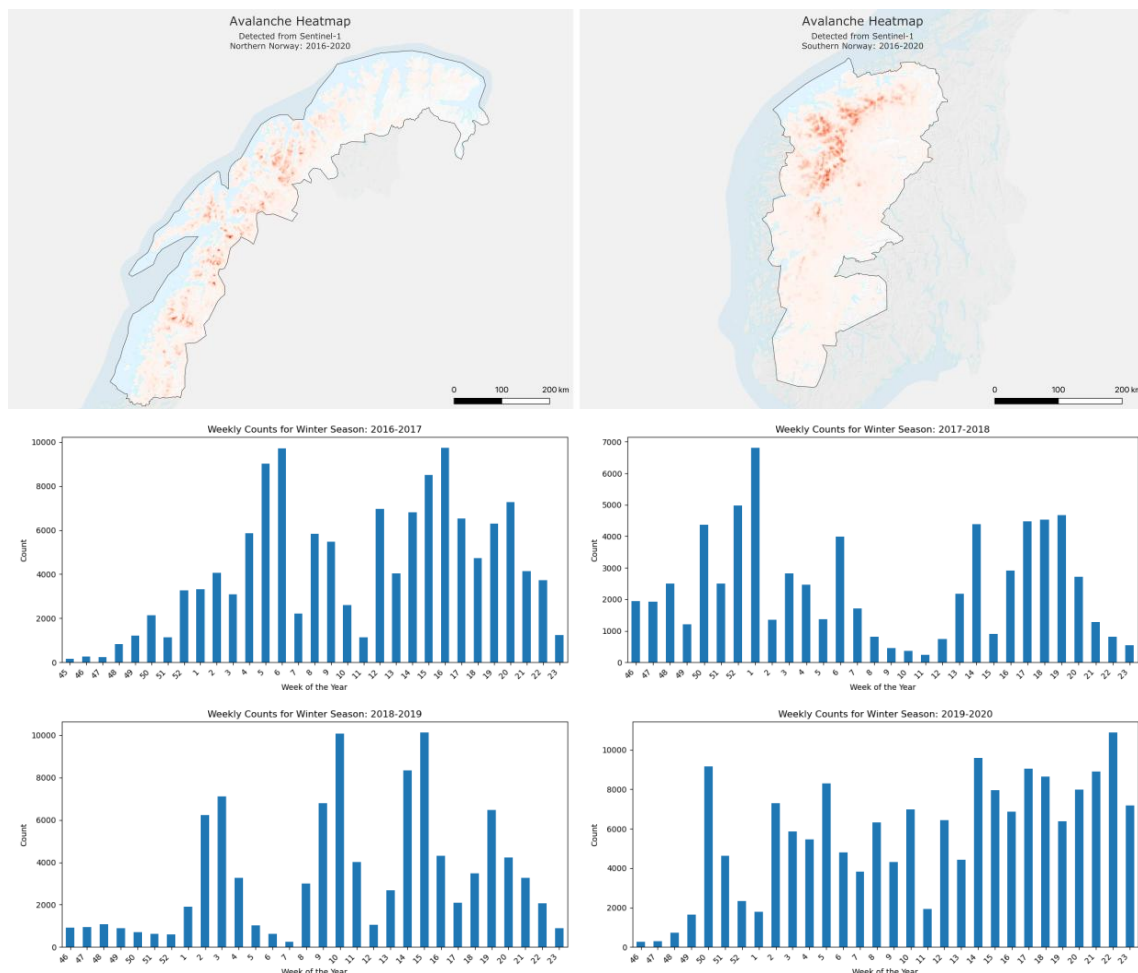


Figur 2.10: Vi har testet mange forskjellige maskin-læringsalgoritmer. Segmenteringsmodeller oppnår høyest F1 score. Kilde: NORCE

Den oppdaterte metoden innebærer bruk av en dyplæringssegmenteringsmodell trent for å kartlegge snøskred i Norge for vintersesongene fra 2016 til 2020, da Sentinel-1 opererte med to satellitter (Grahn m.fl., 2024). Modellen ble trent på en utvidet versjon av datasettet brukt i Bianchi m.fl. (2021), som besto av 4 507 annoterte bilder, hver på omtrent $3,6 \times 3,6$ km i størrelse. For dette formålet ble det utviklet en egen applikasjon hos NORCE, SkredLab, som hjelper med annotering av bildene. Modellarkitekturen med best ytelse kombinerer en Xception-encoder, forhåndstrent på ImageNet for effektiv ekstraksjon av skredpolygoner, med en Feature Pyramid Network (FPN)-dekker for å fange opp romlige trekk i flere skalaer. Inndata inkluderte ko-polariserte radarbilder fra Sentinel-1 tatt ved to påfølgende tidspunkter fra samme bane – samme prinsipp som i forrige algoritme. Helningsvinkler avledet fra en høyoppløselig digital høydemodell (DEM) brukes som ekstra lag i modellen. For å redusere falske positive implementerte vi også filtreringskriterier som minimum areal og høyde over havet for skredpolygonene, samt overlapp med arealtyper som er kjent for å skape falske positive, for eksempel jordbruk eller vann. Denne metoden er nå implementert som den operasjonelle deteksjonsalgoritmen hos NVE.

2.2.4 Resultater og anvendelser

Totalt detekterte dyplæringsmodellen 472 741 snøskred i perioden med to Sentinel-1 satellitter fra 2016 til 2020. Figur 2.11 viser den romlige fordelingen av alle deteksjoner over Nord- og Sør-Norge som "heat-map" og den tidsmessige fordelingen av disse deteksjonene som ukentlige antall (Grahn m.fl., 2024). Figur 2.12 viser avsetninger detektert over et mindre område i Sør-Lyngen (Grahn m.fl., 2024).

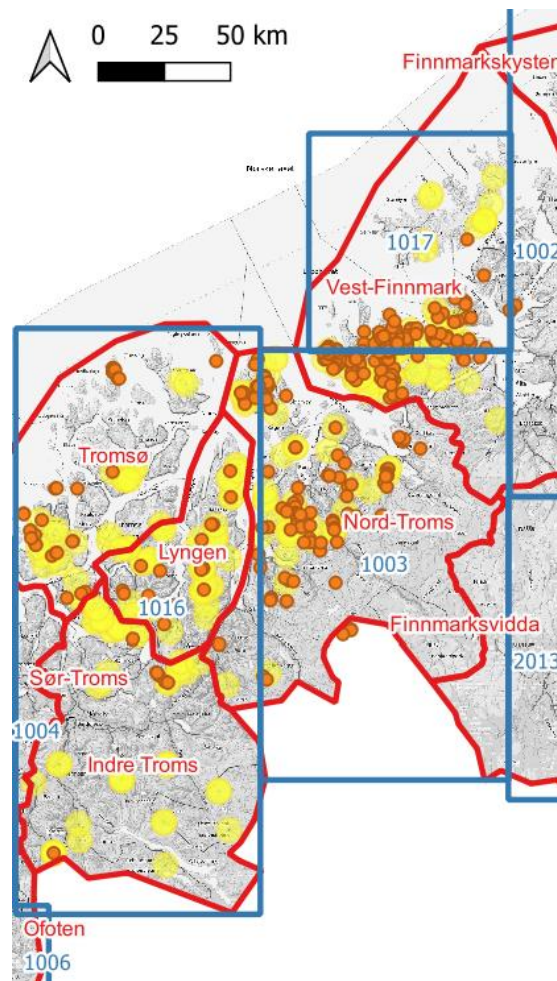


Figur 2.11: Snøskred detektert fra Sentinel-1 A og B fra 2016 til 2020, totalt 472 741 snøskred i Norge. Stolpediagrammene viser antall skred per uke for hver av de fire vinterne 2016-2017 til 2019-2020. Kilde: Grahn m.fl., 2020.

I Sør-Norge er det mest skredaktivitet på Nord-Vestlandet rundt fylket Møre og Romsdal. I Nord-Norge er områder med høy skredaktivitet mer spredt. Høyest aktivitet finner vi i Troms fylke. Skredaktiviteten gjennom vinterseasonen varierer fra år til år, basert på stolpediagrammene i Figur 2.11. I enkelte uker kan det gå opptil 10 000 skred i Norge. Generelt ser det ut til at det er mest skredaktivitet i månedene mars og april. Det er også i denne perioden vi forventer flere våte skred. Siden våte skred blir bedre detektert av algoritmen vår, kan dette føre til en bias i dataene.

Metoden ble brukt under en ekstremværhendelse i starten av mars 2023. Kraftig vind og mye nysnø traff Troms fylke og førte til utløsning av mange snøskred. Fem personer omkom som følge av snøskred under denne hendelsen, som er nærmere beskrevet i Kosberg m.fl., 2023.

Figur 2.12 viser kart over området som er analysert og skiller mellom skred som er automatisk og manuelt detektert i satellittbildene. Totalt ble 375 objekter identifisert manuelt, og 231 objekter ble identifisert ved hjelp av algoritmen beskrevet i avsnitt 2.2.1, som mulige snøskred. De detekterte skredene har ikke nødvendigvis løsnet 31. mars 2023, men i en periode på 12 dager i forkant av opptaket. I denne analysen er tidsoppløsningen 12 (eller 24) dager siden Sentinel-1B ikke lenger var tilgjengelig. Dette bidrar til større usikkerhet i deteksjonen, siden mulige skredavsetninger kan forandre seg mye over 12 dager og dermed ikke være gjenkjennelige i det hele tatt. Årsaker til disse forandringene kan være regn eller nysnø, kraftig snøtransport eller temperatursvingninger mellom tidspunktet skredet løsnet og aktivitetsbildet ble tatt (Kosberg m.fl., 2023).



Figur 2.12: Manuelt identifiserte (oransje) og automatisk identifiserte (gule) snøskred markert som punkter. Totalt ble 375 skred identifisert manuelt og 231 automatisk i radarbilder fra satellitten Sentinel-1A. De blå rektanglene viser prosesseringsområdene for satellittbildene. De røde polygonene markerer grensene til regionene brukt i snøskredvarslingen. Kilde: Kosberg m.fl., 2023.

Satskred-analyser bidrar til å forstå situasjonen bedre og til validering av snøskredvarslet som ble gitt i forkant av hendelsen. Antall og størrelse på de observerte skredene indikerer at varselet beskrev de forventede skredforholdene svært godt. Observasjonene fra satellitt ble også bekreftet gjennom skredkartlegging fra to helikopterverflyvinger.

2.3 Snø og innsjøis

I NVE er det en lang tradisjon å bruke informasjon fra satellittdata i varslingstjenestene. Arbeidet i dette delprosjektet er en videreutvikling av snøtjenesten og innsjøistjenesten med bruk av Sentinel-3 og Sentinel-1 data, maskinlæring og kobling mot modeller. I denne prosjektperioden har man også sett på muligheten for bruk av multisensor innenfor snø- og is-applikasjoner. Det har blitt jobbet med å forbedre skymasken for Sentinel-3 og tilrettelegge og aggregere data for bruk inn mot flomvarslingen og isvarslingen. For eksempel har snødekningsgrad (FSC) fra Sentinel-3 blitt brukt til å validere snødekningsgrad beregnet i NVEs flomvarslingsmodeller og snømodeller.

For innsjøis brukes Sentinel-3 og -2 data til å fastlegge isleggings- og isløsningstidspunkt. Info om isleggingstidspunkt brukes som input for NVE innsjøismodell, ved at den initierer når modellen starter opp simuleringen. I tillegg til satellittdata brukes også «time-lapse» kamera til å fastlegge isleggings- og isløsningstidspunkt. Ismodellen simulerer så videre utvikling av isdekket gjennom issesongen frem til isløsning, med basis i temperatur- og nedbørdata fra SeNorge-modellen. De satellittbaserte tjenestene gir nye muligheter for å overvåke snø- og istilstand gjennom en sesong, og er et viktig bidrag inn mot våre varslingstjenester.

Noe av begrensingen for bruk av satellittdata i forbindelse med snø- og iskartlegging er at skyklassifiseringen til tider feiler over snø- og isdekte områder. Dette er et kjent problem og kan lett føre til at man feiltolker skydekte områder som snø- eller isdekt. For å rette opp denne svakheten har NR jobbet med å forbedre skymasken for Sentinel-3 med bruk av maskinlæring. Resultatene av dette arbeidet har gitt oss et betydelig bedre skyprodukt hvor man også i større grad fanger opp problemene man hadde i skyskygger. Disse områdene kunne ofte bli klassifisert som snødekt da de har relativt lik signatur i reflektansbildet. Det er derfor veldig viktig at skymasken er god for å gi et bedre og mer nøyaktig snø- og isprodukt.

Brukerne av satellittprodukter har i liten grad full oversikt over begrensningene som finnes i satellittproduktene. Vår erfaring er at det er viktig å ha et godt og stabilt produkt for at dette skal bli brukt i varslingstjenestene. I løpet av prosjektperioden er det blitt utviklet verktøy som gjør det enkelt å ekstrahere ut informasjon fra satellittproduktene for å sammenligne disse med modellresultater som brukes i våre varslingstjenester, se kapittel 2.7.

2.3.1 Snø

I det foregående prosjektet (Snøistjeneste 2018-20) har det blitt utviklet snødekningsgrad representert binært («Snow Cover Area», SCA) og med snøfraksjoner («Fractional Snow Cover», FSC) i prosent (0-100 % snødekning). Dette arbeidet har fortsatt i dette Copernicus-prosjektet og det har vært en utvikling og uttesting av algoritmer over tid. De fleste algoritmene er blitt utviklet i andre prosjekter, men NR har gjort tilpasninger slik at de kan brukes på Sentinel-3 (SLSTR). I denne prosjektperioden er de forskjellige metodene blitt testet opp mot hverandre for å avdekke svakheter og styrker til de enkelte. I tillegg har det blitt jobbet med en videre utvikling av snødekningsgrad basert på maskinlæring. Det har vært fokus på å forbedre snødekningsgradproduktet i skogsområder og ved dårlige lysforhold. Dette arbeidet er i hovedsak blitt utført av NR.

I NVE er det etablert mer strømlinjeformede prosesseringstjenester, med bruk av actina og Airflow (kapittel 2.1). Dette gir bedre muligheter for analyse og overvåkning av prosesseringskjeden enn det vi har hatt frem til i dag. Dette vil lette bruken av satellittdata

internt og gjøre produktene mer robust slik at våre varslingsjenester i større grad kan ta disse i bruk. Under beskrives de enkelte leveransene i prosjektet.

2.3.1.1 Snødekningsgrad med dyplæring

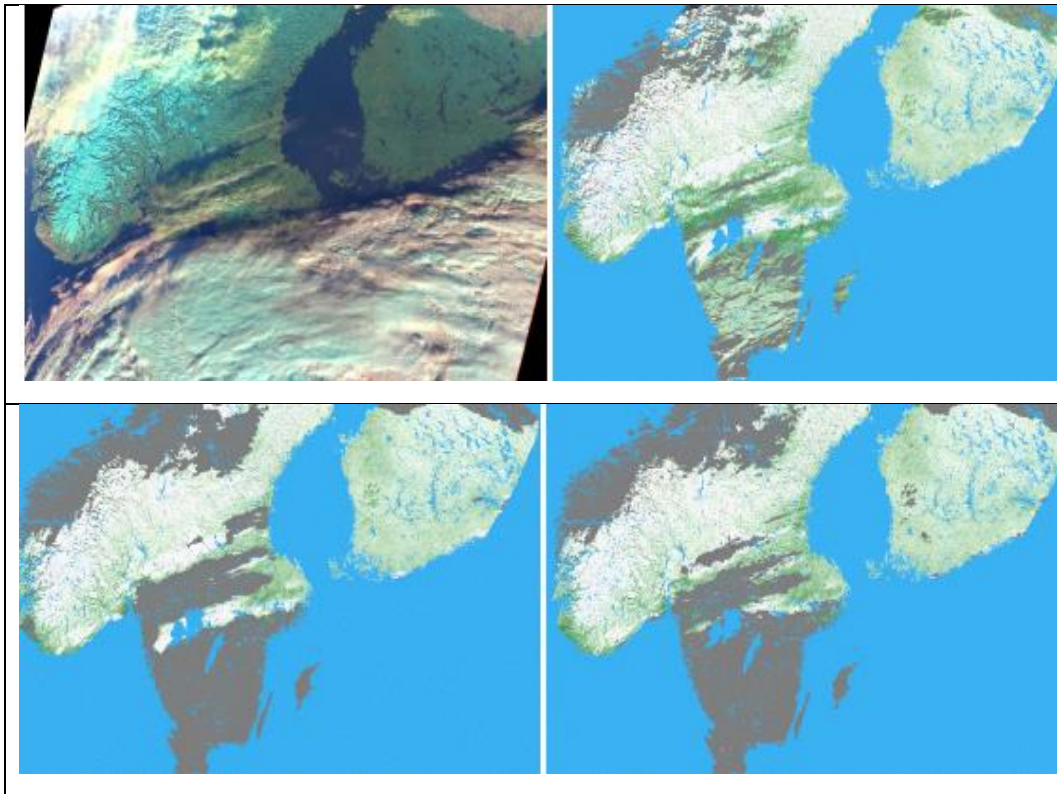
I løpet av 2023 og starten av 2024 har NR videreutviklet snødekningsgrad for Sentinel-3 SLSTR med dyplæring (DL). Denne aktiviteten hører til leveranse 3a, 3b og 3b1 i prosjektet og arbeidet er basert på en tidligere modell utviklet av NR i ESA-prosjektet AI4Arctic. Modellen har blitt videreutviklet ved å legge til mer treningsdata som dekker skog og satellittbilder uten snø. Dette økte ytelsen i disse områdene. Feilraten for områder med skog ble redusert fra 11,2 % til 7,4 % (Waldeland m.fl., 2023). Dyplæringsalgoritmen som ga best ytelse er basert på U-Net. En nærmere beskrivelse av arbeidet finnes i NR-rapporten Waldeland m.fl. (2023). Modellen er basert på et stort treningsdatasett basert (1605 bilder) på skyfrie Sentinel-2 bilder (10 m,) som er aggregert opp til FSC 500x500 m piksler, og Sentinel-3 bilder med tilnærmet samme opptakstidspunkt som Sentinel-2 bildene. Piksler med skyer er ikke brukt i treningen.

Både det gamle (versjon 0, leveranse 3a nytt navn FSC-DL-F1) (Solberg m.fl., 2021) og det nye videreutviklede dyplærings snødekningsgradsproduktet (leveranse 3b) er satt i drift i NVE.

2.3.1.2 Forbedret skymaske for Sentinel-3

Parallelt med utvikling av den forbedrede snødekningsgradalgoritmen basert på dyplæring har det også blitt jobbet med å forbedre skymasken (leveranse 3d). En av hovedutfordringene med skydeteksjon i satellittbilder over snødekt terreng er å skille skyer fra snø- og isdekt land, siden skyer og snø-/isdekt land har mange av de samme spektrale karakteristikene. Siden snødekt land kan bli tolket som skyer og skyer kan bli tolket som snødekt land er det viktig med korrekt skymaskering for å få et pålitelig snø- og isdekningssgradprodukt (Figur 2.13). Den eksisterende skyklassifiseringsmetoden «simple cloud detection algorithm» SCDA versjon 2.0 har vist store svakheter, noe som gir utfordringer når man bruker snødekningsgrad-produktet. NR har utviklet en dyplæringsmetode for å predikere skymasker i Sentinel-3 SLSTR. De har trent opp U-net, et dypt nevralt nettverk for prediksjon av skyer i Sentinel-3 SLSTR. Treningsdata og valideringsdata er laget på grunnlag SCDA-versjon, med tilleggskriterier. Siste versjon av algoritmen er blitt trent opp med egen klasse for skyskygger og flere bilder med lav solvinkel. Resultatene av valideringsarbeidet viser at klassifiseringen med U-net gir store forbedringer av skymaskering i forhold SCDA metoden. Særlig for måneder med lav solhøyde (november, desember, januar og februar). Også for de andre månedene gir U-net bedre resultat enn SCDA. Hovedgrunnen er at SCDA er pikselbasert, altså at hver piksel i bildet predikeres som skyer eller skyfritt basert på de spektrale verdiene i pikselen uten å ta hensyn til nabopiksler. U-Net er derimot basert på bildegjenkjenning, og ser på bildeutsnittet rundt hver piksel. Mer info om metoden finnes i Tier m.fl. (2023). Det er fortsatt muligheter for forbedringer dyplæringsalgoritmen, men dette er tidkrevende og ikke vært rom for i dette prosjektet. I et visuelt produkt er det ikke samme krav til nøyaktighet da man her lettere kan se at det er skyer i bildet og derfor unngå å bruke disse delene av bildet. Når dette skal gjøres maskinelt er det derimot veldig viktig med riktig klassifisering når dataene skal brukes opp mot andre uavhengige data.

Et eksempel på forbedringen som er gjort vises i Figur 2.13. I testbildet fra 10. januar er det fullt skydekke i de sydlige delene av Sverige. Med SCDA feiler skyklassifiseringen og tolker dette som skyfrie områder. De maskeres derfor ikke ut i snødekningsgradproduktet (FSC-SA) siden skyskyggen har lik signatur som snø. I dette tilfeller blir det dermed klassifisert som delvis snødekt. De to neste bildene viser skymaske basert på dyplæring, og før og etter opptrening med mer data i 2023 for lav solvinkel og skyskygger.



Figur 2.13: Sammenligning av skydeteksjon for Sentinel-3 SLSTR fra 10. januar 2020. Oppe til venstre vises Sentinel-3 bilde i falske farger. Her er det mulig å se skyer og snødekt og snøfrie områder. Oppe til høyre vises FSC-SA produkt hvor skydeteksjonen er utført med SCDA 2.0 (skyer er grå) og snødekningsgrad vises fra hvitt til grønt. Nede til venstre vises FSC-SA hvor skydeteksjon er utført med U-Net (grått, enkel opptrening i 2021) og snødekning (hvitt-grønt). Nede til høyre vises resultatet med skydeteksjon med U-Net (grått) med ny opptrening i 2023. Kilde: Trier m.fl. (2023).

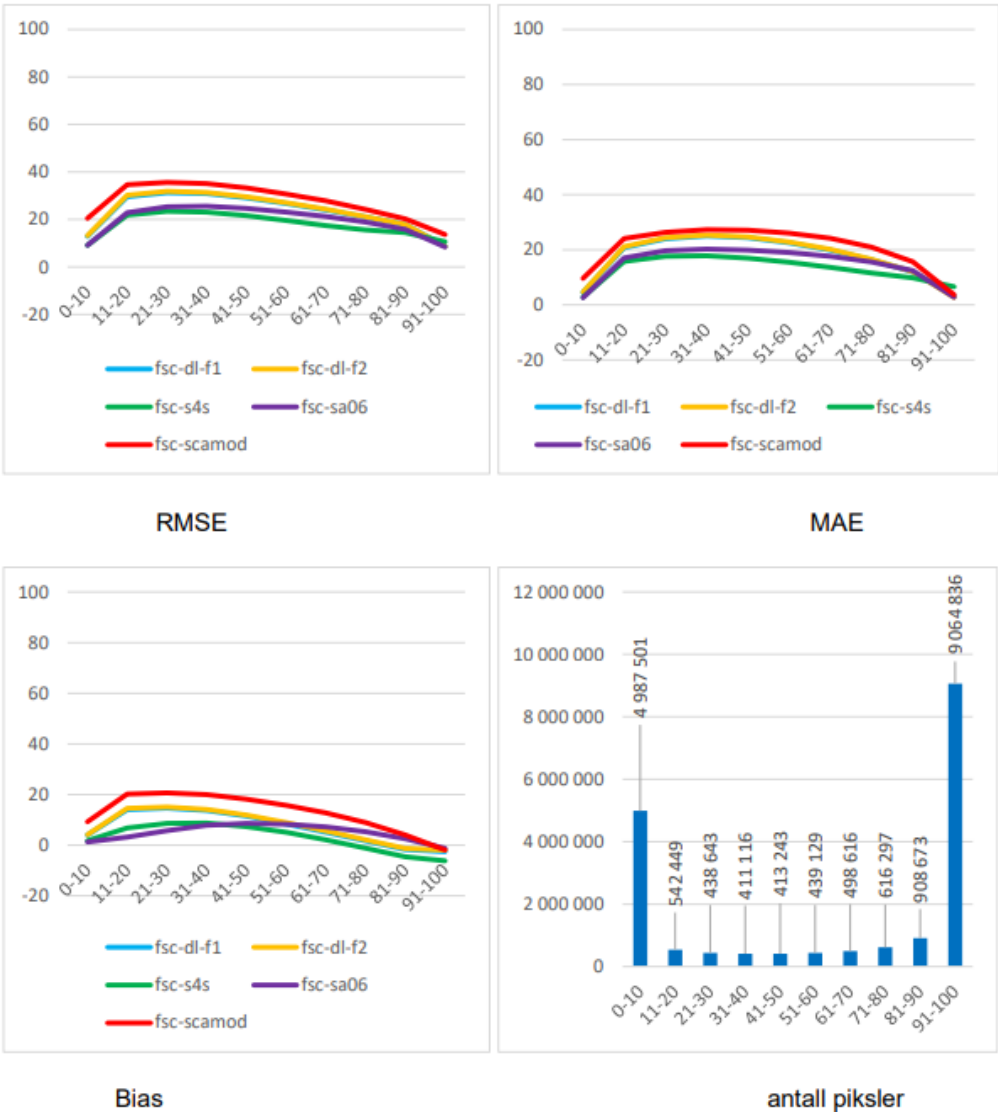
2.3.1.3 Valideringsrapport FSC

I løpet av 2024 har NR jobbet med å sammenligne ytelsen til en rekke av FSC-produkter som har blitt utviklet i forbindelse med dette og tidligere Copernicus-prosjekter i NVE. Denne aktiviteten hører til leveranse 3e i prosjektet. Arbeidet har vært omfattende da man i tillegg til å etablere et stort referansedatasett fra Sentinel-2, også har lastet ned alle Sentinel-3 bildene på nytt. Dette skyldes at ESA har utført en rekalkibrering av SLSTR-kanaler og reprosessering av Level 1B produkt, som benyttes i tjenesten. Med homogene Sentinel-3-SLSTR data sammenliknes et enhetlig datasett for hele perioden 2016-2023 (Trier m.fl., 2024). I rapporten har man sett på ytelsen til fem forskjellige FSC algoritmer. To er basert på dyplæring (DL) (FSC-DL F1 (første versjon, utviklet i AI4Arctic) og FSC-DL F2 (andre versjon) (se kapittel 2.3.1.1). I tillegg har man FSC med basis i Salomonsen og Appel (FSC-SA06) (Solberg m.fl., 2018), Sentinel4Snow (FSC-S4S) (Solberg m.fl., 2019 og Solberg m.fl., 2021), og SCAMod (FSC-SCAMOD) (Solberg m.fl., 2021). For nærmere beskrivelse av disse, se evalueringsrapport Trier m.fl. (2024). Valideringsrapporten sammenstiller resultater fra forskjellige årstider/solhøyder, forskjellige arealklasser (for eksempel skog, bart fjell og sparsom vegetasjon), terrenghelning og eksponering, i tillegg til sammenslåing av hele landet og for regioner.

Hovedkonklusjonen fra rapporten er at det ikke finnes en metode som er best egnet under alle forhold, men den gir NVE et godt utgangspunkt for sin videre anbefaling av hvilket snødekningsgradprodukt som bør være operasjonelt. I Tabell 2.4 vises ytelsen til de forskjellige FSC-produktene for smeltesesongen for hele landet. I Figur 2.14 vises resultatene for smeltesesongen og hvordan ytelsen er for forskjellige snødekningsgrader for forskjellige klasser.

Tabell 2.4: Oppsummert sammenligning av de fem metodene for estimering av snødekningsgrad for smeltesesongen april-juni i hele Norge. «Alle klasser» inneholder også «myr» og «jordbruk» (Trier m.fl., 2024).

	alle klasser			bart fjell og sparsom vegetasjon			skog		
antall piksler	18 320 503			10 329 063			5 737 522		
metode	RMSE	MAE	bias	RMSE	MAE	bias	RMSE	MAE	bias
fsc-dl-f1	15,43	7,33	1,48	12,84	6,40	0,10	20,02	10,47	4,46
fsc-dl-f2	15,63	7,22	1,90	12,87	6,20	0,46	20,42	10,50	5,09
fsc-s4s	12,80	7,29	-1,95	9,49	6,26	-2,22	17,51	10,54	-1,46
fsc-sa06	12,90	6,01	0,99	9,73	4,70	1,94	17,63	9,65	0,04
fsc-scamod	20,18	9,75	4,70	16,38	7,52	3,62	26,72	15,45	8,10



Figur 2.14: Plot som viser ytelsen for de forskjellige FSC-algortimene (forskjellige ytelsesmål RMSE, MAE, og Bias, samt antall valideringsdata som betyr antall piksler med treningsdata) til de fem forskjellige snødekningsgrad-algortimene for 10 % prosent klasser. Resultat vises for alle landskapsklasser og alle terrengtyper og for hele Norge (Trier m.fl., 2024).

Med basis i Figur 2.14 ser man at dyplæringsmetoden (fsc-dl-f2) gjør det bedre enn de andre når snødekningsgraden er liten (0-10 %) eller stor (91-100 %) (i perioden hvor man har mye treningsdata), mens S4S fungerer generelt best, og noe bedre en SA06. I rapporten finner man flere slike plott for forskjellige perioder av året (årstidsvariasjon), forskjellige landskapsklasser og terrenghelninger. Den generelle tendensen er at avvikene er typisk minst for alle metoder nær 100 % (91-100 %) og nær 0 % (0-10 %). Avvikene har gjerne også en tendens til å øke med avtagende snødekningsgrad, inntil et knekkpunkt før laveste FSC-intervall (0-10 %). Resultatene viser også at det er noe dårligere resultater i skog enn i åpent terreng, men resultatene er allikevel rimelig gode også her. For skog er det også forskjeller mellom Sør- og Nord-Norge, noe som skyldes at skogen er noe mer glissen i nord enn i syd. Årstiden (solhøyden) spiller også inn, med bedre resultater når solen står høyt på himmelen. Om vinteren, for eksempel i perioden september-november og januar-februar, er det store avvik mellom valideringsdata og FSC produktene, og avviket øker med avtagende FSC (høyest avvik for 11-20 % klassen). I denne perioden bør man derfor være forsiktig med å bruke et fininndelt FSC produkt. I denne perioden vil man trolig være mer tjent med å bruke et binært SCA produkt, og eventuelt FSC SCAMod, men selv den gjør det relativt dårlig i denne perioden. Trolig vil en dyp-læringsalgoritme gjøre det bedre i denne perioden, men det vil være krevende å etablere treningsdata for denne perioden.

I rapporten konkluderes det med at:

«For valg av operasjonell metode er det store spørsmålet hvilket av resultatene man bør ta mest hensyn til. Overordnet er spørsmålet om man skal minimere de totale avvikene (gitt ved tabellene i det foregående) eller minimere det generelle avviket med lik vektlegging av alle snødekningsgrader (gitt ved plottene av avvik som funksjon av FSC-intervaller i det foregående). Om man vil minimere totalene, så bør man velge metoden med dyp læring (F2, som er den nyeste). Da får man best snøkart nær 0 % og nær 100 % FSC, der datapopulasjonene er desidert størst. Om man heller vil ha en metode som fungerer generelt best for alle snødekningsgrader, så bør man velge S4S (eventuelt SA06). Da får man litt dårligere nøyaktighet for de laveste og høyeste verdiene av FSC, men best resultater ellers)» (s.81, Trier m.fl., 2024).

I tillegg påpeker rapporten at:

«På sikt vil det være mulig å trene en metode for dyplæring slik at den gjør det best for alle snødekningsgrader. Med relativt lite treningsdata for delvis snødekning, kan dette være krevende, men det finnes tilnærmingsmåter man bør undersøke (f.eks. bruk av grunnmodeller – foundation models – som er store pretrente modeller som typisk har større evne til å fange opp mønstre i dataene selv om mengden treningsdata er moderat)». (s.82, Trier m.fl., 2024).

Rapporten peker også på muligheten for å lage en hybrid løsning:

«Der dyplæring og S4S (eller SA06) kombineres. Den baseres på å bruke resultatene fra dyp læring nær 0 % FSC og nær 100 % FSC, ellers S4S (dvs. bruke resultatet fra S4S når dyp læring gir verdier i intervallet f.eks. 10-90 % FSC). Forskjellene mellom metodenes ytelse er ikke større enn at dette trolig kan gi et sømløst og tilfredsstillende snøkart». (s.84, Trier m.fl., 2024).

Med basis i dette vil vi anbefale å bruke S4S som produkt i våre sammenligninger mot modeller da denne har best nøyaktighet for snødekning mellom 20 og 80 %. I våre visuelle tjenester slik

som seNorge, kan man bruke et hybridprodukt bestående av FSC-DL-F2 for lave og høye snødekningsgrader, mens man for de imellom benytter S4S. I perioden med lav solhøyde (november-februar) er usikkerheten stor og øker med avtagende snødekningsgrad, med unntak av den laveste snødekningsgraden klasse (0-10 %). Så her må man bruke produktene med forsiktighet.

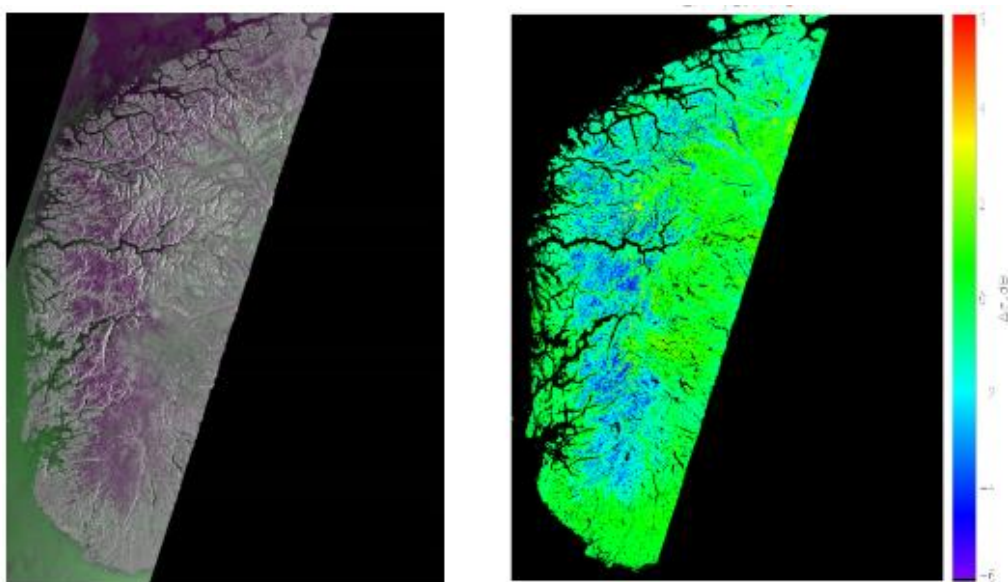
Som nevnt er det nok muligheter for å videreutvikle dyplæringsalgoritmen slik at denne blir best for alle snødekningsgrader. Per nå vil NVE heller fokusere på bruk av eksisterende algoritmer til validering av våre operasjonelle varslingsmodeller. Parallelt med dette vil man også jobbe med å utvikle metodikk for assimilering av satellittbasert FSC inn i våre modeller (se kapittel 3.1.2).

2.3.1.4 Videre utvikling av valideringsverktøy

Leveranse 3f om valideringsverktøy har prosjektet ikke gått videre fordi skymasken for Sentinel-2 per nå er lite egnet for bruk over snø- og isdekte områder. Arbeidet med å forbedre Sentinel-2 skymasken er utenfor dette prosjektets ramme. Vi kjenner til at det er miljøer som arbeider med forbedret skymaskering av Sentinel-2 bilder så vi vil følge utviklingen her. Så vi håper på en forbedring slik at dette valideringsverktøyet kan utnyttes.

2.3.1.5 Våtsnøprodukt

Et våtsnøprodukt kan avledes fra Satskred produksjonslinjen, og er et ønske for snøskredvarslingen og til forbedring av et snødekningsgradprodukt. I forbindelse med multisensor og multialgoritmer (leveranse 3i) har det blitt diskutert å kombinere Sentinel-1 våtsnøproduktet med Sentinel-3 snødekningproduktet i perioder hvor man har langvarige perioder med skyer. NORCE har derfor etablert et referansedatasett til dette (Malnes, 2024a). Produktet vil bli satt i produksjon før snøsmeltingen starter våren 2025. Det videre arbeidet med multisensor har vi utsatt til vi i større grad har modellverktøy som kan nyttegjøre seg dataene. Våtsnøproduktet kan benyttes visuelt og inn i våre varslingsverktøy uten å kombineres med andre sensorer. Beskrivelse av våtsnøprodukt finnes i teknisk notat fra Malnes (2024a). Figur 2.15 er hentet fra nevnte rapport og viser mulig visualisering av våtsnøproduktet. Designet på produktet i NVE vil bli fastsatt våren 2025.



