

Sluttrapport: (2025)

Kartlegging av palsmyr

Kartlegging og overvåking av palsmyr med fjernmåling



Field-rapport
18976-2025-01

Denne rapporten er kvalitetssikret i henhold til FIELDS kvalitetssystem og godkjent av: Floris Jan Groesz

Prosjektleder:
Floris Jan Groesz

Hovedforfatter(e):
Nils C. Prieur, Jaime Candelas Bielza

Underleverandør:
Sallir Natur AS

Prosjektnummer:
18976

Forsidebilde:
Nils C. Prieur, Field Geospatial AS

Adresse: Field Geospatial AS
Drammensveien 260,
0283 Oslo

© Field Geospatial.
Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse.

fieldgeo.com/no/

Tittel
Kartlegging og overvåking av palsmyr med fjernmåling

Forfatter(e)
Nils C. Prieur, Floris Jan Groesz, Martijn Vermeer, Luis Barreiro, Jaime Candelas Bielza, Bendik Sivertsen, Geir Arnesen

Prosjektet finansiert av
Miljødirektoratet

Utgitt av Field
Prosjektnr 18976
Avtalenr 24087244

Sidetall
48

Fagområde
Naturkartlegging

Kontaktperson hos oppdragsgiver
Hanna Nyborg Støstad
Johanna Sætherø Steen

Rapportnummer hos oppdragsgiver:
M-3070|2025

Dato
20.01.2026

Distribusjon
Åpen

Sammendrag: Dette prosjektet etablerer et nytt, fremtidsrettet rammeverk for overvåking av palsmyr i Norge, ved å erstatte tradisjonelle feltmetoder med en strategisk kombinasjon av fjernmåling og maskinlæring. Kjernen i rammeverket er en nyutviklet, to-steps kartleggingsmetodikk som utnytter moderne datateknikker. På et nasjonalt nivå er det brukt dyplæring til å produsere det første heldekkende kartet over nåværende (216 km²) og historiske (1106 km² med rester) palsmyrsystemer. På lokalt nivå er det utviklet en maskinlæringsmodell (Random Forest) som med høy nøyaktighet (75.8 % totalnøyaktighet) kan finkartlegge ulike arealtyper og dermed spore detaljerte endringer over tid. Prosjektet demonstrerer også hvordan disse teknikkene kan anvendes på historiske flybilder for å kvantifisere endringer over lengre tidsrom, og avdekket et dramatisk volumtap på 93 % i et case-område siden 1970-tallet. Disse verktøyene er sammenfattet i et forslag til et nytt, tretrinns overvåkingsdesign som kombinerer storskala, nasjonal kartlegging med en mer dynamisk og detaljert oppfølging av utvalgte områder. Ved å integrere maskinlæring med moderne og historiske fjernmålingsdata, representerer dette prosjektet et paradigmeskifte for overvåking av klimasensitive økosystemer, og gir en langt mer kostnadseffektiv og skalerbar tilnærming enn tidligere.

Emneord: palsmyr, pals, overvåkingsdesign, naturkartlegging, fjernmåling, maskin læring, kunstig intelligens.

Keywords: palsa mires, monitoring design, environmental mapping, remote sensing, machine learning, AI.

Innhold

Sammendrag	5
Summary	6
1. Introduksjon	7
1.1. Prosjektets målsetting	7
1.2. Aktiviteter og arbeidspakker	7
2. Grovkartlegging av palsmyrsystemer	7
2.1. Arbeidsområde	7
2.2. Data	8
2.3. Metoder	11
2.4. Modellering, ensemble av modeller og usikkerheten	11
2.5. Post-prosessering	18
2.6. Statistikk på grovkartleggingen	19
3. Finkartlegging	20
3.1. Data	20
3.2. Metoder	20
3.3. Modellering	22
3.4. Resultater	23
3.5. Post-prosessering	29
3.6. Statistikk på finkartleggingen	29
4. Utvikling av overvåkingsdesign	31
4.1. Overvåkingsprogrammet for palsmyr (2004–2024)	31
4.2. Forslag til nytt overvåkingsdesign (2026 og fremover)	31
4.3. Test av overvåkingsdesign	33
5. Opsjon 1 - Bruke historiske flybilder til å måle høydeendringer tilbake i tid	36
5.1. Introduksjon	36
5.2. Studieområder og tilgjengelige datasett	36
5.3. Metoder	37
5.4. Vurdering av datakvalitet	39
5.5. Kvantitativ endringsdeteksjon – eksempel	39
5.6. Diskusjon	40
5.7. Konklusjoner	43
6. Leveransen	44
7. Referanser	46

Sammendrag

På oppdrag fra Miljødirektoratet er det i dette prosjektet utviklet en ny metodikk for kartlegging og overvåking av den truede og klimasensitive naturtypen palsmyr, basert på fjernmåling og maskinlæring. En to-steps tilnærming ble benyttet. Først ble en nasjonal grovkartlegging gjennomført ved hjelp av en dyplæringsmodell (U-Net) for å identifisere den totale utbredelsen av myrsystemer som har eller har hatt palser. Denne kartleggingen identifiserte et samlet areal på 1322 km², fordelt på 216 km² med aktiv palsmyr og 1106 km² med palsrester. Det store arealet av rester indikerer at den historiske utbredelsen av palsmyr kan ha vært 3–5 ganger større enn i dag.

Videre ble det utviklet en Random Forest-modell for finkartlegging av fem arealtyper (pals, torvring, m.m.) innenfor 1000 av de største palsmyrsystemene. Finkartleggingsmodellen oppnådde en totalnøyaktighet på 75.8 % og viste seg spesielt treffsikker for klassen «Pals» (82 % F1-score), mens «Torvring» var den mest utfordrende klassen på grunn av lav presisjon (40 %). For å sette endringene i et lengre perspektiv, ble også historiske flybilder analysert. For et eksempelområde kvantifiserte denne analysen et dramatisk volumtap på hele 93 % mellom 1972 og 2020, noe som dokumenterer en betydelig nedsmelting over de siste 50 årene.

Basert på disse resultatene, kulminerer prosjektet i et forslag til et nytt, fremtidsrettet overvåkingsdesign i tre nivåer. Dette hybride designet kombinerer en bred, nasjonal kartlegging hvert 5.–10. år (Nivå 1), med en hyppigere og mer dynamisk overvåking av 10–15 utvalgte indeks-lokaliteter (Nivå 2), supplert med målrettet feltarbeid og dronekartlegging ved behov (Nivå 3). Samlet sett legger prosjektet et solid og kostnadseffektivt fundament for fremtidig forvaltning og overvåking av palsmyr i Norge.

Summary

Commissioned by the Norwegian Environment Agency, this project has developed a new methodology for mapping and monitoring palsa mires—a threatened ecosystem sensitive to climate change—using remote sensing and machine learning. A two-stage approach was employed. First, a national-scale coarse mapping was conducted using a deep learning (U-Net) model to identify the total extent of mire systems that currently contain or previously contained palsas. This mapping identified a total area of 1322 km², comprising 216 km² of active palsa mire and 1106 km² of palsa remnants. The large area of remnants indicates that the historical distribution of palsa mires may have been 3–5 times larger than it is today.

Second, a Random Forest classifier was developed for the fine-scale mapping of five surface types (palsa, peat ring, etc.) within 1000 of the largest palsa mire systems. The fine-scale model achieved an overall accuracy of 75.8%, proving most effective for the "Palsa" class (82% F1-score), while the "Peat ring" class was the most challenging due to low precision (40%). To place these changes in a long-term perspective, historical aerial imagery was also analyzed. For one case study site, this analysis quantified a dramatic 93% loss in palsa volume between 1972 and 2020, documenting significant permafrost thaw over the last 50 years.

Based on these results, the project culminates in a proposal for a new, future-oriented, three-tiered monitoring design. This hybrid framework combines broad, national-scale mapping every 5–10 years (Level 1) with more frequent, dynamic monitoring of 10–15 selected index sites (Level 2), supplemented by targeted fieldwork and drone surveys as needed (Level 3). Overall, this project establishes a robust and cost-effective foundation for the future management and monitoring of palsa mires in Norway.

1. Introduksjon

1.1. Prosjektets målsetting

Hovedformålet med overvåkingen er å dokumentere tilstand og endringer i palsmyr som følge av klimaendringer. Programmet skal kartlegge utbredelsen av palsmyrsystemer i Norge, vurdere lokalitetenes status, samt utarbeide detaljert statistikk for overflateklasser og høydeendringer. Videre skal overvåkingen estimere det totale palsarealet nasjonalt og kvantifisere endringer over tid. Resultatene skal danne datagrunnlag for indikatoren “Areal av palsmyr” i Naturindeksen, samt bidra med kunnskap til forvaltning og forskning nasjonalt og internasjonalt.

1.2. Aktiviteter og arbeidspakker

Prosjektet omfatter følgende aktiviteter:

1. Kartlegging av palssystemer
 - Grovkartlegging av palsmyrsystemer på nasjonalt nivå
 - Detaljert kartlegging av areal typer i palsmyrsystemer
2. Utvikling av overvåkingsdesign
3. Rapportering
4. Opsjon 1 - Analyse av historiske høydeendringer ved bruk av historiske flybilder (i separat dokument)

Prosjektet har en varighet på to år (2024—2025).

2. Grovkartlegging av palsmyrsystemer

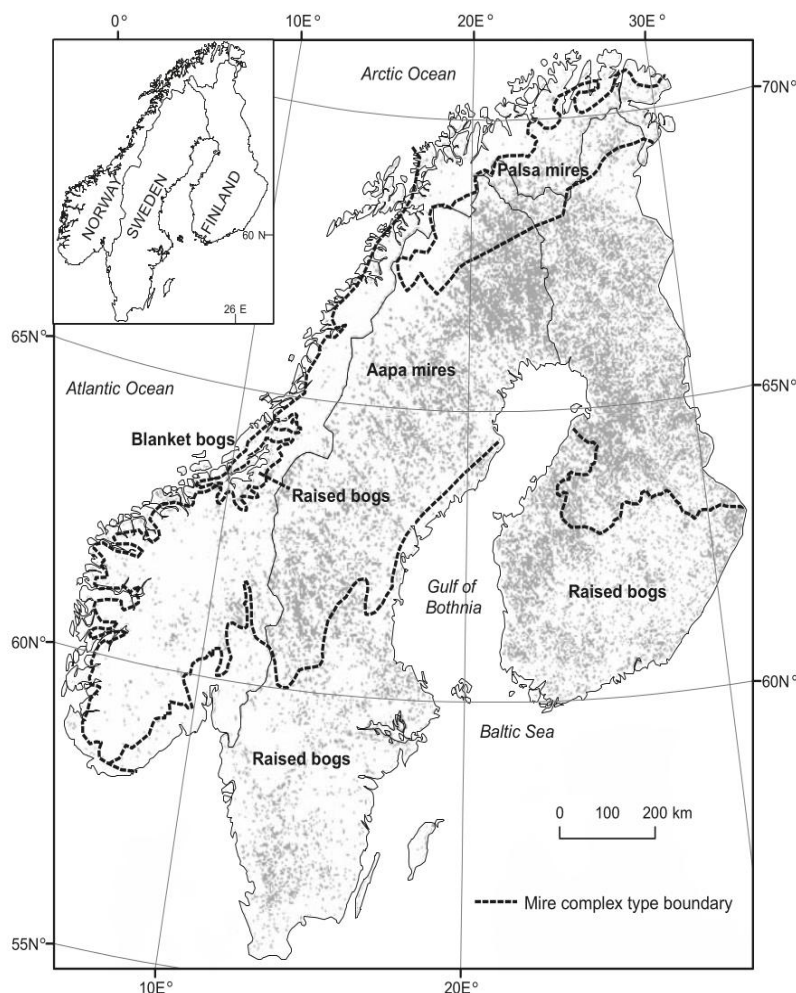
Hensikten med grovkartleggingen er å lage et nasjonalt kart for totalutbredelsen av myrsystemer som har eller har hatt palser. Kartleggingen vil kreve produksjon av referansedata som inkluderer typiske strukturer som er assosiert med palssystemer. Dette vil typisk være de karakteristiske torvringene som står igjen etter at en pals har kollapset, selve palsene eller palsplataene, jordvannsmyr og termokarstinnsjøer med torvringer rundt. I tillegg vil det genereres ikke-pals referansedata med strukturer som kan ligne de som forekommer i palssystemer. Dette kan være andre typer vegetasjon på myrer eller strenger som dannes på høymyrer eller bakkemyrer som kan forveksles med torvringer i et palssystem. Dette er viktig for å lære opp modellen å skille mellom palsmyr og andre typer myr.

Tidslinje i utviklingen av grovkartleggingen:

- Data innsamling fra 2D flybilder, med større fokus på Finnmark, Indre Troms og Finland (vår, sommer og høst 2024)
- Test av bildeklassifisering av palssystemer i Finnmark (høst 2024)
- Test av bildesegmentering av palssystemer i Finnmark (høst/vinter 2024)
- Grovkartlegging av palsmyrsystemer i Finnmark (vinter 2024)
- Data innsamling fra flybilder, med større fokus i sørliggende områder (vår 2025)
- Modellutvikling/forbedring av dyplæringsmodeller (vår 2025)
- Flere runder av aktiv læring (vår/sommer 2025), modellering + sjekk av resultater med ny datainnsamling for å forbedre resultater
- Heldekkende kart av palsmyrsystemer i Norge (sommer/høst 2025)
- Finjustering basert på tilbakemeldingen fra Miljødirektoratet (høst 2025)
- Levering av heldekkende kart av palsmyrsystemer i Norge (desember 2025)

2.1. Arbeidsområde

Den nordligste delen av Fennoskandia ligger i en sone med sporadisk permafrost (Gisnås mfl. 2017, Obu mfl., 2018). Mesteparten av denne permafrosten forekommer i palsformasjoner, som er forhøyninger i myrområder (Borge mfl. 2017). Disse palsene har en kjerne av permafrost, utviklet enten i torv eller mineralisk jord, og er dekket av et overflatelag med torv. De fleste kjente palsmyrene i Norge finnes i indre deler av Finnmark fylke eller i de tilstøtende områdene av Troms fylke (Seppälä 1986, Sollid & Kvillan 1991, Sollid & Sørbel 1994, **Figur 1**).



Figur 1 Generelt kart som viser utbredelsen av torvmarker med en tykkelse på mer enn 1 m (skraverte områder) og de viktigste myrkomplekstypene i Fennoskandia (basert på Pajunen 2005) og hentet fra Parviainen & Luoto (2007).

2.2. Data

Fjernmålingsdata

Flere datakilder er tilgjengelige i dette prosjektet. To hovedfjernmålingsdatakilder er brukt: en 1-m omløp RGB-mosaikk og en 1-m digital terrengmodell (DTM) som dekker hele Norge. Omløpsfotograferingen gir oppdaterte flybilder og ortofoto for hele landet. Ortofotene (data kan nedlastes via [Norge i Bilder](#)) er samlet over flere omløpsprosjekter utført av Field (og andre firmaer), er i hovedsak samlet inn i løpet av de siste fem årene, mens terrengmodellen fra Kartverket/høydedata.no ([Kartverkets nasjonale høydedatabase](#)) kan bestå av enda eldre laser- eller bildematchingsdata. Et sentralt forbehold ved disse datasettene er at de er satt sammen av data fra en rekke ulike prosjekter med varierende opptaksår. Dette skaper en tidsmessig usynkronisitet, der et ortofoto fra 2024 kan være kombinert med en DTM fra 2019. Denne uoverensstemmelsen i tid er en begrensning for både grov- og finkartleggingen, da en ideell analyse forutsetter at begge datakilder er så samtidige som mulig for å nøyaktig reflektere dagens landskap. For å sikre transparens for sluttbrukeren, er derfor opptaksåret for både ortofoto og DTM inkludert som egne informasjonslag (bånd) i de endelige kart- og vektorproduktene, slik at brukeren alltid er kjent med alderen på grunnlagsdataene.

Referansedata

Innsamling av referansedata av høy kvalitet har vært en sentral del av prosjektet, da dette danner grunnlaget for modellenes pålitelighet. Referansedataene i denne studien er generert gjennom manuell digitalisering av fjernmålingsdata (flybilder og terrengmodeller), og er ikke basert på direkte feltmålinger. For å sikre at treningsdataene er korrekte og entydige, er arbeidet utført i tett samarbeid med fagekspertisen i Sállir Natur.

Innledende tester ble gjennomført for å sammenligne ytelsen til en modell med to klasser (palsmyr / ikke-palsmyr) mot en modell med fire klasser. Resultatene viste at en 2-klases modell ga utilfredsstillende resultater, primært fordi klassen «ikke-palsmyr» ble for heterogen. Dette førte til at myrområder med lignende morfologi som palsmyr ofte ble feilklassifisert. En modell basert på fire klasser ga betydelig bedre nøyaktighet, særlig ved å redusere antall falske positive, samtidig som den muliggjør en bedre differensiering mellom ulike stadier i palsens nedbrytning.

Alle resultatene som presenteres i denne rapporten er derfor basert på denne 4-klasses tilnærmingen. For at en dyp læringsmodell skal lære seg å avgrense klasser presist, er det viktig at treningsdataene inneholder bildeutsnitt med overganger mellom klassene. Ruter på 1024x1024 piksler (tilsvarende 1024x1024 m) ble brukt for å sikre at slike overganger kom med. Referansedataene ble samlet inn i fire klasser: **aktiv palsmyr**, **palsrester**, **myr (andre enn palsmyr)** og **bakgrunn**. Klassene «aktiv palsmyr» og «palsrester» dekker til sammen hele palsmyrsystemet, som også inkluderer elementer som vil bli kartlagt i finkartleggingen (pals, torvringer, fastmatter, mykmatter og termokarstinnsjøer). Et eksempel på referansedata er vist i Figur 2.

Prosjektmedarbeidere fra Field og Sallir Natur kartla referanseområder i Finnmark og Nord-Finland. Spesiell oppmerksomhet ble viet til å dekke variasjon i morfologi og utviklingsstadier i palsens syklus. Dette ble gjort ved å velge palsmyrer både nær og fjernt fra kysten, og ved å spre innsamlingen geografisk. Senere i prosjektet ble det samlet inn data fra andre deler av Norge, som Nordland og kjente palsmyrlokaliteter på Dovrefjell. For å redusere risikoen for forveksling mellom palsmyrer og andre myrtyper, ble sistnevnte definert som en egen klasse. Sallir Natur gjennomgikk alle palsmyrdata i hver iterasjon for å kvalitetssikre at de representerte reell palsmyr og for å unngå sammenblanding med andre myrtyper.

Denne iterative prosessen reflekterer vår stegvise forbedring av dyp læringsmodellene. Vi benyttet en aktiv læringstilnærming der nye versjoner av referansedata ble brukt til å trene nye modeller. Etter hver treningsrunde ble modellen brukt til å predikere palsmyrsystemer over store områder. En nøye gjennomgang av prediksjonene og innsamling av falske positiver (feilklassifiserte områder) ble deretter inkludert i en nyere versjon av referansedataene. Denne prosessen ble gjentatt gjennom hele prosjektet og har kulminert i over 30 versjoner av referansedatasettet (Figur 3).

Tilleggsdata

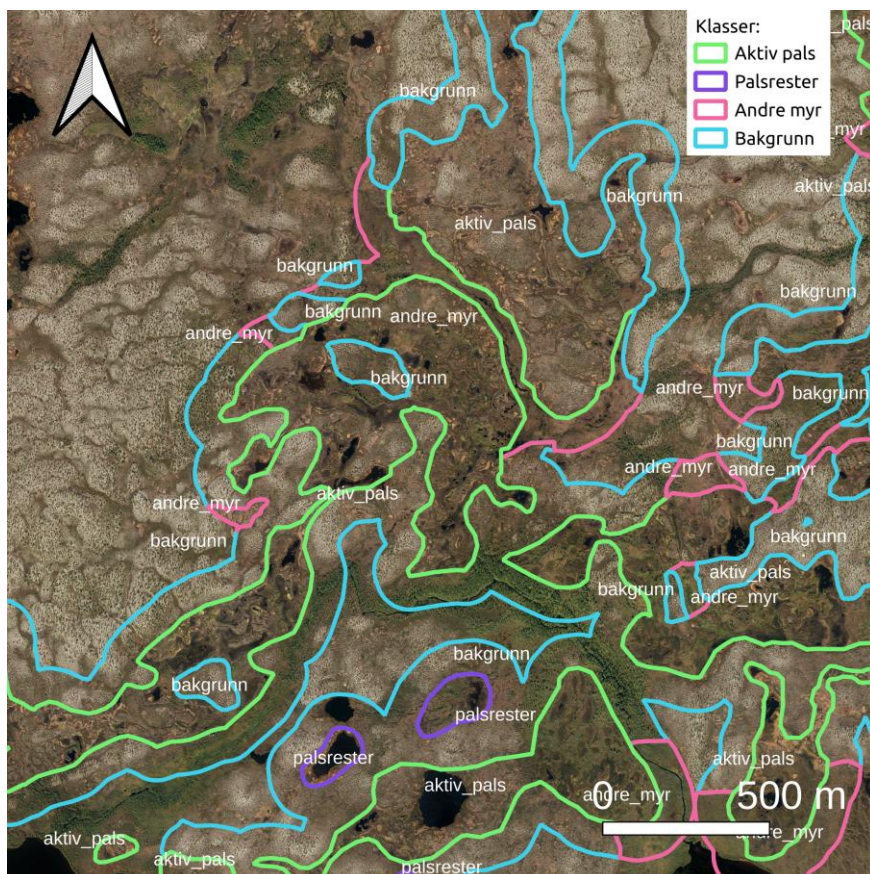
DN13: Datasettet viser naturtypelokaliteter på land og i ferskvann, kartlagt etter DN-håndbok 13. Hver naturtype er beskrevet i DN-håndbok 13. Palsmyr er en av naturtypene beskrevet i datasettet. Alle palsmyr polygoner ble selektert fra datasettet (53 polygoner). I tillegg ble det selektert 116 polygoner med nedbørsmyr. Nedbørsmyr kan forveksles med palsmyr og derfor er det interessant å se om noen av disse områder blir feilaktig klassifisert. DN13 flatene ble kun brukt i test-datasettet, ikke i treningsdatasettet.

