



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Gran på furumark – Kan vi detektere tørkestress ved hjelp av fjernmålte laserdata?

Jon Thomas Haugland

Skogfag

Forord

Oppgaven er skrevet i forbindelse med prosjektet Forest4Society. Det er et samarbeid mellom Norges miljø og biovitenskapelige universitet (NMBU), og Mendel University og CzechGlobe i Tsjekkia. Prosjektet går i hovedsak ut på å utforske skjøttede skogers helse og evne til å utføre økosystemtjenester under framtidige klimaendringer. Hovedfokus er på effektene av tørke og hetebølger, spesielt på gran, både i Tsjekkia og i Norge (NMBU, 2022). Som en del av dette omfattende prosjektet, som strekker seg over 4-år, er bidraget fra denne oppgaven å se på forskjeller i kronetetthet og vitalitet mellom granbestand med ulike forutsetninger over en relativt kort periode. Mine data inkluderer kun den første vekstsesongen i dette prosjektet.

En stor takk må rettes til min hovedveileder Hans Ole Ørka som har ledet meg gjennom denne oppgaven. Du har med stødig hånd støttet meg gjennom statistiske analyser og behandling av laserdata. En stor takk må også rettes til med-veileder Line Nybakken som har kommet med mye kunnskap og konstruktive tilbakemeldinger. Takk til begge for meget bra veiledning! En takk må også rettes til Danielle Creek for hyggelige og lærerike dager i felt!

Denne oppgaven representerer slutten av mine 5 år som student på NMBU. Takk til alle på lesesalen for god stemning og høyt kunnskapsnivå i både faglige og ikke-faglige diskusjoner.

Til slutt vil jeg takke min vordende samboer Anne Pernille for å ha hjulpet meg med å holde gode rutiner gjennom en hektisk periode, og for å ha lest igjennom en rekke ganger og kommet med gode tilbakemeldinger. Tusen takk!

Tack psamt Pskaal!

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 15. mai 2023

Jon Thomas Haugland

Sammendrag

Tørkestress hos gran (*Picea abies*) i norske skoger er relevant å studere når vi ser utviklingen med tørke hos gran i Sentral-Europa. Miljøendringer som en konsekvens av global oppvarming er forventet å påvirke granas naturlige vekstområder. Endringer i nedbørsmønster, nedbørsmengder og økt avdampning vil ha innvirkning på et vannkrevende treslag som gran. Derfor har vi i denne studien forsøkt å detektere tørkestress i gran ved hjelp av fjernmåling. Forskjeller i kronetetthet og vekst mellom gran på fuktig mark sammenlignet med gran på tørrere mark er studert. Fjernmåling i form av LIDAR og RGB-bilder ble brukt som verktøy for å detektere strukturelle forskjeller i krone, og redusert vitalitet hos gran som følge av tørkestress. Resultatene viser at det er en klar korrelasjon mellom kronetetthet, nedbørsmengde og voksested for gran. Gran på fuktig mark responderer positivt på økende nedbørsmengde, mens gran på naturlig tørrere mark reagerer annerledes. Det er klare forskjeller i kronestruktur mellom gran på tørr og fuktig mark, noe som kan brukes til å vurdere vitalitet. Studien er utført langs en gradient i temperatur, nedbør og vekstsesonglengde fra Aremark i sør, til Rendalen nord.

Abstract

Drought stress in Norway spruce (*Picea abies*) in the Norwegian forests is a field which is important to study considering the drought related decimation of Norway spruce in Central-Europe. Environmental changes due to global warming are expected to affect the natural habitat of Norway spruce. Change in precipitation- pattern, amount and increased ground evaporation will affect a water demanding species such as Norway spruce. Therefore, in this study, we use remote sensing to detect drought stress in Norway spruce. Detecting differences in growth between spruce on moist ground and dry ground is the main goal. LIDAR and RGB-photos are the remote sensing tools. Differences in crown density based on precipitation, temperature, and place of growth for Norway spruce was proven. The spruce on moist ground responded positively on increasing amount of precipitation, whilst spruce on natural dry ground reacted differently. Values of crown density showed adaption to the conditions and may be used to detect reduced vitality. The study was conducted along a gradient in temperature, precipitation, and growing season length from Aremark in the south to Rendalen in the north.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iv
Abstract	vi
Innholdsfortegnelse	1
1. Innledning	3
1.1 Introduksjon	3
1.2 Bakgrunn	4
1.3 Problemstilling	5
2. Material og metode	6
2.1 Studieområde og valg av prøveflater	6
2.3 Registreringsmetode	7
2.4 Dendrometer	8
2.6 Fjernmålte laserdata	9
2.7 Kronehøydemodell og kronesegmentering	10
2.8 Beregning av laservariabler	11
2.9 Statistiske analyser	12
3. Resultater	14
3.1 Forskjeller mellom hele prøveflater	14
3.2 Resultater mellom alle segmenter innenfor hver kategori	19
3.3 Sammenligning av vekst i dendrometertrær	23
4. Diskusjon	29
4.1 Kronetetthet over breddegrad og nedbør	29
4.2 Høyde over breddegrad og nedbør	32
4.3 Dendrometertrærne	33
5. Konklusjon	36
6. Litteratur	37

1. Innledning

1.1 Introduksjon

Menneskeskapte klimaendringer er en realitet vi nå står ovenfor. Stadig skiftende klima og mer ekstreme værtyper øker behovet for kunnskap om hvilke påvirkninger dette har på naturen. Effektene det vil ha på det boreale barskogbeltet, som norske skoger i stor grad er en del av, er viktig å studere. Større endringer i skogenes sammensetninger, økosystemtjenester og trærnes motstandsevne kan gjøre at vi må tenke annerledes, og tilpasse skogforvaltningen til nye forhold. Derfor er studier med søkelys på effekter av miljøendringer interessante. Abiotiske og påfølgende biotiske forstyrrelser er utfordringer norske skogeiere vil merke mer til i årene som kommer med skiftende klima og økende temperaturer. Svekket skoghelse vil ikke bare påvirke tømmerproduksjon, men også andre økosystemtjenester som vi og naturen er avhengige av f.eks. sopp, bær, rensing av vann og lagring av karbon i skogen. Prediksjoner av klima 100 år fram i tid viser at det vil skje endringer, også i de mest optimistiske scenarioene. Det er predikert lavere grunnvannstand, økt markvannsunderskudd og lengre perioder i sommermånedene med lav vannføring, noe som vil påvirke skogbruket i betydelig grad (Hanssen-Bauer et al., 2009). Klimaendringene vil generelt føre til tidligere snøsmeltning og økt mengde nedbør spesielt på våren, med mindre nedbør på sommeren i Norge. Kombinert med høyere avdampning som følge av økte temperaturer er dette predikert å gi flere vårflommer, hvor påfølgende sommertørke vil forekomme oftere (Kausrud et al., 2022). Lengre tørkeperioder og høyere temperaturer vil trolig spesielt påvirke treslag som vokser på plasser utenfor artens opprinnelige tilhørighet, hvor vekstforholdene ikke er like gunstige for dens tilpasninger. Slike skogtyper er som regel et resultat av menneskelig skogreising. I den norske skogen kan dette føre til økt sårbarhet for blant annet tørkestress hos gran (*Picea abies*), og vil med det også øke sannsynligheten for påfølgende billeangrep, og store økonomiske tap.

Av treslagene som naturlig vokser i de norske skoger er det gran som er mest utsatt for tørkeskader. Dette skyldes blant annet mye barmasse og en stor topp mot rot ratio (Hanssen et al., 2019). Dette kan være roten til problemer når klimaet trolig blir tørrere i årene som kommer. Det finnes mange områder i Norge hvor gran vokser og klarer seg på relativt grunn jorddybde og skrint jordsmonn, hvor man opplever naturlig vedvarende tørke gjennom vekstsesongen. Hvordan dette påvirker granas vitalitet og motstand mot akutt tørke er uvisst. Det er den akutte tørken som har størst innvirkning på granas forsvarsevne (Netherer et al., 2019). Om dette gjør at gran som vokser på typisk tørrere mark (i denne oppgaven referert til

som furu- (*Pinus sylvestris*) mark) er mer sårbar for akutt tørke enn gran som vokser på fuktige granboniteter er derfor viktig å undersøke.

1.2 Bakgrunn

Det er begrenset med forskning på effekter av tørke i den boreale barskogen i Norden, men studier fra blant annet Tsjekkia (Krejza et al., 2021), viser at økende temperaturer og mer tørke vil få fatale konsekvenser for gran i Sentral-Europa. Med dagens mengde av CO₂-utslipp vil normaltemperaturen i Oslo om 50 år tilsvare temperaturen i en sentral-europeisk by i dag (Bastin et al., 2019). Massedøden av gran i Sentral-Europa de senere årene er kjent (Landbruks&matdepartementet, 2020), og når modellene viser økning i temperaturer er det ikke utenkelig at vi kan oppleve det samme her i Norge. Derfor må effekten av hyppigere og lengre tørkeperioder i norske skoger og konsekvensene av dette utforskes. Tørkesommeren 2018, med lange perioder med unormalt høye temperaturer og lite nedbør, førte til stor belastning på granskogen i mange områder på sør-Østlandet. Resultatene har vi sett påfølgende år, med unormalt høy mortalitet. I takt med mer tørkestress forventes andelen barkbilleangrep å øke (Bentz et al., 2019). Gran som er plantet på typisk furumark, er trolig mer utsatt for abiotiske og deretter biotiske forstyrrelser som nettopp tørkestress og barkbilleangrep.

Det er flere årsaker til at gran har blitt plantet på furumark, og en av dem er at gran er det treslaget som er viktigst for norsk treforedlingsindustri basert på volum (SSB, 2023). Gran er derfor ofte det mest lønnsomme alternativet, noe som kan være en medvirkende årsak til planting utover naturlige vekstområder, og på mer typisk furumark. En annen årsak er store elgstammer i deler av sørøst Norge. Elgen unngår som regel gran, men spiser furuforyngelse. Dette gir økonomiske tap ved reetablering av nye furubestand (Felton et al., 2022), og gran på furumark blir alternativet for å få opp ny foryngelse.

For å kartlegge områder hvor grana kan ha redusert vitalitet på grunn av dårlig egnede vekstforhold, trenger vi effektive metoder for gjenkjenning og registrering. Utvikling i teknologi gir mange muligheter, og fjernmåling med laser (LIDAR) har blitt en kostnadseffektiv metode for registrering av store skogsområder. LIDAR som verktøy i skogbruket har gitt detaljerte målinger av skogkarakteristikker og enorme mengder data i en del år allerede. Når man bruker fjernmåling med laser er det essensielt å også ha fysisk målte data fra bakken for å kalibrere LIDAR-målingene (Wulder et al., 2012). Ved bruk av laser er det mulig å måle kronetetthet, høydevekst og posisjonering av enkeltrær. Fjernmåling av LAI

(Leaf Area Index) eller kronetetthet er allerede en etablert metode for å se på skogens helsetilstand (Solberg et al., 2005). RGB-bilder (bilder i rødt, grønt og blått) er en annen fjernmålingsmetode som kan brukes for å detektere ulike egenskaper i trekrona. Ulikt vanninnhold i barnåler gir forskjellig refleksjon av lyset som sendes ut. Det er tidligere blitt brukt på gran for å identifisere tørke (Junttila et al., 2015). Derfor kan RGB-bilder være et instrument som kan brukes for å detektere tørkestress, og skille det ut som årsak, på bakgrunn av barnålenes vanninnhold. Om vi kan bruke fjernmåling til å evaluere og skille mellom vitalitet hos frisk gran og tørkeutsatt gran i naturen, vil det gi mer kunnskap om granas ytre begrensninger med hensyn til tørke. Samtidig vil det også hjelpe til med å enkelt identifisere de tørkeutsatte områdene, og finne omfanget av mulige skadeutsatte områder.

1.3 Problemstilling

Hovedmålet med denne oppgaven var å se på kronetetthet hos gran plantet på typisk gran- og furumark langs en klimagradiant i Sørøst-Norge. Jeg har både sett på kronetetthet ved hjelp av fjernmåling med laser relatert til klimaet og kronetetthet relatert til vekst hos enkelttrær i sesongen 2022. RGB-bilder er også forsøkt brukt for identifisering av tørkestress, for å teste om det var mulig å knytte kronetetthet direkte til vitalitet, og dermed enkelt oppdage tørkestresset gran. Motivasjonen er å utforske en kostnads- og tidseffektiv metode for gjenkjenning av skadeutsatte skogsområder.