Figur 2.15: Eksempel på hvordan Våtsnøproduktet kan se ut. Sentinel-1 RGB komposittbilde med lilla nyanser viser områder med våt snø (venstre). Relativ tilbakespredning der blånyanser antyder våt snø med relativ tilbakespredning mindre enn terskelverdien (høyre) (Malnes, 2024a).

2.3.2 Innsjøis

Bruk av satellittbilder i varsling av innsjøis i NVE har blitt viktig de siste årene. Mye av grunnen er tilgjengeliggjøring av satellittbildene i NVEs varslingsverktøy som iskart.no (se kapittel 2.7.4). I prosjektperioden har det blitt laget et innsjøisprodukt som angir perioden for islegging og isløsning basert på Sentinel-1 data. I tillegg har NVE jobbet med å tilrettelegge for Sentinel-1 intensitetsbilder i våre kartverktøy og tilgjengeliggjøre disse satellittbildene for varslingsstjenestene på lik linje med Sentinel-2. I tillegg har NR sett på potensialet for å kartlegge innsjøis med bruk av Sentinel-3 SLSTR-data ved hjelp av dyplæringsalgoritme.

2.3.2.1 Bruk av Sentinel-1 til iskartlegging og intensitetsbilde

NORCE har utviklet en metode for å kartlegge isleggings- og isløsningstidspunkt ved bruk av en tidsserie av normaliserte tilbakespredningsverdier (db) fra Sentinel-1 fra definerte innsjøer (Malnes, 2024b). Dette er leveranse 3g i prosjektet. I testfasen ble alle innsjøer som er større enn 2 km² kartlagt. Innsjøer som er større enn 50 km² har blitt delt opp i mindre enheter, da islegging skjer på forskjellige tidspunkt. Oppdelingen er utført av NVE og er basert på erfaring fra isvarslingen på hvordan innsjøene normalt islegger seg. Ut fra tidsseriene kan man tydelig se en årssyklus i tilbakespredningen, med høy tilbakespredning i perioder med is sammenliknet med perioder uten is (Figur 2.16). Ettersom tilbakespredningen er avhengig av om det er mye vind, kan man legge inn noen føringer på hvor sannsynlig det er at innsjøen er islagt på angitt tidspunkt eller ikke. På denne måten kan man redusere utfallsrommet for isleggings- og isløsningstidspunkt og redusere antall falske positive. For å fastlegge isleggings- og isløsningstidspunktet brukes terskelverdier for å fastsette tidspunktet. De terskelingsverdiene som er blitt benyttet så langt er basert på erfaring, og er testet på innsjøer hvor isleggings- og isløsningstidspunktene er kjente. Her gjenstår det arbeid for å forbedre produktet ved bruk av flere valideringsdata. Produktet bruker input fra Satskred produksjonslinja i NVE tilvarende Sentinel-1 intensitetsbilde (Figur 2.16).

Interpolert data fra ujevn temporalt opptak. Til daglig verdi via et 5 punkts glatting for å oppnå en relativt fornuftig sampling her

Terskler for å finne start og slutt på «vinteresong» ~ Isdekt periode

Regelset:

Islegging = første dag etter:

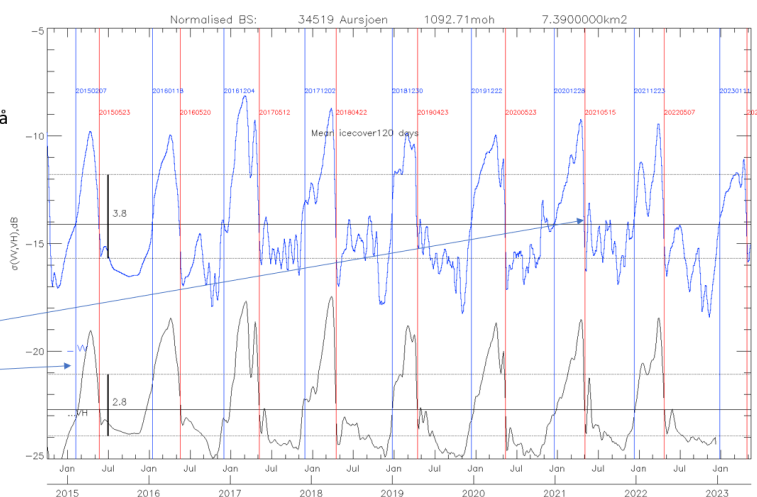
1. DOI > 1 Des
2. Sigma > Thr = mean(sigma)

Is-slutt = første dag etter:

1. DOI > 1 Mars
2. Sigma > Thr = mean(sigma)

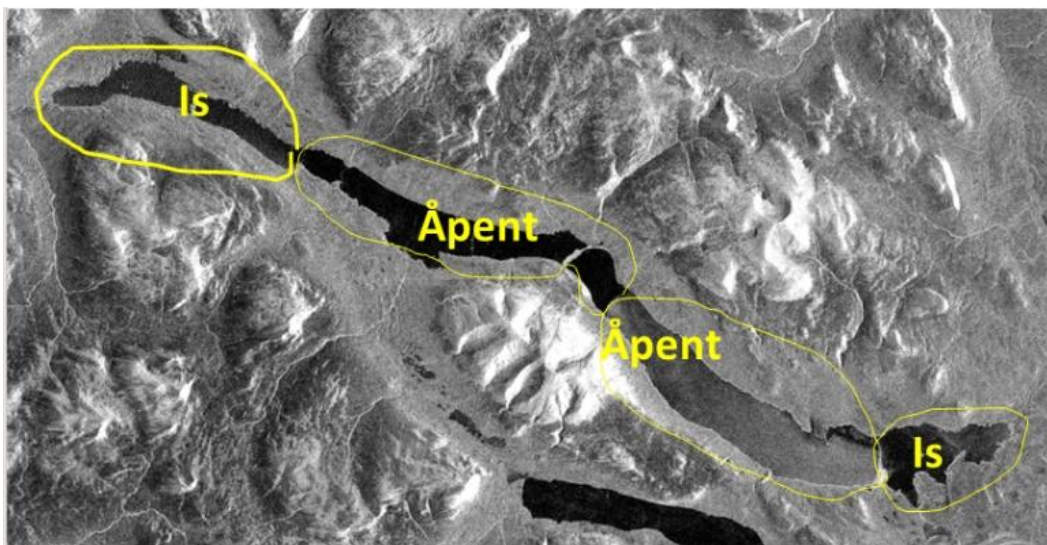
Forbedringer:

- Våt snø
- Ta med VH?



Figur 2.16: Tidsserie for normaliserte tilbakespredningsverdier fra Sentinel-1 for Aursjøen i perioden 2015-2023 (høyre). Til venstre er forslag til regler for å fastlegge isleggings- og isløsningstidspunkt basert på terskelverdier og tid på året.

En del av leveransen har også vært å utvikle et visuelt Sentinel-1 bilde som kan brukes på lik linje som Sentinel-2 og -3 (Figur 2.17).

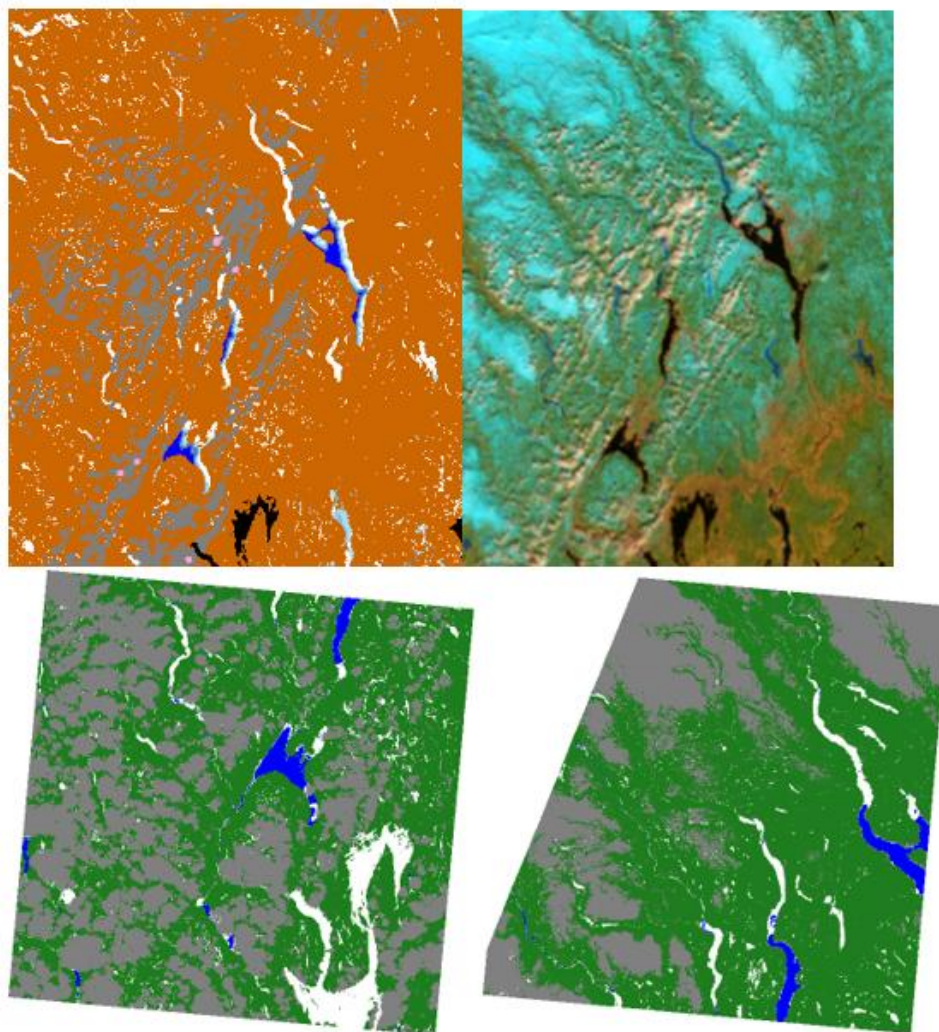


Figur 2.17: Intensitetsbilde fra Sentinel-1 for Altevannet i Troms brukt til iskartlegging. Siden innsjøen er større en 50 km² så er den delt opp i fire enheter fra vest mot øst (gule sirkler angir området). Oppdelingen er basert på tidligere informasjon om isleggingen på Altevannet. Man kan se forskjeller i intensitet mellom de forskjellige områdene, noe som skyldes om området er islagt eller ikke. Men man kan også se at åpent vann har to forskjellige karakteristikk, med lav tilbakespredning (svart farge) i vest, og høy tilbakespredning i øst (gråfarge). Angivelsen av is og åpent vann er basert på uavhengige observasjoner.

2.3.2.2 Isdekningsgrad med dyplæring

Bakgrunnen for dette arbeidet var å utforske muligheten for iskartlegging med bruk av Sentinel-3 SLSTR sensoren i stedet for Sentinel-3 OLCI (Leveranse 3h). Sentinel-2 SLSTR opptak har betydelig lavere solvinkel kontra Sentinel-3 OLCI. Dette gjør at man får bedre bildedekning i isleggingsperioden for deler av landet enn man oppnår med Sentinel-3 OLCI. I denne prosjektfasen har NR utviklet en første versjon av en maskinlæringsalgoritme for innsjøiskartlegging.

Resultater og metoden som er blitt benyttet beskrives i Rudjord m.fl. (2024). Arbeidet her har tatt med seg erfaring fra tilsvarende prosjekt for FSC (se kapittel 2.3.1.1). Med et relativt begrenset treningsdatasett og med bruk av SCDA-skymasken har U-Net dyplæringsalgoritmen vist at det er mulig å estimere isdekningsgrad på innsjøer med bruk av Sentinel-3 SLSTR-data. Modellen har noen svakheter ved at det er blitt benyttet SCDA-skymasking hvor det vil være naturlig å bruke skymaske basert på dyplæring. I tillegg er det brukt begrenset mengde med treningsdata, så kvaliteten på disse kan økes. Algoritmen bør testes mer, også under utfordrende forhold. Av denne grunn har man valgt å ikke operasjonalisere denne algoritmen inn i NVE Copernicustjenester. I Figur 2.18 visualiseres isdekningsgradproduktet basert dyplæring sammenliknet med et Sentinel-3 SLSTR bilde og isprodukter fra Sentinel-2.

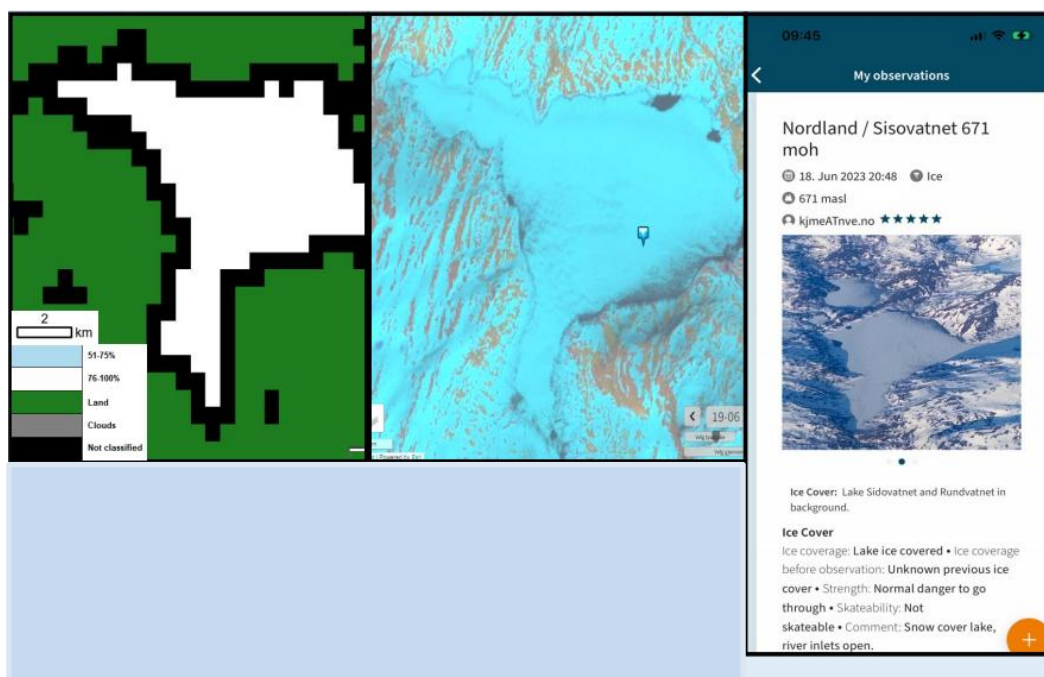


Figur 2.18: Øverst til venstre: Isdekningsgrad fra dyplæring for Mjøsa, Randsfjorden og Tyrifjorden, 10.04.2019. Øverst til høyre: Fargekompositt med falske farger av SLSTR-bånd 5, 3 og 1 fra samme dag. Nederst til venstre: Isdekningsprodukt fra Sentinel-2 fra dagen etter, 11.04.2019. Nederst til Høyre: Isdekningsprodukt fra Sentinel-2 fra 13.04.2019. Kilde: Rudjord m.fl. (2024).

2.3.2.3 Verdiøkende tjenester basert på satellitt, modell og observasjon

Resultater fra leveranse 3j handler om å kunne sammenlikne observasjoner, satellittprodukter og modelldata. Dette gjøres i flere system i NVE i dag. Bruk av satellittdata i NVEs kartapplikasjoner og tjenester er beskrevet i eget kapittel (kapittel 2.7). Sammenligning av FSC-produkt og snødekningsgrad fra flomvarslingsmodeller og snømodeller beskrives i kapittel 2.7.5.

Figur 2.19 viser hvordan man kombinerer forskjellige satellittprodukter med en observasjon fra Varsom-appen/Regobs. I eksemplet ser man Sentinel-3 OLCI isproduktet til venstre, mens midtre bilder viser Sentinel-2 satellittbilde med punkt hvor Varsom Regobs observasjon er plassert. En slik kombinasjon av observasjoner av uavhengige satellittdata styrker enkelt observasjonen fra Varsom, og kan bidra til validering av satellittbaserte produkter.



Figur 2.19: Til venstre ses Sentinel-3 OLCI isprodukt over Sisovatnet tatt 18.06.23. I midten Sentinel-2 fargebilde (båndkombinasjon 11-8-4) fra samme område tatt 19.06.23. Til høyre Varsom-observasjon som viser bilde tatt 18.08.23.

2.3.2.4 Tidsserieanalyser for kvantifisering av klimaeffekter

INVEs IT-infrastruktur ligger det nå til rette for å etablere tidsserier med basis i de satellittbaserte produktene som er fremskaffet i prosjektet (Leveranse 3k, se kapittel 2.1.5 og 2.7.6). Her vil det i fremtiden være naturlig å se på snø- og issesongens lengde og karakteristikker over tid. Produkt kan lages for hele landet og for ønskede regioner.

2.3.2.5 Overflatekorntype

NVE har per nå ingen mulighet for å utnytte informasjon om rim, omdannet snø og nysnø i våre modeller. Det er derfor ikke blitt jobbet med dette i denne prosjektperioden. Vi har et kornstørrelseprodukt utviklet av NR med basis i Sentinel-3, fra tidligere prosjekt, men produktet trenger mer tilpasning for å være nyttig for brukerne. I forbindelse med videreutvikling av våre snømodeller kan slik informasjon bli nyttig på sikt.

2.4 Bre

I prosjektet Copernicus bretjeneste ble Sentinel-satellittbilder brukt til å lage en rekke breprodukter og til å utforske muligheter for bruk av satellittdata (Andreassen m.fl., 2021a). Sentinel-2 satellittbilder ble brukt til å kartlegge utbredelse av alle breer og fonner i Norge (Andreassen m.fl., 2022), måle brehastighet (Nagy og Andreassen, 2019a), kartlegge breinnsjøer og overvåke flomhendelser i forbindelse med innsjøtapping (Nagy og Andreassen, 2019b). Sentinel-2 data vil mest sannsynlig spille en nøkkelrolle også i fremtiden når brekartleggingen gjentas. De store endringene av norske breer vil medføre behov for hyppigere oppdateringer. I NVEs Copernicustjenester har vi fokusert på historisk utvikling av breomkrets fra lille istid til i dag, og vi har videreutviklet kartleggingsmetode for bresjøer og laget nye datasett for bresjøer (Leveranser 4c og 4d). Vi har også tatt i bruk Sentinel-1 og Sentinel-2 til prosessering av snølinjer (Leveranse 4a).

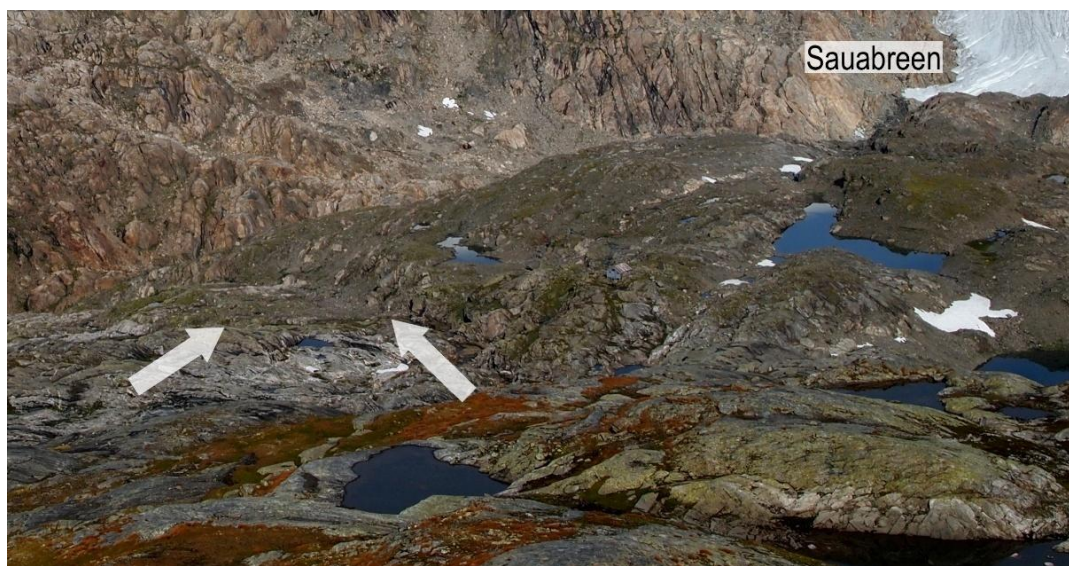
2.4.1 Tidsserieanalyse av utvalgte fonner og breer

Sentinel-2 satellittdata fra 2018 (Nord-Norge) og 2019 (Sør-Norge) ble brukt til å kartlegge alle Norges breer og fonner. Metoden fungerte godt, men krevde en del manuell redigering (Andreassen, 2022; Andreassen m.fl., 2022). Satellittbilder har også blitt brukt til å kartlegge lille istids omkrets sammen med andre data som ortofoto og feltundersøkelser (f.eks. Baumann m.fl., 2009; Stokes m.fl., 2018; Weber m.fl., 2019; 2020). I NVEs Copernicustjenester har vi gjennom studentoppgaver og forskningssamarbeid undersøkt potensialet for å bruke Sentinel-2 bilder til kartlegging av tidligere og nåværende utbredelse av breer, og til å følge med på mindre fonner som er i ferd med å forsvinne. I august og september 2024 gjorde vi også feltundersøkelser ved Folgefonna, Breifonn og Kringsjøfonna.

2.4.1.1 Kartlegging av lille istids maksimale utbredelse

Den lille istid var et relativt kjølig klimaintervall fra ca. 1400-tallet til begynnelsen av 1900-tallet, hvor breer i Norge—som i mange andre regioner rundt om i verden—rykket frem (Grove, 2004). For mange norske breer var dette det største brefremstøtet i de siste ca. 4 000 årene (sen-Holocen). Betydningen av den lille istid er at denne perioden kan anses å representere breene i en naturlig tilstand, styrt av naturlige, ikke-menneskeskapte forhold. Å kartlegge breutbredelsen under den lille istid og opprette et landsdekkende datasett som viser den maksimale utbredelsen, er viktig, fordi dette kan fungere som et førindustrielt referansepunkt for sammenligning med dagens breer.

Hvor godt Sentinel-2 data er egnet til å kartlegge breutbredelsen under den lille istid i Norge, avhenger i stor grad av hvor tydelig gjenkjennelige trekk fremtrer og kan detekteres i satellittbildene, både gjennom manuelle og (semi-)automatiske analysemetoder. Gjenkjennelige trekk som benyttes for å identifisere den lille istid inkluderer primært glisiale landformer, som for eksempel morenerygger, og naturlige grenser i landskapet foran breene. Disse grensene er typisk skapt av forskjeller i geologisk «ferskhet» og vegetasjonstetthet (Weber m.fl., 2019). Områdene innenfor den lille istids utbredelse har vanligvis et ferskt preg på grunn av sin relative unge alder, ettersom arealene har vært dekket av is inntil nylig (ca. 1750 blir ofte brukt som lille istids maksimum). Disse arealene er preget av et bart sedimentdekke av morenemateriale med lite eller ingen vegetasjon, eller bart fjell som er lite forvitret og viser ferske spor etter breerosjon (som for eksempel skarpe skuringsstriper). I motsetning til dette er områdene utenfor preget av velutviklet vegetasjon og et tett bevokst sedimentdekke, eller tydelig forvitret fjell (Figur 2.20).

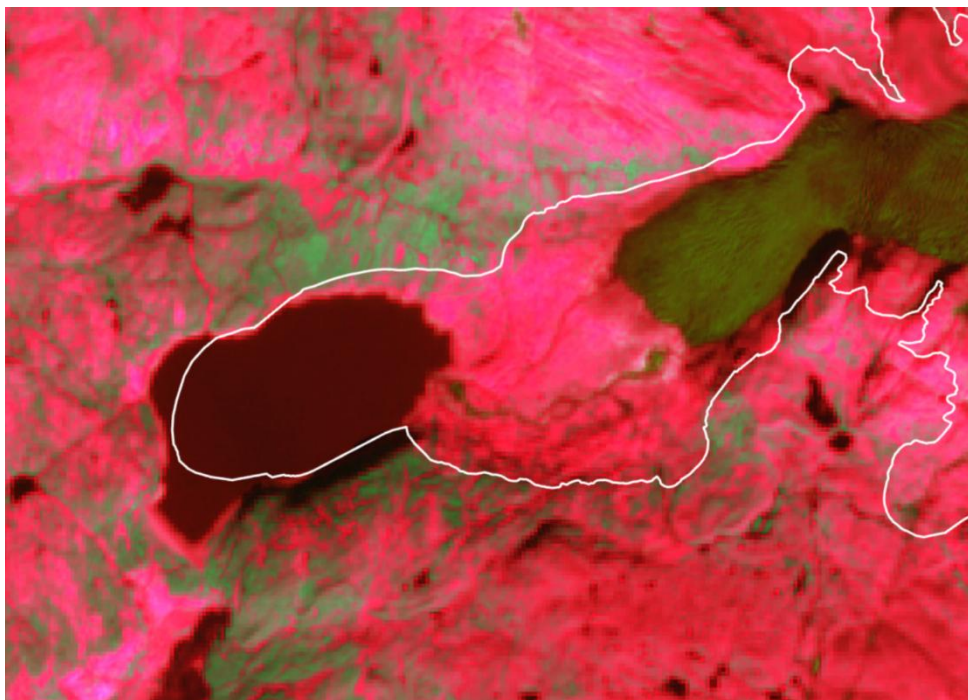


Figur 2.20: Bildet viser den maksimale utbredelsen av breen under den lille istid i terrenget rundt Sauabreen, en utløper av Folgefonna. Grensen for den lille istid fremstår som et tydelig skille i landskapet mellom bart, forvitret fjell i forgrunnen, som er eldre og ikke var isdekket under den lille istid, og områder med ubevokst sedimentdekke, som representerer terreng som har vært isdekt og har blitt isfritt siden slutten av denne perioden. Foto: Paul Weber

I en masteroppgave i samarbeid med NVE og NMBU ble det undersøkt i hvilken grad Sentinel-2 data kan brukes til å detektere disse forskjellene ved platåbreen Hardangerjøkulen (Løkeberg, 2024). Oppgaven benyttet en styrt bildeklassifisering basert på maskinlæringsalgoritmer (Support Vector Machine og Random Trees), samt statistiske analyser av pikselverdier fra ulike Sentinel-2 kompositter, som for eksempel falskt farge-infrarødt, og vegetasjonsindekser, som for eksempel Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) og Bare Soil Index (BSI). Metodene ga ikke bare svært gode visuelle resultater, der de karakteristiske trekkene fremsto tydelig i Sentinel-2 komposittene og -indeksene (Figur 2.21 og Figur 2.22), men resulterte også i solide klassifiseringsresultater (Figur 2.23). Løkeberg (2024) rapporterer en total nøyaktighet på opptil 80 % for maskinlæringsalgoritmene. De statistiske analysene viser et signifikant skille mellom områdene innenfor og utenfor lille istidsgrensen, og bekrefter at vegetasjonstetthet er blant de viktigste variablene. Oppgaven fremhever derimot også at en viss forhåndskunnskap om plasseringen av grensen for den lille istid er essensiell for å kunne utvikle gode treningsdata for en slik analyse. En ytterligere begrensning som oppgaven gikk inn på, er at for å detektere morenerygger, trengs det i tillegg til optiske fjernanalysbilder også høydedata i form av detaljerte høydemodeller.



Figur 2.21: Hardangerjøkulens nordøstlige brearmer Midtdalsbreen og Blåisen er vist i et falskt kortbølge-infrarødt kompositt (basert på båndene B11, B8 og B4), tatt 27. august 2019. Den hvite linjen representerer grensen til den lille istid, som ble rekonstruert av Weber m.fl. (2019), og ble brukt av Løkeberg (2024) som uavhengig valideringsdatasett. Komposittet fremhever tydelig forskjellene i overflatens egenskaper på hver side av den rekonstruerte lille istidsgrensen. Figuren er hentet fra Løkeberg (2024).



Figur 2.22: Hardangerjøkulens sørvestlige breutløper Rembesdalskåka er vist i et kompositt, som er basert på BSI-indeksen (skalert med en faktor på 6,25), og båndene B8 og B11 (tatt 27. august 2019). Den rekonstruerte grensen til den lille istid (Weber m.fl., 2019) er representert av den hvite linjen. Komposittet gjør forskjellene i vegetasjonstetthet godt synlig. Arealene innenfor grensen er dominert av bart fjell med svært sparsom plantevekst i form av pionervegetasjon. Figuren er hentet fra Løkeberg (2024).

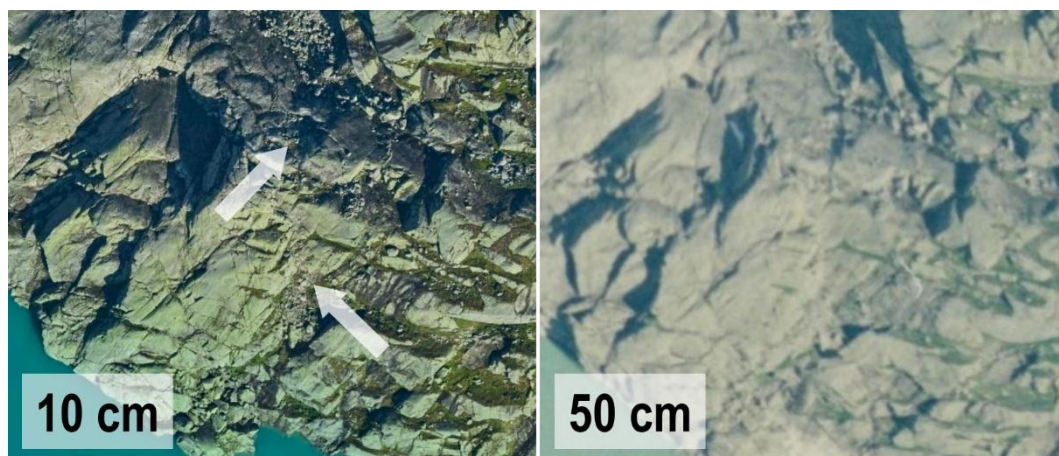


Figur 2.23: Figuren viser det visuelle resultatet av en styrt bildeklassifisering basert på maskinlæringsalgoritmen Support Vector Machine for Hardangerjøkulens sørvestlige breutløper Rembesdalskåka (hentet fra Løkeberg, 2024).

At Sentinel-2 satellittbilder alene har begrenset nytteverdi for lille istids kartlegging, og spesielt for å detektere moreneryggene dannet av dette fremstøtet blir tydelig ved Folgefonna. Selv om Sentinel-2 dataene har sine fordeler når det gjelder å detektere de karakteristiske vegetasjons- og geologiske grensene som definerer breens utbredelse under den lille istid (Figur 2.24), er det ikke mulig å skille ut moreneryggene knyttet til denne fremrykningen i de middels oppløste bildene. Dette krever både høyoppløselig ortofoto og detaljerte skyggerelieffbilder basert på terrengmodeller. Vårt arbeid ved Folgefonna har vist at moreneryggene etterlatt av den lille istid, spesielt de som ligger på de høyere platåområdene, ofte kun består av steinlinjer. Disse landformene kan kun identifiseres på ortofoto med høy romlig oppløsning (< 50 cm; Figur 2.25). Dette skyldes også at platåområdene ofte er preget av fjellstrukturer med en klar orientering, noe som kan føre til at steinlinjene blir «skjult» i det oppskårne terrenget. På grunn av dette er selv høyoppløselige skyggerelieffbilder av begrenset nytte når det gjelder å oppdage og kartlegge steinlinjer, og en grundig kartlegging og befaring i felt er ofte uunnværlig for å sikre de beste resultatene.



Figur 2.24: Vestsiden av Søndre Folgefonna er vist på et Sentinel-2 falskt farge-infrarødt bilde (basert på båndene B8, B4 og B3), tatt 20. september 2022. Dette falske fargekomposittet fremhever tydelig kontrasten mellom områder med tett vegetasjon (vist i dypt rødt) og bart terreng med lite eller ingen vegetasjon (vist i grå/brun farge). Grensene mellom disse områdene kan brukes til å pålitelig avgrense den maksimale breutbredelsen under den lille istid. Områder med tett vegetasjon indikerer eldre terrengoverflater som ikke har vært dekket av is under den lille istid, mens områder med bart terreng har blitt isfritt siden slutten av den lille istid. Det innfelte kartet viser plasseringen av Folgefonna på Vestlandet, markert med et rødt punkt.

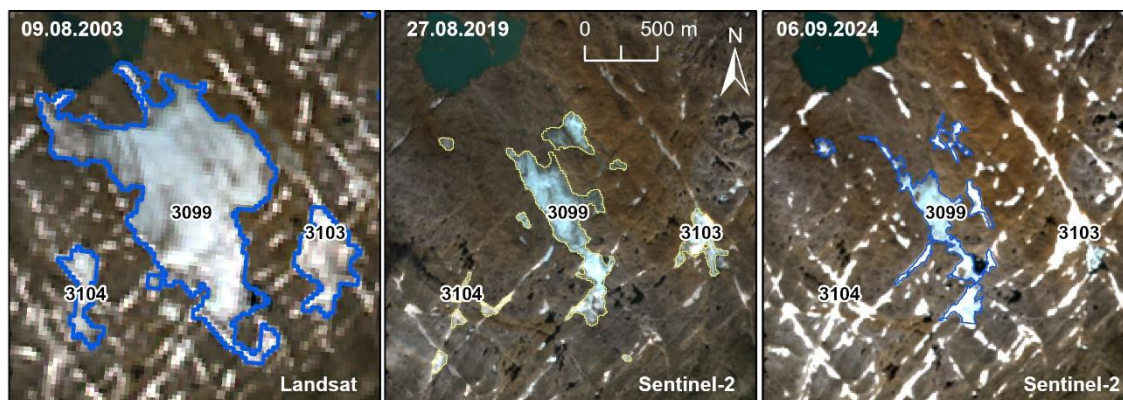


Figur 2.25: Å identifisere morenerygger dannet under den lille istid, ofte i form av steinlinjer (som kan sees som et vertikalt skille i midten av bildene), avhenger av ortofoto med tilstrekkelig høy oppløsning. Ortofotene viser det samme området; mens bildet til venstre har en oppløsning på 10 cm, har bildet til høyre en oppløsning på 50 cm (norgebilder.no). Identifiseringen kompliseres ytterligere av det dype, oppskårne terrenget, som preges av en tydelig orientert fjellstruktur i høyplatåområdene rundt Folgefonna.