Forekomst av pals i Finnmark, Borge mfl. (2017): Borge og medforfattere har systematisk kartlagt forekomsten av palsmyrer i Finnmark ved manuell tolkning av flybilder fra 2005 til 2014 med en romlig oppløsning på 250 meter. Forfatterne ga Field tilgang til de rutede dataene som ble generert i studien. Datasettet ble også brukt for å evaluere modellresultatene.

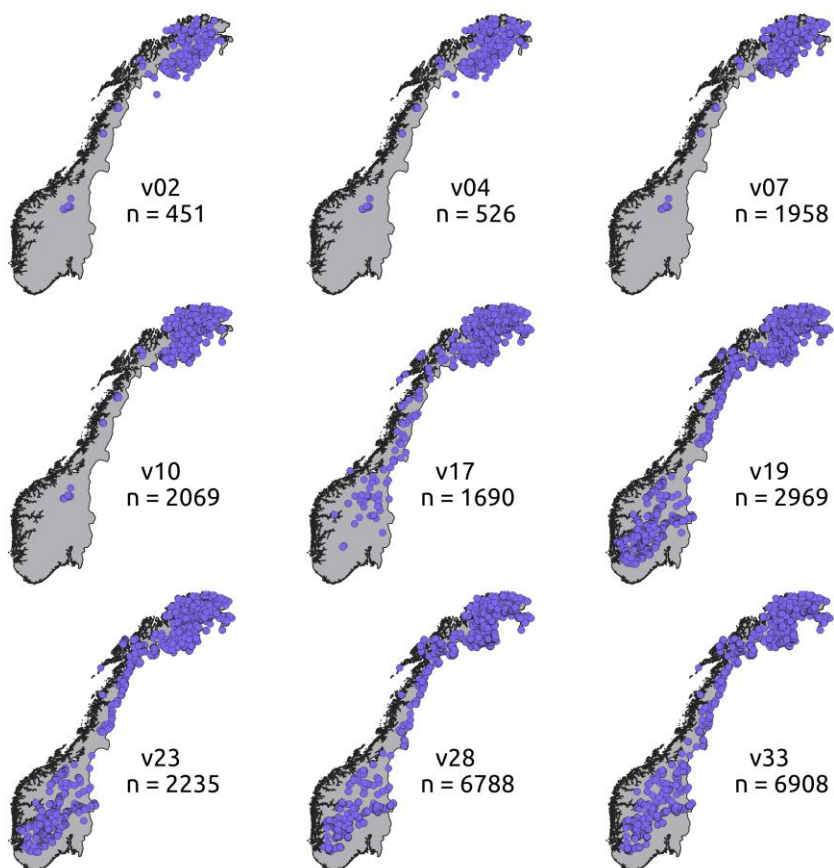
Inndeling av referansedata i trenings, validerings- og testdatasett

I en dyp læringsprosess er det avgjørende å skille mellom trenings-, validerings- og testdatasett. Valideringsdatasett brukes underveis i modelltreningen for å justere hyperparametere og evaluere ytelsen på data modellen ikke har sett før, noe som bidrar til å hindre overtilpasning. Testdatasett, derimot, brukes kun én gang helt til slutt for å evaluere den endelige modellens ytelse på helt nye, usette data. Det er kritisk å holde testdatasett adskilt for å sikre at evalueringen gir et realistisk bilde av modellens evne til å generalisere. Av det totale innsamlede datamaterialet ble 85 % brukt til trening, 10 % til validering og 5 % til testing.

For å forhindre såkalt «datalekkasje» ble det tatt spesielle forhåndsregler. Referansedata som lå geografisk nærmere hverandre enn 1024 meter ble først gruppert. Denne grupperingen sikrer at svært like og overlappende områder ikke havner i forskjellige sett (f.eks. både i trenings- og testsettet). Splitten på 85/10/5 ble deretter anvendt på disse gruppene, ikke på individuelle polygoner. Denne metoden garanterer en streng geografisk separasjon mellom trenings-, validerings- og testdata, og gir en mer robust og pålitelig evaluering av modellen.



Figur 2. Eksempel av innsamlede referansedata fra Indre Finnmark (24.538°E, 68.873°N). For å fange opp overganger mellom klassene, er også 'andre myr' og 'bakgrunn' kartlagt som en buffer rundt polygoner med 'aktiv pals' og 'palsrester'.



Figur 3. Geografisk utbredelse og vekst av referansedata for grovkartleggingen. Innsamlingen pågikk over cirka ett år og viser hvordan datasettet (n=antall polygoner) økte i omfang med nye versjoner (v).

2.3. Metoder

I prosjektet ble to hovedmetoder testet: bildeklassifisering og bildesegmentering. En grundig beskrivelse av begge metodene og forskjellene mellom dem ble gitt i statusrapporten fra desember 2024 (Groesz mfl. 2024b), og gjentas derfor ikke her. Hovedfokus har vært på bildesegmentering, da denne metoden gir mer presise omriss av palsmyrene. Kun disse resultatene blir presentert i denne sluttrapporten.

Bildesegmentering med dyp læring

Bildesegmentering med dyp læring er en teknikk der en modell lærer å klassifisere hver enkelt piksel i et bilde. Målet er å produsere et klassifisert kart der hver piksel er tildelt en av de forhåndsdefinerte klassene (i vårt tilfelle: aktiv palsmyr, palsrester, myr og bakgrunn). Kjernen i slike modeller er ofte et konvolusjonelt nevral nettverk (CNN). Disse nettverkene er spesielt effektive for bildeanalyse fordi de automatisk lærer å gjenkjenne hierarkiske mønstre – som kanter, former og teksturer – direkte fra bilde-dataene. CNN-er har revolusjonert mange fagfelt, inkludert medisinsk bildeanalyse, autonome kjøretøy og fjernmåling (f.eks. LeCun mfl., 1998; Krizhevsky mfl., 2012).

Treningen foregår ved at modellen mates med et stort antall eksempler. Hvert eksempel består av et bildeutsnitt (input, ortobilde og terrengmodell) og et tilhørende fasitkart (label), der sistnevnte er de manuelt tegnede referansedataene. Fordi fjernmålingsdataene for hele Norge er for store til å behandles samtidig, deles de opp i mindre, håndterbare bildeutsnitt (f.eks. 1024x1024 piksler) som mates inn i modellen sekvensielt. For hvert bildeutsnitt genererer modellen en prediksjon. En 'tapsfunksjon' (loss function) sammenligner deretter modellens prediksjon med fasiten og beregner avviket. Basert på dette avviket justeres modellens interne parametere, eller 'vekker', gradvis for å gjøre prediksjonen mer lik fasiten. Denne prosessen gjentas tusenvis av ganger, slik at modellen stegvis blir bedre til å gjenkjenne de ulike klassene.

I dette prosjektet ble det i hovedsak benyttet en U-Net-arkitektur (Ronneberger mfl., 2015), som er anerkjent for sin effektivitet i bildesegmentering. Arkitekturen (som U-Net) definerer den overordnede strukturen for hvordan data flyter gjennom nettverket. Denne arkitekturen bruker en 'ryggrad' (backbone) – typisk et forhåndstrengt klassifiseringsnettverk som ResNet – som fungerer som en effektiv egenskapsuttrekker i den første delen av modellen. For å finne den optimale modellen for vår spesifikke oppgave, ble det utført en rekke eksperimenter. Disse inkluderte testing av ulike ryggrader (backbones) og pre-trente modeller (e.g., ImageNet, avdprop), forskjellige tapsfunksjoner som vektor feil ulikt, og variasjoner i størrelsen på bildeutsnittene for både trening og prediksjon. Underveis i treningen ble valideringssettet brukt til å objektivt måle modellens ytelse på data den ikke var trent på, noe som er avgjørende for å unngå overtilpasning.

2.4. Modellering, ensemble av modeller og usikkerheten

Data-sentrisk tilnærming og risiko for overtilpasning

I dette prosjektet ble det valgt en data-sentrisk fremfor en modell-sentrisk tilnærming. Dette innebærer at hovedfokus var på å systematisk forbedre kvaliteten på treningsdataene, fremfor å primært justere og eksperimentere med selve modellarkitekturen. Dyplæringsmodeller krever oftest svært store mengder data for å oppnå gode resultater. Selv med over 6000 referansepolygoner, er datasettet relativt lite i en dyplæringskontekst. Dette medfører en betydelig risiko for overtilpasning, en tilstand der modellen lærer seg treningsdataene «utenat» i stedet for å generalisere, og dermed presterer dårlig på nye, usette data. For å redusere denne risikoen, ble det lagt mer vekt på å forbedre kvaliteten på treningsdataene (seksjon 3.2.2) enn på en uttømmende jakt etter optimale hyperparametere. Som en direkte strategi for å begrense overtilpasning, ble det benyttet «lette» versjoner av anerkjente ryggrader som ResNet18 og EfficientNet-b0/b1.

Modelltesting og håndtering av klasseubalanse

Selv om tilnærmingen var data-sentrisk, ble det utført en rekke eksperimenter for å finne en robust modell. Dette inkluderte testing av ulike ryggrader, variasjoner i størrelsen på bildeutsnitt for trening (512x512 og 1024x1024 piksler) og prediksjon (opptil 4096x4096 piksler), samt effekten av batch-normalisering. Klassene i datasettet er svært ubalanserte (mye mer bakgrunn enn palsmyr). For å sikre at de viktige, men sjeldne klassene ble lært opp korrekt, ble det brukt vektning i tapsfunksjonen med vektor på 15, 8, 4 og 1 for henholdsvis aktiv palsmyr, palsrester, myr og bakgrunn.

Ensemble av modeller for robuste prediksjoner

Analysene viste at ingen enkeltmodell var perfekt. Hver modell hadde ulike styrker og svakheter (Figur 4), med varierende mønstre av feilklassifiseringer (f.eks. falske positive i Sør-Norge, langs elver, eller i fjellområder med lignende morfologi, se Figur 5). Siden forskjellene var relativt små, men utfyllende, ble det besluttet å kombinere syv av de beste modellene (se Tabell 1) i et «ensemble». Denne metoden baserer seg på en flertallsavstemning for hver

piksel, der den mest predikerte klassen blant de syv modellene blir valgt. For å øke påliteligheten ble det satt en terskel: kun piksler der minst fire av syv modeller var enige, ble beholdt. For det endelige nasjonalt grovkartleggingsproduktet ble kun klassene **aktiv palsmyr** og **palsrester** inkludert (Figur 6).

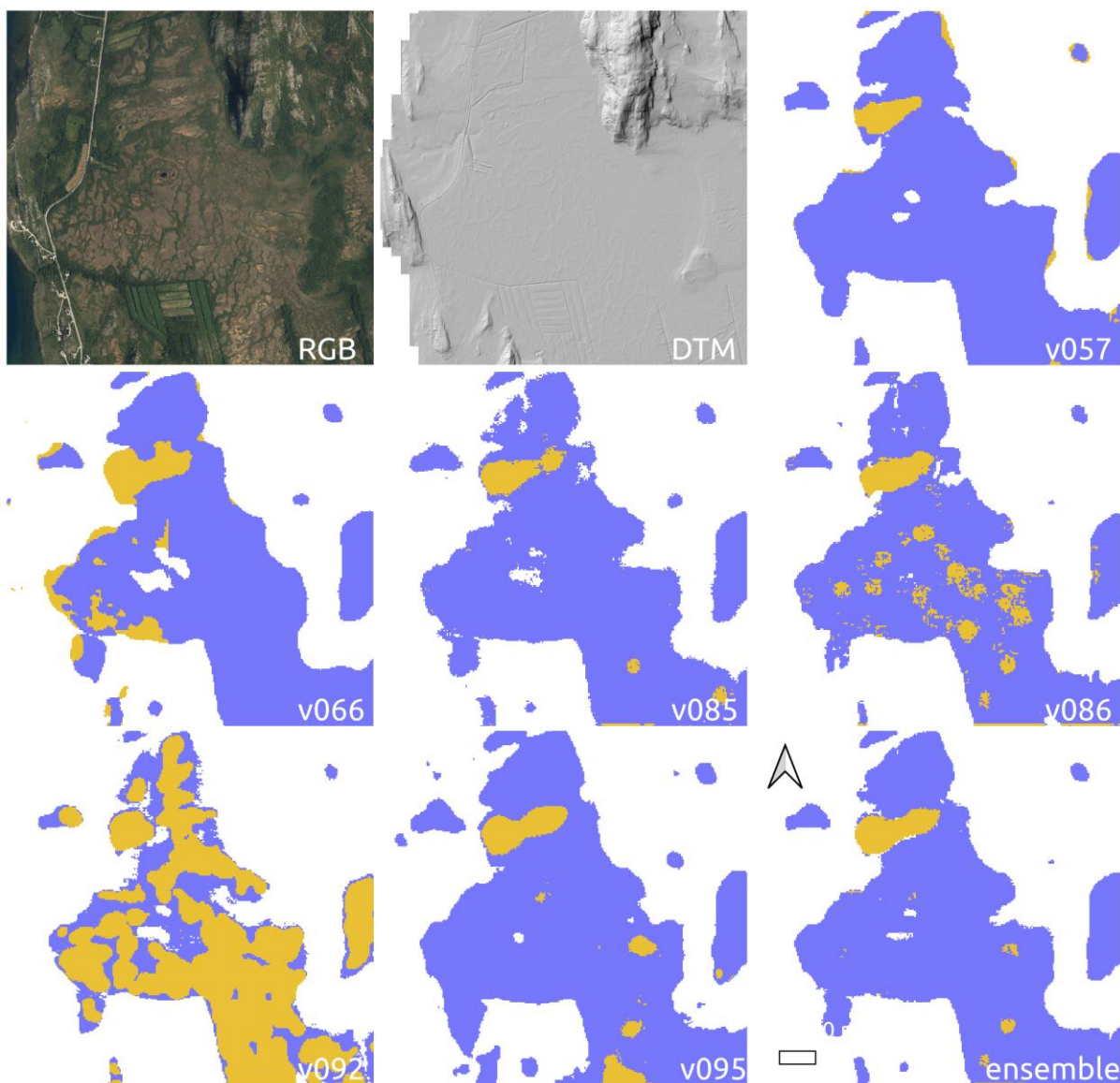
Usikkerhetsvurdering basert på modell-enighet

I stedet for å bruke en enkel modells ofte upålitelige konfidensscore, ble usikkerheten i prediksjonene kvantifisert basert på enigheten innad i ensemblet. En slik tilnærming gir et mer robust og tolkningsbart mål på usikkerhet. En enkelt modells konfidens kan være overoptimistisk, spesielt for piksler som er ulike treningsdataene. Ved å bruke konsensus på tvers av flere uavhengige modeller, fanger man en mer reell usikkerhet. Vi definerte en skala for å representere dette:

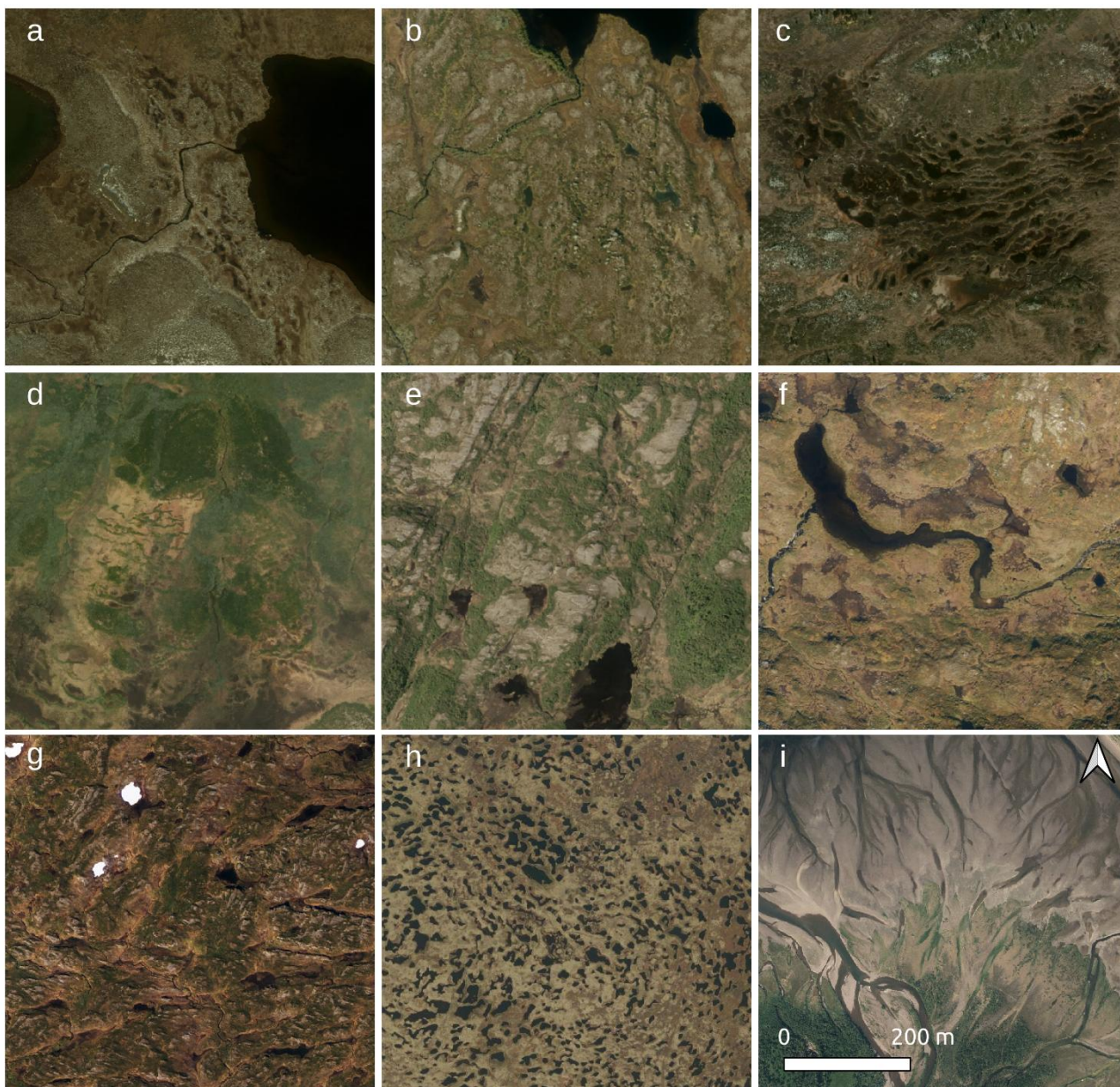
- **4 av 7 enige:** Rimelig sikkerhet
- **5 av 7 enige:** God sikkerhet
- **6 av 7 enige:** Veldig god sikkerhet
- **7 av 7 enige:** Komplett enighet

Tabell 1. Oversikt over hyperparameter-variasjoner for de syv modellene som inngår i ensemblet.

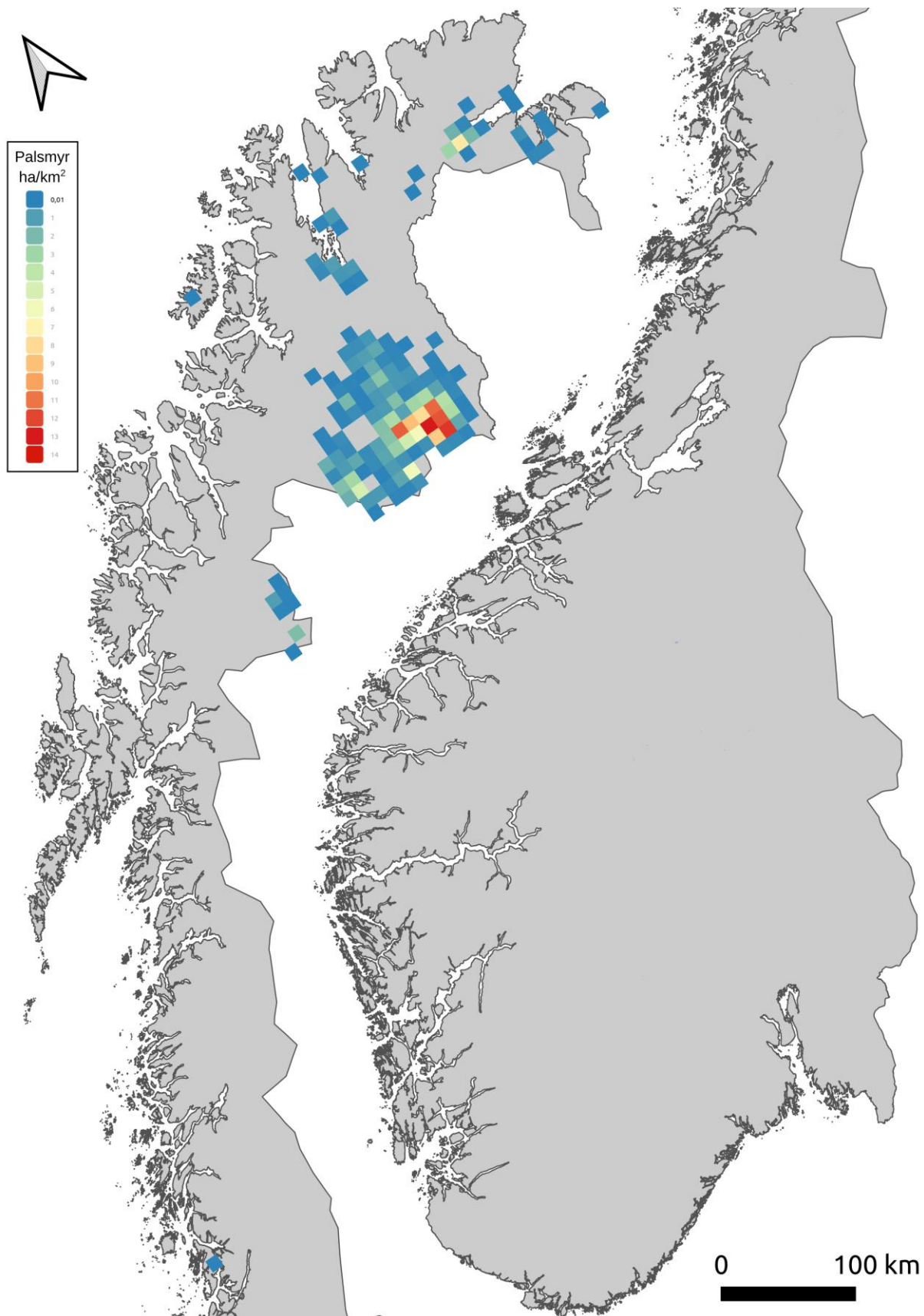
Modelname	Specification
pred_v57e31	UNet, backbone: EfficientNet-b1, encoder_weights: imagenet, decoder_channels : [256, 128, 64, 32, 16], class_weights: [3, 3, 3, 1], sample_weights: [15, 8, 4, 1], windows_size: [512, 512], batch_norm: True, batch_size: 16
pred_v61e50	Seed: 0 -> 101, batch_size: 16 -> 8
pred_v66e48	Seed: 101 -> 102, batch_size: 8 -> 16
pred_v85e42	Seed: 102 -> 0, Backbone: EfficientNet-b1 -> EfficientNet-b0, batch_norm: True -> False
pred_v86e59	decoder_channels : [256, 128, 64, 32, 16] --> [128, 96, 64, 32, 16]
pred_v92e24	Same as v86 but with larger predict window size: 2048 -> 4096
pred_v95e29	encoder_weights: imagenet -> advprop



Figur 4. Sammenligning av prediksjoner fra enkeltmodeller og den endelige ensemble-modellen for en palslokalitet. Figuren viser inngangsdata (RGB-ortofoto og terrengmodell), prediksjonene fra syv individuelle modeller (f.eks. v057, v086), og den sammenslåtte ensemble-prediksjonen nederst til høyre.