Ved sammenligning av kronetetthet og høydevekst innenfor lokalitet, forventet jeg høyest kronetetthet i bestand med gran på granbonitet, og lavere for gran på furumark. Tilsvarende forventet jeg høyere trær i bestand med gran på granbonitet. Jeg forventet også at forskjellen mellom gran på granmark og gran på furumark var minst der det er best vanntilgang (høyest nedbørsmengde).

Jeg forventet videre at vekst hos enkelttrær er relatert til kronetetthet. En tettere krone med høyere evne til fotosyntese bør gi bedre vilkår for diametervekst. Jeg antok også høyere tilvekst ved økende nedbørsmengde.

Jeg forventet å kunne detektere forskjeller i RGB-bildene som kan brukes til å skille på ulik vanntilgang for gran ved hjelp av forskjell i refleksjon fra nålene.

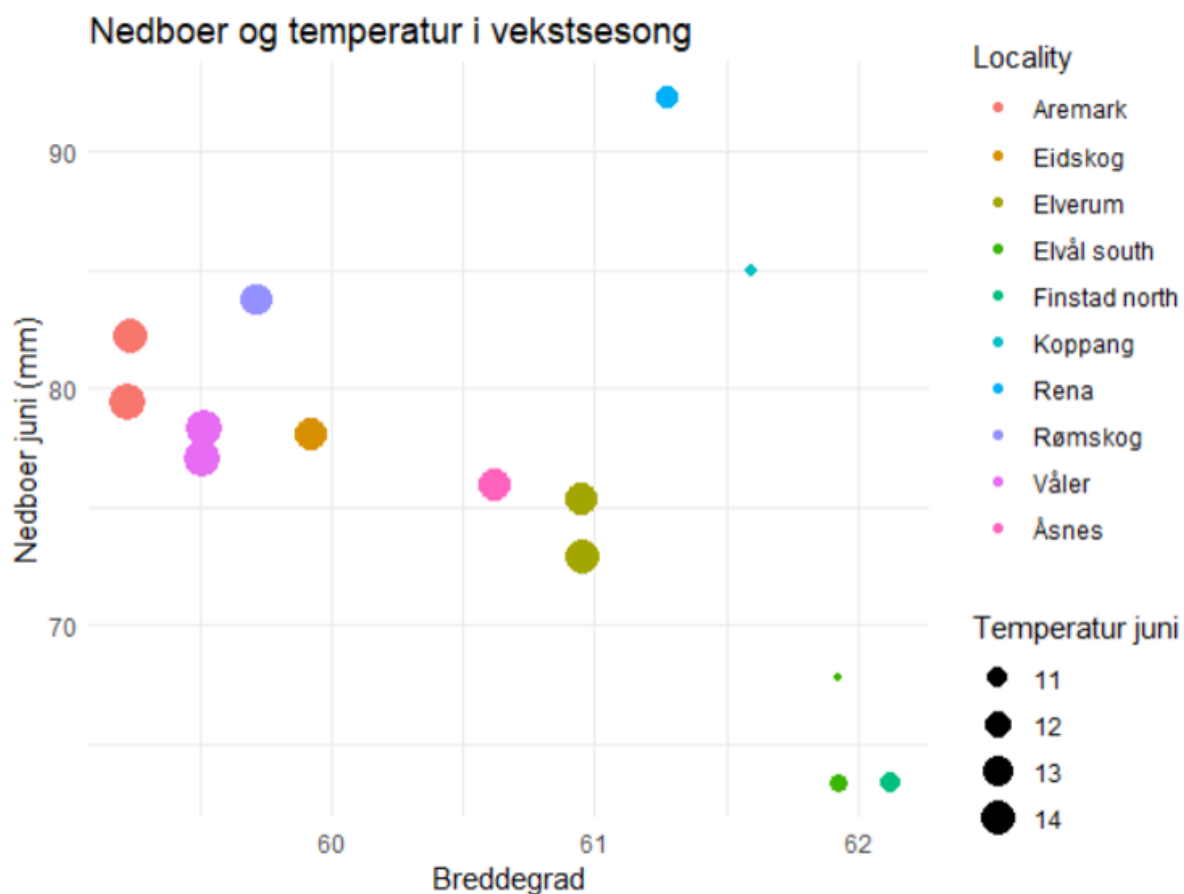
2. Material og metode

2.1 Studieområde og valg av prøveflater

Studieområdene var fordelt på 10 lokaliteter fra Aremark sør i Viken fylke, til Rendalen nord i Innlandet fylke (figur 1). På hver lokalitet hadde vi to prøveflater, ett på typisk granmark (blåbærskog, bonitet G17-G20) og ett på typisk furumark (bærlyngskog, G11-G14). Ved å ha par med prøveflater i samme område, kunne vi studere eventuelle forskjeller mellom bestandene med minst mulig klimatiske og miljømessige forskjeller. Transektet dekker samtidig en gradient i temperatur, nedbør og vekstsesonglengde (figur 2). Prøveflatene ble etablert i grandominerte bestand med jevn bestandsstruktur. Bestandene som ble valgt ut i par var relativt jevnaldrende, mellom 35 og 49 år. Senter av prøveflaten ble lagt ut subjektivt med hensyn på å få et mest mulig jevnt skogbilde. Vi unngikk store åpninger/glenner, steinrøyser etc. Prøveflatene måtte være grandominert, slik at mer enn 60% av det totale treantallet var gran på alle flater.



Figur 1: Norgeskart med de ulike lokasjonene markert.



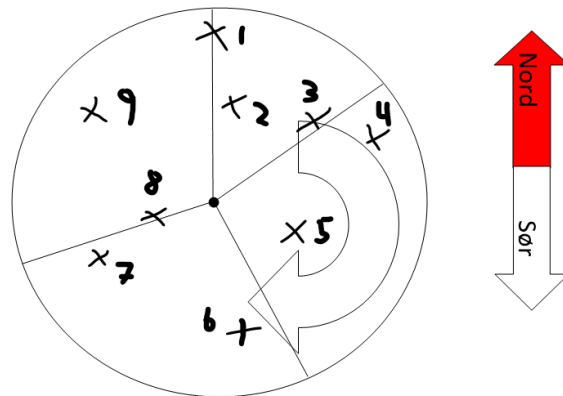
Figur 2: Nedbør og temperatur for alle lokalitetene langs breddegraden i vekstsesongen. Nedbørmengde og temperatur er synkende langs breddegraden, med unntak av Rena og Koppang som har mye nedbør langt nord. Alle 20 prøveflatene er plottet, men noen ligger så nære hverandre at forskjellen i breddegrad ikke synes. Størrelsen på sirklene representerer temperatur, økende temperatur ved økende størrelse på sirkelen.

2.3 Registreringsmetode

Registrering i felt ble gjort på alle trær innenfor sirkulære prøveflater med en radius på 16,93 meter, som gir et areal på 900 m². Senter ble bestemt og stedfestet med bruk av globalt navigasjonssatellitt-system, også kalt GNSS, for å få den nøyaktige posisjonen til flata. Modellen som ble brukt var en Topcon Legacy E+. Radius på prøveflatene ble målt fra senter og ut til grensen ved hjelp av vertex. Grensen ble markert med oppmerkingsbånd for oversikt under registreringen. I tillegg måtte sentrum av stammen på et tre befinne seg innenfor den målte radiusen, for å telle med i studien.

Første tre på prøveflata står alltid i en rett linje fra senter mot nord, deretter registreres neste tre i siktelinja med klokka. Neste tre er alltid det neste i synsvinkelen fra nord med klokka, der det ytterste treet alltid teller først (figur 3). Samtlige trær med en diameter større enn 5 cm, ble

markert med rød spraymaling i brysthøyde pekende inn mot sentrum. Dermed kan det måles på samme punkt neste gang. Vi tok to målinger, den første målingen med klaven mot sentrum, og den andre målingen 90 grader på den første. Da fikk vi også en snittdiameter, som senere ble brukt i analysene. Alle trær ble nummerert.



Figur 3: Illustrasjon av metode for posisjonering av trær. Første tre alltid i nord, lengst ut mot grensa. Registrering foregår deretter med klokka og fra ytterkant inn mot sentrum.

Treslag, høyde og tilstand ble registrert som enten dominant, sub-dominant eller understander. De høyeste og bredeste trærne med størst krone registreres som dominante. Sub-dominante er gjennomsnittstrærne, mens understandere er de minste trærne som i prinsippet er utkonkurrert. Det registreres også om treet er levende eller dødt. Hvert tre ble posisjonsfestet med grader og avstand fra sentrum. I dette tilfellet er det brukt et kompass som går fra 0 til 400 gon, og ut ifra dette ble det regnet ut polare koordinater. De polare koordinatene registrert i felt, som er et produkt av avstand og vinkel fra sentrum i hver prøveflate, ble senere omregnet til ordinære koordinater i EUREF89 UTM sone 32. Dermed ble den fysiske posisjonen til trærne bestemt. Posisjonsfestingen er viktig for senere sammenligning med laserdata. Datagrunnlaget fra feltdata i denne studien kommer fra 2969 trær, på 20 ulike lokaliteter.

2.4 Dendrometer

Det ble valgt ut ti dominerende grantrær på hver prøveflate. På ni av de utvalgte trærne ble det installert et TOMST punktdendrometer 1,5 meter over stubben. I tillegg ble ett grantræ utstyrt med et EMS-bånddendrometer. Et dendrometer er et apparat som måler krymping, svelling og vekst i treet under vekstsesongen. Dendrometrene er digitalt avlesbare, og ved å skanne målerne overføres all loggført data til datamaskinen. Veksten fra sesongen 2022 ble registrert av de installerte dendrometrene, og det er disse dataene som er brukt i studien.

2.6 Fjernmålte laserdata

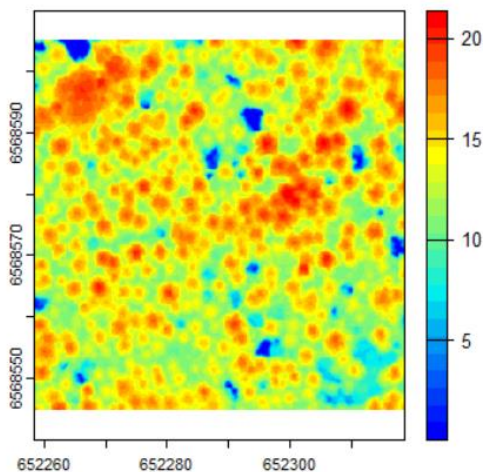
De fjernmålte dataene ble registrert ved hjelp av en drone. Dronetypen som ble benyttet var en DJI Matrice 300 RTK og sensoren som ble benyttet var DJI Zenmuse L1. Zenmuse L1 er en lidar-sensor og har i tillegg et enkelt kamera som tar RGB-bilder. Ved å bruke de innsamlede posisjonsdataene for sentrum av de ulike prøveflatene fra feltarbeidet, ble dronen programmert til å registrere et kvadrat på 100 * 100 meter rundt disse punktene. Dronen ble flydd med flystriper fra nord til sør med en flyhøyde på 60 meter over bakken fra sentrum av prøveflaten. Innstillingene på kamera og sensor er beskrevet i tabell 1. Laserdataene fra dronen ble levert ferdig bearbeidet som en fungerende las.fil. Filen var i DJI Terra og Terrascan. I DJI Terra ble rådataene fra flygningene prosessert til en georeferert punktsky i et kartesisk koordinatsystem. Dette resulterte i en punktsky med RGB-verdier, intensitetsverdier, tidsstempler, antall returnerte laserpunkter og vinkelen på skanningene. Punktskyen er en las.fil, og i tillegg fikk vi også en banefil som gir posisjonering og orientering. Terrascan ble brukt for normalisering av banefila for å fjerne støy, som eksempelvis overlappende flygningslinjer hvor punkttetthet ble tynt.

Tabell 1: Lidar (L1) parametere.

