

2443

NINA Rapport

Utvikling av grøftekart i myr og torvmark i Norge med hjelp av dyplæring

Ulrika Jansson, Vegar Bakkestuen, Anders Lyngstad, Ida Marielle Mienna



NINAs publikasjoner

NINA Rapport

Dette er NINAs ordinære rapportering til oppdragsgiver etter gjennomført forsknings-, overvåkings- eller utredningsarbeid. I tillegg vil serien favne mye av instituttets øvrige rapportering, for eksempel fra seminarer og konferanser, resultater av eget forsknings- og utredningsarbeid og litteraturstudier. NINA Rapport kan også utgis på engelsk, som NINA Report.

NINA Temahefte

Heftene utarbeides etter behov og serien favner svært vidt; fra systematiske bestemmelsesnøkler til informasjon om viktige problemstillinger i samfunnet. Heftene har vanligvis en populærvitenskapelig form med vekt på illustrasjoner. NINA Temahefte kan også utgis på engelsk, som NINA Special Report.

NINA Fakta

Faktaarkene har som mål å gjøre NINAs forskningsresultater raskt og enkelt tilgjengelig for et større publikum. Faktaarkene gir en kort framstilling av noen av våre viktigste forskningstema.

Annen publisering

I tillegg til rapporteringen i NINAs egne serier publiserer instituttets ansatte en stor del av sine forskningsresultater i internasjonale vitenskapelige journaler og i populærfaglige bøker og tidsskrifter.

Utvikling av grøftekart i myr og torvmark i Norge med hjelp av dyplæring

Ulrika Jansson
Vegar Bakkestuen
Anders Lyngstad
Ida Marielle Mienna

Jansson, U., Bakkestuen, V., Lyngstad, A., & Mienna, I.M. 2024.
Utvikling av grøftekart i myr og torvmark i Norge med hjelp av
dyplæring. NINA Rapport 2443. Norsk institutt for naturforskning.

Oslo, mars 2024

ISSN: 1504-3312

ISBN: 978-82-426-5252-2

RETTIGHETSHAVER

© Norsk institutt for naturforskning

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

KVALITETSSIKRET AV

Magni Olsen Kyrkjeeide

ANSVARLIG SIGNATUR

Forskningsjef Lajla Tunaal White (sign.)

OPPDRAKSGIVER(E)/BIDRAGSYTER(E)

Miljødirektoratet / SATS (Forskningsrådet)

OPPDRAKSGIVERS REFERANSE

M-2734|2024 / 160022/F40

KONTAKTPERSON(ER) HOS OPPDRAGSGIVER/BIDRAGSYTER

Kjell Tore Hansen

FORSIDEBILDE

Eksempel på resultat av dyplæringsmodell fra Levanger, der hvite
områder indikerer høyest sannsynlighet for grøfter © NINA

NØKKEWORD

Norge

Myr, Våtmark, Torvmark

Skog

Grøfter, Drenering

Kartlegging

Forvaltning

Økologisk tilstand

Fjernmåling og Lidar

Kunstig intelligens

KEY WORDS

Norway

Mires, Wetland, Peatland

Forest

Ditches and Drainage

Ecological condition

Management

Remote sensing and Lidar

Artificial intelligence

KONTAKTOPPLYSNINGER

NINA hovedkontor

Postboks 5685 Torgarden
7485 Trondheim
Tlf: 73 80 14 00

NINA Oslo

Sognsveien 68
0855 Oslo
Tlf: 73 80 14 00

NINA Tromsø

Postboks 6606 Langnes
9296 Tromsø
Tlf: 77 75 04 00

NINA Lillehammer

Vormstuguvegen 40
2624 Lillehammer
Tlf: 73 80 14 00

NINA Bergen

Thormøhlens gate 55
5006 Bergen
Tlf: 73 80 14 00

www.nina.no

Sammendrag

Jansson, U., Bakkestuen, V., Lyngstad, A. & Mienna, I.M. 2024. Utvikling av grøftekart i myr og torvmark i Norge med hjelp av dyplæring. NINA Rapport 2443. Norsk institutt for naturforskning.

Store arealer myr og torvmark i Norge har blitt grøftet og dyrket opp til jordbruksmark og en betydelig andel er også grøftet for skogproduksjon. Det er et stort behov for et omforent kunnskapsgrunnlag i Norge når det gjelder arealomfang og arealendring av myr over tid og en oversikt over hvor mye av myrarealene som er drenert etter grøfting. Kartfestet informasjon om omfang og plassering av grøfting er viktig i kommunal og regional arealplanlegging. Dette vil også gi bedre oversikt over økologisk tilstand i myr og torvmark, trusler mot naturverdier, effekter på økosystemtjenester som karbonlagring og hydrologi, og hvilke arealer som kan egne seg for restaureringstiltak.

Formålet med prosjektet var å utvikle en mulig produksjonslinje for et heldekkende nasjonalt fjernmålingsbasert kart for grøfter i myr, samt å gi et kostnadsestimat for å lage et heldekkende grøftekart for Norge. For å utvikle og teste en modell for å detektere grøfter og fremskaffe heldekkende fjernmålingsbaserte kartprodukter over grøfter har vi brukt data fra studieområder i Sørøst-Norge (Oslo, Nordre Follo, Moss, Finnemarka og Kongsberg), og i Trøndelag (Levanger). Vi brukte en høyoppløselig terrengmodell og annoterte/digitaliserte lineære strukturer som lå slik i terrenget at de visuelt ble tolket som grøfter. Dette ble gjort for areal i studieområdene som var klassifisert som myr eller skog i arealresurskart AR5. Grøftemodellen er utviklet for å dekke grøfter i åpen myr, samt i tresatt myr og skog (først og fremst torvmarksskog), men ikke grøfter i jordbruksmark eller langs veier. Kjørespor eller grøfter langs mindre skogsbilveier ble heller ikke inkludert.

Vi benyttet LiDAR-data som fundament for å konstruere en stabel av prediktorvariabler (terrengindekser) for grøftemodelleringen. I arbeidet med å utvikle grøftemodellen har vi anvendt avanserte dyplæringsteknikker, spesielt en modell kjent som U-Net. U-Net-modellen er spesielt designet for å håndtere billedata, og dens arkitektur er optimalisert for å identifisere mønstre og strukturer i komplekse bilder. Dette gjør den særlig egnet for å analysere terrengmodeller og identifisere grøfter basert på LiDAR-data, som gir høyoppløselig tredimensjonal informasjon om landskapet. For å trene U-Net-modellen, har vi brukt et datasett bestående av høyoppløselige terrengmodeller fra utvalgte områder, kombinert med nøyte annoterte grøfter. Dette tillot modellen å lære hvilke trekk og mønstre som indikerer tilstedeværelsen av grøfter i landskapet.

Dyplæringsteknikker viser seg å være effektive for å gi treffsikre data om grøfting. Modellens ytelse var sentralt i evalueringen av vår tilnærming til å kartlegge grøfter ved bruk av dyplæring og LiDAR-data. Den mest effektive modellen viste på en treningsnøyaktighet på 99,6 % og en valideringsnøyaktighet på 99,4 %. Grøftemodellen kan også identifisere grøfter i jordbrukslandskap, men det er behov for videreutvikling av modellen i slike varierte miljøer. Lignende modeller kan utvikles for å detektere andre linjeformete strukturer, som for eksempel kjørespor.

Inngrep i myr er ikke jevnt fordelt geografisk eller regionalt. Lavlandet (boreonemoral og sørbo-real sone) har størst arealbruksendring, og her utgjør oppdyrking, nedbygging og torvtekt en betydelig andel. I mellomboreal sone utgjør drenering for skogbruksformål en større andel av inngrepene, men oppdyrking er fortsatt en sentral påvirkningsfaktor. I nordboreal sone er det generelt mindre påvirkning fra grøfting og drenering for skogbruksformål den klart dominerende kategorien inngrep. I lavalpin sone er flest inngrep knytta til infrastruktur og utbyggingsprosjekter.

Flere utviklingsprosjekter basert på heldekkende kart over grøftet myr og våtmark samt koblinger mot andre datasett og modeller vil gi nyttig kunnskap til forvaltning og internasjonal rapportering om økologisk tilstand i myr og for klimagassberegninger. Denne rapporten beskriver flere anbefalinger for oppfølging av dette arbeidet med utvikling av slike dyplæringsmodeller.

Ulrika Jansson (ulrika.jansson@nina.no), Vegar Bakkestuen (vegar.bakkestuen@nina.no) og Ida Marielle Mienna (ida.mienna@nina.no), NINA, Sognsveien 68, 0855 Oslo, Anders Lyngstad (anders.lyngstad@nina.no), NINA, Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim

Abstract

Jansson, U., Bakkestuen, V., Lyngstad, A., & Mienna, I.M. 2024. Developing maps of ditches in wetlands and peatlands in Norway using deep learning. NINA Report 2443. Norwegian Institute for Nature Research.

Large areas of wetlands and peatlands in Norway have been drained and converted into agricultural and building land, as well as a significant portion that has been drained for forestry purposes. There is a substantial need for a reconciled knowledge base over the extent and changes in the area of wetlands and peatlands over time, including an overview of the extent of the areas that have been drained through the digging of ditches. Mapped information about the extent of drained wetlands and the placement of drainage ditches is important for better informed municipal and regional land-use planning. It will also provide a better understanding of the ecological condition of mires and peatlands, threats to natural values, effects on ecosystem services such as carbon storage and hydrology, and which areas may be suitable for restoration measures.

The purpose of this project was to develop a possible production line for a comprehensive national remote sensing-based map of ditches in wetlands and peatlands, and to provide a cost estimate for creating a national map of wetland and forest drainage for Norway. To develop and test a model for detecting ditches and providing comprehensive remote sensing-based map products of these, we used data from study areas in South-east Norway and in Trøndelag. We used high-resolution terrain models and annotated/digitized linear structures that were visually interpreted as ditches in the terrain. This was done for areas classified as peatland or forest in official land use maps. The model covers ditches in open wetlands and peatlands, as well as in wooded peatlands and forests (primarily peatland forests) but does not cover agricultural land. Tire tracks or ditches along minor forest roads were also not included.