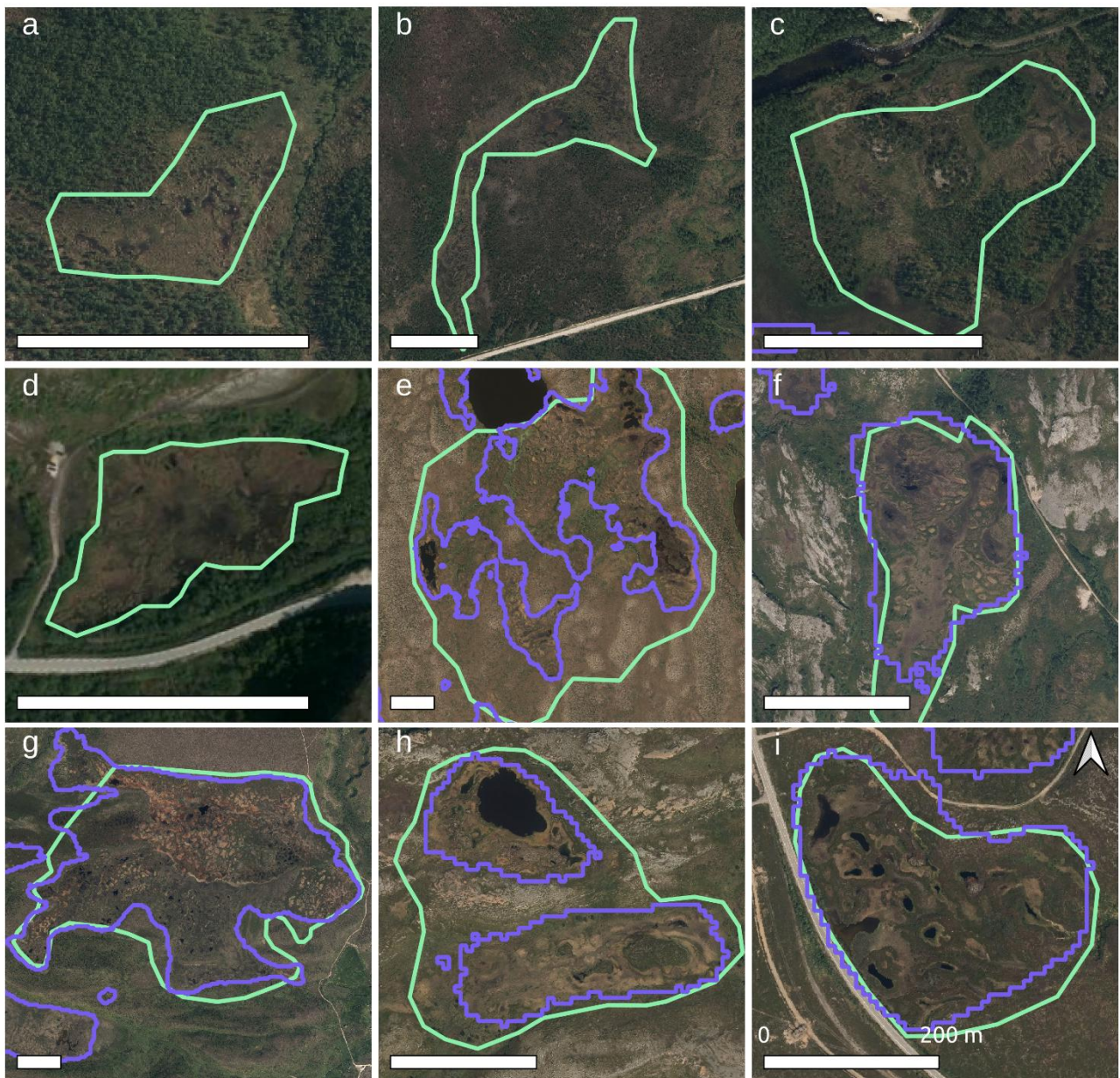
Figur 5. Eksempler på falske positiver i enkeltmodellenes prediksjoner. Områdene har ofte terrengformer som ligner på palsmyr, noe som fører til feilsegmentering i enkeltkjøringer.



Figur 6. Tetthetskart over palsmyr (hektar per km²) i et 10x10 km rutenett over Norge. Områder med en tetthet under 0.01 ha/km² er ekskludert fra figuren.

Sammenligning mellom DN13 og modellresultatene (ensemble).

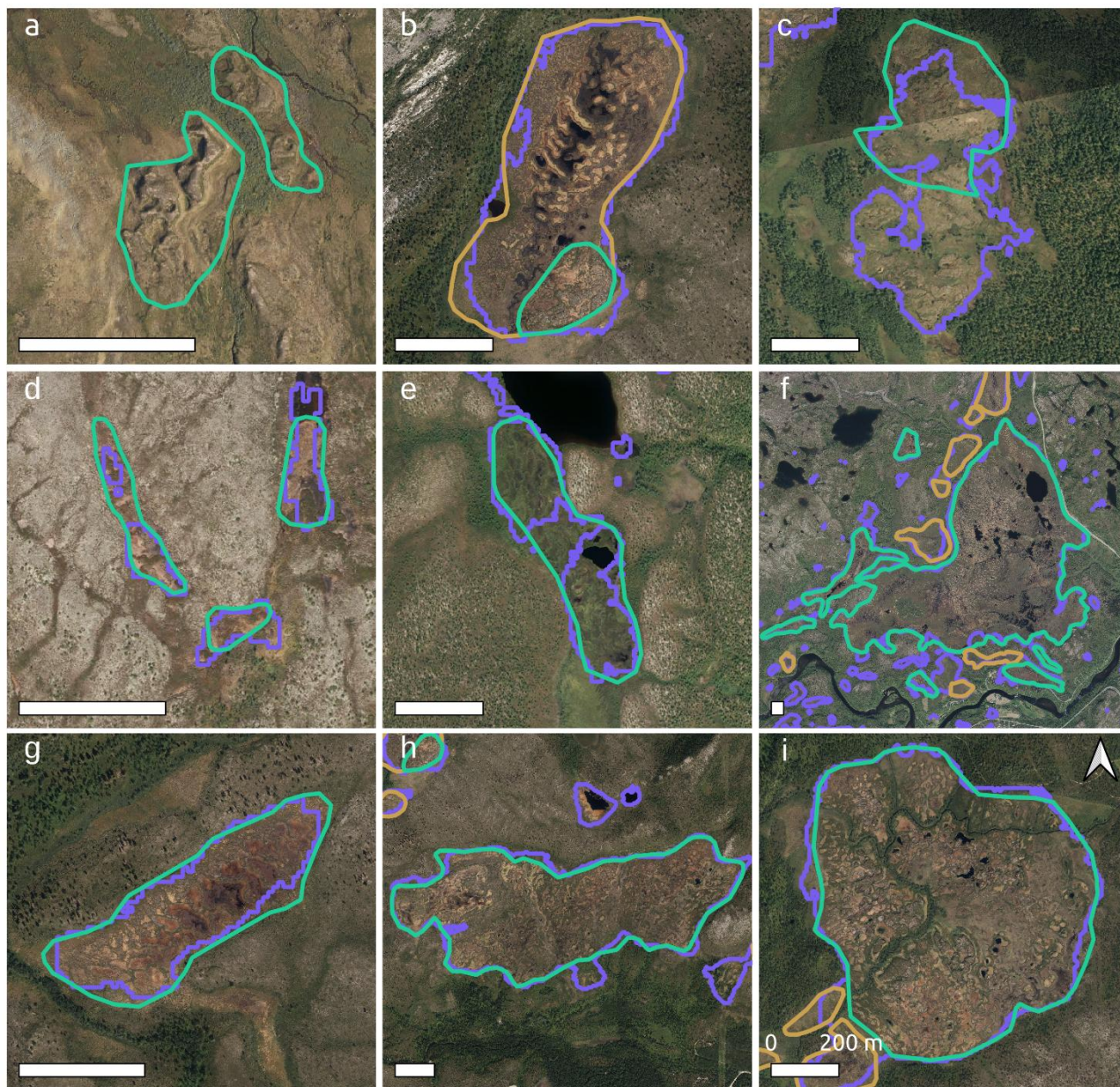
For å ytterligere teste resultatene fra modellen, benyttet vi oss av DN13-datasettet, som ble samlet inn uavhengig av dette prosjektet. Ni av de 53 digitaliserte avgrensningene er vist i Figur 7 (i lys grønn/turkis) sammen med prediksjonene fra den andre runden med referansedata (i lilla). Av de 53 palsmyrområdene digitalisert i DN13-datasettet, blir 49 detektert. Tre av de 4 siste polygonene viser tineområder i palsmyrsystemer (a,b, og d), og det kan derfor stilles spørsmål ved om disse burde detekteres eller ikke. Ett polygon (c) blir ikke segmentert, men burde ha blitt. Modellens "recall" er dermed mellom 92 og 98 %, avhengig av om de tre tineområdene inkluderes eller ikke. Modellens "precision" (nøyaktighet) er på 100%. "Recall" (gjenfinning) måler hvor stor andel av de faktiske forekomstene modellen finner, mens "precision" (presisjon) angir hvor stor andel av modellens prediksjoner som faktisk er korrekte. I alle tilfeller er avgrensningene fra modellen langt mer presise enn de digitaliserte grensene for palsmyr i DN13.



Figur 7. Sammenligning av ensemble-prediksjonen (lilla) med manuelt kartlagte polygoner fra DN13-datasettet (turkis) for ni lokaliteter i Finnmark. For lokalitetene a-d detekterte ikke modellen palsmyr, mens for e-i er det godt samsvar.

Sammenligning mellom test datasettet og modellresultatene (ensemble).

Den endelige ensemble-modellen ble evaluert mot det uavhengige testdatasettet, som utgjorde 5% av de totale referansedataene. I denne evalueringen ble kun de 60 polygonene som tilhørte klassene «aktiv palsmyr» (20) og «palsrester» (40) benyttet. Resultatene viste en svært høy gjenfinningsgrad (recall). Modellen detekterte alle unntatt ett polygon for hver av de to klassene, noe som gir en samlet gjenfinning på 97 %. Modellens nøyaktighet (precision) er på 100%. En visuell sammenligning av prediksjonene og testdataene bekrefter den høye ytelsen. Som vist i figuren, er modellens avgrensninger (lilla) ikke bare i godt samsvar med test-polygonene (turkis og oransje/gul), men de er også ofte mer detaljerte og nøyaktige enn de manuelt tegnede omrissene. Dette indikerer at modellen har generalisert godt og er i stand til å produsere presise kart over palsmyrsystemer.

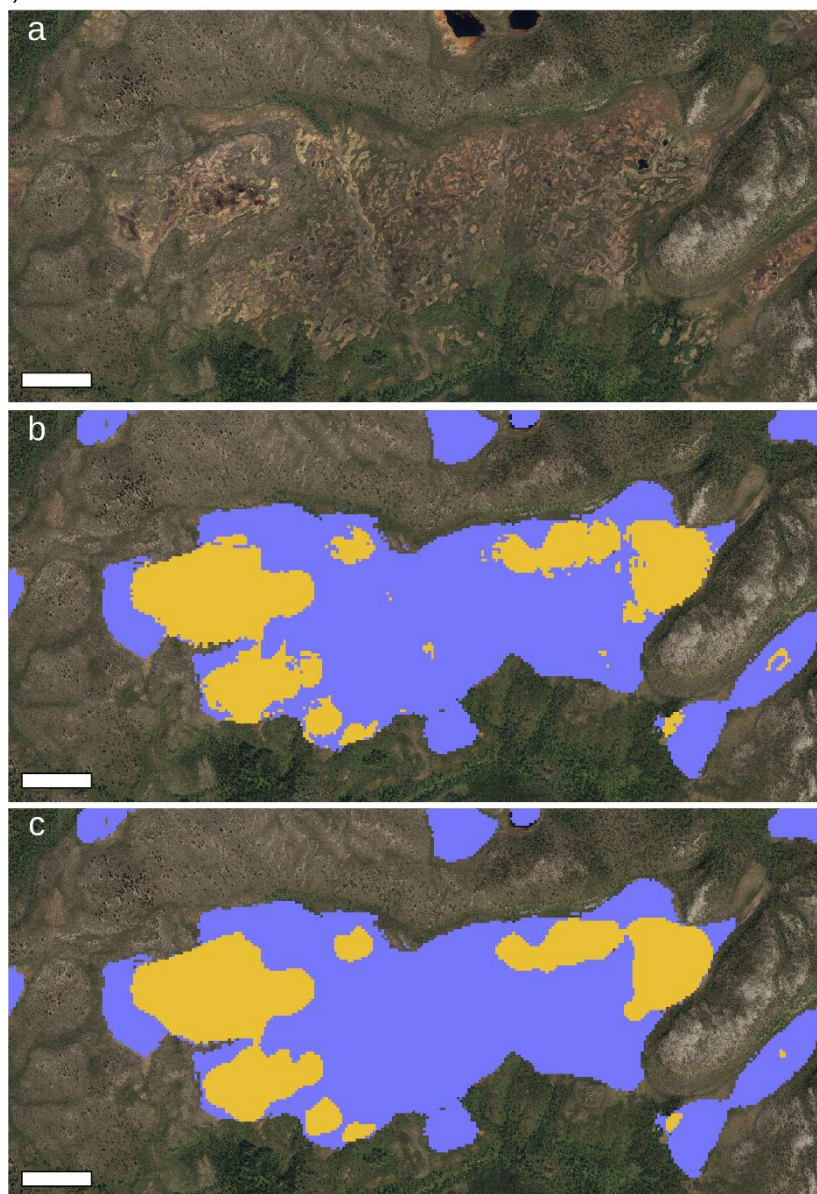


Figur 8. Sammenligning av ensemble-prediksjonen (lilla) med det manuelt kartlagte testsettet for ni lokaliteter. Testsettet viser 'aktiv palsmyr' i turkis og 'palsrester' i oransje/gul. For lokaliteten vist i panel a, ble ikke palsmyren segmentert av modellen.

2.5. Post-prosessering

Det ble vurdert å bruke et eksisterende permafrostkart (Obu mfl., 2019) for å geografisk avgrense modellens prediksjoner. Kartet representerer den maksimale permafrostutbredelsen i perioden 2000–2016. Bruk av en slik maske ville imidlertid medført en risiko for å ekskludere reelle palsmyrer nær kysten i Nord-Finnmark og Varanger, hvor temperaturen i dag kan være høyere enn i perioden kartet ble laget for. Ettersom modellen i seg selv var robust og i liten grad predikerte palsmyr lenger sør, ble det konkludert med at en slik ekstern avgrensning ikke var nødvendig.

Som et siste trinn ble det brukt et filter for å jevne ut det endelige prediksjonskartet. Et majoritetsfilter på 5x5 piksler ble anvendt, som tildeler hver piksel verdien til den mest dominante klassen i sitt nabolag. Denne prosessen fjerner effektivt «salt og pepper»-støy (enkeltstående, feilklassifiserte piksler). Selv om slik støy er betydelig redusert i ensemble-modellen sammenlignet med enkeltmodellene (Figur 4), sikrer dette filteret et mer homogent og visuelt helhetlig resultat (Figur 9).



Figur 9. Effekt av post-prosessering på ensemble-prediksjonen for en palsmyrlokalitet (70.189°N, 24.851°Ø). Panelene viser (a) RGB-ortofoto, (b) den opprinnelige ensemble-prediksjonen, og (c) den utjevnete prediksjonen etter bruk av et 5x5 majoritetsfilter.

2.6. Statistikk på grovkartleggingen

Den nasjonale grovkartleggingen identifiserte et totalt areal på 1322 km² i Norge. Dette arealet er fordelt på 216 km² segmentert som «aktiv palsmyr» og 1106 km² som «palsrester». Arealet for «aktiv palsmyr» fordeler seg på 5622 enkeltlokaliteter større enn 1000 m².

Det er viktig å understreke at disse arealtallene, spesielt for «palsrester», sannsynligvis er noe overestimert. Dette skyldes at andre myrtyper med lignende morfologi, som for eksempel strengmyr, kan ha blitt feilklassifisert. En grov vurdering tilsier en mulig overestimering på 10–15 %. Selv med en slik justering, representerer arealet med palsrester et betydelig omfang. Dersom man antar at mesteparten av dette arealet tidligere har vært aktiv palsmyr, indikerer resultatene at den historiske utbredelsen av palsmyr kan ha vært 3–5 ganger større enn i dag (2025).

Det må også presiseres at klassen «aktiv palsmyr» i grovkartleggingen ikke bare omfatter selve palsene, men også omkringliggende arealer som er en del av palsmyrsystemet. Dette er de samme områdene som danner grunnlaget for den videre finkartleggingen. Leseren bør derfor være klar over at det faktiske arealet dekket av selve pals-haugene er mindre enn de 216 km² som er rapportert for klassen som helhet.

3. Finkartlegging

3.1. Data

Grovkartleggingen danner grunnlaget for å velge ut områder til finkartlegging av arealtyper i palsmyrsystemer. Basert på resultatene fra denne kartleggingen ble de 1000 største (i areal) aktive palsmyrene valgt ut (av cirka 5622). Utvalget ble gjort under antakelsen om at fremtidig detaljert analyse og kontinuerlig overvåking primært vil fokusere på de største palssystemene. Et relativt høyt antall på 1000 områder sikrer at også mindre palssystemer blir inkludert, slik at datagrunnlaget får en god variasjon i arealstørrelse. Innenfor disse 1000 områdene ble alle tilhørende forekomster av «aktiv palsmyr» og «palsrester» tatt med i den videre finkartleggingen. For å begrense arbeidsmengden med innsamling av referansedata, ble det besluttet å kun merke nye data innenfor disse utvalgte områdene. Dette var et nødvendig grep på grunn av den store variasjonen i palsmyrsystemer, spesielt de som er under nedsmelting. I den detaljerte kartleggingen er det planlagt å kartlegge fem overflatetyper: bakgrunn, pals, termokarstinnsjøer, jordvannsmyr og torvringer (Figur 10). Totalt ble det samlet inn 6674 polygoner med referansedata fra Finnmark og Nordland, ettersom de 1000 største palssystemene utelukkende befinner seg i disse to fylkene.



Figur 10. Utsnitt av en ortofoto over palssystemet ved Ahkkefielbma på Finnmarksvidda med strukturer indikert. Merk at fastmatte og mykmatte er kombinert til en klasse (jordvannsmyr).

Inndeling i trenings- og testsett

For å sikre en robust evaluering av modellen, ble det totale referansedatasettet først delt inn i et treningssett (85 %) og et rent testsett (15 %). Denne inndelingen ble gjort per palsmyrsystem, som vil si at alle data fra ett og samme myrsystem havnet i enten trenings- eller testsettet, men aldri i begge. Dette forhindrer datalekkasje og sikrer at modellen blir testet på helt uavhengige områder. Testsettet ble holdt helt adskilt og kun brukt til den endelige evalueringen av den ferdige modellen.

For selve modelltreningen ble det benyttet en strategi med romlig 5-fold kryssvalidering. Dette innebærer at treningsdataene deles inn i fem grupper basert på geografisk plassering. Et rutenett på 2.5 x 2.5 km ble lagt over dataene, og hver rute ble tilfeldig tildelt en av de fem gruppene. Denne romlige inndelingen forhindrer at geografisk nærliggende og svært like data havner i både trenings- og valideringssettet samtidig, noe som gir en mer realistisk evaluering av modellens evne til å generalisere. Selve kryssvalideringen fungerer ved at modellen trenes fem ganger. I hver runde brukes fire av gruppene til trening, mens den femte gruppen brukes til å validere (teste) modellen. Prosessen gjentas til hver gruppe har blitt brukt som valideringssett én gang. Gjennomsnittresultatet fra de fem rundene gir et pålitelig mål på modellens ytelse.

