



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

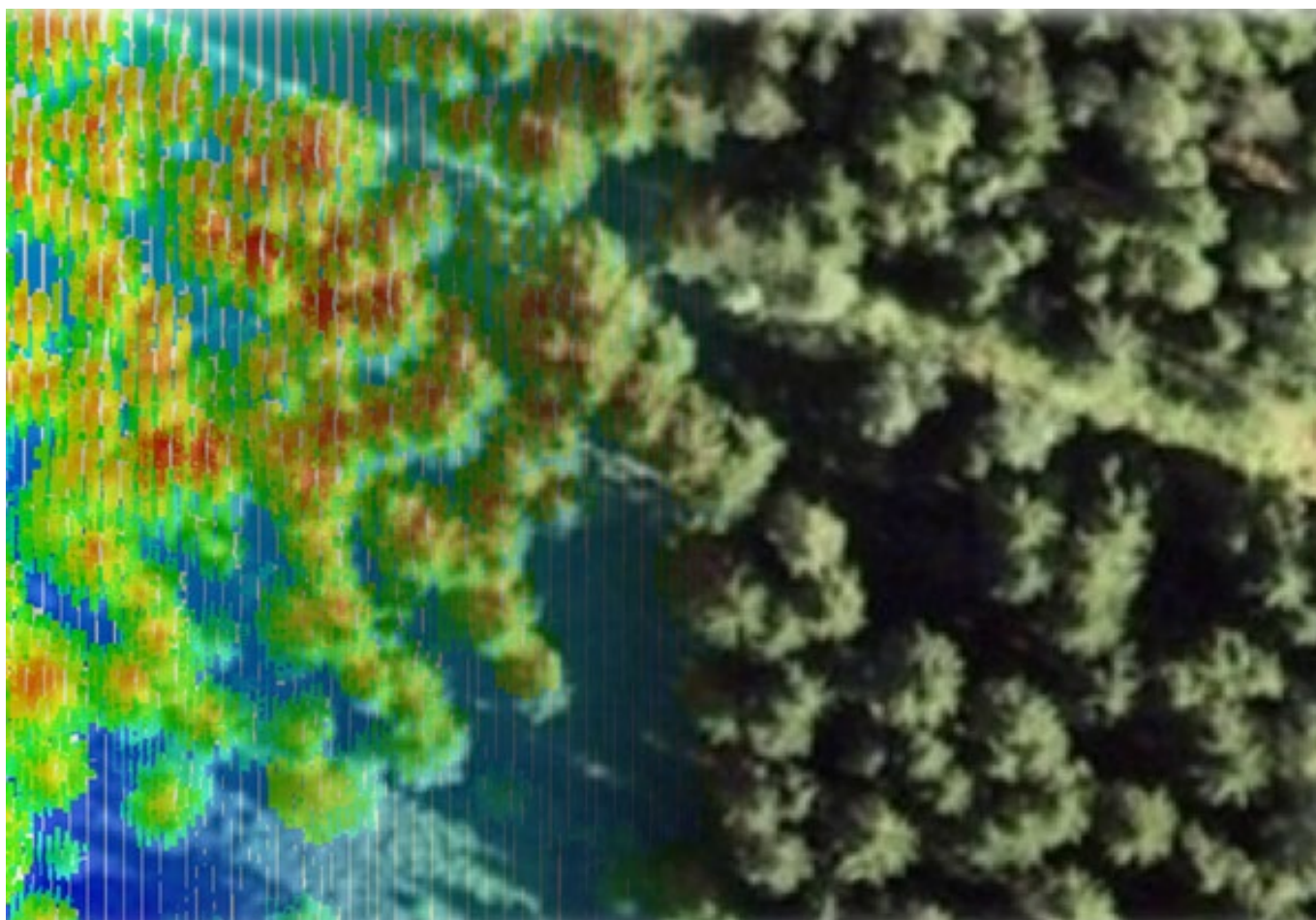
2026

ISSN 2535-2806

MINA fagrapport 110

Fjernmålt kartlegging av tørkestress hos gran

Rachel Kuzmich
Johan Asplund
Danielle Creek
Claire Devos
Terje Gobakken
Line Nybakken
Hans Ole Ørka
Ole Martin Bollandsås



Kuzmich, R., Asplund, J., Creek, D., Devos, C., Gobakken, T., Nybakken, L., Ørka, H.O. & Bollandsås, O.M. 2026. **Fjernmålt kartlegging av tørkestress hos gran.** – MINA fagrapport 110. 18 s.

Ås, januar 2026

ISSN: 2535-2806

RETTIGHETSHAVER

© Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU)

Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse

TILGJENGELIGHET

Åpen

PUBLISERINGSTYPE

Digitalt dokument (pdf)

KVALITETSSIKRET AV

Forskningsutvalget, MINA, NMBU

OPPDRAUGSGIVER

Skogtiltaksfondet, Utviklingsfondet for skogbruket.

FORSIDEBILDE

Farget laserpunktsky og flybilde.

NØKKEWORD

Gran, tørke, skoghelse

KEY WORDS

Norway spruce, drought, forest health

Rachel Kuzmich, Johan Asplund, Danielle Creek, Terje Gobakken, Line Nybakken, Hans Ole Ørka, & Ole Martin Bollandsås: Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Ås.

Claire Devos: Ansatt ved MINA, NMBU da arbeidet ble utført.

Forord

Denne rapporten formidler resultatene fra prosjektet «Fjernmålt kartlegging av tørkestress hos gran» (jan. 2024 – des. 2025). Prosjektet har vært et samarbeid mellom NMBU, Glommen Mjøsen Skog, Viken Skog og AT Skog.

Prosjektgruppen vil gjerne gi en stor takk til Irmina Walker Ørka og Håkon Næss Sandum for hjelp til å samle inn dronedata i Våler. En takk går også til alle skogeierne som har latt oss bruke skogen deres som laboratorium. Vi er også takknemlige for samarbeid og datautveksling med det NMBU-ledede forskningsprosjektet «Predict» og til «Global Change Research Institute of the Czech Academy of Sciences – CzechGlobe» i Brno, Tsjekkia for å ha samlet hyperspektrale data for alle studieområder.

Sammendrag

Denne studien har analysert muligheten for å bruke fjernmåling til å oppdage fysiologisk tørkestress hos gran før synlige skader oppstår. Vi utviklet en stressindeks (Tree Growth-Water Index - TGWI) basert på detaljerte dendrometermålinger av enkelttrær, og sammenlignet denne med data fra multispektrale bilder fra droner og hyperspektrale flybilder. Studien viser at endringer i vegetasjonsindekser over tid (tidsserier), spesielt i "Red edge" (~700 nm) og nær-infrarøde bølgelengder, har størst potensial for å avdekke tørkestress. Studien konkluderte med at gratis satellittdata fra Sentinel-2, kombinert med voksestedsdata, kan danne grunnlaget for et operativt overvåkingssystem for å hjelpe skogbruket med å identifisere risikoutsatte bestand.

Summary

This study has analyzed the feasibility of using remote sensing to detect physiological drought stress in spruce trees before visible damage occurs. We developed a stress index (Tree Growth-Water Index - TGWI) based on detailed dendrometer measurements of individual trees and compared this with data from multispectral images captured from drones and hyperspectral aerial imagery. The study showed that changes in vegetation indices over time (time series), particularly in the "Red edge" (~700 nm) and near-infrared wavelengths, have the greatest potential for revealing drought stress. The study concluded that free satellite data from Sentinel-2, combined with site data, can form the basis of an operational monitoring system to assist forestry in identifying at-risk stands.