We used LiDAR data as a foundation to construct a stack of predictor variables (terrain indices) for modelling ditches. In the development of the ditch model, we have applied advanced deep learning techniques, specifically a model known as U-Net. The U-Net model is particularly designed to handle image data, and its architecture is optimized to identify patterns and structures in complex images. This makes it especially suitable for analyzing terrain models and identifying ditches based on LiDAR data, which provides high-resolution three-dimensional information about the landscape. To train the U-Net model, we have used a dataset consisting of high-resolution terrain models from selected areas, combined with carefully annotated ditches. This allowed the model to learn which characteristics and patterns that indicate the presence of ditches in the landscape.

Deep learning techniques proved to be effective in providing accurate data on ditches. The performance of the model was central in evaluating our approach to mapping ditches using deep learning and LiDAR data. The most effective model demonstrated a training accuracy of 99.6% and a validation accuracy of 99.4%. The model can also identify ditches in agricultural landscapes, but further development of the model is needed in such diverse environments. Similar models can be developed to detect other linear features, such as tire track damage from logging or construction.

Human interventions in peatlands are not evenly distributed geographically or regionally. Lowland areas (boreonemoral and southern boreal zones) have the highest extent of land use change, with cultivation, building development, and peat extraction comprising a significant portion. In the middle boreal zone, drainage for forestry purposes constitutes a larger share of interventions, but cultivation remains a central influencing factor. In the northern boreal zone, drainage for forestry purposes is the dominant category of intervention, while in the subalpine zone, interventions are mostly related to infrastructure and development projects.

Several development projects based on comprehensive maps of drained peatlands and wetlands, as well as linkages to other datasets and models, will provide valuable knowledge for

management and international reporting on ecological condition and greenhouse gas calculations. This report describes several recommendations for follow-up on these results with the further development of such deep learning models.

Ulrika Jansson (ulrika.jansson@nina.no), Vegar Bakkestuen (vegar.bakkestuen@nina.no) og Ida Marielle Mienna (ida.mienna@nina.no), NINA, Sognsveien 68, 0855 Oslo, Anders Lyngstad (anders.lyngstad@nina.no), NINA, Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim

Innhold

Sammendrag	3
Abstract	5
Innhold	7
Forord	8
1 Innledning.....	9
1.1 Status for kartbasert kunnskap om myr i Norge.....	9
1.2 Behov for nye karttjenester.....	9
1.3 Oppdragsspesifikasjon	10
2 Metode	11
2.1 Innsamling av bakkesannheter og forberedelser av treningsdata	11
2.2 Utvikling av dyplæringsmodell.....	13
3 Resultater	15
3.1 Grøftemodellens treffsikkerhet	15
3.2 Resultater fra studieområdene	15
3.3 Produksjonslinje for heldekkende nasjonalt grøftekart	18
3.4 Kostnadsestimat	19
4 Diskusjon.....	20
4.1 Grøftemodellens ytelse.....	20
4.2 Deteksjon av grøfter utenfor myr.....	20
4.3 Endring i grøftetetthet over tid	20
4.4 Andel grøftet myr	21
4.5 Geografiske gradienter og regional variasjon	21
4.6 Kobling mot feltdata og biologisk viktig myr	21
5 Anbefalinger for fjernmålingsbasert kartlegging og overvåking av myr	23
5.1 Full-skala algoritmebasert heldekkende nasjonalt grøftekart	23
5.2 Bruk av fjernmålingsteknikker for effektovervåking av myrrestaurering	23
5.3 Utviklingsprosjekter for bedre myr- og grøftekart.....	25
5.4 Konklusjon	26
6 Referanser	27
Vedlegg	29

Forord

NINA har på oppdrag fra Miljødirektoratet sammenstilt en mulig produksjonslinje for utvikling av et heldekkende nasjonalt fjernmålingsbasert kart for grøfter i myr, basert på uttesting i et utvalg pilotkommuner. I tillegg har vi vist hvilke kostnader utarbeidelsen av et heldekkende grøftekart i myr og skog i Norge vil innebære. Arbeidet har skjedd i nært samarbeid med et internt forsknings- og utviklingsprosjekt (DeepDitch) finansiert av Forskningsrådet (160022/F40). Resultatene fra både DeepDitch og oppdraget fra Miljødirektoratet presenteres samlet i denne rapporten.

Vi vil takke Miljødirektoratet og Forskningsrådet for muligheten å teste ut maskinlæring for generering av kart som både er relevante for vurdering av økologisk tilstand og som vil utgjøre et viktig grunnlag for prioritering av restaureringstiltak i myr og torvmarkskog.

Oslo og Hamar 26. mars. 2024

Ulrika Jansson og Vegar Bakkestuen

1 Innledning

Det er et stort behov for et omforent kunnskapsgrunnlag i Norge når det gjelder arealomfang og arealendring av myr over tid. Slik kunnskap er viktig både i sammenheng med kommunal og regional arealplanlegging, men kan også gi bedre oversikt over naturverdier, karbonlagring og økosystemtjenester. Avhengig av hvilke datakilder man bruker kan arealestimatene for myr og torvmark i Norge sprike fra ca. 15 000 km² til 30 000 km² (Bakkestuen et al. 2023, Bryn et al. 2018, Joosten et al. 2015). Samtidig mangler vi sikre tall på hvor mye grøftet myr og torvmark vi har i Norge. Store arealer myr og torvmark er blitt grøftet og dyrket opp til jordbruksmark og en stor andel av myrarealet er grøftet for skogproduksjon, både i mellomkrigstiden og etterkrigstiden, ofte med statlig støtte for å øke sysselsetting og produksjon i primærnæringene.

1.1 Status for kartbasert kunnskap om myr i Norge

De kartgrunnlagene for myr som vi har i dag og som fortsatt oppdateres er AR5 (arealressurskart tilpassa målestokk 1:5000) og N50 (Kartdata tilpasset målestokk 1:50 000). I tillegg finnes et digitalt markslagskart (DMK) med nokså detaljerte avgrensninger av myr og tresatt våtmark (DMK: myrinformasjon og DMK: TSKOG), men disse kartlagene oppdateres ikke lenger. Både AR5, N50 og DMK er ressurskart, hvilket betyr at de viser arealenes potensial for å produsere ressurser vi trenger (f.eks. tømmer, torv, jordbruksprodukter) og slike kart er ikke egnet for å gi oversikt over naturtyper og arealenes grunnleggende økologiske egenskaper. AR5 er for eksempel nylig vist å være unøyaktig når det gjelder forekomst av intakt åpen myr ettersom dette ikke vanligvis oppfattes som et nyttig areal for ressursproduksjon. Nyere GIS-modelleringer (basert på satellitter og maskinlæring) gir et bedre kart for forekomst av åpen myr (<https://vegar.users.earthengine.app/view/deeplearningmodel3>) (Bakkestuen et al. 2023), men inneholder ikke data på hvor store areal med grøftet og gjenplantet eller gjengrodd myr vi har i Norge.

Samtidig som de offisielle myrkartene er unøyaktige, ligger disse til grunn for mange forvaltningsbeslutninger, deriblant prioritering av kartleggingsinnsatser for biologisk mangfold på myr, prioritering av restaureringsareal, grove estimater på karbonlager i myr (Miljødirektoratet og Landbruksdirektoratet 2016) og nasjonal rapportering av klimagassregnskapet. Ressurskartene over myr er også brukt sammen med grove kart over grøfter i myr, for å estimere hvor store myrareal som er drenert (Miljødirektoratet og Landbruksdirektoratet 2016). Oppdaterte kart over myr og tilstand i forhold til grøfting vil også gi et bedre beslutnings- og rapporteringsgrunnlag for Norges arealregnskap.

1.2 Behov for nye karttjenester

Det er i dag et stort og økende fokus på økosystemtjenester fra myr, som karbonlagring, brannregulering og vannforsyning, og på restaurering av myr regnes som en av flere naturbaserte løsninger på redusert klimarisiko (Bonn et al. 2016, Dige et al. 2017). Det er kjent at drenerte myrer har høyere utslipp av karbondioksid (CO₂) enn både naturlig myr og restaurert myr (Weldon et al. 2016). En nylig sammenstilling fra boreale og tempererte områder viser at grøftede, tresatte områder på organisk jord er betydelige utslippskilder til klimagasser, som CO₂, metan og nitrogenoksid (Jauhiainen et al. 2019). Derfor haster det å få oversikt over disse arealene også i Norge, slik at vi kan målrette restaureringsinnsatsen og forbedre beregningene i klimaregnskapet.

I en litteratur-gjennomgang i 2021 ble det pekt på at fjernmåling vil gjøre kartlegging av myr mer effektiv, og at det var stor mangel på forskning på dette feltet i Norge (Venter et al. 2021). De heldekkende LiDAR-terrengmodellene som nylig ble publisert for Norge gjør at kartlegging av

tilstand i myr med fjernmålingsteknikker nå kan bli enklere. Dette inkluderer identifisering av dreneringsgrøfter, noe som tidligere var svært krevende å oppdage med fjernmåling.

Grøfter er visuelt gjenkjennelige i nye terrengmodeller basert på LiDAR-data. Annotering av grøfter både på åpen myr og på tresatt torvmark er mulig i disse terrengmodellene og kan brukes som bakkesannheter for å trene en dyplæringsmodell. Kunnskap om hvor grøftene finnes er helt avgjørende for å kunne fatte forvaltningsvedtak om hvilke arealer som bør inngå i prioritering av restaurering.

1.3 Oppdragsspesifikasjon

Formålet med oppdraget var å utvikle en mulig produksjonslinje for et heldekkende nasjonalt fjernmålingsbasert kart for grøfter i myr, basert på uttesting i et utvalg pilotkommuner, i tillegg til et kostnadsestimat for å lage et heldekkende grøftkart for Norge.