Lidar (L1) parameters	
Flight rout altitude (m)	60 meters above plot center
Speed	10 m/s
Advanced Settings	
Side Overlap LIDAR (%)	80%
Forward Overlap (Visible) (%)	80%
Payload Settings	
Return mode	Triple
Sampling Rate	160kHz for triple returns
Scanning mode	Repetitive

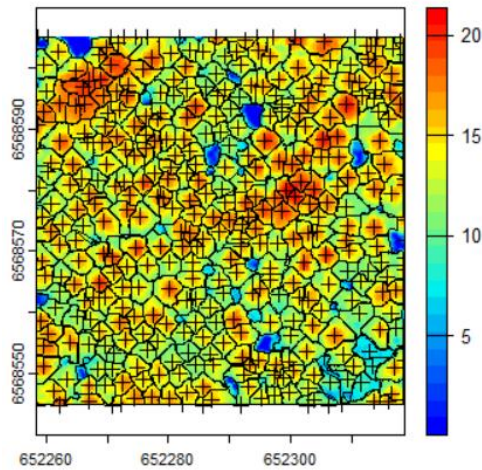
2.7 Kronehøydemodell og kronesegmentering

Kronehøydemodellen er basert på punktskyene fra lidar-skanningene. I punktskyen ligger det høydeinformasjon som bakketreff og treff i krone eller tretopp. Ved å filtrere ut de ønskede høydedataene, som høyeste lasertreff for hver piksel, får man en 2D modell som beskriver høyden sett ovenfra ved hjelp av et fargespekter (figur 4). I dette tilfellet er blå farge bakketreff, og rød farge er de høyeste treffene. Denne modellen tar utgangspunkt i hele flater og ikke individuelle segmenter slik som kronesegmenteringen.



Figur 4: Høydemodell fra laserdata (høyde i meter). Blå farge er bakketreff, rød farge et helt i toppen.

For kronesegmentering bruker man også informasjon fra punktskyene i LIDAR-dataene. Segmenteringen i dette tilfellet er en gjenkjenning av hele trær basert på høydeinformasjon. Høyeste punktet i ett område blir identifisert som en tretopp, og kronen skilles ut basert på synkende og økende høydeverdier. Et kronesegment er som om en sylinder blir tredd over hvert enkelt tre. Det gir derfor individuell informasjon om hvert enkelt tre (segment). Hvert enkelt kryss representerer en tretopp som modellen har funnet, og omrisset er kronen (figur 5). Segmenter i denne oppgaven kan ses på som individuelle målinger av enkeltrær. Segmentene er ikke perfekt tilpasset hvert enkelt tre med tilhørende krone. Dette betyr at segmentene kan bestå av flere trær med flere kroner i et og samme segment, eller bare en del av kronen til et tre i et segment.



Figur 5: Kronesegmentering, høydemodell med predikerte trekroner og topper (høyde i meter). Hvert kryss representerer en funnet tretopp, fargene beskriver høyde og omrisset rundt kryssene er kronesegmentene.

2.8 Beregning av laservariabler

I denne studien er det hovedsakelig to grupper av laservariabler som ble brukt. D-variabelen for kronetetthet og H-variabelen for høyden. Mengden returnerte laserpulser fra ulike nivåer i kronedekket er det som gir en beskrivelse av tettheten i krona. Kronetetthet beregnes fra andelen lasertreff over 2 meter fra bakken (for å unngå busker, steiner etc.). Området fra laveste laserhøyde (>2m) og opp til 95% av høydepercentilen blir delt inn i 10 vertikale fraksjoner. Mengden returnerte laserpulser fra hver høydefraksjon i kronen vil da gi en beskrivelse av tetthet gjennom hele kronen. I denne studien er det beskrevet som Dx verdiene, mest brukt fra D5 (midt på) til og med D9 (topp). Trehøyden er basert på første og siste returnerende laserpuls, og på bakgrunn av dette dannes høydepercentiler. Dette deles inn i prosentvis høyde 10% (H10), 50% (H50), 90% (H90) og i tillegg gjennomsnitts-, maksimal- og standardavviksverdier (Gobakken and Næsset, 2008).

RGB-variablene måles i mengden rødt, grønt eller blått lys som reflekteres fra objektene bildet blir tatt av. Forskjellen i mengden returnert lys i de ulike fargene er det som kan fortelle noe om overflaten lyset reflekteres fra. Barnåler med mye vann vil reflektere ulik mengde rødt, grønt eller blått lys sammenlignet med barnåler med lavt vanninnhold.

2.9 Statistiske analyser

De statistiske analysene ble gjort i RStudio ved å sammenligne de fjernmålte laserdataene mellom prøveflater og lokaliteter. De registrerte feltdataene ble brukt i analysene for dendrometertrærne.

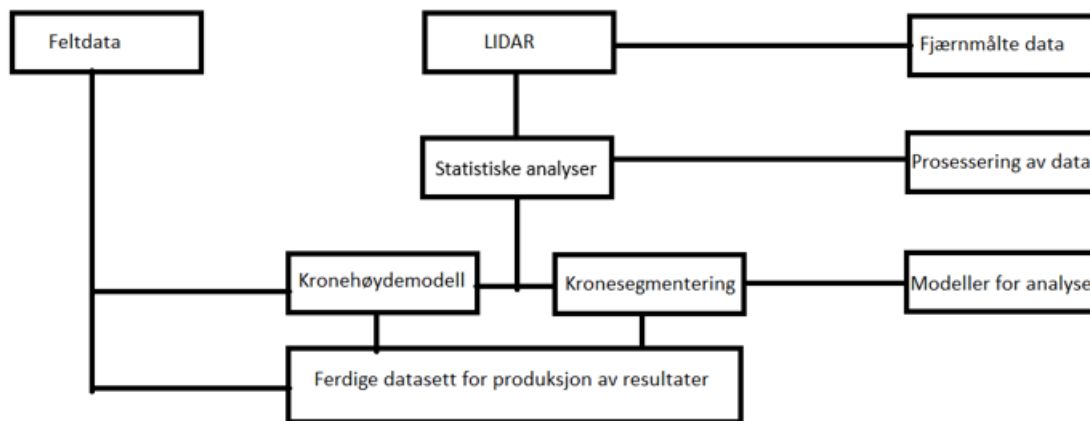
Fra punktskyen i las.fila kommer alle laserparametrene som forklarer blant annet kronetetthet og trehøyde. Den danner også grunnlaget for kronehøydemodellene og kronesegmenteringen som brukes til å gjenkjenne, eller finne enkeltrær. Det er brukt Dalponte-metoden, en metode som har blitt brukt tidligere med gode resultater, hvor trekronen bestemmes fra trees toppunkt og tilhørende kroneomriss (Dalponte and Coomes, 2016). Kronehøydemodellen var hovedmetoden for analysene i del 3.1 med forskjellene mellom prøveflater i par.

Kronesegmenteringen var hovedmetoden for alle trær innenfor referanseprøveflate mot alle trær innenfor tørre prøveflater, og dendrometertrærne.

Hovedfokuset var på tre ulike nivåer; analyser av hele kronedekket mellom prøveflater i par. Analyse av alle segmenter på referanse-prøveflater, mot alle segmenter på tørre prøveflater. Analyse av kronetetthet og høydevekst, mot diametertilvekst og vanntilgang for dendrometertrærne (segmenter) mellom prøveflater. Med analyser menes sammenligning av verdiene for de ulike laservariablene fra referanse- og tørre prøveflater. Det er denne dataen som gir informasjon om forskjellene som undersøkes i denne studien. På dendrometertrærne gjøres også posisjonering. Grafene ble framstilt på bakgrunn av dette i RStudio, sammen med værdata hentet fra meteorologisk institutt (Norsk Meteorologisk Institutt, 2023). For å gjennomføre gjenkjenning og posisjonsfesting av dendrometertrærne kobles laserregistreringene mot de fysiske innsamlede posisjonsdataene. Ved gjenkjenning av tretopp og krone fra laserdata kobles de til nærmeste fysiske registrerte dendrometertre. Prøveflate 19 og 20 er ikke med i gjenkjenningen av posisjonerte trær på grunn av manglende fysiske posisjonsdata.

For å sjekke hvilke parametere som hadde signifikante forskjeller mellom referanser- og tørre prøveflater ble det brukt t-test (tabell 6, tabell 7 og tabell 8), med et konfidensintervall på 95%. I tabeller og figurer brukes notasjonene «ref» og «dry». Ref er gran på granmark som tilsvarer referanse-prøveflatene, mens dry er gran på furumark som tilsvarer de tørre prøveflatene. Det er også lagd lineære regresjonsmodeller for å undersøke om det er en sammenheng mellom variablene for referanse- og tørre prøveflater, og om denne sammenhengen er signifikant. *P*-verdiene forteller om det er signifikant innenfor et utvalg på 95% eller 99%. R^2 forklarer i hvor stor grad det er en sammenheng. Hvor 0 er ingen sammenheng og 1 er fullstendig sammenheng.

Flytdiagrammet gir en grov oversikt over framgangsmetode og arbeidsmetodikk (figur 6).

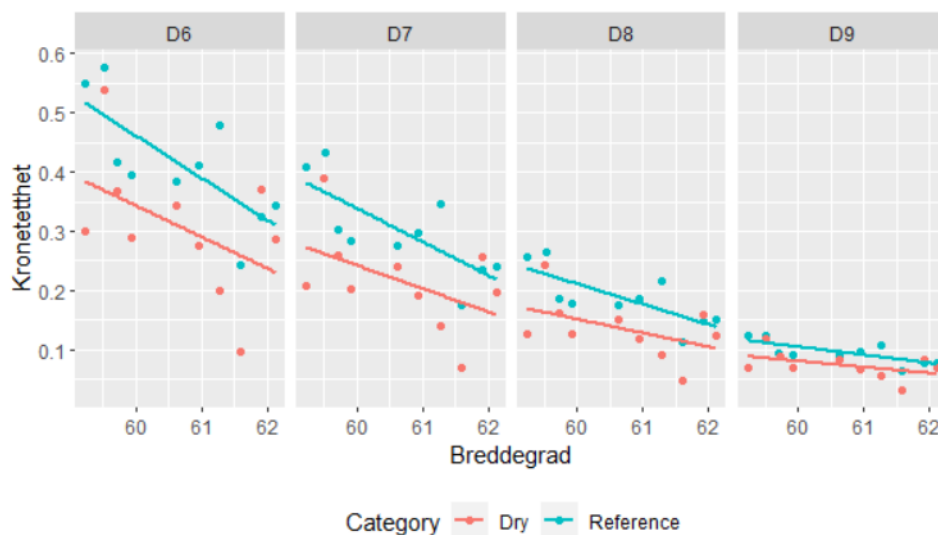


Figur 6: Flytdiagram med oversikt over arbeidsmetodikk.

3. Resultater

3.1 Forskjeller mellom hele prøveflater

Det var signifikante forskjeller for kronetetthet mellom referanse- og tørre prøveflater langs nord- sør-gradienten for alle de undersøkte kronelagene D6-D9 (figur 7, Tabell 6).



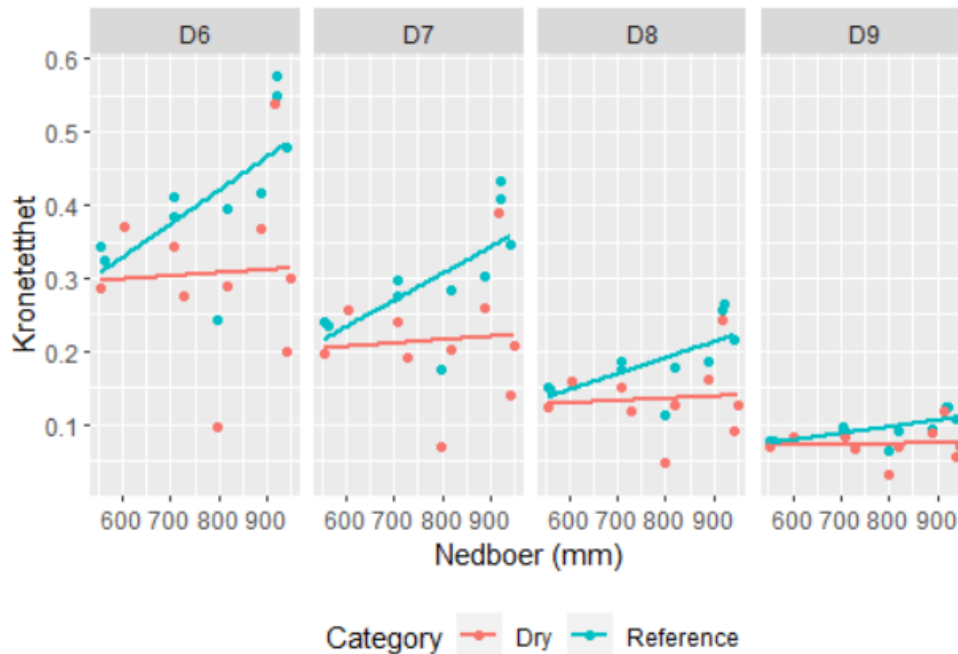
Figur 7: Utvikling i kronetetthet for de to kategoriene langs breddegraden.

P-verdiene for endringer i forskjellen mellom referanse- og tørre prøveflater er signifikante. R^2 viser at regresjonsmodellen beskriver forskjellene i utvikling av kronetetthet mellom kategoriene ved økende nedbørsmengde til en viss grad, men ikke fullstendig (tabell 2).