Innhold

Sammendrag.....	4
Summary.....	5
1. Innledning og bakgrunn.....	7
2 Data	8
2.1 Studieområder	8
2.2 Feltdata	8
Prøveflater og utvalg	8
Dendrometre og TGWI	8
2.3 Fjernmålingsdata	8
Datainnsamling	8
Prosessering av fjernmålte data	8
3 Analyser	10
3.1 Beregning av uttrykket for tørkestress (TGWI).....	10
3.2 Analyser med multispektrale bilder.....	11
Prosessering av fjernmålte data	11
Forklaringsvariabler	11
Statistisk modellering	12
3.3 Analyser med hyperspektrale bilder.....	12
Statistisk modellering	12
4. Resultater	14
Analyser med multispektrale bilder.....	14
Analyser med hyperspektrale bilder.....	16
5. Diskusjon.....	17
Referanser	20

1. Innledning og bakgrunn

Det boreale skogbeltet varmes opp dobbelt så raskt som det globale gjennomsnittet (IPCC, 2014), men nettoeffekten av klimaendringer på skogens produktivitet er fortsatt usikker. Mens lengre og varmere vekstsesonger kan fremme veksten, kan vi også få en økning i biotiske og abiotiske forstyrrelser, som insektutbrudd, sen vårfrost, hetebølger og tørke (Allen et al., 2010, Seidl et al., 2014).

Treslag som vokser i randsonene eller utenfor sitt naturlige utbredelsesområde forventes å være spesielt utsatt for stress forårsaket av klimaendringer (Seidl et al., 2017). Et eksempel er gran (*Picea abies*), som har vært plantet utenfor sitt naturlige utbredelsesområde på grunn av den relativt raske veksten og den høye tømmerkvaliteten (Caudullo et al., 2016, Spiecker, 2000). I de senere år har imidlertid veksten i granskog blitt redusert, og man har registrert høye mortalitetsrater på grunn av hetebølger og sommertørke (Boden et al., 2014, Krejza et al., 2021, Rosner et al., 2018). Gitt granas økonomiske betydning, er det et akutt behov for å utvikle effektive metoder for å overvåke respons på tørke.

Gran er svært viktig for skogbruket i Norge, og utgjør over 70 % av det årlige avvirkede tømmervolumet. Treslaget er imidlertid sårbart for klimaendringer, spesielt i form av hyppigere og mer intense tørkeperioder i vekstsesongen. Tørkestress reduserer ikke bare tilveksten (Bošel'a et al., 2014, Lévesque et al., 2013), men svekker også trærnes motstandskraft mot sekundære skadegjørere, der barkbiller (*Ips typographus*) utgjør den største trusselen (Netherer et al., 2021, Netherer et al., 2019). I tillegg kan tørke føre til direkte kvalitetstap gjennom sprekkdannelser i veden.

For å kunne håndtere denne relativt ekstraordinære situasjonen, og for å kunne planlegge forvaltningen, trengs god informasjon, til riktig tid, om tilstanden til granskogen. Dagens ordinære skogbruksplaner baserer seg imidlertid på datainnsamling som gjennomføres med ca. 15 års mellomrom. Denne frekvensen er ikke tilstrekkelig for å fange opp akutte helseendringer i skogen som følge av for eksempel tørkehendelser. I tillegg ville det være en stor fordel å kunne avdekke svak helse før trærne er så svake at de uansett vil dø. Det er derfor et økende behov for overvåkingssystemer som kan gi skogeiere og forvaltere løpende informasjon om skogens helsetilstand. Slik informasjon er avgjørende for å kunne iverksette tiltak, som for eksempel sanitærhogst eller prioritering av hogst i bestand som står i fare for å tape verdi.

Fjernmålingsteknologi tilbyr et kraftfullt supplement til tradisjonelle feltmålinger ved å kunne levere hyppige, romlig detaljerte data over store skogarealer. Multispektrale og spesielt hyperspektrale sensorer kan fange opp subtile endringer i blad- og vannstatus og klorofyllrelaterte signaturer som ofte opptrer før synlige symptomer som nåletap eller misfarging. Ved å kombinere slike spektrale data med kontinuerlige feltmålinger (f.eks. dendrometre) kan man dermed oppnå tidligere og mer målrettet overvåking av tørkestress i granbestand, noe som forbedrer muligheten for raske forvaltningsbeslutninger.

Hovedmålet med denne studien har vært å undersøke om spektrale data kan brukes til å detektere fysiologisk tørkestress hos gran før synlige skader (som nåletap eller misfarging) oppstår.

2 Data

2.1 Studieområder

Studien har hovedsakelig benyttet prøveflater i Våler kommune, i tillegg til fjernmålte data fra følgende lokaliteter (fra nord mot sør): Finstad, Hanestad, Koppang, Rena, Elverum, Åsnes, Eidskog, Rømskog og Aremark (Figur 1). På alle lokalitetene ble det etablert prøveflate-par for å representere både lite tørkeutsatt skog og bestand med større sannsynlighet for tørkestress.

2.2 Feltdata

Prøveflater og utvalg

På hver prøveflate ble representative grantrær valgt ut for feltmålinger. Utvalget inkluderte trær i ulike dimensjonsklasser og stående på ulike vokseplasser for å fange variasjon i respons.

Dendrometre og TGWI

På de utvalgte trærne ble dendrometre montert. Dendrometre måler ørsmå døgn- og sesongsvariasjoner i stammediameter, som reflekterer vekst og vannrelatert krymping/utvidelse. Kun Våler-lokaliteten hadde dendrometerdata ferdig prosessert og klare til bruk i analyser da denne studien ble gjennomført. Basert på disse tidsseriene ble det utledet en indeks for treets stressnivå, «Tree Growth–Water Index» (TGWI) (beskrivelse av beregning og prosessering av TGWI i eget avsnitt).