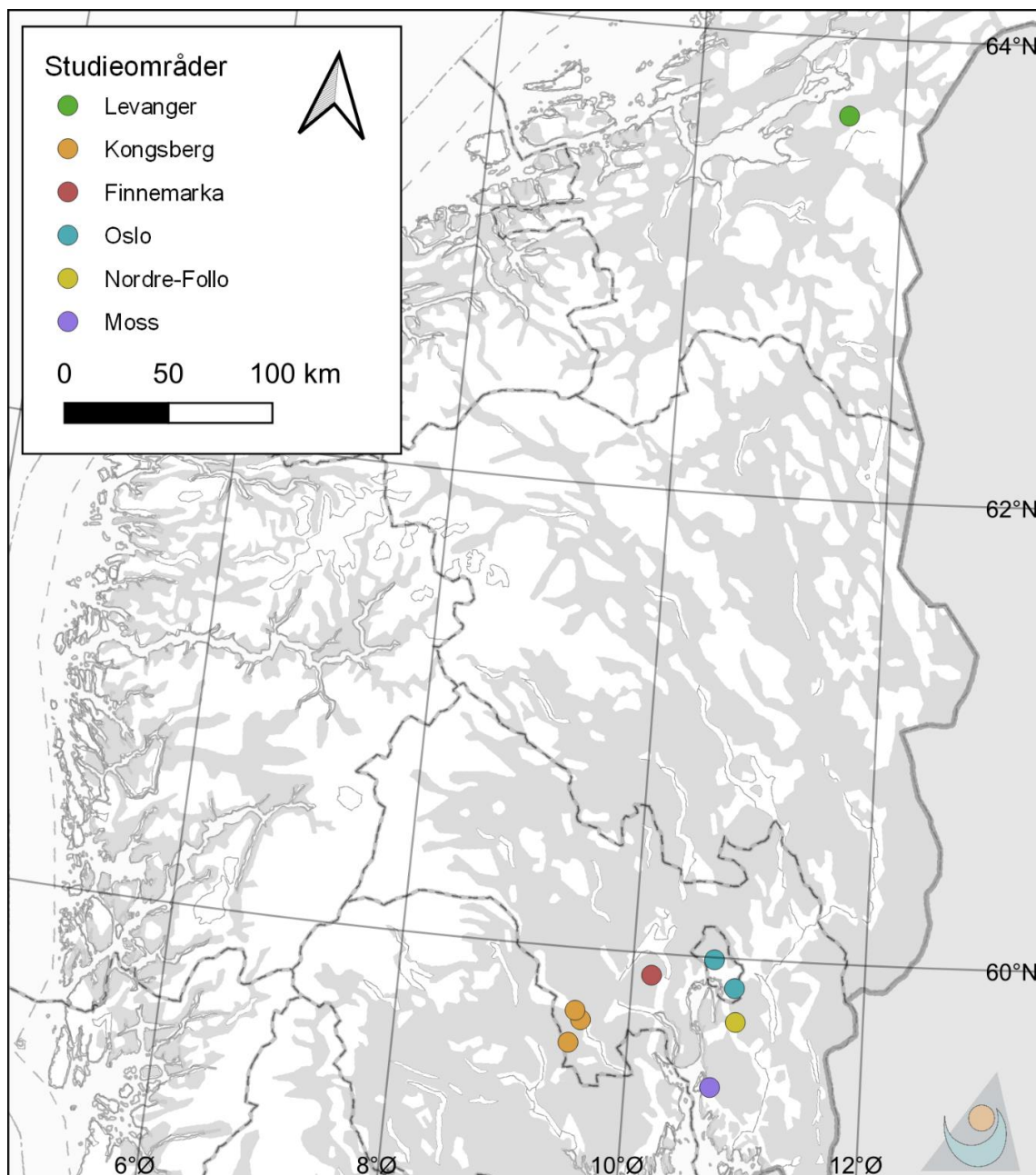
Følgende delmål inngår i oppdraget:

1. Utvikle og teste en modell basert på et utvalg representative kommuner som kan gi grunnlag for regionale og nasjonale kostnadsanslag for å framskaffe heldekkende fjernmålte produkter for omfanget av grøfting i myr.
2. Gi et kort forslag til produksjonslinje (og relevante kartdatabaser) for nasjonale fjernmålte heldekkende kart for eksisterende grøfting i myr.
3. Analyse av arealestimater (inkl. lengde, grøftedybde, bredde, innsynking o.l.), samt relevant statistikk for de utvalgte kommunene. Hvor mye intakt myr vs. påvirket myr?
4. Undersøke om det er mulig å skille mellom nygrøfting og opprensning av gamle grøfter.
5. Undersøke overlapp med eksisterende kartlagte naturtyper i myr (f.eks. sentrisk høy-myr).
6. Vurdere mulighetene for å si noe om grøfting over tid – kan eldre flybilder brukes?
7. Vurdere mulighetene for at modellen kan gi ytterligere informasjon om endringer og økologisk tilstand i myr (inkl. bruk av mer høyoppløselige optiske data/radardata).
8. Foreslå relevante parametere for å detektere effekter av restaurering gjennom fjernmåling.
9. Vurdere om det er mulig å gjennomføre en tilsvarende analyse på annen mark i Norge ved bruk av analysemetoden som er utviklet.

2 Metode

2.1 Innsamling av bakkesannheter og forberedelser av treningsdata

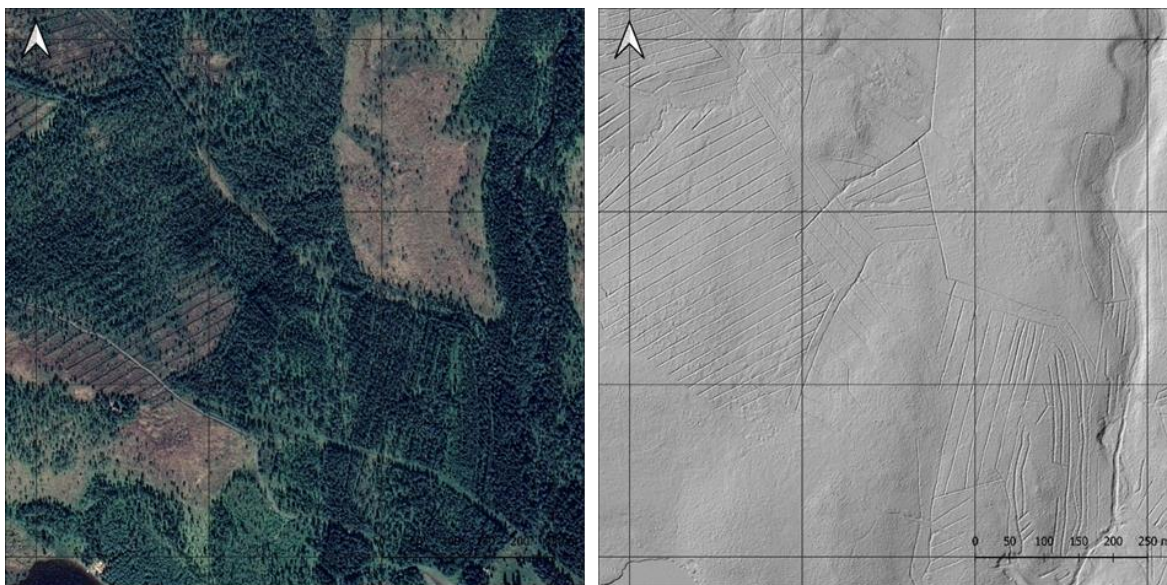
For å utvikle og teste en modell for å detektere grøfter og fremskaffe heldekkende fjernmålingsbaserte kartprodukter over grøfter i myr og våtmark har vi brukt data fra en rekke studieområder hovedsakelig i Sørøst-Norge (Oslo, Nordre Follo, Moss, Finnemarka og Kongsberg), men også i Trøndelag (Levanger) (Figur 1). Disse områdene representerer et bredt spekter av miljøgradienter viktige for våtmark- og sumpskogbiogeografi, inkludert variabler som temperatur- og nedbørsregime, solstråling, geologi og topografiske gradienter (Bakkestuen et al. 2008, Moen 1999).



Figur 1. Oversikt over arealer der bakkesannheter er innsamlet gjennom digitalisering av grøftelinjer i høyoppløste digitale terrengmodeller.

Som grunnlag for modellen, annoterte/digitaliserte vi grøftelinjer i de ni studieområdene, fordelt på seks kommuner. Dette ble gjort for å generere bildebrikker som kunne brukes i dyplæringsprosessen. I motsetning til tradisjonelle metoder som bruker treningspunkter, lar dyplæring oss bruke store pikselnabolag for å bestemme klassifisering av en piksel, som i dette tilfellet var om pixelen var del av en grøft eller ikke.

For å effektivisere prosessen og unngå manuell behandling av tusenvis av bildebrikker, ble grøfter digitalisert vegg-til-vegg innenfor avgrensede arealer i de seks studieområdene (Figur 1). Dette arbeidet inkluderte bruk av eksisterende grøftemodeller (fra MDIR) og terrengskyggekart (Figur 2). Vi digitaliserte alle de lineære strukturene i de høyoppløselige terrengmodellene som lå slik i terrenget at de visuelt ble tolket som grøfter. Dette ble gjort for alt areal i studieområdene som var klassifisert som myr eller skog i AR5. Grøfter ble ikke digitalisert i jordbruksmark eller langs veier. Kjørespor eller grøfter langs mindre skogsbilveier ble heller ikke digitalisert.



Figur 2. Bildene viser deler av et bakkesannhetsområde i Levanger. Til venstre: Flyfoto som viser både åpen ugrøftet myr og grøftet myr i forskjellig grad av gjengroing/gjenplantning. Til høyre: Terrengskyggekart over samme område.

Vi benyttet LiDAR-data som fundament for å konstruere en stabel av prediktorvariabler (terrengindekser) for grøftemodellering (Tabell 1). Disse dataene er fritt tilgjengelige på hoydedata.no (tilgang 07.12.2023). Vi lastet opp relevante terrengmodeller fra LiDAR-dataene til Google Earth Engine (GEE). Disse ble lagret under ressursen "users/vegar/dtm1/dtmcoll".

Tabell 1. Basert på terrengmodellen (1 meter oppløsning) utviklet vi syv terrengindekser for inkludering i prediktorstabelen.