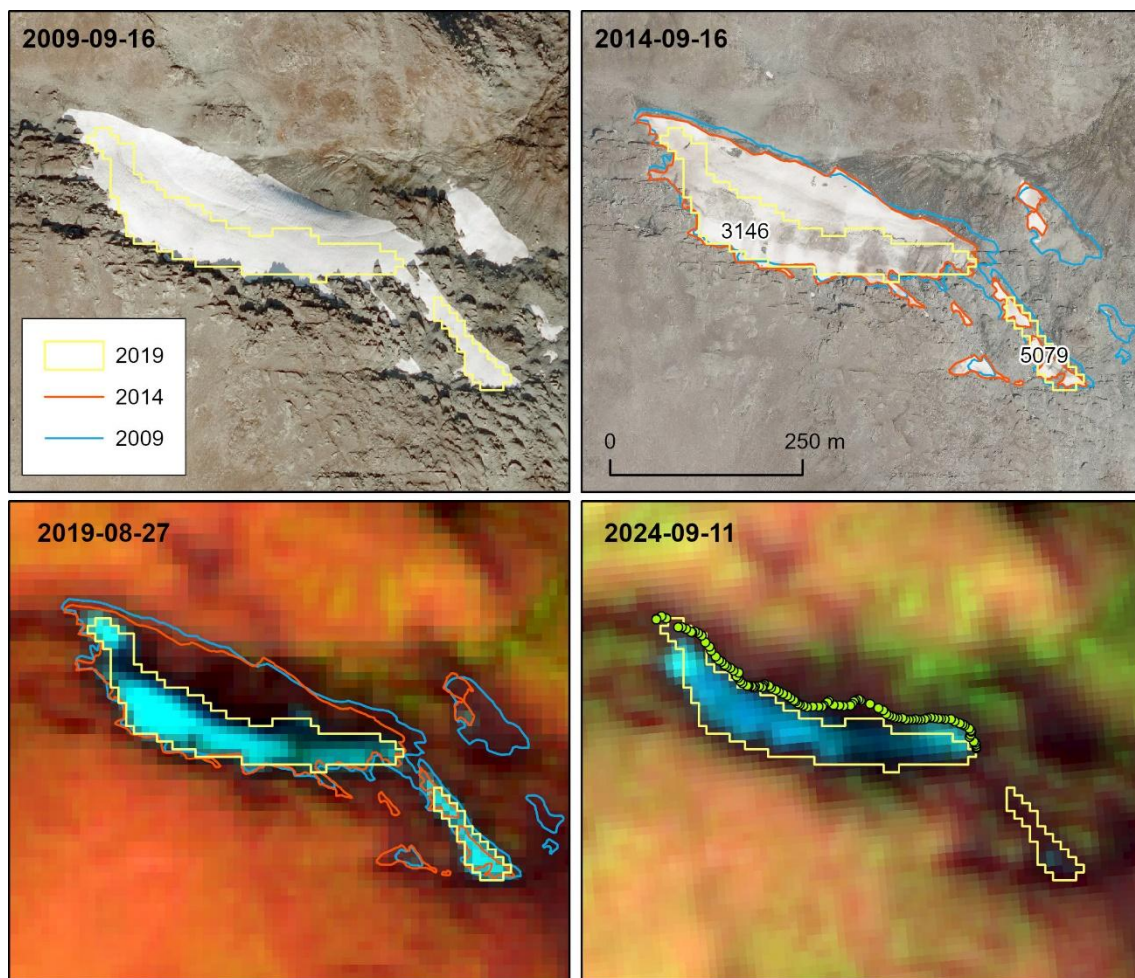
Til tross for de ovennevnte begrensningene er en foreløpig konklusjon at en av de store fordelene med å bruke Sentinel-2 data for denne typen kartlegging, er dens evne til å ta bilder i det infrarøde spektrumet og kombinere de ulike satellittbåndene til komposittbilder og vegetasjonsindekser. Ved hjelp av det infrarøde spektrumet kommer de karakteristiske forskjellene i vegetasjonstetthet mellom de bare, lite bevekste områdene innenfor grensene for den lille istid, og de godt og tett bevekste områdene utenfor disse grensene, tydelig frem. Dette potensialet kan utforskes videre i fremtiden gjennom mer systematisk testing og kartlegging, med et spesielt fokus på å automatisere lille istids deteksjon ved hjelp av maskinlæringsalgoritmer.

2.4.1.2 Kartlegging av fonner som er i ferd med å forsvinne

I siste nasjonale brekartlegging fant vi 20 breenheter som hadde forsvunnet siden forrige breatlas (Andreassen, 2022). I tillegg identifiserte vi breer som var i ferd med å forsvinne, som Breifonn i Rogaland og Vegdalsisen i Nordland. I FonnSat prosjektet så vi på ti små fonner og breer av arkeologisk interesse (Andreassen m.fl., 2020). Arbeidet FonnSat videreføres i et ph.d.prosjekt ved NTNU. Breer som er forsvunnet er også av interesse internasjonalt med liste over 'extinct glaciers' i Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) databasen og Global Glacier Casualty list lansert august 2024. NVE har bidratt med data fra brekartleggingen og med historie om [Breifonn og Juvfonna](#). Feltturer ble gjort til Breifonn og Kringsollfonna i august og september 2024. Målet er å studere egnetheten av Sentinel-2 og andre data til å kartlegge endringer i disse fonnene over tid, og videreføre arbeidet i FonnSat og Copernicus bretjeneste (Andreassen m.fl., 2020; 2021). Sentinel-2 satellittbilder fra 2024 viser at Breifonn har minket videre siden 2019 (Figur 2.26). Kringsollfonna har holdt stabil størrelse i hoveddelen fra 2019 til 2024 (Figur 2.27), mens en avsnørt del som fortsatt inneholder noe is, er i ferd med å bli borte (Figur 2.28).



Figur 2.26: Utviklingen av Breifonn i Rogaland som er kartlagt i de siste to breatlasene med henholdsvis Landsat-satellittbilde i 2003 (Andreassen m.fl., 2012) og Sentinel-2 bilder i 2019 (Andreassen m.fl., 2022), og nytt bilde i 2024. Legg merke til at Breifonn har minket fra 2019 til 2024, men at det er mer gjenliggende snø i 2024, selv om bildet er tatt ti dager senere. Omkretsen i 2024 er tegnet inn fra et ortofoto som kun dekker breenhet 3099. Figuren er oppdatert og modifisert fra Andreassen (2022).



Figur 2.27: Utviklingen av Kringsollfonna i oppdalsfjella fra 2009 til 2024. Bildene fra 2009 og 2014 er ortofoto fra norgebilder.no, bildene fra 2019 og 2024 er Sentinel-2 satellittbilder. De grønne punktene i 2024 er GPS-målinger langs nedre del av brekanten til den største delen (breenhet 3146) den 13. september 2024. Breenhet 3146 har ikke minket i utbredelse siden 2019, men breenhet 5079 er knapt synlig i bildet. Figuren er oppdatert og modifisert fra Andreassen m.fl. (2020).

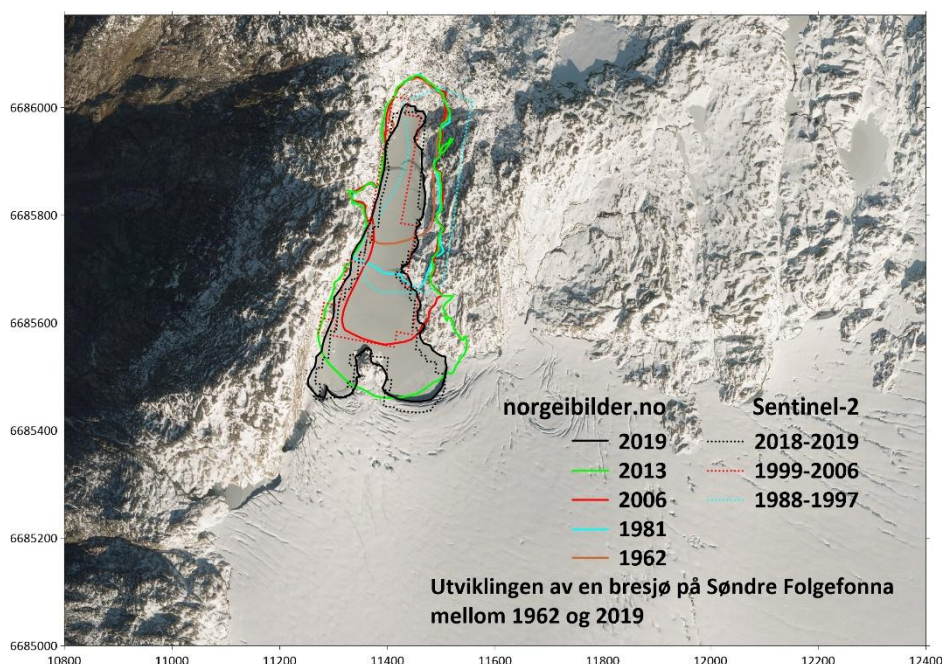


Figur 2.28: Feltundersøkelser ved Kringsollfonna 13. september 2024. Her ved breenhet 5079 som er nesten helt smeltet bort. Foto: Liss M. Andreassen

2.4.2 Bresjøer

2.4.2.1 Tidsserieanalyse av utvalgte bresjøer

Gjennom WMS-tjenesten “norgebilder.no” kan man kikke på og laste ned nye og historiske ortofoto fra hele landet. Alle nye ortofoto fra de årlige omløpsfotograferingene som Kartverket gjennomfører, tilgjengeliggjøres fortløpende i “norgebilder.no”. Historiske ortofoto produseres fylkesvis og mange ortofoto er per i dag tilgjengelig. Et produkt som viser historisk utvikling av utvalgte bresjøer som NVE følger med på, er blitt laget fra de ortofoto som var tilgjengelig på norgebilder.no høsten 2023. Ortofoto ble lastet ned og bresjøomkrets ble digitalisert på skjerm. Produktet ble publisert i Nasjonal vitenarkiv (Kjøllmoen og Andreassen, 2024). Deler av datasettet ble også brukt som referansedatasett for utvikling av ny løsning beskrevet i kapittel 2.4.2.2. Det historiske bresjøproduktet supplerer de ulike produktene laget med satellittdata, og kan brukes til å vise bresjøenes utvikling over tid (Figur 2.29). Det finnes imidlertid fortsatt mange historiske analoge og digitale flybilder som ennå ikke er prosessert til ortofoto. Det er derfor potensiale for at flere interessante bresjøomkretser kan digitaliseres på sikt.



Figur 2.29: Utviklingen av en bresjø på Søndre Folgefonna basert på ortofoto mellom 1962 og 2019 og satellittdata fra tidligere bresjøprodukter laget i prosjektene CryoClim og Copernicus bretjeneste. Bakgrunn: ortofoto fra 2019. Kilde: norgebilder.no.

2.4.2.2 Automatisk kartlegging av bresjøer med Sentinel-2

Tidligere resultater fra Copernicus bretjeneste har vist at Sentinel-2 er godt egnet til å kartlegge bresjøomkrets, oppdage nye bresjøer og oppdage jøkullaup (Nagy og Andreassen, 2019; Andreassen m.fl., 2022). Metodene som er brukt er ulike typer indekser som Normalized Difference Water Index (NDWI) med en terskelverdi, supplert med manuell redigering. Manuell digitalisering er også brukt for å digitalisere bresjøomkretser (Andreassen m.fl., 2021). I et samarbeid med NTNU ble Sentinel-2 sammenlignet med andre satellittdata som Landsat og PlanetScope og ble brukt til å rekonstruere hendelser fra små bredemte sjøer ved Tystigbreen (Aberhalden m.fl., 2024).

I NVE Copernicustjenester har vi testet og videreutviklet en løsning for automatisk detektering av bresjøers utstrekning med Sentinel-2 bilder og for å oppdage jøkullaup ved å se på statistikk for endring av bresjøenes areal gjennom en sesong.

Vi bruker indeksene NDWI og Normalized Difference Snow Index (NDSI) for å kartlegge bresjøareal. Sentinel-2 dataene hentes fra MET sin THREDDS-katalog, mens skymasker fra Sentinel-2 brukes for å filtrere vekk bilder med mye skyer.

Resultatet er geometrier for hver bresjø på hver skyfrie dag med bilder, og en graf som representerer endringen av bresjøens areal over tid. utfordringer med sky- og skyskyggedeteksjon gjør at løsningen trenger kraftig filtrering av hvilke bilder som brukes, og gjør det derfor vanskelig å få på plass helautomatisk varsling av jøkullaup. Det er i tillegg en del utfordringer knyttet til å skille mellom snø og slamholdig vann.

Prosedyre

Totalt 51 kjente bresjøer i Norge ble valgt ut for sporing, og en .shp-fil med referansegeometrier til disse ble sammenstilt basert på et NVE-datasett kartlagt med Sentinel-2 data fra 2018 (Nord-Norge) og 2019 (Sør-Norge) (Andreassen m.fl., 2022; Andreassen og Nagy, 2022), supplert med data fra det historiske datasettet (Kjøllmoen og Andreassen; 2024) og Landsat satellittdata (Klingenberg og Andreassen, 2016). Alle bresjøene har fått tildelt en løpende bresjø-ID.

Av de 51 lokalitetene var 37 vann i Sør-Norge, i Sentinel-2 tiles 32VLM, 32VLP, 32VMN og 32VMP. De resterende 14 vannene var i Nordland og Troms, i Sentinel-2 tiles 33WVP, 33WVQ, 33WWQ, 33WWR og 33WXT.

Analysen ble i all hovedsak utført i den felles Grass GIS-infrastrukturen til NVE.

Hver bresjø ble analysert hver for seg, og et space time raster dataset (STRDS) ble registrert med relevante Sentinel-2 bilder, ut ifra den Sentinel-2 tile som vannet var posisjonert i. Utstrekningen av datasettet var bresjøens *bounding box* med en 2 km buffer i hver dimensjon. Siden oppløsningen til Sentinel-2 er 10 m var oppløsningen til hvert raster altså noe i overkant av 4000 px × 4000 px, avhengig av vannets størrelse. Deretter ble en deteksjon utført som følger:

1. En binær skymaske ble laget og lagret som et raster. Dette ble ikke brukt i selve analysen, men brukt kun for å filtrere vekk hele bilder med skyer i.

2. Et NDSI-raster ble kalkulert (men ikke lagret) av bånd 3 (grønt) og 11 (kortbølget infrarødt, SWIR). Alle piksler som hadde en NDSI-verdi over 0,42 ble maskert ut. NDSI beregnes

$$NDSI = \frac{\text{etter} \quad \text{Grønt} - SWIR}{\text{Grønt} + SWIR} \quad \text{formelen:}$$

3. Bånd 3 og 8 (nært infrarødt, NIR) ble kombinert til et NDWI-raster. NDWI beregnes etter

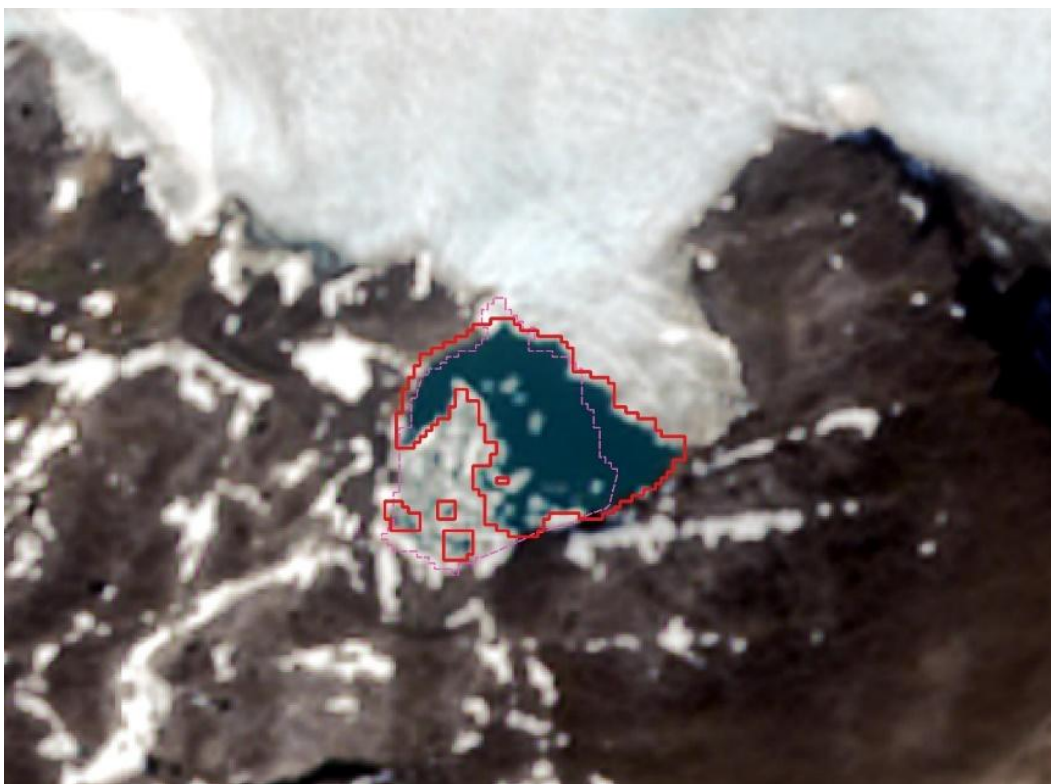
$$NDWI = \frac{\text{Grønt} - NIR}{\text{Grønt} + NIR} \quad \text{formelen:}$$

4. NDWI-rasterne og skymasken ble aggregert døgnavis, så om det en dag eksisterte flere bilder over vannet (f.eks. om vannet var i en grensesone mellom flere Sentinel-2 tiles), ble de sammenslått til ett bilde.

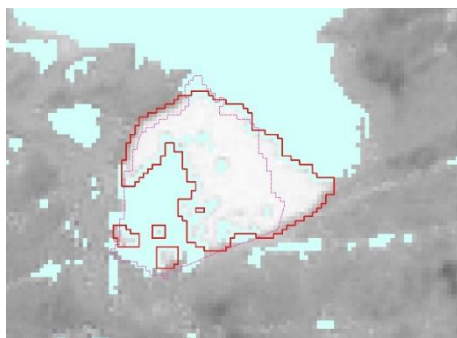
5. Et nytt raster ble laget av NDWI-rasteret ved å gjennomføre en naboverdianalyse som normaliserte hver piksel relativt sine naboer (en 49 px stor buffer i hver dimensjon, så hver piksel ble normalisert i relasjon til omtrent den nærmeste kvadratkilometeren). Dette hevet kontrasten i rasteret. Nabopikslers med en NDWI over eller lik 0,23 ble ikke tatt hensyn til, for å unngå at bresjøene selv bidro til å minke verdien på vannpikslers. Dette førte til at pikslers med relativt høy NDWI kunne ha en verdi over 1, selv om rasteret var normalisert.
6. Et binært raster ble beregnet hvor sanne verdier representerte enten:
 - en unormalisert NDWI-verdi større enn eller lik 0,23, noe som betyr at pikselen har stor sannsynlighet for å være vann (verdien 0,23 ble valgt basert på Nagy og Andreassen (2019)), eller
 - et unormalisert NDWI-verdi større enn 0,13 og et normalisert NDWI-verdi større enn 0,84, noe som betyr at pikselen ligner vann veldig mye mer enn nabopikslene sine. Verdiene 0,13 og 0,84 ble valgt eksperimentelt.
7. Det binære rasteret ble jevnet ut ved å gi hver piksel modalverdien av de ni nærmeste pikslene.
8. Det binære rasteret ble så konvertert til vektorform. Her ble bilder med skyer i filtrert vekk, og kun de geometrier som var i kontakt med vannets referansegeometri og som ikke var veldig mye større enn referansegeometrien ble beholdt.

Produktet

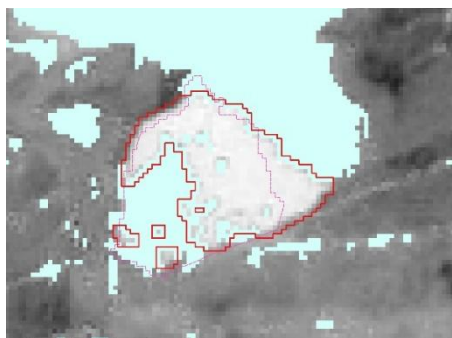
Deteksjonene lagres som en samling geometrier per bresjø og dato. Disse kan enten vises én og én, eller analyseres sammen som en tidsserie. Et eksempel på en slik geometri kan sees i Figur 2.30, hvor bresjø 349 har blitt detektert. En god del av vannet er dekket av breis fra kalving og maskeres som snø av algoritmen, noe som blir tydelig om man går inn på NDWI-rastrene som blitt brukt i deteksjonen (se Figur 2.31 og Figur 2.32).



Figur 2.30: Bresjø 349 (ved Frostisen) i data fra 2024-07-15. Referansegeometri i lilla, deteksjon i rødt. /Sentinel Copernicus data 2024/

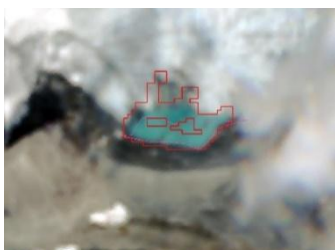


Figur 2.31: NDWI-raster fra 2024-07-15. Snø er filtrert ut og vises her i blå farge. Symbologien (min/maks) går fra $-0,56$ (svart) til $0,29$ (hvitt).



Figur 2.32: NDWI-raster hvor hver piksel er normalisert i relasjon til nabopikslene. Symbologien (min/maks) går fra 0 (svart) til $1,14$ (hvitt).

Det er også mulig å følge sjøer over tid. Dette kan dels brukes for å følge med på endringer av sjøer pga. breendringer, men også for å påvise jøkullaup. Et godt eksempel er jøkullaupet i bresjø 306 (Midtgreen) i 2024. Dette vannet ble tømt i to omganger, og dette vises både i de enkelte geometriene (se Figur 2.33, Figur 2.34 og Figur 2.35), men også om man plotter vannets areal over tid (se Figur 2.36).



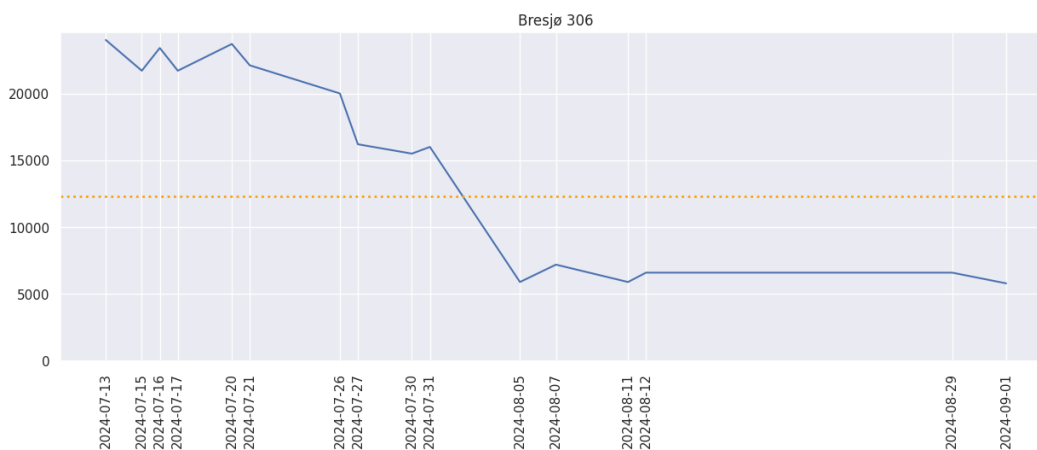
Figur 2.33: Bresjø 306 i data fra 2024-07-23. Dette er omtrent vannets største utstrekning.



Figur 2.34: Bresjø 306 i data fra 2024-07-26. Her har vannet åpenbart blitt tømt.



Figur 2.35: Bresjø 306 i data fra 2024-08-05. Nå er vannet plutselig enda mindre.



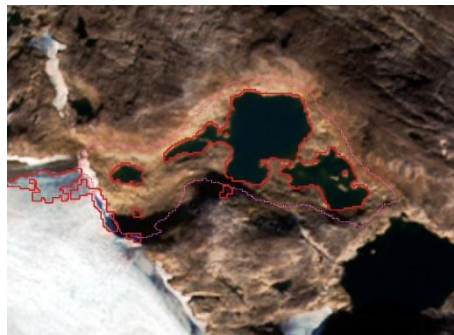
Figur 2.36: Arealet til bresjø 306 over tid. Datapunkter som avviker kraftig fra referansegeometrien, eller som viser en veldig stor økning i arealet har blitt fjernet. Den gule streken representerer referansegeometrien sitt areal.

Siden analysen er avhengig av at det leveres skyfrie bilder, kan resultatet bli vanskelig å tolke om man ikke er heldig med været i dagene rett etter jøkullaupet. En gang etter 2024-08-09 (se Figur 2.37) og før 2024-08-15 fant et jøkullaup sted fra bresjø 444 (Blåmannsisen). Dessverre kunne dette ikke detekteres på ordentlig måte før 2024-09-06 (se Figur 2.38) grunnet mye skyer i august.

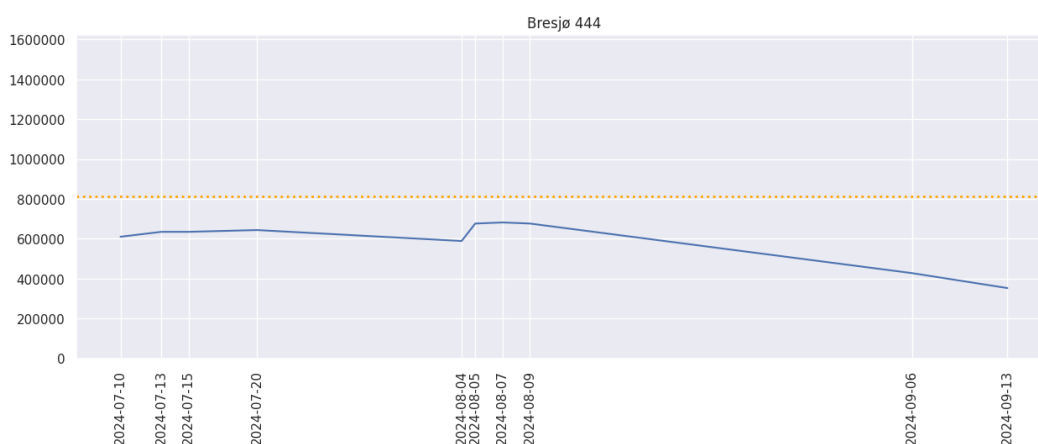
Når man plotter dette (Figur 2.39) så ser man at arealet har minket med 37 %, men dette er ikke veldig tydelig da det er så stor forskjell i tid mellom bildene.



Figur 2.37: Bresjø 444 i data fra 2024-08-09. Vannet er nesten, men ikke helt fullt.



Figur 2.38: Bresjø 444 i data fra 2024-09-06. Vannet er nå tømt. Se diskusjon om falske positiver i dette bildet.

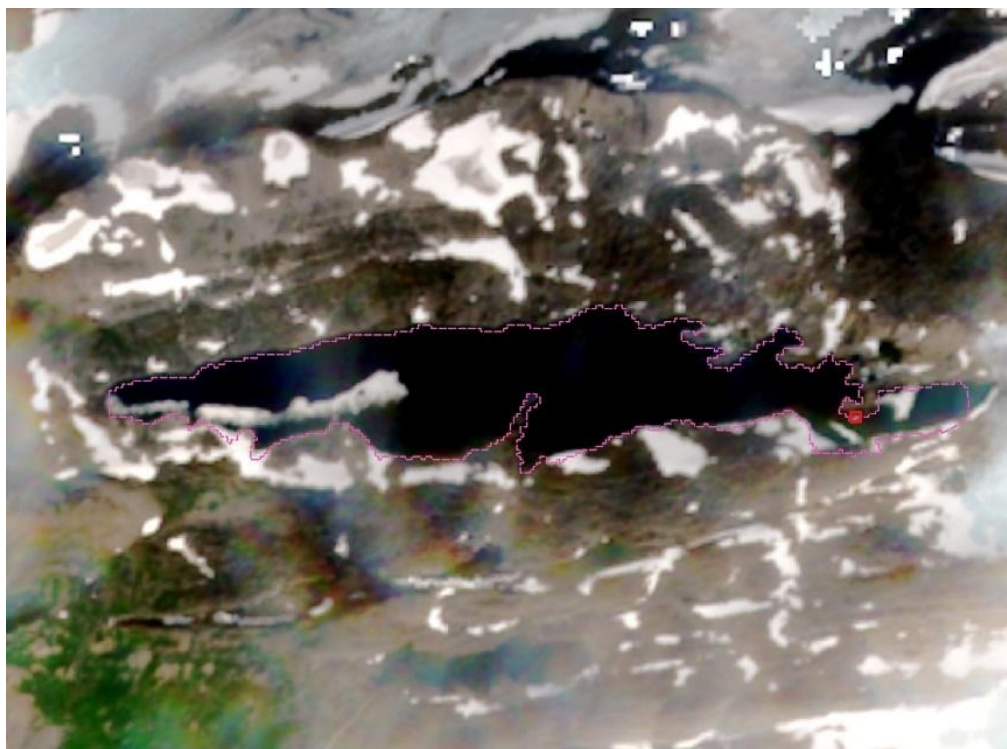


Figur 2.39: Areal for bresjø 444 over tid. Det skjedde en tømning mellom 2024-08-09 og 2024-09-06.

Diskusjon

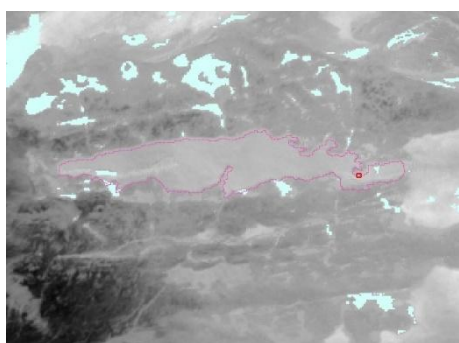
Løsningen med tidsserie av areal leverer rimelig nøyaktige resultater når forholdene er gode. Ved gode forhold er det ingen skyer eller skygge fra skyer, og det er høy solvinkel med få skygger i terrenget, og vannet er uten slam eller is. Dessverre er det få ganger dette er tilfellet, særlig over tid, noe som kreves for å lage en nøyaktig tidsserie.

Sentinel-2 dataene inneholder en skymaske som skal gjøre det mulig å unngå å analysere skyer, men den klarer ikke å finne alle skyer, og når en sky kommer over et vann som analyseres blir det meget vanskelig å få frem brukbare data. Dette selv om skyen er gjennomsiktig. Et eksempel på dette er vist i Figur 2.40, hvor et meget tynt skylag ligger over bresjø 378 (Svartisen). Her finner algoritmen kun én piksel som den mener er åpent vann, selv om et menneske ser vannet meget tydelig.

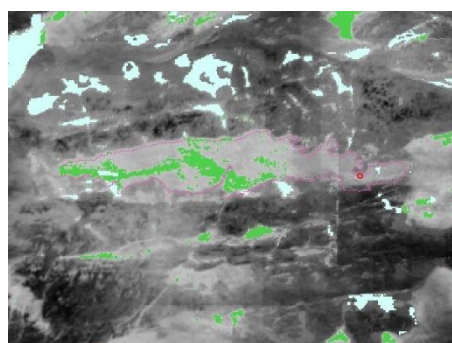


Figur 2.40: Bresjø 378 fra 2024-07-15. Et tynt skydekke ligger over vannet og gjør at kun én piksel (i rødt) klassifiseres som åpent vann.

For å finne ut hva som skjer hjelper det å se på NDWI-rastrene som analysen har blitt gjort på. Figur 2.42 viser at en god del av vannet (men mindre enn man kunne håpet) er over terskelverdien for det normaliserte rasteret, 0,84. Men da en deteksjon av det normaliserte rasteret også krever en unormalisert NDWI-verdi over 0,13, blir bare én piksel markert, da kun én piksel når denne terskelverdien (se Figur 2.41). Ingen del av vannet blir detektert som åpent vann ved å bruke den andre NDWI-terskelverdien på 0,23.



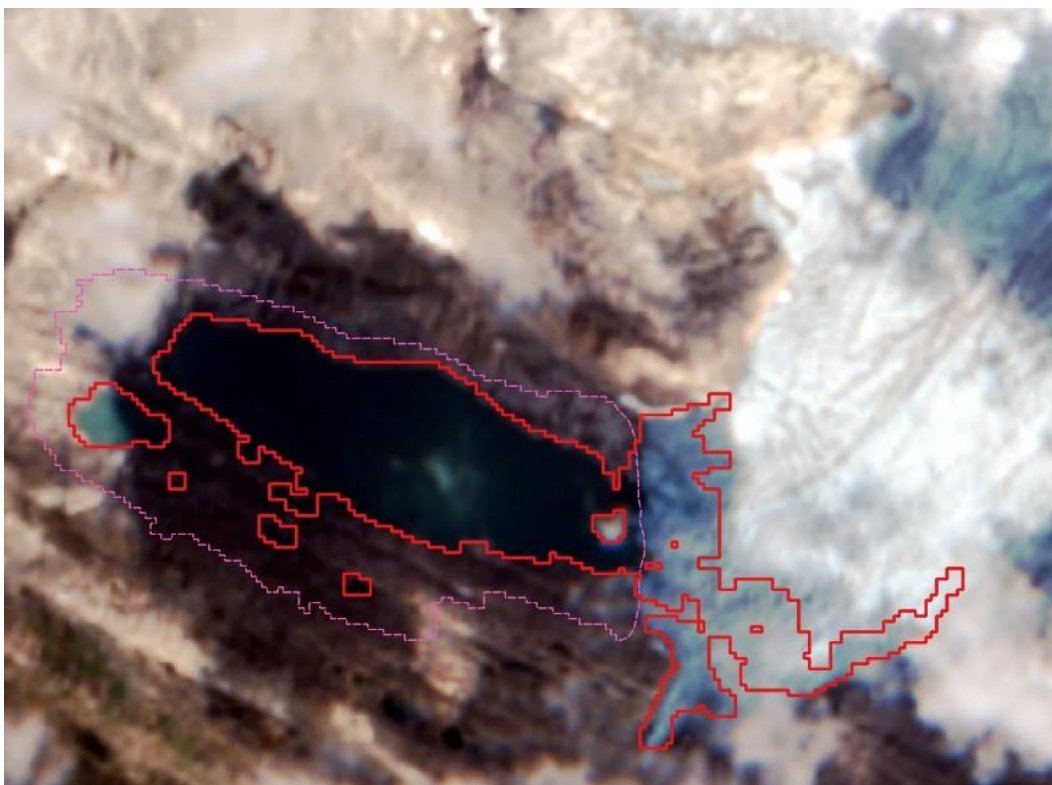
Figur 2.41: NDWI-raster over bresjø 378 fra 2024-07-15. NDWI for vannet er i gjennomsnitt 0,06. Én eneste piksel på vannet er over den lavere terskelverdien på 0,13. Ingen piksel er over terskelverdien 0,23.



Figur 2.42: Normalisert NDWI-raster over bresjø 378 fra 2024-07-15. Her er flere deler av vannet over terskelverdien på 0,84 (grønt) enn hva som er markert som åpent vann (rødt).

Selv skyer (eller skymaske) på kun en del av vannet er et problem, da det vil bety at det beregnede arealet blir mye mindre enn det reelle. Dette gjør at det kun er skyfrie bilder som er interessante for denne løsningen. Ettersom skymasken til Sentinel-2 ikke er tilstrekkelig er det et alternativ å bruke Sentinel-3 eller værmodeller for å finne store skyfrie områder, og kun bruke disse for analyse. Et problem med denne løsningen er at flere brukbare bilder vil bli sortert vekk.

Skygge er et problem når man bruker NDWI. Skygge er per definisjon områder som er indirekte belyste, og slike områder får en høyere fargetemperatur enn direkte belyste områder grunnet Rayleigh-spredning i atmosfæren (f.eks. er fjell i skygge ikke bare mørkere, men også betydelig blåere enn solbelyste ditto). Siden NDWI kun er en sammenligning mellom to bølgelengder vil dette også heve NDWI-verdien i skyggen, noe som fører til falske positiver (se Figur 2.38 og Figur 2.43). Dette gjelder så vel skyskygger som skygger i terrenget.



Figur 2.43: Bressjø 384 (Svartisheibreen) fra 2024-09-06. Deteksjonen følger skyskyggen opp på breen. Ellers er deteksjonen stort sett korrekt.

Det er mulig å anvende terrengkorreksjon på rasteret for å jevne ut ulikheter i belysning som terrenget fører til. Men for at det skal gi utslag på NDWI-verdien må denne korreksjonen også rette i forholdet mellom rødt og nært infrarødt bånd, ikke kun endre i intensiteten på de ulike båndene. Terrengkorreksjonen som finnes tilgjengelig i Grass GIS (*i.topo.corr*) har ikke den funksjonaliteten. En bedre måte å løse problemet på, i hvert fall når det gjelder skyer, er å finne en bedre løsning for å filtrere bort bilder med skyer i.

Noe av det første som skjer i prosesskjeden er at snø filtreres vekk. Det er i hovedsak to ting som gir feil i denne filtreringen, is i vannet og slam. Dette er et problem da breer både kalver is i bresjøer og avgir slam i disse. I Figur 2.44 ser vi et isfylt vann (bresjø 334 på bre 6207), hvor kun en brøkdel av vannet har blitt detektert. Det er vanskelig å tenke seg en løsning på dette, da isen i vannet rett og slett ikke er vann, så det ville vært feil av prosesskjeden å klassifisere det slikt.

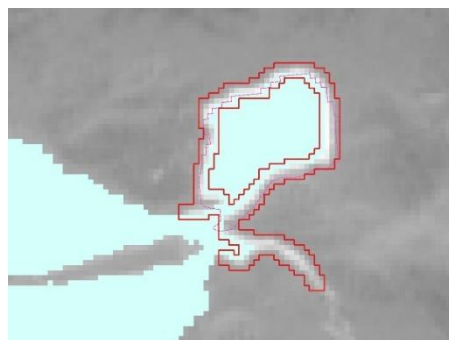
I Figur 2.45 og Figur 2.46 er det i steden en slamrik bresjø (331 på Koppangsbreen) som ikke blir korrekt detektert. Slammet blir klassifisert som snø og fjernet tidlig i prosessen, så når vannet skal detekteres så er det ikke særlig mange piksler igjen å detektere, og vi får kun en krans rundt stranda på vannet.