2.3 Fjernmålingsdata

Datainnsamling

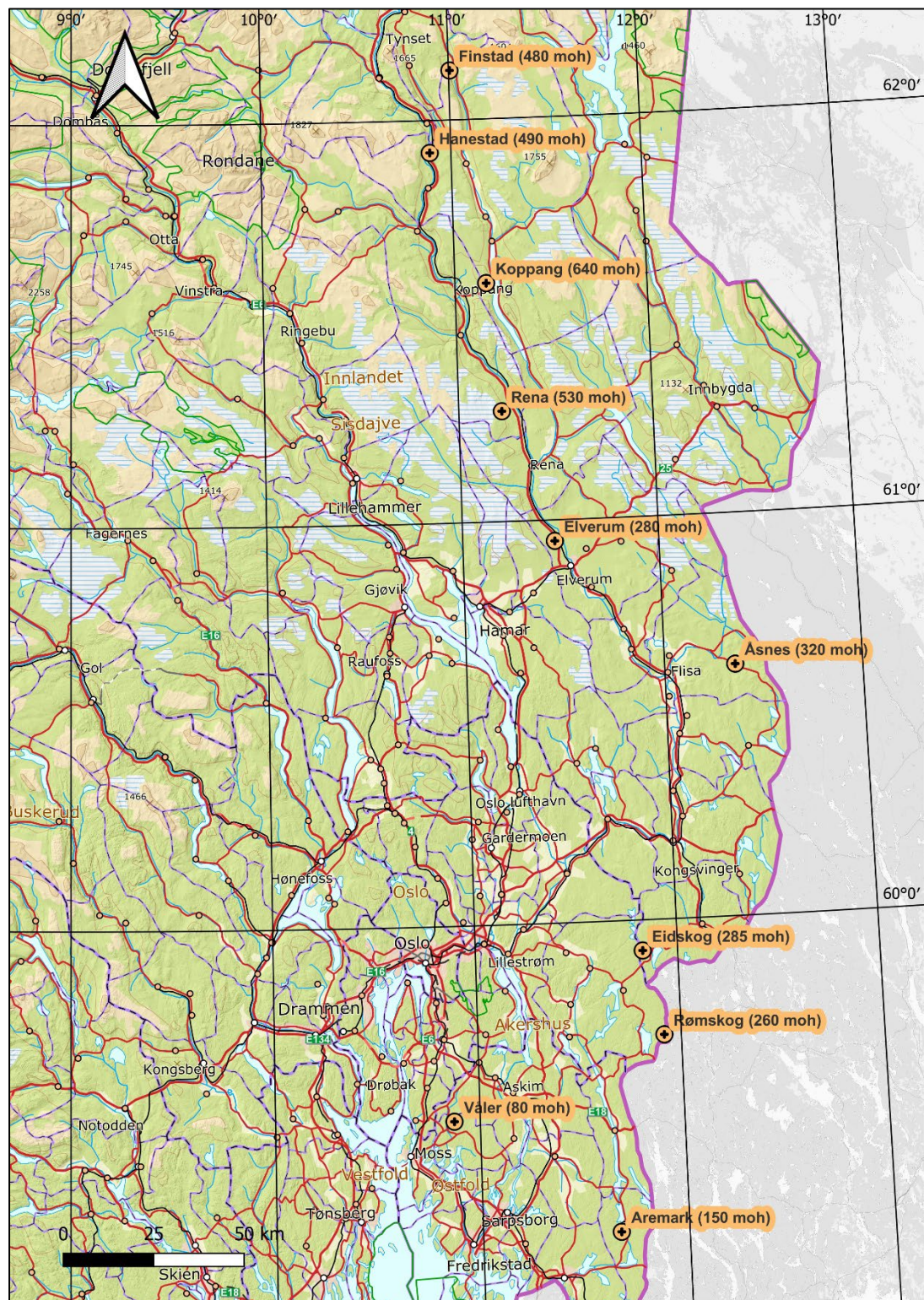
I Våler, parallelt med de fysiologiske målingene, ble det gjennom hele vekstsesongen 2023 gjennomført datainnsamling med drone (UAV) utstyrt med multispektral sensor (DJI Mavic 3M). For Våler og alle andre lokaliteter ble det i tillegg samlet inn hyperspektrale data (for ett tidspunkt). De hyperspektrale dataene ble samlet i juli 2023 et CASI1500 kamera, båret av et Cessna 208B fly.

De hyperspektrale dataene har svært høy oppløsning langs det elektromagnetiske spektrumet. En spektralverdi i et gitt bånd fra et hyperspektralt bilde er et gjennomsnitt av reflektansen i et 10 nanometers intervall. I et multispektralt bånd kan intervallet være 200 nanometer. Hyperspektrale data er derfor nyttige hvis det man kartlegger er sensitivt for svært spesifikke og smale deler av lysspekteret, som for eksempel små forskyvninger i klorofyllfluorescens eller subtile endringer i vanninnhold som kan drukne i de bredere båndene til en multispektral sensor. Hyperspektrale data gir dermed muligheten til å oppdage fysiologiske endringer på et tidlig stadium, potensielt før de blir synlige for det blotte øyet eller fanges opp av konvensjonelle multispektrale instrumenter. I sammenheng med dette prosjektet var imidlertid hovedgrunnen til å inkludere dataene at det ga mulighet for å gjøre mer detaljerte analyser med tanke på å finne hvilke bølgelengder som kunne forklare variasjonen i TGWI. Med hyperspektrale data var det også mulig å beregne ytterligere vegetasjonsindekser enn de som kunne bregnes fra multispektrale data, blant andre indekser som er beskrevet i litteraturen som gode indikatorer for vannhusholdning i trær.

Prosessering av fjernmålte data

De spektrale dataene ble radiometrisk korrigert i tillegg til at det ble foretatt andre nødvendige justeringer for at de spektrale verdiene ikke skal være påvirket av annet et egenskapene til overflaten de er reflektert fra. Dataene ble i tillegg georeferert for å kunne knyttes direkte til trærne som var målt på bakken. Fra de multi- og hyperspektrale dataene, ble det beregnet en rekke

vegetasjonsindekser (Tabell 1) som tidligere har vist seg å beskrive vitalitet og vannhusholdning hos trær på en god måte (Le et al., 2023, Huang et al., 2021, Yan et al., 2025, Zeng et al., 2020).



Figur 1. Oversiktskart som viser lokalitetene brukt i studien. Elevasjon i parentes etter lokalitetsnavn.

3 Analyser

Hovedhensikten med analysene var å koble endringer i trærnes spektrale signatur (lysrefleksjon i ulike bølgelengder) direkte til det målte stressnivået (TGWI). Oppsummert kan analysene deles inn i to kategorier:

1. Analyser med multispektrale bilder

- Analysene ble utført kun med data fra Våler og med en tidsserie av fjernmålingsdata.
 - Det ble utført en **parvis korrelasjonsanalyse** for å finne hvilke spektrale variabler som alene er sterkest korrelert med TGWI.
 - Det ble videre **utviklet en statistisk modell** for å finne relativ viktighet av variablene når all informasjon er tilgjengelig.

2. Analyser med hyperspektrale bilder

- Analysene er i hovedsak utført med data fra Våler, men ulike vegetasjonsindekser ble kartlagt for alle andre områder. Fjernmålte data fra ett tidspunkt.
 - Det ble **utviklet en modell** for å finne relativ viktighet av variablene når all informasjon er tilgjengelig.
 - Det ble gjort en **kartlegging av vegetasjonsindekser** for alle studieområder.

Detaljer om analysene kommer i de følgende avsnittene.

3.1 Beregning av uttrykket for tørkestress (TGWI)

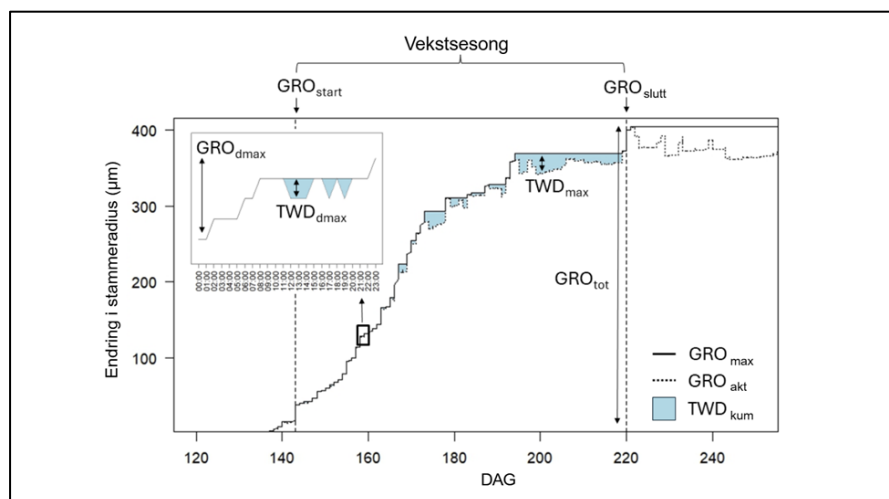
TGWI (Tree Growth-Water Index) ble utviklet i dette prosjektet for å fange opp trærnes helhetlige fysiologiske tilstand gjennom vekstsesongen. I stedet for å se på enkeltmålinger isolert (som bare vekst eller bare vanntilgang), kombinerer TGWI tidsseriemålinger fra dendrometre gjennom vekstsesongen til en enkelt verdi som plasserer hvert tre på en skala fra "stresset/lav vitalitet" (negativ eller lav verdi) til "god vitalitet/høy vekst" (høy verdi). Indeksen ble beregnet ved hjelp av prinsippkomponentanalyse (PCA) av nøkkelvariabler utledet fra dendrometerdataene, og de to første komponentene ble vektet sammen (Eq. 1) med de respektive forklarte varianser (ω) som vektor:

$$TGWI = \frac{-(\omega_1 \times PC1 + \omega_2 \times PC2)}{(\omega_1 + \omega_2)} \quad \text{Eq. 1}$$

Indeksverdien er gjennom vektingen i størst grad påvirket av komponenten som forklarer mest av variansstrukturene. En lav eller negativ verdi for TGWI indikerer stress, mens Figur 2 viser et eksempel på en dendrometer-tidsserie med disse nøkkelvariablene illustrert. Figuren viser endringen i stammeradien over dagnummer i året (DAG). Vekstsesongen er indikert med stiplede vertikale linjer.