Metode (GEE=Google Earth Engine)	Prediktor-variabler	Forklaring
TAGEE-skriptsamlingen i GEE	Terreng-skyggekart*	Representerer skyggeeffekter forårsaket av terrengets topografi, spesielt høydeforskjeller. Terrengskyggekart er nyttige for å identifisere områder som mottar forskjellige mengder sollys gjennom dagen, noe som påvirker både mikroklima og vegetasjonens vekst.
TAGEE	Vertikal krumvatur*	Måler krumningen av terrenget i en vertikal retning. Det kan gi informasjon om avrenningsmønstre og erosjon. Positive verdier indikerer konkave overflater (som grøfter), mens negative verdier indikerer konvekse overflater (som forhøyninger).
TAGEE	Helning*	Måler hvor bratt et område er. Helning har stor betydning for mange økologiske og hydrologiske prosesser, inkludert avrenning, erosjon, og artenes fordeling.
TAGEE	Vestvendthet og sørvendthet*	Beskriver orienteringen av landoverflaten mot henholdsvis vest og sør. Dette påvirker hvor mye sollys et område mottar, noe som igjen påvirker lokale klimatiske forhold og vegetasjonstyper.
SAGA GIS-programmering i GEE (se Vedlegg for detaljer)	Dalkløftindeks*	Brukes til å identifisere og kvantifisere kløfter ved å bruke en transformasjonsalgoritme («top hat»). Dette hjelper til å skille kløfter fra resten av landskapet ved å fokusere på de mørkere forsenkningene i et terrengbilde som representerer kløfter.
SAGA	Bakkeindeks*	Likt som dalkløftindeksen, men denne indeksen fokuserer på å identifisere og kvantifisere høyere liggende områder som rygger.

*Lenke til terrengindekser: <https://ee-vegar.projects.earthengine.app/view/deep-ditch>

2.2 Utvikling av dyplæringsmodell

Modellen for dyplæring ble trent med 9 utvalgte treningsområder fordelt på 6 kommuner (Figur 1). Vi brukte om lag halvparten av områdene med bakkesannheter til evaluering av modellen.

Studieområdene varierte i størrelse fra rundt 3 km² til 10 km² og ble delt inn i trenings- og evalueringsformål. Vi utviklet en algoritme i Google Earth Engine for å skape 320 × 320 m store bildebrikker (tilsvarende 32 × 32 piksler i vår 1-meter oppløsnings-prediktor-stabel). Totalt ble 2000 bildebrikker generert for hver trenings- og evalueringspolygon. Hver bildebrikke inneholdt et lag med den funksjonen som skulle forutsies (grøft) stablet oppå de andre lagene i prediktor-stabelen. Disse ble deretter eksportert og lagret i Google Cloud Storage som TFRecord-filer.

Vi brukte Google Earth Engine (GEE) for lagring, tilpasning, analyse, samt eksport og import av data til skybasert dyplæring (Bakkestuen et al. 2023). Tilpassede data i TensorFlow-format (TFRecord) ble eksportert til Google Cloud Storage og brukt som input for en virtuell maskin til å kjøre dyplæringskoden.

Vår modell var et Fullt Konvolusjonelt Nevralnettverk («Fully Convolutional Neural Network» (FCNN)) for semantisk klassifisering, som har til hensikt å merke hver piksel i et bilde med et sannsynlighetsestimat for tilhørighet til en bestemt klasse (Brown et al. 2022, Zhuang et al. 2019).

Til vår modell brukte vi Keras-implementasjonen av U-Net-modellen (Chollet 2015). Denne U-Net-modellen tar imot 32×32 piksler store datachips og gir ut en klassifisering for hver enkelt piksel. U-Net-modellen er basert på en TensorFlow-arbeidsflyt fra Google Earth Engine Team, som er tilgjengelig online. Vi satte læringsraten til 0,1, med batch-størrelse på 16 og 20 epoker med 500 gjentakelser (iterasjoner) per epoke. U-Net inneholder fem lag for koding og fem for dekoding, med økende antall kanaler fra 32 til 1024.

For innstillingene til modellen brukte vi 'Adam' for optimalisering, 'binary_crossentropy' for tap og 'binary_accuracy' for å måle nøyaktighet. Dette innebærer at verdier fra treningsdataene ble brukt for å vurdere feil før oppdatering av modellens vektorer. Etter å ha trent modellen over 20 epoker for å sikre stabil ytelse, ble den anvendt på hele vårt studieområde. For å gjøre dette mer håndterbart, eksporterte vi nødvendige lag til skyen for effektiv beregning.

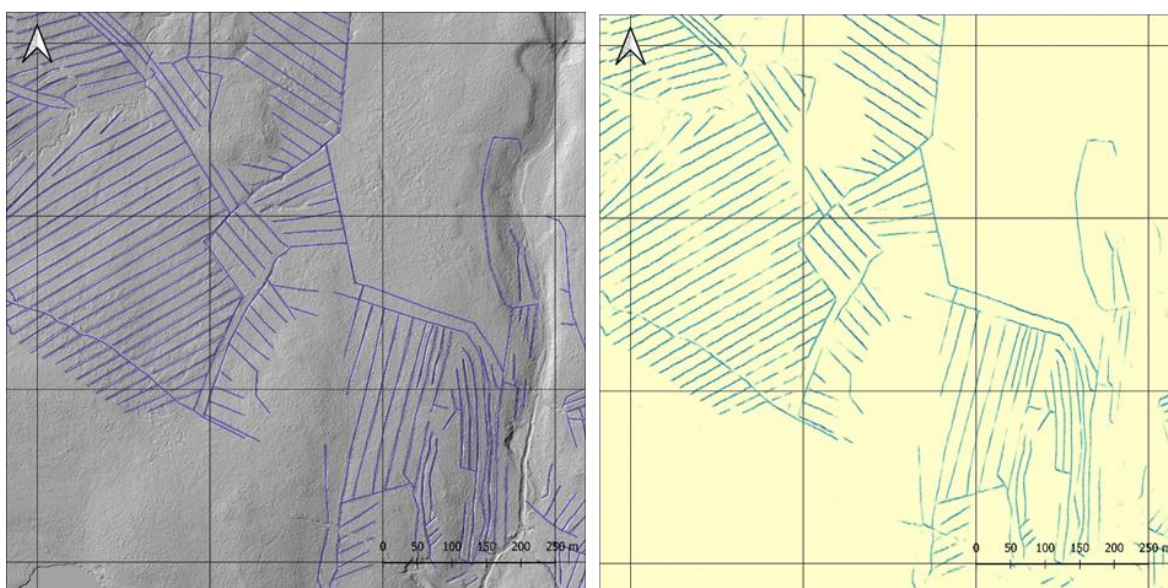
Selve dyplæringsmodellen er i et rasterformat med 1 meter pikseloppløsning (Figur 4). Hver piksel kommer med en sannsynlighet mellom 0 og 100 prosent for at denne er en grøftepiksel.

For å gjøre om piksler til polygoner (fra rasterformat til vektorformat) må det settes en grenseverdi (cut-off-verdi) på sannsynlighetsskalaen. I Figur 5 har vi satt denne grensen på 30 %. Det finnes ingen god regel for å sette en slik grenseverdi, men man må finne en balanse mellom å inkludere så mange relevante grøfter som mulig, samtidig som man unngår for mye støy. Når det er satt en grenseverdi kan rasteret konverteres til polygoner (Figur 6). Dette kan imidlertid føre til mange veldig små polygoner. I vårt arbeid har vi derfor valgt å fjerne polygoner under 5 kvadratmeter for å unngå for mye støy i datasettet.

3 Resultater

3.1 Grøftemodellens treffsikkerhet

Modellens ytelse var sentralt i evalueringen av vår tilnærming til å kartlegge grøfter ved bruk av dyplæring og LiDAR-data. Den mest effektive modellen vi utviklet oppnådde gode resultater, med en treningsnøyaktighet på 99,6 %. Valideringsnøyaktighet var på 99,4 %, hvilket betyr at det kun var 0,6 % feiltreff, enten som falske positive eller falske negative treff. En illustrasjon over treffsikkerheten til modellen vises i Figur 3. For å oppnå disse resultatene, benyttet vi 'Adam' som optimaliseringsalgoritme, 'binary_crossentropy' som tapfunksjon, og 'binary_accuracy' for å måle modellens nøyaktighet. Disse valgene reflekterer en standard praksis i dyplæringsprosjekter, hvor data fra treningssettet brukes til å evaluere og justere modellens vektor før modellen anvendes på uavhengige datasett.



Figur 3. Treffsikkerheten til modellen er illustrert med deler av et bakkesannhetsområde i Levanger som eksempel. Til venstre: Annoterte grøfter basert på terrengskyggekartet. Til høyre: Eksempel på ferdig dyplæringsmodell i raster-format.

3.2 Resultater fra studieområdene

Resultatene fra grøftemodelleringen ga mulighet for å beregne grøftetettheten for hvert område:

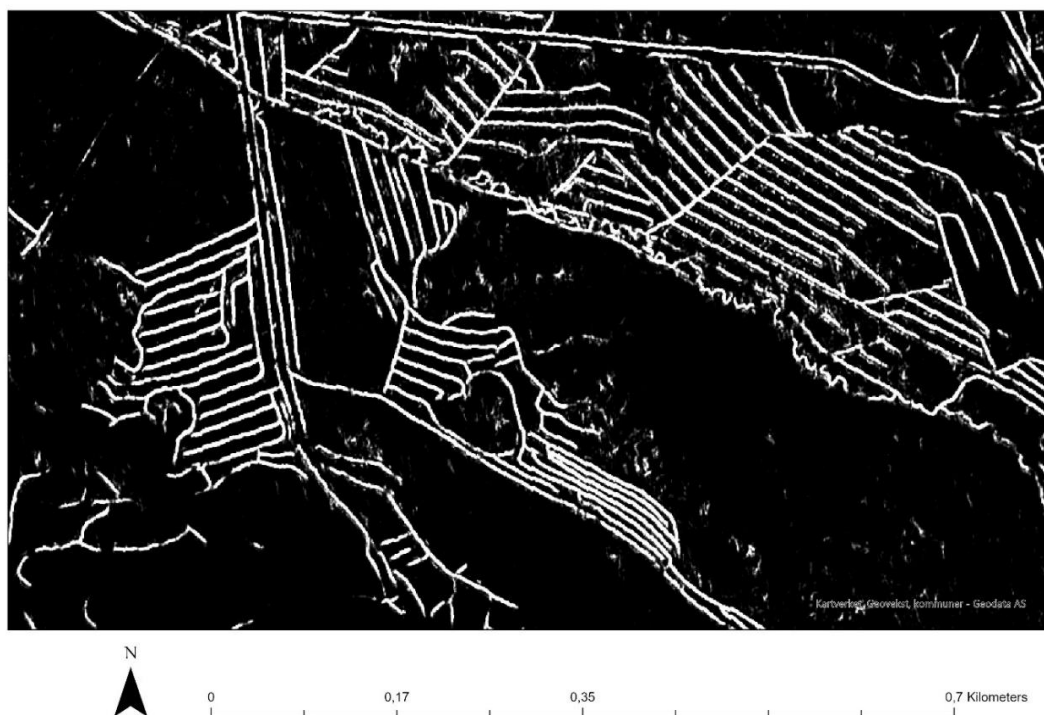
- I Levanger ble det modellert grøfter med en samlet lengde på omtrent 246 km i et område på 100 km², noe som gir en grøftetetthet på ca. 2,46 km/km².
- I Moss var den samlede grøftelengden ca. 422 km i et område på 128 km², noe som resulterer i en grøftetetthet på ca. 3,30 km/km².
- Tilsvarende i Oslo/Follo, ble det modellert grøfter på ca. 376 km i et område på 180 km², som gir en grøftetetthet på ca. 2,09 km/km².