3.2. Metoder

I starten av prosjektet ble det vurdert om man skulle benytte en Random Forest-klassifisering eller en dyp læringsmodell. Valget falt på Random Forest fordi metoden er effektiv, robust og krever relativt mindre datainnsamling sammenlignet med dyp læring. En dyp læringsmodell ville krevd en svært tidkrevende innsamling av heldekkende referansedata for alle klassene på tvers av mange palsmyrsystemer. Gitt den relativt begrensede størrelsen på mange av arealtypene som skulle kartlegges, ble en pikselbasert Random Forest-metode ansett som mer hensiktsmessig.

Random Forest er en maskinlæringsmetode som bygger på mange beslutningstrær for å gjøre prediksjoner. Hvert enkelt tre gir en «stemme» for resultatet, og den endelige prediksjonen bestemmes av flertallet av trærne. Dette gjør metoden robust mot overtilpasning og gir bedre nøyaktighet enn enkeltstående beslutningstrær.

Inngangsdata og utledede variabler

Som inngangsdata til Random Forest-modellen ble det benyttet 1-m RGB-data (ortofoto), 1-m heldekkende terrengmodell (DTM) og 1-m CIR-data (fargeinfrarødt). Både RGB- og CIR-dataene er mosaikker satt sammen fra ulike flybildeprosjekter, og er produsert internt hos Field Geospatial. Fra disse tre datasettene ble det utledet totalt 46 variabler. Flere av disse er de samme, men beregnet med ulik skala (oppløsning eller vindusstørrelse). Dette ble gjort for å fange opp mønstre og strukturer av ulik størrelse i landskapet, fra små detaljer til store formasjoner.

Variablene kan grupperes basert på kildedataene:

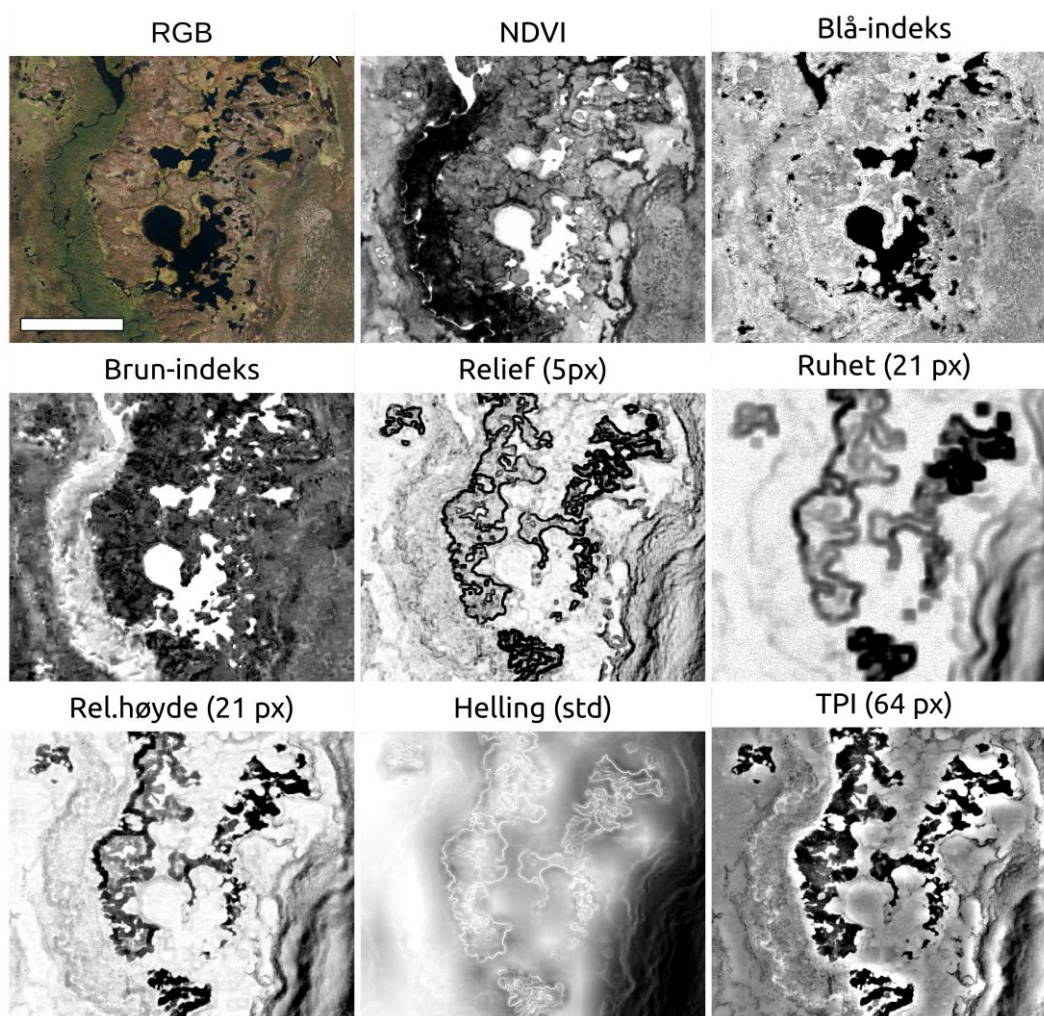
1. Fra RGB- og CIR-data (ortofoto og fargeinfrarødt): Disse variablene beskriver de spektrale egenskapene til overflaten.
 - Fargeindekser: Forholdet mellom fargekanalene rød, grønn og blå (f.eks. `blue_ratio`, `green_ratio`, `brown_index`).
 - NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): En vegetasjonsindeks beregnet fra de fargeinfrarøde (CIR) og røde båndene, som indikerer mengden levende vegetasjon.
2. Fra DTM (terrengmodell): Et stort antall topografiske variabler ble utledet fra terrengmodellen for å beskrive formen og strukturen til landskapet i ulike skalaer.
 - Grunnleggende terrengvariabler (Multi-resolution): Helning, plan- og profilkrumning beregnet ved fire ulike oppløsninger (1m, 4m, 16m, 64m) for å fange opp både fine og grove terrengformer.
 - Vindusbaserte variabler (Window-based): Variabler beregnet innenfor et bevegelig vindu for å beskrive det lokale nabolaget rundt hver piksel. Dette inkluderer:
 - Topographic Position Index (TPI): Viser om en piksel ligger høyere eller lavere enn terrenget rundt.
 - Roughness (ruhet): Et mål på terrengvariasjonen.
 - Relief (relieff): Forskjellen mellom høyeste og laveste punkt i nabolaget.
 - Relative Elevation (relativ høyde): Høyden over det lokale minimum. Alle disse ble beregnet med fire forskjellige vindusstørrelser (5x5, 11x11, 21x21, og 64x64 piksler).
 - Aggregerte variabler (Aggregation): For hver av de multi-skala og vindusbaserte variablene ble det beregnet statistiske mål (standardavvik og variasjonsbredde) på tvers av de ulike skalaene. Dette gir et mål på hvordan de topografiske egenskapene endrer seg med skala (f.eks. `slope_std` og `tpi_range`).

Variablenes rolle for segmenteringen

Valget av utledede variabler er gjort for å fange opp de unike geomorfologiske og spektrale egenskapene til de ulike arealtypene:

- For å skille ut palser, som er store, forhøyede landformer (hauger og platåer), er topografiske variabler som Topographic Position Index (TPI) og relativ høyde i middels til store skalaer sentrale. Disse viser at palsen ligger hevet over terrenget rundt.
- Torvringer, som er smale, avlange rygger, identifiseres best ved hjelp av fin-skala terrengvariabler. Høy krumning (curvature) og ruhet (roughness) i små vindusstørrelser er egnet til å fange opp disse distinkte, men smale, ryggene.
- Termokarstinnsjøer (smeltesjøer) kjennetegnes ved at de er flate og ligger i forsenkninger i terrenget. De har derfor lav helning, negativ TPI og lav relativ høyde. Spektralt vil de også skille seg ut, ofte med lav NDVI og lave verdier i RGB-båndene på grunn av vannets absorberende egenskaper.
- Jordvannsmyr og andre myrtyper vil i større grad skilles ut basert på spektrale egenskaper fra RGB- og CIR-dataene, som fanger opp ulikheter i vegetasjon og fuktighet.

Ved å kombinere variabler fra ulike skalaer og kilder (DTM, RGB, CIR), kan modellen lære seg å skille mellom komplekse og overlappende mønstre i landskapet (se Figur 11).



Figur 11. Eksempler på 8 av de 46 utledede variabler for et palsmyrlokalitet i Finnmark (69.035°N, 22.358°E). Merk at disse 8 variabler er blant de 12 viktigste variablene (se sekjon 3.3 for mer informasjon).

3.3. Modellering

Hyperparameter-optimalisering

For å finne den optimale kombinasjonen av hyperparametre for Random Forest-modellen, ble det gjennomført en to-steps prosess med et randomisert rutenettsøk (Randomized Grid Search). Denne metoden tester tilfeldige kombinasjoner av parametre for å effektivt utforske et bredt parameter-rom. Prosessen ble delt inn i et grovt søk og et finjustert søk.

Grovt rutenettsøk

I første steg ble det utført et bredt søk for å identifisere de mest lovende områdene i parameter-rommet. Det ble testet 100 tilfeldige kombinasjoner over 5-fold kryssvalidering. Følgende hyperparametre og verdiområder ble utforsket:

- Antall trær (n_estimators): [150, 225, 300, 400]
- Maksimal tredybde (max_depth): [12, 15, 17, ubegrenset]
- Minimum antall prøver for splitt (min_samples_split): [50, 90, 120]
- Minimum antall prøver per blad (min_samples_leaf): [20, 30, 40]
- Antall variabler vurdert per splitt (max_features): ["sqrt", "log2", 5, 7, 9]
- class_weight: [None (not balanced), "balanced"]

Resultatene fra det grove søket indikerte at den beste modellen hadde følgende parametre: n_estimators=225, min_samples_split=50, min_samples_leaf=20, max_features=7, class_weight="balanced" og max_depth=ubegrenset.

Finjustert rutenettsøk

Basert på resultatene fra det grove søket, ble det definert et smalere, mer fokusert rutenett for å finjustere de mest lovende parameterne. I dette steget ble det testet 80 nye kombinasjoner, igjen med 5-fold kryssvalidering. Verdiområdene var konsentrert rundt de beste verdiene fra det grove søket:

- Antall trær (n_estimators): [200, 225, 250, 275, 300]
- Maksimal tredybde (max_depth): [17, ubegrenset] (sterk indikasjon på at ubegrenset var best)
- Minimum antall prøver for splitt (min_samples_split): [40, 50, 60, 75, 90]
- Minimum antall prøver per blad (min_samples_leaf): [20, 25, 30, 35]
- Antall variabler vurdert per splitt (max_features): Verdier rundt 7 og 8 ble utforsket videre.
- class_weight: [None (not balanced), "balanced"]

Endelig modell

Det finjusterte søket resulterte i den endelige modellen som ble brukt for prediksjon. De optimale hyperparameterne ble funnet å være:

- n_estimators: 300
- min_samples_split: 50
- min_samples_leaf: 20
- max_features: 8
- max_depth: ubegrenset (None)
- class_weight: 'balanced' (for å håndtere ubalanserte klasser)
- bootstrap: True

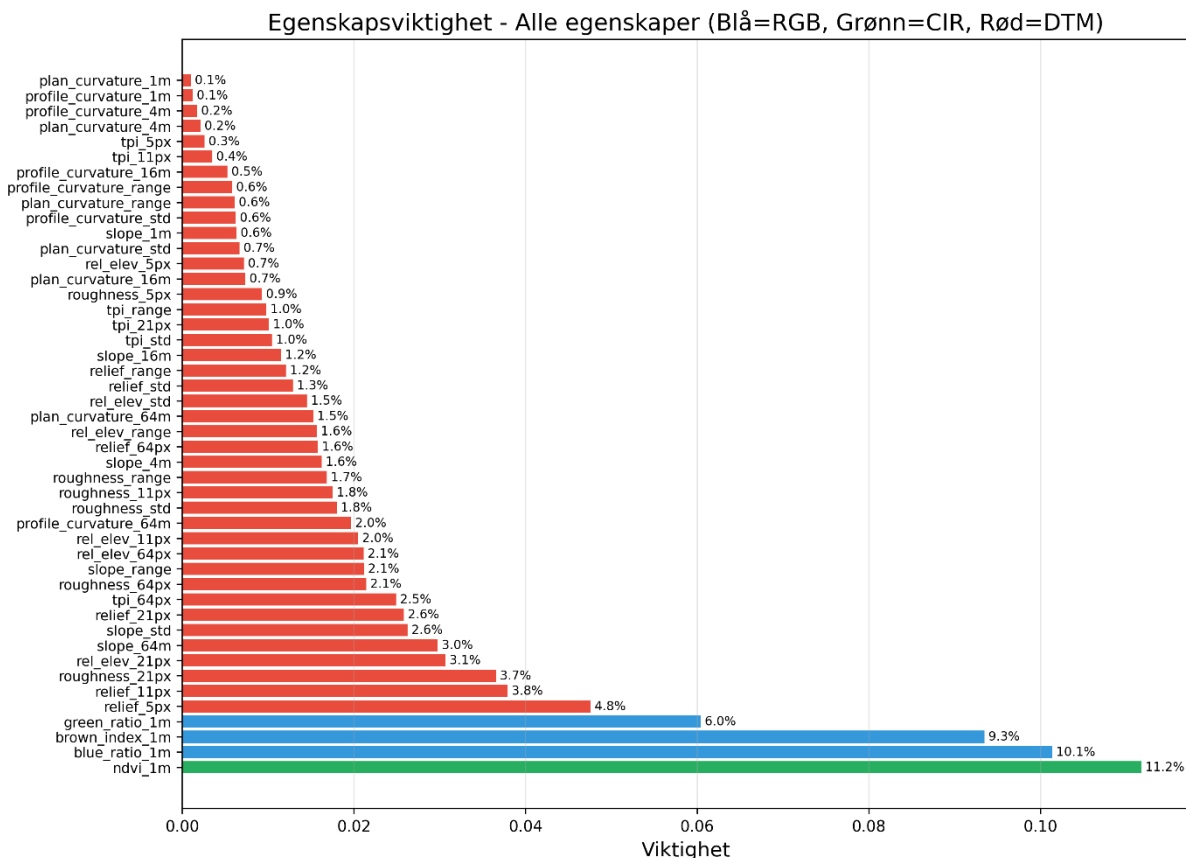
Variabel-viktighet

For å forstå hvilke variabler som var viktigst for modellens prediksjoner, ble det utført en analyse av variabel-viktighet (feature importance, Figur 12). Analysen viser hvordan modellens beslutninger påvirkes av de ulike inngangsdataene. Hovedfunnet er at terrengvariabler utledet fra DTM-en samlet sett var viktigere enn de spektrale variablene fra RGB/CIR-dataene, og sto for 63 % av den totale variabel-viktigheten, mot 37 % for de spektrale (Figur 13). Til tross for dette, er de fire enkeltstående mest viktige variablene alle spektrale indekser beregnet i 1-meters oppløsning. ndvi_1m var den aller viktigste variabelen, etterfulgt av blue_ratio_1m, brown_index_1m og green_ratio_1m (Figur 12). Sammen utgjør disse fire variablene alene over en tredjedel av modellens beslutningsgrunnlag.

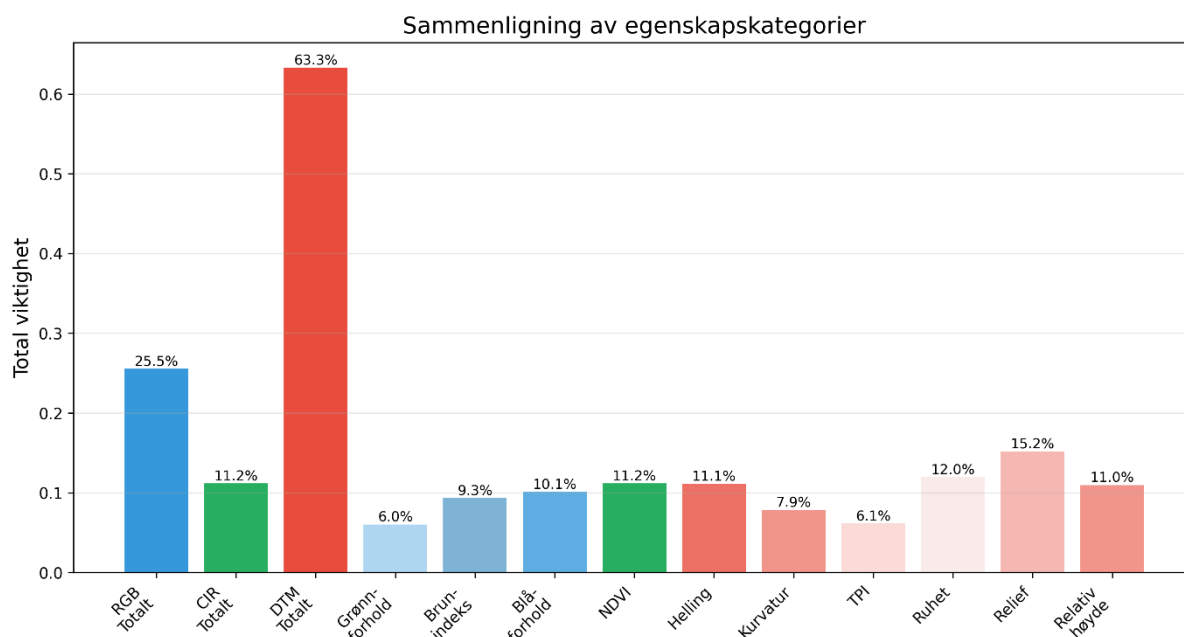
Når man ser på viktigheten av ulike skalaer, er trenden sammensatt. Mens de spektrale variablene er viktigst ved 1-meters oppløsning, er bildet annerledes for terrengvariablene. Her viser analysen at variabler beregnet over større vinduer/blokker eller grovere oppløsninger er svært innflytelsesrike. For eksempel er variabler som relief_5px, relief_11px, roughness_21px, rel_elev_21px, slope_64m og slope_std alle rangert blant de 10 viktigste totalt sett. Dette understreker at en multi-skala tilnærming, som kombinerer fin-skala detaljer med landskapstrekk i en bredere kontekst, er avgjørende for å lykkes. Det er viktig å merke seg at disse resultatene gjelder for den spesifikke modellen som ble trent i denne analysen. Rangeringen og den nøyaktige viktigheten av enkeltvariabler kan endre seg noe mellom ulike modellkjøringer. Hovedtrendene, slik som den generelle dominansen av terrengvariabler (DTM) over spektrale data og viktigheten av en multi-skala tilnærming, forventes imidlertid å være relativt stabile.

3.4. Resultater

Resultatene fra finkartleggingen med Random Forest-modellen presenteres i tre deler for å gi et helhetlig bilde av modellens ytelse og begrensninger. Først gjennomgås en kvalitativ, visuell analyse av resultatene for fire utvalgte palsmyrsystemer. Disse systemene er valgt for å representere geografisk variasjon (Sør-Varanger, Porsanger, Indre Finnmark og Troms). I denne delen vurderes prediksjonene visuelt for å illustrere hvor modellen presterer bra, og hvor den har utfordringer med feilklassifiseringer. Deretter presenteres de kvantitative resultatene fra den romlige 5-fold kryssvalideringen som ble gjennomført under selve modelltreningen. Disse tallene gir et robust estimat på modellens gjennomsnittlige ytelse. Til slutt evalueres den ferdigtrente, endelige modellen på det helt uavhengige testsettet som ble holdt av. Resultatene fra denne endelige testingen presenteres ved hjelp av en forvekslingsmatrise (confusion matrix) og tilhørende nøyaktighetsmål (metrics).



Figur 12. Egenskapsviktighet av de 46 variablene i den endelige beste Random Forest-modellen. Rød, blå og grønn farger viser fra hvilken inngangsdata er variabler beregnet fra (respectively terrengmodellen, RGB og CIR).



Figur 13. Egenskapsviktighet per inngangsdata (tre første "histograms") og per egenskapskategorier i den endelige beste Random Forest-modellen. Rød, blå og grønn farger viser igjen den opprinnelige inngangsdataen.

Visuell analyse

En visuell analyse av resultatene fra finkartleggingen viser at modellen generelt presterer svært godt. Spesielt for store palsmyrsystemer, hvor palsene er flere meter høye og tydelig synlige i både DTM og ortofoto, er prediksjonene for alle klasser nøyaktige og logiske (se Figur 14 og 15). Klassene «pals», «jordvannsmyr» og «termokarstinnsjø» blir gjennomgående godt avgrenset.

Analysen avdekker også noen systematiske utfordringer og områder med usikkerhet:

- Forveksling mellom «pals» og «torvring»: Den største usikkerheten ligger i skillet mellom «pals» og «torvring». Dette er spesielt tydelig i mindre palsmyrsystemer eller systemer med lave palser (< 1 meter), som vist i Figur 16. Forvekslingen skyldes dels at disse landformene er morfologisk like – en torvring er en smal rygg, mens en pals er en bredere haug som kan arte seg som alt fra små hauger til store platåer. Usikkerheten kan også være en forlengelse av tolkningusikkerhet under selve referansekartleggingen, da overgangen mellom disse typene er flytende.
- Oppløsning på inngangsdata: Den begrensede bredden på mange torvringer gjør at 1-meters oppløsning på ortofoto og terrengmodellen kan være en begrensende faktor. Selv om bruk av data med høyere oppløsning (f.eks. 25 cm) er teknisk mulig, ble det ikke ansett som nødvendig for formålet med denne kartleggingen.
- Kant-effekter: I ytterkantene av de kartlagte palsmyrsystemene har modellen en tendens til å feilklassifisere bratte skråninger, som fjellsider, som «pals». Dette er en type falsk positiv som trolig kan fjernes ved å klippe bort de ytterste meterne av prediksjonsområdet i en post-prosessering.