Det ble først gjort en vurdering av hvilke egenskaper som burde være representert for at den endelige indeksen skulle representere vannhusholdningen til trærne. Både det maksimale vannunderskuddet treet opplevde ($TWD_{\max}$) og det samlede vannunderskuddet over tid (TWD_{kum}) ble ansett for å være viktig input til indeksen. I tillegg, hvor mange dager treet faktisk hadde vekst ($GRO_{\text{akt}} > 0$), lengden på vekstsesongen ($GRO_{\text{slutt}} - GRO_{\text{start}}$) og den totale radietilveksten (GRO_{tot}) ble også ansett for å være viktig for at indeksen skulle være sensitiv til faktisk vekst og vekstpotensial.

En lav TGWI-verdi indikerer et tre som har hatt gunstige forhold: lavt vannstress, mange vekstdager og god diametertilvekst. En høy TGWI-verdi indikerer et tre preget av stort vannunderskudd og redusert vekstaktivitet. Indeksen gir oss dermed et mer robust mål på treets respons på miljøet enn en enkel vekstmåling alene ville gjort.



Figur 2. Illustrasjon av dendrometermålinger for et tre over en vekstsesong.

3.2 Analyser med multispektrale bilder

Prosessering av fjernmålte data

De multispektrale dronebildene ble radiometrisk korrigert og harmonisert over tid. For hver trekrone ble det hentet ut spektraldata (reflektans fra hvert pixel) for fire bånd: grønn, rød, «Red edge» og nærinfrarød (NIR). Deretter ble det beregnet fire vegetasjonsindekser som er kombinasjoner av reflektansen i ulike spektrale bånd, også dette per pixel. Slike indekser er i mange tilfeller mer hensiktsmessig informasjon sammenlignet med reflektansen i de enkelte spektrale bånd fordi de uttrykker differanser mellom i reflektans i ulike deler av det elektromagnetiske spektrumet, noe om både gjør at man i mindre grad er avhengig av å kalibrere for effekter som følge av at det er et gitt måleinstrument som er brukt, samt lys- og fuktighetsforhold på måletidspunktet. Indeksene vi har brukt er (se Tabell 1 for detaljer):

$$\text{NDVI: } \frac{(NIR - \text{rød})}{(NIR + \text{rød})}$$

$$\text{GNDVI: } \frac{(NIR - \text{grønn})}{(NIR + \text{grønn})}$$

$$\text{NDRE: } \frac{(NIR - \text{red edge})}{(NIR + \text{red edge})}$$

$$\text{SR: } \frac{NIR}{\text{rød}}$$

Forklaringsvariabler

Informasjonen fra bildene ble hentet ut fra bildene på følgende måte: 1) Bildepixler fra hver trekrone ble avgrenset (ved hjelp av laserdata samlet fra fly). 2) Både for reflektansen i hvert av de fire båndene og for vegetasjonsindeksene, ble det beregnet gjennomsnitt, standardavvik, minimums- og maksimumsverdi innenfor hver trekrone. 3) For å fange opp dynamikken gjennom vekstsesongen, ble tidsseriene for både reflektansen til vegetasjonsindeksene omgjort til sesong-verdier: gjennomsnitt, variasjon (standardavvik), ekstremverdier (min/maks) og endringsrate (stigningstall).

Statistisk modellering

Sammenhengen mellom stressindeksen (TGWI) og de fjernmålte dataene ble analysert på to måter:

Korrelasjonsanalyse: Dette ble utført for å kartlegge hvilke spektrale bånd som samvarierte sterkest med stressindeksen. Det ble lagt vekt på å sammenligne viktigheten av gjennomsnittlige verdier over vekstsesongen og variablene som indikerte trender for å kunne si noe om verdien av å ha tidsserier av fjernmålingsdata.

Modellutvikling: Partial Least Squares Regression (PLSR) (Wold et al., 1984, Wold et al., 2001, Martens and Martens, 2001) ble brukt for å bygge en prediksjonsmodell som håndterer at mange av fjernmålingsvariablene er sterkt korrelerte med hverandre. Gjennom PLSR-analysen ble variablenes viktighet beregnet for å isolere hvilke spektrale bånd og tidstrender som best forklarer variasjonen i tørkestress hos gran og furu. For å få en robust indikasjon på viktighet, ble PLSR-analysen kjørt flere ganger med ulike kriterier for å vekte de enkelte variablene i modellen. Det endelige viktighetskriteriet («consensus importance») ble beregnet basert på disse gjentatte analysene. En variabel med «consensus importance» større enn verdien 1 er vanligvis vurdert som viktig.

PLSR er en metode som er spesielt godt egnet når man har mange forklaringsvariabler som er innbyrdes korrelerte (multikollinearitet). I motsetning til vanlig regresjon, som ser på hver variabel isolert, reduserer PLSR de spektrale dataene til et sett med latente variabler (komponenter). Disse komponentene er konstruert for å maksimere den forklarte kovariansen mellom fjernmålingsdataene (X) og stressindeksen (Y).

Hver variabel blir vektet i henhold til sitt bidrag til disse komponentene. Variabler som bærer mye informasjon relevant for å forutsi treets stressnivå, får høyere vekt, mens støy eller irrelevant informasjon tones ned. Modellen kan formuleres matematisk som:

$$\hat{Y} = XB_{PLS} \quad \text{Eq. 2}$$

der matrisen med regresjonskoeffisienter (XB_{PLS}) er definert som:

$$B_{PLS} = W(P^T W)^{-1} Q^T \quad \text{Eq. 3}$$

Her representerer W vektene for X-variablene, P og Q er ladningene («loadings») for henholdsvis X og Y. Denne strukturen gjør det mulig å håndtere komplekse datasett med høy dimensjonalitet uten at modellen blir ustabil.

3.3 Analyser med hyperspektrale bilder

Statistisk modellering

På samme måte som for modellen basert på de multispektrale dataene, ble også utviklet en PLSR-modell for TGWI basert på hyperspektrale data. Som en demonstrasjon på bruken av spektral informasjon for å kartlegge tørkestress, ble det for alle studieområder utarbeidet temakart for ulike vegetasjonsindekser. Hovedformålet med denne kartleggingen var å visualisere hvordan indeksverdiene varierer over arealet og i hvilken grad de samvarierer.

Tabell 1. Vegetasjonsindekser som karakteriserer komplementære aspekter ved vegetasjon (dvs. struktur, fysiologi og biokjemi). Indekser er basert på informasjon fra relativt brede spektrale bånd (indikert med *) og andre er knyttet strengt til smale bånd (indikert med **). I kolonnen «Spektral informasjon» vises bølgelengden i nanometer for båndene som er brukt for å beregne indeksene fra de hyperspektrale dataene, samt verbal beskrivelse av båndene for indeksene beregnet fra de multispektrale dataene.