Dette indikerer en høyere konsentrasjon av grøfter per kvadratkilometer i Moss sammenlignet med Levanger og Oslo/Follo.

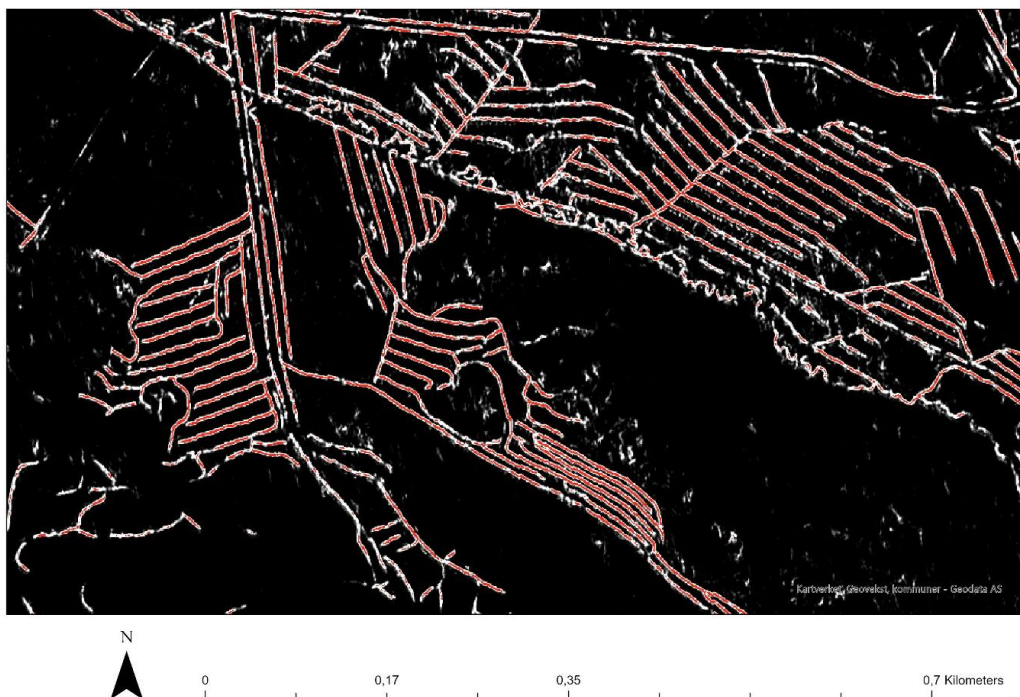
Ved å vurdere både lengde og areal av grøfter, kan vi få en indikasjon på tettheten og omfanget av grøftesystemene i de ulike områdene:

- I Levanger dekker grøftene et areal på 36,7 dekar i et 100 km² stort område, noe som tilsvarer en grøftetetthet på ca. 367 m²/km².
- I Moss, hvor grøftearealet er 75,7 dekar i et område på 128 km², er grøftetettheten ca. 591 m²/km².
- I Oslo/Follo-området, som har et grøfteareal på 77,1 dekar i et 180 km² stort område, er grøftetettheten ca. 429 m²/km².

I Moss var det grøfter i 299 av de totalt 2574 myr- og våtmarkspolygonene funnet med modellen utviklet av Bakkestuen m.fl. (2023). Det samlede arealet av myr- og våtmark som hadde grøfter var på 11,6 km² av totalt 30,8 km² (ca. 38 %) med myr- og våtmarksareal i Moss. Tilsvarende var det i Oslo/Follo 274 av 2110 myr- og våtmarkspolygoner med spor av grøfthing. Arealet av myr- og våtmarkspolygoner som hadde grøfter var på 17,3 km² av totalt 37,4 km² (ca. 46 %) med myr- og våtmarksareal. Tilsvarende beregninger ble ikke gjort for Levanger. Myr- og våtmarksmodellen Nord-Norge er ferdigstilt (se Nybø m.fl. 2023), og vil kunne brukes for å undersøke andel grøftet myr i Nord-Norge når grøftekart for den landsdelen er utviklet.



Figur 4. Figuren viser et rasterkart som er resultatet av dyplæringsmodellen. Dette eksemplet er fra Levanger, der hvite områder indikerer høyest sannsynlighet for grøfter.



Figur 5. Figuren illustrerer effekten av å sette en grenseverdi på 30 % sannsynlighet for grøft. Røde piksler viser hvor grenseverdien er oversteget. Valget av en slik grenseverdi innebærer en balanse-ring mellom å inkludere så mange relevante grøfter som mulig, samtidig som man minimerer mengden av støy.



Figur 6. Figuren viser hvordan rasteret fra Figur 4 ser ut etter at det ble konvertert til polygoner. Denne prosedyren gjør det mulig å representere grøftene som distinkte geometriske figurer. Små polygoner på mindre enn 5 kvadratmeter er fjernet.

3.3 Produksjonslinje for heldekkende nasjonalt grøftekart

Under følger en produksjonslinje i form av en punktliste med hva som må til og i hvilken rekkefølge alt må gjøres for å produsere et heldekkende nasjonalt grøftekart:

1. Datainnsamling og -forberedelse:

- Samle inn og organiser nødvendige data, i hovedsak LiDAR, men flyfoto og eksisterende geografiske data om grøfter er nødvendig som bakkesannheter for annotering av data for å trene og validere dyplæringsmodellen.
- Pre-prosesser data for å optimalisere dem for dyplæringsmodeller (f.eks. lage terrengindekser fra LiDAR, normalisering av prediktorvariabler, justering av oppløsning og lage en GIS-stabel).

2. Utvikling av dyplæringsmodell:

- Velg og konfigurér en passende dyplæringsarkitektur (f.eks. U-Net som er brukt i denne rapporten).
- Definer og sett opp trenings-, validerings- og testsett.

3. Trening og validering av modell:

- Tren modellen på det forberedte datasettet.
- Evaluer modellens ytelse ved hjelp av valideringssettet og juster modellen basert på tilbakemeldingene.

4. Test og optimalisering:

- Test modellen på testsettet for å vurdere dens evne til å generalisere til nye data.
- Gjør ytterligere justeringer om nødvendig for å forbedre nøyaktigheten og påliteligheten.

5. Raster til polygon-konvertering:

- Bruk modellen til å lage rasterkart over grøfter.
- Sett en grenseverdi for sannsynlighet for grøft (f.eks. 30 %) og konverter rasterdata til polygoner.
- Fjern ubetydelige polygoner (f.eks. mindre enn 5 m²).

6. Post-prosessering og kvalitetssikring:

- Utfør nødvendig postprosessering for å finjustere grøftekartet.
- Gjennomfør kvalitetssikring og valider kartet mot kjente grøfteområder og ekspertråd.

7. Skaler opp produksjonslinjen:

- Skaler opp løsningen for å dekke hele Norge.
- Implementer effektiv databehandling og lagring for å håndtere store datamengder.

8. Integrering og distribusjon:

- Integrer det ferdige kartet med eksisterende kartleggingssystemer.
- Planlegg og gjennomfør distribusjon av kartet til relevante interessenter.

9. Vedlikehold og oppdateringer:

- Etabler rutiner for regelmessig oppdatering og vedlikehold av grøftekartet.
- Hold modellen oppdatert med nye data og teknologiske fremskritt.

10. Dokumentasjon og opplæring:

- Dokumenter hele prosessen detaljert.

- Tilby opplæring og ressurser for brukere av grøftekartet.

3.4 Kostnadsestimat

For å beregne hvilke kostnader som fremstilling av et heldekkende grøftekart for Norge vil innebære vil det være nyttig å knytte kostnadene opp til hvert enkelt kostnadskreivende trinn i produksjonslinjen (kap. 3.3) og legge inn kostnader knyttet til tilpassing av eksisterende script, direkte kostnader knyttet til dataprosessering og lagring, i tillegg til evt. vedlikehold og oppdatering av grøftekartet når det er ferdigstilt.

I dette prosjektet er det brukt ett abonnement i Google Cloud AI. Hastigheten på dette abonnementet klarer å lage en grøftemodell for 25 km² på mellom 1 til 1,5 timer. Raskere alternativer kan vurderes, men det er viktig å balansere behovet for hastighet med økte kostnader. Det bør også utforskes muligheter for å effektivisere prosessen, for eksempel ved å forbedre algoritmer eller ved å benytte mer effektive dyplæringsmodeller. Det vil være kostnadsbesparende om man kan utelukke arealer i høy- og mellomalpin sone eller andre mindre relevante områder på forhånd, men dette må veies mot oppdragsgivers eventuelle behov for heldekkende grøftekart for å kunne gi gode data på i hvor stor grad forskjellige deler av landet skiller seg med hensyn til grøftetetthet og økologisk tilstand i myr.