Figur 2.44: Bresjø 334 fra 2024-08-20. Is i vannet gjør at geometrien er veldig mye mindre enn vannets faktiske utbredelse.



Figur 2.45: Bresjø 331 fra 2024-07-31. Bresjøen blir kun detektert rundt stranda.

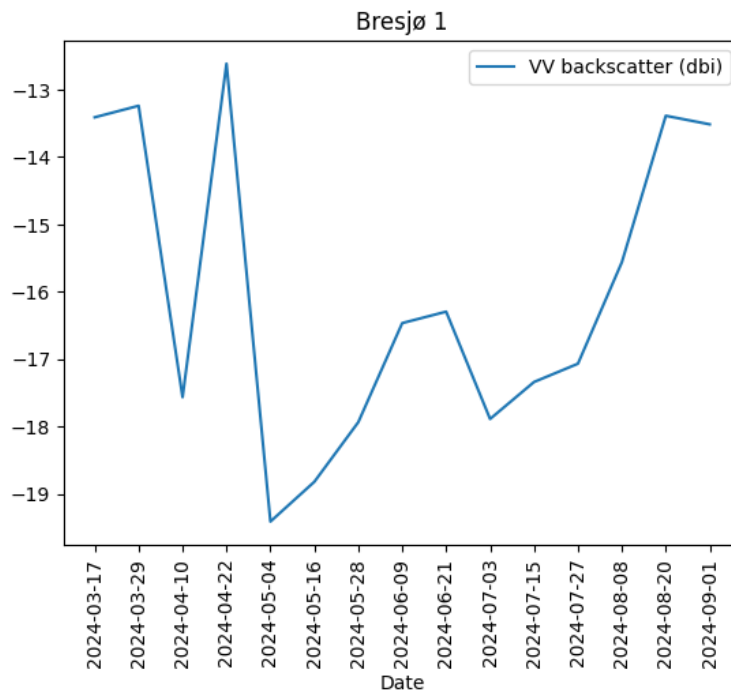


Figur 2.46: NDWI-raster for bresjø 331 fra 2024-07-31. Her blir det tydelig at det slamrike vannet har blitt filtrert bort som et snøfelt.

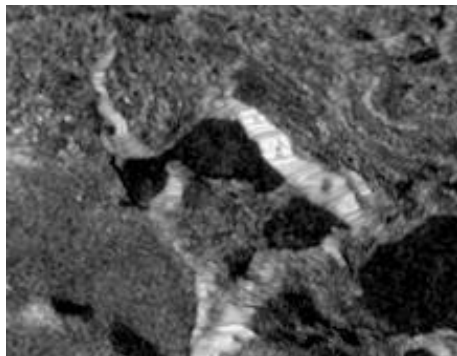
Det bør være mulig å utvikle en indeks som gjør det mulig å skille mellom veldig blått vann og snø. Hvis en slik indeks ble beregnet samtidig som NDSI-indeksen som filtrerer vekk snø, så skulle man kunne unngå å filtrere bort vann som ligner på bresjø 331.

2.4.2.3 Uttesting av automatisk overvåkning av bresjø med Sentinel-1

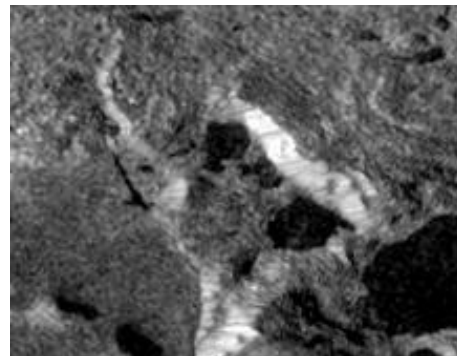
I forbindelse med utviklingen av snølinjeanalyse ved hjelp av Sentinel-1 (se seksjon 2.4.3) ble det også testet om det var mulig å oppdage jøkullaup i dataene. Gjennomsnittet av tilbakespredningsverdiene (engelsk «backscatter») over Messingmalmvatnets referansegeometri ble plottet over en sommersesong (se Figur 2.47). Det er kjent at vannet ble tømt 12. august (personlig kommunikasjon med SISO Energi), og det kan ses av Sentinel-1 bildene (se Figur 2.48 og Figur 2.49).



Figur 2.47: Sentinel-1 backscatter over Messingmalmvatnet. Vannet ble tømt 12.august (personlig kommunikasjon med SISO Energi).



Figur 2.48: Sentinel 1-data fra 2024-08-08



Figur 2.49: Sentinel 1-data fra 2024-08-20

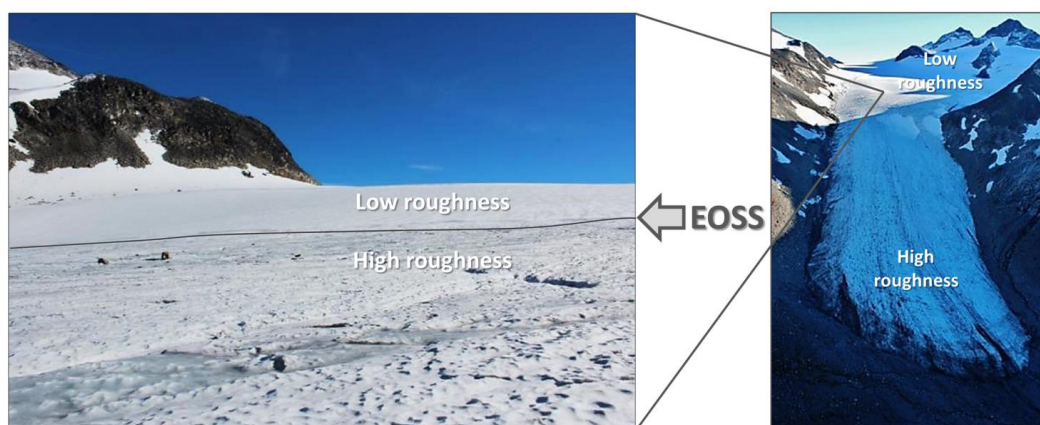
Tidlig på sesongen er det mye forstyrrelser av snøsmelting og is i vannet. Men fra 2024-06-09 er vannet godt synlig i Sentinel-1 backscatter verdiene, og i forbindelse med tømminga i midten av august ser man en tydelig oppgang av backscatterverdien i vannets referansegeometri. Dette skyldes at vannet tømmes og dermed byttes ut med fjell, som sprer en større andel av strålinga tilbake til sensoren. Hvor bra denne metodikken vil fungere i ulike situasjoner har ikke blitt ordentlig vurdert ennå, men kan være en mulig måte å overvåke jøkullaup i kjente bredemte sjøer fremover.

2.4.3 Snølinjer

Det er flere grunner til at kartlegging og overvåkning av snølinjer på breer i Norge er nyttig for NVE. Informasjon om snølinjer kan være til hjelp når man beregner massebalanse for breer. Man får et inntrykk av hvordan smeltesesongen har vært og om det har skjedd noe spesielt på breene gjennom siste sesong. Man kan også bruke snølinjer avledet fra satellitt til å validere resultater fra bremodeller. I tillegg er det nyttig å bruke satellittbilder før man skal planlegge feltarbeid for å få innblikk i snøforholdene på breen. Dette kapittelet svarer til leveranse 4a «Snø- og firnlinjedeteksjon med Sentinel-1 og Sentinel-2». Siden 2022 har det blitt lagt mye ressurser på å få på plass produksjonslinjen for geokodede Sentinel-1 tilbakespredning av intensitetsdata (engelsk «backscatter»). NVE valgte å gjøre mest arbeid på uttesting av Sentinel-1 for snølinjer. Arbeidet med den mer etablerte metoden for kartlegging av snølinjer fra Sentinel-2 er ikke implementert. En beskrivelse av deteksjon av snølinjer med Sentinel-2 er gitt i Andreassen m.fl. (2021a). Noe arbeid er også gjort med å ta ut snølinjer fra Sentinel-2, og med å sammenligne snølinjer digitalisert manuelt fra Landsat med Sentinel-2.

2.4.3.1 Snølinjeovervåkning på bre med Sentinel-1

Bakgrunnen for å legge til rette for tidsserieplott av Sentinel-1 er arbeidet til Winsvold m.fl. (2018), hvor det ble presentert forskjellige måter å overvåke breer med tidsserier. Grunnen til at det er mulig å følge snølinja på en bre over tid med Sentinel-1 er på grunn av ruhetsforskjellen mellom våt sesongsnø og breis/firn (Figur 2.50).



Figur 2.50: Illustrasjon av sesongbasert snø som har lav ruhet, og firn eller breis som har høyere ruhet i overflaten (Winsvold m.fl. 2018). EOSS står for «end of summer surface» og er ofte den linja som korresponderer med likevekstlinja.

Metode

I arbeidet som er presentert her har vi valgt samme type representasjon av dataene som i Winsvold m.fl. (2018). Denne representasjonen kan justeres ved behov. Universitetet i Oslo har gjennom MASSIVE-prosjektet bidratt med veiledning på en oppdatert normalisering av Sentinel-1 intensitetsverdiene langs brelinja som er representert i plottet (personlig kommunikasjon Thomas Schellenberger, 2024). Målet med normaliseringen er å få sammenliknbare verdier av tilbakespredning over tid. Grunnen til at man trenger dette er topografiske effekter av helning som gjenspeiles i radarsignalet gjennom året, både sommer og vinter. Dette kan påvirkes av breens helning mot satellittsensoren eller sprekkemønster.



Figur 2.51: Hellstugubreen fra Sentinel-2 6. september 2024 (til venstre), og Sentinel-1 4. september 2024 (til høyre). Den svarte linja representerer brelinja hvor intensitetsverdier fra Sentinel-1 trekkes ut. Gjenværende snø fra sesongen gjenspeiles i mørkere områder på breen i Sentinel-1 satellittbildet (til høyre). Copernicus Sentineldata (2024).

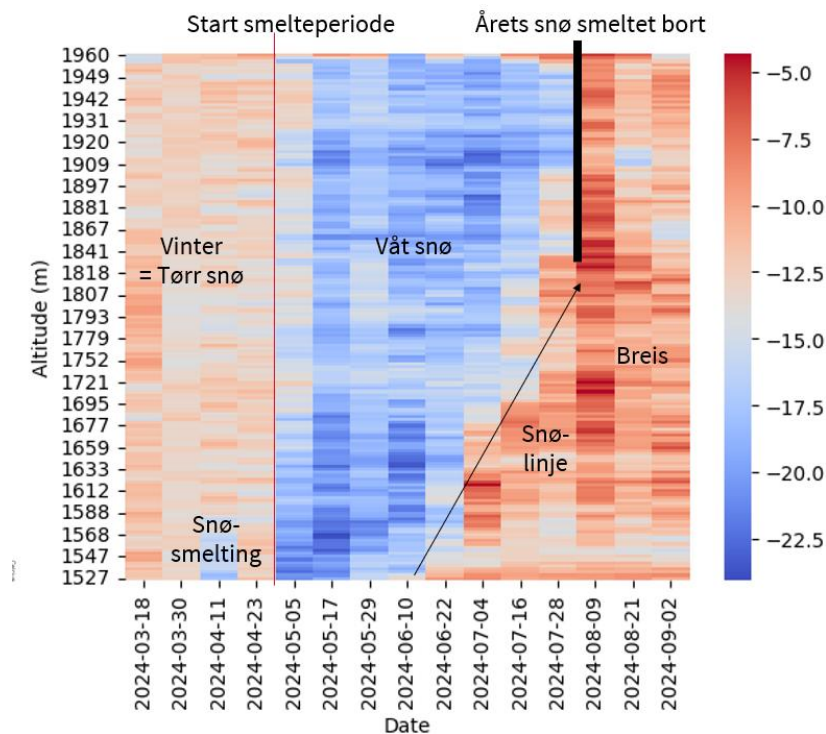
Normaliseringen gjøres for alle piksler som er i nærheten av en endimensjonal brelinje (Figur 2.51). Det er disse enkeltverdiene per piksel som plottes i resultatene.

$$Norm = Sentinel1 - gj.snitt(3 \times vinter Sentinel1) + gj.snitt(Sentinel1)$$

Plottene er lagd med et skript i Jupyter som kobler seg på actinia. Der plukkes det kun ut Sentinel-1 intensitetsverdier fra samme relative bane slik at piksler med samme opptaksgeometri sammenliknes i et plott. Det er flere overlappende baner for Fastlands-Norge i en repetisjonssyklus av Sentinel-1A på 12-dager. Derfor er det mulig å få informasjon ofte, selv med kun én operasjonell satellitt, ved å plote og sammenlikne flere overlappende baner hver for seg.

Produkt

Med Sentinel-1 har vi denne prosjektperioden overvåket Hellstugubreen i Jotunheimen siden 18. mars 2024. Denne overvåkingen innebærer lengden på smelteperioden, værhendelser med smelting, regn eller nysnø, og muligheten for å følge snølinja over tid i smeltesesongen. I Figur 2.52 ser man flere indikatorer på endringer over tid langs brelinja representert på y-aksen som høyde. I Figur 2.51 er den svarte brelinja tegnet inn på satellittbildet.

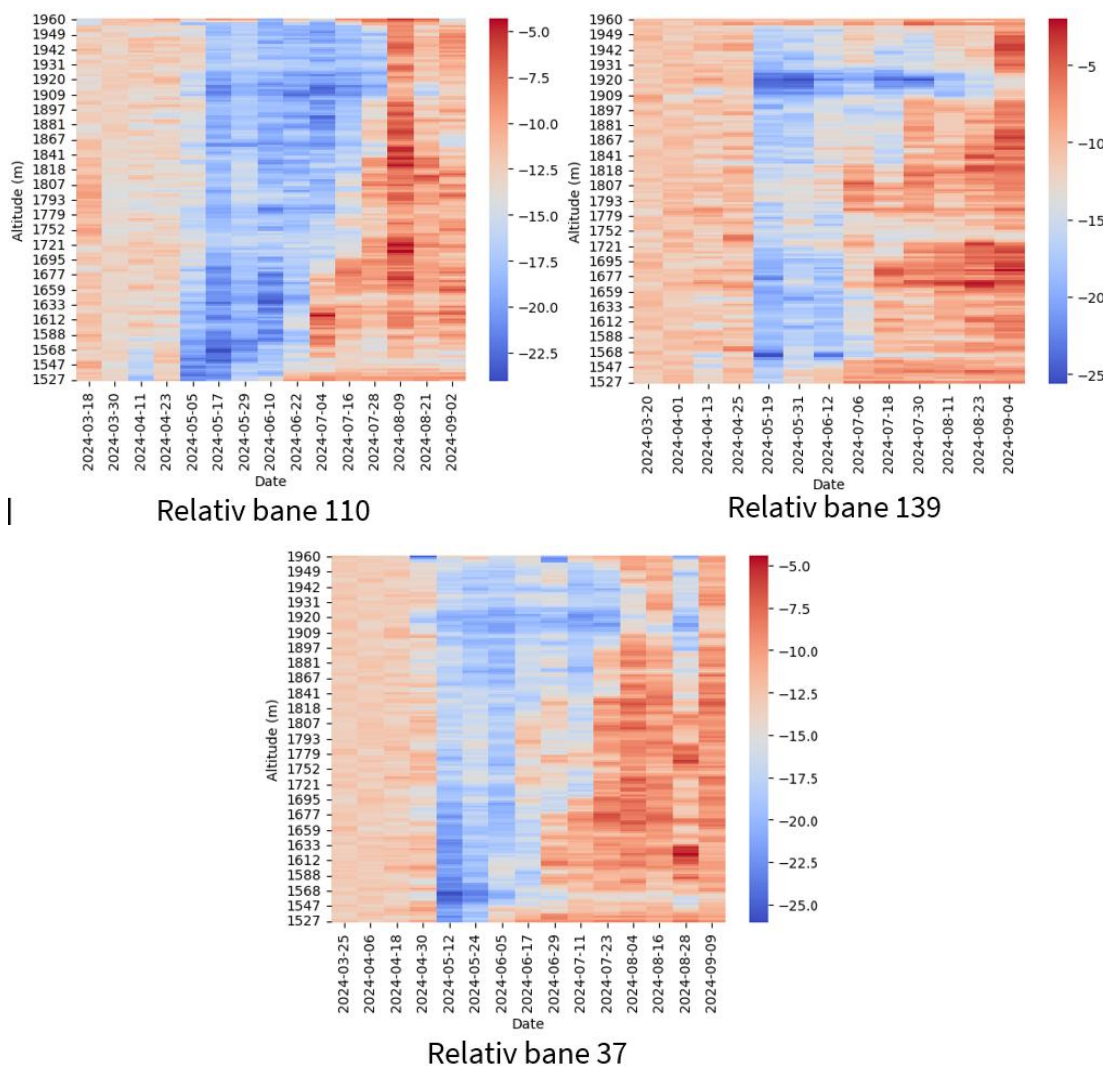


Figur 2.52: Resultat fra Hellstugubreen fra 18. mars til 2. september 2024. Det er indikert på figuren hva de forskjellige elementene er. Den svarte brelinja fra Figur 2.51 på y-aksen representert med høyde, og dato på x-aksen. Verdiene i plottet er normaliserte Sentinel-1 intensitetsverdier med VV-polarisering.

Her er forklaringer på de forskjellige elementene i Figur 2.52 for 2024-sesongen:

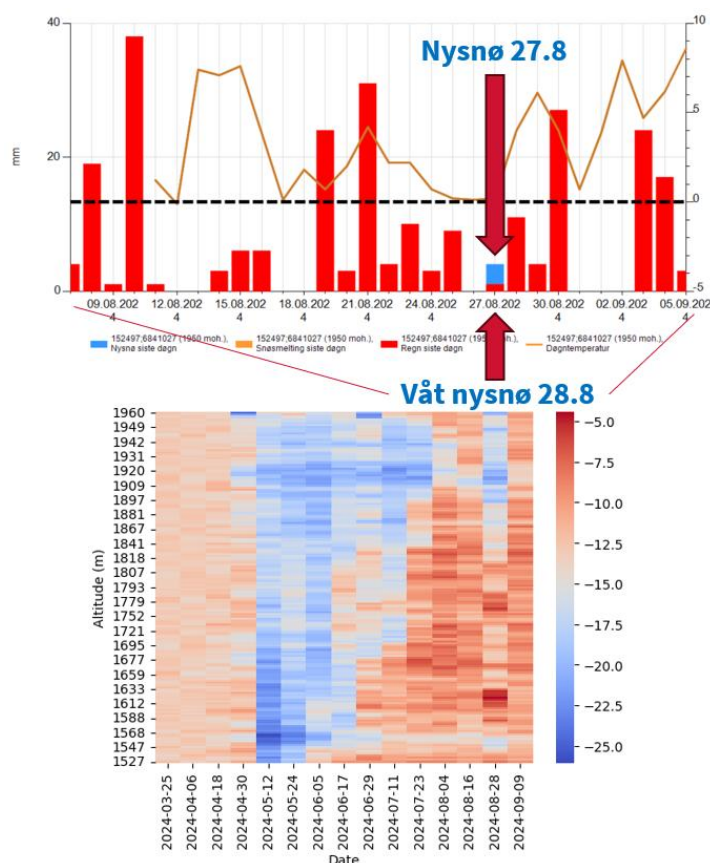
- Den meteorologiske stasjonen på Sognefjellshytta viste noen dager med temperatur over 0 grader, blant annet 10. april, og det er trolig denne varmhendelsen som gjenspeiles i satellittbildet fra 11. april i høydeintervallet 1527-1568 moh.
- Mellom 18. mars og 5. mai er det tørre og kalde forhold langs brelinja
- Den 5. mai har smelteperioden startet.
- Den 9. august er all snø fra 2024-sesongen smeltet bort langs brelinja.
- Smelting mellom 10. juni og 9. august gjør at snølinja på Hellstugubreen heves oppover i høyden langs brelinja.
- Etter 9. august er det bare breis og firn langs brelinja og ingen gjenværende snø fra 2024-sesongen.

For å få en tettere tidsserie kan man sammenlikne Sentinel-1 intensitetsverdier for alle overlappende baner, eller også kalt, relative satellittbaner (se Figur 2.53). I praksis får man da et innblikk i snø- og smeltesituasjonen på en bre med ganske tett tidsintervall (2-5 dager mellom hvert satellittopptak i Sør-Norge).



Figur 2.53: Brelinje på y-aksen representert med høyde og dato på x-aksen. Det er tre relative satellittbaner 110, 139, 37 som er plottet for samme smeltesesong i 2024. Til sammen gir disse plottene en ganske tett tidsoppløsning, men de gir forskjellige uttrykk grunnet geometriforskjeller mellom bakken og sensoren. Verdiene i plottet er normaliserte Sentinel-1 intensitetsverdier med VV-polarisering.

I Figur 2.54 ser vi også nysnø observert i Sentinel-1 tidsserien med relativ bane 37. Her sammenlikner vi denne med meteorologiske data fra MET hvor det var registrert nysnø dagen før satellittopptaket.



Figur 2.54: Det ble registrert våt nysnø i satellittbildet fra 28. august (relativ bane 37). Her sammenliknes dette med METs meteorologiske data hvor nysnø ble registrert (øverste figur merket blått). Brelinje på y-aksen representert med høyde og dato på x-aksen. Verdiene i plottet er normaliserte Sentinel-1 intensitetsverdier med VV-polarisering.

Diskusjon

Tilgjengeliggjøring av produktene er det per dags dato ikke lagt til rette for. Disse produktene bør kun visualiseres når brukerne trenger dem, og kan kjøres på bestilling i Jupyter-skriptet med de ferskeste Sentinel-1 dataene fra NVEs Copernicus-infrastruktur gjennom actinia. Produktet kjøres i dag ved behov for de breene NVE måler massebalanse på, og skal på sikt tilgjengeliggjøres til brukerne i mappestruktur i NVE etter at brelinjene er oppdatert og optimalisert for hver enkelt bre. Det er ønskelig med flere plott for en bre hvor flere brelinjer blir benyttet. Les mer om anbefalinger for neste periode i kapittel 3.3.6. Det er fortsatt nødvendig at breforskerne utfører manuelle inspeksjoner på resultater av snølinjer og andre smelterelaterte parametere fra Sentinel-1. Da er det fint å kunne validere SAR-tidsseriene med enten bakkeobservasjoner eller Sentinel-2 satellittbilder.

I tillegg til å kunne bruke informasjon fra tidsserier av Sentinel-1 til å få nyttig hjelp når breforskerne i NVE beregner massebalanse eller planlegger feltarbeid, kan man også på sikt gå et steg videre. Det vil si at man kan ta ut statistisk informasjon om for eksempel snølinnehøyder, varighet på ablasjons- og akkumulasjonssesongen, og regnhendelser på breen, og bruke dette til parametersetting i modeller. Uttrekk av snølinjer kan også brukes til å validere modellresultater, eventuelt estimere massebalanse for umålte breer. Dette krever mer uttesting og dedikert satsning for å gjennomføre.

2.5 Flom

NVE har et statlig ansvar for å forebygge skader fra flom i Norge. Under og etter en flomhendelse er det nyttig å få overblikk over flommens utvikling og dens maksimale utbredelse (kulminasjon). Det er derfor av interesse for NVE å kartlegge de oversvømte områdene ved flom nøyaktig, både for dokumentasjon i etterkant av hendelser, for kalibrering og evaluering av hydrauliske modeller, og for utarbeidelse av flomsonekart og aktsomhetskart for flom. I dette kapittelet beskrives brukerbehovene for satellittprodukter som er til støtte for dette.

Delprosjekt 5 Flom har blitt omprioritert i prosjektperioden (se vedlegg 1). NVE har gjort omprioriteringer fordi noen leveranser viste seg å ikke være ønskelig å gjennomføre på grunn av begrenset dokumentert nytteverdi med dagens produksjonslinje. Forsinkelser i prosjektet FlomRisk, et FoU-prosjekt som skulle etablere hydrauliske modeller for flere områder, førte også til endrede prioriteringer og mindre ressursbruk for delprosjektet som ble omfordelt på andre delprosjekt. De viktigste grunnene til denne vurderingen er (les mer i kapittel 2.5.2.1 og 2.5.2.2):

1. Varslingssituasjonen finner naturlig nok sted før selve hendelsen, og registreringer ved kulminasjonstidspunktet kommer for seint til å bli en del av varslingen. Fjernmålte flomareal er dermed primært nyttige ved kalibrering og evaluering av modeller. NVEs eksisterende flomtjeneste basert på Sentinel-1 har vært tilgjengelig i noen år, men brukes i praksis svært lite både av varslingstjenesten og av seksjonene som arbeider med sikring, flomkartlegging og arealplanlegging.
2. De fleste norske vassdrag responderer raskt på en nedbørhendelse, og den relativt lave opptakshyppigheten gjør at en ofte ikke får målinger ved eller nær kulminasjon. Dette er ytterligere forsterket gjennom at Sentinel-1B ble tatt ut av drift, men vil bedre seg med Sentinel-1C. For de største vassdragene er dette problemet mindre.
3. Den romlige oppløsningen på 20 m gjør at variasjoner i vanndekket areal i mindre og mellomstore elver har liten signatur i bildene. For større vassdrag er situasjonen bedre, men slike vassdrag er ofte instrumentert for kontinuerlig registrering av vannstand slik at merverdien av satellittbilder er begrenset. For både små og store vassdrag vurderes fly- eller dronefotografering som en bedre datakilde enn satellittbilder, både pga. detaljeringsgraden i større flomutsatte områder, og pga. utnyttbarheten også for små vassdrag.
4. Mulighet for å bestille finoppløselige satellittdata gjennom CEMS. For store hendelser der flyfotografering er umulig på grunn av dårlig vær og lavt skydekke så vil aktivisering av CEMS kunne dekke et behov for dokumentasjon over større områder. Det vil også være nyttig dokumentasjon under hendelser der det er vanskelig framkommelighet for å gjøre feltobservasjoner, målinger og kartlegging med drone. Med stadig flere satellitter tilgjengelig gjennom CEMS, ser vi at CEMS blir viktigere for NVE under ekstremværhendelser.

I den opprinnelige planen var brorparten av FoU-aktiviteten under DP5 tiltenkt en ekstern FoU-leverandør, og i en tidlig fase av prosjektet hentet NVE inn et forslag til utviklingsprosjekt fra en slik leverandør. Den bærende ideen i dette var å benytte maskinlæring i klassifisering av Sentinel 1-bildene, i stedet for den fysiske algoritmen dagens flomtjeneste er bygd på. Utfordringene med romlig og temporær oppløsning nevnt i punkt 2 og 3 ovenfor ble imidlertid vurdert som såpass mye større enn svakhetene i selve inversjonsalgoritmen, at denne underleveransen ble prioritert bort og ikke igangsatt. Dette gjorde at delprosjekt 5 ble betydelig redusert, og henvist til å arbeide med de produktene som allerede var tilgjengelige; den eksisterende flomtjenesten samt muligheten av å bestille finoppløste satellittdata fra CEMS-tjenesten. Etter en intern vurdering

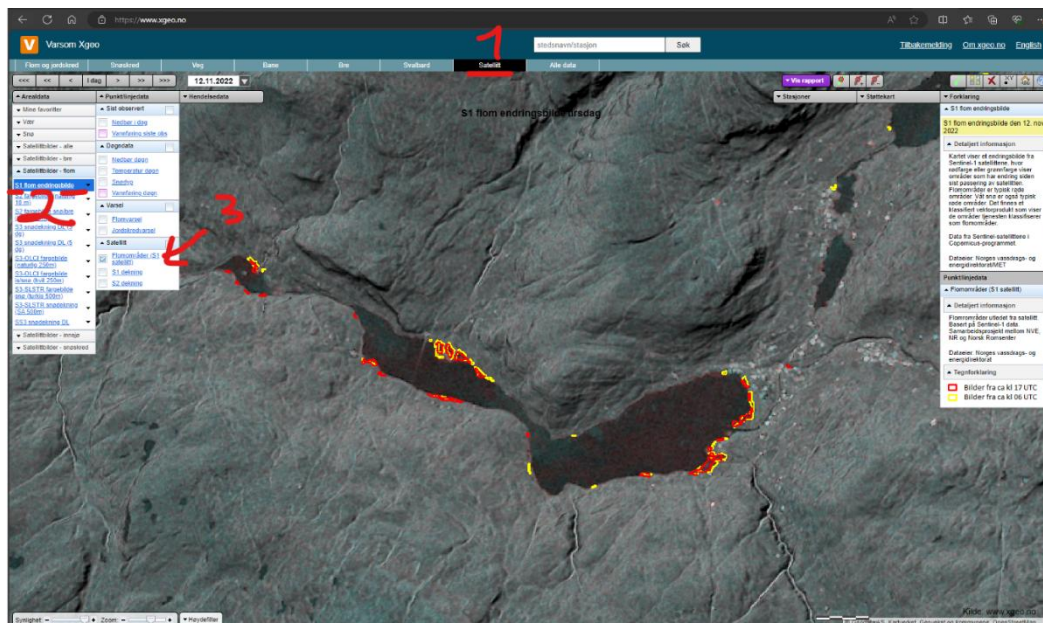
høsten 2024 har NVE bestemt å sette Flomtjenesten på pause (se kapittel 2.5.2). Historiske data fra før 2023 vil være tilgjengelig i Xgeo/SeNorge.

Det kan i fremtiden vurderes om det bør gjøres et nytt forsøk på å utvikle en vesentlig bedre flomtjeneste. Etter hvert vil det igjen bli data fra to satellitter og med data relativt nær en kulminasjon i vassdrag med stort nok oversvømt areal, så kan det bli aktuelt å se på dette på nytt. Satellittene dekker mye større utstrekning enn droner og vi mangler åpne datasystemer for dronedataene. Dersom det kommer noe positive «proof-of-consept» hendelser, kan en ny vurdering gjøres. CEMS fungerer rimelig bra, men skal den bli bedre må NVE ha tid til å gi konkrete tilbakemeldinger. NVE vil følge med på resultatene fra et pågående ESA foundation model prosjektet med NR, som også kan bidra til å belyse nye muligheter.

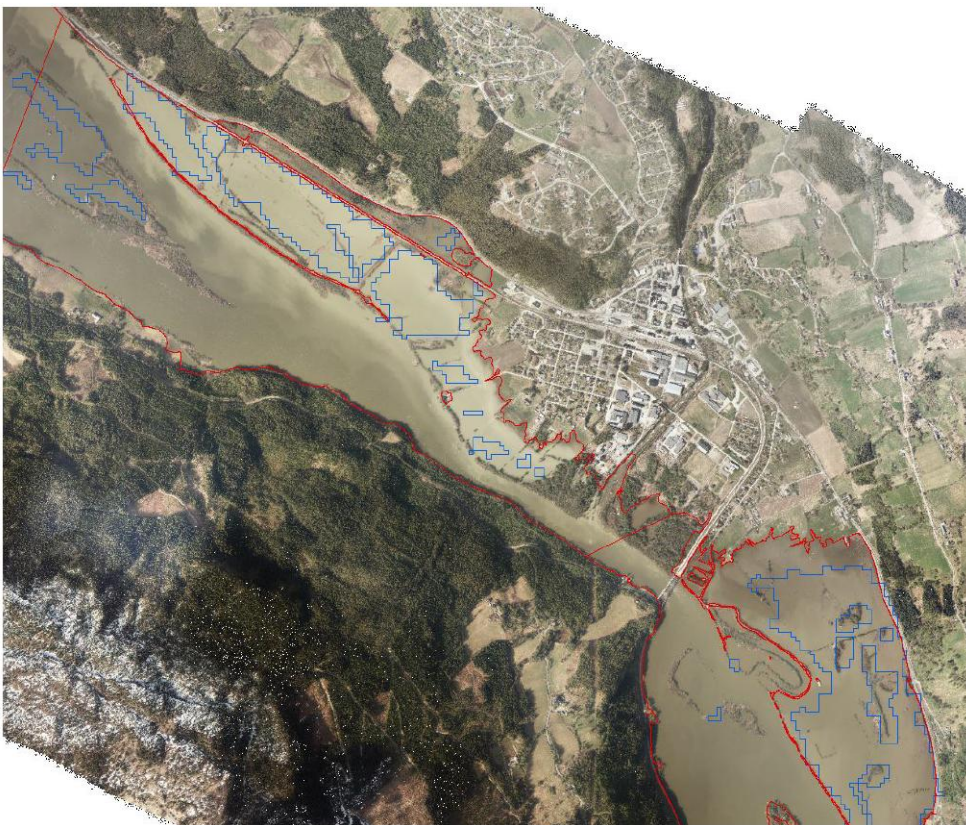
2.5.1 Bakgrunn for flomkartlegging i NVE

Sentinel-1 C-bånd SAR er en radarsatellitt som har en pikselstørrelse på 5x20 m. Denne radarsatellitten er ikke avhengig av klarvær for å ta bilder, men den «ser» gjennom skydekket. Det var per 2016 to satellitter, Sentinel-1 A og B, i bane som ga 6 dagers tidsoppløsning i repeterende baner. På grunn av satellittenes polare bane og den nordlige lokasjonen til Norge har Norge overlappende satellittbaner og derfor mye høyere oppløsning enn 6 dager (2-4 ganger per uke). Sentinel-1 B fikk problemer i 2021 og leverer ikke lenger satellittdata til det nasjonale bakkesegmentet. Siden 2021 har det kun vært Sentinel-1A som er operasjonell og det er per i dag kun 12 dagers tidsoppløsning i repeterende baner. Sentinel-1C satellitt ble skutt opp desember 2024 og det gjør at det igjen blir 6 dagers tidsoppløsning med to satellitter i bane forhåpentligvis i mai 2025.

Sentinel-1 SAR satellittbilder detekterer vann, fordi radarsatellitten har høy absorpsjon i vann og lite informasjon mottas derfor tilbake til satellittsensoren. NVEs flomtjeneste er basert på denne teknologien og ble operasjonell i 2019. Tjenesten er utviklet av Norsk Regnesentral i samarbeid med NVE (Solberg m.fl., 2019). Kort fortalt detekterer Flomtjenesten vann og våte områder fra Sentinel-1 SAR, og bruker en flommaske som identifiserer flomarealet til tidligere flommer. Flomtjenesten aktiveres automatisk i NVE når det sendes ut et oransje eller rødt flomvarsel. Resultatet er et endringsbilde, hvor det nyeste Sentinel-1 bildet fungerer som et aktivitetsbilde og sammenliknes med et referansebilde som er predefinert i algoritmen. Oppløsningen på resultatene er ca. 20 m per piksel (Solberg m.fl., 2019). I tillegg lages det i flomtjenesten polygoner av oversvømt område og vann. Resultater ligger under fanen «Flom» i xgeo.no (Figur 2.55). I Figur 2.56 sammenliknes et produkt fra Flomtjenesten med et ortofoto. Det er kun flomtjenesteprodukter før 2023 som er tilgjengelige i Xgeo/SeNorge.



Figur 2.55: Viser hvordan endringsbildene (Sentinel-1) og polygonene vises på xGeo. Røde og gule polygoner viser flomareal for to ulike tidspunkt på samme dag.



Figur 2.56: Flomarealer ved Ringebu fra 12. og 14. mai fra ortofoto (røde polygoner) og Flomtjenesten (blå polygoner) og viser flomareal drapert over ortofotoet. Det er to dagers mellomrom mellom innsamlingen av de to datasettene, og som det fremgår av figuren har vannstanden gått markant tilbake i denne tiden. (Solberg m.fl., 2019).