Tabell 2: Regresjonstall og *p*-verdier for sammenhengen i ulik utvikling mellom kategoriene med hensyn på breddegrad.

	D6	D7	D8	D9
R^2	0,40	0,44	0,44	0,41
<i>P</i> -verdi	0,01	0,005	0,005	0,009

En korrelasjonsanalyse mellom kronetetthet og gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde viser at referanse-prøveflatene får redusert kronetetthet ved minkende mengde nedbør, mens de tørre prøveflatene er mindre påvirket av nedbør (figur 8). Trenden er økende forskjeller mellom kategoriene ved økende mengde nedbør.



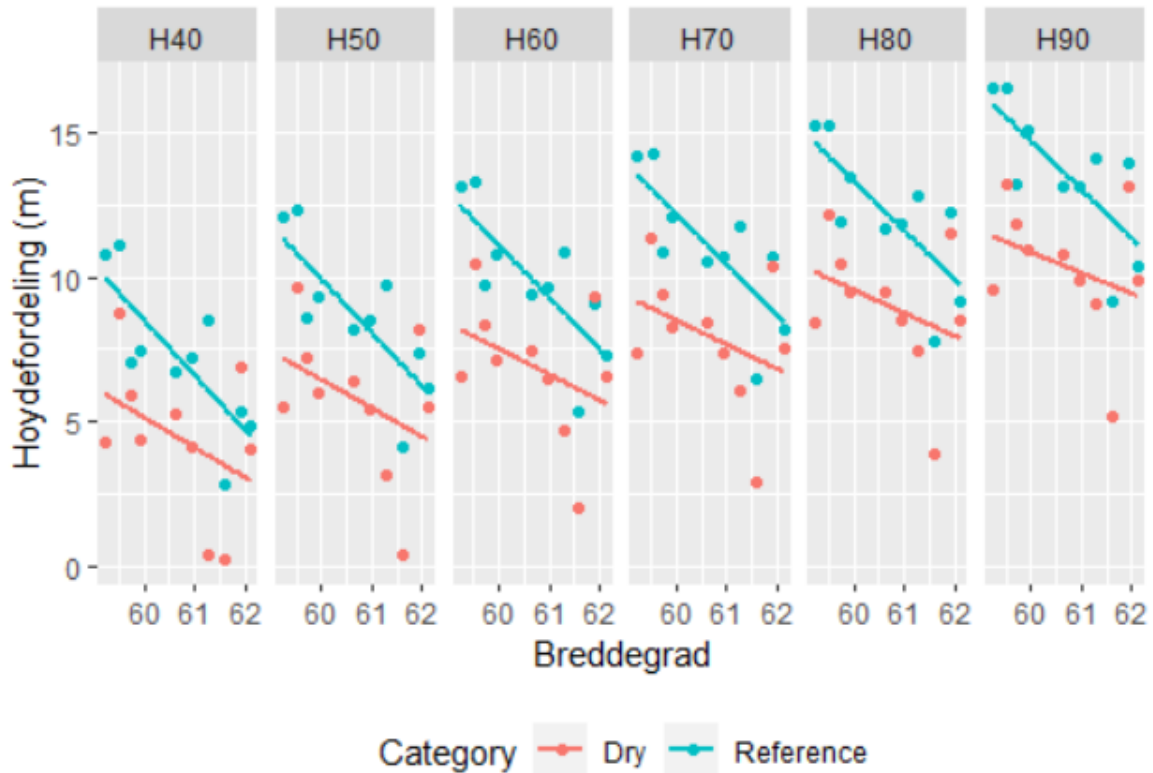
Figur 8: Kronetetthet over gjennomsnittlig nedbørsmengde (mm) for referanse- og tørre prøveflater.

P-verdiene for endringer i forskjellen mellom referanse- og tørre prøveflater er signifikante. R^2 viser at regresjonsmodellen ikke beskriver forskjellene i utvikling av kronetetthet mellom kategoriene ved økende nedbørsmengde spesielt godt (tabell 3), og ikke like bra som for økende breddegrad.

Tabell 3: Regresjonstall og *p*-verdier for sammenhengen i ulik utvikling mellom kategoriene med hensyn til nedbørsmengde.

	D6	D7	D8	D9
R^2	0,23	0,28	0,28	0,26
<i>P</i> -verdi	0,06	0,04	0,04	0,05

Høydepercentilene over breddegrad fra og med H40 har signifikante forskjeller mellom tørre prøveflater og referanser (figur 9). Høydepercentiler over breddegrad viser en synkende trend ved økende breddegrad. Forskjellene mellom referanser og tørre prøveflater blir også her mindre ved økende breddegrad.



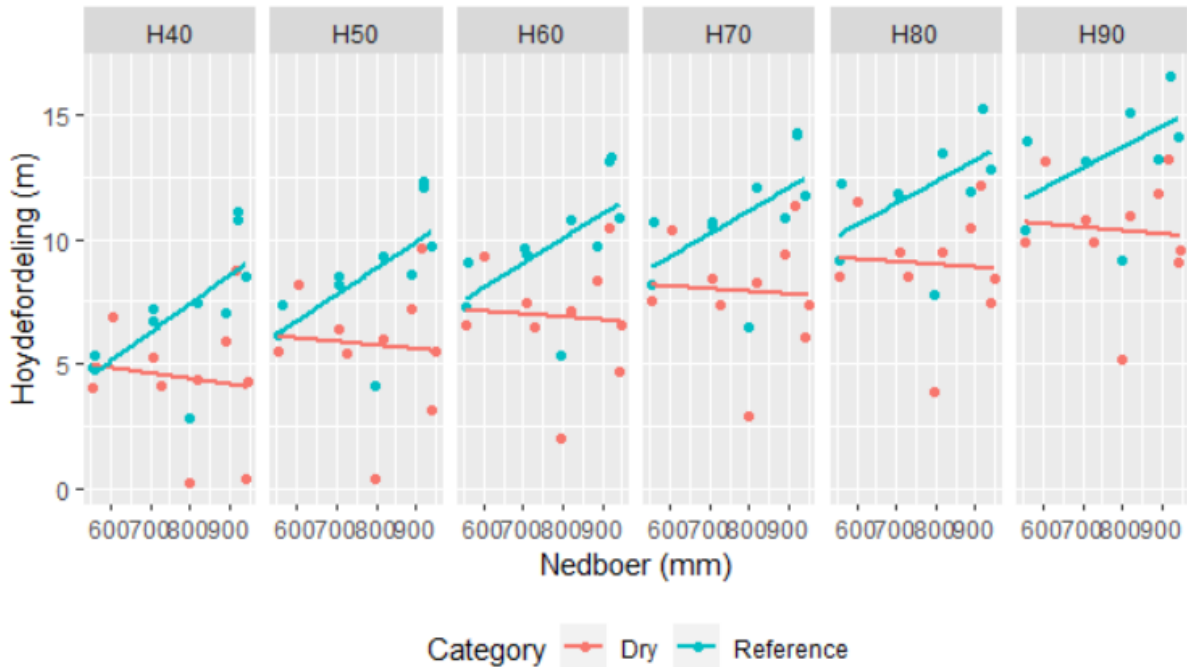
Figur 9: Fordeling og utvikling i høydepercentiler mellom kategoriene over økende breddegrad.

P-verdiene for endringer i forskjellen mellom referanse- og tørre prøveflater er signifikante (tabell 4). R^2 viser at regresjonsmodellen forklarer forskjellene i utvikling for høyde over breddegrad mellom referanse- og tørre prøveflater relativt godt. Det betyr at endret høydevekst mellom kategoriene er betydelig ved endring i breddegrad.

Tabell 4: Regresjonstall og *p*-verdier for sammenhengen i ulik utvikling mellom kategoriene med hensyn til breddegrad.

	H40	H50	H60	H70	H80	H90
R^2	0,44	0,46	0,49	0,50	0,49	0,48
<i>P</i> -verdi	0,006	0,005	0,003	0,003	0,003	0,004

Høydepercentilene over økende nedbørsmengde viser at referanse-prøveflatene responderer med økende vekst i høyden, mens de tørre prøveflatene ikke har like god respons (figur 10). Forskjellene mellom kategoriene øker ved økende nedbørsmengde.



Figur 10: Fordeling og utvikling i høydepercentiler mellom kategoriene over økende nedbørsmengde.

P-verdiene for endringer i forskjellen mellom referanse- og tørre prøveflater er signifikante (tabell 5). R^2 viser at regresjonsmodellen ikke forklarer forskjellene i utvikling mellom kategoriene ved endret nedbørsmengde spesielt godt. Dette betyr at referanse- og tørre prøveflater har ulik utvikling i trendene for høydevekst ved økende nedbørsmengde, men endring i nedbør har ikke like stor betydning som endring i breddegrad.

Tabell 5: Regresjonstall og p-verdier for sammenhengen i ulik utvikling mellom kategoriene med hensyn til nedbørsmengde.

	H40	H50	H60	H70	H80	H90
R^2	0,29	0,29	0,31	0,32	0,32	0,32
P-verdi	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02

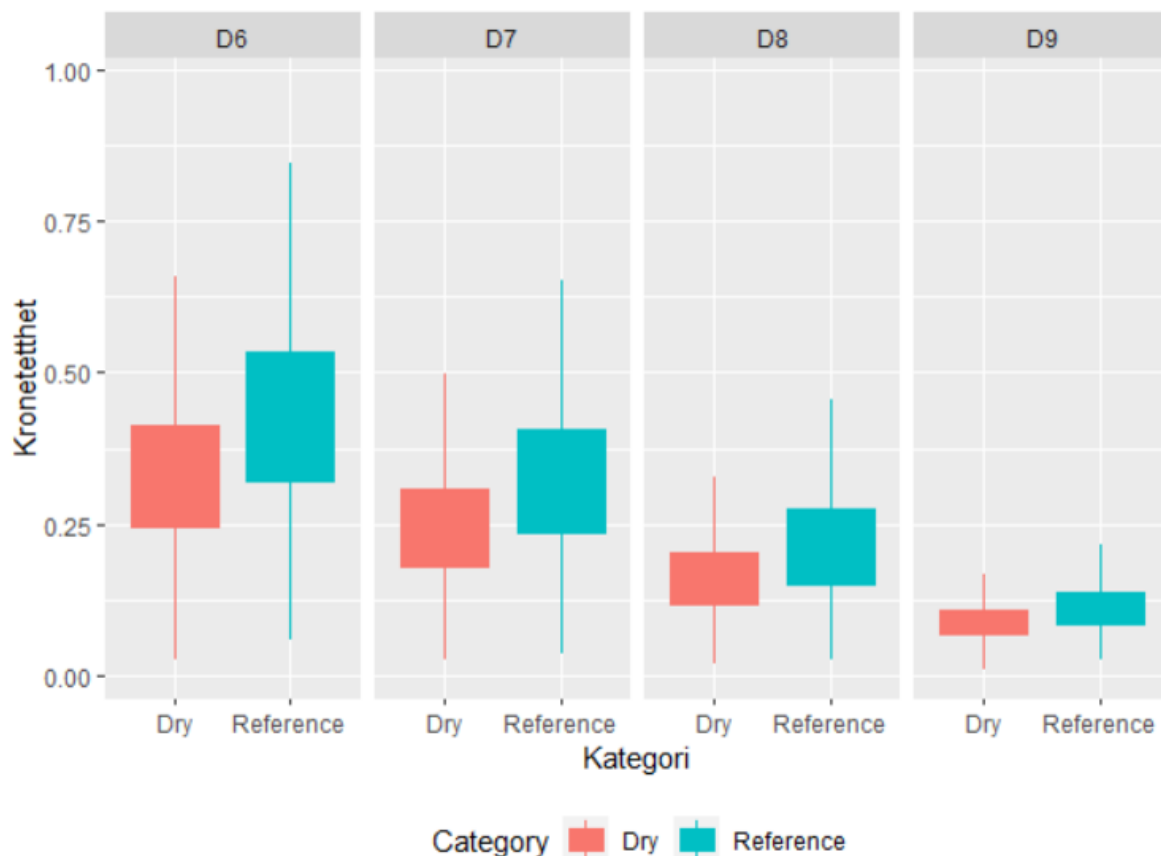
Maksimal trehøyde, gjennomsnittlig trehøyde og standardavviket til høyden viser akkurat samme utvikling som de andre høydepercentilene og illustreres derfor ikke.

Tabell 6: Alle laserparametere med signifikante p-verdier mellom referanser og tørre prøveflater med endring i breddegrad, og gjennomsnittsverdiene for begge kategoriene.