Et detaljert kostnadsestimat vil kunne utvikles basert på foreslått produksjonslinje, men vil måtte tilpasses oppdragsgivers behov av detaljgrad og ønsket geografisk utstrekning for kartgrunnlaget over grøfter i Norge.

4 Diskusjon

4.1 Grøftemodellens ytelse

Selv om modellens høye nøyaktighetsrater indikerer en vellykket modellering, er det viktig å anerkjenne begrensningene som følger med fraværet av uavhengige bakkesannheter fra feltundersøkelser. Dette var en skrivebordsøvelse gjennomført om vinteren, uten mulighet for feltverifisering. Til tross for dette mener vi at valget av grenseverdi og fjerning av mindre polygoner er fornuftige beslutninger som bidrar til modellens praktiske anvendbarhet og nytteverdi i å frembringe heldekkende, fjernmålingsbaserte kartprodukter over grøfter.

Fremover vil det være viktig å validere modellens prediksjoner mot feltdata for å videreutvikle og forfine modellen, særlig i lys av dens potensielle anvendelse i varierte miljøer. Denne innledende tilnærmingen gir imidlertid et solid grunnlag for videre arbeid og demonstrerer nytteverdien av dyplæringsteknikker i miljøovervåking og kartlegging av grøfter.

4.2 Deteksjon av grøfter utenfor myr

Grøftemodellen vi har utviklet i prosjektet dekker både grøfter i åpen myr, i tresatt myr og i skog (først og fremst torvmarksskog), med oppmuntrende resultater. Dyplæringsteknikker viser seg å være effektive i disse områdene, selv om det krever en viss grad av filtrering for å redusere støy. Videre har vi utforsket bruken av modellen i jordbrukslandskapet (oppdyrka torvmark og annet jordbruksareal). Selv om modellen også kan identifisere grøfter i disse områdene, observerer vi en økning i støy, noe som indikerer et behov for mer avansert filtrering og tilpasning av modellen for optimal ytelse i slike varierte miljøer. Lignende modeller kan utvikles for å detektere andre linje-strukturer, som for eksempel kjørspor i fjell, myr og skog.

Forskjellige kartprodukter, inkludert grøftekartene kan utvikles til å kunne presenteres i en kartløsning hos NINA eller leveres i format som kan vises på Økologisk Grunnkart, Naturbase eller lignende kartløsninger der grøftekartene kan vises sammen med andre relevante kart over økosystemer og påvirkningsfaktorer. Dette vil kunne gi forvaltningen en god visuell oversikt over overlapp mellom biologisk viktig myr og skog og grad av påvirkning fra grøfting, som viktig bakgrunnsinformasjon til prioritering av restaureringstiltak.

4.3 Endring i grøftetetthet over tid

For å se på endring i grøftetetthet over tid med metodikken vi har utviklet, vil det være nødvendig med en tidsserie med høyoppløste høydemodeller basert på LiDAR. Dette foreligger ikke på nåværende tidspunkt og det er usikkerhet knyttet til hvor ofte det vil samles inn høyoppløselige LiDAR-data på nasjonal skala. Det ville være svært nyttig med jevnlig innsamling av landsdekkende LiDAR-data for eksempel for vurdering av utviklingen av økologisk tilstand i myr, torvmarkskog og andre fuktige til våte skogtyper og for vurdering av restaureringssuksess.

Basert på tidsserier av flybilder vil det være mulig å se på historiske endringer på mindre arealer med fortrinnsvis åpen myr. Dette vil imidlertid kreve utvikling av en egen dyplæringsmodell, som må trenes. Det har ikke vært tid og ressurser i dette prosjektet til å teste ut dette.

4.4 Andel grøftet myr

Grøftetettheten i områdene vi undersøkte i dette prosjektet varierte fra 2,09 km/km² til 3,30 km/km². Våre områder ligger i boreonemoral, sørboreal og mellomboreal sone, og disse sonene dekker ca. 127 500 km². Hvis vi antar en gjennomsnittlig grøftetetthet på 2,5 km/km² tilsier det at det er ca. 320 000 km grøfter fra boreonemoral til mellomboreal sone i Norge.

Det er grunn til å tro at det er høyere andel grøfta myr i lavlandet enn i nordboreal og lavalpin sone, mens det er uklart om andelen i mellomboreal sone er lavere eller høyere. Resultater fra ANO-kartlegging ([Arealrepresentativ naturovervåkning \(ANO\): Resultater - Miljødirektoratet \(miljodirektoratet.no\)](https://arealrepresentativ.naturvern.no/)) viser så langt en andel intakt myr (dvs. uten påvirkning fra grøfter) på nesten 94 %, noe som er svært forskjellig fra vårt resultat, der 46 % av myrarealet i Oslo/Follo og 38 % av myrarealet i Moss hadde grøfter. Vi tror dette skyldes tre forhold. ANO-prøveflatene trekkes tilfeldig, og mange av dem er i høyereliggende strøk der vi forventer mindre grøfting. Vi tror dessuten at ANO-metodikken kan påvirke denne statistikken fordi det i ANO er grøftingsintensitet slik den oppfattes i en 250 m²-sirkel som registreres. Hvis observatørene ikke anser at grøfter påvirker myra inne i denne sirkelen blir dette registrert som intakt myr. I vår gjennomgang skiller vi på myrpolYGONer med og uten grøfter, og det vil gi en annen statistikk. Det er også sannsynlig at våre undersøkelsesområder ikke er representative siden de er valgt ut delvis med tanke på å finne områder der vi har mange nok grøfter til at det gir gode treningsdata for grøftemodellen.

4.5 Geografiske gradienter og regional variasjon

Inngrep i myr er ikke jevnt fordelt geografisk eller regionalt. Lavlandet har mest inngrep, og her utgjør oppdyrking, nedbygging og torvtekt en betydelig andel av dette. Lavlandet kan vi i denne sammenheng definere som boreonemoral- og sørboreal sone. I mellomboreal sone utgjør drenering for skogbruksformål en større andel av inngrepene, men oppdyrking er fortsatt et sentralt inngrep. I nordboreal sone er drenering for skogbruksformål den klart dominerende kategorien inngrep, mens det i lavalpin sone er mest inngrep knytta til infrastruktur og utbyggingsprosjekter.

På lignende vis kan vi antakelig finne ulikheter mellom seksjoner, der det er grunn til å tro at oppdyrking utgjør en større andel av inngrepene i de mest oseaniske seksjonene. Det vil derfor være formålstjenlig å stratifisere utvalget av treningsområder slik at det dekker spekteret av regional variasjon, og kanskje også en rent geografisk gradient fra sør til nord.

Myrareal og andel myr er også ujevnt fordelt geografisk og regionalt (Bryn et al. 2018, Moen 1999). Det kan vurderes å sample arealer for treningsdata slik at dette gjenspeiler den romlige fordelingen av myr i Norge. Det vil øke muligheten for at vi får med et representativt utvalg av variasjonen skapt av ulike metodikk for grøfting (eks. grøftetetthet og -dybde), samt hvordan dette kommer til uttrykk i dag. I lavlandet går gjenvoksing raskere, og det kan introdusere en regional gradient i muligheten til å påvise grøfter.

4.6 Kobling mot felldata og biologisk viktig myr

Det bør utvikles og gjennomføres et prosjekt med kontroll av dyplæringskartene i felt for å kvantifisere hvor nøyaktig dyplæringsmodellen for grøfter er. Dette vil forbedre metoden. Dette kan gjøres i samband med ANO-overvåking, og da gjerne for et større, heldekkende areal som f.eks. en ANO-rute (500 m x 500 m). En fordel med dette er at det vil gi et representativt datasett.

Den opprinnelige målsettingen om å undersøke overlapp mellom detekterte grøfter og kartlagt biologisk viktig myr klarte vi ikke å svare på. Dette skyldes at studieområdene våre i for liten grad fanget opp myr kartlagt gjennom metodikk for DN-håndbok 13 eller gjennom en av metodene for kartlegging ut fra NiN. En medvirkende årsak kan være at grad av inngrep ofte brukes for å skille

mellom myr med og uten høy kvalitet og verdi. Forekomst av grøfter vil derfor ofte bety at myra ikke blir kartlagt. Det vil imidlertid være svært relevant å kjøre overlappsanalyser mellom grøfter og kartlagt biologisk viktig natur, og karbonrik myr når et heldekkende grøftekart for Norge foreligger. Det kan også gjennomføres slike analyser for utvalgte tema, f.eks. ved å ta i bruk datasettet for typisk høgmyr (f.eks. Lyngstad & Vold 2015). Dette datasettet omfatter ca. 500 lokaliteter som ligger spredd fra Sørlandet til Helgeland, og det er antakelig mest rasjonelt (også her) å inkludere dette i overlappsanalyser når et heldekkende grøftekart er framstilt.

5 Anbefalinger for fjernmålingsbasert kartlegging og overvåking av myr

5.1 Full-skala algoritmebasert heldekkende nasjonalt grøftekart

For å vurdere mulighetene for at dyplæringsmodellen for grøft kan gi ytterligere informasjon om endringer og økologisk tilstand i myr, inkludert bruk av mer høyoppløselige optiske og radar data, kan det være mulig å teste ut noen av de følgende punktene:

- **Datakilde og oppløsning:** Vurdere å integrere høyoppløselige optiske bilder og radar-bilder i modellen. Optiske data som Sentinel-2 eller kommersielle satellittbilder kan gi detaljert informasjon om vegetasjon og overflateendringer, mens radarbilder (som fra Sentinel-1) er effektive for å detektere endringer i fuktighet, uavhengig av skydekke og lysforhold.
- **Endringsdeteksjon:** Bruk tidsrekker av satellittdata for å identifisere endringer i myr-områder over tid. Dette kan omfatte endringer i vegetasjon, vannstanden eller andre fysiske egenskaper som kan indikere endringer i økosystemets tilstand. Endringer i fuktighet (jf. radardata) i myr kan indikere inngrep som påvirker hydrologien.
- **Grøftedeteksjon og økologisk tilstand:** Analyser sammenhengen mellom tilstedeværelsen av grøfter og økologiske forhold i myr. Dette kan inkludere hvordan grøfting påvirker hydrologi, torvakkumulasjon, vegetasjonstyper og biologisk mangfold. Dette bør ta utgangspunkt i et litteraturstudium, men også omfatte feltundersøkelser for å sikre relevans for norske forhold.
- **Maskinlæringsmetodikk:** Forbedre modellen ved å integrere flere prediktorer som kan indikere økologisk tilstand, som fuktighetsindekser, vegetasjonsindekser og teksturfunksjoner fra høyoppløselige bilder.
- **Validering og nøyaktighetsvurdering:** Valider modellens resultater med feltdata eller andre pålitelige kilder for å sikre nøyaktighet i deteksjonen av grøfter og tolkningen av økologiske tilstandsindikatorer.
- **Tidsrekkeanalyse:** Bruk modellen til å analysere tidsrekker av data for å spore økologiske endringer i myr over tid, og forstå hvordan disse endringene er knyttet til grøfting og andre menneskelige inngrep.
- **Interdisiplinært samarbeid:** Samarbeid med økologer og hydrologer for å tolke funnene og forstå de bredere økologiske implikasjonene av våre observasjoner.