Samlet sett ser graden av forveksling mellom «pals» og «torvring» ut til å avhenge av størrelsen på palsmyrsystemet og hvor langt det har kommet i nedsmeltingsprosessen.

Resultater fra kryssvalidering

Den romlige 5-fold kryssvalideringen som ble utført under treningen, ga en gjennomsnittlig nøyaktighet (accuracy) på 73.4 % med et standardavvik på 3.5 %. Resultatene for de enkelte foldene varierte fra 69.1 % til 78.7 %. Denne variasjonen indikerer en moderat romlig heterogenitet i datasettet, som betyr at noen geografiske områder er enklere for modellen å klassifisere enn andre. Standardavviket er imidlertid innenfor et akseptabelt nivå for denne typen fjernanalyse, og de stabile resultatene på tvers av foldene viser at modellen er robust og ikke lider av betydelig overtilpasning.

Evaluering på testsettet

På det uavhengige testsettet oppnådde den endelige modellen en totalnøyaktighet på 75.8 %. Dette resultatet er på linje med gjennomsnittet fra kryssvalideringen, noe som er en sterk indikasjon på at modellen generaliserer godt til nye, usette data. En mer detaljert analyse av ytelsen for hver klasse (Tabell 2) avslører imidlertid betydelige forskjeller.

Klassen «Pals» er den som predikeres best, med en F1-score på 82 %, basert på en presisjon på 84 % og en gjenfinning på 79 %. Klassene «Annet» (F1: 79 %) og «Jordvannsmyr» (F1: 76 %) har også jevnt over god og balansert ytelse.

Den største utfordringen er klassen «Torvring», som kun oppnår en F1-score på 50 %. Dette skyldes en svært lav presisjon på 40 %, som betyr at 60 % av alle piksler som predikeres som «Torvring» er feilklassifisert. Modellens evne til å finne eksisterende torvringer (gjenfinning) er imidlertid betydelig bedre, på 68 %.

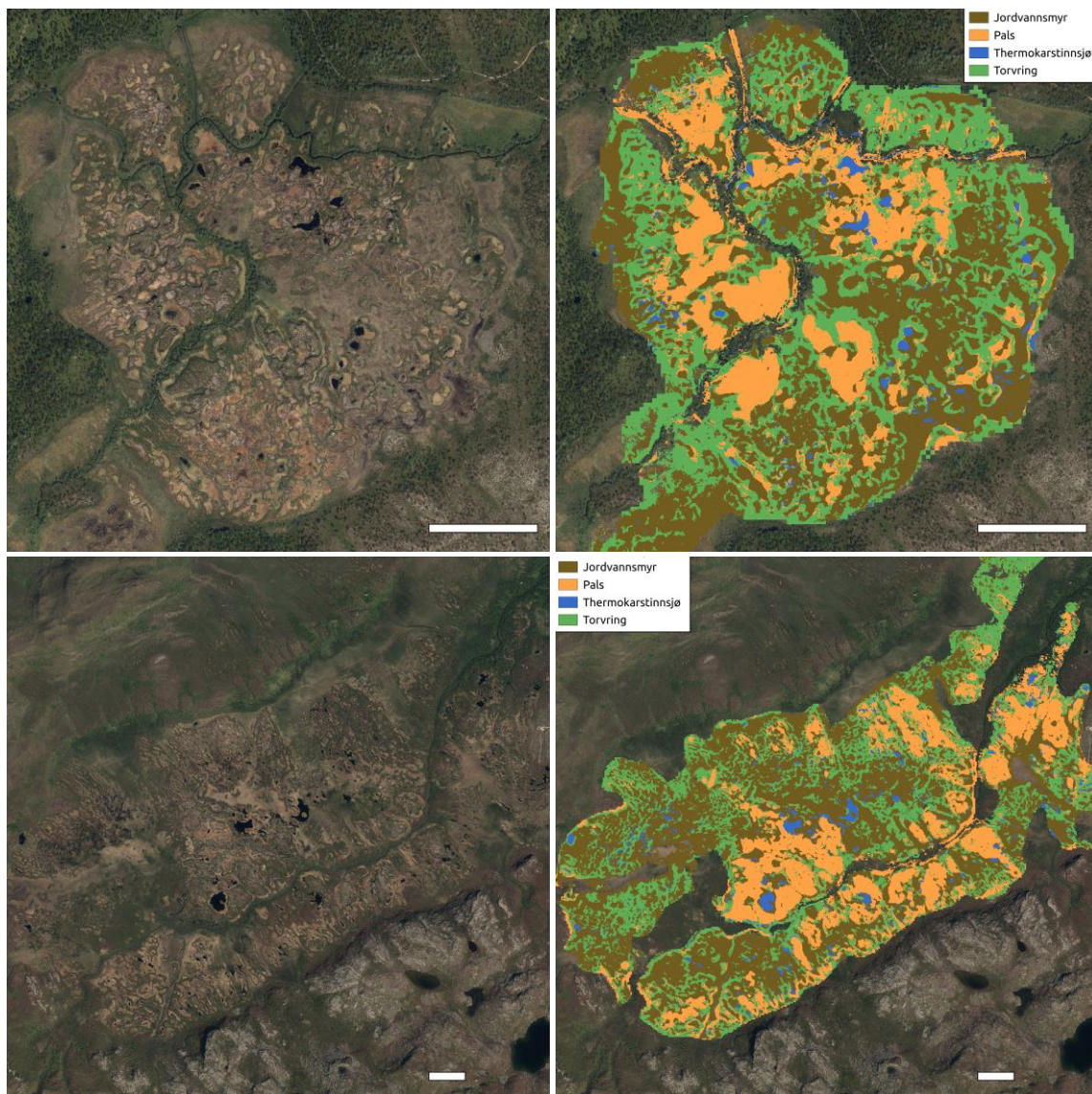
Analyse av forvekslingsmønstre

En analyse av hvilke klasser som forveksles, viser tre hovedmønstre:

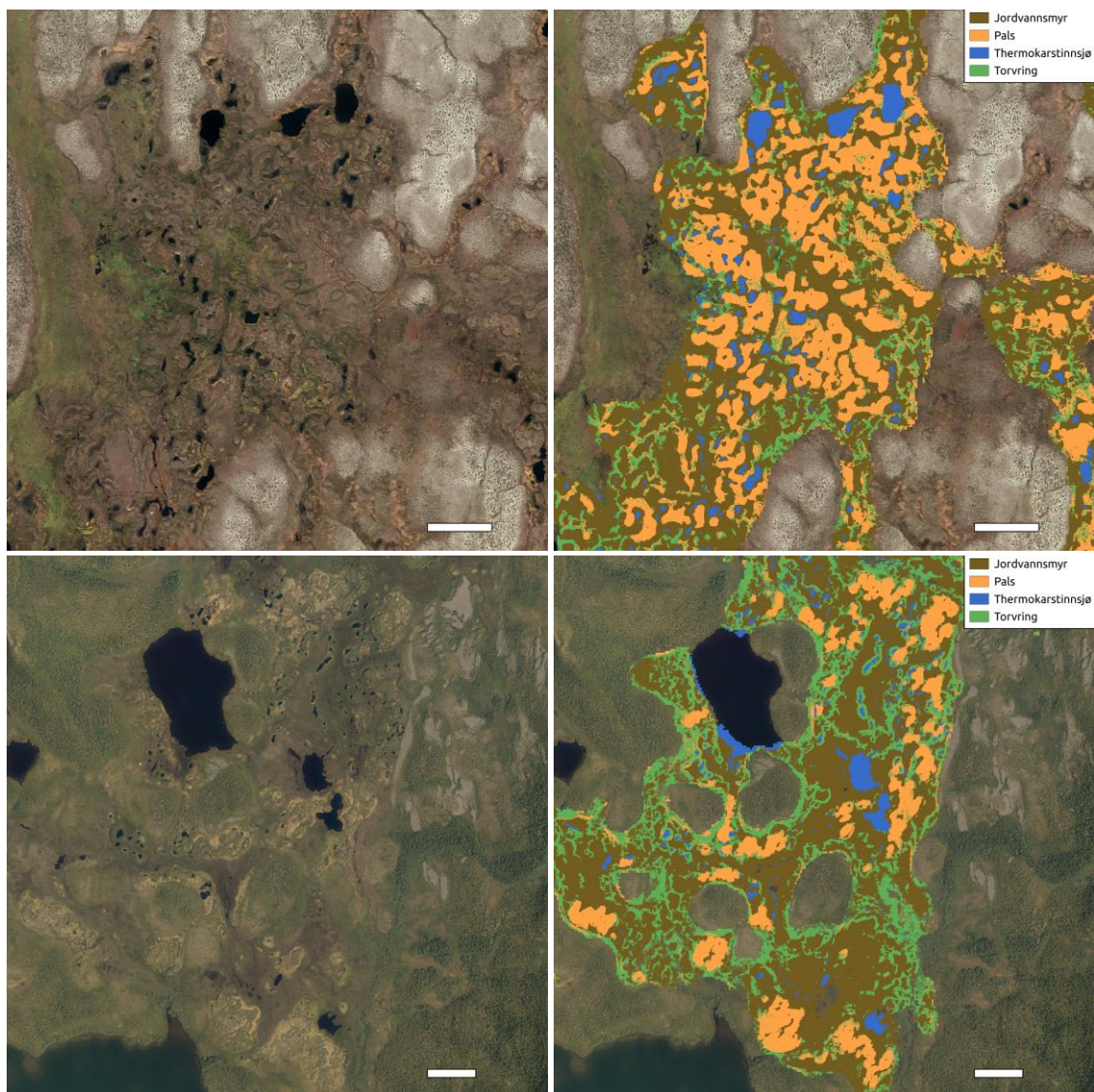
- Overprediksjon av «Torvring»: Den klart største kilden til feil er at modellen for ofte klassifiserer andre klasser som «Torvring». For eksempel blir 10.5 % av alle «Pals»-piksler og 12.2 % av alle «Jordvannsmyr»-piksler i testsettet feilaktig klassifisert som «Torvring».
- Forveksling mellom «Pals» og «Annet»: Det er en moderat, gjensidig forveksling mellom disse to klassene. 13.4 % av «Annet»-piksler blir feilaktig tatt for å være «Pals», mens 5.6 % av «Pals»-piksler blir tatt for å være «Annet».
- Forveksling mellom vannrelaterte klasser: Som forventet er det en viss forveksling mellom «Jordvannsmyr» og «Thermokarstinnsjø». 12.7 % av piksler som tilhører «Thermokarstinnsjø» blir feilklassifisert som «Jordvannsmyr».

Tabell 2. Precision, recall og F1-score på test datasettet.

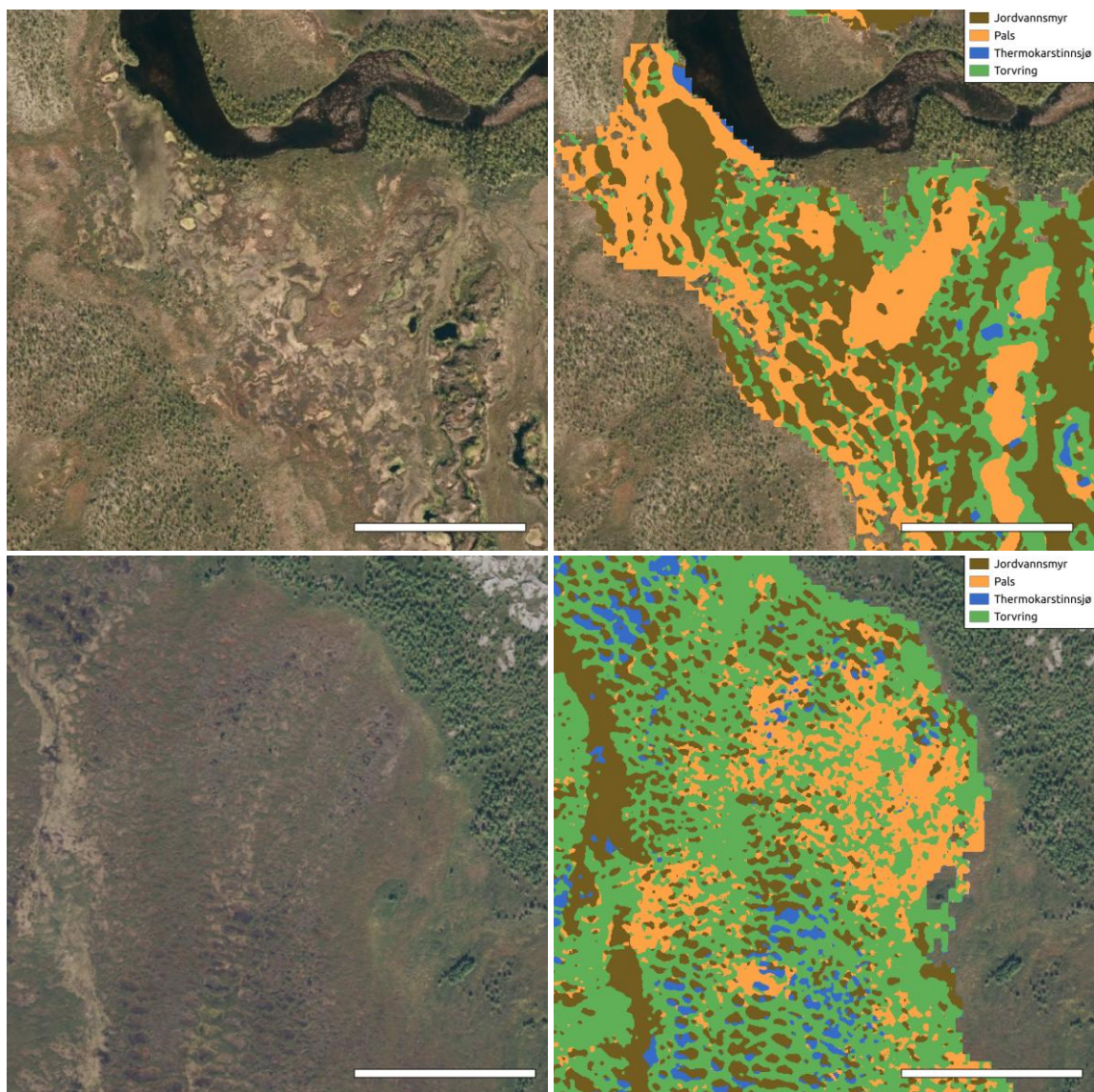
Class	Precision	Recall	F1-score	Support
Annet	81	77	79	136,277
Jordvannsmyr	81	72	76	162,761
Pals	84	79	82	215,104
Thermokarstin.	69	77	73	32,177
Torvring	40	68	50	44,562



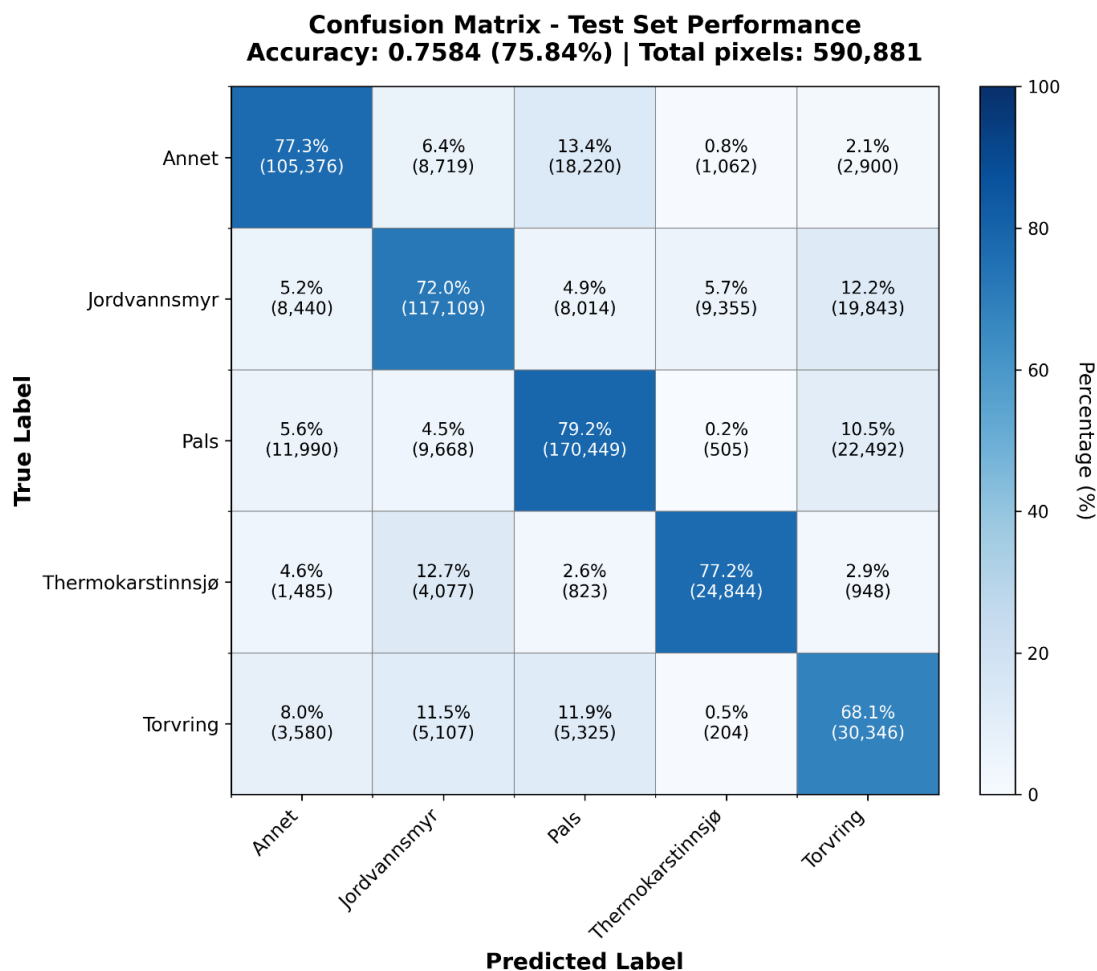
Figur 14. Resultater fra finkartleggingen for to palsmyrssystemer: Porsanger (øverst, 70.212°N, 24.875°Ø) og Varanger (nederst, 70.118°N, 28.444°Ø). Bildene til venstre viser RGB-ortofoto, mens bildene til høyre viser de tilhørende prediksjonene. Målestokken for alle bildene er 200 meter.



Figur 15. Resultater fra finkartleggingen for to palsmyrssystemer: Indre Finnmark (øverst, 70.212°N, 24.875°Ø) og Troms (nederst, 70.212°N, 24.875°Ø). Bildene til venstre viser RGB-ortofoto, mens bildene til høyre viser de tilhørende prediksjonene. Målestokken for alle bildene er 200 meter.



Figur 16. Eksempler på finkartlegging med noe lavere prediksjonskvalitet. Lokalitetene er Indre Finnmark (øverst, 69.437°N, 24.251°Ø) og Varanger (nederst, 69.664°N, 29.361°Ø). Bildene til venstre viser RGB-ortofoto, og til høyre de tilhørende prediksjonene. Målestokken for alle bildene er 200 meter.



Figur 17. Forvekslingsmatrise for testsettet for den endelige RGB+DTM+NDVI-modellen. Matrisen viser klassifiseringsytelsen for fem palsmyrklasser (totalt 590,881 piksler, 75.84 % total nøyaktighet). Verdiene representerer radnormaliserte prosentandeler, med absolutte pikselantall i parentes.

3.5. Post-prosessering

For å optimalisere finkartleggingsresultatene, ble det, på samme måte som beskrevet i seksjon 2.5 for grovkartleggingen, anvendt et post-prosesseringsfilter. Et majoritetsfilter på 5x5 piksler ble benyttet. Dette filteret tildeler hver senterpiksel verdien til den mest dominerende klassen innenfor et 5x5 nabolag. Målet med denne prosessen er å effektivt fjerne «salt og pepper»-støy (enkeltstående, feilklassifiserte piksler) og dermed oppnå et mer homogent og visuelt helhetlig resultat for finkartleggingskartet.

3.6. Statistikk på finkartleggingen

Finkartleggingen ble utført innenfor et område som dekker de 1000 største palsmyrsystemene identifisert i grovkartleggingen. Disse 1000 systemene representerer et areal på 160 km² med «aktiv palsmyr», noe som utgjør 74 % av det totale arealet for denne klassen i Norge (216 km²). Sammen med tilhørende «palsrester» (118 km²) i de samme områdene, dekker finkartleggingsområdet totalt 278 km². Innenfor dette området på 278 km² resulterte finkartleggingen i følgende arealfordeling for de fire kartlagte arealtypene (i tillegg til bakgrunnsklassen):

- Jordvannsmyr: 126 km² (142 km², underestimert på grunn av lav gjenfinning)
- Pals: 83 km² (88 km², lett underestimert)
- Torvringer: 62 km² (36 km², overestimert på grunn av lav presisjon)
- Termokarstinnsjø: 14 km² (13 km², lett overestimert)

Det kartlagte arealet fra modellen er et estimat som inneholder usikkerhet. Ved å bruke forvekslingsmatrisen fra evalueringen på testsettet, kan vi justere de kartlagte arealene for å få et mer nøyaktig estimat av det reelle arealet på bakken (i parentes). Denne metoden, kjent som feiljustering, korrigerer for modellens systematiske feil ved å vekte resultatene med klassenes presisjon (precision) og gjenfinning

(recall). Justeringen tar hensyn til både arealer som feilaktig er inkludert i en klasse (falske positive) og arealer som feilaktig er utelatt (falske negative).