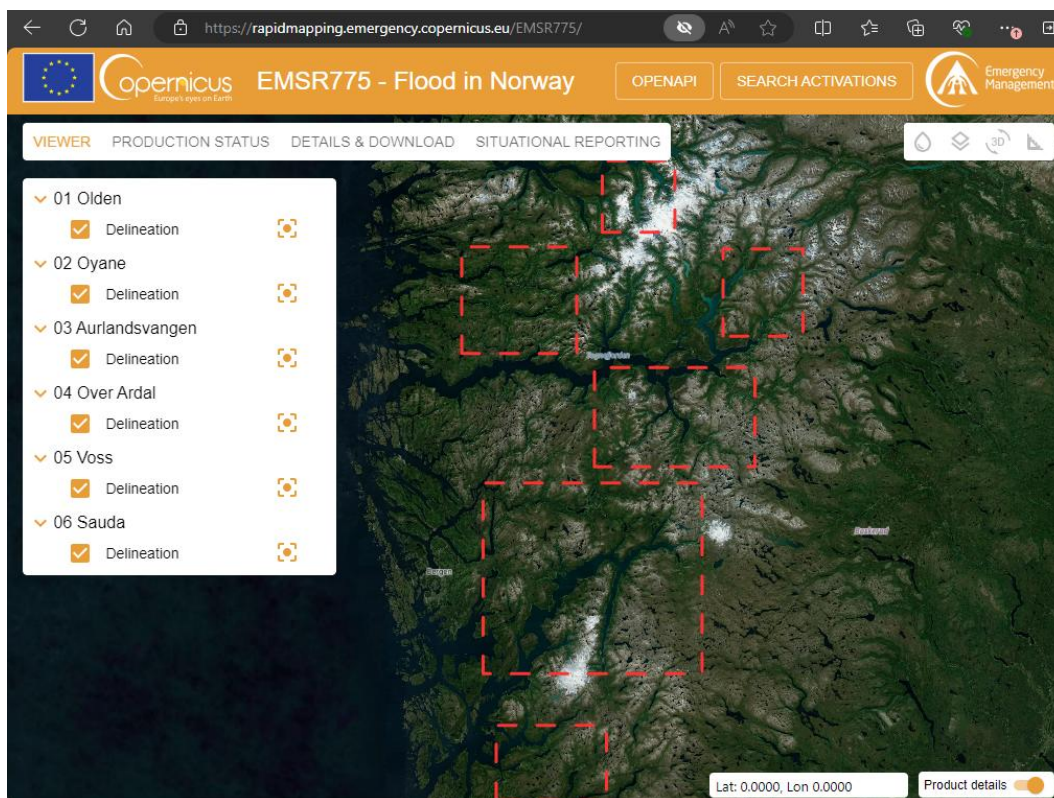
I dag finnes det også andre satellitt-tjenester man kan bruke for å få tak i lignende type data som det flomtjenesten leverer, men da basert på satellittdata med høyere romlig oppløsning, slik som Copernicus sin egen krisehåndteringstjeneste CEMS. CEMS har tidligere blitt aktivert for NVE

i flere større hendelser, slik som under ekstremværhendelsen «Hans» i august 2023, for vårfloppen i Finnmark i 2020 og for vårfloppen på Østlandet i 2018. Siste aktivering av CEMS ble gjort under ekstremværhendelsen «Jakob» den 30. oktober 2024 som førte til intens flom og jord- og flomskred på Vestlandet (Figur 2.57: Aktivering av CEMS av NVE gjennom Direktorat for sikkerhet og beredskap den 30. oktober 2024 under den pågående ekstremværhendelsen «Jakob».. På grunn av Norges deltakelse i Copernicus, er det gratis for Norge å aktivere tjenesten. Det er Direktoratet for sikkerhet og beredskap (DSB) som må aktivere tjenesten på vegne av NVE. CEMS kan bestille detaljerte satellittbilder fra kommersielle satellitter for å ha grunnlag for å gi et mer nøyaktig flomareal enn det flomtjenesten kan. CEMS kan bruke både optiske bilder og radarbilder. For flom brukes det mest radarbilder, ettersom radar kan «se» gjennom skyene. Når NVE tidligere har aktivert CEMS, så har det ofte blitt brukt satellittbilder med romlig oppløsning på 1-5 meter som grunnlag (Tabell 2.5). Likevel kan det være vanskelig å vite nøyaktigheten på CEMS-polygonene. Ofte ser det ut som de er manuelt digitalisert fra satellittbilder. Derfor er det bedre for NVE å få ordentlige rutiner for hvordan satellittbildene skal visualiseres i våre applikasjoner/GIS-system, slik at analysepersonalet i NVE eventuelt kan tegne eller rette på CEMS-polygoner av flom og oversvømmelse.

For hydraulikere i NVE så vil flomareal, gitt god nøyaktighet, kunne være en viktig datakilde for kalibrering og evaluering av hydrauliske modeller. For å legge til rette for å benytte dataene inn i modeller har det i prosjektet blitt jobbet med å oppdatere et kartlag som inneholder flomareal, hvor brukerne kan filtrere på egenskaper som kilde, årstall og hendelse med mer. I dette kartlaget ligger både polygoner over flomareal analysert fra både flybilder og fra satellitt, og her er nå alle data om flomareal fra CEMS-aktiveringer sammenstilt og lagt inn. CEMS har blitt lagt inn som kilde til de data som stammer fra CEMS-aktiveringene og med informasjon om blant annet satellitt, dato og oppløsning på satellittbildene som er brukt til analysene. Dette var en del av arbeidet med leveranse «5c Bruk av Sentinel-data for validering av estimert oversvømt areal og konsekvenser ved ulike flomstørrelser i tilknytning til risikobasert varslings».

Tabell 2.5: Sammenligning av nøkkeltall mellom flomtjenesten og CEMS.

	Flomtjenesten	CEMS
Romlig oppløsning	20 m (både sluttprodukt og satellittbildene)	1-5 m (ikke sluttprodukt, men i bildene)
Temporal oppløsning	2-8 ganger / uka (etter Sentinel-1C er oppe)	Varierende, må bestilles. Større fleksibilitet, men ikke definert.
Produkt	Områder under vann (der det vanligvis ikke er vann basert på referansebilde)	Områder under vann (der det vanligvis ikke er vann basert på referansebilde)
Satellittbilde	SAR	SAR og optisk
Type data	Raster	Vektor



Figur 2.57: Aktivering av CEMS av NVE gjennom Direktorat for sikkerhet og beredskap den 30. oktober 2024 under den pågående ekstremværhendelsen «Jakob».

2.5.2 Kravspesifikasjon for flomareal

I prosjektperioden har vi satt søkelys på å kartlegge brukerbehovene til brukere av flomtjenesten og andre satellittprodukter av flomareal. En egen evaluering av behov for flomareal og flomtjenesten ble ferdigstilt høsten 2024. Dette er en del av leveranse «5c Bruk av Sentinel-data for validering av estimert oversvømt areal og konsekvenser ved ulike flomstørrelser i tilknytning til risikobasert varslings». Det ble konkludert med at Flomtjenesten settes på pause slik den er i dag, da bruken har vært og er minimal. Historiske data (endringsbildene og flompolygoner) består i Xgeo og overføres til SeNorge. I kapitlene nedenfor listes de viktigste kravene og ønskene fra brukerne av flomareal opp.

2.5.2.1 Krav og ønsker fra Skred- og vassdragsavdelingen

Skred- og vassdragsavdelingen (SV) trenger primært data om flomutbredelse for to områder:

- Under beredskap: for oversikt og for å se utvikling over tid for hendelser som varer flere dager
- Tidsserier fra flomobservasjoner - for dokumentasjon av utbredelse og flomhøyder til bruk i hydrauliske modeller (for eksempel flomsoner)

Flomsoner (inkl. flomhøyder) med gjentakintervall gitt i TEK17 (Byggteknisk forskrift) er grunnlag for hvordan arealplanlegging i kommuner skal ta hensyn til flom, og det er grunnlag for videre planlegging og prosjektering av sikringstiltak mot flom. Flomsoner er også nyttig å ha under beredskap og i forberedelse før hendelser, for eksempel for å vurdere evakuering av områder og hvor man bør ha midlertidige sikringstiltak.

Tradisjonelt har det ofte kun blitt brukt historiske data om vannføring og vannstand (og forholdet mellom disse) fra målestasjoner for å kunne lage hydrauliske modeller, der vannstand på målestasjonene har blitt interpolert utover en terrengmodell. Det vil da selvsagt være usikkerheter i disse modellene, og modellene vil kunne bli langt bedre med det som kalles kalibreringsdata, dvs. målinger av flomhøyder med GNSS-utstyr på forskjellige steder under faktiske flomhendelser. Hvis man kan koble en flomhendelse til et gjentakintervall vil man kunne kalibrere den hydrauliske modellen slik at den passer bedre med det som faktisk har blitt observert. Slike målinger blir kun punktmålinger eller målinger over små områder. Med bruk av fjernanalyse, slik som fotografering fra fly eller satellittdata, vil vi kunne dekke store områder der vi ser den faktiske laterale utbredelsen. Med en verdi for xy (øst/nord) kan vi dermed også få en verdi for z (høyde), som er viktig input for kalibrering. Dermed har slike data stort potensiale for forbedring av hydrauliske modeller.

Når vi skal bruke slike data for å kalibrere modeller, er vi avhengig av flere ting:

- Vi må kunne stole på at områdene som er markert som flomområder, faktisk er flomområder
- Vi må ha en god nøyaktighet
- Vi bør helst ha data fra så nært tidspunktet for kulminasjon som mulig, i det minste må datafangsten bli gjort når det er stor vannføring

De to første punktene er viktigst. Dersom vi får gode data, men som ikke er målt ved kulminasjon, så kan vi i alle fall koble utbredelsen til et gjentakintervall.

SV trenger høy grad av nøyaktighet, spesielt på informasjon om høydeverdiene. SVs regionkontorer har tidligere nevnt at de trenger en romlig oppløsning som er maksimalt 2-3 meter, avhengig av størrelsen på vassdraget. For høydeverdien trengs helst en nøyaktighet på maksimalt et par desimeter.

2.5.1.2 Krav og ønsker fra Hydrologisk avdeling

Flom- og jordskredvarslingen ved Hydrologisk avdeling (H) varsler flom, jordskred, flomskred og sørpeskred på daglig basis for inneværende døgn og de to neste. Varlene baseres i hovedsak på meteorologiske prognoser, enten direkte eller videre behandlet i egne modeller. Det ligger i sakens natur at observasjoner av eksisterende flomutbredelse i utgangspunktet kommer i seineste laget til å være sentrale informasjonskilder for selve varslingsformålet, selv med svært effektiv behandling og publisering av nye data.

Det finnes likevel aspekter ved varslingsjenestene som kan ha god nytte av fjernmålingsdata:

1. Datagrunnlag som er nyttig før en hendelse: Tidsserier fra flomobservasjoner, dokumentasjon av utbredelse og flomhøyder til kalibrering og validering av hydrauliske modeller. Både vannstand og vanndekket areal (flomsoner) er viktig. Til dette formålet er en ikke avhengig av at observasjonen skjer i kulminasjonstidspunktet, selv om observasjonen er mer verdifull jo nærmere flomtoppen den skjer. Det er nødvendig med god nøyaktighet og detaljeringsgrad, særlig for mindre vassdrag.
2. Etter en hendelse kan observerte flomkart basert på flomareal være nyttig for å evaluere prognoser og varslet farenivå. Det er viktig at observasjonen gjøres nær kulminasjon, fordi farenivået gjelder den maksimale vannstanden i hendelsen.
3. Fjernmålte data kan være mer interessant i områder der vi ikke har målestasjoner. Ofte er dette mindre vassdrag og elver, som derfor har større krav til oppløsning på satellittdataene.

4. Flomkart brukt i formidling av situasjonsbeskrivelse, altså lagt ut på nettsider der publikum og beredskapsaktører kan se dem.

For de tre første punktene i denne lista er det viktig at data er tilrettelagt for maskinell analyse og tilgjengelige på disk eller fra database for å kunne ta det i bruk. Formidling for interaktiv bruk på en nettside eller i annen visualisering er nødvendig for varslingen og tilgjengeliggjøring for allmenheten.

2.6 Nye muligheter for bruk i NVE

NVE har lang erfaring med bruk av satellittdata og vært en aktiv bruker av Copernicusdata siden 2014. Per i dag brukes imidlertid Copernicusdata operasjonelt mest i forbindelse med kryosfære og hydrologisk kartlegging og overvåkning. Det er god grunn til å tro at Copernicusdata kan være verdifull og nyttig også for andre anvendelsesområder i NVE. Formål med delprosjekt 6 «Muligheter» har derfor vært å kartlegge om og i hvilken grad NVE kan få mer utbytte av Copernicus data ved å a) ta i bruk nye satellitter som vil bli skutt opp de neste årene, eller b) ved å anvende data fra sensorer som allerede er i bruk på nye temaer eller oppgaver i NVE.

Denne kartleggingen ble gjennomført gjennom dialog med mulige nye brukere i NVE fra avdelinger og seksjoner som tradisjonelt ikke jobber med satellittdata og ved å følge med på aktiviteter ved forskningsmiljøene og Norsk romsenter.

2.6.1 Deteksjon av jord- og sørpeskred med Sentinel-1 og -2 data

Hensikten med mulighetsstudien er å vurdere om det er realistisk å utvikle produkter som kan benyttes til å kartlegge og overvåke skredaktivitet. Kartlegging av jord- og flomskred er viktig for å få oversikt over antall og størrelse på skred, særskilt de som går i områder uten større infrastruktur. I tillegg er det ønskelig å kunne evaluere et jordskredvarsel med hjelp av slike data fra satellitt. Dette vil være nyttig for jordskredvarslingen ved hydrologisk avdeling og for skredkartlegging i skreddatabasen som skred- og vassdragsavdelingen er ansvarlig for. Figur 2.58 viser en sammenstilling av et Sentinel-2 satellittbilde og bilder fra felt.



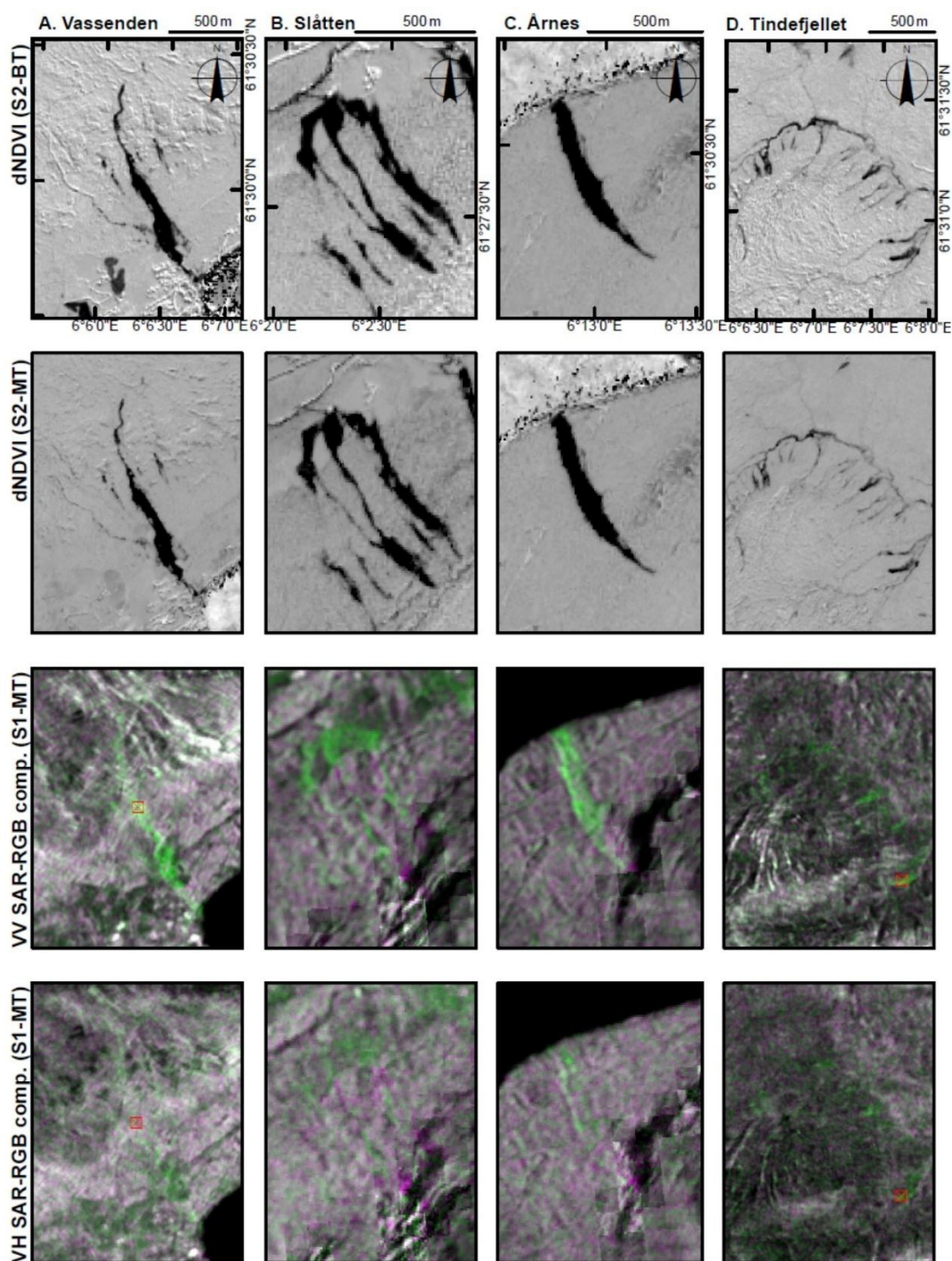
Figur 2.58: Jordskred i Ål under ekstremværhendelsen «Hans» i august, 2023. Her vises skredene tydelig et år etter hendelsen i Sentinel-2 satellittbilde (21. juni 2024) sammen med bilder i felt (18. juni 2024). Foto: Solveig H. Winsvold. Copernicus Sentineldata (2024).

En rekke publikasjoner de siste årene har illustrert at tidsserier av satellittdata er velegnet til å detektere jordskred i ulike landskap og terreng (Prakash, Manconi og Loew 2020, Ganerød m.fl. 2023, Lindsay m.fl. 2023). Særlig endringer i NDVI mellom jordskredhendelser gir tydelige signaler for deteksjon av jordskred (se Figur 2.59). En utfordring for kartlegging av jordskred med optiske satellitter nært i tid slik som Sentinel-2 er imidlertid skydekke, ettersom jordskred er knyttet til perioder med nedbør og dermed skydekke. Det ble derfor gjort forsøk på å bruke radarsatellitter slik som Sentinel-1 til deteksjon av jordskred også. Kobling mellom radarsignal og skredaktivitet er mindre entydig og påvirket av flere faktorer, slik som arealdekke, opptaksvinkel, polarisering etc. (Lindsay m.fl. 2023).

Med bakgrunn i satellittenes evne til å fange opp arealdekkeendringer relatert til jordskred ble maskinlæringsmodeller som detekterer jordskred i jordobservasjonsdata (Prakash, Manconi og Loew 2020, Ganerød m.fl. 2023) utviklet. Vurderingen av fagfolk i NVE er at presisjon av de presenterte modellene oppnår en brukbar presisjon for formålene i NVE. Disse modellene ble utviklet på regional skala eller basert på begrenset utvalg av skredhendelser. Landsdekkende bruk av slike modeller på nasjonal skala vil kreve en videreutvikling som håndterer de ulike faktorene som påvirker deteksjonsevnen, slik som:

- Skredtyper, -størrelse, jordsmonn, etc.
- Sensorer som Sentinel-1 og Sentinel-2
- Ulik klimatisk og romlig kontekst (årstider, vegetasjon og arealdekke, etc.)

Utfordringer forventes også med å kunne skille jordskred fra andre hendelser med muligens lignende signaturer i jordobservasjonsdataene, slik som for eksempel flatehogst, utbygging, eller billeangrep (skadedyr). Skred- og vassdragsavdelingen (SV) i NVE har derfor i 2024 gitt i oppdrag et FoU-prosjekt med tittel «Automatisk detektering av jord- og flomskred ved bruk av satellittdata» for utvikling av en dyplæringsmodell for deteksjon av jordskred med Sentinel-1 og -2 (se kapittel 3.1.1).

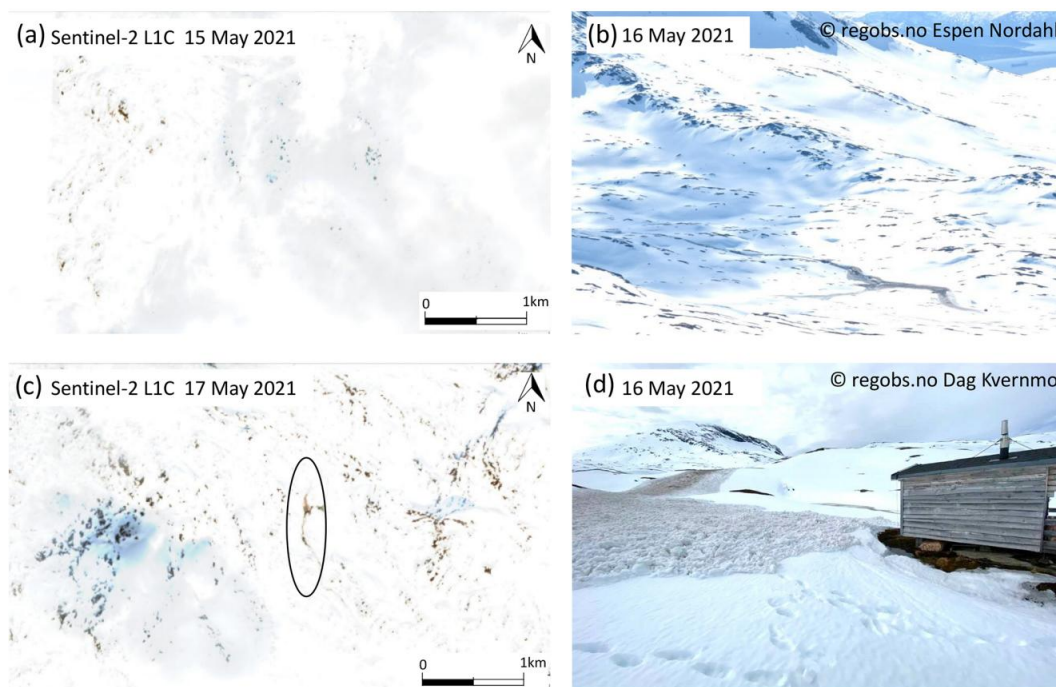


Figur 2.59: Synlighet av jordskred ved Jølster, Vest-Norge, den 30. juli 2019 i Sentinel-1 og Sentinel-2 (Lindsay m.fl. 2023).

IT-plattformen for Copernicusdata i NVE, som er utviklet i dette prosjektet, har skapt forutsetningene for å kunne ta i bruk utviklede modeller på satellittdataene på en effektiv måte. I en neste fase av Copernicus-prosjektet i NVE anbefales det å følge med det nevnte FoU-prosjektet for å sikre effektiv integrasjon av modellen i produksjonslinjene hvis det viser seg å være hensiktsmessig og ønskelig.

Siden denne type skredkartlegging har metodisk sett en del overlapp med aktivitetene i Miljødirektoratet og SSB knyttet til Naturkartlegging (Klima- og miljødepartementet, 2024), vil det være naturlig følge med på arbeidet som gjøres der.

Det nevnte FoU-prosjektet i NVE på kartlegging av jordskred vil i utgangspunktet ikke ha fokus på deteksjon av sørpeskred. Kartlegging av sørpeskred er vanskelig å gjøre med eksisterende Sentinel-satellitter grunnet for lav romlig og temporal oppløsning. Beskrivelse av utfordringer med sørpeskredkartlegging med satellittbilder har nylig blitt beskrevet i Sund m.fl. (2024) (se Figur 2.60).



Figur 2.60: Sørpeskred er vanskelig å detektere fra Sentinel-2 satellittbilder. Her gjengis resultater fra artikkelen Sund m.fl. (2024) hvor man fant et sørpeskred ved Leigasletta i Nordland på satellittbildene.

Mens tilnærmingen ovenfor kartlegger faktiske skredhendelser i etterkant, er en annen mulighet å bruke særlig satellittdata for å overvåke miljøbetingelser før jord- eller sørpeskred utløses. Arbeidet som ble gjort i forbindelse med våtsnøkartlegging (se kapittel 2.3.1.5) eller jordfuktighet (se kapittel 2.6.4) viser de grunnleggende mulighetene for å estimere endringer i vannmetning i jorden og snøpakke ved hjelp av SAR-data. I hvilken grad eller hvordan disse dataene kan knyttes til miljøbetingelser i forkant av utløsning av jord- og sørpeskred krever videre undersøkelser. Dette vil også være et mulig bruksområde for de nye sensorene som blir tilgjengelig slik som L-bånd SAR (ROSE-L) eller passiv mikrobølge (CIMR) (se kapittel 3.2).

2.6.2 Endringsdeteksjon for konsesjonsbehandling, beredskap og tilsyn

For å undersøke mulighetene til å bruke endringsdeteksjon i satellittdata i konsesjonsbehandling, beredskap og tilsyn (for eksempel knyttet til nett, produksjonsanlegg, eller veier) ble det gjennomført intervjuer med avdelinger og seksjoner i NVE som tradisjonelt ikke jobber med satellittdata. Konkret deltok avdelingene for Tilsyn og beredskap (TB) og Energi- og konsesjon (EK) i intervju og brukerundersøkelser. Formålene med intervjuene var å kartlegge mulige bruksområder og samle brukerbehov fra saksbehandlerne. Utover praktiske sider ved

bruk av satellittdata i saksbehandlingen ble også administrative spørsmål knyttet til NVEs ansvar og rolle diskutert i intervjuene.

Dialog med eksterne, slik som Miljødirektoratet om bl.a. datasett de lager for eksempel i forbindelse med inngrepsfri natur har også vært en del av denne mulighetsstudien. Det samme gjelder deltakelse på relevante seminarer og konferanser slik som EGU i 2024 eller Miljødirektoratets fjernmålingsseminar om endringsdeteksjon den 19. januar 2023.

Gjennom mulighetsstudien ble to konkrete bruksområder identifisert og diskutert, der endringsdeteksjon i satellittdata i utgangspunktet kan ha nytteverdi i NVE sin saksbehandling:

1. Overvåking av vegetasjonsdekket som del av konsesjons- og tilsynsarbeid
2. Overvåking av grunnbevegelse ift. dampsikkerhet

2.6.2.1 Overvåking av vegetasjonsdekke som del av konsesjons- og tilsynsarbeid

Særlig optiske satellitter har lenge blitt brukt til overvåking av areal- og vegetasjonsdekke, på grunn av satellittenes evne til å levere fortløpende data som kan respondere på endringer i vegetasjon. Overvåking av vegetasjonsdekket er relevant i to ansvarsområder i NVE, nemlig a) for tilsyn i forbindelse med utbygging av energianlegg som del av konsesjonsprosessen og b) for tilsyn med krav om kantvegetasjon langs vassdrag i henhold til vannressursloven. Bruk av satellittdata for disse to bruksområdene ble derfor diskutert med kollegaer i avdeling TB.

En vesentlig endring i areal- og vegetasjonsdekket oppstår som direkte følge av byggeaktivitet ved utbygging av energianlegg. Plassering av inngrep og oppførte bygninger er i utgangspunktet kjent gjennom konsesjonsprosessen og tiltakshaver leverer detaljerte romlige data på utbygging. Et annet vesentlig element i tilsyn knyttet til utbygging av energianlegg er revegetering av arealer som har vært påvirket av byggeprosessen og som må tilbakeføres til en tilnærmet naturlig tilstand. Også her er tiltaksområdene og dermed områdene for tilsyn kjent, slik at man vil kunne overvåke vegetasjon til disse mulige anvendelsesområdene relativt målrettet og lokalt begrenset.

Et annet anvendelsesområde for overvåking av vegetasjonsdekket er knyttet til NVEs tilsynsoppgaver på kantvegetasjon. Etter vannressursloven har grunneiere plikt til å opprettholde kantvegetasjon langs vassdrag med årssikker vannføring (vassdrag som ikke tørker ut av naturlige årsaker oftere enn hvert 10 år gjennomsnittlig). Som nasjonal vassdragsmyndighet holder NVE tilsyn med at grunneierne etterlever disse kravene (Staubo m.fl. 2019). I saksbehandlingsprosessen kunne satellittdata i utgangspunktet brukes til to formål i dette anvendelsesområdet: 1) for å oppdage ulovlige inngrep i kantvegetasjon og 2) for å tidfeste eventuelle anmeldte forhold.

I prinsippet ville satellittdata kunne være en nyttig informasjonskilde til de nevnte anvendelsesområdene ovenfor. Miljødirektoratet bruker for eksempel Sentinel-2 data for å oppdage inngrep i form av veier i urørt natur (Trier og Salberg 2020, Trier 2023). SSB planlegger også bruk av Sentinel-2 data for å kartlegge naturinngrep generelt.

I begge anvendelsesområdene i NVE er det imidlertid uklart om satellittdata fra Sentinel-2 kan levere data som har den presisjonen som er nødvendig for å besvare spørsmålene som oppstår i saksbehandlingen.



Figur 2.61. Sammenligning av ortofoto og skyfri Sentinel-2 mosaikk for et tilsynsområde i Fjellhamar i 2020

Revegetering f.eks. er en relativt langsom og gradvis prosess, og her er det et åpent spørsmål om data fra Sentinel-2 er i stand til å fange opp denne gradvise arealdekkeendringen, eller mangel av revegeteringen med tilstrekkelig pålitelighet i tid. Med tanke på ev. inngrep i kantvegetasjon og plassering eller utstrekning av oppførte bygninger ifm. konsesjoner er særlig den romlige oppløsningen til Sentinel-2 en begrensende faktor (Figur 2.61). Det anbefales derfor å teste bruk av de analyseklare dataene som ble framskaffet i første fasen av Copernicus prosjektet på ulike konkrete tilsynsoppgaver knyttet til overvåking av vegetasjonsdekke. Bruk av ekstra høyoppløselige data, bl.a. gjennom avledede produkter som NIBIOs Grønnstrukturkart, er muligheter som kan vurderes ved videre undersøkelser. Et tenkelig ambisjonsnivå for bruk av satellittdata kunne være å bruke disse dataene til å prioritere tilsyn ved befaring i felt. Annen mulig informasjon man kunne få ut av satellittdata er å identifisere oppstart av byggeaktivitet, slik som Kartverket og a-krimssenteret på Vestlandet utforsker, som kan være verdifull i konsesjonsprosessen.

I dialog med fagavdelingene ble også praktiske behov ved mulig bruk av satellittdata i saksbehandlingen diskutert. Her ønsker saksbehandlerne en tett og direkte integrasjon av satellittdataprodukter i de digitale verktøyene de allerede bruker. Siden dette regelmessig ville utløse utviklingsbehov er det hensiktsmessig å avklare at satellittdata faktisk kan gi den innsikten som trengs i saksbehandlingen. Videre må man finne egnede presentasjonsformer for data og produkter. Dette framhever behovet for tilrettelegging for interaktivt og eksperimentelt bruk av de samlede analyseklare dataene, slik at potensialet for enkelte slike oppgaver kan avklares raskt og effektivt. Dette vil hjelpe å ta i bruk satellittdata utover anvendelsesområdene i denne mulighetsstudien.

2.6.2.2 Overvåking av grunnbevegelse ift. dampsikkerhet

Damtilsynet i NVE (seksjon TDB) har vært bevisst på muligheter med å overvåke f.eks. deformasjon på damanlegg med InSAR og utprøvde dette i 2015/2016 på fire testcaser med ganske lovende resultat. InSAR kan i utgangspunktet være nyttig for dameiere å følge med på, og i utvalgte tilfeller også ift. tilsynsoppgaver i NVE.

En vesentlig grunn for at InSAR-data ikke ble tatt i bruk mer aktivt så langt ligger i rollen NVE har når det gjelder damtilsyn. Overvåking av damkonstruksjonen er dameiernes ansvar og ikke NVEs. Damtilsynet overvåker eller overprøver i utgangspunktet ikke data som leveres fra dameier. Hvis InSAR-data kunne brukes til å identifisere faresignaler for fjellskred som kan ende opp i magasiner ville det være et nyttig og aktuelt bruksområde.

2.6.3 Mulighetsstudie ROSE-L, CIMR, LSTM og S2NG

NVE har i denne prosjektperioden fulgt med på ny informasjon om Copernicus Sentinel Expansion missions, og deltatt på seminar om ROSE-L, CIMR og CRISTAL i regi av Norsk Romsenter. Der har NVE gitt tilbakemeldinger til nasjonale veikart som utarbeides for de nye Copernicus-satellittene. LSTM har vi ikke hatt noe aktivitet på siden det har vært for tidlig å utforske dette satellittprogrammet. Disse nye sensortypene er planlagt å skytes opp fra og med 2028 og fremover. I kapittel 3.2 gis det anbefalinger på hva slags forløperaktiviteter NVE kan gjøre i den neste prosjektperioden 2025-2027 (Tabell 3.1). Mye av denne innsikten er samlet inn i denne prosjektperioden gjennom denne leveransen, 6c «Mulighetsstudie Rose-L, CIMR, LSTM (snø, skred, is, vannbalanse) og neste generasjon Sentinel-2».

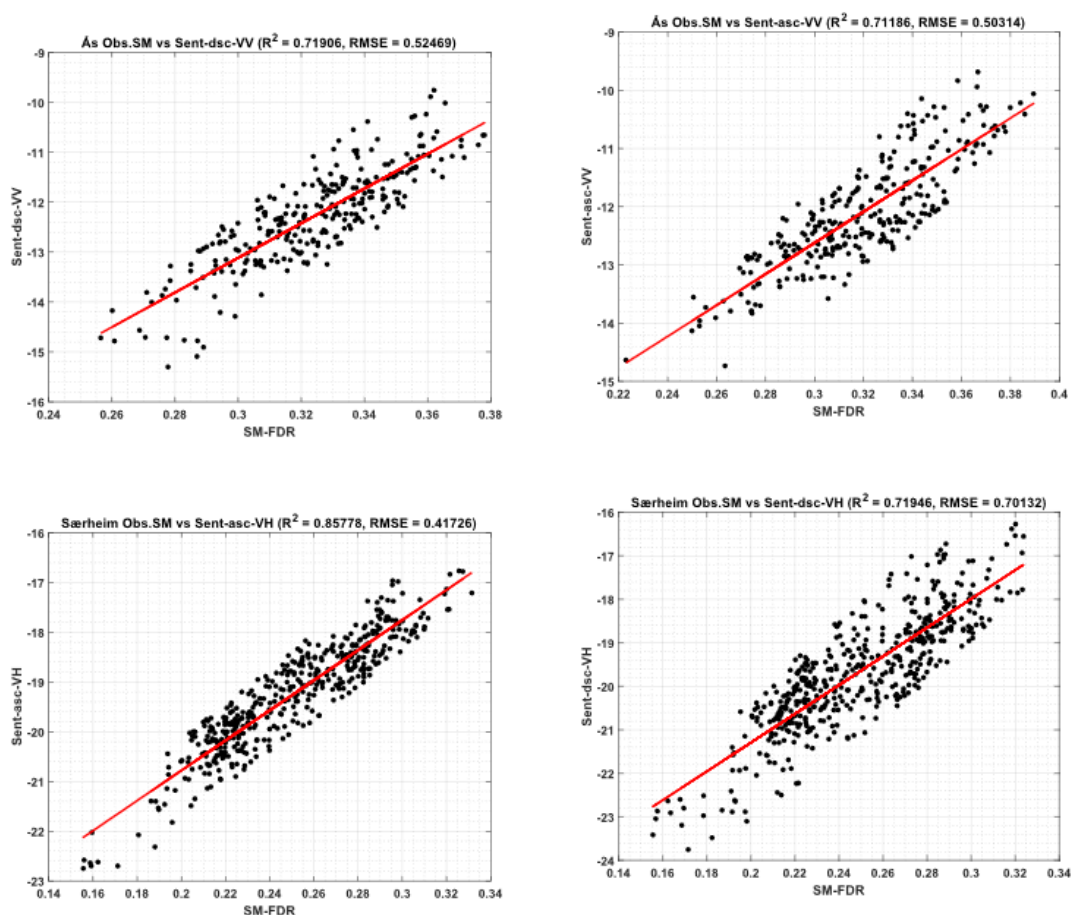
Norge er med i EUs jordobservasjonsprogram Copernicus som gir oss gratis og forutsigbare data slik at NVE kan bygge tjenester basert på disse satellittene. Den europeiske romfartsorganisasjonen (ESA) har for medlemslandene og Copernicus startet planleggingen av en ny høyoppløselig satellitt som er viktig for NVE i fremtiden. NVE med i en gruppe som skal gi råd til ESA om brukerbehovene til neste generasjon Sentinel-2 satellitter («Sentinel-2 Next Generation Mission Advisory Group»). NVE bidrar primært med å ivareta brukerbehovene innen kryosfære for nasjonale tjenester og Copernicustjenestene til EU. Dette betyr at NVE er med på å spesifisere kravspesifikasjonen til neste generasjon av Sentinel-2. I praksis betyr det innspill på ønsket kvalitet på satellittdata i områder med mye topografi og bratt terreng, og for breer, snø, innsjøis, havis og permafrost etc. Ferdigstilling av de nye satellittene er først på 2030-tallet, men dette er en fin mulighet for NVE å påvirke at det blir god kvalitet på satellittdataene og innsikt i hva neste generasjon av Sentinel-2 vil bety for oss fremover (se kapittel 3.2).