Indeks	Navn	Bølgelengde	Beskrivelse
NDVI*	normalized difference vegetation index	Rød (669) NIR (797)	Mål på vegetasjonens grønnet, ofte brukt for estimering av biomasse og fotosyntetisk aktiv vegetasjon.
GNDVI*	green normalized difference vegetation index	Grønn (555) NIR (797)	Mål på vegetasjonens grønnet, mer følsom for klorofyllinnhold enn NDVI.
NDRE*	normalized difference Red edge	Red edge (726) NIR (797)	Mål på vegetasjonens grønnet, i stand til å trenge inn i og oppdage stress i tette trekroner.
SR*	simple ratio	Rød (669) NIR (797)	Mål på vegetasjonens helse, men må kalibreres.
WBI**	water band index	897 969	Mål på vanninnhold, brukt til tørkeovervåking.
STR**	structure ratio	854 897	Estimerer variasjon i strukturelle egenskaper, som kan være forbundet med stress.
SIP**	structure insensitive pigment index	441 683 797	Estimerer relativ pigmentsammensetning (dvs. forholdet mellom klorofyll og karotenoid), brukt til å oppdage stress.
MCARI**	modified chlorophyll absorption in reflectance index	555 669 698	Estimerer klorofyllinnhold samtidig som den reduserer påvirkningen av ikke-fotosyntetisk bakgrunn (dvs. jord) og bladstruktur
ACI**	anthocyanin content index	555 655	Følsom for antocyaninpigmenter (rødt, lilla og blått), ofte assosiert med plantestress.
PRI**	photochemical reflectance index	526 569	Estimerer planters fotosyntetiske effektivitet (dvs. hvordan planter bruker absorbert lys), brukt til tidlig tørke- og stressovervåking.
RVSI**	Red edge vegetation stress index	712 726 755	Designet for å oppdage subtile endringer i "Red edge", assosiert med stress og endringer i klorofyllabsorpsjon.
PSI**	plant stress index	698 755	Et forholdstall designet for å oppdage stress.

4. Resultater

Tolkning av resultatene fra PCA-analysen (Tabell 2) der nøkkelementene ble vektet sammen til TGWI-indeksen, viser at underskudd på vann (TWD_{kum} og TWD_{dmax}) var sterkt positivt korrelert med TGWI for første prinsipalkomponent (PC1), mens de vekst-relaterte variablene virket i motsatt retning. Dette er et forventet resultat, og det viser også at trær med høyt vannunderskudd (høy TWD) generelt hadde hatt færre dager med aktiv vekst og lavere totaltilvekst. For den andre prinsipalkomponenten (PC2) er alle variabler positivt korrelert. Siden vekstvariablene har de sterkeste positive ladningene her, er PC2 i stor grad påvirket av trær med lang vekstsesong og høy totalvekst. Siden disse verdiene vektet negativt inn i den endelige TGWI-formelen (Eq. 1), betyr det at trær med høy vekstkapasitet (høy PC2) får en lavere stress-skåre, noe som er fysiologisk logisk. De to første prinsipalkomponentene beskriver omtrent 82 % av variasjonen i de originale variablene (PC1 48 %, PC2 34 %). Tabellen viser også «loadings» for de tre neste komponentene (i lys grå) som til sammen forklarer den resterende variasjonen. Det er ikke gjort forsøk på å gi disse en fortolkning, siden disse komponentene bidrar lite.

Tabell 2. Sammendrag av «loadings» fra PCA-analysen. En loading indikerer korrelasjonen (både retning og styrke) mellom de originale variablene og TGWI indeksen.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
TWD_{kum}	0.53	0.39	-0.07	-0.20	-0.72
TWD_{dmax}	0.49	0.44	-0.15	0.59	0.45
$GRO_{akt} > 0$	-0.58	0.25	-0.05	0.63	-0.46
$GRO_{slutt} - GRO_{start}$	-0.19	0.58	0.74	-0.22	0.17
GRO_{tot}	-0.34	0.50	-0.65	-0.41	0.20