5.2 Bruk av fjernmålingsteknikker for effektovervåking av myrrestaurering

Vi har identifisert flere parametere som kan være nyttige for å oppdage effekter av restaureringsarbeid gjennom fjernmålingsteknikker. Det er essensielt å velge parametere som nøyaktig

gjenspeiler nøkkelendringene, både økologisk og fysisk, i det restaurerte området. Her er noen foreslåtte parametere til vurdering:

1. Vegetasjonsindekser:
 - **Normalisert differanse vegetasjonsindeks (NDVI):** Gir informasjon om vegetasjonens helse og biomasse.
 - **Leaf Area Index (LAI):** Angir mengden bladareal per arealenhet overflate.
2. Vannkvalitet og Vannkroppsparametere:
 - **Turbiditet (vannets klarhet):** Kan indikere erosjon eller sedimentavsetninger.
 - **Klorofyll-a konsentrasjon:** Indikator for algevekst i vann.
 - **Overflatevannstemperatur:** Endringer kan indikere endrede miljøforhold.
3. Landoverflateparametere:
 - **Overflatetemperatur:** Kan gi innsikt i mikroklimaendringer.
 - **Fuktighetsindekser:** Som Normalized Difference Water Index (NDWI) for å overvåke endringer i jordfuktighet eller overflatevann.
4. Biomangfold og Habitatstruktur:
 - **Artsfordeling:** Endringer i artsfordeling over tid kan indikere effekter av restaurering.
 - **Habitatkartlegging:** Bruk av høyoppløselige bilder til å identifisere endringer i habitatstrukturen.
5. Endringer i arealdekke:
 - **Arealdekkendringer:** Kartlegging av endringer i arealdekke, som skog, våtmarker eller åpen vannflate.
6. Erosjon og Sedimentasjon:
 - **Sedimenttransport:** Bruk av optiske og radarbilder for å observere sedimentflyt.
7. Økosystemtjenester:
 - **Karbonlagring:** Endringer i karbonlagring kan måles ved å overvåke vegetasjonsdynamikk.
 - **Produksjon:** Endringer i NDVI indikerer trender i produksjon, og kan knyttes til gjengroing av slåttemyr (fôrproduksjon).
8. Hydrologiske endringer:
 - **Vannføring og nivåendringer:** Overvåking av endringer i vannføring og vannstand i elver og vannforekomster.
 - **Endringer i fuktighetsforhold på bakken:** Radarmålinger fra satellitter (eks. SAR) kan avdekke endringer i det hydrologiske regimet.
9. Teknologiske Muligheter:
 - **Droner:** For detaljerte, lokale observasjoner.
 - **Satellittdata:** For overvåking over større områder og over tid.

Vi viser også til Joosten et al. (2015) for en gjennomgang av muligheter og begrensninger for overvåking av restaurert myr ved hjelp av direkte og indirekte metoder, inkludert fjernmåling. Indirekte («proxy») metoder utnytter at det kan finnes stedfortredende variabler som er enklere eller billigere å måle enn variabelen vi egentlig er interessert i å overvåke. Et eksempel kan være å måle synking i myr ved hjelp av satellittbaserte radarmålinger (SAR Interferometri (InSAR)), for deretter å utlede karbontap over tid (Couwenberg & Hooijer 2013).

5.3 Utviklingsprosjekter for bedre myr- og grøftekart

Flere utviklingsprosjekter basert på heldekkende kart over grøftet myr og våtmark og koblinger mot andre datasett og modeller vil gi nyttig kunnskap til forvaltning og internasjonal rapportering. Gjennom å identifisere områder med drenert myr og torvmark vil det være mulig å angi bedre estimat for utslipp av klimagasser til luft og oppløst karbon (humus) til vann fra våtmark med inngrep. Vi forslår derfor følgende videreutviklingsprosjekter:

1. Overlappsanalyse av grøfter fra dyplæringen til AR5-myr og DMK-myr, myrmodellen til Bakkestuen et al. (2023) og en [svensk torvmarkmodell](#) (Ågren et al. 2022) dersom den blir testet i Norge. Dette vil kunne gi et godt anslag av grøftepåvirket myr og torvmark i Norge.
2. Hydrologisk overvåking av tre høgmyrer i Norge med plugging av grøfter viser at vannstanden øker ut til en avstand på 12,7 – 24,8 m fra grøftene etter restaurering (Stachowicz et al. submitted). Effekten av drenering strekker seg antakelig om lag dobbelt så langt ut, noe som indikerer at blautsetting vanligvis ikke vil kunne reetablere det opprinnelige hydrologiske regimet fullt ut. Vi vet at dreneringseffekter er forskjellige i forskjellige torvmassivenheter. Et utvidet tverrfaglig samarbeid mellom hydrologer og økologer vil være viktig for å kvantifisere effekter av drenering og påfølgende restaurering i et bredt spekter av myrtyper. Dette kan også gi grunnlag for avrenningsmodeller for å vurdere effekt av grøfting på vannmiljø.
3. Bedring av kunnskapsgrunnlaget knyttet til hvor store klimagassutslipp det er fra grøftet myr over tid. Anslagene som brukes ved rapportering av utslipp er basert på utslippsfaktorer som stort sett bygger på datagrunnlag fra sørligere myrer. Det bør gjøres en videreutvikling av utslippsfaktorer fra ulike typer intakt og grøftet myr i Norge. Disse kan sammenstilles med kartdata for å få bedre oversikt over både utslipp og restaureringspotensial.
4. Maskinlæring kan være egnet for å skille myrtyper eller grupper av myrtyper, og dette gjelder særlig torvmassivenheter siden de er basert på hydromorfologisk klassifisering. En av årsakene til at denne klassifiseringen har blitt brukt mye i skandinavisk myrviten-skap er at den gir mulighet for kartlegging på flybilder, det vil si med fjernmåling. Heldek-kende kart for myrer med og uten regelmessige strukturer som strenger og høljer er nærliggende å prioritere.
5. Det er behov for målretting av restaureringstiltak for å gi best mulig samfunnsøkonomiske effekter av restaurering som naturbasert løsning på tvers av klima- og miljømålene. Det er pågående forskning på klimagassfluks i myr i Norge som vil gi ny kunnskap om utslipp og karbonbinding i myr. Ved å kombinere nye heldekkende kart over myr og grøfter på myr samt kunnskap om sammenhengen mellom naturgoder og myrtyper, kan man få utviklet modeller og kart som viser hvor man bør prioritere restaureringstiltak på lokalt og regionalt nivå.
6. Lage grunnlag for å bedre gjennomføre restaureringstiltak der de kan ha best effekt for natur og reduserte utslipp til luft og vann. Kunnskapen som er utviklet gjennom grøfte-modellene er et viktig steg for vurdering av tilstand og identifisering av arealer med behov for restaureringstiltak. Det muliggjør også utvikling av nye modeller i kombinasjon med annen kunnskap om naturgoder for bedre måloppnåelse.

5.4 Konklusjon

Maskinlæring gir helt nye muligheter for å bruke fjernmålingsdata til å identifisere myr og grøfter i myr, og har potensiale til å revolusjonere kunnskapsgrunnlaget om myrarealer. Forvaltningsrelevansen er svært stor, og vi ser nå konturene av landsdekkende myrkart med en presisjon og detaljeringsgrad som hittil har vært uoppnåelig. Slike kart vil ha en rekke anvendelsesområder på tvers av sektorer (f.eks. landbruk, miljø, transport), og på alle forvaltningsnivå. I samband med det foreslåtte forbudet mot utbygging av myr vil et kartlag over myr som har allmenn aksept være avgjørende som et utgangspunkt for de politiske avveiningene. Ved rødlistevurderinger er areal og tilstand på areal helt avgjørende for korrekte avgjørelser, og her vil disse kartene øke presisjonen fundamentalt. Den kanskje mest konkrete nytten vil vi se innen prioritering av arealer for myrrestaurering. Et grøftekart vil lette planlegging for Miljødirektoratet, SNO og Statsforvalter, og vil også kunne inngå i et naturfaglig grunnlag for et åpent marked for karbonkreditter basert på restaurering av myr.