Resultatene viser at det kartlagte arealet for «Jordvannsmyr» og «Pals» var noe underestimert. Den største endringen ses for «Torvringer», hvor det kartlagte arealet på 62 km² er overestimert. Det justerte arealet på kun 36 km² reflekterer modellens lave presisjon og tendens til å feilsegmentere andre klasser som «Torvring». Disse feiljusterte arealene gir et mer realistisk bilde av den faktiske utbredelsen av de ulike arealtypene i finkartleggingsområdet. Arealet klassifisert som «Pals» (88 km²) utgjør dermed omtrent 55 % av den totale «aktive palsmyren» (160 km²) innenfor de 1000 største palsmyrsystemene som ble finkartlagt.

4. Utvikling av overvåkingsdesign

4.1. Overvåkingsprogrammet for palsmyr (2004–2024)

Opprinnelig design og resultater

Det opprinnelige overvåkingsprogrammet ble etablert i 2004 for å dokumentere effektene av klimaendringer på palsmyrer, som fungerer som sensitive indikatorer for permafrosttilstand i randområdene for permafrost. Formålet var å overvåke endringer i utbredelse og struktur langs viktige klimagrader i Norge. Seks lokaliteter ble valgt ut for overvåkingen: Haukskardmyrin, Haugtjørnin og Leirpullan på Dovre representerer en sørlig høydegradient med varierende grad av oseanitet. Ostojeakkt, Goahteluoppal og Ferdesmyra i Troms og Finnmark dekker en nordlig kontinentalitetsgradient. Metodikken var basert på feltarbeid med linjetransektanalyser, der palsmorfologi, markdekke, teledyp og vegetasjon ble registrert med fem års intervaller (Hofgaard, 2004).

Programmet har gjennom de siste 20 årene dokumentert en akselererende nedbrytning av palsmyrene (Hofgaard mfl., 2020; Arnesen mfl., 2023). Samtlige overvåkingsområder viser en tydelig, langsiktig trend med reduksjon i både palsenes høyde og areal, en utvikling som har pågått siden 1950-tallet. Denne tilbakegangen knyttes til regional oppvarming. Analysene viser signifikante korrelasjoner mellom permafrostens utbredelse (andel målepunkter med tele) og temperaturforholdene om høsten og vinteren, samt akkumulert frostmengde. Det ble ikke funnet korrelasjon med sommertemperaturer. Resultatene viser årlige variasjoner som følge av skiftende værforhold. Kalde og snøfattige vintre kan midlertidig bremse nedbrytningen. En sentral observasjon er de forsterkende tilbakekoblingsmekanismene (positive feedback loops) knyttet til vegetasjonsendringer. Tining fører til fuktigere forhold, som fremmer etablering av kratt og gress. Denne vegetasjonen fungerer som snøfangere som isolerer bakken mot vinterkulde og hindrer gjeninnfrysing, noe som akselererer videre tining.

Det er observert stor variasjon i tilstand mellom de ulike lokalitetene:

- Ferdesmyra: Tilbagegangen har vært dramatisk. Ved siste omdrev i 2023 var det ingen aktive palser igjen langs transektene, og lokaliteten anses i praksis som tapt som palsmyr.
- Haugtjørnin: Lokaliteten preges av lave palser med svært stabil høyde. Det antas at disse har mistet sin dynamikk fordi de hviler på fast grunn, og dermed ikke synker videre tross tining.
- Leirpullan: Skiller seg ut som spesielt stabil med høy andel tele. Dette er en høyereliggende lokalitet med lithalsaer (mineraljordspalser), som er mer geomorfologisk stabile enn torvpalser.
- Øvrige lokaliteter: Goahteluoppal, Ostojeakkt og Haukskardmyrin viser en jevn, kontinuerlig reduksjon i palshøyde og utbredelse.

Evaluerings av eksisterende overvåkingsdesign fremste styrke er de metodisk konsistente og lange tidsseriene. Dette datagrunnlaget har vært avgjørende for å dokumentere den langsiktige tilbakegangen i palsmyr og for å gi innsikt i nedbrytningsprosessene.

Sammenlignet med dagens teknologiske muligheter har det opprinnelige designet imidlertid begrensninger. Utvalget på seks overvåkingsområder er for lite til å generalisere funnene til nasjonal skala. Den feltbaserte metodikken langs faste linjer gir detaljert informasjon om akkurat de palsene som krysses, men fanger ikke opp laterale endringer (arealutvidelse eller innskrumping) i resten av myrkomplekset. Siden palser ofte endres raskere horisontalt enn vertikalt, gir punktmålinger et ufullstendig bilde av totaltapet. Manglende bruk av arealdekkende fjernmåling har medført at den romlige konteksten rundt endringene i liten grad er blitt fanget opp.

4.2. Forslag til nytt overvåkingsdesign (2026 og fremover)

Overordnet mål og datakvalitet: et kostnads-kvalitetsdilemma

Målet for det nye designet er å overvåke tilstand og utviklingstrender for alle palsmyrer i Norge på en effektiv måte. Ved å ta i bruk ny teknologi kan det leveres landsdekkende og oppdaterte data til forvaltning og forskning. En forutsetning for dette er et datagrunnlag av høy kvalitet. Det er avgjørende å kunne gjennomføre nøyaktige analyser av høydeendringer for å kvantifisere volumtap av is og torv.

Erfaringer fra pilotprosjekter og analyser av historiske data viser at terrengmodeller (DTM) basert på LiDAR (laserdata) er den foretrukne metoden for dette formålet. I motsetning til bildematching, som måler overflaten av vegetasjonen, kan LiDAR trenge gjennom vegetasjonsdekket og gi nøyaktige målinger av selve bakkeoverflaten.

Innsamling av nye LiDAR-data er imidlertid kostnadskreven. Dette skaper en økonomisk utfordring for overvåkingsprogrammet. Alternativet er å benytte eksisterende data, primært de nasjonale omløpsfotograferingene

(RGB-flybilder), for å generere digitale overflatemodeller (DSM) gjennom bildematching (fotogrammetri). En vesentlig svakhet ved denne tilnærmingen i palsmyr-sammenheng er at metoden modellerer vegetasjonens overflate. Siden gjengroing (økt buskvekst) ofte opptrer samtidig med at palsen tiner og synker, kan vegetasjonsveksten maskere det reelle volumtapet i bakken. I tillegg kan DSM-er fra bildematching inneholde artefakter som reduserer påliteligheten i endringsanalyser.

Valget står dermed mellom å investere i ny datafangst med LiDAR for å oppnå kvantitative resultater med høy presisjon, eller å benytte eksisterende flybilder. Ved bruk av sistnevnte må det tas høyde for at presisjonen i endringsanalysene blir lavere, og at usikkerheten knyttet til vegetasjonsendringer vil være betydelig større.

Overvåkingsdesignet, hybridtilnærming

For å møte målsettingene foreslås en hybridtilnærming i tre nivåer som kombinerer landsdekkende fjernmåling med målrettet feltarbeid. Modellen bygger videre på maskinlæringsmetodikken utviklet i prosjektet (se kapittel om grov- og finkartlegging). Det nasjonale kartet fra grovkartleggingen danner grunnlaget for utvalg og prioritering av lokaliteter, mens finkartleggingsmodellen benyttes for løpende oppdatering av status i utvalgte områder etter hvert som nye data foreligger.

Overvåkingen struktureres i tre nivåer med ulik geografisk oppløsning og frekvens. Det første nivået (nivå 1) omfatter en landsdekkende analyse med 5–10 års intervaller for å dokumentere store, langsiktige endringer i utbredelse. Det andre nivået (nivå 2) retter seg mot intensivovervåking av 21 utvalgte indekslokaliteter (tabell 2), med en dynamisk frekvens på 1–5 år styrt av tilgangen på nye fjernmålingsdata. Det tredje nivået (nivå 3) består av målrettet feltarbeid og detaljert biologisk overvåking, der innsatsen behovsprøves basert på funn fra de to øvrige nivåene.

Nivå 1: Nasjonalt referansegrunnlag Nivå 1 etablerer det nasjonale referansegrunnlaget for overvåking av langsiktige endringer, med en oppdateringsfrekvens på 5–10 år. Nivået bygger på «Grovkartleggingen» som referanse for både aktive palssystemer og rester av palssystemer. Ettersom endringer på dette skalanivået skjer langsomt, gjennomføres nye analyser kun når oppdaterte nasjonale datasett (flyfoto og DTM) foreligger. Nivået baseres utelukkende på eksisterende data uten ny datafangst. Analysene vil beregne nasjonal og regional statistikk for totalarealet av palsmyrsystemer for å dokumentere langsiktig arealtap.

Nivå 2: Dynamisk overvåking av indekslokaliteter Nivå 2 er programmets hovedelement og omfatter dynamisk overvåking av indekslokaliteter. Frekvensen er fleksibel (1–5 år) og styres av tilgangen på nye fjernmålingsdata. Her benyttes «Finkartleggingsmodellen» for å registrere interne endringer i palssystemene, som er de mest fremtredende på kortere sikt. For å sikre høy datakvalitet bør det planlegges egen innsamling av LiDAR og flybilder for et nettverk på ca 20 lokaliteter. Samordning av flyvninger vil kunne redusere kostnadene per lokalitet. Utvalget bør inkludere de seks opprinnelige overvåkingsområdene for å videreføre tidsseriene, supplert med nye områder for å sikre representativitet langs klimagradientene. Analysene skal kvantifisere arealendringer og beregne volumtap ved hjelp av terrengmodeller (DTM).

Nivå 3: Feltvalidering og oppfølging Nivå 3 omfatter feltvalidering og biologisk overvåking. Innsatsen er behovsprøvd og leverer bakkeidata som ikke kan hentes via fjernmåling. Formålet er å validere og forbedre fjernmålingsmodellene, undersøke områder med raske endringer identifisert i Nivå 2, samt gjennomføre registreringer av vegetasjon og rødlistede arter. Ved særskilte behov kan det bestilles ny datafangst for enkeltlokaliteter for å belyse spesifikke problemstillinger. For slike avgrensede studier vil bruk av droner ofte være et mer kostnadseffektivt alternativ enn tradisjonelle flyfoto.

Fordeler og videre potensial

Det foreslåtte overvåkingsdesignet gir et strukturert grunnlag for prioritering av ressurser, der den nasjonale kartleggingen danner utgangspunktet for videre innsats. Modellen er fleksibel og tillater en avveining mellom kostnad og datakvalitet, avhengig av behovet for presisjon (LiDAR kontra fotogrammetri). Kombinasjonen av nasjonal oversikt og detaljerte, behovsprøvede analyser gir en mer helhetlig og effektiv overvåking. Bruk av validerte modeller sikrer kvantitative og etterprøvbare data på endringer i både areal og volum.

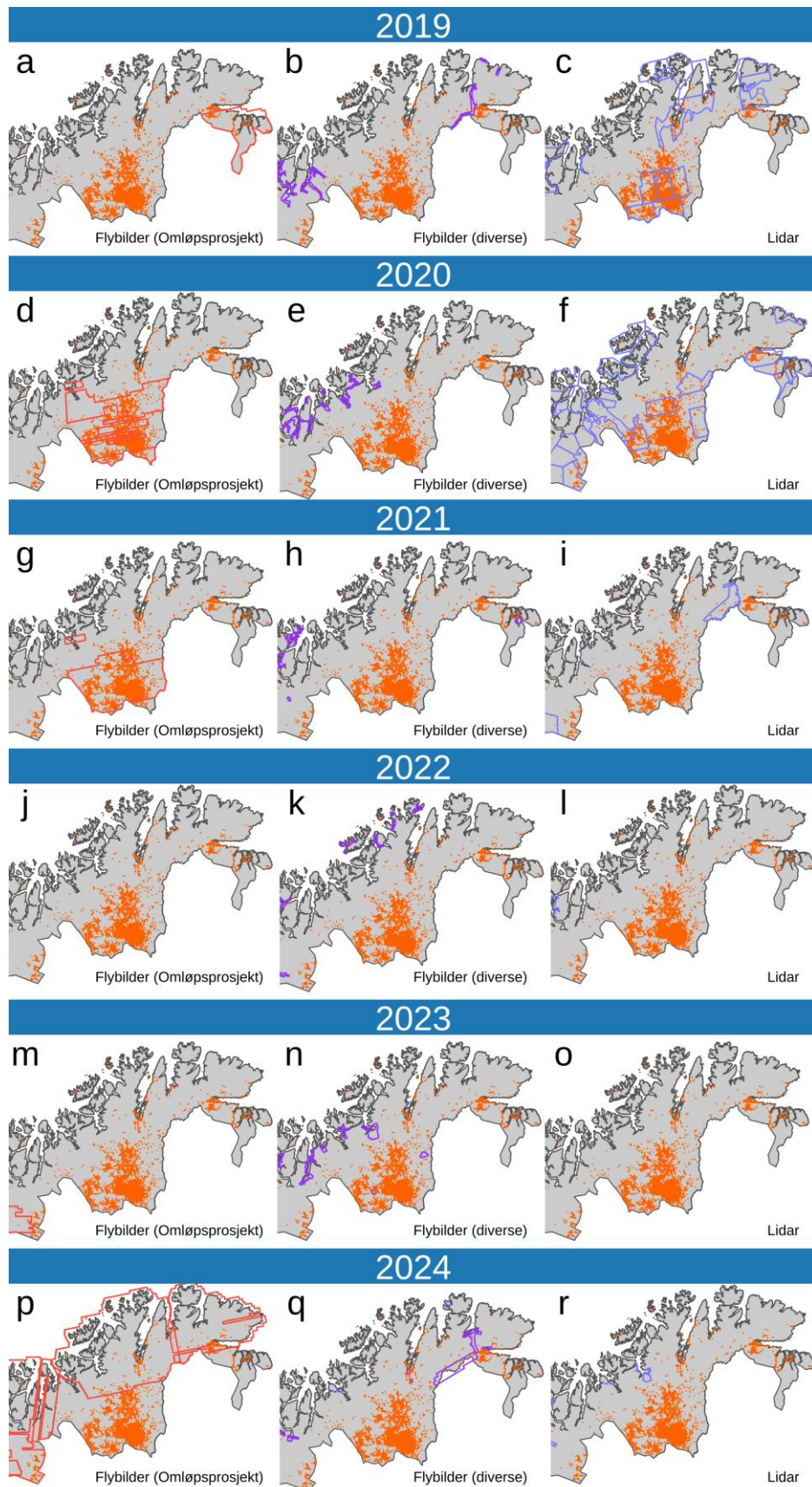
Tilgang på detaljerte data for høydeendringer åpner for avanserte analyser utover beregning av volumtap. Det blir mulig å kartlegge områder med rask tining eller heving, analysere endringer i overflatestruktur (topografisk ruhet), og modellere endringer i hydrologi og avrenningsmønstre. Ved å koble høydedata til finkartleggingen kan man beregne setningsrater for spesifikke formelementer, for eksempel forskjellen i innsynkning mellom palstopp og palskant. Videre kan data om høydeendringer kobles mot andre romlige datasett for å øke forståelsen av lokale årsaksfaktorer for permafrosttining.

Tabell 2. Forslag på 21 utvalgte overvåkningslokaliteter.

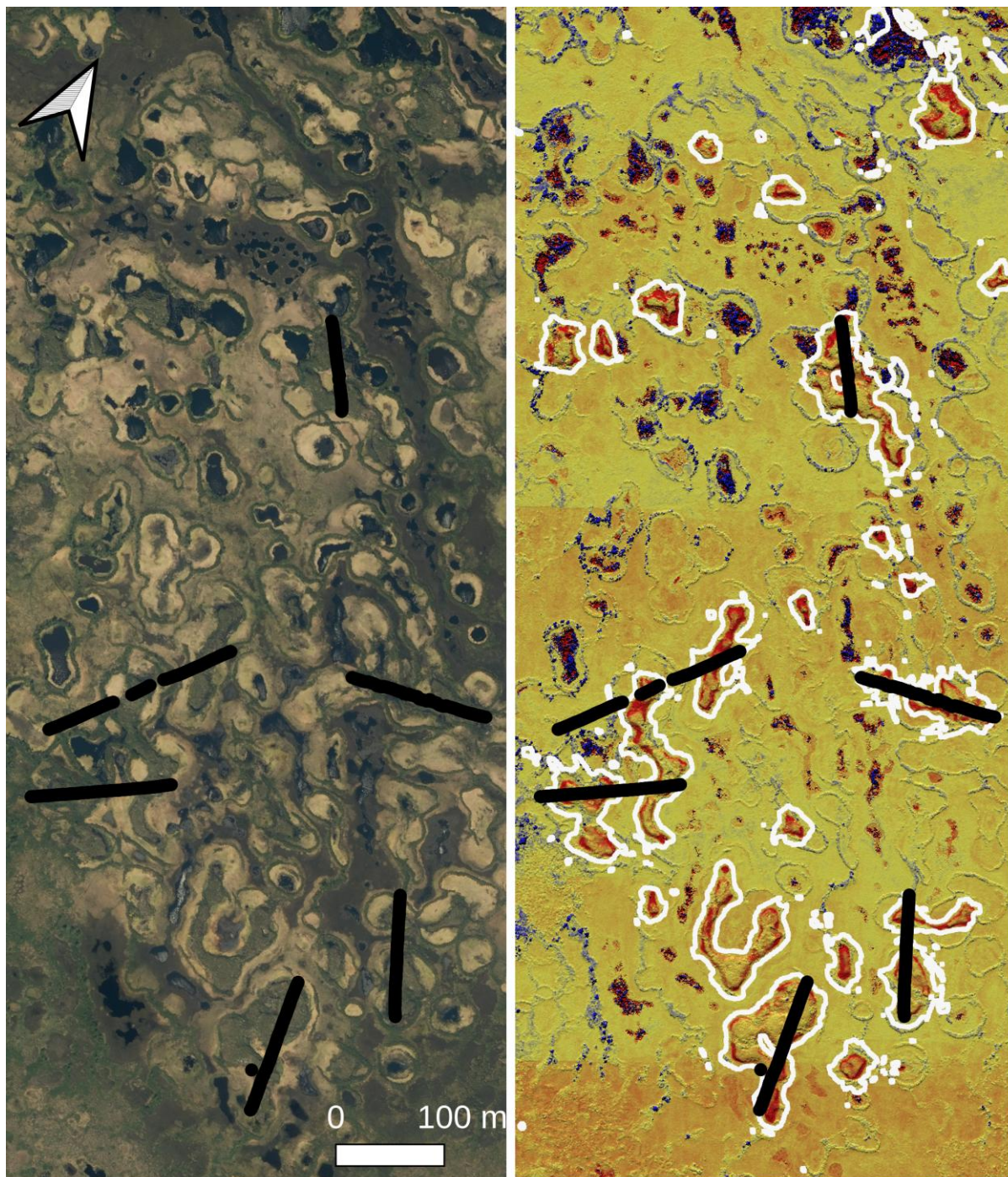
Navn	Kommentar	Tilgjengelighet	lon	lat
Korsmyran	Store palsplatåer, langt øst	Vanskelig	28.314	70.130
Korsdalen	Mindre myr med noen få palser	Lett	29.463	69.637
Morssajeaggi	Store og høye palser	Middels	24.875	70.211
Brennelvmyra	Lett tilgjengelig fremdeles en del palser	Lett	25.098	70.048
Searvejeaggi og Oivosjeaggi	Palser og palsplatåer	Middels	23.177	69.032
Dealljadasjávrrit Øst	Lite system med tydelige palser, trolig ikke mye utsmeltet	Middels	22.712	69.112
Ráigeluovttajeaggi	Tydelige palser, lett tilgjengelig	Lett	22.847	69.081
Ráisjávri nord	Lite system, mye utsmelting, men enda tydelige palser	Middels	22.437	69.216
Ráisjávri sør	Palsplatåer med 2-3 meters høyde	Vanskelig	22.435	69.185
Askkasjávri	Stort og trolig temmelig intakt system, utilgjengelig	Svært vanskelig	22.263	69.167
Muvrresahpi_Goahteluoppal	Stort system, mye utsmeltet, overvåket før, utilgjengelig	Svært vanskelig	22.366	68.902
Balggesvárri	Stor konsentrasjon av palsmyrer innen en radius på 7 km	Svært vanskelig	22.370	69.040
Vuohcetjávrrit	Stor konsentrasjon av palsmyrer nord og øst for vannene	Svært vanskelig	22.263	68.970
Áidejávri	Konsentrasjon av palsmyrer, platåer og variasjon, mye utsmeltet, tilgjengelig	Lett	23.302	68.753
Civttasmarleaksi	Store palssystemer med platåer i kjerneområdet for palser, utilgjengelig	Svært vanskelig	24.469	68.969
Goddejeaggi	Store palssystemer med store platåer, utilgjengelig	Svært vanskelig	23.785	69.009
Guhkesjeaggi	Svært store palssystemer i en radius på ca 2 km, utilgjengelig	Svært vanskelig	24.390	68.848
Jávremohkejeaggi	Mindre system med ganske store palser, tilgjengelig	Lett	24.255	69.387
Hohtebalssat	Middels stort system med tilløp til platå, ganske tilgjengelig	Middels	24.126	69.371
Ostojeakkitt	Stort system med mindre platåer, tilgjengelig med båt, overvåket før	Vanskelig	19.792	68.486
Høgskarmyrin	Nesten utsmeltede palser, overvåket før, eneste i Sør-Norge, tilgjengelig	Middels	9.374	62.147

4.3. Test av overvåkingsdesign

Testområdet Muvrresjávri i Finnmark er valgt for testing av overvåkingsdesignet. Dette området har tidligere vært benyttet i et pilotprosjekt hvor Field og Sállir Natur evaluerte bruken av LiDAR-data og bildematchingsdata for presis høydemåling i palsmyrsystemer (Groesz mfl., 2024a). Sállir Natur har også utført feltmålinger av terrenghøyder langs seks profiler i området, noe som gir viktig referanse for validering. Den nye finkartleggingen, i kombinasjon med rasterdata for høydeforskjeller, muliggjør en effektiv visuell, kvalitativ og kvantitativ analyse over store områder (se Figur 19 for testområdet). Dette inkluderer studier av massebalanse, areal- og volummål, samt presis kvantifisering av tap av palsarealer. Videre gjør den detaljerte finkartleggingen det mulig å vurdere endringer i vegetasjon og arealtyper innenfor de fire definerte klassene: «pals», «termokarstinnsjø», «jordvannsmyr» og «torvringer». Denne metodikken ligger til grunn for det foreslåtte nye overvåkingsdesignet og vil være svært nyttig for å sammenligne geografiske endringer og kvantifisere tapet av palsarealer over tid.