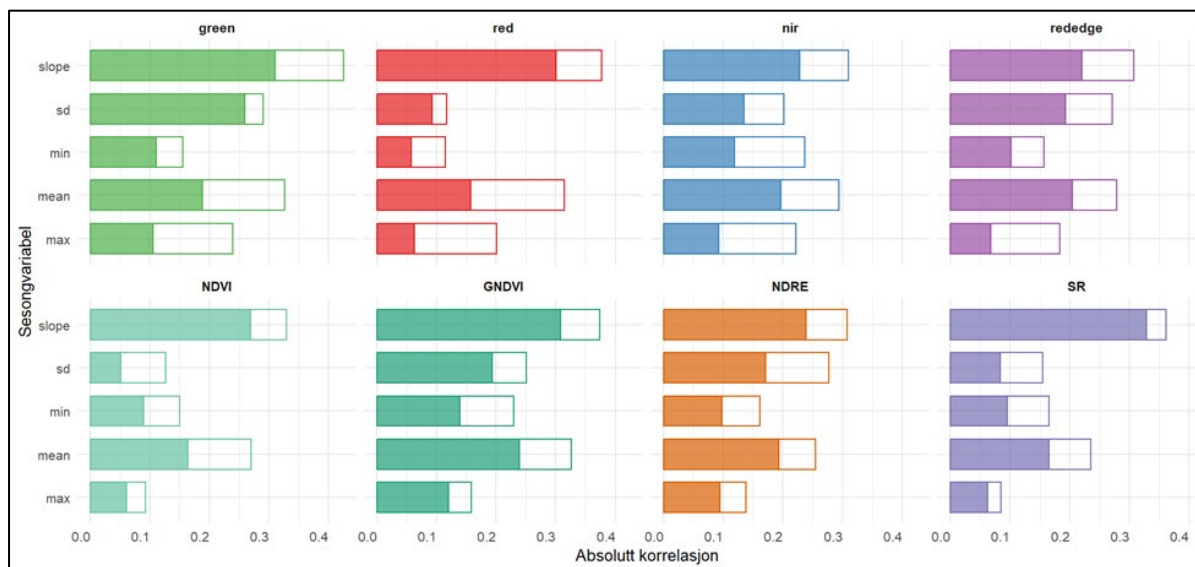
Analyser med multispektrale bilder

Korrelasjonsanalyse

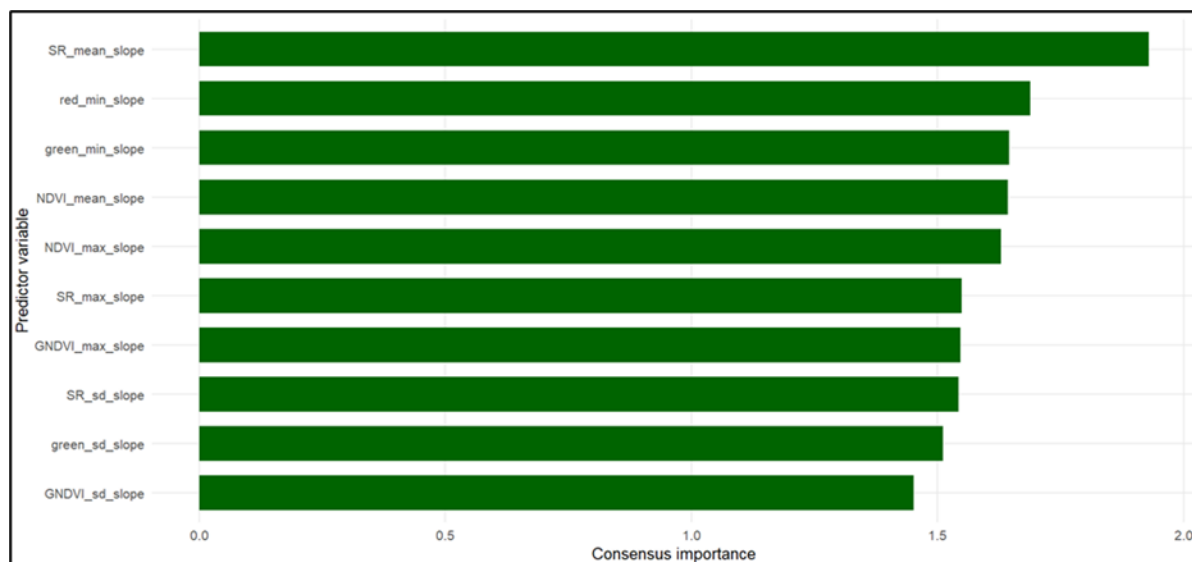
Resultatene basert på multispektrale data fra Våler viste at det var endringene i de spektrale verdiene gjennom sesongen («slope») som var sterkest korrelert med TGWI, heller enn gjennomsnittsverdiene. Dette vises tydelig i Figur 3 der søylene for nettopp «slope» er de lengste for alle spektrale variabler og vegetasjonsindekser. Noe som ikke går fram av figuren var at det var særlig endringen i minimumsverdier som var viktig for spektralverdiene, og endringen i maksimumsverdien for vegetasjonsindeksene. Det går imidlertid fram av figuren at gjennomsnittsverdien over sesongen var bedre enn de andre momentstatistikk-variablene (max, mean, min, sd).

Modellutvikling

Modelleringen med PLSR (Eq. 2) bekreftet at det var sesongvariablene som var absolutt dominerende med tanke på å forklare variasjonen i TGWI. Figur 4 viser en rangering av de 10 variablene med hensyn på «consensus importance» kriteriet, og at alle disse var variabler som beskrev endringer over vekstsesongen («slope»). Faktisk er 18 av de 20 høyest rangerte av denne typen. Som nevnt blir alle tilgjengelige variabler brukt i modellen med ulike vekter, men viktigheten av endringsvariabler er det desidert viktigste resultatet å ta med seg fra denne analysen.



Figur 3. Gjennomsnittlige (fylte søyler) og maksimale (omriss) korrelasjonsverdier mellom sesongbaserte variabler for spektralbånd og vegetasjonsindekser og TGWI.

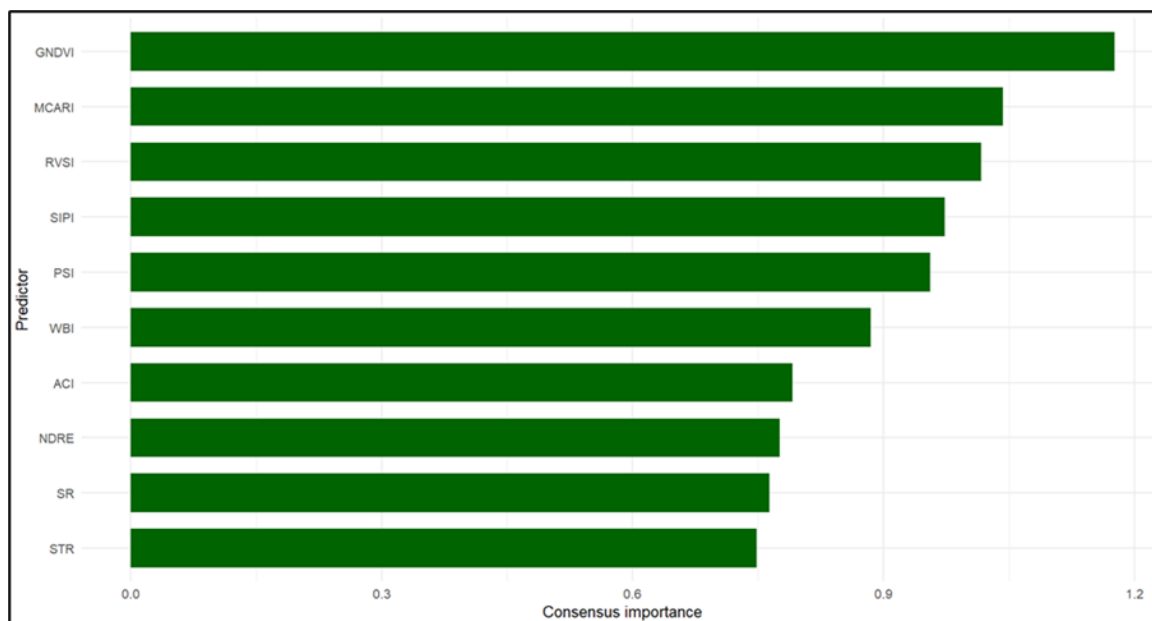


Figur 4. «Consensus importance» for de 10 viktigste forklaringsvariablene («Predictor variable») for TGWI, som inkluderte sesongbaserte variabler for spektralbånd og vegetasjonsindekser.

Analysér med hyperspektrale bilder

Modellutvikling

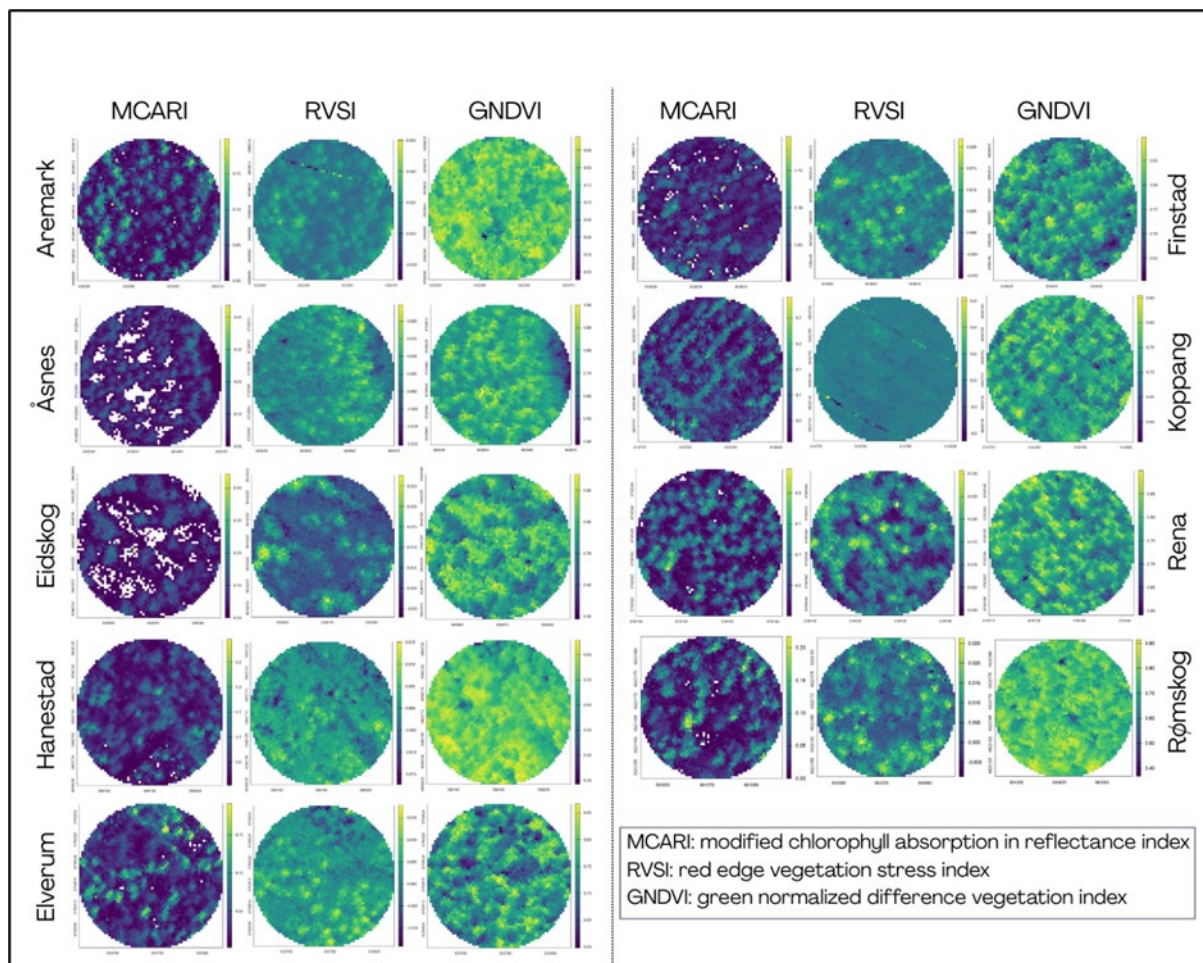
PLSR-modelleringen med de hyperspektrale dataene viste at de tre vegetasjonsindeksene som ble rangert på topp med tanke på «consensus importance»-kriteriet var GNDVI, MCARI og RVSI (Figur 5). Alle er sensitive til klorofyllendringer og har tidligere vært brukt til å detektere tørkestress hos planter og trær. GNDVI var en av indeksene som også ble beregnet for de multispektrale dataene.