Laserparameter	p-verdi	mean_dry	mean_ref
D6	0,044	0,31	0,41
D7	0,032	0,22	0,30
D8	0,029	0,14	0,19
D9	0,034	0,07	0,10
H40	0,028	4,42	7,19
H50	0,020	5,76	8,63
H60	0,013	6,89	9,85
H70	0,009	7,91	10,97
H80	0,007	10,35	13,54
H90	0,007	10,35	13,54
Hmax	0,017	16,47	19,31
Hmean	0,021	5,44	7,64
Hsd	0,003	3,87	4,98

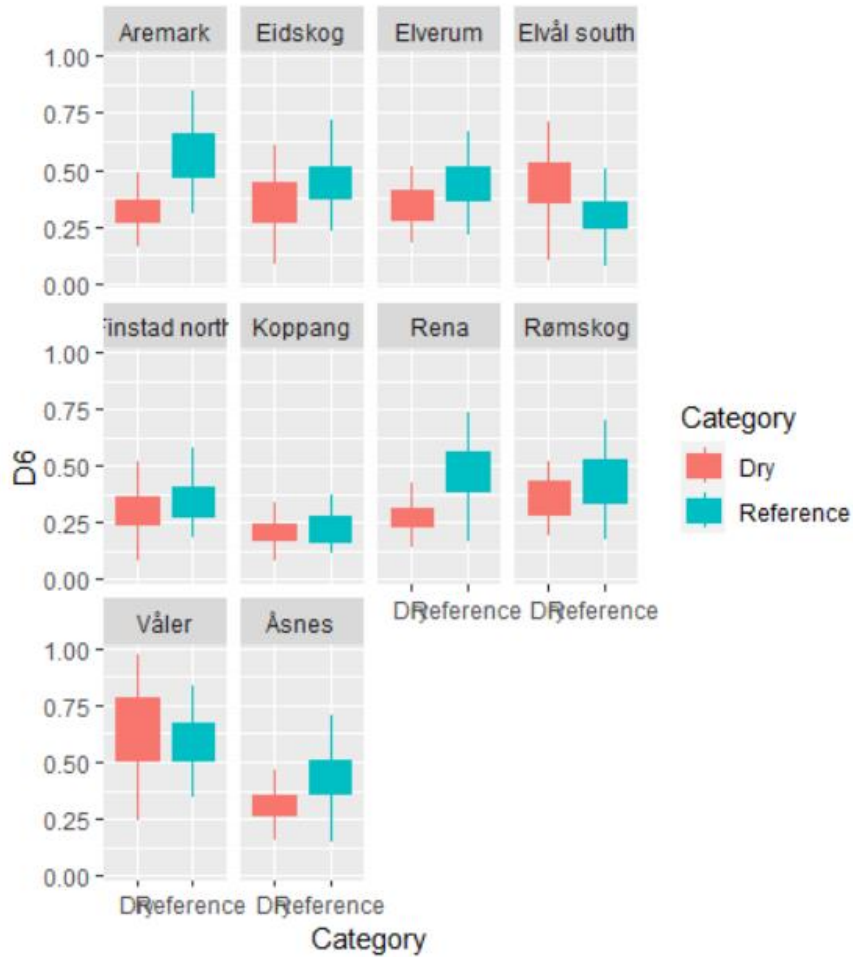
3.2 Resultater mellom alle segmenter innenfor hver kategori

Segmenter er gjenkjenning og inndeling av enkeltrær basert på kronesegmentering. Ved sammenligningen av resultatene mellom alle segmenter innenfor referanse-, mot alle segmenter innenfor tørre prøveflater, er alle laservariablene signifikante i henhold til p -verdien fra t-testen. Derfor presenteres kun data for de samme parameterne som var signifikante i 3.1 for å ha sammenligningsgrunnlag (tabell 7). Kronetetthet på de forskjellige nivåene for alle segmenter innenfor referanser- og alle segmenter innenfor tørre prøveflater viser klare forskjeller (figur 11). Resultatene viser gjennomgående at segmentene fra de tørre prøveflatene har lavere kronetetthet enn segmentene fra referanse-prøveflatene. Resultatene viser at det er størst variasjon i tetthet for begge kategoriene i D6- og D7-sjiktet som er rett over midten av trekrone. Det er mindre variasjon i D8- og D9-sjiktet som er i toppen av trekrone.



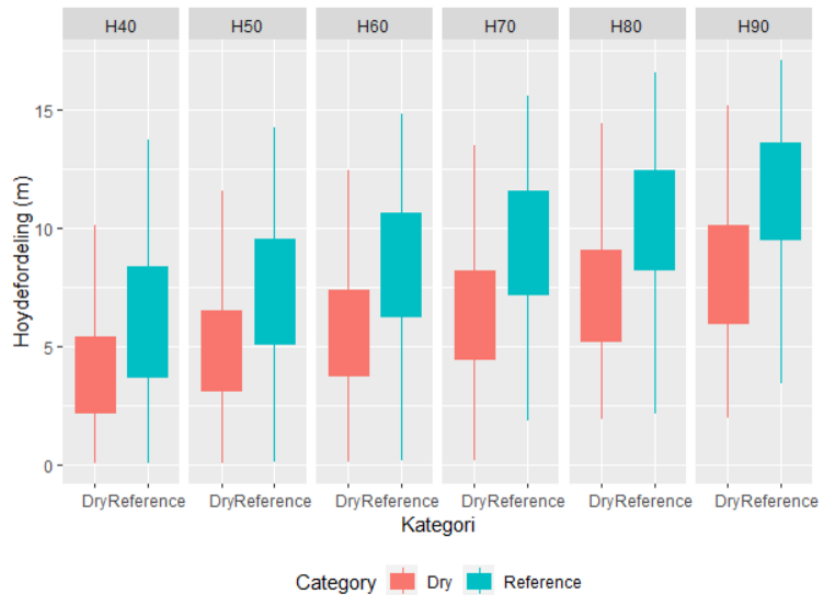
Figur 11: Kronetetthet på de ulike nivåene for alle segmenter innenfor hver kategori.

Oversikt over kronetetthet (D6) innenfor hver enkelt lokalitet viser de individuelle forskjellene mellom lokalitetene (figur 12). Våler og Elvål viser høyere kronetetthet hos tørre prøveflater enn for referanse-prøveflater. Dette skyldes mye innslag av løvtrær som gir høyere verdi for kronetetthet.



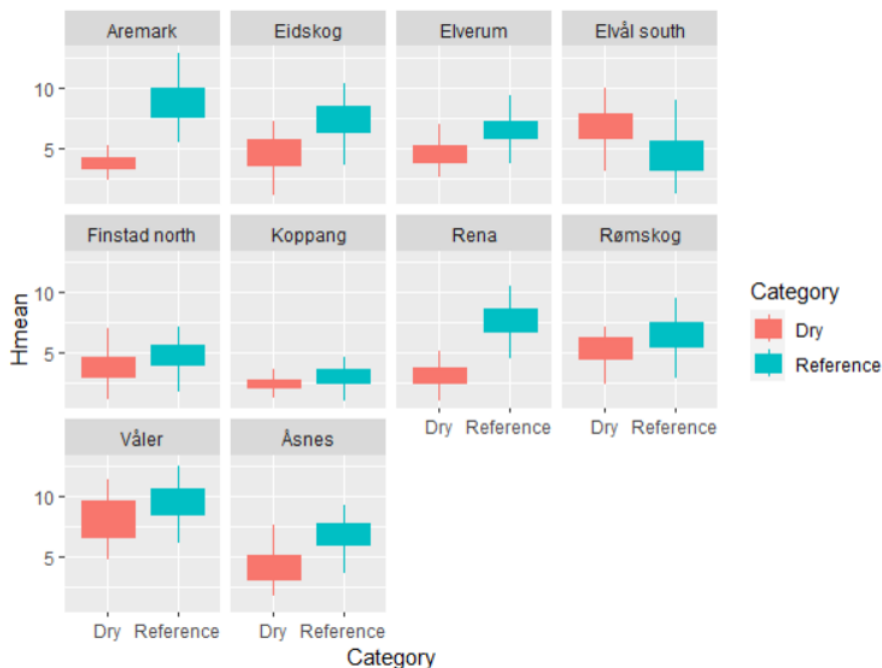
Figur 12: Kronetetthet D6 for hver enkelt lokalitet.

For høydefordelingen innenfor de ulike høydepercentilene mellom segmentene på referanse- og segmentene på tørre prøveflater er det signifikant forskjell (figur 13). Referanseprøveflatene har gjennomgående større høydeverdier enn de tørre prøveflatene.



Figur 13: høydefordeling i de ulike høydepercentilene for de to kategoriene.

Gjennomsnittlig trehøyde for referanse og tørt plott på alle lokasjonene viser at referanseprøveflatene i snitt har best høydevekst. Unntaket er Elvål som viser høyest gjennomsnittsverdi for tørr prøveflate (figur 14).



Figur 14: Gjennomsnittlig trehøyde i meter for alle lokaliteter.

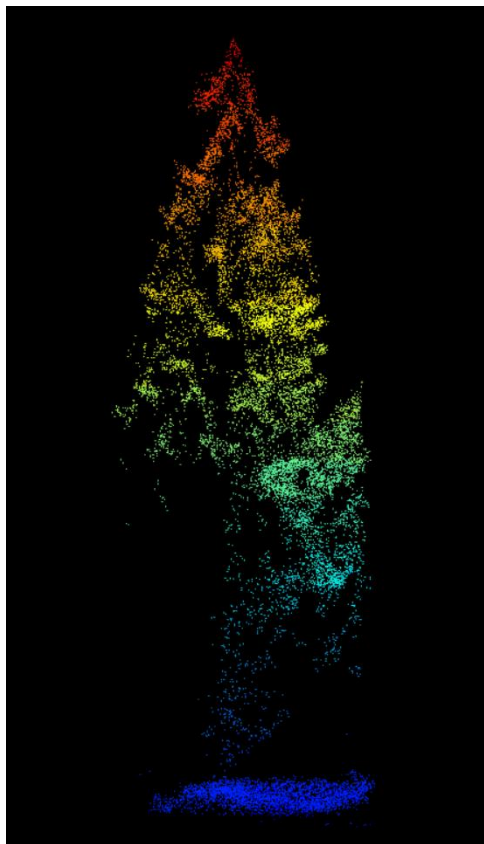
Tabell 7: Alle laserparameterne var signifikante i del 3.2 for alle segmenter på referanse- mot alle segmenter på tørre prøvefater. Tabell 7 viser de mest interessante signifikante laserparameterne, og gjennomsnittsverdiene for begge kategoriene.

Laserparameter	p-verdi	mean_dry	mean_ref
D6	<0,001	0,38	0,46
D7	<0,001	0,28	0,35
D8	<0,001	0,19	0,23
D9	<0,001	0,10	0,12
H40	<0,001	5,03	7,31
H50	<0,001	6,12	8,59
H60	<0,001	7,00	9,62
H70	<0,001	7,83	10,57
H80	<0,001	8,68	11,54
H90	<0,001	9,69	12,68
Hmax	<0,001	11,90	15,20
Hmean	<0,001	5,56	7,79
Hsd	<0,001	3,39	4,47

3.3 Sammenligning av vekst i dendrometertrær

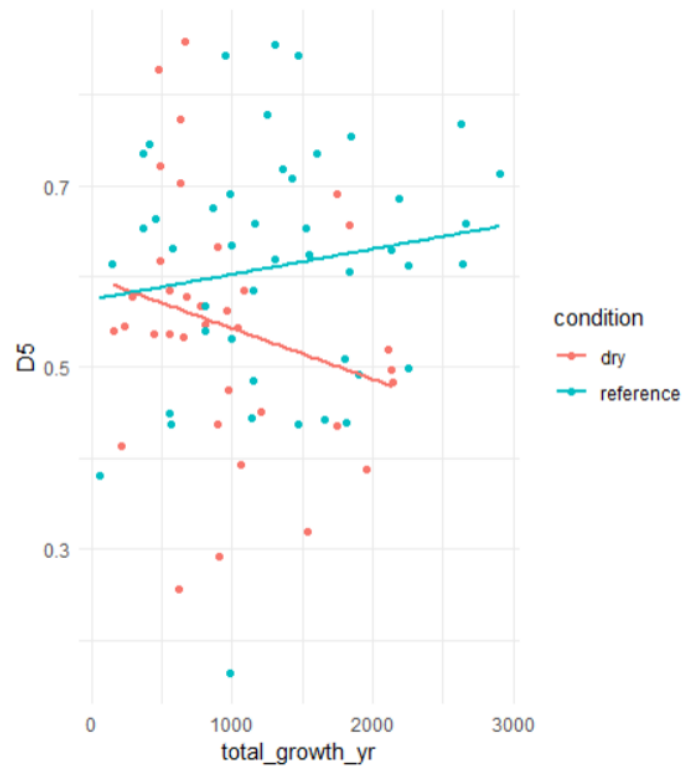
Jeg sammenlignet videre vekst hos enkelttrær (trær med dendrometer) med kronetettheten hos disse. Tetthets- (D_x) og høydeverdiene (H_x) har samme trender som i resultatene fra del 3.1 og illustreres derfor ikke igjen. $D5$ -parameteren beskriver gjennomsnittlig kronetetthet i bestandet, og brukes videre i tabellene og figurene.