Figur 18. Oversikt over geografisk dekningsområde for omløpsflybilder (rød), andre flybilder (lilla) og lidarprosjekter (blå). Dataene er innsamlet mellom 2019 og 2024. Utbredelsen av aktiv palsmyr fra grovkartleggingen er også vist i oransje på alle bildene som referanse.



Figur 19. Analyse av høydeendringer for Muvrrešjávri i perioden 2019–2023. Bildet til venstre viser RGB-ortofoto fra 2023, med seks tverrprofiler målt i felt under Palsmyr-pilotprosjektet. Bildet til høyre viser høydeforskjellen mellom bildematchingsdata (2023) og laserdata (2019). De hvite polygonene representerer arealer som er predikert som «pals» i finkartleggingen.

5. Opsjon 1 - Bruke historiske flybilder til å måle høydeendringer tilbake i tid

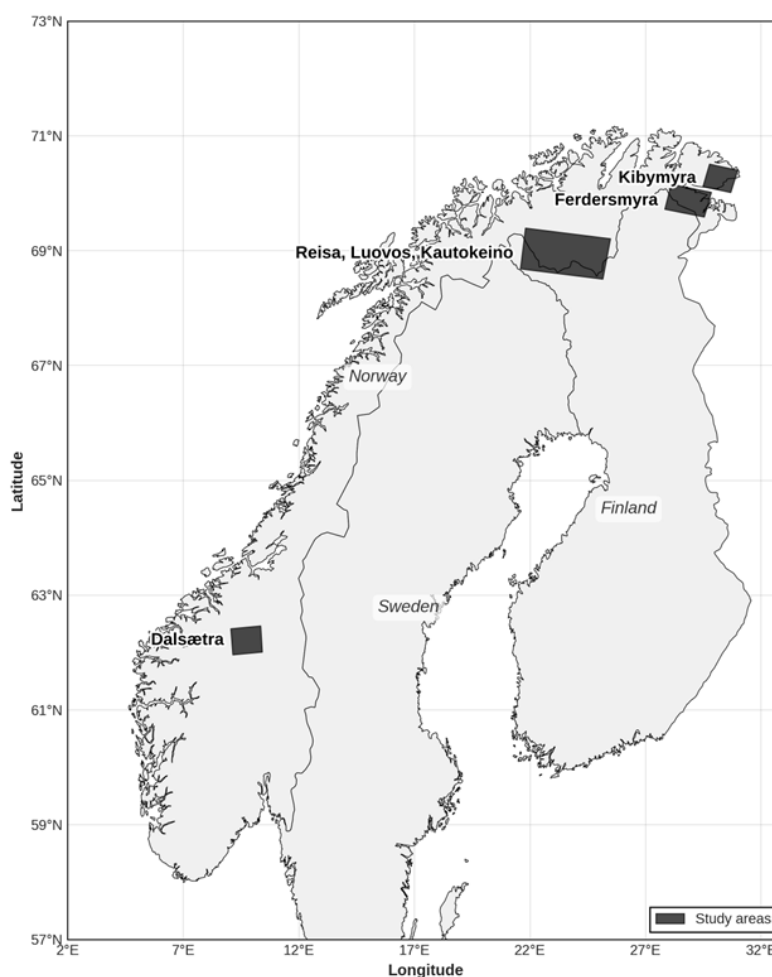
5.1. Introduksjon

Bruken av historiske flybilder gir en verdifull mulighet til å utvide den tidsmessige horisonten for overvåking av palsmyrer utover perioden som dekkes av moderne fjernmålings-teknologi. Ved å generere digitale overflatemodeller (DSM-er) fra arkivbilder som går tilbake til 1950–1980-årene, er det mulig å kvantifisere langsiktige høydeendringer og dokumentere degradering av palsmyrsystemer over flere tiår. Denne tilnærmingen er særlig viktig for å forstå tempo og mønster i tap av permafrost som respons på klimaendringer.

Historiske flybilder innebærer imidlertid betydelige tekniske utfordringer. Kvaliteten på avledede DSM-er varierer sterkt avhengig av bildenes alder, de opprinnelige opptaksspesifikasjonene og de fotogrammetriske prosesseringsmetodene som var tilgjengelige på opptakstidspunktet. Problemer som båndartefakter fra flystriper, systematiske vertikale forskyvninger og støy kan svekke nøyaktigheten og anvendbarheten til historiske høydedata. I denne delen vurderes kvaliteten på tilgjengelige historiske DSM-er for flere palsmyrer-undersøkellesområder i Norge, deres egnethet for endringsdeteksjon, og det presenteres eksempler på kvantitative analyser av høyde-, areal- og volumendringer der datakvaliteten tillater det.

5.2. Studieområder og tilgjengelige datasett

Historiske flybilder var tilgjengelige for fire hovedstudieområder som dekker sentrale palsmyr-lokaliteter i Norge (Figur 20). For hvert område ble det generert digitale overflatemodeller (DSM-er) fra arkivfotografier som spenner over flere tiår, sammen med moderne referansedatasett som gir et høykvalitets grunnlag for sammenligning. Studieområdene er Dalsætra (Folldal–Dovre), Ferdersmyra (Sør-Varanger), Kibymyra (Varanger) og et Finnmarksvidda-sett som er inndelt i Reisa, Luovos og Kautokeino.



Figur 20. Kart som viser plasseringen av studieområdene i Norge.

Analysen bygger på to hovedtyper data. For det første historiske DSM-er generert ved fotogrammetriske teknikker, som bildekorrelasjon basert på digitaliserte eldre flyfoto for spesifikke år ved hvert studieområde. For det andre nyere digitale terrengmodeller (DTM-er) avledet fra flybåren laserskanning (ALS) fra prosjektet Nasjonal detaljert høydemodell (NDH), som gir den mest pålitelige referansen for dagens terreng. Der det er tilgjengelig, er nyere DSM-er også inkludert. Datatilgjengelighet og tidsserier varierer mellom lokalitetene (Tabell 3): for eksempel Dalsætra 1963–2023; Ferdesmyra 1957–2020; Kibymyra 1970–2024; og Finnmarksvidda 1958–2023.

Tabell 3. Oversikt over studieområdene og datasettene brukt i analysen.

Område	DTM	DSM	Prosjektnavn
Dalsætra	2019	1963, 1980, 2016	NDH Folldal-Dovre 2019 Hedmark nord 2016 Alvdal-Rendalen 1980 Sunndal, Oppdal, Folldal, Dovre, Lesja 1963
Ferdesmyra	2020	1957, 1972, 2019	NDH Neiden 2020 Sør-Varanger 2019 Sør-Varanger 1972 Sør-Varanger-Nesseby 1957 Sør-Varanger 1957
Kibymyra	2006, 2016	1970, 2024	Varanger 2024 NDH Vadsø 2016 Vadsø 2006 Vardø Vadsø 1970
Finnmarksvidda (Reisa, Luovos og Kautokeino)	2019, 2020	1958, 2020, 2021, 2023	NDH Guovdageaidnu 2019 NDH Biedjovaggi 2020 NDH Reisadalen 2020 NDH Siebe 2019 Kautokeino 1958

5.3. Metoder

Metodikken for å analysere historiske flyfoto med mål om å måle høydeendringer i palsmyrer besto av en tretrinns prosess: (1) kvalitetsvurdering av historiske DSM-er, (2) en lokal arbeidsflyt for kvantitativ endringsdeteksjon, og (3) kvantifisering av endringer i palsareal og -volum.

Kvalitetsvurdering og brukbarhetsklassifisering

For å vurdere brukbarheten til hvert historiske DSM ble det gjennomført en systematisk kvalitetsanalyse basert på tre metoder:

1. Profilanalyse: høydeprofiler ble hentet ut fra stabilt, flatt terreng som ikke burde ha endret seg i løpet av studieperioden, for å identifisere systematiske vertikale forskyvninger, støy og båndartefakter fra flystriper.
2. Hillshade-sammenligning: hillshade-visualiseringer ble brukt til å kvalitativt vurdere hvor godt palsformasjoner er representert. Høy-kvalitets DSM-er viser tydelige landformer, mens lav-kvalitets datasett viser forvrengninger.
3. Differanseraster-analyse: differanserastre mellom historiske DSM-er og en moderne referanse-DTM eller DSM ble beregnet for å skille mellom systematiske feil og faktiske høydeendringer.

Basert på denne vurderingen ble hvert datasett klassifisert i én av tre kategorier:

- Eget: høykvalitets datasett som kan brukes direkte.
- Krever korrigering: datasett med systematiske feil som kan brukes etter lokale justeringer.
- Ikke egnet: datasett med betydelig støy eller artefakter, uegnet for kvantitative analyser.

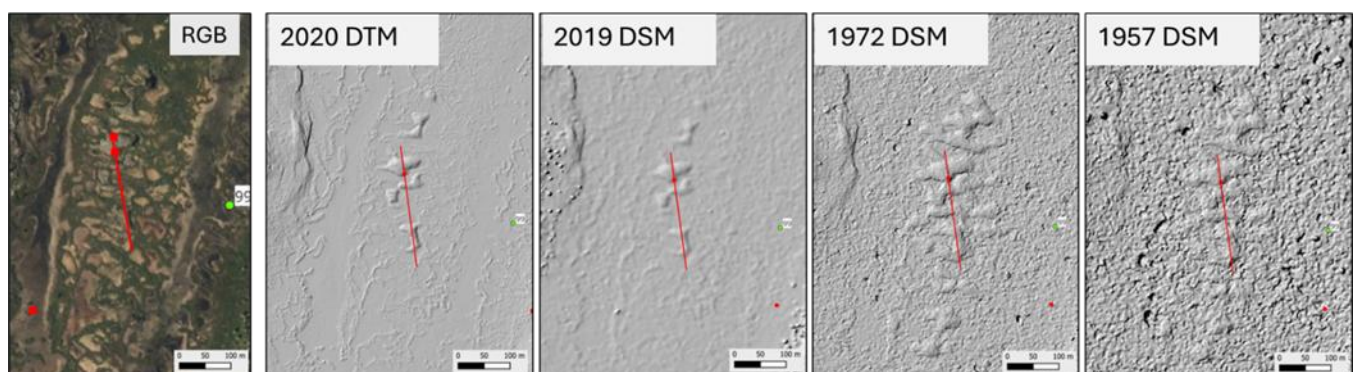
Lokal analysearbeidsflyt for endringsdeteksjon

På grunn av romlig variasjon i feil i historiske datasett ble all kvantitativ analyse utført på lokal skala, med fokus på individuelle palsformasjoner. Arbeidsflyten besto av fire hovedsteg, beskrevet nedenfor.

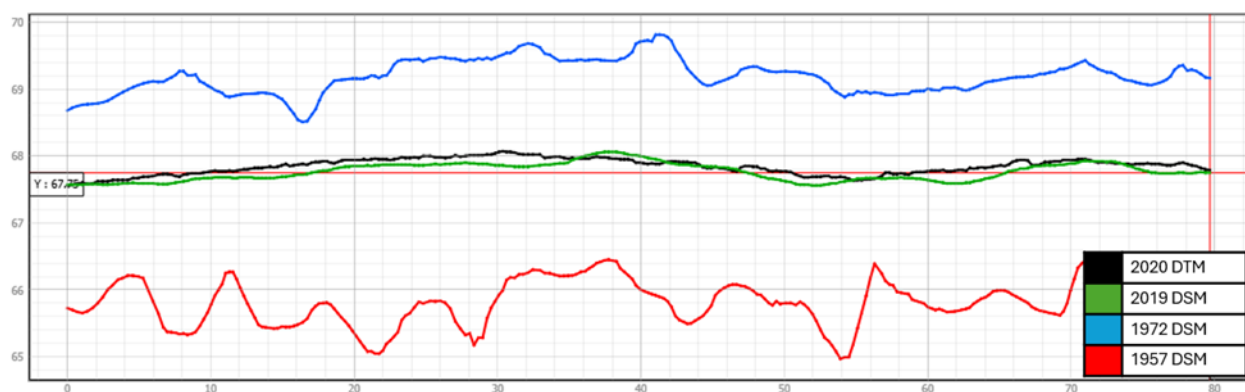
1. Datatilrettelegging og korrigering: Utsnitt til lokal utstrekning: historiske og moderne DSM-er ble klippet til et lokalt utsnitt (vanligvis 100 × 100 m til 500 × 500 m) som dekker palsene og omkringliggende stabilt terreng (Figur 21).
2. Korrigering av vertikal forskyvning: vertikale avvik mellom historiske og moderne DSM-er ble korrigert ved hjelp av en referansepunkt-tilnærming. Stabile referansepunkter (f.eks. fjell i dagen, mineralsk mark som ikke burde ha endret seg mellom tidsperiodene) ble identifisert ved bruk av ortofoto og hillshade-visualiseringer. Den mediane høydeforskjellen mellom det historiske og det moderne DTM eller DSM på disse punktene ble deretter beregnet og brukt som korreksjon på det historiske DSM-et (Figur 22). Denne lokale tilnærmingen var

nødvendig for å håndtere romlig varierende feil.

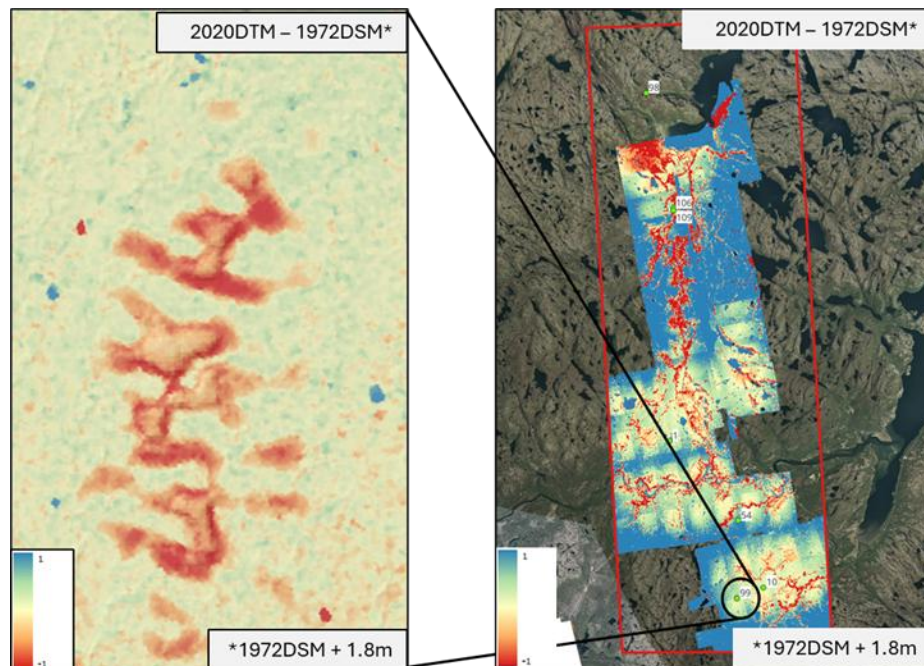
3. Beregning av høydeforskjell: etter vertikal justering ble høydeforskjellsrastrer (Figur 23) beregnet ved å trekke det korrigerte historiske DSM-et fra det moderne DTM- eller DSM-datasettet: $\Delta H = \text{DSM}_{\text{modern}} - \text{DSM}_{\text{historical (corrected)}}$
4. Avgrensning av pals: palsgrenser ble avgrenset for både moderne og historiske datasett. For moderne data ble høykvalitets DTM-er eller DSM-er brukt til å avlede egenskaper som helning, krumning og topografisk posisjonsindeks (TPI) som inngangsvariabler til segmenteringsalgoritmer. For historiske data baserte avgrensningen seg på en kombinasjon av høydeforskjellsrasteret og visuell tolkning av historiske ortofoto.
5. Beregning av areal og volum: (a) Arealendring: endringer i palsareal ble kvantifisert ved å sammenligne arealet av avgrensede polygoner mellom tidsperioder. (b) Volumendring: volumet av hver palsformasjon ble beregnet ved å måle volumet av haugen over et referanseplan definert av grensehøyden, som palsen reiser seg over. Det totale volumet ble beregnet ved å summere volumet til hver piksel over dette planet. For hver piksel i innenfor pals-polygonet ble høyden over referanseplanet beregnet som: $\Delta h_i = h_i - h_{\text{ref}}$ der h_i er høyden til piksel i i DSM-et. Det totale volumet V av palsformasjonen ble deretter beregnet ved å summere produktet av hver piksel sin høyde over referanseplanet og pikselarealet: $V = \sum(\Delta h_i \times A_{\text{pixel}})$ der A_{pixel} er arealet av én piksel, gitt av rasteroppløsningen. Volumendringen ble så beregnet som: $\Delta V = V_{\text{modern}} - V_{\text{historical}}$. Volumberegningen ble utført automatisk ved bruk av QGIS-pluginen "Volume Calculator" (REDcatch, 2020).



Figur 21. Multitemporalt terrengbilde av en palsaformasjon på Ferdesmyra. RGB-ortofoto (venstre) sammen med hillshade av 2020-DTM og DSM-er fra 2019, 1972 og 1957. Den røde linjen fungerer som en referanseseksjon gjennom årene; røde/grønne punkter er referansemarkører.



Figur 22. Høydeprofiler over et flatt referanseområde på Ferdesmyra, brukt til å estimere vertikale forskyvninger mellom datasett: 2020-DTM (svart), 2019-DSM (grønn), 1972-DSM (blå) og 1957-DSM (rød).



Figur 23. Høydeforskjellskart mellom DTM fra 2020 og DSM fra 1972, etter at en vertikal justering på +1.8 m er anvendt på 1972-overflaten. Bildet til høyre viser det fullstendige utsnittet over et ortofoto, der fargene representerer høydeforskjeller (2020–1972) fra –1 til +1 m. Bildet til venstre viser en zoomet detalj som fremhever mikorelieffet, hvor positive verdier (røde farger) indikerer forhøyninger og negative verdier (blå farger) indikerer forsenkninger.

5.4. Vurdering av datakvalitet

Dalsætra

Ved Dalsætra fungerte DTM fra 2019 som et høykvalitets referansegrunnlag. DSM fra 2016, til tross for en ikke-uniform vertikal forskyvning, ble vurdert som brukbar etter lokale korrigeringer. DSM fra 1980 var preget av støy og båndartefakter fra flystriper, noe som begrenset bruken til sammenligninger i grov skala. DSM fra 1963 var for uregelmessig og degradert til å kunne brukes i systematiske analyser. Hillshade- og differanserasteranalyser bekreftet disse vurderingene.

Ferdesmyra

På Ferdesmyra var både DTM fra 2020 og DSM fra 2019 av høy kvalitet og egnet for overvåking. DSM fra 1972 hadde en betydelig forskyvning og lokale variasjoner, men kunne gi innsikt i historisk morfologi etter lokale justeringer. DSM fra 1957 var svært uregelmessig og uegnet for systematisk analyse.

Kibymyra

På Kibymyra var DTM fra 2016 et stabilt og pålitelig referansegrunnlag. DTM fra 2006 hadde en systematisk skjevhet som kunne korrigeres. DSM fra 2024 var svært støyende og kun av begrenset lokal verdi. En uvanlig observasjon var de nesten identiske høydeverdiene mellom DTM 2006 og DTM 2016, der differansekart viste flere artefakter enn reelle endringer.

Reisa, Luovos, and Kautokeino

I det omfattende området Reisa, Luovos og Kautokeino var moderne datasett (2019–2023) av svært god kvalitet og krevde minimal korrigering. Det historiske DSM-et fra 1958 for Luovos viste tydelige båndartefakter fra flystriper, noe som begrenset bruken til kvalitativ tolkning etter målrettede lokale tilpasninger. DSM-ene fra 2020 og 2021 viste også striping-artefakter i regional skala, men var nyttige for lokal overvåking etter justering.

5.5. Kvantitativ endringsdeteksjon – eksempel

Arealendring på Ferdesmyra (1972–2020)

Ved å bruke differanserasteret (2020-DTM – 1972-DSM) for å avgrense den historiske utbredelsen av palsformer, var det mulig å kartlegge den romlige fordelingen av palshauger slik de eksisterte i 1972, og sammenligne dette med deres nåværende utbredelse i 2020. I det utvalgte eksempelområdet viste analysen et betydelig tap av palsareal over

den 48 år lange perioden (Figur 24). Den historiske utbredelsen fra 1972 dekket et areal på 12 250 m², bestående av flere sammenhengende palshauger arrangert i et omtrentlig lineært mønster langs myra. I 2020 var det pals-dekkede arealet redusert til 1 740 m², noe som tilsvarer et tap på 10 510 m², eller omtrent 86 % av den opprinnelige utbredelsen. Det romlige mønsteret av tap var ikke homogent. Noen palshauger hadde forsvunnet fullstendig og etterlatt seg kun flate, våte myroverflater eller grunne søkk som trolig representerer tidligere termokarst-sjøer. Andre hauger hadde fragmentert til mindre, isolerte rester, med tapet konsentrert langs kantene og i områder der den opprinnelige palshaugen hadde vært tynnere. Enkelte områder i sentrum av de største haugene viste relativ stabilitet.