Figur 5. «Consensus importance» for ulike vegetasjonsindekser beregnet fra hyperspektrale data med tanke på å forklare TGWI.

Kartlegging av vegetasjonsindekser

Figur 6 er en visualisering av prediksjoner av de tre vegetasjonsindeksene som i størst grad forklarte variasjonen i TGWI. Disse temakartene illustrerer variasjonen til de aktuelle vegetasjonsindeksene for en prøveflate i hvert studieområde. Det man kan legge merke til er at det er forskjeller mellom indeksene på enkelte av flatene med hensyn på evnen til å beskrive variasjoner på enkelttreenivå. Dette indikerer at enkelte indekser kanskje best beskriver situasjonen på litt større romlig skala (her RVSI), mens andre er mer sensitive for forskjeller mellom enkelttrær. Vi kan ikke ut fra dette direkte si noe om kvaliteten på informasjonen indeksene gir, men vi vet at disse var sterkt korrelert med TGWI i Våler og vi har fått illustrert at indeksene har ulike egenskaper.



Figur 6. Temakart. Prediksjoner av vegetasjonsindekser for én flate i hvert studieområde. Forklaring på de ulike indeksene finnes i Tabell 1. Mørke farger (blå) = lav indeksverdi, lyse farger (gul) = høy indeksverdi.

5. Diskusjon

Analysene i dette prosjektet har gitt verdifull innsikt i sammenhengen mellom trærnes vannhusholdning og den spektrale signaturen som er assosiert med tørkestress. Basert på resultatene og erfaringene fra prosjektet, tegner det seg et bilde av mulighetene – men også begrensningene – for å etablere et praktisk system for overvåking av tørkestress.

Vi vil trekke frem fire hovedmomenter som er avgjørende for en eventuell operasjonalisering av metoden:

1. Tolkning av stress-signalet (TGWI)

Indeksen vi har utviklet, TGWI, er ment å skulle representere treets fysiologiske respons på vanntilgang der og da. Det er viktig å understreke at selv om treet opplever et vannunderskudd og redusert vekst i en periode, er ikke nødvendigvis synonymt med at treet er døende eller påført varig skade. Hvis ikke de fysiologiske skadene i treet har blitt for store, har gran evne til å hente seg inn igjen dersom vanntilgangen bedres. Et operativt system må derfor skille mellom akutt, men forbigående stress og kritisk, vedvarende stress som indikerer høy risiko for død eller barkbilleangrep. Vi må jobbe videre med dendrometermålinger fra flere år og langs naturlige klimagrader (flere prøveflater) for

å bedre forstå granas tålegrenser og evne til å komme seg igjen etter ulike grader av stress. Dette er hovedmålene i det NFR-finansierte prosjektet PREDICT, ledet av NMBU.

I dette prosjektet var dataene fra Våler fra en relativt smal variasjonsbredde med tanke på trestørrelser og bonitet. I en operativ situasjon der man skal uttrykke tørkestress gjennom en indeks som TGWI, er det trolig nyttig å uttrykke vekstdelen av indeksen relativt til disse attributtene siden de har betydning for veksthastigheten. I denne studien har bruk av absolutte vekstuttrykk trolig ikke påvirket kvaliteten på resultatene i negativ retning.

2. Styrken i sammenhengene

Våre analyser viser statistisk signifikante sammenhenger mellom fjernmålingsdata og tørkestress, spesielt knyttet til endringer i det grønne og røde spekteret samt NIR. Likevel må det påpekes at korrelasjonene er moderate (Figur 3). Fjernmåling alene forklarer ikke all variasjon i trærnes vitalitet og sammenhengene er sannsynligvis ikke robuste nok på enkelttrær-nivå. I en operativ overvåking framstår bestandsnivået mer hensiktsmessig hvis formålet er å skaffe tilveie informasjon for å støtte hogstprioriteringer.

Uansett om man velger enkelt-tre- eller bestandsnivået, er det også viktig å understreke at alle typer prediksjoner og klassifikasjoner som utføres ved hjelp av fjernmålte data er forbundet med usikkerhet. Trær eller områder som i fjernmålingsdataene ser ut til å være utsatt for stress trenger ikke å være det, og motsatt. Et kart som indikerer stressnivå med en grad av usikkerhet, kan likevel være svært nyttig som en grovsortering før en manuell inspeksjon.

3. Datainnsamling: Fra drone til satellitt

I dette prosjektet ble det benyttet drone for å sikre høyoppløselige data til forskningsformål. For en operativ overvåking av skogbruket i stor skala, fremstår bruk av drone som ressurskrevende og kostbart. Løsningen for et praktisk opplegg ligger derfor trolig i bruk av gratis satellittdata. Analysene våre peker på at det er tidsseriene (endringene over tid) og spektralbånd som Red edge og NIR som er viktigst. Dette er informasjon som er tilgjengelig gjennom data som samles inn av Sentinel-2 satellittene. Selv om oppløsningen er grovere enn med drone, tilbyr Sentinel-2 den nødvendige frekvensen og spektrale dekningen kostnadsfritt, noe som lønnsomhetsmessig er en åpenbar fordel ved utvikling og bruk av et slikt system.

Landsat 8/9 er også en mulighet, men den mangler det spesifikke Red edge båndet som var en viktig bidragsyter i analysen, og har lavere oppløsning (30 m) og sjeldnere passeringer. Derfor er Sentinel-2 det klart beste valget for å skalere opp disse funnene kostnadsfritt.

Til sammenligning ved bruk av drone med sensorer brukt i presisjonsskogbruk/landbruk (*MicaSense Red edge (P-serien eller Altum) eller multispektrale kameraer fra DJI (f.eks. Mavic 3 Multispectral, som ble brukt som utgangspunkt i metodikken her)*), ligger innkjøpsprisen i intervallet 60 000 - 120 000,- (NOK).

I jordobservasjonsdelen av EUs romprogram (Copernicus) er det også planlagt å sende opp et satellittpar med hyperspektrale sensorer i 2028, kalt CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment). Dette vil gi spektrale data omtrent en gang hver uke i intervallet mellom 400 og 2500 nm i det elektromagnetiske spektrumet, fordelt på mer enn 200 bånd med en spektral oppløsning på 10 nm. Kombinasjonen høy spektral oppløsning og høy frekvens er attraktivt i denne sammenhengen. Den romlige oppløsningen (30 m) er dog noe grovere sammenlignet med Sentinel 2 (10-20 m).