Visuell framstilling av et segment (figur 15). Dette eksempelet er bra tilpasset slik at man kun får med kronen fra ett tre. Dette viser at det er mulig å plukke ut enkelttrær for å se på kronetetthet og kronestruktur visuelt.



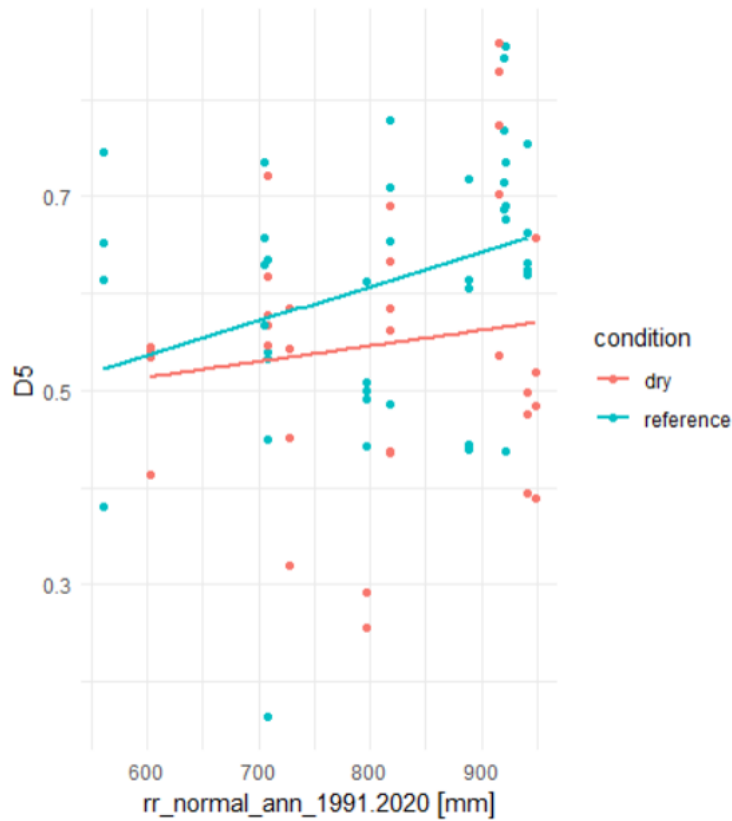
Figur 15: Punktsky fra laser av dendrometertre treID 27, prøveflate 1. Blå farge er bakketreff, og endring i farge fra blå til rød er økende høyde over bakken. Dette viser at det er mulig å plukke ut enkelttrær for å se på kronetetthet og kronestruktur visuelt.

Kronetetthet over total diametervekst (figur 16) fra 2022 sesongen viser at tilveksten hos dendrometertrærne på referanse-prøveflatene har økende tilvekst med økende kronetetthet i 2022. For dendrometertrærne på de tørre prøveflatene derimot, øker tilveksten i 2022 med synkende kronetetthet. Forskjellene i endring av kronedensitet over vekst mellom referanse og tørt er imidlertid ikke signifikante ($p > 0,05$).



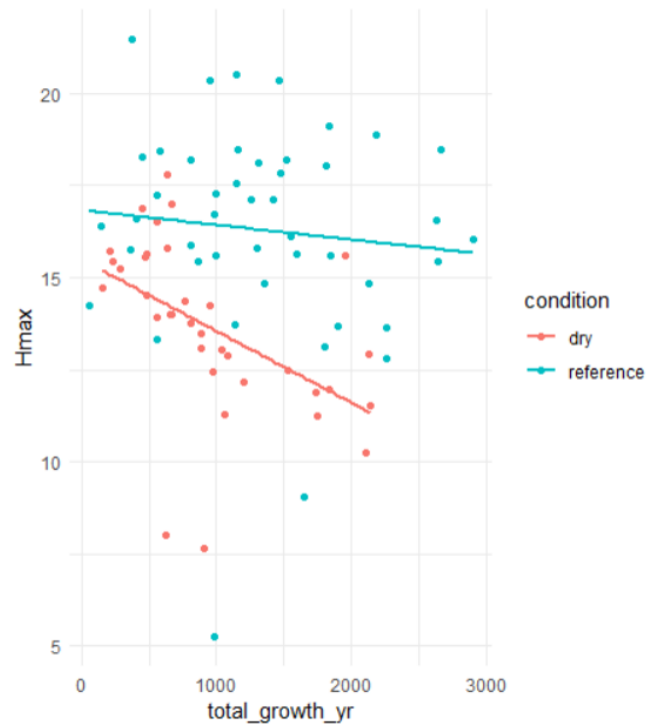
Figur 16: X-aksen viser total tilvekst i 2022 sesongen i mikrometer, y-aksen viser kronetetthet.

Kronetettheten er signifikant økende med økende mengde nedbør for både referanse- og tørre prøveflater (figur 17). En korrelasjonsanalyse mellom kronetetthet og gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde viser at referanse-prøveflatene får økt kronetetthet ved økende mengde nedbør. De tørre prøveflatene får også økt kronetetthet, men de er mindre påvirket av mer nedbør. Trenden er økende forskjeller mellom kategoriene ved økende mengde nedbør.



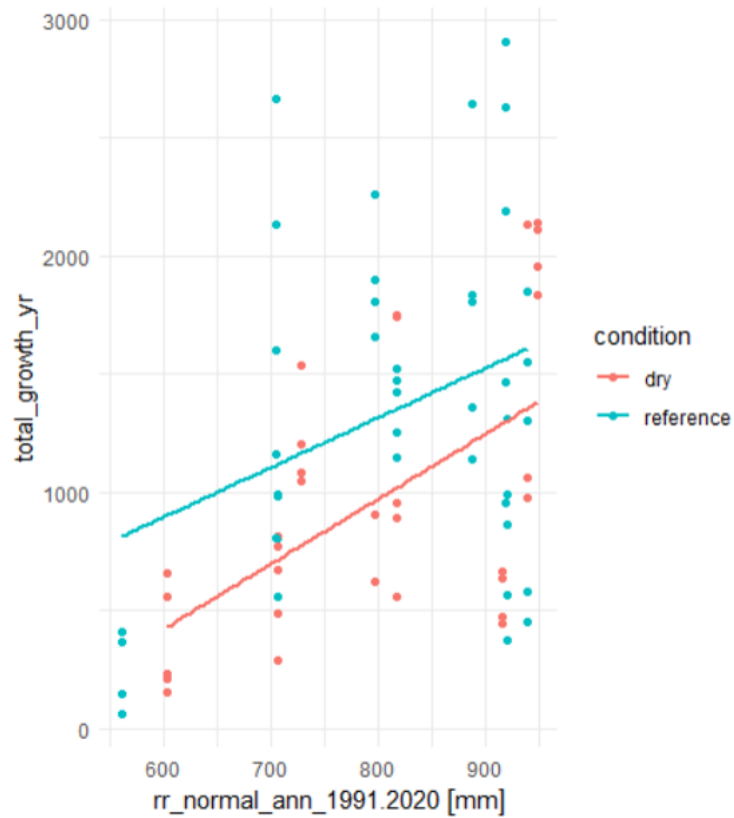
Figur 17: X-akse viser gjennomsnittlig årlig nedbør (mm), y-akse viser kronetetthet (D5).

En korrelasjonsanalyse mellom maksimal trehøyde og den totale tilveksten for vekstsesongen 2022 viser synkende høydeverdier med økende tilvekst, spesielt for dendrometertrærne på de tørre prøveflatene (figur 18). Trenden er økende forskjeller i maksimal høyde mellom kategoriene ved økende tilvekst. Endringene i forskjellen mellom kategoriene signifikant ($p < 0,001$).



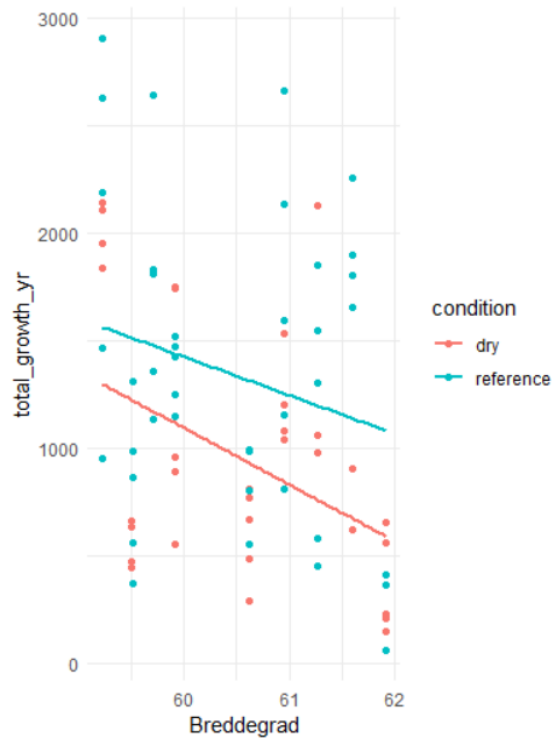
Figur 18: X-aksen viser total tilvekst i sesongen 2022 (mikrometer), y-aksen viser maksimal trehøyde (Hmax, meter)

Det er en signifikant sammenheng mellom total tilvekst for vekstsesongen 2022 og gjennomsnittlig årlig nedbørmengde (Figur 19). Tilveksten relativt til nedbør var imidlertid ulike mellom referanse og tørre prøveflater ($p < 0,001$). Det er en R^2 på kun 0,22 så regresjonsmodellen forklarer ikke sammenhengen spesielt godt.



Figur 19: X-aksen er gjennomsnittlig årlig nedbør (mm), y-aksen er total tilvekst i sesongen 2022 (mikrometer).

Total tilvekst for referanse- og tørre prøveflater viser synkende tilvekst ved økende breddegrad (figur 20), som fører til minkende nedbør og temperatur. Den totale tilveksten i 2022 viser at det var signifikant forskjell for dendrometertrærne mellom referanse og tørre prøveflater ($p = 0,010$, tabell 6).



Figur 20: Total tilvekst for dendrometertrærne over breddegrad for vekstsesongen 2022. Total tilvekst i mikrometer.

Tabell 8: Alle signifikante p -verdier mellom dendrometertrær på referanser- og tørre prøveflater over breddegrad fra laserdata, og gjennomsnittsverdiene for begge kategoriene.

Laserparameter	P-verdi	mean_dry	mean_ref
D5	0,036	0,55	0,61
D6	0,010	0,44	0,52
D7	0,007	0,33	0,40
D8	0,005	0,21	0,27
D9	0,010	0,11	0,14
H20	0,018	1,76	3,47
H30	0,005	4,70	6,63
H40	< 0,001	6,41	8,53
H50	< 0,001	7,44	9,72
H60	< 0,001	8,33	10,76
H70	< 0,001	9,20	11,69
H80	< 0,001	10,09	12,69
H90	< 0,001	11,17	13,79
Hmax	< 0,001	13,63	16,29
Hmean	< 0,001	6,62	8,54
Hsd	< 0,001	3,85	4,78
Tilvekst	0,0104	959,41	1339,58

4. Diskusjon

Hovedmålet med denne oppgaven var å se på kronetetthet og kronetetthet relatert til vekst hos gran plantet på typisk gran- og furumark langs en klimatisk gradient i Sørøst-Norge, ved hjelp av LIDAR registrert med drone. Laseren identifisert tydelige forskjeller, og har gitt mye nyttig data. Det er imidlertid viktig å merke seg at droneflygningene ble gjort over en lengre tidsperiode, og siste flyvning var i slutten av september 2022. Da er høsten i gang, dette kan til en viss grad påvirke laserdataene. Løvslipp, eventuelle endringer av vanninnhold i nåler og tidligere høst i nord enn i sør er faktorer som til en viss grad kan påvirke laserskanningene.