2.6.4 Kartlegging av jordfuktighet med Sentinel-1

Jordfuktighet er en miljøvariabel som har vesentlig betydning for forståelsen og evnen til å predikere en rekke hydrologiske fenomener slik som flom eller jordskred. Synthetic Aperture Radar (SAR) data fra satellitter slik som Sentinel-1 er sensitiv for tilstanden av jordoverflaten slik som ruhet eller fuktighet og har derfor potensialet til å forbedre og utvide kartlegging av jordfuktighet i rom og tid. I Copernicus-prosjektet ble det undersøkt i hvilken grad Sentinel-1 data kan levere verdifull informasjon på jordfuktighet til formålene i NVE. Dette ble gjort gjennom litteraturstudie og regresjonsanalyse mellom Sentinel-1 SAR data og feltmålinger av jordfuktighet fra NVEs stasjonsnett (Mengistu, 2024). Tidligere studier viser til muligheter for bruk av SAR-data til kartlegging av jordfuktighet, men peker også på utfordringer knyttet til for eksempel vegetasjonsdekket og terreng (Blyverket, 2023; Bhogapurapu m.fl., 2022; Malnes og Eckerstorfer, 2022; Greifeneder m.fl., 2021; Singh m.fl., 2020).

Regresjonsanalysen viser at polariseringene fra Sentinel-1 må brukes strategisk avhengig av landskapskonfigurasjon (terreng og arealdekke) av feltlokalitetene. Under denne forutsetningen oppnår regresjonsanalysen imidlertid god korrelasjon mellom jordfuktighet og radar-backscatter fra Sentinel-1 gjennom tid (se Figur 2.62), noe som demonstrerer satellittens evne til å fange opp dynamikk i jordfuktighet.

Funnene indikerer at SAR-teknologi fra Sentinel-1 kan levere utvidet innsikt i utvikling av jordfuktighet i rom og tid, hvis avhengighetene mellom polariseringene, og geografiske faktorer slik som helning eller arealdekke kan håndteres på en robust måte for større geografiske utstrekninger. I et neste steg burde derfor korrelasjonsanalysen utvides til å dekke også stasjonene i Filefjell og Kvarstadseter for å inkludere høyereliggende områder og de klimatiske betingelsene der. Formål med utvidelsen er å undersøke konsistens og nøyaktighet av SAR-baserte jordfuktighets-estimer på tvers av ulike økosystemer og landskapsfaktorer. En slik utvidelse vil kunne kombineres med utforskning av L-bånd SAR-sensorer som vil bli tilgjengelig med ROSE-L (Se kapittel 3.2). En viktig avklaring vil imidlertid være om produkter på jordfuktighet fra satellitt kan innpasses i hydrologiske modeller i NVE for å sikre at utviklingsarbeidet faktisk vil gi utbytte.



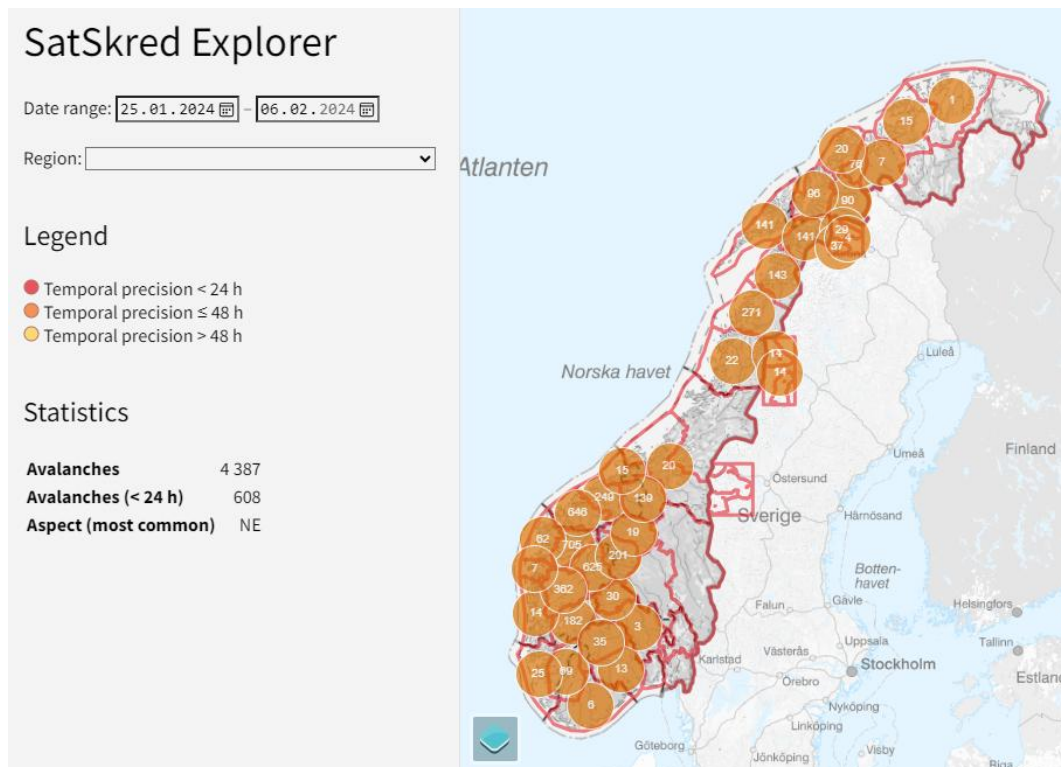
Figur 2.62: Regresjonsanalyse som viser forhold mellom radar backscatter-verdier fra Sentinel-1 på y-aksen og jordfuktighetsmålingene i feltstasjonene på Ås (mot VV polarisering) og Sørheim på x-aksen (mot VH polarisering).

2.7 Tilgang på satellittdata og -produkter i NVE

NVE publiserer produkter og tjenester basert på Copernicus Sentineldata på nettsider, i ulike karttjenester, som APIer og via NVEs egen infrastruktur for å aggregere informasjon fra satellittdataene. Dette kapittelet lister opp stedene der NVE bruker satellittdata og beskriver kort hva de forskjellige systemene er og hvordan de kan brukes. Kapittelets hensikt er å informere NVE-ansatte om hvor man får tilgang til produkter og tjenester fra Copernicus-data. Mange av nettsidene og APIene er tilgjengelig for eksterne og dette beskrives også. Det er et bevisst valg å ikke lage en egen «satellitt-portal» i NVE, siden brukerkravet er tilgjengeliggjøring av satellittprodukter i applikasjoner man allerede benytter i sitt arbeid. Det finnes en egen intern NVE-WIKI som beskriver mange av satellittproduktene og -tjenestene (NVE-WIKI, 2024).

2.7.1 Satskred Explorer

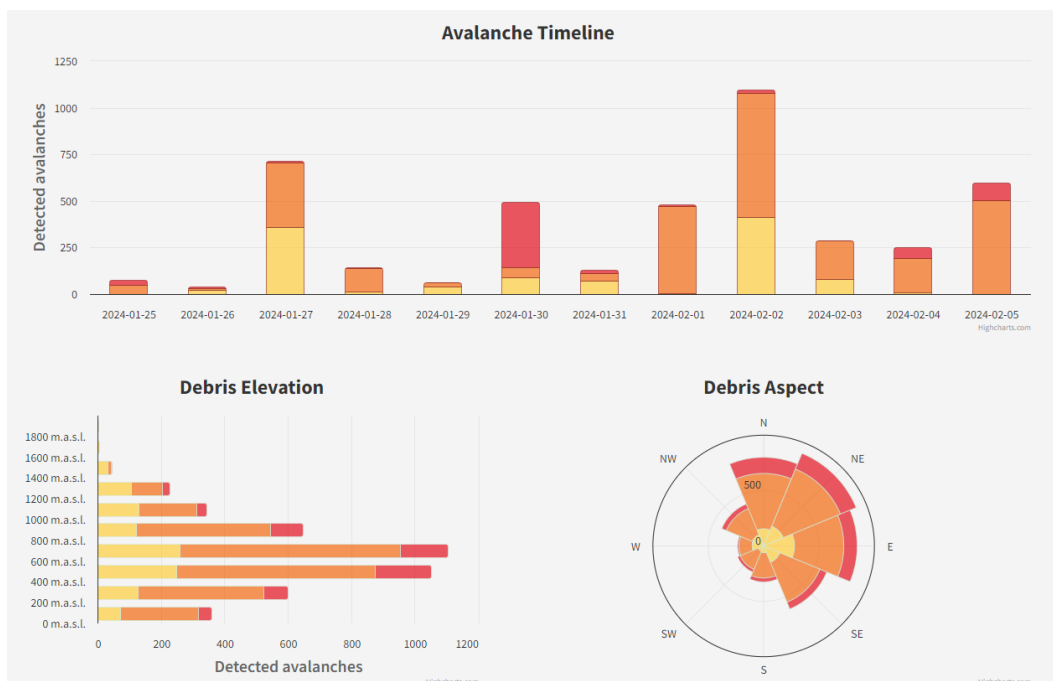
Resultatene fra Satskred-prosjektet er tilgjengelig på nettsiden satskred.nve.no. Produktet heter Satskred Explorer. Skred registrert fra satellitt vises som polygoner på et kart over Norge og deler av Sverige (Figur 2.63).



Figur 2.63: Skjermdump av nettsiden satskred.nve.no som viser skred registrert fra satellitt. Brukeren kan zoome i kart og filtrere etter dato og region.

I kartet kan brukeren zoome inn og ut. For et større område viser kartet et sammendrag av antall skred. Zoomer brukeren inn i kartet vises hvert enkelt skred. Ved å klikke på en skredpolygon får man opp en infoboks med metadata om skredet. Det er også mulig å kopiere skredet og tilhørende metadata direkte fra kartet.

Brukeren kan velge mellom forskjellige bakgrunnskart (f.eks. topografisk kart, bratthetskart). Det er også mulig å filtrere data basert på tidsperiode og varslingsregion for snøskred (se varsom.no). Det vises en kort statistikk for utvalget brukeren ser for valgt kartutsnitt og filtrering. Dette inkluderer samlet antall snøskred for valgt område, antall snøskred med tidsestimat for utløsningstidspunkt bedre enn 24 timer, samt himmelretning for skredene. Videre vises tre grafer: i) en tidslinje over antall skred per dag, ii) fordeling av antall skred per høydenivå, og iii) fordeling av antall skred per himmelretning, alt fargekodet etter tilgjengelig tidsoppløsning for utløsningstidspunkt (Figur 2.64).



Figur 2.64: Grafene som viser detaljert informasjon om skredene i et valgt kartutsnitt i Satskred Explorer. Tidslinje over antall skred per dag øverst. Nederst til venstre vises antall skred per høydeintervall og nederst til høyre vises antall skred per himmelretning. Fargekoden angir tidsnøyaktighet av estimert utløsningstidspunkt: rød: <24t, oransje: 24-48t, gul: >48t.

Vi har satt opp et ArcGIS API, i tillegg til Satskred Explorer, for å gi tilgang til data for eksterne brukere som ønsker å teste produktet. Spøringer mot API-et er åpent tilgjengelige via Query: [Query: SatSkred \(ID: 0\) \(nve.no\)](#). Brukeren kan filtrere søket basert på skredets egenskaper. Dataene er tilgjengelige i formater som HTML, KML, GEOJSON osv. Tiden er angitt som Unix Epoch Time i millisekunder. For å kunne utføre svært spesifikke søk er det nødvendig med kunnskap om datastrukturen. Vi oppfordrer derfor foreløpig brukere til å kontakte NVE før avansert bruk av dataene.

2.7.2 Varsom Xgeo/SeNorge

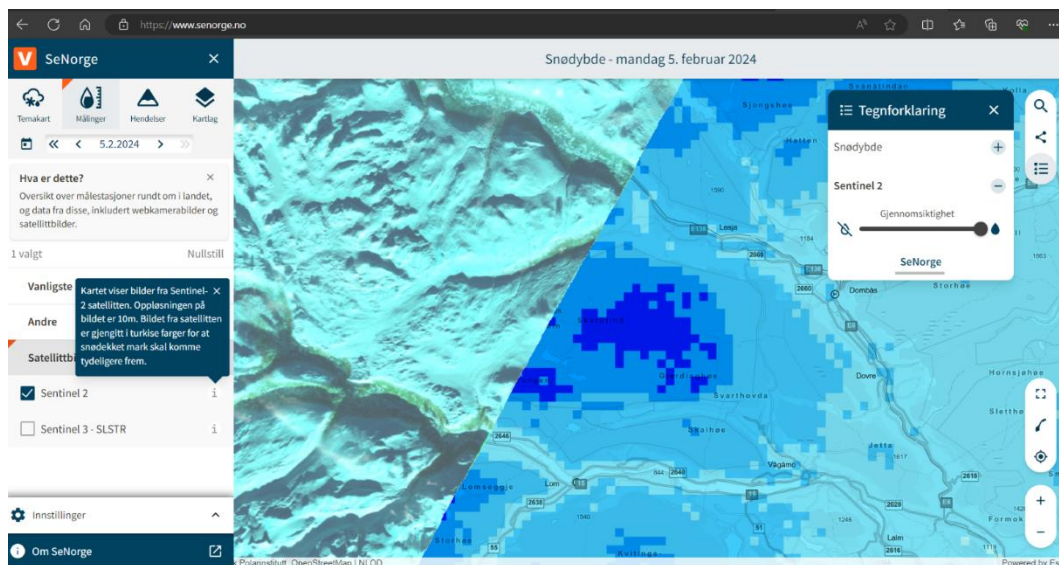
Varsom Xgeo er et ekspertverktøy som brukes til beredskap, overvåking og varsling av flom, jordskred- og snøskredfare. Med kart og tid som utgangspunkt sammenstilles data fra stasjoner og modeller med hendelser og feltobservasjoner.

Ulike fareindekser (eks. Hydmet Geo: jordskredfare) er basert på griddede vær- og snødata fra SeNorge.no, utarbeidet av Statens vegvesen og Bane NOR har i samarbeid med NVE og MET. Fareindeksene er basert på statistiske sammenhenger og bruk av terskelverdier for ulike kombinasjoner av parametere. I dag brukes Xgeo både av interne og eksterne til å se på Sentinel-satellittbilder og produkter sammen med støttekart for blant annet for å planlegge feltarbeid, se på snøtilstand, validere snødekningsgrad i varslingsmodeller, utvikling av bresjøer og innsjøis.

Varsom Xgeo skal avvikles og erstattes av Varsom SeNorge. Det er derfor viktig å informere brukere om dette, og sørge for at den viktigste funksjonaliteten som er i Xgeo blir tilgjengelig i SeNorge.

På Varsom SeNorge finner du kart over snø-, vær- og vannforhold i Norge, samt klimahistorikk, klimascenarier og satellittbilder for Norge (Figur 2.65). Nettstedet er åpent for alle og inneholder flere hundre tusen unike kart – fordelt på daglig oppdaterte temakart, månedskart og historiske

kart. I SeNorge er det mulig å vise og laste ned tidsserier fra temakart og målestasjonene til NVE, MET og SVV. Vegmeldinger som skyldes flom, skred og uvær er også tilgjengelig, sammen med observasjoner som er registrert i Varsom-appen og på Regobs.no.

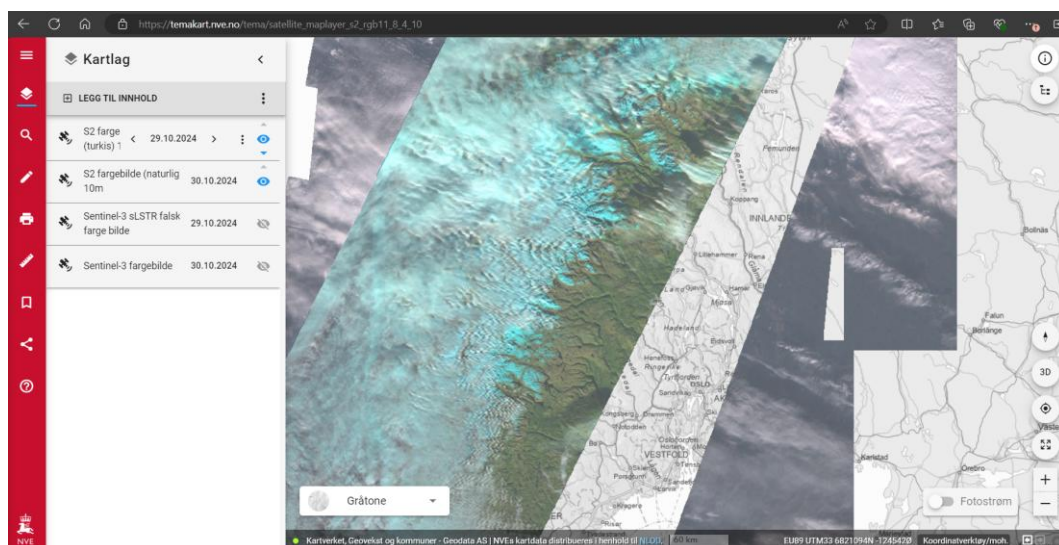


Figur 2.65: Satellittbilde fra Sentinel-2 satellitten (satellittbånd 11 (SWIR), 8 (NIR) og 4 (Rødt)) sammen med modellert snødybde fra seNorge-modellen. Opplysningen på satellittbildet er 10 m per piksel. Bildet fra satellitten er gjengitt i turkise farger for at snødekket mark skal komme tydeligere frem.

2.7.3 NVE Temakart

NVE Temakart (temakart.nve.no) er en populær og relativt enkel karttjeneste fra NVE. I kartverktøyet er det mulig å sammenstille forskjellige geografiske temadata og gjøre enkle analyser og spørringer mot disse.

I NVE Temakart er det mulig å se på Sentinel-2 og Sentinel-3 satellittdata i forskjellige fargekombinasjoner, sammen med kartlagene NVE leverer (Figur 2.66). Brukeren får opp satellittbildene fra «Legg til innhold» og deretter søke på satellitt. NVE Temakart tilbyr både vanlig kartvisning og 3D-visning.



Figur 2.66: Sentinel-2 satellittbilder fra 29. og 30. oktober vises i temakart.nve.no.

2.7.4 Varsom Iskart

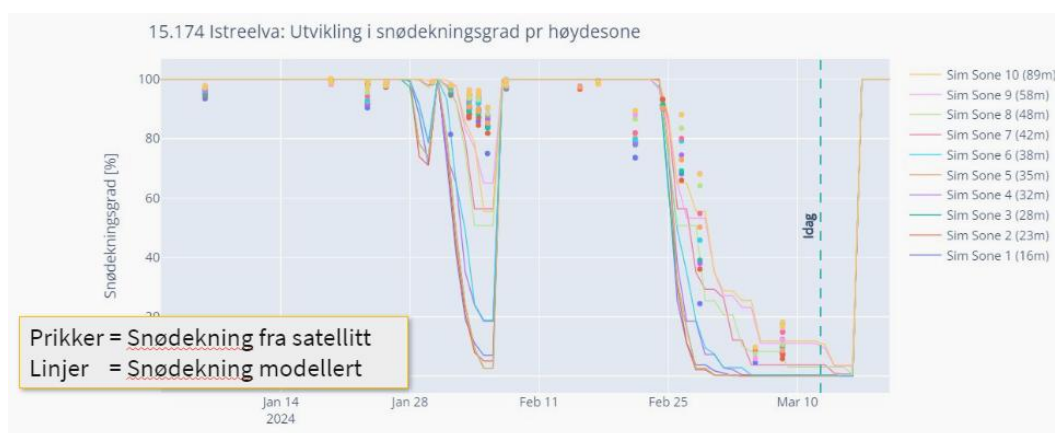
Iskart.no brukes både intern og eksternt. Internt brukes iskart som et viktig varslingsverktøy for isvarslerne. Kartverktøyet Varsom Iskart viser isobservasjoner fra Varsom (synkronisert med observasjoner fra Regobs-databasen), webkamera ved innsjøer og satellittbilder (visuelle RGB eller falske fargebilder). I tillegg ligger det info hvor man finner svekket is på grunn av for eksempel kraftverksreguleringer, som er kjente områder med strømdrag som svekker isen.

Brukeren kan velge mellom forskjellige satellittprodukter under eget satellittsymbol. Her kan man velge mellom RGB bilder både fra Sentinel-2 og Sentinel-3. Brukeren kan justere lysstyrke og kontrast for å forsterke bildene slik de blir lettere og tolke. I tillegg kan man i Iskart se på værprognoser fra YR eller data fra SeNorge, samt observasjoner fra Varsom og webkamera. Det er lagt inn filtrering av visning av data slik at man kan se ulykker, isproblemer og sanntidsværdata fra målestasjoner. Man kan i tillegg filtrere på om man bare vil se nyere observasjoner eller eldre observasjoner, om observasjonen inneholder istykkelsemålinger, eller bilder. Varsom Iskart også brukes til å få opp gamle observasjoner hvis man vil ha ut historiske data fra Hydra-databasen.

Varsom Iskart gir eksterne brukere samme mulighet for å få oversikt over isforholdene i ønsket region. Isvarslingen har et ønske om at Iskart.no skal være det naturlige stedet for å undersøke satellittdata til bruk i turplanlegging (Sentinel-2 og Sentinel-3, og seinere Sentinel-1 intensitetsbilde).

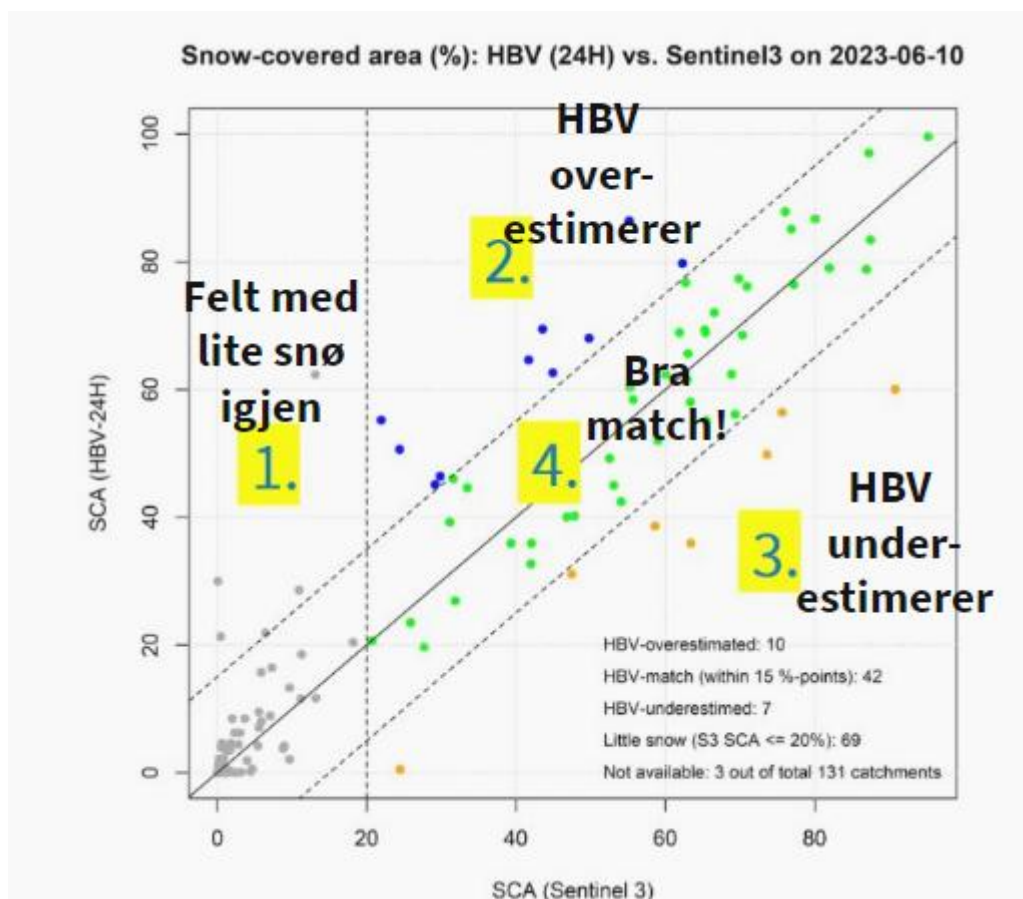
2.7.5 Satellittdata og modeller under vårflom

I forbindelse med vårflommen har NVEs flom- og jordskredvarsling lenge hatt et ønske om et produkt som kan brukes til å vurdere snømagasinet i våre varslingsmodeller (både flomvarslingsmodellen HBV og SeNorge-snømodellen). I forbindelse med Copernicus-prosjektet er det derfor utviklet to produkter som sammenligner modellert snødekningsgrad mot Sentinel-3 FSC-DL-F1. Det ene produktet brukes for å sammenstille data for hvert enkelt av nedbørfeltene som modelleres i flomvarslingen. Ved hjelp av en web-applikasjon utviklet i prosjektet plottes modellert og satellittbasert snødekningsgrad gjennom tid mot hverandre, slik at varslerne kan følge utviklingen i modellens tilstandsbeskrivelse i de ulike høydeintervallene.



Figur 2.67: viser snødekningsgrad i 10 høydeintervaller simulert med HBV-modellen og beregnet fra Sentinel 3-bilder (FSC-DL-F1). Modellresultatene (heltrukne linjer) og satellittdata (punkter) for samme høydesone har samme farge. Her reagerer modellen for kraftig på en smeltepisode i begynnelsen av februar, mens nysnøfallet 6-7 februar fanges korrekt opp.

Der Figur 2.67 muliggjør en detaljert evaluering av modellen for ett enkelt nedbørfelt, samler Figur 2.68 informasjon fra alle feltene på en gitt dag. Denne komprimerte framstillingen er ofte bedre egnet i selve varslingssituasjonen. Figuren oppsummerer raskt hvor modellen overestimerer og underestimerer snødekningsgraden; hvor det er godt samsvar mellom de to, og hvor det er så lite snø igjen at sammenligningen er uviktig.

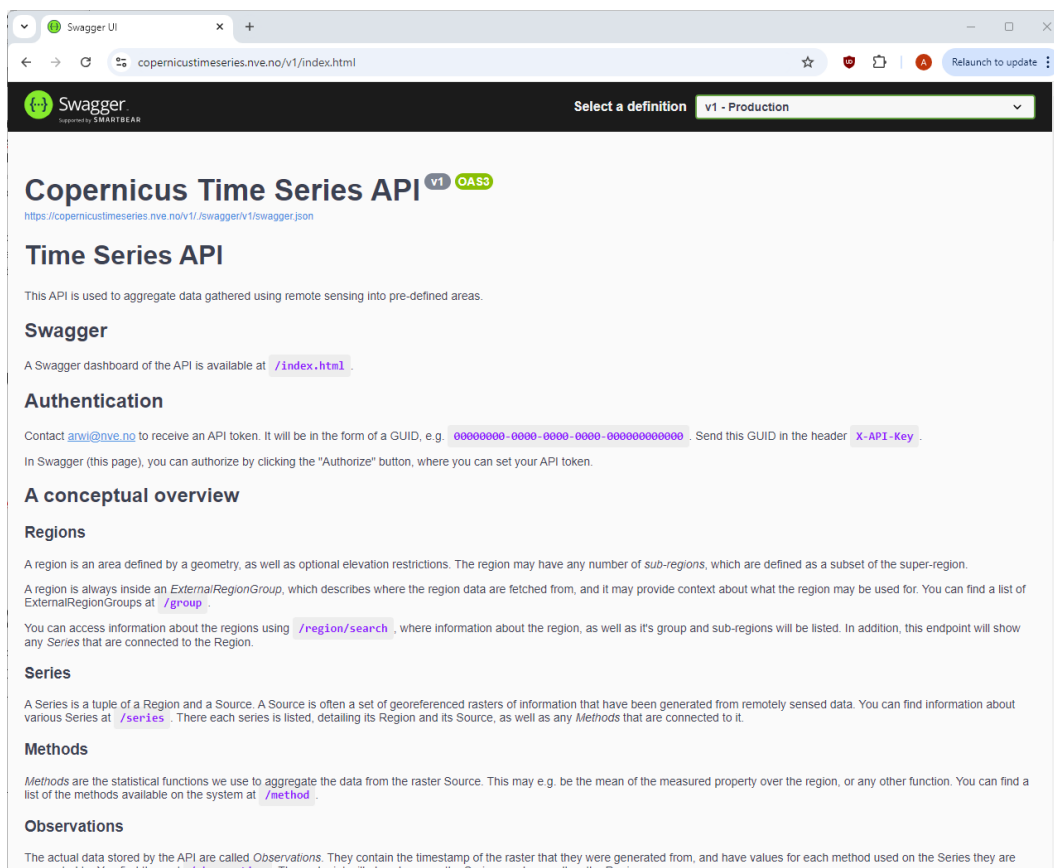


Figur 2.68: Plot av snødekningsgrad beregnet med HBV modellen mot dekningsgraden for de samme felte basert på Sentinel-3 (FCS-DL-F1).

Utenom den mørkeste delen av vinteren viser satellittdataene god konsistens både i tid og mellom høydesoner. Dette styrker tilliten til kvaliteten, selv om disse figurene ikke i seg selv inneholder noen uavhengig kontroll av Sentinel-3-dataene. Det er i første rekke under vårmeltingen en slik uavhengig kontroll av modellens snødekningsgrad er viktig, i noe mindre grad under snøleggingen om høsten. Midtvinters har terrenget i all hovedsak full snødekning, og merverdien av slike målinger er mindre. For andre snøegenskaper som albedo eller fuktighetstilstand kan betydningen av midtvinters-bilder være større, og en må da ta hensyn til den solhøyde-relaterte støyen. Dette vil det bli jobbet med videre.

2.7.6 Tidsseriedatabase og tidsserie API

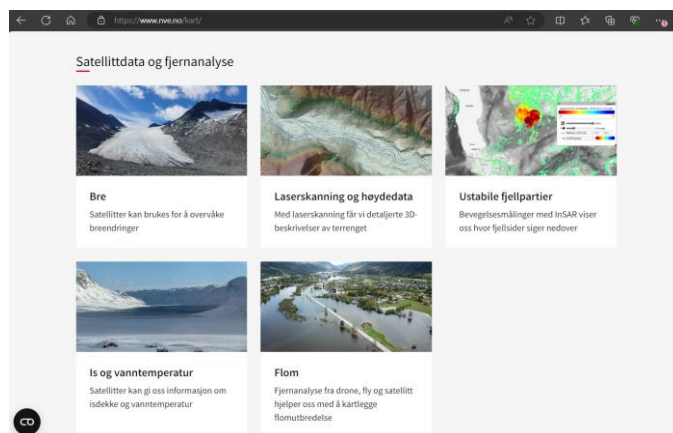
Tidsseriedatabasen (se kapittel 2.1.5) er offentlig tilgjengelig via et API som er dokumentert med Swagger (se Figur 2.69). Dokumentasjonen og APIet er tilgjengelig på <https://copernicustimeseries.nve.no/v1/>. Informasjon om hvordan man henter ut data gis som kodeeksempel i API-dokumentasjonen.



Figur 2.69: Swagger-dokumentasjonen til prosjektets tidsserie-API.

2.7.7 Om satellittdata og fjernanalyse på nve.no

I løpet av prosjektperioden har prosjektet fått tildelt et eget område for satellittdata og fjernanalyse på [NVE.no/kart](https://nve.no/kart). Til nå er det opprettet en egen nettside for temaene bre, is og vanntemperatur, og flom, som alle er tema relatert til NVE Copernicustjenester. I tillegg har andre prosjekt i NVE laget en side om laserskanning og høydedata og ustabile fjellpartier. De forskjellige sidene inneholder korte beskrivelser av hvordan og hva slags fjernanalyse som blir benyttet, samt de viktigste lenkene til kart-tjenester og referanser (Figur 2.70).



Figur 2.70: Informasjon på egne nettsider om bruk av satellittbilder for bre, is og flom ble lagt inn på nve.no i prosjektperioden.

3 Anbefalinger for 2025-2027

I prosjektet NVE Copernicustjenester i perioden 2022-2024 har vi identifisert fremtidige produkter og anbefalinger for aktiviteter i neste prosjektperiode 2025-2027. Disse anbefalingene er tuftet på erfaringer vi har opparbeidet oss, spesielt i møte med brukere av satellittdata og produkter. Utviklingen av produkter og tjenester basert på Copernicus Sentineldata, og forbedringer av algoritmer, har til nå vært hovedfokus. Hovedmålet for neste prosjektperiode er å øke samfunnsnyttene av NVE Copernicustjenester. Dette innebærer også ønske om mer tilgjengeliggjøring av tjenester, kartlegging av brukerbehov, dokumentering og samarbeid i forvaltningen (Johannessen, m.fl. 2024). I tillegg er det viktig med forberedelse til fremtidige satellitter fra Copernicus. Overordnet blir disse temaene viktige å følge opp:

1. Videreutvikle eksisterende tjenester og produkter
2. Utforske mulighetene i nye tjenester og nye sensorer og satellitter
3. Utvikle NVEs evne og kompetanse på anvendelse og data fra tjenestene

Videre i kapittel 3 beskrives anbefalinger for Copernicus-aktiviteter i 2025-2027. Dette kan endre seg ut i fra prioriteringer og ny innsikt i prosessen med prosjektutforming.

3.1 Videreutvikle eksisterende tjenester og produkter

IT-utviklingen som skjer gjennom Copernicus-prosjektet må være samkjørt med resten av organisasjonens digitaliseringsinitiativer (initiativer kan være hvordan KI skal håndteres, bruk av skytjenester, IT-styringsprinsipper osv.). Det er viktig at prosjektet understøtter disse initiativene og følger de gjeldende prinsippene for utvikling, enten det gjelder arkitekturprinsipper eller dataforvaltningsprinsipper. IT er også et viktig verktøy for å realisere innovasjon. NVE, som mange andre statlige etater, har stort fokus på kunstig intelligens (KI) og hvordan dette kan understøtte fagprosessene i NVE. Utvikling av tjenester og infrastruktur er et viktig bidrag for å kunne realisere gevinst av resultatene.

3.1.1 Kunstig intelligens

De betydelige fremskrittene som ble gjort på store språkmodeller (Large Language Models - LLMs) de siste årene har utløst stor oppmerksomhet på Kunstig intelligens (KI). Denne teknologien vurderes nå i alle områder av digitalisering i offentlig sektor og har blitt ett av tre fokusområder i Digitaliseringsdirektoratet (Digdir). Staten vedtok i september 2023 en stor satsing på forskning og utvikling på KI og bruk av denne teknologi på tvers av fagfelt og mulige bruksområder med samfunnsnytter («KI-milliarden»). Norges Forskningsråd planlegger å bruke disse midlene til å støtte fire til seks sentre for forskning på kunstig intelligens (Khrono, 2024). Ikke overraskende er KI også internt i NVE et viktig tema for innovasjon i virksomheten.

Digdir påpeker imidlertid at mangel på analysekompetanse ofte er en vesentlig begrensende faktor for bruk av KI i offentlig sektor og gjør offentlige etater regelmessig avhengig av innleide konsulenter (Digdir, 2024). I første fasen av Copernicus-prosjektet i NVE ble flere KI-baserte modeller for satellittbildetolkning implementert, men også her sto konsulenter for utvikling av modellen. Det anbefales å bruke neste fase av Copernicus-prosjektet til å øke og styrke analysekompetanse internt i organisasjonen og ruste organisasjonen bedre til å kunne (videre-)

utvikle KI-baserte modeller til satellittbildetolkning. Det er naturlig at dette skjer i dialog og samarbeid med aktuelle institutt og universiteter.

Dette kan oppnås blant annet gjennom det å følge med konsortier og i KI-sentre som får tildeling av KI-milliarden. Parallelt blir det viktig å etablere IT-rutiner og løsninger for de ulike stegene ved bruk av KI og maskinlæringsmodeller i satellittbildetolkning, nemlig det å tilrettelegge bedre for generering av treningsdata, håndtering og versjonering av treningsdata, trening, evaluering og versjonering av modeller og ikke minst valg av modellarkitekturer/modelltyper til ulike formål (se kapittel 2.1). Her blir det også viktig å se aktivitetene i Copernicus-prosjektet i sammenheng med annen bruk av KI og maskinlæring i NVE ellers, slik som for eksempel på hydrologiske modeller (se kapittel 3.1.2).