4. Alternativ tilnærming: Kobling av voksestedsdata og værprognoser

Gitt at de spektrale signalene alene kan være svake eller tvetydige, bør man vurdere om en ren fjernmålingsbasert tilnærming er den mest effektive. Et spor man kan utforske er sammenkobling av eksisterende data knyttet til voksestedet. Fra skogbruksplandata (dominerende treslag, bonitet), topografisk informasjon (helling, eksposisjon) og tilgjengelig informasjon om løsmasser (type, tykkelse), vil man sannsynligvis kunne trekke sammen informasjon som er svært relevant hvis man skal rangere bestand med tanke på uttørkingsfare, en miljøvariabel som også er en del av Natur i Norge systemet (Halvorsen et al. 2016 – s. 191).

Sammen med denne informasjonen, kunne man også bruke sesongvarsler for nedbør og temperatur, for å predikere såkalt Vapour Pressure Deficit (VPD), og dermed sannsynlighet for tørkestress med tilstrekkelig nøyaktighet for logistikkplanlegging. VPD er et godt mål for fordamping og transpirasjon i planter, jo høyere VPD jo tørrere er lufta, og beregnes ved hjelp av temperatur og relativ luftfuktighet. Satellittdata fra Sentinel 2 og CHIME vil imidlertid kunne inkluderes også i et slikt system. I punkt 1 over ble det påpekt at TGWI kun indikerer vannhusholdningen i øyeblikket, og at det er vanskelig å si noe om alvorlighetsgraden. Koblingen med voksesteds- og værdata kan være nyttig for å tolke verdiene for TGWI (eller en annen indikator på vannhusholdning) slik at man kan skille mellom alvorlig og ikke alvorlig tørkestress.

Konklusjon og videre forskning

Prosjektet har vist at vannhusholdningen setter spektrale spor som er målbare. Ved NMBU jobber vi videre for å forstå granas tåleevne og tålegrenser under tørkeepisoder. På fjernmålingssida bør veien videre dreies mot å utnytte satellittbaserte tidsserier (Sentinel-2 og CHIME) for å skalere opp funnene fra dette prosjektet, men disse bør inngå som en del av et bredere beslutningsstøttesystem der også bonitet og værprognoser vektlegges tungt. Man kan se for seg utvikling av et system der satellittdata lastes ned og prosesseres automatisk, slik at man løpende oppdaterer «risikokart» i skogbruksplanene. Modellene kunne kalibreres ved hjelp av permanente flater med dendrometre som kontinuerlig overvåket vannhusholdningen hos trær. Slike flater er under etablering flere steder. Dette vil gi skogeieren et dynamisk verktøy for å identifisere bestand som trenger tilsyn eller prioritert hogst, basert på en kombinasjon av faktisk observert stress (satellitt) og forventet tåleevne og -grenser (voksested).

Referanser

- ALLEN, C. D., MACALADY, A. K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., MCDOWELL, N., VENNETIER, M., KITZBERGER, T., RIGLING, A., BRESHEARS, D. D., HOGG, E. H., GONZALEZ, P., FENSHAM, R., ZHANG, Z., CASTRO, J., DEMIDOVA, N., LIM, J.-H., ALLARD, G., RUNNING, S. W., SEMERCI, A. & COBB, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660-684.
- BODEN, S., KAHLE, H.-P., WILPERT, K. V. & SPIECKER, H. 2014. Resilience of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growth to changing climatic conditions in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management*, 315, 12-21.
- BOŠEL'A, M., SEDMÁK, R., SEDMÁKOVÁ, D., MARUŠÁK, R. & KULLA, L. 2014. Temporal shifts of climate–growth relationships of Norway spruce as an indicator of health decline in the Beskids, Slovakia. *Forest Ecology and Management*, 325, 108-117.
- CAUDULLO, G., THINNER, W. & DE RIGO, D. 2016. *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In European Atlas of Forest Tree Species (pp. 114–116). <https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/european-atlas/atlas-data-and-metadata/>.
- HALVORSEN, R., medarbeidere og samarbeidspartnere, 2016. NiN – typeinndeling og beskrivelsessystem for natursystemnivået. – Natur i Norge, Artikkel 3 (versjon 2.1.0): 1–528 (Artsdatabanken, Trondheim; <http://www.artsdatabanken.no>).
- HUANG, S., TANG, L., HUPY, J. P., WANG, Y. & SHAO, G. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32, 1-6.
- IPCC 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1132 pp.
- KREJZA, J., CIENCIALA, E., SVĚTLÍK, J., BELLAN, M., NOYER, E., HORÁČEK, P., ŠTĚPÁNEK, P. & MAREK, M. V. 2021. Evidence of climate-induced stress of Norway spruce along elevation gradient preceding the current dieback in Central Europe. *Trees*, 35, 103-119.
- LE, T. S., HARPER, R. & DELL, B. 2023. Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests. *Remote Sensing* [Online], 15.
- LÉVESQUE, M., SAURER, M., SIEGWOLF, R., EILMANN, B., BRANG, P., BUGMANN, H. & RIGLING, A. 2013. Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. *Global Change Biology*, 19, 3184-3199.
- MARTENS, H. & MARTENS, M. 2001. *Multivariate Analysis of Quality: An Introduction*, Wiley.
- NETHERER, S., KANDASAMY, D., JIROSOVÁ, A., KALINOVÁ, B., SCHEBECK, M. & SCHLYTER, F. 2021. Interactions among Norway spruce, the bark beetle *Ips typographus* and its fungal symbionts in times of drought. *Journal of Pest Science*, 94, 591-614.
- NETHERER, S., PANASSITI, B., PENNERSTORFER, J. & MATTHEWS, B. 2019. Acute Drought Is an Important Driver of Bark Beetle Infestation in Austrian Norway Spruce Stands. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2.
- ROSNER, S., GIERLINGER, N., KLEPSCH, M., KARLSSON, B., EVANS, R., LUNDQVIST, S.-O., SVĚTLÍK, J., BØRJA, I., DALSGAARD, L., ANDREASSEN, K., SOLBERG, S. & JANSEN, S. 2018. Hydraulic and mechanical dysfunction of Norway spruce sapwood due to extreme summer drought in Scandinavia. *Forest Ecology and Management*, 409, 527-540.
- SEIDL, R., SCHELHAAS, M.-J., RAMMER, W. & VERKERK, P. J. 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4, 806-810.
- SEIDL, R., VIGL, F., RÖSSLER, G., NEUMANN, M. & RAMMER, W. 2017. Assessing the resilience of Norway spruce forests through a model-based reanalysis of thinning trials. *Forest Ecology and Management*, 388, 3-12.
- SPIECKER, H. 2000. Growth of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) under changing environmental conditions in Europe. European Forest Institute (EFI).
- WOLD, S., RUHE, A., WOLD, H. & DUNN, I. W. J. 1984. The Collinearity Problem in Linear Regression. The Partial Least Squares (PLS) Approach to Generalized Inverses. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 5, 735-743.

- WOLD, S., SJÖSTRÖM, M. & ERIKSSON, L. 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58, 109-130.
- YAN, K., GAO, S., YAN, G., MA, X., CHEN, X., ZHU, P., LI, J., GAO, S., GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P., MYNENI, R. B. & WANG, Q. 2025. A global systematic review of the remote sensing vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 139, 104560.
- ZENG, L., WARDLOW, B. D., XIANG, D., HU, S. & LI, D. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111511.