6 Referanser

- Bakkestuen, V., Erikstad, L. & Halvorsen, R. 2008. Step-less models for regional environmental variation in Norway. *Journal of Biogeography* 35(10): 1906-1922. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2008.01941.x>
- Bakkestuen, V., Venter, Z., Ganerød, A.J. & Framstad, E. 2023. Delineation of Wetland Areas in South Norway from Sentinel-2 Imagery and LiDAR Using TensorFlow, U-Net, and Google Earth Engine. *Remote Sensing* 15(5): 1203.
- Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H. & Stoneman, R. 2016. *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press, Cambridge. doi:DOI: 10.1017/CBO9781139177788
- Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V.J., Haertel, R., Ilyushchenko, S., Schwehr, K., Weisse, M., Stolle, F., Hanson, C., Guinan, O., Moore, R. & Tait, A.M. 2022. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data* 9(1): 251. doi:10.1038/s41597-022-01307-4
- Bryn, A., Strand, G.-H., Angeloff, M. & Rekdal, Y. 2018. Land cover in Norway based on an area frame survey of vegetation types. *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography* 0(0): 1-15. doi:10.1080/00291951.2018.1468356
- Chollet, F. 2015. Keras. <https://keras.io>
- Couwenberg, J. & Hooijer, A. 2013. Towards robust subsidence-based soil carbon emission factors for peat soils in south-east Asia, with special reference to oil palm plantations. *Mires & Peat* 12: 1-13.
- Dige, G., Eichler, L., Vermeulen, J., Ferreira, A., Rademaekers, K., Adriaenssens, V. & Kolaszewska, D. 2017. Green Infrastructure and Flood Management - Promoting cost-efficient flood risk reduction via green infrastructure solutions. EEA Report No 14/2017. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-flood-management/>
- Jauhiainen, J., Alm, J., Bjarnadottir, B., Callesen, I., Christiansen, J.R., Clarke, N., Dalsgaard, L., He, H., Jordan, S., Kazanavičiūtė, V., Klemedtsson, L., Lauren, A., Lazdins, A., Lehtonen, A., Lohila, A., Lupikis, A., Mander, Ü., Minkinen, K., Kasimir, Å., Olsson, M., Ojanen, P., Öskarsson, H., Sigurdsson, B.D., Sjøgaard, G., Soosaar, K., Vesterdal, L. & Laiho, R. 2019. Reviews and syntheses: Greenhouse gas exchange data from drained organic forest soils – a review of current approaches and recommendations for future research. *Biogeosciences* 16(23): 4687-4703. doi:10.5194/bg-16-4687-2019
- Joosten, H., Barthelmes, A., Couwenberg, J., Hassel, K., Moen, A., Tegetmeyer, C. & Lyngstad, A. 2015. Metoder for å beregne endring i klimagassutslipp ved restaurering av myr. NTNU Vitenskapsmuseet naturhistorisk rapport 2015-10. NTNU Vitenskapsmuseet. <https://www.ntnu.no/documents/10476/1262347829/2015-10+Rapport+Klimagassutslipp.pdf/c83fab53-b626-4c6e-988e-efcc675e8ff2>
- Lyngstad, A. & Vold, E.M. 2015. Kartlegging av typisk høgmyr ved hjelp av flybilder. Østfold, Akershus og sørlige deler av Hedmark. – NTNU Vitenskapsmuseet naturhistorisk rapport 2015-3. NTNU Vitenskapsmuseet. <https://www.ntnu.no/documents/10476/1262347829/2015-3+Rapport+-+h%C3%B8gmyr+flybilder.pdf>
- Miljødirektoratet og Landbruksdirektoratet. 2016. Plan for restaurering av våtmark i Norge (2016-2020) - Med mål om reduserte klimagassutslipp, tilpasning til klimaendringene og bedret økologisk tilstand. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M644/M644.pdf>
- Moen, A. 1999. National Atlas of Norway. Vegetation. Norwegian Mapping Authority, Hønefoss.
- Stachowicz, M., Lyngstad, A., Osuch, P. & Grygoruk, M. Hydrological response to rewetting of drained peatlands – a case study of three raised bogs in Norway.
- Venter, Z.S., Nowell, M.S., Bakkestuen, V., Ruud, A., Kruse, M., Skrindo, A.B., Kyrkjeeide, M.O. & Singsaas, F.T. 2021. Literature review of wetland remote sensing and mapping. NINA Rapport

2014. Norsk institutt for naturforskning. <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2021/juni-2021/literature-review-of-wetland-remote-sensing-and-mapping/>
- Weldon, S., Parmentier, F.-J.W., Grønlund, A. & Silvennoinen, H. 2016. Restaurering av myr. Potensialet for karbonlagring og reduksjon av klimagassutslipp. M628-2016. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m628/m628.pdf>
- Zhuang, J., Yang, J., Gu, L. & Dvornek, N. 2019. ShelfNet for Fast Semantic Segmentation. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICCVW.2019.00113>
- Ågren, A.M., Hasselquist, E.M., Stendahl, J., Nilsson, M.B. & Paul, S.S. 2022. Delineating the distribution of mineral and peat soils at the landscape scale in northern boreal regions. SOIL 8(2): 733-749. doi:10.5194/soil-8-733-2022

Vedlegg

Script i Google Earth Engine for å lage prediktorvariablene brukt i dyplæringen:

```
// Inkluderer TAGEE-funksjonsbiblioteket for terrenganalyse
var TAGEE = require('users/joselucassafanelli/TAGEE:TAGEE-functions');

// Beregner gjennomsnittlig høyde fra Digital Terrain Model (DTM)
var dtmm = ee.Image(dtm.mean()).rename('DTM');
//Map.addLayer(dtmm, {min: 0, max: 2400}, 'dtmm');

// Definerer studieområdets geografiske område (bounding box)
var bbox = geometry;

// Klipper Digital Elevation Model (DEM) basert på studieområdet
var demSRTM = dtmm.clip(bbox).rename('DEM');
//Map.addLayer(demSRTM, {min: 0, max: 2000}, 'klippet', false);

// Analyserer terrengattributter (f.eks. høyde, helning, kurvatur)
var DEMAttributes = TAGEE.terrainAnalysis(TAGEE, demSRTM, bbox);
print(DEMAttributes.bandNames(), 'Parameters of Terrain');

// Visualiseringsinnstillinger for forskjellige terrengattributter
var sel0 = DEMAttributes.select('Elevation');
var sel1 = DEMAttributes.select('Slope');
var sel4 = DEMAttributes.select('Northness');
var sel5 = DEMAttributes.select('Eastness');
var sel6 = DEMAttributes.select('HorizontalCurvature');
var sel7 = DEMAttributes.select('VerticalCurvature');

Map.addLayer(sel0, {min: 0, max: 2469}, 'Høyde - 1 m resolution', false);
Map.addLayer(sel1, {min: 0, max: 90}, 'Helning - 1 m resolution', false);
```

```

// Beregner negativ verdi for sørvendthet og vestvendthet for bedre visualisering
var sel4neg = sel4.multiply(-1);
Map.addLayer(sel4neg, {min: -1, max: 1}, 'Sørvendt - 1 m resolution', false);

var sel5neg = sel5.multiply(-1);
Map.addLayer(sel5neg, {min: -1, max: 1}, 'Vestvendt - 1 m resolution', false);

Map.addLayer(sel6, {min: -0.00001, max: 0.00001}, 'Horizontal Curvature - 1 m resolution', false);
Map.addLayer(sel7, {min: -0.00002, max: 0.00002}, 'Vertical Curvature - 1 m resolution', false);

// Top-hat algoritmer for å identifisere kløft og bakketoppindekser

var dem_max = dtmm.reduceNeighborhood({
  reducer: ee.Reducer.max(),
  kernel: ee.Kernel.circle(7),
});

var dem_min = dem_max.reduceNeighborhood({
  reducer: ee.Reducer.min(),
  kernel: ee.Kernel.circle(7),
});

var valley = dem_min.subtract(dtmm).subtract(0);//.max()

var dem_min2 = dtmm.reduceNeighborhood({
  reducer: ee.Reducer.min(),
  kernel: ee.Kernel.circle(7),
});

var dem_max2 = dem_min2.reduceNeighborhood({
  reducer: ee.Reducer.max(),
  kernel: ee.Kernel.circle(7),
});

var hill = dtmm.subtract(dem_max2).subtract(0);//.max();

var valley2 = valley.where(valley.gt(0).add(hill).lte(0), 0);
var hill2 = hill.where(hill.gt(0).add(valley).lte(0), 0);

// Top hat algorithms

var valleyindex = valley2.divide(hill2.add(valley2));
Map.addLayer(valley, {min: 0, max: 1}, 'Dalkløft index', false);

```

```
print(valley);

// Beregner terrenkskyggekart for å fremheve topografiske funksjoner
var hillshade = dtm.map(function(i){
  return ee.Terrain.hillshade(i);
});

var myhillshade = hillshade.mean();
Map.addLayer(hillshade.mean(), {min: 0, max: 270}, 'Terrenkskyggekart');

// Stakker forskjellige terrenkattributter sammen for videre analyse
var stakk1 = sel1.addBands (sel4neg);
var stakk2 = stakk1.addBands (sel5neg);
var stakk3 = stakk2.addBands (sel7);
var stakk4 = stakk3.addBands (valley);
var stakk5 = stakk4.addBands (hill);
var stakk6 = stakk5.addBands (myhillshade);

print(stakk6);
Map.addLayer(stakk6, {min: 0, max: 1}, 'stakk6');
Map.addLayer(mingeo, {color: '#00FFFF'}, 'mingeo', true);

// Eksporterer den stakkede terrenkanalysen for videre bruk
var dem10proj = dem10.projection();
Export.image.toAsset({
  image: stakk6,
  description: 'GroftbackLev',
  scale: 1,
```


Norsk institutt for naturforskning, NINA, er en uavhengig stiftelse som forsker på natur og samspillet natur–samfunn.

NINA ble etablert i 1988. Hovedkontoret er i Trondheim, med avdelingskontorer i Tromsø, Lillehammer, Bergen og Oslo. I tillegg driver NINA Sæterfjellet avlsstasjon for fjellrev på Oppdal, og forskningsstasjonen for vill laksefisk på Ims i Rogaland.

NINAs virksomhet omfatter både forskning og utredning, miljøovervåking, rådgivning og evaluering. NINA har stor bredde i kompetanse og erfaring med både naturvitere og samfunnsvitere i staben. Vi har kunnskap om artene, naturtypene, samfunnets bruk av naturen og sammenhenger med de store drivkreftene i naturen.

ISSN:1504-3312
ISBN: 978-82-426-5252-2

Norsk institutt for naturforskning

NINA Hovedkontor

Postadresse: Postboks 5685 Torgarden, 7485 Trondheim

Besøks-/leveringsadresse: Høgskoleringen 9, 7034 Trondheim

Telefon: 73 80 14 00, Telefaks: 73 80 14 01

E-post: firmapost@nina.no

Organisasjonsnummer 9500 37 687

<http://www.nina.no>



Samarbeid og kunnskap for framtidens miljøløsninger