3.1.1.1 Kunstig intelligens i varslings-tjenestene

Fra våren 2025 starter NVE etter alt å dømme arbeidet med å utvikle KI-baserte hydrologiske modeller. Vi ønsker å utvikle minst én modell med fokus på simulering av vannføring og flom i umålte felt, og minst én modell med fokus på flomvarslings. Disse KI-modellene har trolig stor nytte av satellitt-produkter som inngangsdata til modellene, særlig observerte tilstander som i tradisjonelle modeller simuleres ut fra prosessforståelse uten å bli validert separat. I spesiell grad gjelder dette variabler som snødekningsgrad og snømengde, fordi disse representerer langtidshukommelsen i modellen.

Et annet område som kan være aktuelt for maskinlæring basert på satellittdata er en preoperasjonell tjeneste for jord- og flomskredeteksjon basert på maskinlæringsalgoritme. NVE har tidligere bidratt i et PhD-arbeid rundt dette (Lindsay, 2023), og har startet et nytt FoU-prosjekt som skal se videre på utnyttelse av slike data (se kapittel 2.6.1). Kalibrering av faretersklene for NVEs operasjonelle jordskredindeks baseres nå i høy grad på innrapporterte skred som har krysset vei, med sterk underrapportering av skred som ikke gjør slik skade. En satellittbasert algoritme vil langt på vei avhjelpe denne systematiske underrapporteringen, gi en markert økning i antall observerte skred og en vesentlig bedre bekreftelse på hvor og når det *ikke* har gått skred. Dette vil gi en vesentlig mer treffsikker klassifisering og trening av skredmodellen selv om deteksjon og beskrivelse av hvert skred fra fjernmåling har svakere presisjon enn ved personlig befarings.

3.1.2 Bedre modelltilstander

Det arbeidet som er gjort på sammenligning av snødekningsgrad i modell og Sentinel 3-bilder bør utvides til å omfatte de øvrige varslingsmodellene NVE bruker. Dette gjelder både nedbørfeltmodeller, som det planlegges å drifte et større antall av, og den grid-baserte modellen som går for hele Norge og som forsyner SeNorge-nettsiden med simulerte tilstandskart. Også snødekningsgrad fra Sentinel-1 og Sentinel-3 bør tas inn i dette. Alle disse har finere romlig oppløsning og større potensiale for å utvikle kart for modellparametre som i dag bare beskrives med enkle empiriske konstanter. Sentinel-1 har i tillegg en misjon i å fylle ut Sentinel-3 i perioder med mye skyer.

Videre planlegges det å gå videre fra bare sammenligning til oppdatering av modellens tilstander, og til kalibrering av modellenes parametre. Fordi snødekningsgraden ikke kan løsrives fra mengden snø, er slik bruk av satellittinformasjon mindre triviell enn bare å justere modellens snødekningsgrad så den stemmer med satellittbildene. Det finnes ulike teknikker for å gjøre slik assimilering, og ulike valg som må treffes med henhold til om en skal oppdatere modellene på nedbørfelt-nivå, på høydesone-nivå, eller helt ned på enkelt-piksler.

I tillegg til dette ønsker NVE å se på nytteverdien av satellittdata for albedo, kornstørrelse, snøoverflate-temperatur og -fuktighet. Dette henger sammen med innføring av energibalanse-basert smeltesimulering, som drives av et rikere sett inngangsdata fra atmosfæremodellene enn bare nedbør og temperatur. Informasjon om snøkvalitet er også nyttig i modeller som simulerer andre egenskaper enn snømengde, og som kan styrke varslingen av snø- og sørpeskred. En særlig utfordring ligger i å formulere modeller som relaterer fjernmålte snøegenskaper ved overflaten til forholdene gjennom hele snøpakkas dyp.

Slike mer prosessnære snørutiner er for noen av våre modeller allerede i drift, for andre planfestet i to pågående interne FoU-prosjekter som har sitt siste år i 2025. Dette betyr at vi i neste prosjektperiode 2025-2027 vil ha modeller som er i stand til å nyttiggjøre seg informasjon om flere snøegenskaper enn de som har vært relevante til nå.

3.1.3 IT-utvikling og arkitektur

Med Copernicusdata plattformen i NVE ble det i inneværende prosjektfase bygget opp et solid, fleksibelt, skalerbart og utvidbart system for håndtering av satellittdata. Mens de nye algoritmene er implementert i den nye plattformen, så gjenstår det å flytte resten av produksjonsmiljøet fra tidligere prosjekter over til denne nye plattformarkitekturen (se kapittel 2.1.4).

Videre forventes det at utvalgte, nye algoritmer som blir utviklet i løpet av prosjektperioden produksjonssettes og flettes inn i produksjonslinjene i fasen 2025-2027 i denne plattformen. Dette gjelder f.eks. en algoritme for jordskred-deteksjon i et parallelt-gående FoU prosjekt i NVE.

Med tanke på de planlagte aktivitetene i perioden 2025-2027, som tettere kobling mellom satellitt- og modelldata, mulighetsstudier for nye satellitter og bruk av KI er det særlig tre aktiviteter som krever videreutvikling av NVEs satellittdata infrastruktur:

- *Integrasjon av data fra egnede forløper-satellitter*
For å fasilitere forberedelsene på nye Sentinel-satellitter må test-data fra utvalgte forløper-satellitter (f.eks. kan det være aktuelt med NISAR som forløper for ROSE-L) integreres i plattformen, slik at disse kan brukes til utprøving og utvikling av algoritmer og produkter.
- *Integrasjon av modelldata og/eller kobling*
Griddede modelldata i NVE har mange likhetstrekk med satellittdata og satellittdata-produkter ved at begge representerer rom-tidsserie data. En viktig jobb for assimilering av satellittdata i modellene er det å kunne matche modell- og satellittdata i rom og tid. Den etablerte satellittdata-plattformen i NVE har per nå allerede egnede verktøy for dette, men oppgaven er å finne en effektiv og brukervennlig måte å koble satellitt- og modelldata for validering, kalibrering eller assimilering. Også her vil opplæring av brukere kunne spille en vesentlig rolle.
- *(Videre-) Trening av maskinlærings- og Dyp-Læringsmodeller*
I den nye plattformen ble det satt opp en generisk løsning for bruk av KI-modeller på satellittdata. Mens denne løsningen dekker et bredt spekter av mulige bruksområder som for eksempel Satskred o.l., må det forventes at løsningen må utvides eller tilpasses, for eksempel når nye rammeverk, KI-arkitekturer eller annen maskinlæring skal tas i bruk. Det løsningen ikke dekker tilfredsstillende, er trening, utvikling og forbedring av nye eller eksisterende maskinlæringsmodeller. Her trengs det mer tilrettelagte arbeidsflyter som følger veletablerte standarder og prosedyrer (MLOps).

Disse arbeidsflytene inkluderer generering, lagring, organisering, versjonering og integrasjon av treningsdata og resulterende modeller.

Gjennom prosjektet er og blir mer og mer analyseklare satellittdata og -produkter tilgjengelig på den nye Copernicus dataplattformen i NVE. For å gjøre faktisk bruk av dataene enklere for brukerne gjenstår det å videreutvikle plattformen for interaktiv og eksperimentell anvendelse av satellittdata. Her siktes det bl.a. mot tettere integrasjon mot Jupyter Notebooks, som er en populær løsning for datautvinning innen datavitenskap. Videre skal IT-systemene videreutvikles til å gi enklere tilgang til dataene i form av visualisering og bruk i GIS programvare eller nettleser. Til sistnevnte er det viktig å sikre ytelse og funksjonalitet i serverløsningene som leverer billedata. Her identifiserte vi i prosjektfasen 2022-2024 behov og muligheter for tekniske forbedringer når det gjelder hastighet og fullstendighet i opptegning av satellittbildene særlig fra satellittene med høyere oppløsning og større antall bilder per døgn. Integrasjon av satellittprodukter i sluttbrukerverktøy (SeNorge, Iskart, Skredlab osv.) er et annet viktig område for IT-utvikling i perioden 2025-2027. Denne utviklingen er tiltenkt å gå hånd-i-hånd med planlagt opplæring av interne brukere.

Fordi håndtering av satellittdata er krevende når det gjelder bruk av ressurser for både lagring og prosessering, vil det også i en neste prosjektfase være nødvendig å følge med og vurdere behov og muligheter for å flytte NVE sin satellittdatapattform til ekstern infrastruktur (vertsbasert prosessering). I tillegg kan integrasjon av eksterne nasjonale tjenester, slik som for eksempel skyfrie Sentinel-2 mosaikker fra Kartverket eller produkter fra europeiske Copernicus-tjenester (CLMS, 2024) være relevant. Geokodede Sentinel-1 data fra Norsk Bakkeselement forventes å være et viktig eksternt data-produkt som vi håper å få integrert i NVEs system i neste prosjektfase. Dette vil kunne erstatte interne prosesseringsrutiner hvis det oppfyller krav til tilgjengelighet og oppetid.

Et annet tema som berører IT-utvikling for prosjektfasen 2025-2027 er håndtering av metadata og ekstern tilgjengeliggjøring av data gjennom moderne standarder (f.eks. CSW, STAC, OGC API). Bedre og standardbasert dokumentasjon av satellittdata er en viktig faktor for økt bruk i og muligens utenfor organisasjonen.

IT-utviklingen gjennom prosjektet vil utvikle og forbedre den tekniske arkitekturen gjennom kontinuerlige forbedringer. Viktige arkitekturprinsipper for prosjektet er modulær og tjenesteorientert arkitektur. Data og analyser skal være tilgjengelig gjennom tjenester. Resultatene må også være gjenfinnbare (behov for metadatainfrastruktur). Det forventes mer bruk av KI inn i den nye prosjektperioden, dette gjelder både for NVE som helhet i sin digitaliseringsstrategi, men også for Copernicus-prosjektet. Prosjektets mål og NVEs mål for bruk av KI må samkjøres og sannsynligvis justeres i den nye prosjektperioden.

3.1.4 Innovasjon og FoU

Parallelt med NVE Copernicustjenester er det andre aktiviteter i NVE som kan ses i sammenheng med prosjektet. Dette handler mye om å bli kjent med brukerbehov og nytte der det tradisjonelt ikke brukes Copernicus-data i stor grad i NVE i dag. Dette innebærer også å undersøke eksisterende nasjonale datasett som er operasjonelle hos andre etater i Norge som kan ha nytteverdi for NVE. Det er fortsatt mye å lære om tilgjengelige satellittdata og produkter og hvordan disse kan brukes innovativt i NVE. Et pågående FoU-prosjekt om pre-operasjonell tjeneste for flomskred og jordskreddeleksjon basert på maskinlæringsalgoritme er noe NVE Copernicustjenester følger med på (se kapittel 3.1.1). Hvis tilrettelegging og håndtering av

algoritmer standardiseres så er det mer effektivt å opprette operasjonelle tjenester i NVEs IT-systemer i etterkant. Under listes andre tema som NVE ser på som nyttige å få informasjon fra satellittdata, hvor NVE bør følge med på studier i fremtiden.

3.1.4.1 Sørpeskred

I fremtiden kan det bli bedre metoder for å detektere vannmettet snø eller vanninnhold i snø med Sentinel-2 og eventuelt Sentinel-1, noe som er relevant for å overvåke sørpeskred. I dag er det imidlertid vanskelig å bruke satellittdata for dette (Sund m.fl. 2024, se kapittel 2.6.1). NVE ønsker å vite hvor vannet befinner seg i snøpakka og mengden vann, da dette kan bidra til å lage en indeks for sørpeskred. Ved å analysere regn over snø over tid kan vi estimere om vannet trenger ned i snøpakka. Et sørpeskred utvikler seg i mange tilfeller til flomskred, spesielt i forbindelse med snøfelt. Det anbefales å følge med på forskning og studier som undersøker om maskinlæringsalgoritmer kan anvendes til deteksjon av sørpeskred. Som en del av aktiviteter knyttet til KI i neste prosjektfase vil det være en mulighet i et neste steg å videreutvikle de KI-baserte deteksjonsmodellene for snø- eller jordskred til å dekke også andre skredtyper slik som sørpeskred. Ved å samle inn nyttig informasjon fra satellittdata kan NVE forhåpentligvis i fremtiden få bedre verktøy for å forutsi og håndtere slike naturfarer.

3.1.4.2 Flomareal

I neste prosjektperiode anbefales det å følge med på et annet FoU-prosjekt i NVE om flomareal. Utviklingen innenfor kunstig intelligens vil kunne gi store muligheter innenfor analyser av fjernanalysedata, og NVE er i dag med på prosjektet «Foundation models for climate and society» (ESA, 2024). Prosjektet er ledet av Norsk regnesentral (NR), med midler fra ESA. I dette prosjektet ser man på om «Foundation models» innenfor kunstig intelligens kan gi forbedrede resultater sammenlignet med hva Flomtjenesten har gitt oss. Det er viktig å følge med på utviklingen, og prosjektet gjør at NVE kanskje også kan se nye muligheter for bruk av satellittbilder.

Videre vil NVE ta med seg anbefalinger fra evalueringen som skrives om flomareal og flomtjenesten i eget notat (se kapittel 2.5). Det er for eksempel ønskelig å lage et strukturert opplegg for når og hvordan man skal aktivere CEMS med forhåndsdefinerte polygoner for varslings, beredskap og flomsonekartlegging.

3.1.4.3 Jordfuktighet

Fjernmåling av jordfuktighet er også et jevnlig tilbakevendende tema. Så lenge slike data bare forteller om det øverste jordlaget på noen få cm, og i tillegg forstyrres av skogdekke, vurderes verdien for vannbalansed modeller i norsk terreng som liten. Med nye sensorer som NISAR og ROSE-L, med bedre egenskaper, er det all grunn til å se på slik bruk på nytt, både for flomvarslings- og jordskredvarslingsmodeller (se kapittel 3.2). Stasjoner som måler jordfuktighet er viktige tilskudd for å forstå satellittmålinger med L-bånd SAR. Det anbefales å ha et kunnskapssamarbeid med Meteorologisk institutt (MET) om dette temaet. Det er også et EU-prosjekt som Justervesenet har om jordfuktighet, og som er med i prosjektet SoMMet (2024), som bør ses i sammenheng med aktiviteter på dette i NVE i fremtiden.

3.3.5.4 Saksbehandlingsoppgaver og tilsyn

Avdeling for energi og konsesjon og avdeling for tilsyn og beredskap har liten tradisjon for å bruke satellittdata til støtte i saksbehandlingsoppgaver. I denne prosjektperioden har prosjektet startet med å få innsyn i brukeroppgaver og hva brukerne trenger av informasjon fra satellittdata, gjennom delprosjektet om nye muligheter for bruk (se kapittel 2.6.2). Videre trengs det mer innsikt i å forstå de ulike oppgavene til saksbehandlerne. Det anbefales å følge NVEs

digitaliseringsprosjekt, og lage «proof-of-concepts» for de temaene som er mest lovende for bruk av satellittdata basert på kartlagt brukerinnsikt. For eksempel kan det være endringsanalyser i områder med vindkraftutbygging eller langs vassdrag. Med nye typer satellittsensorer fra Copernicus i fremtiden, kan det blir flere tjenester som server saksbehandlingsoppgaver om energi og konsesjon, samt tilsyn (se Tabell 3.1). Det er også viktig å samarbeide og tilrettelegge data for andre nasjonale etater som kan ha nytte av NVEs operasjonelle Copernicustjenester (for eksempel Landbruks- og matdepartementet, 2024).

3.2 Utforske mulighetene i nye tjenester og nye sensorer og satellitter

Det anbefales å ha en egen arbeidspakke i den neste prosjektperioden 2025-2027 om mulighetsstudier på kommende satellitter. Dette innebærer både de kommende nye Sentinel-satellittsensorene gjennom Copernicus, men også uttesting av mulige forløper satellitter slik som Surface Water and Ocean Topography (SWOT) som kan ses på som en forløper til Sentinel-3 nestegenerasjon. I denne arbeidspakken inkluderes også forberedelser til Sentinel-1 og -2 nestegenerasjon, i den grad man kan forberede seg ut ifra tilgjengelig informasjon.

«Copernicus Sentinel Expansion Missions» (ESA, 2024) har en sammensetning av seks forskjellige satellittprogram som vil ha nye typer sensorer i forhold til de eksisterende Sentinell-sensorene som er operasjonelle i dag. Satellitter vil skytes opp fra 2025 og fremover. De viktigste satellittene for nye tjenester og produkter i NVE er disse:

- **Radar Observing System for Europe – L-band (ROSE-L):** L-bånd SAR med estimert oppskytningsstidspunkt for en første A-satellitt i 2028.
- **Copernicus Land Surface Temperature Monitoring (LSTM):** Termisk sensor med estimert oppskytningsstidspunkt for en første A-satellitt i 2029.
- **Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR):** Passiv mikrobølge-satellitt som har estimert oppskytningsstidspunkt i 2029.

NVE bør få økt kunnskapsgrunnlag på fremtidige Copernicus satellittsensorer. Hovedhensikten med aktiviteter på dette er å beslutte hvordan og i hvilket omfang vi skal benytte «Copernicus Sentinel Expansion missions» (ESA, 2024) og neste generasjon Sentinel-1, -2, -3 i fremtiden. Vi ønsker å teste ut satellittdata med lignende spesifikasjoner og oppløsning som de fremtidige Copernicussatellittene ved bruk av forløper satellittdata. Nye satellitter fra Copernicus som er aktuelle for NVE blir først skutt opp fra 2028. Faktiske data fra nye typer sensorer, utover første generasjons Sentinel-sensorer som vi har i dag, vil ikke være tilgjengelig i prosjektperioden 2025-2027. For disse aktivitetene er det stor interesse for et kunnskapssamarbeid mellom Meteorologisk institutt (MET) og NVE der det er hensiktsmessig. For eksempel ønsker NVE å bidra med tilbakemeldinger på planlagte land-produkter fra CIMR. Dette kan gjelde den tekniske oppbygningen av produkter som for eksempel fil-format, oppløsning etc. I tillegg kan NVE være med i faglige diskusjoner, eventuelt å teste ut, mer dedikerte produkt for kalde områder med komplekst terreng.

Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (CHIME) og Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter (CRISTAL) er interessante satellittprogram som NVE ønsker å følge med på, men ikke ha forløperaktiviteter for i 2025-2027.

I Tabell 3.1 listes anbefalte aktiviteter som NVE bør undersøke i neste prosjektperiode 2025-2027 som kan bli aktuelt å jobbe videre med når de nye Copernicus Sentinel-satellittene blir operasjonelle. Et eksempel på en slik aktivitet kan være at NVE ønsker å utforske om energi som går tapt i urbane områder kan identifiseres med LSTM. NVE skal ikke foreslå energieffektivisering, men hvis NVE får statistikk fra satellittdataene kan man få bedre kunnskap om regionalt behov for energieffektivisering. Det bør utforskes om NVEs energimerking av tekniske anlegg gjennom Energimerkeordningen kan ha nytte av LSTM for tilsynsoppgaver.

Surface Water and Ocean Topography (SWOT) er et fransk-amerikansk samarbeid (CNES/NASA) hvor det frigis åpne og gratis data. SWOT er en operasjonell satellitt i dag og den har lignende egenskaper som neste generasjon Sentinel-3 Altimeter, som vil komme i første halvdel av 2030-tallet. Neste generasjon Sentinel-3 vil ha høyere tidsoppløsning enn SWOT, men akkurat hva dette blir er ikke klart enda. I Tabell 3.1 oppsummeres de temaene NVE anbefaler at SWOT-data testes ut for i neste prosjektperiode.

NVE vil øke sin kunnskap på neste generasjons Sentinel-satellitter fremover. Dette innebærer at vi får god oversikt over spesifikasjonene av de forskjellige sensorene, men også hva slags betydning de kan ha for NVE. NVE anbefaler å fortsette å ha et medlem i ESAs rådgivende gruppe for Sentinel-2 nestegenerasjon (ESA Sentinel-2 Next Generation Mission Advisory Group, S2NGMAG). Med dette arbeidet ønsker NVE å fortsette å påvirke hvilke spesifikasjoner satellitten bør ha for bruk i komplekst terreng, overvåkning av kryosfære og usikkerhetsestimater. Neste generasjon Sentinel-1, -2 og -3 vil revolusjonere mange av de eksisterende operasjonelle tjenestene vi har i NVE i dag. Temaene som er nevnt i Tabell 3.1 vil kunne nyttiggjøre seg av nestegenerasjons Sentinel-satellittene, og antakeligvis vil det bli økt nytte og bruk utover dette også. Satellittprogrammene planlegges for oppskytning i første halvdel av 2030-tallet.

Tabell 3.1: Anbefalte aktiviteter knyttet til nye Copernicus Sentinel Expansion Missions. Nye muligheter for bruk av SWOT altimetri (Sentinel-3 NG) er også nevnt her. Neste generasjon Sentinel-1, -2 og -3 er ikke mer her, men blir viktig for alle temaene og vil sannsynligvis være nyttig for flere temaer i NVE enn det som er nevnt i tabellen.

Tjeneste	Produkt	Bruk	Kommentar
Snøskred	Snøskred-polygoner (økt overvåkning i tid)	Overvåkning Snøskredvarsling	Rose-L (L-bånd SAR)
	Temperatur (input eller validering av Snowpack-modell)	Modellering	LSTM (Termisk)
Snø	Snøparametre (grain size, albedo, black carbon, wet snow, SWE, snow depth etc.)	Overvåkning Flomvarsling og snøskredvarsling	Rose-L (L-band SAR) and CIMR (passive microwave) LSTM (termisk)
	Temperatur (input til energibalanse modeller)	Modellering	CHIME (Hyperspektral)

Tjeneste	Produkt	Bruk	Kommentar
Breer	Overflatetyper	Overvåkning	Rose-L (L-band SAR)
		Modellering	CHIME (hyperspektral)
		Massebalanse	CRISTAL (Altimetri)
	Iskjernemorener	Kartlegging	LSTM (Termisk)
Innsjøis	Is- og vanntemperatur	Overvåkning	LSTM (thermal)
	Islegging og isløsning	Innsjøisvarsling	ROSE-L (L-bånd SAR)
		Modellering	
	Innsjøisutbredelse	Overvåkning	Rose-L (L-bånd SAR)
		Innsjøisvarsling	
	Innsjøistykkelse	Overvåkning	SWOT (Sentinel-3 NG)
		Innsjøisvarsling	
		Modellering	
Skred	Jord- og flomskred	Kartlegging	Rose-L (L-bånd SAR)
		Jordskredvarsling	CHIME (Hyperspektral)
			LSTM (termisk)
	Sørpeskred	Kartlegging	Rose-L (L-bånd SAR)
		Jordskredvarsling	CHIME (Hyperspektral)
			LSTM (termisk)
Jord	Jordfuktighet	Overvåkning	Rose-L (L-bånd SAR) og CIMR (passiv mikrobølge)
		Flomvarslingen	
		Modellering	
	Grunnvann og tørke	Kartlegging	Rose-L (L-bånd SAR) og CIMR (passiv mikrobølge)
		Flomvarslingen	
		Modellering	
Energi og konsesjon	Endringsanalyser (Vegetasjon, veier, bygg etc.)	Konsesjonsbehandling av vind- og solkraft	CHIME (Hyperspektral)
	Solkraftanlegg	Konsesjonsbehandling	LSTM (Termisk)

Tjeneste	Produkt	Bruk	Kommentar
Tilsyn og beredskap	Kontroll av regulantinformatjon	Overvåkning Tilsyn	SWOT (Sentinel-3 NG)
	Temperatur	Utforske om det går an å overvåke energitap regionalt over tid i bygningsmasse? Tilsyn	LSTM (Termisk)
	Tilstanden til solkraftverk	Tilsyn Overvåkning av aldring og tilstand til solkraftanlegg? (Støv, effektivitet i drift etc.)	LSTM (Termisk)
	Solkraftanlegg	Tilsyn Overvåkning av påvirkningen et solkraftanlegg har på miljøet rundt?	LSTM (Termisk)
Flom	Overflatevann	Overvåkning Flomvarsling Kartlegging	Rose-L (L-bånd SAR)
	Temperatur (parameter i flommodeller)	Modellering	LSTM (Termisk)
	Vannstand (i umålte felt)	Overvåkning Flomvarsling Modellering	SWOT (Sentinel-3 NG)

3.3 Utvikle NVEs evne og kompetanse på anvendelse og data fra tjenestene

Til nå har NVE Copernicustjenester hatt fokus på å lage gode og forbedre produkter som har blitt utviklet siden starten av Sentinel-satellittene i 2014. I neste prosjektperiode fra 2025-2027 ønsker NVE mindre aktivitet på algoritmeutvikling, selv om det kan være hensiktsmessig med flere leveranser på dette innenfor temaene. Det anbefales ha fokus på bruk og videreutvikling av dagens operasjonelle tjenester innen snøskred, snø, innsjøis og bre, og satellittdata-tjenestene gjennom IT-infrastrukturen til NVE. NVE ønsker mer fokus på brukeropptak gjennom opplæring, kurs og tilgjengeliggjøring av eksisterende satellittprodukter og -tjenester. Temaene snøskred, snø, innsjøis og bre har kommet lengst i NVE med resultater fra Copernicusdata. Selv om disse ikke lenger er egne delprosjekter, vil temaene fortsette å ha dedikerte prosjektledere med inngående faglig kunnskap for videre utvikling i neste prosjektperiode.

3.3.1 Utvikle bruk av data fra tjenestene

NVE har i inneværende prosjekt utviklet flere produkter og datakilder fra satellittdata (se Tabell 2.2 og Tabell 2.3). Disse er tilgjengelige for interne og eksterne brukere, men videre arbeid må gjøres for å øke bruken av det vi har i NVE i dag. Dette henger sammen med det overordnede målet for hele prosjektet om økt samfunnsnytte. Det anbefales at dette får tilstrekkelig med fokus, for å sikre standardisering og ressurser i NVE.

3.3.1.1 Innarbeide bruk av eksisterende satellittdata og -produkter

En rekke aktiviteter i NVE har potensiale for å dra nytte av produkter som bruker Sentinel-data. Særlig naturfarevarslingen bruker allerede produktene, men videre arbeid trengs for å forbedre ytelsen på flere av tjenestene.

En måte å gjøre satellittprodukter til en mer integrert del av operasjonell drift, er å innføre rutiner på når og hvordan produktene har høy sannsynlighet for å være nyttige. Dette kan innebære forbedrede parametere koblet til satellittdata, f.eks. skydekke, årstid og himmelretning. Det kan også være nærmere koblet til den operative driften, f.eks. tidsintervall, aktuelt farevarsel og lignende. Deler av dette kan automatiseres og legges inn som metadata i produktene, og deler kan innarbeides i de operative rutinene..

For å få på plass så nyttige og brukervennlige systemer som mulig kreves et innledende arbeid med brukerinnsett i 2025. Målet med dette er å få en dypere forståelse for hvordan virksomheten bruker satellittdata i dag, og hvordan bedre tilpasning av produktene kan føre til utvidet bruk av eksisterende produkter. Dette bør gjøres parallelt med arbeid for å tilrettelegge for økt bruk av satellittdata og -produkter. Praktisk vil dette bety økt samarbeid med brukere gjennom seminar og arbeidsmøter, samt dybdeintervjuer der det mangler innsikt om behovene for satellittprodukter. Det anbefales å kartlegge hvordan brukerne ønsker å få representert usikkerhetsestimat og informasjon om når og hvor de bør bruke satellittprodukter. Eksempler på dette kan innebære flagging av piksler eller polygon som forteller brukeren om kvalitet på produktet.

Det bør undersøkes om det finnes eksterne løsninger fra andre nasjonale aktører som NVE allerede bruker, eller om det finnes relevante eksterne produkter som vil forenkle NVEs samfunnsoppdrag. Å knytte sammen aktivitetene gjennom InSAR Norge og NVE Copernicustjenester kan være hensiktsmessig. Det bør spesifikt undersøkes om det er relevant å bruke InSAR fra Sentinel-1 for flere formål enn hva det gjøres i dag.

3.3.1.2 Standardisert brukerdokumentasjon

Tilgjengelig dokumentasjon om satellittprodukter og -tjenester er spredt på forskjellige informasjonskanaler. Mye av dokumentasjonen som finnes om IT-systemene for produksjonslinjen til NVE Copernicustjenester er av teknisk natur. I tillegg til dette bør det være en standardisert måte å beskrive produkter og tjenester på som letter terskelen for å bruke dem. Det trengs også usikkerhetsestimat og informasjon om når og hvor produktene kan ha større usikkerhet. Ved å lage opplæringsmateriell som er rettet til sluttbrukerne vil terskelen for å bruke produktene bli lavere.

Det anbefales å lage eksempler på bruk av produktene, f.eks. gjennom kodeeksempel som brukerne forholdsvis enkelt kan tilpasse deres formål. Strukturen av opplæringsmaterialet skal kunne benyttes som pensum i interne kurs i hvordan produktene kan brukes.

I tillegg til å vise hvordan man bruker produktene skal opplæringsmaterialet være en inngangsport hvor brukere kan finne ut

- hva slags produkter er tilgjengelige
- beskrivelse av usikkerhet i satellittprodukter
- til hva slags formål bør de brukes
- hvor brukerne kan finne disse produktene, også relevante eksterne løsninger

3.3.1.3 Avholde interne kurs

I tillegg til å lage standardisert dokumentasjon som kan brukes for selvstudier bør det også avholdes kurs hvor materialet brukes som pensum. Det er naturlig at de eksisterende operasjonelle tjenestene i NVE i dag relatert til snøskred, snødekningsgrad, innsjøis og bre har slike opplæringskurs. Innholdet utover dette må fastsettes på et seinere tidspunkt etter at spesifikke behov er avdekket i dybdeintervjuene som beskrives i seksjon 3.3.1.1, men eksempel på kursinnhold kan være:

- Prosessering av satellittdata på sentralisert infrastruktur med Jupyter og actinia / GRASS GIS.
- Bruk av rasterdata fra ImageServer i lokale GIS-program.
- Forskjellige satellittdatakilder, samt fordeler og ulemper med disse.

3.3.2 Snøskred

Satskred har vært under utvikling siden 2015. Deteksjonen har lenge vært lovende og gitt gode resultater for store, våte snøskred. Deteksjon av tørre og spesielt mindre skred har derimot vært utfordrende på grunn av lite kontrast mellom skredavsetningene og omliggende snø. Antall falske alarmer («falske positive») har dessverre også vært høyt, særlig for tørre skred. Den nye dyplæringsalgoritmen gir en betydelig bedre sannsynlighet for å detektere skred, men antallet falske alarmer er fortsatt høyt og krever filtrering i etterkant. Sannsynligheten for å detektere et snøskred ser ut til å synke jo lengre tid som går mellom skredet og bildeopptaket. Det er derfor essensielt at minst to satellitter er operative for å sikre et nytt bilde hver sjettede dag. For perioden 2025-2027 er det viktig å bruke dyplæringsalgoritmen i situasjoner der vi har eller kan få gode valideringsdata for å kartlegge styrker og svakheter. Basert på denne kartleggingen bør resultatene tas i operasjonell bruk for skredkartlegging, varsling og sikring. Videre utvikling av selve algoritmen bør utsettes til bruksområder og begrensninger er nærmere kartlagt.

Produksjon av data er nå implementert for hele Norge ved bruk av dyplæringsalgoritmen. I neste fase skal vi arbeide med å anvende Satskred i operasjonelt arbeid. Her peker to anvendelser seg ut: den ene er validering av snøskredvarsel, og den andre er validering av faresonekartlegging. En tredje anvendelse kan være å undersøke hvordan satellittdetekterte skred kan brukes til å evaluere eksisterende eller planlagte sikringer.

Datasettet er allerede svært omfattende og vil vokse raskt. Dette gir muligheter for mye forskning. Derfor er det ønskelig med samarbeid med universiteter i Norge. Analyseverktøyene bør være tilrettelagt for forskere og studenter. Uttak fra databasen bør være enkelt og lett å integrere i for eksempel GIS-verktøy. Skredaktivitet bør sees i sammenheng med snødekkemodeller, meteorologiske forhold og feltobservasjoner. Satskred-dataene kan spesielt vise sine styrker under store hendelser med mange skred. Hendelser i perioden 2016 til 2020, da det var to satellitter tilgjengelige, bør systematisk gjennomgås. For hver hendelse bør antall riktige og falske skred analyseres for å få en bedre forståelse av hvordan skreddeteksjoner kan brukes i operasjonelt arbeid.

Sluttprodukter som satskred.nve.no er rettet mot varslere og de som arbeider med kartlegging og sikring av snøskred. Skredaktivitet fra de siste dagene bør være lett tilgjengelig for snøskredvarslingen. Også andre operatører og samarbeidspartnere som Statens vegvesen, bør lett kunne integrere satskreddata i sine verktøy. God dokumentasjon og opplæring i bruk av APler bør derfor utarbeides og tilgjengeliggjøres.

Rapporter og statistikk over skredaktivitet bør kunne genereres automatisk. For eksempel, statistikk som i figur 2.2.4.1 med kart og grafer om skredaktivitet i Norge bør kunne publiseres etter hver varslingssesong.

Dyplæringsalgoritmer trenger store datasett og ytelsen øker med høy kvalitet og kvantitet av slike treningsdata. Vi bør derfor sørge for at skred detektert fra satellitt kan markeres som riktige eller falske når valideringsdata, for eksempel observasjoner fra Regobs, er tilgjengelig.

Det er viktig at Sentinel-1 misjonen fortsetter og at det sikres at minst to satellitter er operative til enhver tid for å ha skreddeteksjon med god nok temporal oppløsning. Over tid vil data også kunne brukes i klimastudier for å se om, og eventuell hvordan et endret klima påvirker snøskredaktivitet i Norge.

3.3.3 Snø

Copernicus snøtjenesten har vært under utvikling siden 2015, og den har overtatt tjenestene vi hadde for MODIS-satellittene. Det har vært en gradvis utvikling og forbedring av produkter og algoritmer som beregner snødekningsgrad (FSC). I det siste er det også blitt jobbet med å forbedre Sentinel-3 skymaske, slik at man unngår å feilklassifisere skyer som snødekt areal eller vice versa. De nyeste resultatene har gitt gode resultater og de er blitt benyttet til å validere snødekningsgrader i vår HBV 24 flomvarslingsmodell og seNorge snømodell. Det har styrket bruken av FSC produktet i forhold til tidligere bruk hvor man i større grad baserte seg på en visuell sammenligning av kartlag for eksempel i xgeo eller enkel statistikk med verktøy for ønskede polygoner. Forbedring av algoritmen anbefales å settes på vent til bruksområdene er utvidet, kvalitetssikring er gjort og begrensninger er kartlagt, men på sikt vil nok spesielt metodene basert på dyplæring ha et stort potensial for videreutvikling. I tillegg anbefaler vi å se på om det er formålstjenlig å bruke et binært snøprodukt under den mørkeste delen av vinteren, når terrenget i hovedsak er fullt snødekt, da det er stor usikkerhet i FSC produktene. Mulig

kunnskapssamarbeid med MET vil være naturlig for dette. Det vil også være naturlig å følge med på utviklingen av både FSC og binære snøprodukter i Sverige og Finland og det anbefales å ha en felles workshop.

For den neste perioden 2025-2027 ønsker vi å utvide arbeidet som går på sammenligning mellom satellittbasert og modellert snødekningsgrad til de øvrige varslingsmodellene som NVE bruker. Dette gjelder både nedbørsfelt-modeller, som det kjøres et ensemble av og de grid-baserte modellene slik som SeNorge-modellen og FSM.

Det anbefales aktiviteter på multisensor-produkter. I første omgang vil det være naturlig å se på en kombinasjon av Sentinel-1 våtsnøkart med Sentinel-3 FSC slik som skissert i kapittel 2.3.1.5. Et slikt multisensor-produkt vil være nyttig under smeltesesongen som ofte er preget av lange perioder med skydekke.

Med dagens modelloppsett kan man bruke FSC-produktene til å kalibrere modellparametere for en lengre periode av data, men dette kan ikke gjøres underveis i sesongen fordi snødekningsgraden ikke kan løsrives fra mengden snø. Underveis i sesongen kan man ikke bare justere snødekningsgraden slik at den stemmer med satellittbilde siden mengden med snø også må ivaretas. En fullverdig data-assimilering er krevende og den kan gjøres på nedbørfeltnivå, på høydesonenivå eller helt ned på enkeltpiksler. Per nå har NVE lite erfaring med dette og det vil være naturlig å søke samarbeid med for eksempel MET eller andre før vi går videre med dette. I et internt FoU-prosjekt har man sett på mulige veier å gå, og de vil konkludere i løpet av 2025 (se kapittel 3.1.2).