Volumendring på Ferdesmyra (1972–2020)

Etter arealanalysen ble det gjennomført en volumetrisk analyse for å kvantifisere de tredimensjonale endringene i palshaugene (Figur 25). Ved bruk av DTM fra 2020 og det korrigerste DSM fra 1972 ble volumet av palsformasjonene beregnet for begge tidsperiodene for å bestemme den totale volumendringen. Det totale volumet av palsformasjonene i 1972 ble beregnet til 11 438,1 m³. I 2020 var dette volumet redusert til 806,9 m³. Dette tilsvarer et totalt volumtap på 10 631,2 m³, eller omtrent 93 % av det opprinnelige volumet fra 1972. Den romlige fordelingen av volumtapet var ikke jevnt over palsformasjonene. Tapet var sterkest konsentrert langs kantene av haugene. De sentrale kjernene i de større haugene opplevde en mindre reduksjon i volum sammenlignet med ytterkantene. Denne volumetriske analysen kvantifiserer det totale massetapet fra palssystemet og viser en omfattende transformasjon av disse permafrostlandformene over den 48 år lange perioden.

5.6. Diskusjon

Datakvalitet og brukbarhet

Kvalitetsvurderingen avdekket betydelig variasjon i brukbarheten til de historiske DSM-ene. Datasett fra 2000-tallet og nyere (f.eks. 2006–2024) var generelt av akseptabel kvalitet, med systematiske skjevheter som kunne korrigeres gjennom lokale justeringer. Disse datasettene beholdt ofte tilstrekkelig detaljgrad til å identifisere og overvåke palsformer på en pålitelig måte. Datasett fra 1970- og 1980-tallet var mer variable: noen viste akseptabel kvalitet i enkelte områder, mens andre var sterkt påvirket av båndartefakter fra flystriper og støy. Datasett fra 1950- og 1960-tallet var i de fleste tilfeller for degraderte til å brukes i kvantitative analyser, men kunne likevel gi kvalitativ historisk kontekst gjennom visuell tolkning av originalbildene. Det er verdt å nevne at enkelte nyere DSM-er fra 2024 viste svært dårlig kvalitet, noe som indikerer at moderne datasett ikke alltid er pålitelige, og at DTM-er gir det mest robuste datagrunnlaget for denne typen studier.

Båndartefakter fra flystriper var det mest vanlige og problematiske problemet som ble identifisert. Disse artefaktene oppstår fra ujevnheter i bildeoverlapp, belysning og fotogrammetrisk prosessering mellom tilstøtende flylinjer, og resulterer i systematiske stripemønstre i det avledede DSM-et. I flatt terreng fremstår disse artefaktene som vekslende bånd med høyere og lavere høyder, noe som kan forveksles med reell topografisk variasjon. I områder med mer kompleks topografi ble artefaktene lagt oppå de naturlige landformene, noe som gjorde tolkningen mer krevende. Lokale korrigeringsprosedyrer kunne redusere effekten i enkelte tilfeller, men gjennomførbarheten av slik korrigering avhang av alvorlighetsgraden og den romlige variasjonen i artefaktene.

Systematiske vertikale forskyvninger var også vanlige, særlig i eldre datasett. Disse forskyvningene kan skyldes feil i bakkekontroll, geodetiske datum-inkonsistenser eller forskjeller i referanseellipsoiden brukt under prosesseringen. I motsetning til båndartefakter var vertikale forskyvninger ofte mer ensartede og kunne korrigeres relativt enkelt ved å referere til stabile terrengpunkter, selv om slike faste punkter ikke alltid var lett identifiserbare. Den lokale korrigeringsstilnæringen beskrevet i Seksjon 3.3.2 viste seg å være effektiv for å fjerne slike forskyvninger og muliggjøre kvantitativ endringsdeteksjon.

Tilfeldig støy, preget av et salt-og-pepper-mønster eller et kornete overflatepreg, var mest uttalt i de eldste datasettene (1950–1960-tallet). Denne støyen reflekterer sannsynligvis begrensninger i den opprinnelige fotokvaliteten, skanneoppløsningen og bildekorrelasjonsalgoritmene. I tilfeller der støy dominerte signalet, ble datasettet vurdert som uegnet for systematisk analyse.

Analyse av volum- og arealendringer

Den volumetriske analysen som presenteres i denne studien viser verdien av volum som en helhetlig metrikk for å kvantifisere endringer i palser. I motsetning til arealbaserte mål, som kun fanger den horisontale utbredelsen av

palsene, eller gjennomsnittlige høydeendringer, som kan skjule romlig variasjon, integrerer volumetriske beregninger både den romlige utbredelsen og den vertikale dimensjonen i ett enkelt, fysisk meningsfullt mål.

Resultatene fra Ferdesmyra er illustrerende. Analysen dokumenterte et totalt arealtap på omtrent 86 % over den 48-årige perioden. Det tilsvarende volumtapet var enda mer betydelig, på omtrent 93 %. Dette misforholdet viser at palsene ikke bare krympet i horisontal utstrekning, men også sank i høyde. Denne doble prosessen med horisontal tilbaketrekning og vertikal kollaps er karakteristisk for palsnedbrytning drevet av permafrost-tining. Den volumetriske metrikken, ved å fange begge komponentene, gir et mer fullstendig bilde av endringens omfang.

Implikasjoner for overvåking og forvaltning

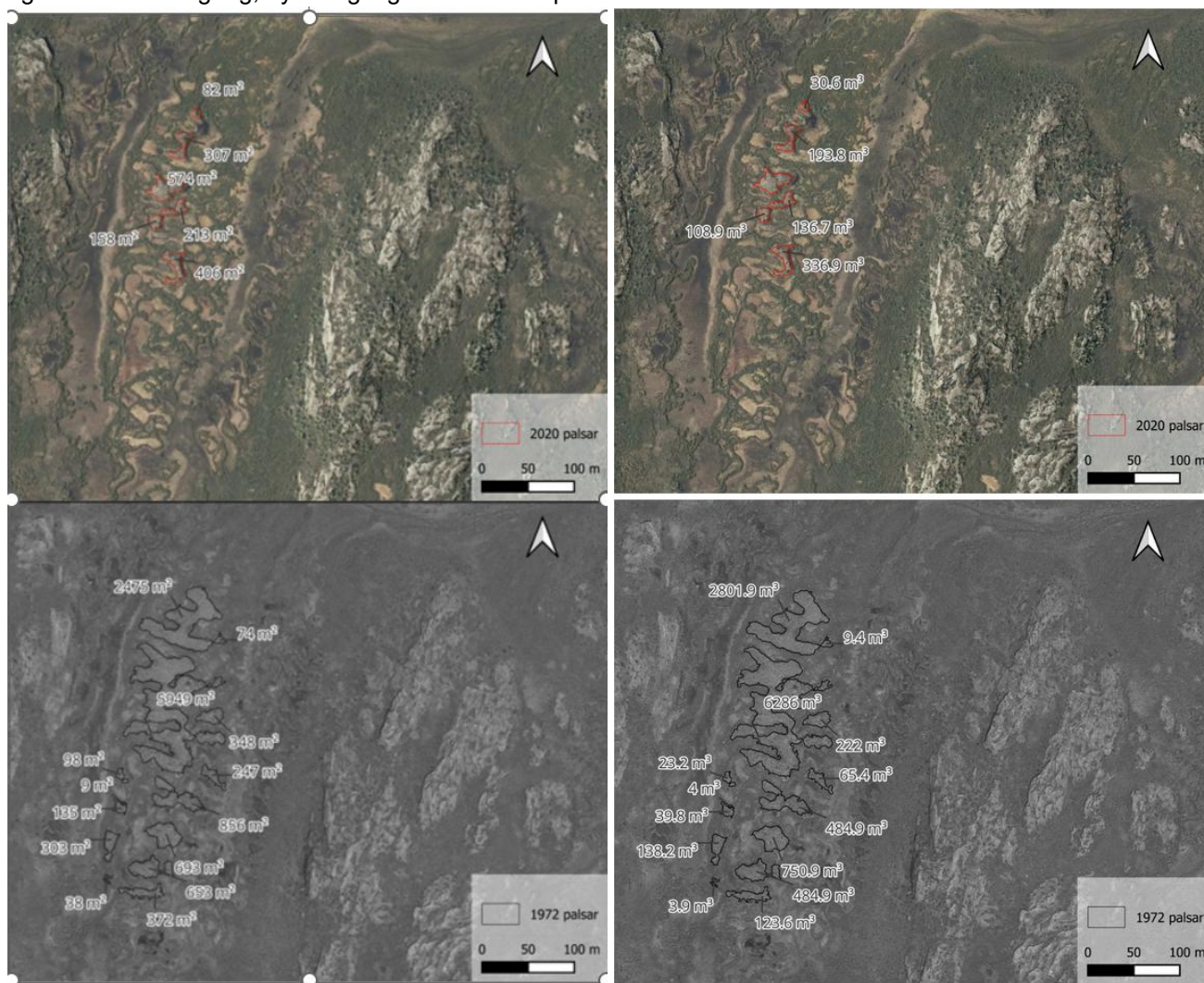
Metodene og resultatene som presenteres i denne rapporten har flere implikasjoner for utformingen av fremtidige overvåkingsprogrammer og for naturforvaltningen. For det første viser den vellykkede bruken av lokale korreeringsprosedyrer at mange historiske DSM-er, til tross for sine begrensninger, kan reddes for kvantitativ analyse med riktige metoder. Dette utvider den tidsmessige rammen for overvåking betydelig og gjør det mulig å dokumentere langtidsutvikling som ikke ville være synlig ved bruk av kun moderne datasett.

For det andre gir integrasjonen av areal-, høyde- og volumetriske metrikker en mer omfattende og nyansert forståelse av palsendringer enn det noen enkeltmetrikker kan tilby. Overvåkingsprogrammer bør sikte mot å samle inn data som støtter alle tre typer analyser, ettersom hver av dem gir unike innsikter i prosesser og mønstre i nedbrytningen.

For det tredje har de romlige endringsmønstrene—særlig det dominerende tapet langs palsakantene og den relative stabiliteten i palskjernene—implikasjoner for tolkningen av fjernmålte data og for prediksjon av framtidige endringer. Kanteffekter og lateral varmeoverføring ser ut til å være sentrale drivere for nedbrytningen, og modeller eller overvåkingsmetoder som tar hensyn til disse romlige prosessene vil sannsynligvis være mer presise.

Til slutt understreker dokumentasjonen av omfattende og betydelig volumtap (f.eks. 74 % på Ferdesmyra over 48 år) behovet for fortsatt overvåking og betydningen av palsmyrer som indikatorer på klimaendringer. Den pågående

nedbrytningen av disse systemene har konsekvenser ikke bare for biologisk mangfold og økosystemfunksjon, men også for karbonlagring, hydrologi og kulturlandskapene i Nord-Fennoskandia.



Figur 24. Arealendring (to til venstre) og volumendring (to til høyre) i pals-utbredelse mellom 1972 og 2020 på Ferdesmyra. Øverst: ortofoto fra 2020 med kartlagte palspolygoner (rød) og individuelle haugarealer. Nederst: ortofoto/DSM fra 1972 med historiske palspolygoner (svart).

Begrensninger og anbefalinger for videre arbeid

Flere begrensninger ved denne studien bør anerkjennes. For det første var kvaliteten på de historiske DSM-ene svært variabel, både mellom og innenfor studieområdene, og ikke alle datasett kunne brukes til kvantitativ analyse. Brukbarhetsklassifiseringene presentert i Seksjon 4.1 gir veiledning, men ytterligere datasett fra andre tidsperioder eller lokaliteter vil kreve uavhengig kvalitetsvurdering.

For det andre er de lokale korrigeringsprosedyrene, selv om de er effektive, arbeidskrevende og krever nøye utvalg av stabile referansepunkter. Automatiserte eller semi-automatiserte korrigeringsmetoder kan forbedre effektivitet og konsistens, men de må kunne håndtere den romlige variasjonen i vertikale forskyvninger.

For det tredje er et vesentlig forbehold fraværet av feltmålt referansedata for palsvolum. Uten slike bakkemålinger kan nøyaktigheten til den fjernmålingsbaserte volumestimeringen ikke fullt ut valideres.

For å håndtere disse begrensningene og bygge videre på funnene i denne studien kan flere anbefalinger foreslås for fremtidig arbeid:

1. Prioriter reprosessering av historiske bilder: I tilfeller der kvaliteten på eksisterende historiske DSM-er er dårlig, bør man vurdere å reprosessere de opprinnelige skannede flybildene.

2. Utvid den tidsmessige og geografiske deknningen: Ytterligere historiske datasett fra 1970–1990-tallet bør evalueres og inkluderes i analysen der kvaliteten tillater det.
3. Gjennomfør feltbaserte volummålinger: For å validere de volumestimatene som er avledet fra fjernmåling, bør framtidig arbeid inkludere feltkampanjer for direkte å måle volumet av utvalgte palsformasjoner. Dette vil gi nødvendige bakke-data for å vurdere nøyaktigheten og påliteligheten til metodene for volumetrisk endringsdeteksjon.

5.7. Konklusjoner

Bruken av historiske flyfoto for å måle høydeendringer i palsmyrsystemer er både lovende og utfordrende. Høykvalitets moderne referansedatasett (DTM-er og DTM-er fra 2000-tallet og senere) gir et pålitelig grunnlag for sammenligning, og flere historiske datasett fra 1970- og 1980-tallet har fortsatt tilstrekkelig kvalitet til å støtte kvantitativ endringsdeteksjon etter lokale korrigeringer. Eldre datasett fra 1950- og 1960-tallet er derimot generelt for degraderte til kvantitativ analyse, selv om de fortsatt kan gi verdifull kvalitativ dokumentasjon av landskapsendringer gjennom visuell tolkning av originalbildene.

Den systematiske kvalitetsvurderingen som ble gjennomført i denne studien understreker viktigheten av nøye datavurdering og målrettede korrigeringsprosedyrer. Båndartefakter fra flystriper, systematiske vertikale forskyvninger og tilfeldig støy kan i stor grad begrense brukbarheten til historiske DSM-er, men med passende metoder kan mange datasett likevel redde for meningsfull analyse.

Integrasjonen av areal-, høyde- og volumetriske metrikker gir et helhetlig bilde av palsendringer. På Ferdesmyra dokumenterte analysen et tap på 86 % av det pals-dekkede arealet og 93 % av palsvolumet mellom 1972 og 2020. Disse resultatene samsvarer med omfattende pals-degradering dokumentert andre steder i Norge og understreker sårbarheten til disse økosystemene i møte med klimaoppvarming.

De romlige endringsmønstrene—der de største tapene oppstår langs palsakantene—gir innsikt i nedbrytningsmekanismene og antyder at randeffekter og lateral varmeoverføring er sentrale drivere. At små restkjerner av palser fortsatt består, indikerer at fullstendig forsvinning er en gradvis prosess som sannsynligvis vil strekke seg over flere tiår.

Sammen med høykvalitets kartlegging av dagens pals-utbredelse og overflatetyper gir integrasjonen av historiske data et mer komplett bilde av permafrostendringer i Norge, og støtter både vitenskapelig forståelse og naturforvaltning. Videre overvåking, som kombinerer moderne fjernmålings-teknologier med historiske arkiver, vil være avgjørende for å spore framtidige endringer og informere bevarings- og tilpasningsstrategier.

6. Leveransen

Følgende filer ble levert med rapporten:

Filnavn	Format	Innhold
Grovkartlegging		
palsmyr-grovkartlegging-referansdata_norge_20251201_25833.gpkg	Geopackage	Aktive palsmyr og palsrester
palsmyr-grovkartlegging-sammenslått-v2_norge_20251201_25833.gpkg	Geopackage	Sammenslåtte segm. (grovkartlegging)
palsmyr-grovkartlegging-sammenslått-uten-indre-ringer-v2_norge_20251201_25833.gpkg	Geopackage	Sammenslåtte segm. uten indre ringer
palsmyr-grovkartlegging-referansdata_norge_20251201_25833.gpkg	Geopackage	Referansdata
palsmyr-grovkartlegging-v2_norge_20251201_25833.tif	GeoTIFF	Originale rasterprediksjoner (aktive palsmyr og palsrester)
palsmyr-grovkartlegging-modellvektorer_norge_20251201_25833.pkl	Pickle	Modellvektorer
Finkartlegging		
palsmyr-finkartlegging-v2_norge_20251201_25833.gpkg	Geopackage	Detaljerte klasser (jordvannsmyr, pals, torvring og termokarstinnsjø i de 1000 største palsmyrområder
palsmyr-finkartlegging-v2_norge_20251201_25833.tif	GeoTIFF	Originale rasterprediksjoner
palsmyr-finkartlegging-referansdata_norge_20251201_25833.gpkg	Geopackage	Referansdata
palsmyr-finkartlegging-random-forest-classifier-modellvektorer_norge_20251201.joblib	Joblib	Modellvektorer
Metadata		
Palsmyr-metadata-flybilder-mosaikk_norge_25833.gpkg	Geopackage	Metadata
Palsmyr-metadata-hoyededata-mosaikk_norge_25833.gpkg	Geopackage	Metadata

Alle rasterprodukter er levert med stilfiler for QGIS (QML og SLD) som kan lastes opp i QGIS eller ArcGIS for å visualisere produktene slik de er presentert i rapporten.

Skriptene for grovkartleggingen og finkartleggingen er gjort tilgjengelig på Miljødirektoratets GitHub-side.

Den eneste forskjellen mellom v2 og de originale filene er at metadata om hvilke flybilder og høydedata som er brukt i RGB- og DTM-mosaikken, nå er inkludert i produktene (både i rasterprediksjoner og GeoPackage-filene.

Geopackage filene har kolonner skrevet på norsk, og forståelig navn sånn at vi vurderer at det ikke er behov for å forklare noe mer om disse produktene. Litt mer informasjon om metadata for raster produktene er gitt under.

Fil: palsmyr-grovkartlegging-v2_norge_20251201_25833.tif (oppløsning 8 m)

Grovkartlegging av palsmyr i Norge. Segmentering av aktive palsmyrer og palsrester. Ensemble av 7 dyplæringsmodeller. Prediksjoner med færre enn 4 enige modeller er forkastet.

Band	Innhold
Band 1	Dominant klasse (class_id)
Band 2	Modellenighet (antall av 7)
Band 3	Datafangstår DTM
Band 4	Datafangstår RGB

Band 1:

Verdi	Arealtype
0	Aktive palsmyr
1	Palsrester
255	NoData

Band 2:

Verdi	Modellenighet (antall av 7)
4	4
5	5
6	6
7	7
255	NoData

Band 3 og 4:

Verdier mellom 0 og 255 tilsvare verdier mellom år 2000 og 2255.

Fil: palsmyr-finkartlegging-v2_norge_20251201_25833.tif (oppløsning 1m)

Band	Innhold
Band 1	Dominant klasse (class_id)
Band 2	Sannsynlighet dominant klasse
Band 3	Sannsynlighet bakgrunn
Band 4	Sannsynlighet jordvannsmyr
Band 5	Sannsynlighet pals
Band 6	Sannsynlighet termokarstinnsjø
Band 7	Sannsynlighet torvring
Band 8	Datafangstår DTM
Band 9	Datafangstår RGB

Band 1:

Verdi	Arealtype
1	Bakgrunn
2	Jordvannsmyr
3	Pals
4	Termokarstinnsjø
5	Torvring
255	NoData

Band 2:

Verdi	Sannsynlighet dominant klasse
0-100	

Band 3-7:

Verdi	Sannsynlighet per klasse
0-100	

Band 8 og 9:

Verdier mellom 0 og 255 tilsvarer verdier mellom år 2000 og 2255.

7. Referanser

Arnesen, G., Sivertsen, B. & Plathe, E. (2023). Sluttrapport etter 20 år med overvåking av seks områder med palser i Norge. Sállir rapport 35.

Borge, A. F., Westermann, S., Solheim, I., Etzelmüller, B. (2017) Strong degradation of palsas and peat plateaus in northern Norway during the last 60 years. The Cryosphere., 11 (1), 1-16, DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/tc-11-1-2017>

Groesz F. mfl. (2024a). Palsmyr Pilot Muvrrešjávri. Prosjektnummer: 17964. FIELD.

Groesz F. mfl. (2024b). Kartlegging og overvåking av palsmyr med fjernmåling. Framdriftsrapport 2024. Prosjektnummer: 18976. FIELD.

Hofgaard, A. (2004). Etablering av overvåkingsprosjekt på palsmyrer. NINA Oppdragsmelding 841.

Hofgaard, A., Kyrkjeeide, M. O. & Myklebost, H. E. (2020). Palsmyr – en naturtype vi er i ferd med å miste. NINA Temahefte 80. Norsk institutt for naturforskning.

Pajunen, H., (2005): Mires. In: M. Seppälä, (ed.): The Physical Geography of Fennoscandia. Oxford University Press. Oxford . 77–95.

PARVIAINEN, M. and LUOTO, M. (2007), CLIMATE ENVELOPES OF MIRE COMPLEX TYPES IN FENNOSCANDIA. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 89: 137-151. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2007.00314.x>

QGIS.org, 2025. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>

REDcatch GmbH. (2020). Volume Calculation Tool for QGIS (Version 0.4). Available from https://github.com/REDcatch/Volume_calculation_for_QGIS3

Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. arXiv:1505.04597.

Ruuhijärvi, R., Salminen, P., & Tuominen, S. (2022) Distribution range, morphological types and state of palsa mires in Finland in the 2010s. Suoseura — Finnish Peatland Society Suo 73(1): 1–32.

Trang T. Le, Weixuan Fu and Jason H. Moore (2020). Scaling tree-based automated machine learning to biomedical big data with a feature set selector. Bioinformatics.36(1): 250-256.

Field