RGB-bilder ble også forsøkt brukt i denne studien, men det var ikke mulig å skille mellom gran på gran- og furumark i tilstrekkelig grad med denne metoden. Hypotesen om å kunne detektere forskjeller i RGB-bildene for å skille mellom tørkeutsatt gran og frisk gran basert på vanntilgang kan hverken bekreftes eller avkreftes. RGB-bildene hadde kun signifikante forskjeller ved sammenligning av alle segmenter på referanse-prøveflater mot alle segmenter på tørre prøveflater. Det betyr at det ikke lyktes å skille mellom de to kategoriene innenfor samme lokalitet, og derfor er det ikke vist til noen RGB-resultater i oppgaven. Det kan være flere årsaker til at denne typen bilder ikke fullt ut beskriver forskjellen mellom de to skogtypene. Dette inkluderer blant annet for lite data, for kort tidsperiode, feil tidspunkt i vekstsesong og kvaliteten på RGB-kameraet som ble brukt i denne studien. RGB-bildene ble tatt over en lengre tidsperiode på høsten, og når veksten har stoppet opp er det kanskje ikke like lett å oppdage variasjoner i nålenes vanninnhold, som når trærne er i full vekst. Det kan også skyldes at de individuelle forskjellene mellom prøveflatene i hvert par kansellerer hverandre ut.

4.1 Kronetetthet over breddegrad og nedbør

Mengden returnerte laserpulser fra de ulike høydenivåene i trekrona er det som gir målet på kronetetthet, omtalt som D-verdiene. Det er viktig å merke seg om verdiene kommer fra segmenter innenfor prøveflata, eller hele prøveflata. Hvert enkelt segment skal optimalt sett representere ett enkelt tre med individuell inndeling av nivåene for kronetetthet. Når trærne blir målt individuelt sammenlignes kronetettheten på de samme nivåene i forhold til treets høyde. Dette er metoden brukt for dendrometertrærne og alle trær på referanse- mot alle trær på tørre prøveflater. Når D-verdiene kommer fra hele prøveflater, er det de høyeste trærne på prøveflata som bestemmer inndelingen av nivåene for kronetetthet. Det kan ses på som at hele prøveflata er ett segment. Det fører til at kronetettheten i toppen på et lavt tre ikke

sammenlignes med kronetettheten i toppen på et høyt tre. Dette kan gi en viss feilmargin i resultatene. Hovedsakelig består prøveflatene av ensaldrede og homogene bestand, og derfor antas det at dette ikke påvirker resultatene i stor grad.

Kronetetthet (D-verdiene) viste signifikante forskjeller mellom gran på furumark og gran på granmark for alle metodene. Her kom det fram at det var synkende tetthetsverdier og forskjeller mellom kategoriene ved økende breddegrad. Størst forskjell mellom referanse- og tørre prøveflater var i sør. Dette bekrefter min hypotese om høyest kronedensitet for gran på granmark, og lavere kronedensitet for gran på furumark. I mine resultater ble sammenhengen for regresjonsmodellen best forklart av økende breddegrad. Dette antar jeg at kan forklares med at både temperatur og nedbørsmengde synker med økende breddegrad.

Det er en sammenheng med kronetetthet og nedbørsmengde, men ikke i like stor grad som for breddegrad. Ved gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde <600 mm er det liten forskjell i kronetetthet mellom gran som vokser på gran- og furumark. Kronetettheten øker markant for gran på granmark med økende nedbørsmengde, men for gran på furumark er økningen i kronetetthet mye mindre. Min hypotese om minst forskjell mellom gran på gran- og furumark, der det er best tilgang på vann er dermed motbevist. Dette tyder på en tilpasning for gran på furumark, der mer nedbør ikke påvirker kronedensiteten, noe som er interessant.

Grunnen til størst forskjell i kronedensitet der det er mest nedbør kan komme som følge av høyere temperatur, som gir større avdamping. I denne studien følger temperaturen breddegraden. Temperatur og gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde har begge høyest verdier i sør. Jordas evne til å holde på fuktigheten blir da en viktig faktor. Naturlig tørre plasser har en dårligere evne til å holde på markfuktighet. Dette vises ved at forskjellen i densitet er størst der temperaturen er høyest gjennom året. Lavere gjennomsnittstemperatur jo lenger nord man kommer gir redusert avdamping fra jorda, samtidig som nedbørsmengden også minker. Det kan forklare hvorfor forskjellene blir mindre mellom referanser og tørre prøveflater langs breddegraden.

Transpirasjon fra trekrone synker ved minkende kronevolum. Derfor kan kronedensiteten reflektere fuktighetsforholdene på voksestedet. Grunnen til dette er at de solkrevende tynne nålene har bedre evne til opptak av vann fra atmosfæren. En nedgang i kronevolum innenfor en viss grense øker dermed opptaket av fuktighet fra luften i form av blant annet tåke. De skyggetålende nålene er tykkere og har bedre evne til å ta opp vann i form av regn. De har derimot dårligere egenskaper når det gjelder opptak av vann fra atmosfæren. Dette er med på

å forme kronetettheten (Herzog et al., 1998). Derfor kan en lavere kronetetthet være et forsøk på å utnytte fuktighet fra luften, samtidig som det minker transpirasjon fra krona. Gran på furumark vil ha større nytte av dette enn gran på granmark, og dette kan være årsaken til de observerte forskjellene i kronetetthet. Det er spesielt i toppen disse endringene skjer, noe som forklarer at de signifikante forskjellene for kronetetthet begynner rundt D5-D6 og videre oppover i trekrona.

De naturlige fuktighetsforholdene i bakken påvirker som nevnt trolig granas evne til kronevekst, eller prioritering av denne veksten. Gran på granmark viser en sterk økning i kronetetthet ved økende mengde nedbør, mens gran på furumark ikke viser den samme responsen. For gran på furumark virker prioriteringen av vekst i krona å være begrenset, selv om nedbørsmengden øker. En årsak kan være at grana på tørre områder oftere blir utsatt for tørkehendelser. Da prioriterer grana vekst under bakken i rotsystemet, spesielt finrøtter (Hikino et al., 2022).

En annen forklaring kan være jordsmonn som ikke holder spesielt godt på markfuktigheten. Da må grana prioritere vekst i rotnettverk og dens evne til opptak av vann framfor vekst i krona. Større kronetetthet gir økt behov for vann, og da må grana tilpasse seg på tørrere områder.

Tidligere forskning beskriver begrenset vekst i røtter som en direkte årsak av tørkestress. Sommertørke kan føre til opphør av vekst i røtter, og sette deler av rotsystemet i dvale. Ved ekstreme tilfeller av slik sommertørke kan det forekomme tørkeskade på røttene. Da vil grana forsøke å regenerere de delene av røttene som har blitt skadet. Hvis dette mislykkes, kan det føre til permanent skade på rotsystemet. Slike skader på grovrøtter og eventuelt tap av deler av det dype rotsystemet kan igjen lede til redusert grensetting og misfarging, fordi det hindrer evnen til opptak av vann og næring (Puhe, 2003). Dette vil da reflekteres i lavere kronedensitet.

Om lavere kronetetthet for gran på furumark er en tilpasning til voksested, eller om det er forholdene på voksestedet som begrenser mulighet til vekst i krona, er vanskelig å si. Når vann ikke er en begrensende faktor, trenger ikke grana å prioritere vekst i rotsystemet eller begrense vekst i krona. Økende kronetetthet ved økende mengde nedbør for gran på granmark tyder på en positiv sammenheng.

Resultatene viser at det er en tydelig forskjell mellom gran på granmark og gran på furumark basert på kronetettheten, samt en tydelig endring i forskjellene fra nord til sør. Om denne

signifikante forskjellen i kronetetthet er dirkete knyttet til granas vitalitet er allikevel vanskelig å konkludere med. Forskjellig prioritering av vekst tilpasset voksested betyr ikke nødvendigvis redusert vitalitet, men kan bety at grana tilpasser seg for å håndtere mindre tilgang på vann fra bakken. Unntaket for kronetetthet er Våler og Elvål. Dette er lokaliteter med stort innslag av løvtrær på de tørre prøveflatene, mens det ikke er løvtrær på referanseprøveflatene. Løvtrær registreres med høyere kronedesnitet enn nåletrær.

Ellers er det viktig å merke seg at subjektivt valgte prøveflater kan føre til at man velger ut bestand med et stort ønske om å oppnå et resultat. Dette er et bias som kan være med på å forsterke resultatene, ved å velge ut ekstreme og unaturlige tilfeller.

4.2 Høyde over breddegrad og nedbør

Høydepercentilene viser en signifikant forskjell mellom referanse- og tørr prøveflate fra H40 til H90 for hele prøveflater. For segmenteringen er forskjellen i høydepercentilene signifikante på alle nivåer. Høydeverdiene viser mye av de samme trendene som kronetetthet. Høyest verdier i sør, lavere verdier i nord, og en minkende forskjell i høydeverdier mellom gran på gran- og furumark ved økende breddegrad. Dette bekrefter min hypotese om størst høydeverdier for gran på granmark. Igjen motbevises min hypotese om minst forskjeller ved best vanntilgang. Jo mer gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde, jo større er forskjellene i høyde mellom referanse- og tørre prøveflater.

Gjennomsnittshøyden er størst for gran på granmark. Elvål er eneste lokalitet hvor tørr prøveflate har størst verdi for gjennomsnittshøyde. Det kan være flere årsaker og sammenhenger. Akkurat som for kronedensitet må gran på furumark i større grad prioritere vekst i rotsystem for opptak av vann, framfor vekst i høyden. Redusert høyde kan på samme måte som redusert kronetetthet være en tilpasning til tørre forhold. Redusert mengde med fuktighet i bakken kan gjøre at et lavere tre har en fordel framfor et høyere tre på grunn av kapillæreffekten.

Regresjonsmodellen forklarer til en viss grad sammenhengen i endring mellom referanse- og tørre prøveflater over breddegrad med R^2 rundt 0,5. Sammenhengen er ikke like tydelig dersom man ser på gjennomsnittlig årlig nedbør. For gran på granmark er det økende verdier for høydepercentilene med økende mengde nedbør. Gran på furumark derimot viser en svak synkende trend ved økende mengde nedbør. Resultatene viser også at det er minkende forskjeller i høydevekst ved minkende mengde gjennomsnittlig årlig nedbør. Den gjennomsnittlige årlige nedbørsmengden og gjennomsnittstemperaturen synker ved økende

breddegrader, i tillegg minker avdampningen fra jorda og dermed også forskjellene mellom referanse- og tørre prøveflater. En årsak til dette kan være at dersom nedbørmengden er under 600 mm i året, må også gran på granmark tilpasse seg til tørrere forhold og prioritere vekst i røtter. En annen måte å se det på er at slike områder er så tørre at de ikke lenger kan regnes som granmark. Lavere snittemperaturer gir kortere vekstsesong og mindre avdampning, sammen kan dette være med å minke forskjellene mellom referanse- og tørre prøveflater. Ellers virker det naturlig at høydeveksten trender på samme måte som kronedensiteten mellom referanse- og tørre prøveflater av de samme årsakene.

Selv om alderen er mellom 35 – 49 år er det så stor forskjell i bonitet at bestandene på høy bonitet er hogstklasse IV, mens noen av bestandene på lav bonitet i beste fall er en sein hogstklasse II. Variasjonen innad de ulike parene er allikevel ikke mer enn én hogstklasse, som følge av at de vokser i umiddelbar nærhet til hverandre og er like gamle. Dette gjør at resultatene fanger opp forskjeller gjennom et relativt langt tidsperspektiv i granas utvikling fra hogstklasse II til IV. Noe som gjør det rimelig å anta at resultatene har gyldighet over en lengre utviklingsperiode i granas livsløp.

4.3 Dendrometertrærne

Tilveksten hos dendrometertrærne for 2022 viser synkende vekst ved økende breddegrad og samtidig økende forskjeller mellom kategoriene med økende breddegrad. Det betyr at tilveksten er likest i sør, der hvor det samtidig er størst forskjell i kronetetthet og høyde mellom kategoriene. På referanse-prøveflatene er det en positiv korrelasjon mellom økende vekst og kronetetthet. For tørre prøveflater derimot, var det en negativ korrelasjon mellom kronetetthet og diametervekst, altså en økende diametervekst ved minkende kronetetthet.