Med neste generasjon snø- og avrenningsmodeller (som er basert på energibalansebasert snøsmelting) som er under utvikling i NVE, vil vi også se på nytteverdien av satellittdata for albedo, kornstørrelse og snøoverflatetemperatur og -fuktighet. Per nå har vi noen pre-operasjonelle produkter for snøoverflatetemperatur og effektivt optisk kornstørrelse utviklet av NR for Sentinel-3 SLSTR i en tidligere fase av Copernicus-prosjektet (se Solberg m.fl., 2021). Det vil derfor være naturlig å se nærmere på disse produktene da informasjon om snøkvalitet er viktig for modeller som simulerer andre egenskaper enn mengden snø slik som for eksempel snødekkemodeller og sørpeskredmodeller.

Som nevnt i 2.3.1.4 så er skymasken til Sentinel-2 for dårlig til å kartlegge skyer over snø til at man kan bruke automatisk genererte snø- (SCA) og isprodukter til sammenligning med Sentinel-3 bilder. NVE ser derfor et behov for at det jobbes videre med skymaskering for Sentinel-2, men at dette gjøres i et eget prosjekt i samarbeid med andre aktører og i dialog med Norsk Romsenter. En mulighet er å bruke Sentinel-3 skymaske som en grov tilnærming for Sentinel-2 skymaske.

3.3.4 Innsjøis

Copernicus istjenesten har vært under utvikling siden 2015, og det har i perioden blitt utviklet Sentinel-3 OCLI baserte isprodukter (isdekningsgrad), Sentinel-2 isprodukt og NR har testet ut et isdekningsgrad-produkt fra Sentinel-3 SLSTR, med basis i dyplæring. Isdeteksjonen med de to førstnevnte metodene har hatt noe begrenset nytteverdi spesielt under isleggingsperioden. Dette skyldes at det ikke gjøres opptak med OLCI-instrumentet når solvinkelen er lav. Dette betyr at man ikke får så mye informasjon under isleggingen som gjerne skjer i november-januar. Samtidig har det vært utfordringer med skymaskeringen da produktet er basert på den tidligere skymasken (SCDA). For neste periode anbefales det å erstatte SCDA-skymasken med en skymaske basert på dyplæring som er beskrevet i 2.3.1.2. Dette vil trolig forbedre produktet noe.

Det anbefales å implementere dyplæringsalgoritmen som er blitt utviklet av NR for Sentinel-3 SLSTR. Dette vil gi oss satellittbilder lengre inn i isleggingsperioden, men nord for Trondheim vil man grovt sett ikke ha noen opptak i store deler av desember og januar.

Hvis det blir utviklet en god skymaske for Sentinel-2 anbefales det å ta opp igjen produksjonen av isdekningproduktet basert på Sentinel-2 som ble utviklet i foregående Copernicus-prosjekt. Enn så lenge vil vi benytte manuell vurdering av satellittbilder for å si noe om isforholdene. Tilgangen til satellittbilder er også her noe begrenset på grunn av manglede opptak ved lav solvinkel, men denne er endret noe for Sentinel-2B som tar bilder opptil breddegrader rundt Trondheim i perioden desember-januar.

I kommende periode anbefales det å jobbe mer med Sentinel-1 isprodukt ved at vi studerer nærmere hvordan tilbakespredningen endrer seg, og knytte dette til isleggings- og isløsningstidspunkt. Det anbefales å etablere et uavhengig valideringsdatasett. Valideringsdatasettet vil bruke både Sentinel-2 og Sentinel-3 satellittdata, i tillegg til observasjoner fra Varsom-app/Regobs og informasjon fra time-lapse kamera. Arbeidet med å etablere valideringsdata basert på time-lapse kamera har startet og vil forsett videre inn i neste prosjektperiode. I utgangspunktet vil vi teste dette på innsjøer som er større enn 2 km², og hvor de som er større enn 50 km² er delt opp i mindre enheter. Det er mulig at denne inndelingen blir endret. Siden tilbakespredningen fra en vannflate i Sentinel-1 avhenger av bølgehøyden, vil det være naturlig å ta ut vinddata rundt opptakstidspunktet for Sentinel-1. Dette kan avdekke hvorvidt det er mye bølger eller ikke på sjøen. Denne ekstrainformasjonen hjelper trolig for tolkningen av tilbakespredningsmønsteret fra Sentinel-1 dataene, og dette anbefales det å jobbe videre med i neste prosjektperiode.

I dag kjører NVE en ismodell som beregner hvordan isen utvikler seg etter islegging, med basis i SeNorge værdata (griddet temperatur og nedbør). Modellen startes på et tidspunkt som er vanskelig å modellere fordi tidspunktet bestemmes av både temperatur, vind, og nedbør. Derfor bestemmes isleggingstidspunktet manuelt av isvarsleren, og tidspunktet er basert på erfaring eller ekstern informasjon, slik som Varsom-app/Regobs observasjoner eller visuell tolkning av isforholdene fra satellitt. Vi har et ønske om å automatisere starten av ismodellen, basert på isleggingstidspunkt etablert fra satellittobservasjoner (Sentinel-1,-2,-3). På samme måte ønsker vi å detektere isløsningstidspunktet. Som for snøskreddeteksjon er det viktig med god temporal oppløsning på Sentinel-1, og det er viktig å sikre at minst to satellitter er operative til enhver tid.

I neste periode anbefales det å bruke satellittdata til å få oversikt over ispropper, isoppstuvninger og isganger på utvalgte elvestrekninger. Her kan man trolig bygge på erfaring fra Satskred og flomtjenesten som er basert på endringsdeteksjon. To aktuelle elvestrekninger man kan starte med er Stjørdalselva og Beiarelva, som har årlige isganger og isoppstuvninger.

NORCE har demonstrert at SWOT altimeterdata trolig kan brukes til iskartlegging på større innsjøer ved at det er høydeforskjell mellom områder som er islagt og områder som er isfrie. Det vil være nyttig for NVE å følge opp dette arbeidet som er forløper-aktivitet til Sentinel-3 nestegenerasjon som vil gi høyoppløselige altimeterdata (se kapittel 3.2).

3.3.5 Bre

Det anbefales å jobbe videre med flere av breproduktene og bretjenestene for å tilgjengeliggjøre data som statistikk og plott. Det anbefales videre å fortsette kunnskapssamarbeidet med eksterne aktører som Universitetet i Oslo, Kartverket, Norges teknisk-naturvitenskapelige

universitet og Norsk Polarinstitutt. Algoritmer og metodikk som utvikles av samarbeidspartnere kan testes ut i neste fase.

Det forrige breatlaset med breomkretser er fra 2018/2019, og det er allerede betydelige endringer. Flere små fonner er i ferd med å forsvinne og sammenhengende brefelt deles opp i flere mindre enheter. Vi ønsker å videreføre arbeidet fra tidligere kartlegging og teste ut egnethet av KI-algoritme utarbeidet i MASSIVE-prosjektet for mer automatisk kartlegging og sammenligne det med vår tidligere brukte algoritme for å se hva som er mest hensiktsmessig for å gjøre kartlegging og endringsanalyse. I samarbeid med NTNU vil vi også se på hvor små fonner og breer som kan kartlegges med Sentinel-2, og hvordan man kan oppdage fonner som står i fare for å smelte bort om kort tid eller alt har forsvunnet. Et datasett for Lille istids maksimale breutbredelse og andre breomkretser vil sammenstilles og brukes i endringsanalyse. Datasettene legges ut på NVEs breatlas.

Vi vil fortsette å følge med på Sentinel-1 og 2 bilder over utvalgte norske lokaliteter av bresjøer med fare for jøkullaup. Det anbefales å lage et nytt produkt av bresjøomkrets for å kunne ha dette som referanse for å oppdage nye sjøer og endring i sjøer. Dette kan være basert på 2024- eller 2025-bilder. Vi vil vurdere videreutvikling av overvåkningstjeneste med Sentinel-1 og -2 for de viktigste bredemte sjøene. Vi ønsker også å sammenligne KI-algoritme med vår forbedrede NDWI-algoritme for mest effektivt å kunne kartlegge bresjøer.

Ved nye produkter av bresjøer og breomkretser ønsker vi å samarbeide med Kartverket så breomkretsproduktet kan tilpasses og glattes og legges ut som oppdaterte lag i deres tjenester i tillegg til NVEs Breatlas og NVE-atlas.

For snølinjer ønsker vi å lage overvåkningstjeneste for å ta ut snølinjer og høyder av snølinjer som dataserier for de viktigste breene NVE følger med på. Sentinel-1 og ev. Sentinel-2 vil brukes til å ta ut data. Dette er statistiske plott som bremålere kan bruke til å få oversikt over smelte- og snøforhold på breen gjennom siste sesong eller over flere sesonger. Dette er til hjelp når man beregner massebalanse og for å følge med på utviklingen av firnområdene på breene over tid.

4 Anbefalinger for aktiviteter fra 2028

NVE ser for seg at vi i perioden 2025-2027 får et kunnskapsgrunnlag for å kunne ta i bruk nye typer satellittdata fra Copernicus Sentinel Expansion Missions når de etter hvert, på rekke og rad, blir operasjonelle fra 2028. Dette innebærer uttesting av deteksjonsalgoritmer og overvåkning av NVEs interesser til støtte i varsling, beredskap, og forskning. Videre tror NVE at det vil komme mer interesse for og nytte av å ta i bruk satellittdata innenfor tilsynsoppgaver, konsesjonsbehandling og i energifaget. Dette er en modningsprosess som NVE jobber med kontinuerlig.

Med et økende antall satellitter og sensorer – og høyere romlig, spektral og temporal oppløsning i dataene – forventes det en eksponentiell økning i datamengde som må håndteres for å utvinne potensialet i satellittdataene. Dagens datamengde innebærer allerede utfordringer knyttet til kostnader for lagring og prosessering av data. I et mer langsiktig perspektiv vil det derfor være fordelaktig å styrke samarbeid i offentlig sektor (Johannessen, m.fl., 2024). Flerbruk av satellittdata-produkter og mellom-produkter vil kunne gi bedre kostnadseffektivitet i håndtering av satellittdata og også redusere miljø- og klimaeffekter av IKT-løsningene knyttet til det. Det å videreutvikle bevissthet på muligheter og begrensninger i Copernicus-tjenester og plattformer (for eksempel DestinationEarth eller Copernicus Data Space Ecosystem) på europeisk nivå er et viktig element i denne sammenhengen.

I kapittel 3.2 beskrives mulige forløperaktiviteter til Copernicus Sentinel Expansion Missions. Her er et knippe eksempler om hvordan NVE vil ta i bruk nye satellittdata fra Copernicus etter 2028:

- Bruken av tilgjengelige L-bånd-SAR-satellitter (NISAR og ROSE-L) kan bidra til å detektere snøskred og dermed øke den temporale oppløsningen. Siden L-bånd forventes å ha tilsvarende, om ikke svakere ytelse for å detektere snøskred, forventer vi kun en eventuell forbedring i tidsoppløsningen for store og våte snøskred. Utfordringene med å detektere tørre skred vil antakelig kun kunne løses ved å ta i bruk høyere frekvenser som X- eller Ku-bånd. Det er viktig at Sentinel-1-programmet fortsetter og at det sikres at minst to satellitter er operative til enhver tid.
- Bruk av L-bånd-SAR-satellitt (NISAR og Rose-L) kan også bidra til forbedret snøkartlegging. L-bånd-SAR har større evne til å penetrere igjennom snøen enn C-bånd, og gir dermed bedre muligheter for å estimere snødyp og trolig SWE, ved å estimere tidsforsinkelsen radarbølgen bruker igjennom snøpakka. Med data fra CIMR (passiv mikrobølge sensor) kan man potensielt estimere snødyp og SWE (Snow Water Equivalent) selv for norske forhold med utfordrende topografi.
- Bruk av LSTM for iskartlegging og vanntemperatur. Høyoppløselig termisk data vil gi muligheter for overvåkning av overflatetemperatur i innsjøer og store elver. Dataene kan derfor brukes til å kartlegge om innsjøen har overflatetemperaturer under null, som betyr at innsjøen er islagt. Dataene vil også kunne brukes til å bestemme istykkelsen på snøfri is, i alle fall tidlig i vintersesongen. LSTM sine målinger av bakketemperatur er antakeligvis nyttig for NVEs hydrologiske modeller.

Det er mange andre mulige aktiviteter i tillegg til de overnevnte (se tabell i kapittel 3.2 for eksempler). Neste generasjon av Sentinel-1, -2 og -3 ventes å ha blant annet bedre romlig- og tidsoppløselig, og disse vil styrke eksisterende produkter i tillegg til nye i NVE.

5 Konklusjon

Over mange år har Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) opparbeidet seg kunnskap om håndtering av satellittdata. Etter at Sentinel-satellittdata ble tilgjengelig gjennom det europeiske jordobservasjonsprogrammet Copernicus i 2014, har NVE utviklet operasjonelle tjenester basert på disse dataene. Denne rapporten gir en oversikt over produkter og tjenester utviklet i prosjektet NVE Copernicustjenester i perioden 2022-2024. Prosjektet har vært delfinansiert av Norsk Romsenter og har hatt som mål å videreutvikle og effektivisere bruken av satellittdata fra Sentinel-1, -2 og -3 satellittene for kartlegging og deteksjon av snøskred, snø, innsjøis, bre og flom. I tillegg har det blitt utforsket nye muligheter for bruk av satellittdataene. I rapporten gis det også anbefalinger for aktiviteter og produkter i neste prosjektperiode 2025-2027.

Tilgjengeliggjøring av satellittbaserte tjenester og produkter bidrar til at NVE gjør bedre beslutninger i varslings-tjenestene for snøskred, flom, jordskred, og is, samt bedre risikovurderinger og sikringstiltak knyttet til naturfarer. I tillegg er satellittdataene nyttige for forebygging av materiell- og personskade knyttet til beredskapssituasjoner og for feltplanlegging. Copernicus-produktene og -tjenestene NVE har ansvar for bidrar til bedre forskning, prosessforståelse og kartgrunnlag levert av NVE. Copernicus-data har vært viktige for å kart- og tallfeste tilbakegangen og endringene i isbreer. Etter hvert danner de også grunnlaget for andre lengre tidsserier for å utforske effekter av klimaendringer. Gjennom prosjektet har NVE bygget en solid IT-infrastruktur og utviklet innovative og stabile produksjonslinjer.

I denne rapporten er det gitt anbefalinger for kommende aktiviteter for 2025-2027. NVE ønsker å utforske bruken av satellittdata for å validere og forbedre eksisterende modeller, blant annet gjennom arbeid med multisensorprodukter. Anbefalingene inkluderer videreutvikling av IT-infrastruktur for å sammenstille satellittprodukter og -tjenester med andre type data fra modeller. Det anbefales å forberede seg på fremtidige satellitter fra Copernicus ved å benytte forløperdata fra liknende satellittsensorer tilgjengelig i prosjektperioden. For at NVE skal nyttiggjøre seg Copernicus til det fulle ønsker vi frem mot, og i neste periode av EUs romprogram fra 2028, å fortsette med å utvikle brukerrettede produkter for NVE og andre interessenter. Dette krever at NVE legger til rette for god dokumentasjon, kvalitet og enkel bruk av sine satellittprodukter og -tjenester for allmennheten. NVE ønsker å være i forkant av de kommende «Copernicus Sentinel Expansion Missions» og forberede seg på disse satellittene opp mot 2028 der vi ser høyest brukergevinst og samfunnsnytte.

6 Referanser

- Abderhalden, J. M., Bly, K. K., Lappe, R., Andreassen, L. M., & Rogozhina, I. (2024). Tracking rapid and slow ice-dammed lake changes through optical satellites and local knowledge – a case study of Tystigbreen in Norway. *Journal of Glaciology*, 1–16.
<https://doi.org/10.1017/jog.2024.13>
- Andreassen, L.M., Winsvold, S. H., Paul, F., & Hausberg, J. E. (2012). *Inventory of Norwegian glaciers* (NVE Rapport 38-2012). Norges Vassdrags- og energidirektorat.
https://publikasjoner.nve.no/rapport/2012/rapport2012_38.pdf
- Andreassen, L. M., Callanan, M., Saloranta, T., Kjøllmoen, B., & Nagy, T. (2020). *FonnSat – Fonner, arkeologi og satellittdata* (NVE Rapport 41/2020). Norges Vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2020/rapport2020_41.pdf
- Andreassen, L.M., G. Moholdt, A. Kääb, A. Messerli, T. Nagy and S.H. Winsvold. (2021a). *Monitoring glaciers in mainland Norway and Svalbard using Sentinel* (NVE Rapport 3/2021). Norges Vassdrags- og energidirektorat.
https://publikasjoner.nve.no/rapport/2021/rapport2021_03.pdf
- Andreassen, L. M., Engeset, R. V., Melvold, K., Müller, K., Orthe, N.-K., Sund, M., & Winsvold, S. H. (2021b). *Developing Satellite Services for Hydrology, Glaciers and Avalanches in Norway* (NVE Rapport 25/2021). Norges Vassdrags- og energidirektorat.
https://publikasjoner.nve.no/rapport/2021/rapport2021_25.pdf
- Andreassen, L. M. (2022). *Breer og fonner i Norge* (NVE Rapport 3/2022). Norges Vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2022/rapport2022_03.pdf
- Andreassen, L. M., Nagy, T., Kjøllmoen, B., & Leigh, J. R. (2022). An inventory of Norway's glaciers and ice-marginal lakes from 2018–19 Sentinel-2 data. *Journal of Glaciology*, 68(272), 1085–1106. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.20>
- Baumann, S., Winkler, S., & Andreassen, L. M. (2009). Mapping glaciers in Jotunheimen, South-Norway, during the “Little Ice Age” maximum. *The Cryosphere*, 3(2), 231–243.
<https://doi.org/10.5194/tc-3-231-2009>
- Bhogapurapu, N., Dey, S., Homayouni, S., Bhattacharya, A., & Rao, Y. S. (2022). Field-scale soil moisture estimation using sentinel-1 GRD SAR data. *Advances in Space Research*, 70(12), 3845–3858. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.019>
- Bianchi, F. M., Grahm, J., Eckerstorfer, M., Malnes, E., & Vickers, H. (2021). Snow Avalanche Segmentation in SAR Images With Fully Convolutional Neural Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 75–82.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3036914>
- Blyverket, J. (2023) *Sentinel-1 Soil Moisture to Applications D3.3 ATBD Soil Moisture Retrieval*. SSM2A. Prosjektrapport. MET.
- Bühler, Y., Hafner, E. D., Zweifel, B., Zesiger, M., & Heisig, H. (2019). Where are the avalanches? Rapid SPOT6 satellite data acquisition to map an extreme avalanche period over the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13(12), 3225–3238. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3225-2019>

- CEMS. (2024, October 8). *Copernicus Emergency Management Service*.
<https://emergency.copernicus.eu/>
- CLMS. (2024, October 8). *Copernicus Land Monitoring Service (CLMS)*.
<https://land.copernicus.eu/en>
- Digdir (2024, November 13) Utfordringer ved bruk av kunstig intelligens i offentlig sektor.
<https://www.digdir.no/rikets-digitale-tilstand/utfordringer-ved-bruk-av-kunstig-intelligens-i-offentlig-sektor/4464intelligens>
- Eckerstorfer, M., & Malnes, E. (2015). Manual detection of snow avalanche debris using high-resolution Radarsat-2 SAR images. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 205–218.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.016>
- Eckerstorfer, M., Bühler, Y., Frauenfelder, R., & Malnes, E. (2016). Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential, and limitations. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.001>
- Eckerstorfer, M., Vickers, H., Malnes, E., & Grahn, J. (2019). Near-Real Time Automatic Snow Avalanche Activity Monitoring System Using Sentinel-1 SAR Data in Norway. *Remote Sensing*, 11(23), 2863. <https://doi.org/10.3390/rs11232863>
- Energidepartementet. (2024). *Meld. St. 27. (2023–2024). Tryggare framtid – førebudd på flaum og skred* [Melding til Stortinget].
<https://www.regjeringen.no/contentassets/7a6bf454917444a18225bd8cdebf3/nno/pdfs/stm202320240027000dddpdfs.pdf>
- ESA. (2024, October 16). *Copernicus Sentinel Expansion Missions*.
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_Sentinel_Expansion_missions
- ESA. (2024, November 3). *Foundation Models for Climate and Society (FM4CS)*.
<https://eo4society.esa.int/projects/fm4cs/>
- Flaten, M. (2023). *Filtering sources of false alarms from automatically detected avalanches in Sentinel-1 SAR images* [Unpublished masters dissertation]. University of Oslo.
- Ganerød, A. J., Lindsay, E., Fredin, O., Myrvoll, T.-A., Nordal, S., & Rød, J. K. (2023). Globally vs. Locally Trained Machine Learning Models for Landslide Detection: A Case Study of a Glacial Landscape. *Remote Sensing*, 15(4), 895. <https://doi.org/10.3390/rs15040895>
- Grahn, J., Bianchi, F. M., Müller, K., & Malnes, E. (2024, September 23–29). *Data-Driven Avalanche Forecasting: Using Weather and Satellite Data*. [Extended abstract]. International Snow Science Workshop, Tromsø, Norway. https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW2024_O1.7.pdf
- Greifeneder, F., Notarnicola, C., & Wagner, W. (2021). A machine learning-based approach for surface soil moisture estimations with google earth engine. *Remote Sensing*, 13(11), 2099.
<https://doi.org/10.3390/rs13112099>
- Grove, J. M. (2004). *Little Ice Ages: Ancient and Modern* (2nd ed.). Routledge.

- Johannessen, J. A., Breivik, L.-A., Høgda, K. A., Pettersson, L. H., Malnes, E., Schyberg, H., Downy, C., & Godøy, Ø. (2024). *Veikart for nasjonal styrking av tverrfaglig forskning, utvikling og bruk av jordobservasjoner fram mot 2030 (VEIKARTJO2030)* (Spesial rapport 109/2024). Nansen Senter for Miljø og Fjernmåling.
- Kjøllmoen, B., & Andreassen, L. M. (2024). *Glacier Lake Outline (GLO) 1961-2022 Norgebilder.no* [Data set]. Retrieved November 8, 2024, from <https://doi.org/10.58059/gpw7-0k22>
- Klima- og miljødepartementet (2024, Oktober 7). *Statsbudsjettet 2025. Bærekraftig bruk og bevaring av naturen*. Regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/no/aktuelt/barekraftig-bruk-og-bevaring-av-naturen/id3056344/>
- Kosberg, S., Michaelsen, M. O., Hoseth, K. A., Engeset, R., Barfod, E., Müller, K., Mikkelsen, O. A., Stefan, M., Skrede, I., & Roggetin, R. (2023). *Evalueringsrapport snøskredhendelser i Troms og Finnmark 31. mars – 2. april 2023* (NVE Rapport 18/2023). Norges vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2023/rapport2023_18.pdf
- Khrono (2024, November 13). *Milliardsatsing på kunstig intelligens*. <https://www.khrono.no/milliardsatsing-pa-kunstig-intelligens/807818>
- Kunnskapsdepartementet. (2017, August 18). *Nasjonale mål og retningslinjer for åpen tilgang til vitenskapelige artikler*. Kunnskapsdepartementet. <https://www.regjeringen.no/contentassets/ae7f1c4b97d34806b37dc767be1fce76/nasjonale-mal-og-retningslinjer-for-åpen-tilgang-til-vitenskapelige-artikler.pdf>
- Landbruks- og matdepartementet (2024, November 11). *Klimatilpasning i reindriften*. <https://www.regjeringen.no/contentassets/884402b6e50242b18fcd030673d23f6d/klimatilpasning-i-reindriften-rapport-fra-arbeidsgruppe.pdf>
- Lindsay, E. (2023). *Using Satellite Imagery to Improve Landslide Detection*. [Unpublished doctoral thesis]. Norwegian University of Science and Technology.
- Lindsay, E., Ganerød, A. J., Devoli, G., Reiche, J., Nordal, S., Frauenfelder, R., & Tokle, L.-C. (2023). *Understanding Landslide Expression in SAR Backscatter Data: A Global Study*. Preprints.org. <https://doi.org/10.20944/preprints202302.0390.v1>
- Løkeberg, J. (2024). *Kartlegging av lille istids utbredelse på Hardangerjøkulen ved bruk av Sentinel-2 data* [Unpublished masters dissertation]. Norwegian University of Life Sciences.
- Malnes, E. (2024a). *Deteksjon av våt snø med Sentinel-1* (Teknisk notat 105910). NORCE.
- Malnes, E. (2024b). *Innsjøis tjeneste* (Teknisk notat 105910). NORCE.
- Malnes, E. og Eckerstorfer, M. (2022) *Analyse av Sentinel-1 data til deteksjon og varsling av kvikkleireskredet på Gjerdrum*. NORCE. Rapport, 33 sider. ISBN: 978-82-8408-246-2
- Mengistu, Z. T. (2024, May 7). *Estimation of soil moisture at field scale using Sentinel-1 data and in situ soil moisture measurements* [Internt NVE-notat]. Norges Vassdrags- og energidirektorat.
- Mullissa, A., Vollrath, A., Odongo-Braun, C., Slagter, B., Balling, J., Gou, Y., Gorelick, N., & Reiche, J. (2021). Sentinel-1 SAR Backscatter Analysis Ready Data Preparation in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(10), 1954. <https://doi.org/10.3390/rs13101954>

- Nagy, T., & Andreassen, L. M. (2019). *Glacier lake mapping with Sentinel-2 imagery in Norway* (NVE Rapport 40/2019). Norges Vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2019/rapport2019_40.pdf
- NVA. (2024, Oktober 28). *Nasjonalt vitenarkiv (NVA)*. <https://nva.sikt.no/>
- NVE. (2024). *Oversikt over norske breer* (NVE Fakta 01/2024). Norges Vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/fakta/2024/fakta2024_01.pdf
- NVE-WIKI. (2024, November 1). *Bruk av satellittdata og -produkter i NVE*. <https://nve-wiki.nve.no/display/HYD/Bruk+av+satellittdata+og+-produkter+i+NVE>
- Prakash, N., Manconi, A., & Loew, S. (2020). Mapping landslides on EO data: Performance of deep learning models vs. Traditional machine learning models. *Remote Sensing*, 12(3), 346. <https://doi.org/10.3390/rs12030346>
- Rudjord, Ø., Waldeland, A. U., Trier, Ø. D., & Solberg, R. (2024). *Isdekningsgrad på innsjøer fra SLSTR med dyp læring. Delprosjekt for snø og is i NVE Copernicus 2* (NR-notat BAMJO/06/24). Norsk Regnesentral.
- Singh, A., Gaurav, K., Meena, G. K., & Kumar, S. (2020). Estimation of soil moisture applying modified Dubois model to Sentinel-1; A regional study from Central India. *Remote Sensing*, 12(14), 2266. <https://doi.org/10.3390/rs12142266>
- Solberg, R., Reksten, J. H., Trier, Ø. D., Melvold, K., & Orthe, N. K. (2018). *Utvikling av operasjonell snøtjeneste hos NVE. Resultater fra prosjektfase 1* (NR-notat SAMBA/19/18). Norsk Regnesentral.
- Solberg, R., Reksten, J. H., Trier, Ø. D., Melvold, K., & Orthe, N. K. (2019). *Utvikling av operasjonell snøtjeneste ved NVE. Resultater fra prosjektfase 2* (NR-notat SAMBA/52/19). Norsk Regnesentral.
- Solberg, R., Reksten, J. H., Trier, Ø. D., Waldeland, A. U., & Melvold, K. (2021). *Utvikling av operasjonell snøtjeneste ved NVE. Resultater fra prosjektfase 3* (NR-notat SAMBA/37/21). Norsk Regnesentral.
- Solberg, R., Salberg, A. B., Reksten, J. H., Kristensen, S. E., & Orthe, N. K. (2019). *Utvikling av operasjonell flomtjeneste ved NVE. Resultater fra prosjektfase 3* (NR-notat SAMBA/09/2019). Norsk Regnesentral.
- SoMMet. (2024, November 8). SoMMet Project Overview. <https://www.sommet-project.eu/project/overview>
- Statham, G., Haegeli, P., Greene, E., Birkeland, K., Israelson, C., Tremper, B., Stethem, C., McMahon, B., White, B., & Kelly, J. (2018). A conceptual model of avalanche hazard. *Natural Hazards*, 90, 663–691. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3070-5>
- Staubo, I., Carm, K., Ågren Høegh, B., L'Abée-Lund, J. H., & Åkre Solheim, S. (2019). *Kantvegetasjon langs vassdrag* (NVE Veileder 2/2019). Norges Vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/veileder/2019/veileder2019_02.pdf

- Stokes, C. R., Andreassen, L. M., Champion, M. R., & Corner, G. D. (2018). Widespread and accelerating glacier retreat on the Lyngen Peninsula, northern Norway, since their 'Little Ice Age' maximum. *Journal of Glaciology*, 64(243), 100–118. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.3>
- Sund, M., Grønsten, H. A., & Seljesæter, S. Å. (2024). A regional early warning for slushflow hazard. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(4), 1185–1201. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1185-2024>
- Trier, Ø. D., & Salberg, A. B. (2020). *Kartlegging av naturinngrep. Sluttrapport – revidert utgave* (NR Notat SAMBA/10/2020). Norsk Regnesentral. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1695/m1695.pdf>
- Trier, Ø. D. (2023). *Driftspilot veideteksjon. Metodeforbedringer i 2022* (NR Notat BAMJO/06/23). Norsk Regnesentral. <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2023/mai-2023/driftspilot-veideteksjon-metodeforbedringer-i-2022/>
- Trier, Ø. D., Waldeland, A. U., & Solberg, R. (2023). *Videreutvikling av skydeteksjon for SLSTR med dyp læring. Delprosjekt for snø og is i NVE Copernicus 2* (NR-notat BAMJO/15/23). Norsk Regnesentral.
- Trier, Ø. D., Reksten, J. H., & Solberg, R. (2024). *Validering og evaluering av FSC. Delprosjekt for snø og is i NVE Copernicus 2* (NR-notat BAMJO/05/24). Norsk Regnesentral.
- Varsom. (2024, Oktober 8). *Naturfarevarsler i Norge*. <https://www.varsom.no/>
- Vickers, H., Eckerstorfer, M., Malnes, E., Larsen, Y., & Hindberg, H. (2016). A method for automated snow avalanche debris detection through use of synthetic aperture radar (SAR) imaging. *Earth and Space Science*, 3(11), 446–462. <https://doi.org/10.1002/2016EA000168>
- Vickers, H., Eckerstorfer, M., Malnes, E., & Dougeris, A. (2017). Synthetic Aperture Radar (SAR) Monitoring of Avalanche Activity: An Automated Detection Scheme. In *Image Analysis. SCIA 2017* (pp. 136–146). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59129-2_12
- Waldeland, A. U., Rudjord, Ø., Trier, Ø. D., & Solberg, R. (2023). *Videreutvikling av snødekningsgrad for SLSTR med dyp læring. Delprosjekt for snø og is i NVE Copernicus 2* (NR-notat BAMJO/14/23). Norsk Regnesentral.
- Weber, P., Boston, C. M., Lovell, H., & Andreassen, L. M. (2019). Evolution of the Norwegian plateau icefield Hardangerjøkulen since the 'Little Ice Age'. *The Holocene*, 29(12), 1885–1905. <https://doi.org/10.1177/0959683619865601>
- Weber P., Andreassen L. M., Boston C. M., Lovell H., & Kvarteig S. (2020). An ~1899 glacier inventory for Nordland, northern Norway, produced from historical maps. *Journal of Glaciology*, 66(256), 259–277. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.3>
- Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., & Rosolem, R. (2012). COSMOS: The cosmic-ray soil moisture observing system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4079–4099. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4079-2012>

7 Vedlegg

Oppdatert oversikt over endringer i leveranser og tidsangivelser. Rader i grått er utsatt i prosjektet og rader i mørkeblått viser flytting av leveransedato.

Delprosjekt	Nr.	Leveranse	Type	2022	2023	2024
Data&styring	1a	Styring og koordinering av aktiviteter og tjenester	Møte/plan/rapport	Q2 Q4	Q2 Q4	Q2 Q4
	1b	Koordinering mot NBS	Møte/plan	Q2 Q4	Q2 Q4	Q2 Q4
	1c	Inkluder og vise S1-data fra NBS i NVEs tjenester (snøskred, snø, is, flom)	Produksjonslinje		Q2	
	1d	DOI og handle for data (permanent, unik ID og versjonskontroll)	Dokumentasjon	Q4	Q2	
	1e	Forbedret Regobs for crowd sourcing (polygoner for skred/flom, enkel obs.)	Utvivelse i app m/nyhet	Q3	Q3	
	1f	Utvikle system for aggregering av satellitt-, modell-, terreng og feltdata for sammenligning og validering av data	Applikasjon			Q2
	1g	Opprette/oppdaterer delprosjektplaner, inkl. avtale bruk av eksterne ressurser	Planer og avtaler	Q1	Q1	Q1
	1h	Operasjonalisering av leveranser fra NR og NORCE	Produksjonslinje	Q4	Q4	Q3
Snøskred	2a	Deteksjonsalgoritme versjon 2 - Unet (færre feildeteksjoner, bedre tørrsnøskreddeteksjon. Bruk av dyplæring og data om vegetasjon og våt snø)	Algoritme m/rapport		Q1 Q3	
	2b	Valideringsrapport (bedre kunnskap om produktets kvalitet og nytte)	Rapport		Q1 Q4	
	2c	Svalbardutvidelse (dekke en varslingsregion)	Utvivelse		Q3	
	2d	Tidsserieanalyse for kvantifisering av klimaeffekter	Rapport			Q4
	2e	Integrering av produkter i snøskredvarslingen med maskinlæring	Applikasjon		Q3	Q2
Snø og is	3a	Snødekningsgrad S3 med maskinlæring-versjon 0	Algoritme	Q4	Q1	
	3b	Snødekningsgrad S3 med maskinlæring -videreutvikling for skog	Algoritme m/rapport	Q4	Q1 Q3	Q1
	3b1	Forbedret S3 Snødekningsgradsprodukt basert på maskinlæring (justering av 3b)	Algoritme m/rapport			Q1
	3d	Skymaske S3 med maskinlæring	Algoritme m/rapport	Q4	Q1	
	3e	Valideringsrapport HSC produkter (bedre kunnskap om kvalitet og nytte)	Rapport		Q3	Q1
	3f	Videreutvikling av valideringsverktøy (skyfrie S2-data validerer S1/S3 produkter)	Applikasjon			Q1
	3g	Bruk av S1 til iskartlegging og intensitetsprodukt	Rapport mulig algoritme		Q1 Q4	Q4
	3h	Bruk av dyplæring/maskinlæring for iskartlegging S3-SLSR evt S1	Algoritme m/notat		Q4	Q2
	3i	Bruk av multisensor og multialgoritmer for snødekningsgrad S1/2/3	Mulighetsstudie/algoritme			Q3
	3j	Verdiøkende tjenester basert på satellitt, modell og observasjoner	Applikasjon m/rapport	Q4	Q2 Q4	Q4
Bre	3k	Tidsserieanalyse for kvantifisering av klimaeffekter	Applikasjon		Q3	Q2
	3l	Overflatekorntype (rim, omdannet, nysnø) fra S3/S2-data	Algoritme m/rapport			Q4
	4a	Snø- og firnlinjedeteksjon med S1/2-data	Algoritme m/rapport			Q3
	4b	Metode for vurdering av konsekvens av jøkulhiaup oppdaget med S1/2-data	Rapport			
	4c	Tidsserieanalyse av utvalgte fonner og breer for kvantifisering av klimaeffekter	Rapport og datasett			Q2 Q4
	4d	Tidsserieanalyse av utvalgte bresjøer for kvantifisering av klimaeffekter	Rapport og datasett		Q4	Q4
	4e	Mulighetsstudie albedo, snølinjer til bruk i modellering - forstudie til fase 2	Rapport			Q4
	5a	Deteksjonsalgoritme versjon 2 (med bruk av dyplæring)	Algoritme m/rapport			Q3
	5b	Deteksjon av overvann og midlertidige vannveier med S1/2 data	Rapport			
	5c	Bruk av Sentinel-data for validering av estimert oversvømt areal og konsekvenser ved ulike flomstørrelse i tilknytting risikobasert varsling	Notat			Q4
Muligheter	6a	Mulighetsstudie Sentinel 1/2-data for deteksjon av sørpeskred og jordskred	Rapport		Q3	Q4
	6b	Mulighetsstudie endringsdeteksjon for konsesjonsbehandling, beredskap og tilsyn (nett, produksjonsanlegg, veier)	Rapport			Q3
	6c	Mulighetsstudie Rose-L, CIMR, LSTM (snø, skred, is, vannbalanse) og neste generasjon Sentinel-2	Rapport			Q4
	6d	Mulighetsstudie jordfuktighet med Sentinel-1	Notat		Q4 Q1	



NVE

Norges vassdrags- og energidirektorat

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