Som nevnt tidligere kan en årsak være at ved begrenset vanntilgang prioriteres vekst i røtter, og samtidig unngå unødvendig vanntap ved å ha lav kronetetthet. At gran på tørrere mark har bedre tilvekst ved lavere kronetetthet, kan bety at lav kronetetthet er en tilpasning for å kunne opprettholde god vitalitet i områder hvor vann er en begrensning. Dermed kan lav kronetetthet for gran på furumark faktisk være et sunnhetstegn. Også det faktum at tilveksten er såpass lik for de to kategoriene til tross for lavere kronetetthet kan tyde på at lav kronetetthet for gran på furumark er et tegn på god vitalitet. Allikevel strekker denne studien seg kun over ett år, så selv om diameterveksten er ganske lik denne sesongen har det ikke vært slik tidligere. Det er synlig forskjell i diameter og bestandstetthet mellom referanse- og tørre prøveflater til tross for lik alder. Min problemstilling om å knytte granas vitalitet til kronedensitet blir derfor

vanskelig å bekrefte, eller avkrefte. Kronedensiteten kan brukes til å skille mellom gran på tørre og fuktige voksesteder. Det betyr at ved mer data om skader og mortalitet kan muligens kronetettheten kobles opp mot det å være utsatt for tørkestress. Fysiologiske mål som eksempelvis grad av fotosyntese er også data som kan kobles til kronedensitet for å skille på vitalitet.

Gjennomsnittlig kronetetthet for dendrometertrærne, D5, har stigende trend ved økende nedbørsmengde for begge kategorier. Dette bekrefter samme trend som rapportert tidligere i oppgaven, men da også bekreftet på enkelttrær. Det virker naturlig da økende mengde nedbør gir minkende behov til å prioritere vekst i røtter. Trenden er fortsatt at gran på granmark har høyere grad av økende kronetetthet ved økende nedbørsmengde. Gran på furumark har også økende kronetetthet ved økende mengde nedbør. Igjen er trenden en økende forskjell i kronetetthet ved økende gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde.

Den maksimale høyden over årlig diametertilvekst er synkende med økende tilvekst for både gran på granmark og gran på furumark i vekstsesongen 2022, men trenden er mye kraftigere for gran på furumark. Grana prioriterer først vekst i høyde, deretter vekst i bredde. Dette vises i vekstmodeller med en synkende høyde-diameter kurve (Vospernik et al., 2010). Det kan tyde på at gran på furumark kulminerer i høydevekst på et tidligere tidspunkt, for så å prioritere diametervekst. Dette kan skyldes kapillæreffekten, og at gran på furumark ikke kan vokse så mye i høyden for å fortsatt ha evnen til opptak av vann gjennom hele treet.

Forskjellen i diametertilvekst mellom dendrometertrærne på granmark og dendrometertrærne på furumark er signifikant. Det er økende diametertilvekst ved økende mengde gjennomsnittlig årlig nedbør for begge kategorier. Min hypotese var at vekst hos enkelttrær er relatert til kronetetthet. En tettere krone med høyere evne til fotosyntese bør gi bedre vilkår for diametertilvekst. Derfor antok jeg også høyere tilvekst ved økende vanntilgang. Det stemte ikke for kronetetthet, men hypotesen stemte for tilveksten. Det er tydelig at tilveksten øker ved økende mengde nedbør. Forskjellene i tilvekst er minst ved høyest gjennomsnittlig årlig nedbørsmengde. Dette virker naturlig da den begrensende vekstfaktoren for de tørre prøveflatene er mangelen på vann. Ved økende tilgang på vann, øker også den totale tilveksten. Det er ikke bare nedbør som bestemmer fuktighetsforholdene. Forskjellige jordtyper tørker ulikt, noen raskere enn andre. Dette er ikke tatt hensyn til i denne studien, men det bør nevnes som en medvirkende årsak.

Fjernmåling med lidar viser seg å være et nyttig verktøy for identifisering av forskjeller i kronetetthet og vekst for gran. Dette gir muligheter til å kartlegge både tids- og kostnadseffektivt store områder for å lokalisere disse arealene hvor gran står på furumark. For å bruke kun en flygning, slik som i denne studien, vil man være avhengig av mer fysisk innsamlet data fra felt for å kunne trekke konklusjoner om vitalitet. Dette kommer forhåpentligvis videre i prosjektet Forest4Society. Ved å bruke to flygninger med noen års mellomrom kan avgang registreres med fjernmåling. Med bruk av kronesegmenteringen kan man sammenligne antall registrerte kroner i samme område på forskjellige tidspunkt, og basert på dette finne forskjeller i mortaliteten for gran på gran- og furumark.

Resultatene i denne studien viser totalt sett at veksten er dårligere for gran på furumark. Det er også visuelt synlig på prøveflatene at veksten er dårligere. Dette betyr at granas klimatilpasning til tørrere forhold går på bekostning av egenskaper som total volumtilvekst. Det er tross alt volumproduksjon som er interessant i områder hvor det er plantet gran, og det er det vi har sett på. Det i seg selv har stor betydning for skogbruket. Kan man erstatte gran på furumark med furu eller andre treslag som er bedre tilpasset tørrere forhold er det en fordel. Og nå kan vi kjenne igjen disse områdene kun basert på kronetetthet. Blir det mulig å påvise at redusert kronetetthet er direkte knyttet til dårligere vitalitet vil det også være veldig viktig for skogbruket. Det vil bety at store områder med skadeutsatt gran kan registreres, og tiltak kan iverksettes for å unngå tørkeskader over større områder.

5. Konklusjon

Ved å analysere kronetetthet er det mulig å se forskjeller mellom gran på gran- og furumark. I denne studien kan det ikke bekreftes eller avkreftes at kronetetthet nødvendigvis gir en direkte indikator på granas vitalitet, men denne indikatoren kan brukes til å skille på voksested. Jeg tenker at et lengre tidsperspektiv hvor man får mer data om vekst og registrert mortalitet på prøveflatene vil kunne gi klarere sammenhenger. Da vil det trolig være mulig å si noe mer om overlevelsessevne basert på kronetettheten og voksested.

Disse registrerte forskjellene i kronetettheten tyder på at grana har ulike strategier avhengig av voksested. Samtidig kan det også være en kombinasjon med tørkestress i røtter som gir disse ulikhetene i kronetetthet. Hvis man kan indentifisere tørkestress i røttene som årsak til redusert kronetetthet vil man kunne koble kronetetthet direkte til granas vitalitet. For å gjøre dette kreves mer forskning. Det er ikke tatt hensyn til jordtyper i denne studien, og tilgjengelig vann handler ikke bare om nedbør. Derfor bør det også inkluderes et mål på vannholdingskapasiteten for ulike jordtyper for å også se effekten av dette i sammenheng med tørkestress.

Høydeveksten for gran på furumark er gjennomgående lavere enn for gran på granmark. Dette i seg selv er en grunn til å prioritere andre treslag, da resultatene viser betydelig dårligere høydevekst for gran på furumark.

Økende forskjeller i tilvekst ved minkende mengde nedbør er en indikator på at tørke hindrer optimal volumproduksjon hos gran på furumark. Dette tyder først og fremst på at granas evne til å vokse forringes på tørre forhold. Dette kan tolkes som et tegn på redusert vitalitet.

Videre forskning på dette prosjektet vil trolig gi klarere resultater og sammenhenger når man inkluderer flere vekstsesonger i dataene. For videre forskning kunne det også vært interessant å måle forskjeller i biomasse for rotsystemene til gran på gran- og furumark. Samtidig ville det vært nyttig og interessant å gjøre nåleanalyser mellom gran på gran- og furumark. Ved å samle nåler fra ulike høydenivåer i hele trekronen kan man bekrefte eller avkrefte at fuktighetsforholdene bestemmer hva slags nåler grana satser på.

6. Litteratur

- BASTIN, J.-F., CLARK, E., ELLIOTT, T., HART, S., VAN DEN HOOGEN, J., HORDIJK, I., MA, H., MAJUMDER, S., MANOLI, G. & MASCHLER, J. 2019. Understanding climate change from a global analysis of city analogues. *PloS one*, 14, e0217592.
- BENTZ, B. J., JÖNSSON, A. M., SCHROEDER, M., WEED, A., WILCKE, R. A. I. & LARSSON, K. 2019. Ips typographus and Dendroctonus ponderosae models project thermal suitability for intra-and inter-continental establishment in a changing climate. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2, 1.
- DALPONTE, M. & COOMES, D. A. 2016. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. *Methods in ecology and evolution*, 7, 1236-1245.
- FELTON, A. M., HEDWALL, P.-O., FELTON, A., WIDEMO, F., WALLGREN, M., HOLMSTRÖM, E., LÖFMARCK, E., MALMSTEN, J. & KARINE WAM, H. 2022. Forage availability, supplementary feed and ungulate density: Associations with ungulate damage in pine production forests. *Forest Ecology and Management*, 513, 120187.
- GOBAKKEN, T. & NÆSSET, E. 2008. Assessing effects of laser point density, ground sampling intensity, and field sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 1095-1109.
- HANSSEN-BAUER, I., DRANGE, H., FØRLAND, E., ROALD, L., BØRSHEIM, K., HISDAL, H., LAWRENCE, D., NESJE, A., SANDVEN, S. & SORTEBERG, A. 2009. Klima i Norge 2100. *Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing., Norsk klimasenter, Oslo, Norway.*
- HANSSEN, K. H., SOLBERG, S., HIETALA, A. M., KROKENE, P., ROLSTAD, J., SOLHEIM, H. & ØKLAND, B. 2019. Skogskader–en kunnskapssammenstilling. *NIBIO Rapport.*
- HERZOG, K. M., THUM, R., KRONFUS, G., HELDSTAB, H.-J. & HÄSLER, R. 1998. Patterns and mechanisms of transpiration in a large subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Ecological Research*, 13, 105-116.
- HIKINO, K., DANZBERGER, J., RIEDEL, V. P., HESSE, B. D., HAFNER, B. D., GEBHARDT, T., REHSCHUH, R., RUEHR, N. K., BRUNN, M. & BAUERLE, T. L.

2022. Dynamics of initial carbon allocation after drought release in mature Norway spruce—Increased belowground allocation of current photoassimilates covers only half of the carbon used for fine-root growth. *Global Change Biology*, 28, 6889-6905.
- JUNTTILA, S., KAASALAINEN, S., VASTARANTA, M., HAKALA, T., NEVALAINEN, O. & HOLOPAINEN, M. 2015. Investigating bi-temporal hyperspectral LiDAR measurements from declined trees—Experiences from laboratory test. *Remote Sensing*, 7, 13863-13877.
- KAUSRUD, K., VANDVIK, V., FLØ, D., GEANGE, S., HEGLAND, S., HERMANSEN, J., HOLE, L., IMS, R., KAUSERUD, H., KIRKENDALL, L., NORDÉN, J., NYBAKKEN, L., OHLSON, M. & SKARPAAS, O. 2022. *Klimaendringer og virkninger på hovedøkosystem skog; Et norsk sammendrag basert på VKM Report 2022:15 Impacts of climate change on the boreal forest ecosystem*.
- 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.
- LANDBRUKS&MATDEPARTEMENTET 2020. Store barkbilleangrep i Sverige og Sentral-Europa. <https://kommunikasjon.ntb.no/pressemelding/store-barkbilleangrep-i-sverige-og-sentral-europa?publisherId=12632359&releaseId=17879033>: Landbruks- og mat departementet.
- 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, 39.
- NMBU, M. 2022. Forests4Society: Forest functions in the past, present and future - what can society expect from forests under climate change? Available: <https://www.nmbu.no/forside/en/projects/forests4society>.
- NORSK METEOROLOGISK INSTITUTT 2023. Gridded climate normals 1991-2020. In: NORSK METEOROLOGISK INSTITUTT (ed.). [https://thredds.met.no/thredds/catalog/KSS/Gridded climate normals 1991-2020/catalog.html](https://thredds.met.no/thredds/catalog/KSS/Gridded%20climate%20normals%201991-2020/catalog.html).
- PUHE, J. 2003. Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands—a review. *Forest ecology and management*, 175, 253-273.
- SOLBERG, S., NÆSSET, E., AURDAL, L., LANGE, H., BOLLANDSÅS, O. M. & SOLBERG, R. 2005. Remote sensing of foliar mass and chlorophyll as indicators of

forest health: preliminary results from a project in Norway. *Proceedings of forestsat*, 105-109.

SSB. 2023. *Avvirkning for salg, etter sotiment, statistikkvariabel og år* [Online]. SSB.

Available: <https://www.ssb.no/statbank/table/03795/chartViewColumn/> [Accessed 26.1 2023].

VOSPERNIK, S., MONSERUD, R. A. & STERBA, H. 2010. Do individual-tree growth models correctly represent height: diameter ratios of Norway spruce and Scots pine? *Forest ecology and management*, 260, 1735-1753.

WULDER, M. A., WHITE, J. C., NELSON, R. F., NÆSSET, E., ØRKA, H. O., COOPS, N. C., HILKER, T., BATER, C. W. & GOBAKKEN, T. 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote sensing of environment*, 121, 196-209.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway