

Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2025 30 stp
Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Er oppstart av primær- og sekundærvekst synkronisert i gran (*Picea abies*) og bjørk (*Betula pendula*)?

Is the onset of primary- and
secondary growth synchronised in
Norway spruce (*Picea abies*) and
birch (*Betula pendula*)?

Cecilie Piccirilli Bjerkeset

Skogfag

Forord

Denne masteroppgaven i skogfag markerer slutten på fem lærerike år ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA). Data fra EEA-prosjektet «Learning by doing» som ble finansiert av Iceland Liechtenstein Norway grants, og finansiering fra UMB forskningsfond og PREDICT prosjektet gjorde det mulig å gjennomføre studiet. I oppgaven vurderes oppstarten av primærvekst (knoppsprett) og sekundærvekst (radiell vekst) i gran og bjørk gjennom våren 2024 i Nordskogen (Ås kommune), samt vurderes dendrometermålinger som et verktøy for å vise oppstart av sekundærvekst. Det er et behov for flere fenologiske studier om økologiske og økonomiske viktige treslag som gran, for å lage prognoser om skogens respons på klimaendringer.

Jeg setter stor pris på veiledning og alle de faglige diskusjonene med mine to veiledere, og vil takke min hovedveileder Line Nybakken og biveileder Danielle Creek. Noe av dataen fra dendrometerne ble sendt fra Tsjekkia, og en stor takk går derfor også til de samarbeidsvillige forskerne ved EEA-prosjektet «Learning by doing». I prosessering av laboratorieprøvene har Mari Katharina Aas Ådland (Veterinær instituttet) og Lene Cecilie Hermansen (The imaging center) vært sentrale bidragsyttere, og jeg vil gjerne benytte anledningen og takke begge. Prosessering av mikrobørprøver og mikroskopi hadde ikke vært mulig uten finansiering fra UMB forskningsfond, en økonomisk støtte jeg er svært takknemlig for.

Sammendrag

Skogens respons til fremtidig klimaendringer er usikker. Trærnes fenologi er sterkt påvirket av klimasignaler og kan dermed være en god indikator på skogens respons på endringer.

Kunnskap om hendelser som oppstart av veddannelse og knoppsprett og koblingen mellom dem, kan indikere hvordan skogen i fremtiden vil respondere.

Jeg har studert forholdet mellom oppstarten av primær (knoppsprett)- og sekundærvækst (radiell vekst) i gran (*Picea abies*) og bjørk (*Betula pendula*) våren 2024 i Nordskogen, Ås kommune. Knopp utvikling ble observert ukentlig ved bruk av kikkert, og radiell vekst ble målt hvert 10. minutt av dendrometre. Data fra dendrometre sammenlignet jeg med mikroskopprøver for å vurdere hvor presist verktøyet kunne predikere oppstart av sekundærvækst. Mikroskopprøvene ble produsert basert på de ukentlige mikroskopprøvene jeg hadde tatt fra fem grantrær.

Det ble observert forskjeller mellom gran og bjørk, både i knopp utvikling og tidsforskjellen mellom knoppsprett og oppstart av radiell vekst. Jeg fant at primærvæksten til grantrær startet mellom en dag (på det tidligste) og ti dager (på det seneste) før sekundærvæksten. Primær- og sekundærfenologien i gran er dermed relativt synkron. Bjørk hadde derimot oppstart av primærvæksten 17-22 dager før sekundærvæksten. Knopp utviklingen til bjørk startet tidligere og var raskere enn gran.

Dendrometermålingene kunne predikere oppstart av veddannelsen bedre når vekststart ble definert som tidspunktet hvor 5% av den radielle veksten var nådd, sammenlignet med 0 μm terskelen for vekststart. Etter det jeg vet, er dette det eneste studiet som har sammenlignet oppstart av veddannelse med mikroskopprøver og dendrometre hos gran, samtidig som koblingen med primærvækst ble studert. Oppsummert, viser studien at det er mer synkronitet mellom oppstarten av primær- og sekundærvækst i gran enn det er i bjørk, og at dendrometre har potensiale til å forutsi oppstarten av sekundærvækst i gran.

Abstract

The forest's response to future climate change is uncertain. Tree phenology is highly affected by climate signals and can therefore be a good indicator of forests response to change. The knowledge about occurrences such as onset of wood formation and budburst, and the connection between them, might indicate how forests in the future will respond.

I have studied the relationship between the onset of primary growth (budburst) and secondary growth (radial growth) in spruce (*Picea abies*) and birch (*Betula pendula*) during spring 2024 in Nordskogen, Ås municipality, Norway. The bud development was observed weekly using binoculars, and radial growth was measured every tenth minute by dendrometers. I compared data from the dendrometers with microscopy tests to evaluate how accurately the dendrometers could predict the onset of secondary growth. The microscopy tests were produced based on the weekly microcores taken from five spruce trees.

There were differences between spruce and birch in both bud development and time difference between budburst and onset of radial growth. In spruce trees, I found that primary growth started between one and ten days before the secondary growth. The primary and secondary phenology in spruce is relatively synchronized. Birch started primary growth 17-22 days before secondary growth. Bud development started earlier and occurred faster in birch compared to spruce.

Dendrometer measurements could predict the onset of wood formation better when onset was set to the 5% radial increment threshold compared to the zero micrometres threshold. To my knowledge, this is the only study that has compared the onset of wood formation with microcores and dendrometers in spruce, while also studying its link to primary growth. In summary, the study shows that onset of primary and secondary growth is more synchronized in spruce than in birch, and that dendrometers have the potential to predict onset of secondary growth in spruce.

Innholdsfortegnelse

Forord	2
Sammendrag.....	3
Abstract.....	4
1 Innledning.....	6
2 Materiale og metode.....	10
2.1 Studiested.....	10
2.2 Studiedesign	11
2.3 Feltregistreringer	11
2.3.1 Registrering av knopp utvikling	11
2.3.2 Registrering av radiell tilvekst	12
2.3.3 Mikrobørprøver	13
2.4 Analyse	14
2.4.1 Produksjon av mikroskopiprøver.....	14
2.4.2 Mikroskopi	16
2.5 Statistiske analyser	19
2.5.1 Knopp utvikling	19
2.5.2 Dendrometerdata	20
3 Resultater	21
3.1 Primærvekst.....	21
3.1.1 Knopp utvikling	21
3.2 Sekundærvekst.....	23
3.2.1 Dendrometerdata	23
3.2.2 Veddannelse.....	28
3.3 Forhold mellom primær- og sekundærvekst i gran	31
4 Diskusjon.....	33
4.1 Primær- og sekundærvekst i gran	33
4.2 Primær- og sekundærvekst i bjørk	36
4.3 Sammenligning av treslag.....	37
4.4 Dendrometer for å anslå vekststart	38
5 Konklusjon.....	41
6 Litteraturliste.....	43
Vedlegg 1	48
Vedlegg 2	50
Vedlegg 3	51
Vedlegg 4	56

1 Innledning

Den gjennomsnittlige globale overflatetemperaturen var i perioden 2001-2020 0.99°C høyere enn for perioden 1850-1900, og global oppvarming er predikert å fortsette (IPCC, 2023). Av de landlige biomenene er det den boreale skogen som opplever den raskeste oppvarmingen (Gonzalez et al., 2010). I en klimaframskriving for norske skogøkosystemer anslår Kausrud et al. (2022) at grana kan utnytte en lengre vekstsesong i perioden 2030-2050, samtidig kan de høyere temperaturene øke risikoen for tørke og sykdommer i gran. De negative konsekvensene av klimaendringer vil trolig være i flertall fra perioden 2040-2060 til 2100 (Kausrud et al., 2022).

Sammenlignet med andre planteegenskaper, er trærnes start og avslutning av vekstsesongen, fenologien, sterkt knyttet til klimaet (Badeck et al., 2004). Endringer i fenologi kan dermed brukes for å vurdere effekten av klimaendringer i skog (Donnelly et al., 2004). Høyere temperaturer som en konsekvens av global oppvarming kan endre tidspunkt for knoppsprett (primærvekst) og oppstart av veddannelsen (sekundærvekst) om våren, men også knoppsetting og avslutningen av veddannelsen om høsten.

Primærvekst er høydeveksten til trærne, som skjer ved aktivitet i apikale meristem, og fører til grønne trekroner og oppstart av fotosynteseaktivitet på våren. Knopp utviklingen om våren styres først og fremst av temperatur (Sarvas, 1972), og dermed forventes tidligere knoppsprett som følge av økte temperaturer. Fotoperioden er en annen sentral faktor som påvirker knoppfenologi (Saxe et al., 2001). Hos noen treslag trengs en økning i antall timer lys om dagen for å bryte knoppshvilen. Hypotesen om at knoppspretten kan komme tidligere ved økte temperaturer er altså realistisk gitt at fotoperioden ikke overstyrer den kontrollen som temperatur har (Körner & Basler, 2010). Kjølekrav er en tredje faktor som styrer vårfenologi, og går ut på at knoppene krever en periode med temperaturer mellom 0°C og 10°C (Battey, 2000) før de er klare til å sprette. Det er observert en sterk respons på fotoperiode når knopper mottar mindre kjøling, og med global oppvarming kan vintrene bli mildere som kan medføre at fotoperiode får større betydning enn temperatur (Way & Montgomery, 2015). Videre vil fotoperiodesensitivitet være sentralt for å avgjøre knoppers respons under global oppvarming, og denne sensitiviteten varierer mellom treslag. Tidligere studier har vist varierende resultater når det gjelder fotoperiodens betydning for knoppsprett

hos gran, men flere av studiene nevnt i en kunnskapsoppsummering av Way and Montgomery (2015) indikerer at gran er sensitiv for fotoperiode.

Sekundærvekst er diameterveksten i stammen og greiner hos trærne. Den foregår ved produksjon av ved (xylem) i laterale meristem (det vaskulære kambiet) (Rathgeber et al., 2016), og bidrar til karbonlagring i stammen. Det vaskulære kambiet produserer ved innover mot kjernen og silvev (floem) i retning barken. Når kambiet er aktivt om våren starter differensieringen og deretter modningen av vedceller. Siden kambiet ikke er aktivt hele året dannes tydelige årringer i veden, mellom avslutningen av forrige års produksjon av vedceller og starten av årets. I likhet med primærveksten, styres veddannelsen av miljøfaktorer som temperatur og fotoperiode. Begge faktorene påvirker hormonnivåer, hormonsensitivitet og tilgangen på karbohydrater (Buttò et al., 2020), som har vist seg å være avgjørende for veddannelsen (Uggla et al., 2001). Selv om de apikale og laterale meristemene responderer på noen felles miljøfaktorer (temperatur og fotoperiode), er det fortsatt ulikheter i hvilke miljøfaktorer de påvirkes av og i hvilken utviklingsfase de ulike faktorene har betydning. For eksempel er lyskvalitet viktig for knopp utvikling (Mølmann et al., 2006), men ikke nevnt som en påvirkningsfaktor for veddannelse (Rathgeber et al., 2022). Det er mulig at disse forskjellene kan medføre at meristemene reagerer ulikt under klimaendringer, som i neste trinn kan resultere i misforhold mellom primær- og sekundærvekst. Körner (2015) påpekte at det er meristemenes evne til å omgjøre karbon til biomasse som først og fremst er til hinder for plantevekst (ikke fotosyntese), og at karbonlagring dermed er avhengig av de miljøfaktorene som styrer kambiumaktiviteten. Det er imidlertid få studier som har sammenlignet primær- og sekundær fenologi, samtidig som det generelt er mye usikkerhet knyttet til fenologiske responser på klimaendringer (Diez et al., 2012; Parmesan, 2007; Wolkovich et al., 2012).

Sammenligning av tidspunkt for knoppsprett og oppstarten av stammetilvekst kan øke forståelsen for vekstdynamikken i trær og skogens klimatilpasning. Skogens produktivitet kan øke under global oppvarming dersom trærne klarer å utnytte den lengre vekstsesongen (Baldocchi et al., 2005; Chuine & Beaubien, 2001; Richardson et al., 2009), og så lenge ikke fuktighet blir en hindring. Det diskuteres om en tidligere knoppsprett (Bronson et al., 2009) kan medføre en tidligere start av sekundærveksten for trær (Perrin et al., 2017). Skal lengre vekstsesong under global oppvarming gi økt karbonlagring, må imidlertid *både* primær- og

sekundærvæksten oppstå tidligere og trærne må vokse like lenge utover høsten (Huang et al., 2014). Forholdet mellom knoppfenologi og vedfenologi er derfor essensielt for forståelsen av hvordan klimaendringer vil påvirke karbonbinding i fremtiden.

Huang et al. (2014) kvantifiserte forholdet mellom primær- og sekundærvækst matematisk og fant at produksjon av vedceller kan være en funksjon av knoppfenologi, kambiumaktiviteten, skudd- og nålevækst, men også faktorer knyttet mer spesifikt til voksested og treslag. Kambievæksten har blitt observert å starte *før* knoppsprett i europalerk (*Larix decidua*), sembrafuru (*Pinus cembra*), furu (*Pinus sylvestris*), edelgran (*Abies alba* Mill.) og gran (*Picea abies*) (Cuny et al., 2012; Lin et al., 2024; Rossi et al., 2009). I motsetning har veddannelsen blitt funnet å oppstå *etter* knoppsprett hos bøk (*Fagus sylvatica*) (Čufar et al., 2008; Schmitt et al., 2000). Hos svartgran (*Picea mariana*) og balsamedelgran (*Abies balsamea*) startet veddannelsen *før* knoppsprett (Huang et al., 2014), og prosessene har også vært *synkrone* (Antonucci et al., 2015). I hengebjørk (*Betula pendula*) har det ikke blitt observert noen tydelig mønster mellom tidspunkt for knoppsprett og veddannelse (Dox et al., 2022). Litteraturen reflekterer altså betydelige forskjeller rundt synkroniseringen av ved- og knoppfenologi mellom treslagene.

For å kunne sammenligne knopp- og vedfenologi har tradisjonen vært å analysere veddannelse fra mikrobørprøver og overvåke knoppsprett visuelt. Mikrobørprøver er små kjerner som tas ut av stammen på et utvalg trær hver uke, og fra disse lages mikroskopiprøver som gjør det mulig å observere celleutviklingen (Prislan et al., 2022). Dette er en ressurskrevende prosess, ettersom det kreves ukentlig feltarbeid, prosessering på laboratorium, mikroskopi og statistisk analyse. En annen lovende metode for å analysere sekundærvækst er å benytte dendrometre. Disse måler radielle endringer i stammen med høy oppløsning (μm vekst per dag). For å fastslå vekststart- og slutt er imidlertid fortsatt mikrobørprøver ansett som beste praksis. Nye typer dendrometre har imidlertid en presisjon som er lovende for å predikere start og slutt av vedcelleforstørrelsen (Miller et al., 2022), men det finnes få studier som har testet dette. Dendrometre har i tillegg den fordel at de kan brukes i mye større skala, og medfører betraktelig mindre inngrep i trærne enn mikrobørprøver. Av de studiene som har sammenlignet primær- og sekundærvækst i gran (Cuny et al., 2012; Lin et al., 2024; Rossi et al., 2009), har alle utelukkende benyttet seg av mikrobørprøver.

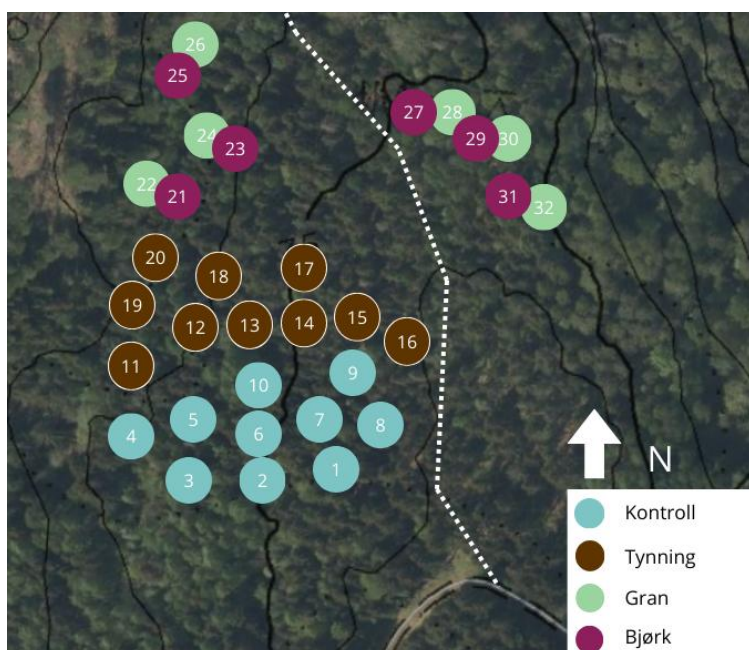
I dette studiet har jeg benyttet registreringer av knopp utviklingsfaser, dendrometerdata og mikrobørprøver i et eksisterende oppsett i Nordskogen (Ås) til å se på forholdet mellom primær- (knoppsprett) og sekundærvækst (radiell tilvekst) for bjørk og gran gjennom våren 2024. Basert på eksisterende litteratur (Rossi et al. 2009; Cuny et al. 2012; Lin et al. 2024) hadde jeg en hypotese om at sekundærvæksten ville startet *før* primærvæksten hos gran. I bjørk hadde jeg en hypotese om at radiell tilvekst ville oppstå *etter* knoppspretten, ettersom den trenger nytt bladverk på våren før den kan fotosyntetisere produkter som kreves i veddannelsen. For gran undersøkte jeg også hvor godt dendrometermålinger viste oppstart av sekundærvækst ved å sammenligne dendrometermålinger med veddannelsen fra mikrobørprøver. Dendrometermålingene ble også benyttet for å vurdere vekststart- og slutt, og når 25% og 50% av tilveksten ble nådd (vekstrytme).

2 Materiale og metode

2.1 Studiested

Studiet ble gjennomført i Nordskogen, i Ås kommune, i et bestand på 14 dekar som ligger 80 meter over havet. Bestandet var dominert av gran (*Picea abies*), med innslag av større furu (*Pinus sylvestris*) og bjørk (*Betula pendula*). Ifølge skogbruksplanen var grantrærne 55 år gamle, tilhørte hogstklasse 4 og hadde bonitet 20.

Gjennomsnittlig temperatur i Ås for 2024 var 7 °C og årsnedbøren lå på 982.5 mm (Norsk klimaservicesenter, 2025). I vekstsesongen (juni-august) var gjennomsnittlig temperatur 15.4 °C og nedbøren var 380.6 mm. Vinteren før mine registreringer (oktober 2023 til januar 2024) hadde middeltemperatur lavere enn normalen (1991-2020), og var den kaldeste vinteren siden 2020. Januar 2024 var 4.2 °C kaldere enn normalen, mens februar og mars var henholdsvis 1.2 °C og 1.6 °C varmere enn normalen 1991-2020. April var 0.2 °C kaldere enn normalen. Mai måned var 4.5 °C varmere, og den varmeste mai etter 2020.



Figur 1: Studieoppsettet i bestandet i Nordskogen, med tynningsforsøk i gran (tynnet og uttynnet kontroll) og par av gran og bjørk. Tallene representerer de ulike trærne (Vedlegg 1). En sti (hvit stiple linje) går gjennom bestandet.

2.2 Studiedesign

Studieoppsettet (Figur 1) ble etablert i forbindelse med EEA-prosjektet «Learning by doing» høsten 2021, da ble det festet dendrometer på gran og bjørk i bestandet. Et tynningsforsøk ble utført i en del av bestandet og 10 av grantrærne fikk dendrometer montert. Dette var en fritynning sen-høsten 2022 hvor tynningsintensiteten var 47.5 % av grunnflaten. Effekten av tynning var ikke en del av problemstillingen min, men ettersom jeg benyttet meg av et tynningsforsøk har jeg tatt med en sammenligning av trær fra kontroll og tynning som bakgrunnsopplysninger. I den utynnede delen av bestandet fikk 10 grantrær dendrometer montert (kontroll). I et annet oppsett ble 12 dendrometre plassert på omtrent like store gran og bjørk som vokste nær hverandre. Jeg omtaler dette oppsettet heretter som «gran-bjørk par». Disse 12 trærne sto i en mer variert del av bestandet og var dermed interessante å sammenligne med de i tynningsforsøket.

2.3 Feltregistreringer

2.3.1 Registrering av knopp utvikling

Våren 2024 gjorde jeg ukentlige målinger av knopp utvikling ved hjelp av kikkert, fra 21. april til 1. juni på alle 32 dendrometertrær. Jeg registrerte knopp utvikling for gran i henhold til en forenklet versjon av Krutzsch' indeks (Krutzsch, 1973). Knopp utviklingen i gran ble kategorisert i følgende faser (Figur 2); 1: oppsvulmet knopp (fase 1 og 2 i Krutzsch index), 2: oppsvulmet knopp med grønn tupp (fase 3 i Krutzsch index), 3: nålene spres mer og ligner en kompakt børste (fase 4 og 5 i Krutzsch index) og 4: nåler er utstrakte og ligner en fyldig børste med spredte nåler (fase 6, 7 og 8 i Krutzsch index). Knopp utviklingen i bjørk ble registrert i henhold til fire faser definert av Fu et al. (2012) (Figur 3); 1: lukket knopp, 2: knopp med blad stikkende ut (knoppsprett), 3: blad splittes fra knoppaksen men ingen synlig bladstilk og 4: minst en synlig bladstilk og utfoldet blad. Fase 2 ble definert som knoppsprett for både gran og bjørk (Fu et al., 2012; Krutzsch, 1973). Jeg registrerte knopp stadium fra sør- og nordsiden av hvert tre, og i hovedsak på de nederste greinene. I tilfeller hvor de nederste greinene var i skyggen og vanskelig å fastslå utviklingsfase på, ble greiner fra midtre del av treet benyttet. Knopp utvikling varierte rundt trærne, og jeg registrerte alltid de knoppene som hadde kommet lengst i utviklingen.



Figur 2: Knoppstadium 1, 2, 3 og 4 i gran, basert på en forenklet versjon av Krutzsch'indeks (Krutzsch, 1973). Knoppstadium 2 er knoppsprett.



Figur 3: Knoppstadium 1, 2, 3 og 4 i bjørk, i henhold til de fire fasene definert av Fu et al. (2012). Knoppstadium 2 er knoppsprett.

2.3.2 Registrering av radiell tilvekst

Radiell tilvekst ble målt med punktdendrometre (Tomst, Brno, Tsjekkia) på de 32 trærne (Vedlegg 1) med μm (mikrometer) oppløsning og registrering hvert 10. minutt.

Dendrometerne (Figur 4) er festet på nordsiden av stammen i en høyde på rundt 1.3 meter, og registrerer lufttemperatur i tillegg til krymping og svelling i stammen. Hydrologiske prosesser i treet kan medføre reversibel krymping og svelling, samtidig kan dendrometerne måle den irreversible endringen som forekommer ved produksjon av nye vedceller, og produksjonen og sammenbruddet av silvev- og barkceller. Jeg benyttet programvaren Lolly (Lolly software, Tomst) i kombinasjon med en adapter (TMD adapter, Tomst) for å laste ned dendrometerdata fra trærne.



Figur 4: Punktdendrometer (Tomst, Brno, Tjekkia) som måler radiell vekst.

2.3.3 Mikroborprøver

For å finne tidspunkt for start av den radielle veksten i veden benyttet jeg mikroborprøver (Prislan et al., 2022) fra et utvalg på fem dendrometertrær av gran (Vedlegg 1). Ettersom den påfølgende fremstillingen og mikroskoperingen av vedprøver er svært tidkrevende, kunne jeg ikke ta prøver fra alle trær. Prislan et al. (2022) foreslo fire til ti trær som et representativt utvalg fra et bestand. Jeg tok ukentlige prøver i perioden 4. mai til 26. mai. Tre av prøvetrærne var en del av gran-bjork parene, mens de to andre var en del av tynningsoppsettet.

Jeg benyttet et Trephor-bor (Trephor 16 mm, Costruzioni meccaniche carabin carlo) for å ta ut mikroborprøver fra hvert prøvetre. I felt hamret jeg boret inn i nordsiden av stammen ved brysthøyde (1.3 m), og tok to prøver med 5-10 cm mellomrom. Etter hvert som det ble mangel på arealer på stammen hvor prøver kunne tas, måtte jeg ta prøver under eller over brysthøyden. Jeg unngikk konsekvent å inkludere deler av stammen med kvist, utvekster, mekaniske skader og andre vekstfenomen som kunne føre til avvik. For å ikke skade kambium ble en hammer med skumkappe benyttet. Etter boring trakk jeg ut verktøyet fra stammen, dyttet en metallpinne inn i røret, løftet prøven ut av røret på Trephorboret med en pinsett og over i et prøverør. Prøvene inneholdt minst de to siste årringene, kambium og det indre silvevet. De ble lagt i Eppendorf prøverør med 70% etanol, og oppbevart i kjøleskap frem til videre prosessering av prøvene.

2.4 Analyse

2.4.1 Produksjon av mikroskopiprøver

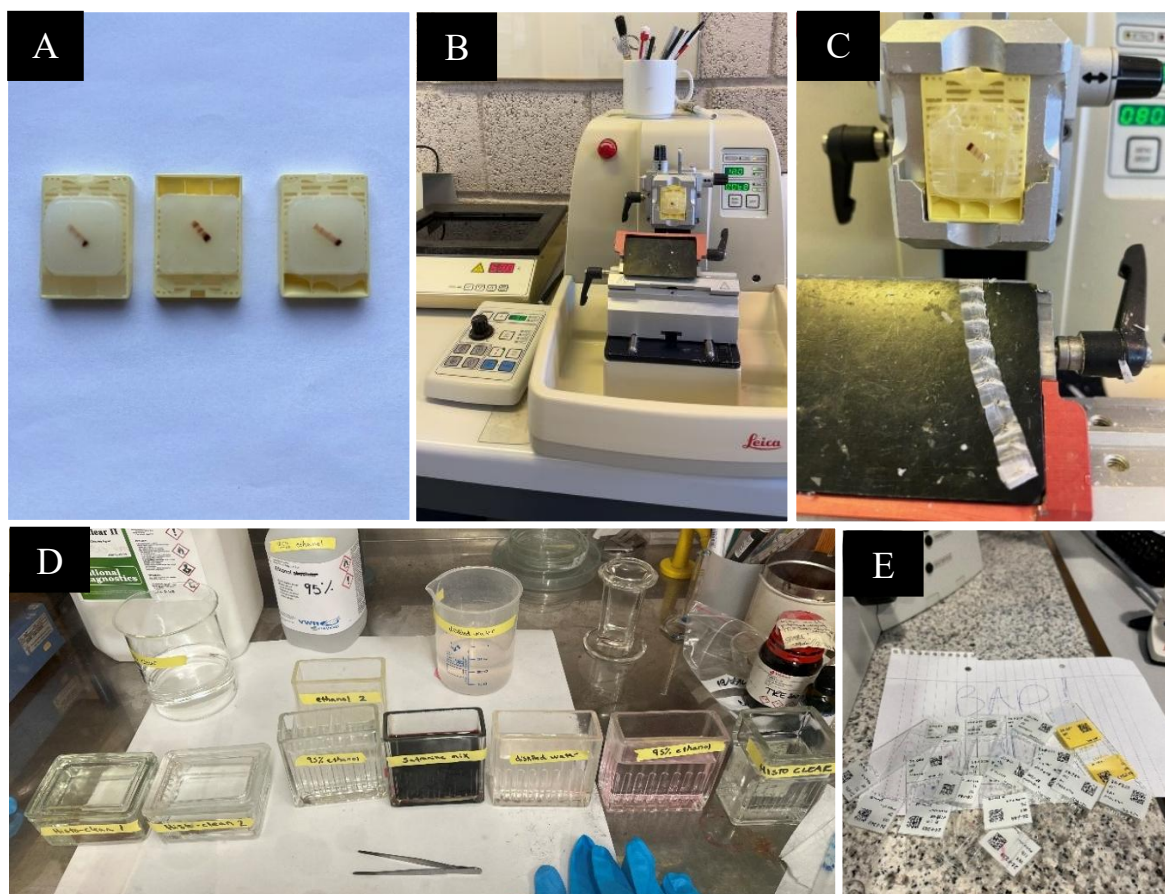
For å kunne observere oppstarten av radiell vekst, måtte mikroboprøvene fremstilles som mikroskopiprøver (Prislan et al., 2022). Planen var at jeg skulle prosessere prøvene selv på Veterinærinstituttet etter gjennomført opplæring på laboratorium høsten 2024, men mangel på ansatte og lange ventelister medførte at det ikke var mulig. I stedet ble prøvene prosessert av Mari Katharina Aas Ådland (overingeniør ved Veterinærinstituttet). Hun skrev ut kassetter markert med uke- og trenummer i en 3D-printer, og kjernene ble plassert i kassetten før oppbevaring i begerglass med 70% etanol. Begerglassene ble så plassert i en kurv i en vevsprosessor, for å dehydrere prøvene i ulike konsentrasjoner av etanol, fra 70% til 100% etanol. Ettersom etanol og parafin voks ikke blander seg, ble xylen deretter brukt i infiltrering av vevet, for å erstatte etanol. Siste steg i prosessen var å legge prøvene i parafinvoks ved 60 °C, som infiltrerte vevet. Når parafinen var rundt 20 °C var den fast og parafinblokkene klare.

De 64 parafinblokkene (Figur 5 A) ble deretter videre prosessert på The imaging center, NMBU, hovedsakelig etter metoden beskrevet av Prislan et al. (2022). Under mikroskopering viste det seg at den første runden med prøver inneholdt brudd og folder av vev, og dermed var bildene dessverre ubrukelige.

Det er et kjent fenomen at det er vanskelig å produsere tynne vevsprøver av ved uten defekter, ved kutting av vev må knivbladet gjennom celler med både tykke og tynne cellevegger og ofte bryter prøven i kambiumsonen (Balzano et al., 2022). Noen teorier bak de ødelagte prøvene er bruken av selvklebende objektglass, problemer ved mikrotomering av hardt vev og mekaniske feil ved prøvetaking. Det kan hende at det klebrige midlet på objektglasset medfører rifter i vevet, ved at deler av vevet sitter fast i glasset og resterende som fortsatt er i vannbadet rives lettere av når tyngden fra vannet drar med seg vev.

I det andre forsøket på å fremstille mikroskopiprøver, ble de fire første ukene av parafinblokker sendt til Veterinærinstituttet like etter jul. Når vi fikk disse prøvene tilbake i februar viste det seg at kun fem av prøvene kunne analyseres, resten ble kastet (Figur 5 E). I siste forsøk på å samle data på vekststarten lagde vi ikke-permanente mikroskopiprøver som resulterte i lesbare bilder. Hovedforskjellen mellom denne produksjonen og den gjennomført tidligere (Figur 5 D) var en enklere farging av vev.

Vi benyttet først et knivblad for å fjerne overflødig parafin rundt prøvene, før parafinblokkene ble trimmet i en roterende mikrotom (Leica HistoCore Autocut, Figur 5 B) til overflaten var jevn og vevet var eksponert. Prøvene ble deretter satt i et begerglass med vann i kjøleskapet i rundt to timer, for å mykne vevet. Videre ble parafinbånd (Figur 5 C) produsert i en mikrotom, i tykkelsen mellom 5 μm og 10 μm . Vevet hadde en tendens til å bli ødelagt i dette steget, selv om knivbladet ble byttet ut og det ble brukt ulike deler av knivbladet. Under mikrotomering brukte vi forslagene publisert i en artikkel (Balzano et al., 2022) for å redusere ødelagte mikroskopiprøver. For å strekke båndene ble de først lagt i kaldt vann noen sekunder og fisket ut med selvklebende objektglass, før båndene ble transportert til 40 °C varmt vann. Når prøven så flat ut ble den fanget med det samme objektglasset, merket med uke- og trenummer. På kanten av vannbadet ble de liggende og tørke noen minutter før de ble tørket i en ovn på 60 °C i rundt 10 minutter. Etter tørking ble noen dråper med astrablue løsning (2 ml astrablue og 1 ml destillert vann) påført vev. Deretter ble papir brukt for å trekke til seg overflødig løsning, og noen dråper vann ble påført før dekkglass ble montert. Ikke-permanente prøver måtte mikroskoperes raskt på grunn av holdbarheten, og derfor ble de produsert enkeltvis. Denne prosessen resulterte i omtrent 20 bilder fra de første fire ukene av prøvetaking, men dessverre var det ikke lesbare bilder for alle fem trær i alle ukene.



Figur 5: A: Parafinblokker med mikrobørprøver. B: Leica mikrotom og temperaturregulert vannbad (til venstre i bildet). C: Parafinbånd med vev, kuttet av en mikrotom. D: Det første oppsett for farging av vev ifølge Prislán et al. (2022). Prøvene ble plassert i de ulike løsningene fra venstre til høyre. Løsninger; Histo-Clear, 95% etanol, Safranin løsning og destillert vann. E: Noen av de dårlige prøvene som ble kastet ut.

2.4.2 Mikroskopi

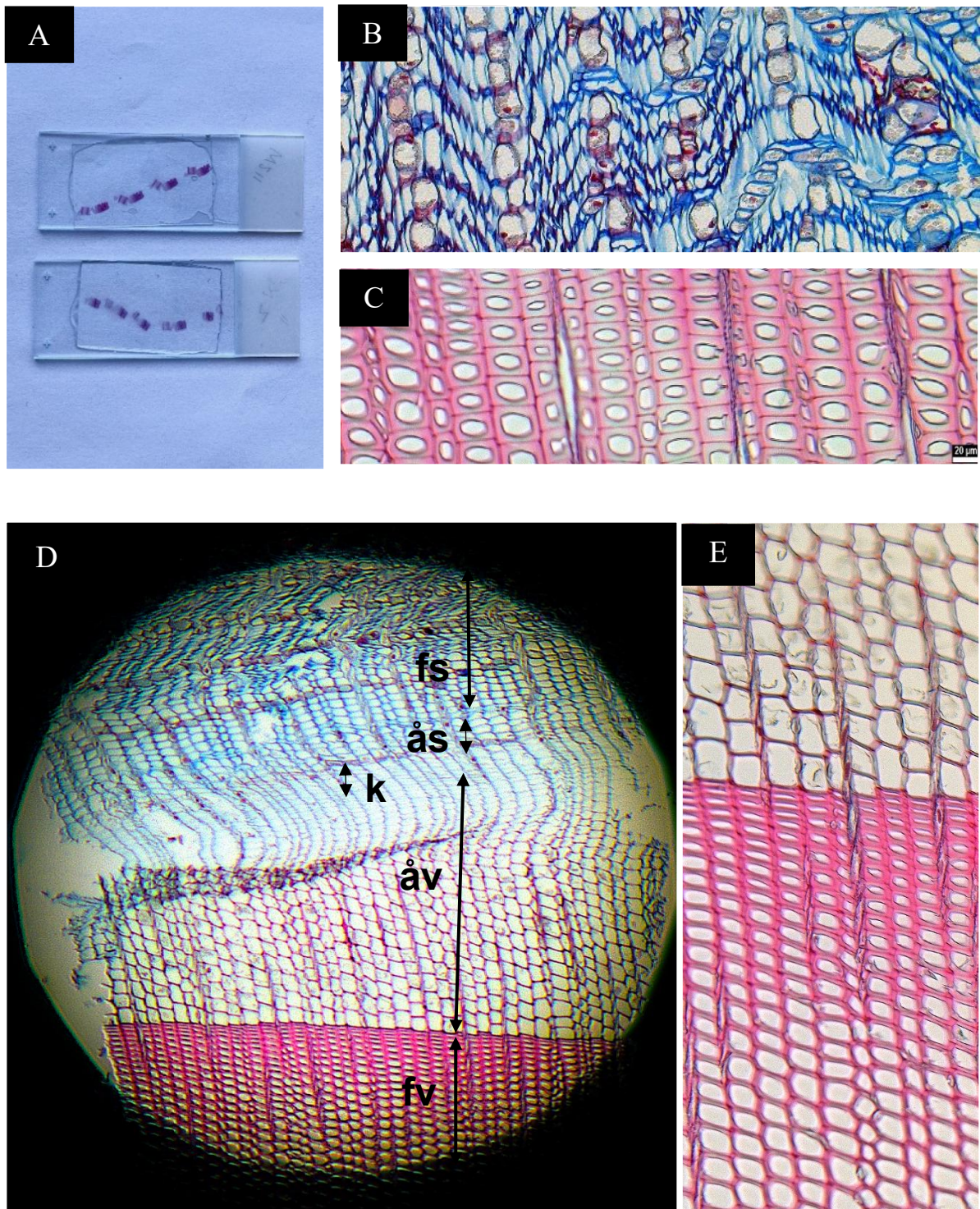
Vevsprøvene (Figur 6 A) ble analysert i et mikroskop (Leica DM6B Light microscope) koblet til LAS X programvaren (LAS X, Leica). Programvaren visualiserte mikroskopiprøvene på dataskjermen og ble benyttet til redigering av bildene. Alt av mikroskopi ble gjennomført på The imaging center, NMBU. En del prøver manglet intakt vev og måtte forkastes. Jeg satt til slutt igjen med prøver fra to trær fra første og andre uke, tre trær fra uke tre og ett tre fra uke fire.

Fargestoffet astrablue fargela kambium og silvev blått (Figur 6 D), mens safranin farget modne vedceller rosa (Figur 6 D). Safranin farger lignifiserte celler røde, men under mikroskopering fant jeg at fargingen varierte mye, og at celleutseende var en bedre indikator på veddanningsfase. Videre ble prøvene observert under en 10x forstørrelseslinse, for å

vurdere vekstfasen og antall celler i ulike faser. I denne forstørrelsen så jeg cellene på et høyere detaljnivå, og kunne se blant annet silvevet (Figur 6 B) og trakeider i ferdig utviklet ved (Figur 6 C). Kambiumsonen var gjenkjennelig under mikroskopet som sammentrykte celler, mens mengden kambiumceller varierte mellom åtte og 12 celler per radielle fil. Hvis veksten ikke hadde startet, lå kambium mellom tidligere års tynne silvrørselementer og tidligere års tykke vedceller.

Hvis veksten hadde startet (Figur 6 D), hadde kambium produsert nytt silvev (ås i Figur 6 D) utover mot barken og nye vedceller innover (åv i Figur 6 D) ved celledeling. Dette ble tydelig illustrert ved nye celler mellom kambiumsonen og ferdig ved. Vekststart ble definert som tidspunktet hvor den første forstørrede cellen ble observert. I celledelingen produseres en ny veddattercelle, og dette betegnes som den første fasen av veddannelsen. I fase to vil den nye cellen forstørres, før den i tredje fase avsetter hemicellulose og cellulose som er fundamentet for sekundærveggen. Forstørrede celler (øverst i Figur 6 E) er større enn kambiumceller, og derfor kom denne fasen tydelig frem i mikroskopet, i motsetning til celledelingen, som var vanskeligere å observere. I fase fire, fortykkelse av celleveggen, lignifiseres primær- og sekundær cellevegg. Fortykkelse av celler indikerer starten på effektiv karbonlagring for trærne (Rathgeber et al., 2022). Siste fase av vedcelleutvikling er celledød, som er nødvendig for at cellen skal ha sin funksjon i veden. Etter celledød betegnes celler som trakeider, og regnes som ferdig utviklet.

For hver av ukene ble fase av veddannelsen fastsatt, og for hvert bilde ble antall radiærceller i kambiumsonen og forstørrelsesfasen notert. Veksten for sesongen ble antatt å ha startet når minst en forstørret celle kunne observeres (Rossi et al., 2006).



Figur 6: A: Mikroskopiprøver. B: Silvev observert ved hjelp av lysfeltmikroskopi (10x forstørrelse). C: Modne trakeider (vedceller) (10x forstørrelse). D: Fjordårets silvev (fs), årets silvev (ås), kambiumsonen (k), årets vedceller i utvikling (åv) og fjordårets vedceller (fv) (2.5 x forstørrelse). E: Celler i forstørrelsesfasen (celler med tynne vegger) og forrige års vedceller (tykke celler) (10x forstørrelse).

2.5 Statistiske analyser

Alle statistiske analyser ble gjort i R (The R Development Core Team 2024), hvor knopp utvikling (Vedlegg 3) og dendrometerdata (Vedlegg 4) ble analysert i hvert sitt R script. For alle analyser ble statistisk signifikans definert som $p < 0.05$.

2.5.1 Knopp utvikling

Effekten av gruppering og treslag på trærnes knopp utvikling ble testet ved hjelp av Kruskal-Wallis test (Vedlegg 3) fra *rstatix*-pakken (Kassambara, 2023). Siden knopp utvikling ble registrert som kategoriske data (knopp stadium) er denne testen passende, ettersom ordinale data er en forutsetning. Kruskal-Wallis testen forutsetter ikke normalfordelte observasjoner, og sammenligner uavhengige grupper. Effekt av gruppering (par, kontroll og tynning) på knopp utvikling ble utført kun for grantrær, ettersom bjørk kun var en del av et oppsett (gran-bjørk par). Testen sammenlignet dagnummer på tvers gruppene, innen hver av de fire knopp stadiene. Effekten av treslag på knopp utvikling ble gjennomført på tvers av tre knopp stadier, i stedet for fire. Knopp stadium tre ble ikke vurdert ettersom bjørk ikke hadde verdier i denne fasen, siden registreringsintervallet på syv dager ikke fanget opp den raske knopp utviklingen til bjørk.

Dagnummer for observasjon av knopp stadium to, tre og fire ble predikert ved hjelp av en generalisert additiv modell (GAM) i R (Vedlegg 3). Funksjonen *gam()* stammer fra *mgcv*-pakken (Wood, 2011). Modellen tillater et fleksibelt forhold mellom respons- og prediksjonsvariabelen, i kontrast til generalisert lineær modell som forutsetter et lineært forhold. En av forutsetningene under tilpasning av modellen var at responsvariabelen dagnummer følger en normalfordeling. Konfidensintervall tilknyttet usikkerhet i predikert dagnummer ble inkludert.

2.5.2 Dendrometerdata

Dendrometre fanger opp både irreversible og reversible radielle endringer. Irreversible radielle endringer kan være produksjonen av vedceller, altså vekst. Reversible radielle endringer (krymping og svelling) kan forårsakes av vann, men det kan også oppstå når silvev- og barkceller produseres og kollapser. Rådata fra dendrometerne krever derfor en foranalyse før en kan få ut den permanente, radielle veksten. Grunnet defekter i dendrometerne ble to av trærne ekskludert.

Data for hvert av de gjenværende 30 trærnes ble korrigert enkeltvis (Vedlegg 4) ved hjelp av `treenetproc` (Haeni et al., 2020), som renser, prosesserer og visualiserer dataene. I grafene for 2024 ble vekststart satt manuelt basert på hvor veksten var flatest i perioden april-mai. Helst skulle det være lik vekst noen dager før og etter den selekterte datoen for vekststart. Total vekst ble utregnet ved å finne den maksimale verdien av akkumulert vekst for hvert tre. Daglig vekst var dagens vekst verdi minus forrige dags vekst. For å vurdere starten og slutten på veksten for 2024 ble terskelmetoden benyttet, der vekststart ansees som tidspunktet når treet har oppnådd 5% av sin totale vekst for året. Vekstslutt blir definert som tidspunktet hvor 95% av den årlige veksten er oppfylt. En terskel på 25% og 50% av årlig vekst ble brukt for å vurdere vekstrytmen blant treslag, tynnet og utynnet del av bestandet.

Tynningseffekten og treslagseffekten på vekst for 2024 ble testet med ANOVA (Vedlegg 4). Den deler variasjonen i dataene opp i to deler; variasjonen som kan forklares av modellen (mellom gruppene) og den uforklarte variasjonen som er innen grupper (residualer).

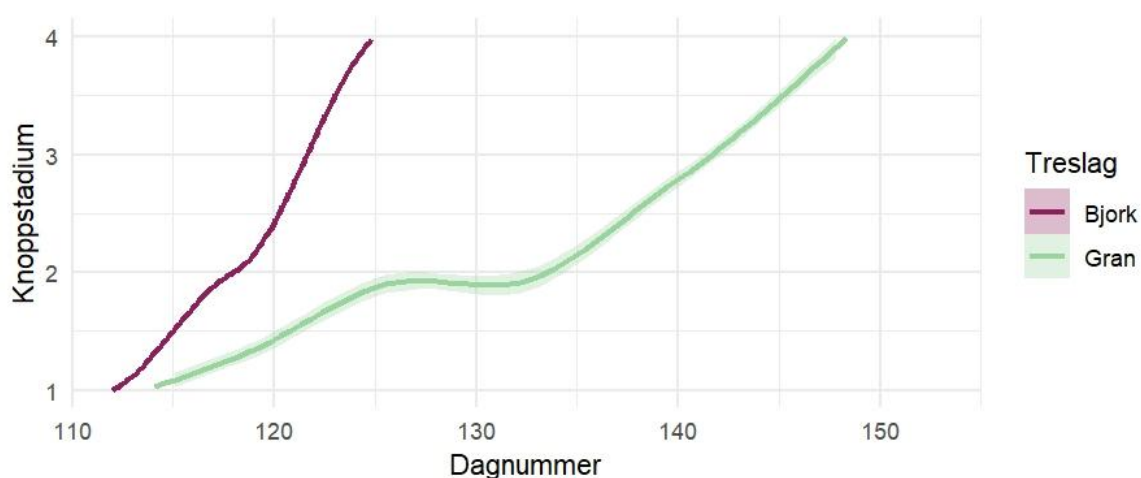
Sammenligningen av veksten mellom bjørk og gran ble basert på dataene fra gran-bjørk parene. For å vurdere om tynning hadde en effekt på grantrærnes vekst ble den gjennomsnittlig veksten sammenlignet med kontrolltrærne.

3 Resultater

3.1 Primærvekst

3.1.1 Knopp utvikling

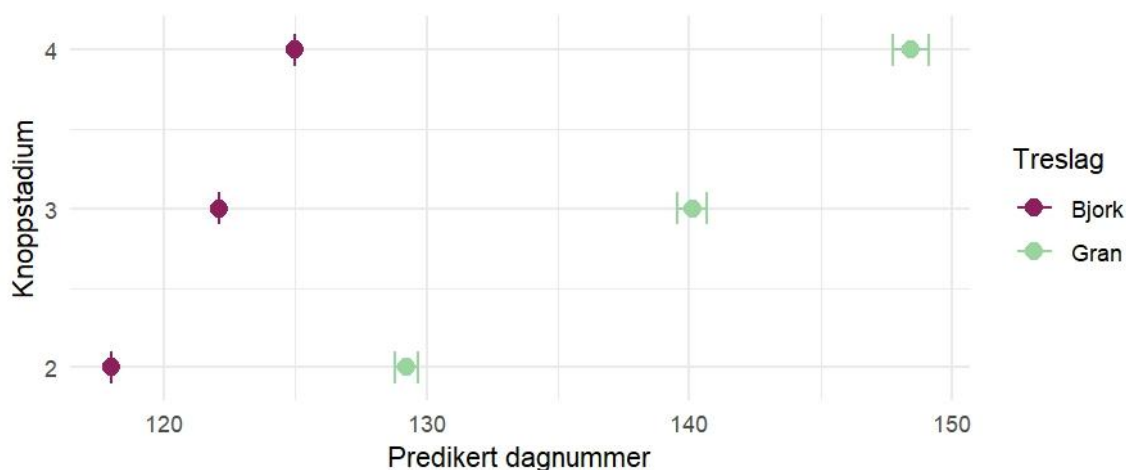
Første registreringsdag 21. april (dag 112) observerte jeg brune lukkede knopper (stadium 1) i begge treslag, på alle 32 trær. En uke seinere (dag 118) hadde bjørk knoppsprett (stadium 2), mens gran fortsatt var i stadium 1. Den tredje uken (dag 125) hadde knoppene på alle grantrær, bortsett fra ett (tre 15), tydelig grønn tupp og knoppsprett (stadium 2) hadde startet. Ved dette tidspunktet var bladstilk og utfoldet blad synlig i bjørketrærne (stadium 4). 12. mai (dag 133) var knopp utviklingen uforandret for begge treslagene. Knopp stadium 3, når skuddet ser ut som en kompakt malebørste, var nådd 19. mai (dag 140) for alle grantrær bortsett fra to (tre 13 og 15). Skuddene hadde mer spredde nåler 27. mai (dag 148), og alle grantrær bortsett fra tre 13 var i siste knopp stadium. Dette siste treet nådde stadium 4 den 1. juni (dag 153).



Figur 7: Knopp stadium (y-akse) for bjørk (lilla) og gran (grønn) frem til de nådde stadium fire. Knoppsprett er stadium to for begge arter. Loess funksjonen resulterer i at grafene fleksibelt tilpasses verdiene til enkelttrærne, istedenfor å kun vise punktverdier for trærne. Sløret rundt grafen til gran representerer 95% konfidensintervallet. Bjørketrærne var synkroniserte under hele observasjonsperioden og har dermed ikke konfidensintervall.

Det var ikke statistiske bevis for effekt av gruppe (tynning, kontroll og par) på knopp stadium 1 ($P=0.815$), 2 ($P=0.792$), 3 ($P=0.411$) eller 4 ($P=0.449$) i gran.

Bjørk hadde en raskere knopp utvikling (nådde de ulike knoppstadiene tidligere) enn gran ($P=0.018$ for knoppstadium 1, $P<0.001$ for stadiene 2 og 4). Bjørk startet knopp utviklingen to dager tidligere og oppnådde siste knoppstadium 23 dager før gran (Figur 7). Grantrærne brukte i gjennomsnitt 34 dager på å gjennomføre de 4 knoppstadiene, og bjørketrærne brukte 13 dager. Like før gran nådde knoppsprett (stadium 2), var det en periode på sju dager hvor knopp utviklingen sto stille (flat kurve). Bjørk hadde ingen tilsvarende utflatingsperiode.



Figur 8: Predikert dagnummer (x-akse) for når bjørk (lilla) og gran (grønn) ville vært i knoppstadiene 2,3 og 4 (y-akse). Prediksjonsmodellen inkluderer standardavvik (horisontale linjer) fra gjennomsnittlig predikert dagnummer.

Prediksjoner kan gi nyttig informasjon om forventet dato for de ulike knoppstadiene, og ettersom stadium 3 ikke ble observert for bjørk kan prediksjonsmodellen fortelle når dette stadiet kunne forventes å inntre. Den generelle additive modellen predikerte at grantrærne ville oppnådd knoppsprett (knoppstadium 2) rundt dag 129, som var 12 dager etter prediksjonen for bjørk (Figur 8). Knoppstadium 3 var forventet å inntreffe ved dag 140 for gran og dag 122 for bjørk. Predikert dato for siste knoppstadium varierte med 23 dager mellom treslagene, og treslagene hadde økende forskjeller i datoer ved senere knoppstadium.

3.2 Sekundærvækst

3.2.1 Dendrometerdata

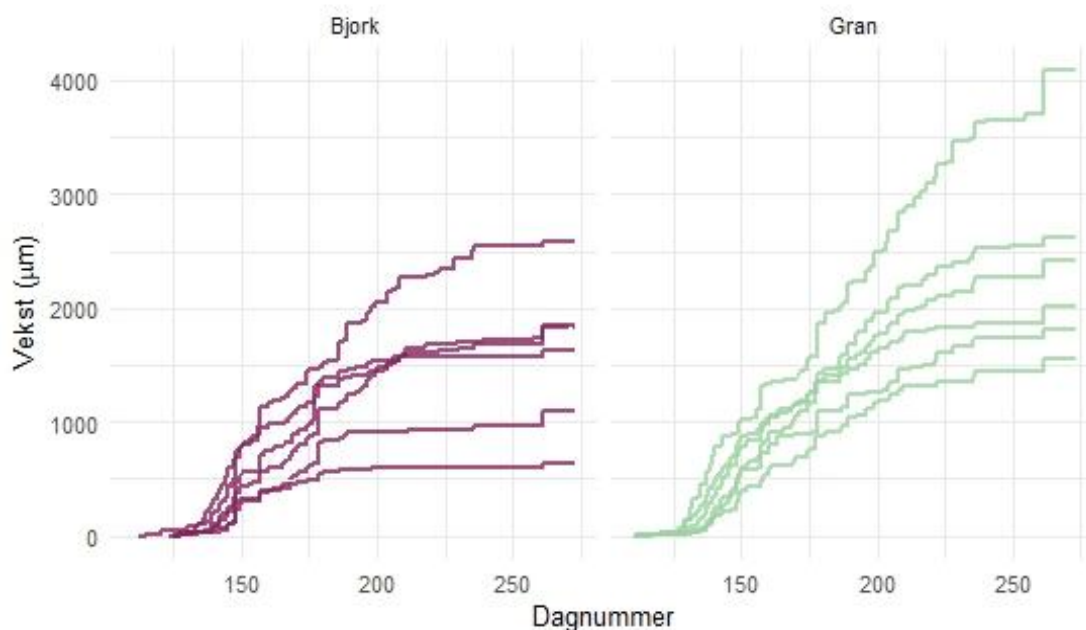
Sammenligning av treslag

Det var ingen statistisk signifikant forskjell i gjennomsnittlig radiell årlig tilvekst mellom gran- og bjørketrærne i parene (Tabell 1). Treslagene viste imidlertid ulikheter gjennom vekstsesongen (Figur 9). Ifølge dendrometermålingene startet veksten mellom dagnummer 125 (4. mai) og 145 (24. mai) for bjørk, mens veksten startet mellom dagnummer 125 (4. mai) og 135 (14. mai) for gran. Bjørketrærne viste altså større variasjon i vekststart enn grantrærne. De fleste bjørketrærne hadde en tidligere og lengre utflating av veksten enn grantrærne, mens de fleste grantrærne hadde en jevnere vekst gjennom sesongen.

Tabell 1: Resultat fra ANOVA testen av effekten av treslag på den gjennomsnittlige veksten for gran-bjørk parene. Treslagsraden representerer variasjonen i vekst mellom treslagene, og residualraden representerer variasjon som ikke kan forklares av modellen og er variasjon innen treslagene. Sum sq er den totale variasjonen innen/mellom gruppene, og mean sq er den gjennomsnittlige variasjonen mellom/innen gruppenne.

	df	Sum sq	Mean sq	F-verdi	P-verdi
Treslag	1	1,993,490	1,993,490.1	3.101	0.109
Residualer	10	6,428,115	642,811.5		

Det var mer variasjon i gjennomsnittlig tilvekst mellom trær innenfor samme treslag enn det var mellom gran og bjørk (Sum sq for residualer større enn sum sq for treslag) (Tabell 1, Figur 9). Gran i par med bjørk hadde en vekst mellom 1.5 og 4.1 mm, mens bjørk hadde en vekst mellom 0.6 og 2.6 mm. Den totale veksten varierte litt mer mellom grantrærne (2.6 mm) enn bjørketrærne (2 mm). Vekstdynamikken blant bjørketrærne varierte gjennom sesongen, men spesielt etter dagnummer 175 (23. juni) ble det større forskjeller i vekst mellom trærne.



Figur 9: Radiell vekst (målt i mikrometer) for vekstsesongen 2024 for bjørk (lilla) og gran (grønn) i par.

Tynningseffekt

Selv om effekten av tynning ikke var en del av min opprinnelige problemstilling, er det interessant å se på hvordan dette kan ha påvirket veksten til trærne og de andre resultatene.

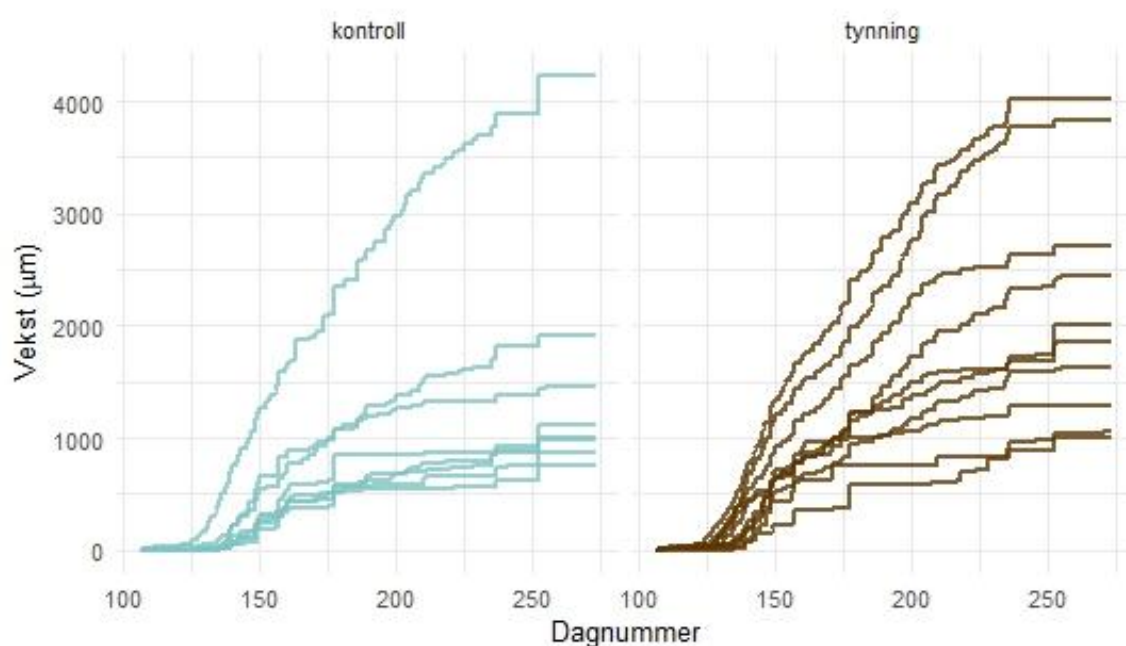
Det var ingen tydelig effekt av tynning på den gjennomsnittlige tilveksten (Tabell 2).

Dendrometermålingene viste også at veksten startet mellom dagnummer 125 (4. mai) og 140 (19. mai) for både den tynnede og den utynnede delen av bestandet (Figur 10). Jeg fant imidlertid ulikheter i vekstrytmen gjennom sesongen: Ved dagnummer 150 (29. mai) hadde åtte av de ti trærne i tynningsfeltet, men kun tre av de åtte kontrolltrærne vokst over 500 µm (0.5 mm). Det ser ut som trærne i tynningsfeltet hadde en raskere vekst i starten av sesongen og flatet ut senere enn kontrolltrærne.

Tabell 2: Resultat fra ANOVA testen av tynningseffekten på den gjennomsnittlige veksten for grantrærne i den tynnede og utynnede delen av bestandet. Tynning/kontroll raden representerer variasjonen i gjennomsnittlig vekst mellom trær i tynningsoppsettet og kontrollen, og residualraden representerer variasjon som ikke kan forklares av modellen og er variasjon innen gruppene (kontroll og tynning). Sum sq er den totale variasjonen innen/mellom gruppene, og mean sq er den gjennomsnittlige variasjonen mellom/innen gruppenne.

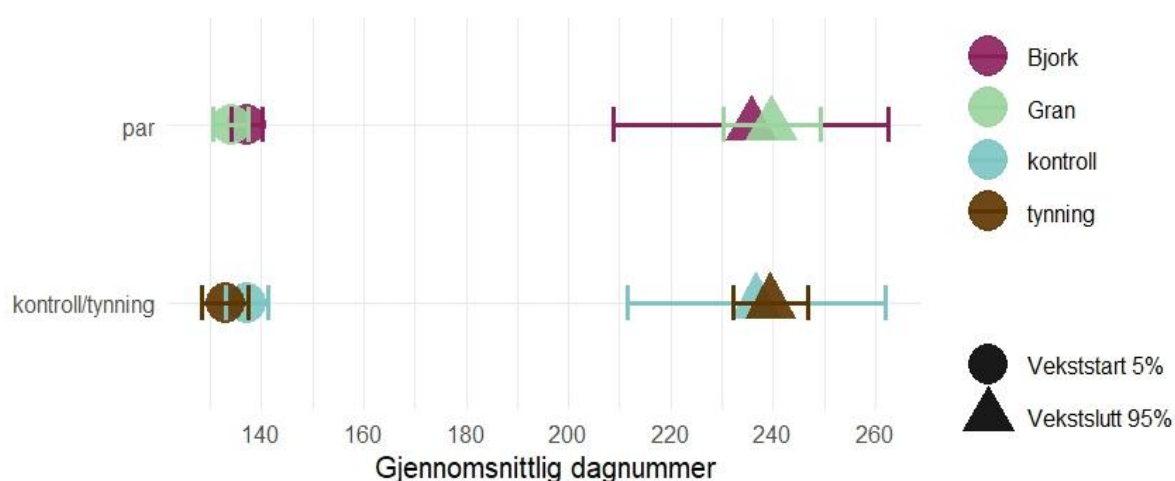
	df	Sum sq	Mean sq	F-verdi	P-verdi
Tynning/kontroll	1	1,855,886	1,855,886	1.506	0.237
Residualer	16	19,668,078	1,229,255		

Det var mer variasjon i vekst mellom trær innenfor samme gruppe (tynning og kontroll) enn det var mellom tynning- og kontrolltrærne (Sum sq for residualer større enn sum sq for Tynning/kontroll) (Tabell 2, Figur 10). Av kontrolltrærne hadde syv av de åtte trærne en tilvekst under 2 mm og det siste treet hadde en tilvekst på 4.3 mm. Blant trærne i tynningsoppsettet hadde åtte av de ti trærne en tilvekst under 2.7 mm og to av trærne hadde en tilvekst nærmere 4 mm. Dette illustrerer variasjonen blant trærne innen tynningsoppsettet og kontrollen.



Figur 10: Radiell vekst (målt i mikrometer) for vekstsesongen 2024 for grantrær i den tynnede (blå) og utynnede (brun) delen av bestandet.

Vekststart og vekstslutt

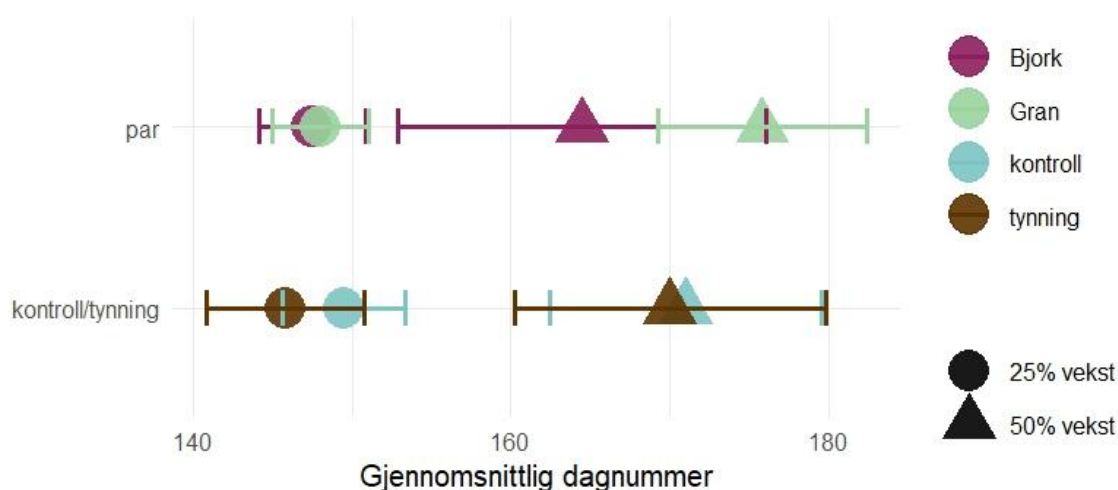


Figur 11: Gjennomsnittlig dagnummer for når grantrærne i den tynnede (brun) og utynnede (blå) delen av bestanden og bjørk (lilla) og gran (grønn) i par nådde 5% (sirkel) og 95% (trekant) av den totale veksten i 2024, som representerer vekststart (5%) og vekstslutt (95%). De horisontale linjene fra punktene representerer standardavvikene fra gjennomsnittet.

Det var ingen sikker statistisk forskjell mellom treslagene i datoen for oppstart ($P=0.121$) av radiell vekst. Ved dag 140 (19. mai) hadde begge treslagene startet veksten (Figur 11). Jeg fant heller ingen forskjell i vekstavslutning mellom treslagene ($P=0.737$), noe som nok skyldes store individuelle forskjeller mellom de enkelte trærne, spesielt hos bjørk (se konfidensintervall i Figur 11).

Selv om statistisk evidens var i grenseland, fant jeg en mulig effekt av tynning på vekststart ($P=0.057$), mens det ikke så ut til å være noen effekt på vekstslutt ($P=0.746$). Ved dag 142 (21. mai) hadde trærne i begge oppsettene startet veksten (Figur 11). Det var store individuelle forskjeller mellom når trærne avsluttet veksten, spesielt blant kontrolltrærne.

Vekstrytme



Figur 12: Gjennomsnittlig dagnummer for når grantrærne i den tynnede (brun) og utynnede (blå) delen av bestandet og bjørk (lilla) og gran (grønn) i par nådde 25% (sirkel) og 50% (trekant) av den totale veksten i 2024. De horisontale linjene fra punktene representerer standardavvikene fra gjennomsnittet.

Tidspunktet for når trærne oppnår 25% og 50% av årlig radiell vekst kan være en indikator på vekstrytme, og er interessant å vurdere i tillegg til vekststart og vekstslutt fordi den indikerer hvordan trærne vokser gjennom sesongen. Det var ingen forskjell mellom treslagene og datoene de nådde 25% ($P=0.791$) og 50% ($P=0.064$) av tilveksten. Bjørketrærne viste store (± 11.6 dager) individuelle forskjeller for når de nådde 50% terskelen (Figur 12), blant grantrærne var det også individuelle forskjeller (± 6.6 dager).

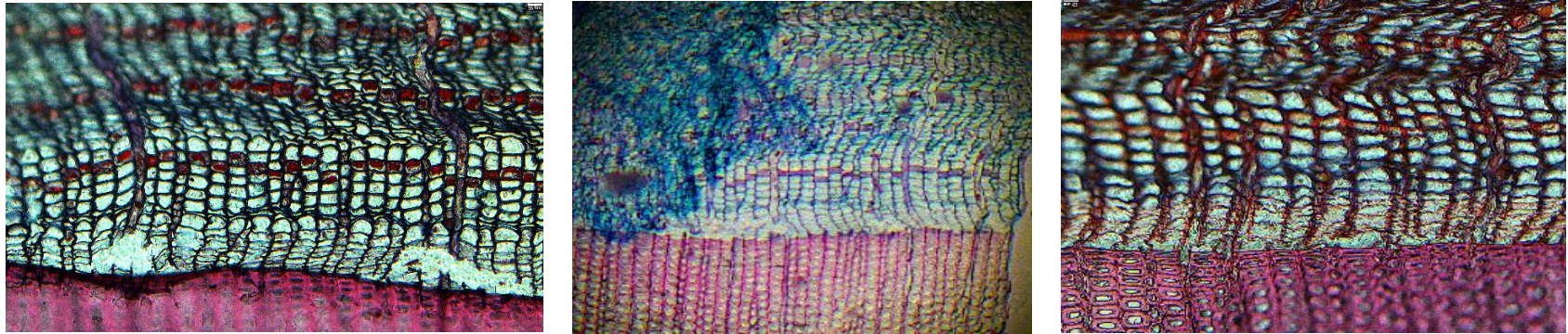
Det var ingen sikre forskjeller i når tynning- og kontrolltrærne oppnådde 25% ($P=0.104$) og 50% ($P=0.823$) av tilveksten. Enkeltrærne i tynningsoppsettet og kontrollen hadde relativt like standardavvik fra gjennomsnittet for både 25% og 50% tilvekst (Figur 12).

3.2.2 Veddannelse

Første prøvetakingsdato, 4. mai, observerte jeg inaktive kambium i mikroborprøvene fra grantrærne. Det vil si at kambiumsonen lå tett opp mot vedcellene fra året før (Figur 13), og jeg observerte rundt åtte kambiumceller per radielle fil. Dette indikerte at sekundærveksten ikke hadde startet. Uken etter (12. mai) var celledelingen i gang, og minst fem nye vedceller var i forstørrelsesfasen (Figur 14). Veddannelsen hadde dermed startet, og trærne hadde gjennomført fase 1 (celledeling) og startet fase 2 (forstørrelse av celler).

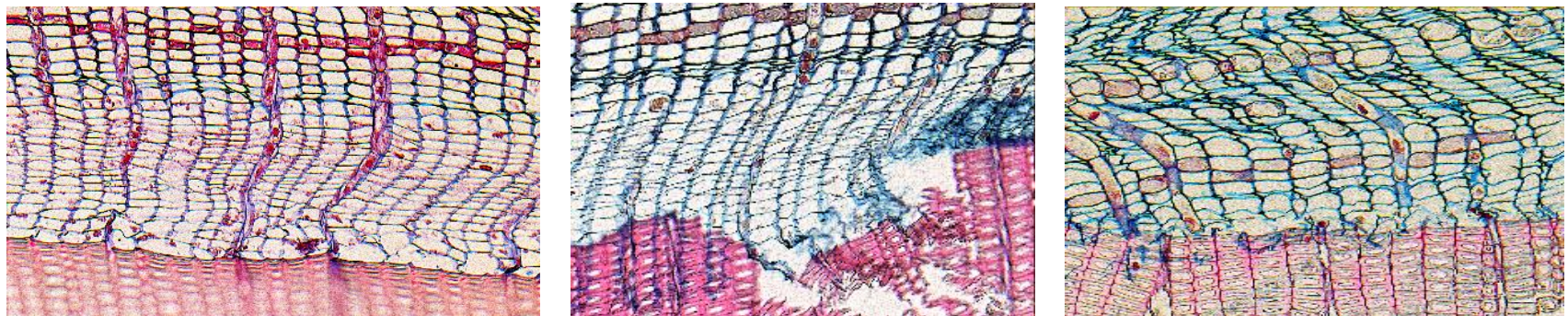
19. mai (Figur 15) var vedcellene fortsatt i forstørrelsesfasen (fase 2), og mellom fem og ti forstørrede celler kunne observeres per radielle fil. Den fjerde uken av prøvetakingen (26.mai) fikk vi kun bilder fra tre nr. 11 (Figur 16), og dette treet hadde rundt 19 forstørrede celler per radielle fil. I slutten av mai hadde dermed trærne kommet til fase 2 av de fem fasene i veddannelsen.

Uke 1



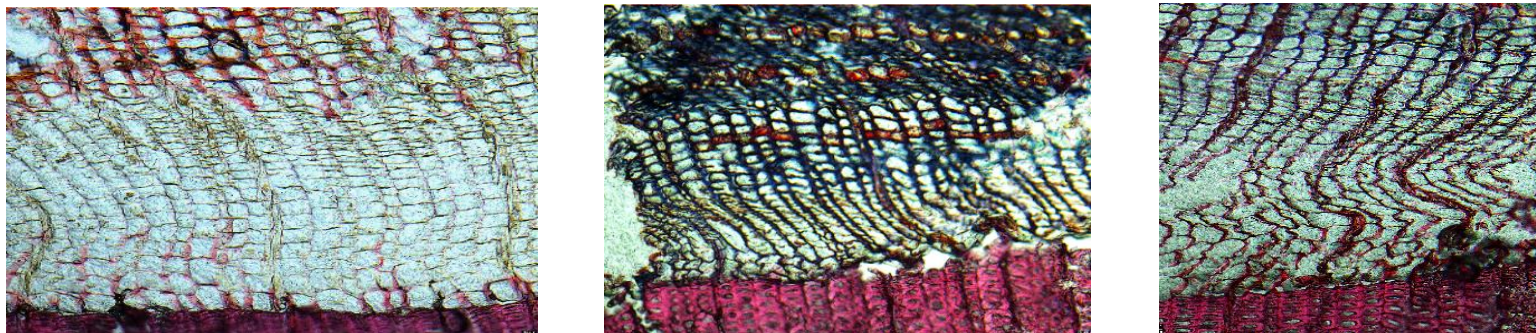
Figur 13: Tre 22 (venstre og midten) og tre 26 (høyre) fra første uken med mikrobjørprøver (4. mai 2024). Kambiumet er de sammenpressede cellene ved de modne vedcellene (rosa celler). De kan observeres som de komprimerte, sorte cellene i bilde til venstre og det er omtrent åtte kambiumceller per radielle fil. Det er ingen tydelige tegn til vekststart ved dette tidspunktet, ettersom det er fravær av celler mellom kambium og modne vedceller.

Uke 2



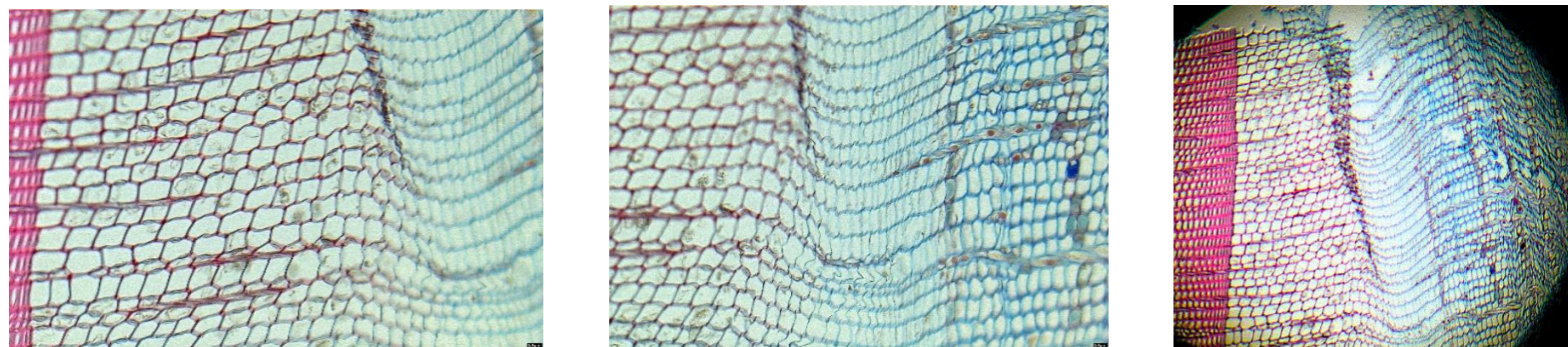
Figur 14: Tre 11 (til venstre), tre 20 (i midten) og tre 24 (til høyre) fra andre uke med mikrobjørprøver (12. Mai 2024). I tre 11 og 20 er det rundt åtte kambiumceller per radielle fil og minst fem nye celler per radielle fil. I tre 11 og 20 kan det se ut som celledeling og forstørrelse har startet, basert på observasjon av nye celler mellom kambium og modne vedceller. Grunnet vevsødeleggelse i tre 20 og 24 er det vanskelig å anslå eksakt antall celler. Det er tydelig at veksten har startet for tre 11 og 20 denne uken i mai 2024.

Uke 3



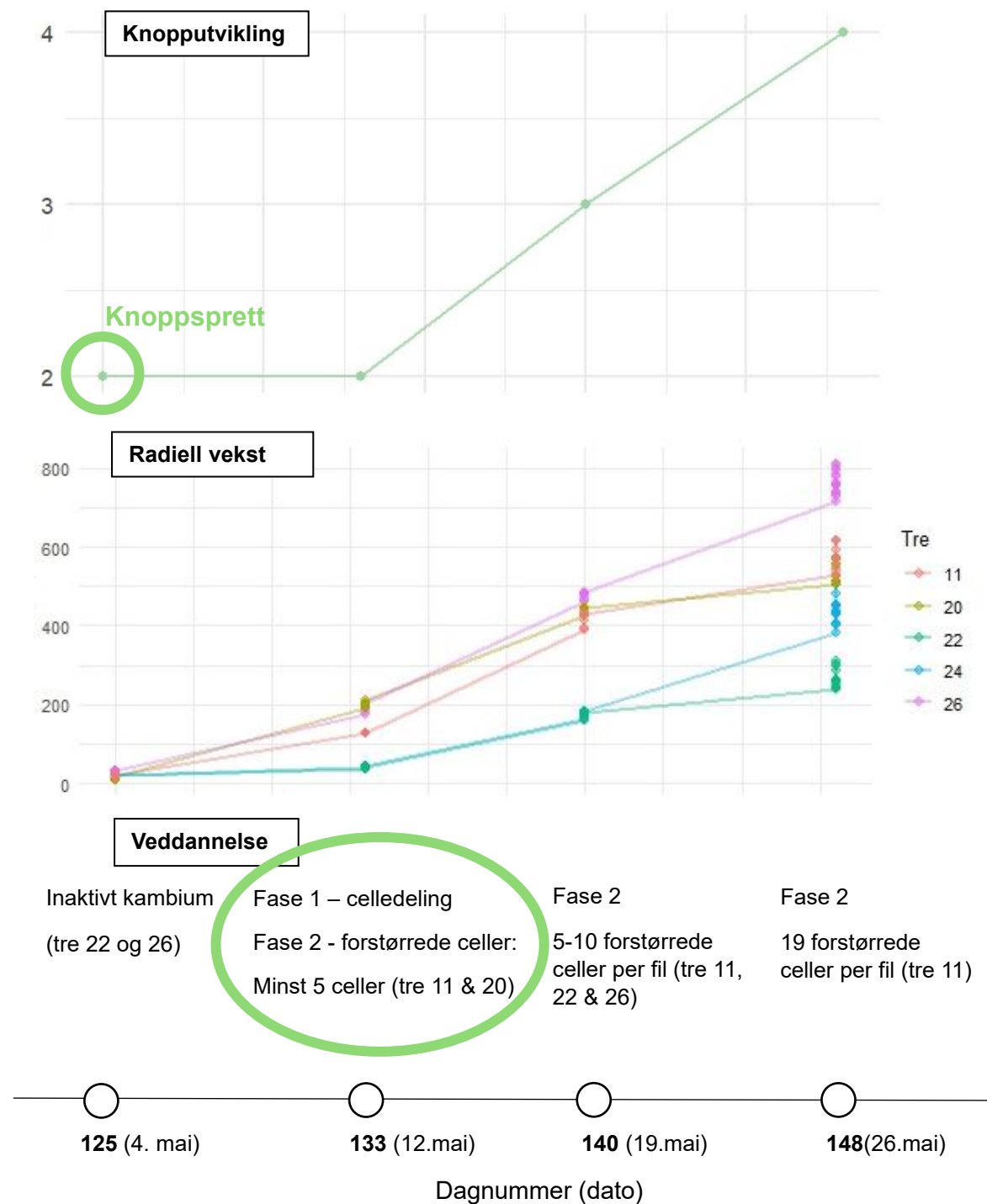
Figur 15: Tre 11 (til venstre), tre 22 (i midten) og tre 26 (til høyre) fra tredje uke med mikrobjørprøver (19. Mai 2024). De nye cellene utvider seg tydelig i tre 11, det er litt vanskeligere å observere i tre 22 og 26. Tre 11 har rundt åtte forstørrede celler per radielle fil, tre 22 har rundt fem og tre 26 har rundt 10. Trærne er fortsatt i forstørrelsesfasen ved dette tidspunktet, dette er fasen etter celledeling og før de får sekundær cellevegg.

Uke 4



Figur 16: Tre 11 fra fjerde uke med mikrobjørprøver (26. Mai 2024), grunnet vevs ødeleggelser var kun tre 11 mulig å analysere. Legg merke til at vedceller er til venstre i bildene og silvev til høyre. Rundt 19 forstørrede celler er det per fil i tre 11 ved dette tidspunktet. Bilde til høyre viser kambium (blå, sammentrykte celler) og til venstre for disse ligger de forstørrede cellene produsert mai 2024 (rosa, tynne celler). Treet er i forstørrelsesfasen fortsatt og det er ingen tydelige tegn til lignifisering.

3.3 Forhold mellom primær- og sekundærvækst i gran



Figur 17: Sammenstilling av knopp utvikling, radiell vekst og veddannelse for de fem grantrærne som det ble tatt mikrobørprøver fra. Knoppstadium 2 representerer knoppsprett. De grønne sirklene representerer starten av knoppsprett og veddannelse.

4. mai hadde primærveksten (knoppsprett) startet i grantrærne. På denne datoen viste mikroskopibildene ingen tegn til vekststart (Figur 17), mens dendrometerne viste vekststart for de fem mikrobortrærne mellom 6. og 17. mai (Vedlegg 2), basert på 5% terskelen.

12. mai var grantrærne fortsatt i knoppstadium 2 og primærveksten hadde pågått i en uke. Celledeling og forstørrede celler kom da frem på mikroskopibildene, og årets sekundærvekst var i gang (Figur 17). Dendrometerdataene viste at tre av trærne (tre nr. 11, 20 og 26) hadde startet veksten (nådd 5% terskelen) mellom 6. og 12. mai (Vedlegg 2). Sekundærveksten startet altså noen dager etter knoppsprett, basert på både mikroskopibildene og dendrometerdataene, men det er en del variasjon mellom enkelttrær.

19. mai ble knoppstadium 3 observert i grantrærne, og primærveksten hadde pågått i to uker. Mikroskopibildene viste mellom fem og ti forstørrede celler per radielle fil, og trærne var i fase 2 av veddannelse (Figur 17). Dendrometerdataene indikerte at de to siste trærne (tre nr. 22 og 24) hadde startet veksten i løpet av uken (Vedlegg 2). Ved dette tidspunkt hadde primærveksten startet for 15 dager siden, veddannelsen hadde startet i noen trær for syv dager siden og dendrometerne viste at alle fem trærne hadde startet veksten (5% av total vekst) før denne dagen.

Dette tyder på at knoppsprett startet litt *før* produksjonen av nye vedceller hos grantrærne, men også at sekundærveksten startet før skuddene var fullt utviklet (Figur 17).

4 Diskusjon

Klimaendringene skjer raskere enn tidligere (Fischlin et al., 2007), og det er knyttet mye usikkerhet til hvordan dette vil påvirke skogens vekst. Det er derfor essensielt å studere hvordan klimafaktorer påvirker vekstdynamikken for å blant annet kunne forutsi karbonlagringsevnen i fremtidsskogen. For å øke kunnskapsnivået på vekstdynamikk kan blant annet forholdet mellom primær- og sekundærvekst utforskes.

Jeg fant at primærveksten startet før sekundærveksten i bjørk, mens i gran var prosessene mer synkronisert. Knopp utviklingen var raskere og knoppsprett oppsto tidligere i bjørk enn i gran, som er å forvente for et pionértreslag sammenlignet med et sen-suksessjonstreslag. Dendrometermålinger har potensiale til å erstatte mikrobjørprøver for å anslå vekststart, men jeg observerte betydelig forskjell mellom metodene for å definere vekststart (5% og 0 μm).

4.1 Primær- og sekundærvekst i gran

Jeg kunne ikke bekrefte hypotesen om at sekundærvekst starter før primærvekst i gran. Knoppsprett forekom omtrent samtidig med radiell vekst. Resultatene tydet på at primærveksten (knoppsprett) hadde startet omtrent likt i grantrærne og at sekundærveksten (radiell tilvekst og veddannelse) hadde startet en til 10 dager etter. Vi kan dermed ikke si sikkert om det er betydelig tidsforskjell mellom prosessene.

Tidligere forskning har funnet at sekundærvekst starter noen dager til flere uker *før* oppstarten av primærveksten hos gran (Cuny et al., 2012; Lin et al., 2024; Rossi et al., 2009). Disse studiene har definerte utfolding av nåler som knoppsprett, som kommer senere i knopp utviklingen enn definisjonen på knoppsprett som jeg har brukt. Cuny et al. (2012) observerte utfolding av nåler og forstørring av vedceller i slutten av april, så med definisjonen jeg brukte hadde primærveksten trolig forekommet tidligere enn sekundærveksten. Sutinen et al. (2012) foreslo å bruke oppsvulmede knopper med synlig grønn topp som en indikator på brudd på knopp hvilen, fremfor utfolding av nåler, slik jeg har gjort (Sutinen et al., 2012). Kruttsch indeksen (Kruttsch, 1973) er en standardisert

metode for å vurdere knopp utviklingen i gran som også fanger opp de interne prosessene i knoppene, derfor ble denne klassifiseringen benyttet. Starten av veddannelse er definert som tidspunktet når den første forstørrede cellen er observert, og denne definisjonen er benyttet både i tidligere studier i gran (Cuny et al., 2012; Lin et al., 2024; Rossi et al., 2009) og denne studien. Ettersom tidspunkt for oppstart av veddannelse defineres likt med annen forskning, kan definisjon på knoppsrett være forklaringen på hvorfor andre har observert større tidsforskjeller mellom primær og sekundærvekst i gran.

Forklaringen på at enkelte studier finner at veddannelse forekommer *før* knoppsrett kan også være klimatilpasning, interne prosesser og næringslager i trærne. Gran har en høyere terskeltemperatur for å tvinges ut av knopp hvile enn terskelen for veddannelse (Lin et al., 2024), noe som kan resultere i at veddannelse starter før knoppsrett i endel forskning. Kambiumaktivitet i gran har vist seg å variere fra år til år på grunn av variasjon i temperatur og nedbør, og lokal tilpasning kan forklare mye av variasjonen i kambiumaktivitet mellom gran populasjoner i ulike høydelag og breddegrader (Gričar et al., 2014). Derfor kan vi ikke se bort ifra at synkroniteten mellom primær- og sekundærvekst kan variere fra år til år.

Forskjeller i synkroniteten mellom primærvekst og sekundærvekst for bartreslag, kan blant annet skyldes hormonelle og genetiske ulikheter (Swidrak et al., 2014). Nye knopper, blad/nåler og skudd produserer Auxin (et plantehormon), som blant annet fraktes til kambium hvor det promoterer celledeling og dermed aktivering av kambium (Savidge, 1988). Auxin spiller derfor en sentral rolle i koblingen mellom ved utvikling og knopp fenologi (Huang et al., 2014). Veddannelse er knyttet til tilgangen på karbohydrater (Rathgeber et al., 2022), som produseres under fotosyntesen og er en sterk kobling mellom primær- og sekundærvekst. Veddannelse og knopp utvikling er begge ressurskrevende, og observasjonen av at disse prosessene ikke forekommer samtidig kan forklares av intern konkurranse om ressurser og effektiv ressurs allokering. Sukker er den viktigste faktoren under fortykkelsesfasen (Rathgeber et al., 2022), og dette kan være grunnen til at siste knopp stadium observeres før fortykkelsesfasen i gran i Nordskogen.

Knoppsprett og veddannelse har blitt funnet å oppstå omtrent samtidig også hos andre eviggrønne treslag, som svartgran (*Picea mariana*) og balsamedelgran (*Abies balsamea*) (Antonucci et al., 2015). Denne synkroniteten kan forklares av flere felles drivende faktorer; Knopp utvikling påvirkes av fotoperiode (Saxe et al., 2001), temperatur (kjølekrav) (Sarvas, 1972) og lyskvalitet (Mølmann et al., 2006), mens veddannelse primært drives av faktorer som fotoperiode, temperatur, sukker og luftfuktighet (Rathgeber et al., 2016). Fotoperiode er en spesielt viktig faktor før både knoppsprett og den første fasen av veddannelse (Rathgeber et al., 2022), som dels forklarer en synkronitet mellom de to fenologiske hendelsene. Plantehormoner som stimulerer vekst, som for eksempel Auxin, kan lagres i vev under vinterhvile (Sundberg et al., 1991), og kan gi relativ synkron oppstart av primær- og sekundærvækst. Studier har dokumentert lagring av karbohydrater i eldre nåler av trær fra granslekten (Egger et al., 1996; Schaberg et al., 2000), som indikerer at gran ikke behøver å sprette knopper tidlig for å starte veddannelse. Høy fotosyntese aktivitet og produksjon av sukker ble påvist i eldre nåler før knoppsprett, og eksporten av karbon fra nåler kan kobles til økning i mengden karbohydrater i barken (Egger et al., 1996). Eldre nåler i eviggrønne treslag kan på dette viset påvirke synkroniteten mellom prosessene. Det kan dermed være flere forklaringer bak den relativt synkrone oppstarten av primær- og sekundærvæksten observert i grantrærne i Nordskogen.

4.2 Primær- og sekundærvekst i bjørk

I samsvar med hypotesen startet primærveksten før sekundærveksten i bjørk. Knoppspretten startet mellom 17 og 22 dager før dendrometrene indikerte at 5% terskelen var nådd. Jeg fant også at bjørk var ferdig med siste knoppstadium flere dager før alle bjørketrærne hadde startet den radielle veksten for sesongen.

Forholdet mellom ved- og bladfenologi er lite studert i bjørk, men resultater fra et studie med fire lauvtreslag (blant annet hengebjørk) indikerer at forholdet mellom primær- og sekundærveksten i bjørk ikke har noe gjennomgående mønster (Dox et al., 2022).

Resultatene mine samsvarer med studier av andre lauvtreslag, som bøk (Čufar et al., 2008; Schmitt et al., 2000), hvor primærvekst er observert å oppstå før sekundærvekst. Selv om bjørk er et tidlig-suksessjonstreslag og bøk er et sen-suksessjonstreslag, tilhører de samme vedporositetstype (to typer; ring- og diffus-porøse treslag). Innen porositetstyper er det funnet likheter i koblingen og tidspunktet mellom primær- og sekundærvekst i lauvtreslag (Chen et al., 2022), og derfor anser jeg forskningen på bøk (Čufar et al., 2008; Schmitt et al., 2000) som relevant.

Ettersom jeg ikke tok noen mikrobørprøver fra bjørk er det usikkert hvor nøyaktig dendrometermålingene kan forutsi kambiumaktivitet i dette treslaget. Bjørk er et bladfellende treslag, og er avhengig av å danne nytt bladverk om våren for å ha tilgang på karbohydrater fra fotosyntesen. Tidsforskjellen mellom knoppsprett og vekststart i stammen indikerer muligens dagene det tar før de nye bladenes fotosynteseaktivitet produserer nok karbohydrater til å starte veddannelsen. Bjørk gjennomførte alle knoppstadier og hadde utfoldet bladverk 15 dager før alle bjørketrærne hadde startet den radielle veksten for sesongen. Om våren kan diffus-porøse treslag (som for eksempel bjørk og bøk) benytte funksjonelle vedrør i tidligere årringer for hydrologiske prosesser i treet. Dermed kan nye vedrør produseres etter knoppspretten (Von Allmen et al., 2015) og trærne kan starte primærveksten før sekundærveksten. I motsetning starter ring-porøse treslag (for eksempel ask og eik) kambiumaktiviteten før knoppsprett, ettersom vedrør påvirket av embolisme fra tidligere årringer må erstattes ved at kambiet produserer nye vedrør som fungerer til vanntransport (Frankenstein et al., 2005). Bjørketrærnes behov for fotosynteseprodukter for

å aktivere sekundærvækst og mekanismen i diffus-porøse treslag forklarer observasjonen av at bjørk i Nordskogen hadde knoppsprett flere dager før veksten i stammen startet.

Selv om alle de undersøkte bjørketrærne fullførte knoppsprett før sekundærvæksten startet, og startet radiell vekst (5% av tilvekst oppnådd) og oppnådde 25% av tilveksten relativt synkront, var det store individuelle forskjeller på når de oppnådde 50% av tilveksten og avsluttet veksten (95% av tilvekst oppnådd). Den individuelle differansen i utviklingen av radiell vekst i bjørketrærne kan gjøre det vanskeligere å predikere sekundærvækst i bjørk.

4.3 Sammenligning av treslag

Den tidligere og raskere utviklingen av knopper i bjørk sammenliknet med gran kan være et resultat av strategien pionértreslag bruker for å ikke bli utkonkurrert av sen-suksesjonstreslag. De 17-22 dagene mellom primær- og sekundærvækst i bjørk kan forklares som tiden treet trenger for å kunne produsere og transportere karbohydrater og plantehormoner (Buttò et al., 2020) ned til stammen hvor den kreves for veddannelse (Rathgeber et al., 2016). I motsetning kan treslag som gran oppbevare karbohydrater i eldre nåler (Egger et al., 1996; Schaberg et al., 2000) og dermed vente med å sprette knopper. Dette kan forklare hvorfor tidsforskjellen mellom oppstarten av primær- og sekundærvæksten i gran var mindre enn den observerte i bjørk.

Modellen predikerte knoppsprett 8.mai i gran og 26. april i bjørk. Knoppsprett i gran forekom mellom 10. mai og 13. juni i en 7-års periode i Sverige (Hannerz, 1999). I et proveniensforsøk i Ås har gjennomsnittlig knoppsprett dato for hengebjørk fra to provenienser vært 25. og 30. april over en 7-års periode (Heide, 2003), og førstnevnte dato er også funnet i et langtidsstudie i bjørk i Finland (Häkkinen et al., 1995). Tidspunkt for knoppsprett i begge treslagene studert i Nordskogen skiller seg dermed ikke drastisk fra disse langtidsstudiene. Fotoperiode og kjølekrav påvirker både knopp utviklingen i dunbjørk (*Betula pubescens*) (Pletsers et al., 2015) og gran (Partanen et al., 1998). Selv om treslagenes knopper påvirkes av samme miljøfaktorer er det forventet at bjørk spretter knopper før gran, siden pionértreslag tar mer risiko for å starte veksten tidligere. Sen-

suksesjonstreslag (for eksempel gran) velger ofte en mindre risikofylt strategi enn tidlig-suksesjonstreslag (Körner & Basler, 2010), og strategiene til treslagene gjenspeiles i resultatene.

Sekundærvæksten var relativt lik mellom treslagene, det var ingen statistisk signifikant forskjell mellom gran og bjørk vedrørende datoene for vekststart og vekstslutt. Det var heller ingen betydelig differanse i når treslagene oppnådde 25% og 50% av tilveksten. Disse resultatene kan kanskje forklares av at det ble funnet mer variasjon i radiell vekst innen treslagene enn mellom treslagene. Resultatene tyder på at de største forskjellene mellom treslagene var for primærvæksten, og tidsforskjellen mellom oppstarten av primær- og sekundærvækst. I treslags sammenligningen av knopp utvikling ble 24 grantrær vurdert mot seks bjørketrær, ettersom grantrærnes knopp utvikling ikke var påvirket av gruppering (par, kontroll og tynning). Under sammenligning av radiell tilvekst mellom treslagene ble seks bjørketrær og seks grantrær brukt, dette var trær fra gran-bjørk parene. Resultatene må vurderes med forbehold ettersom de er basert på en liten samplingstørrelse.

4.4 Dendrometer for å anslå vekststart

Ett av målene med denne oppgaven var å vurdere dendrometre som et alternativt verktøy til mikrobørprøver for å anslå vekststart. Dendrometermålingene anslo vekststart dato innen samme uke som det mikrobørprøvene indikerte, men kun ved bruk av 5% terskelen som definisjon på vekststart.

12. mai hadde veksten startet ifølge mikroskopiprøvene, celledeling hadde funnet sted og minst fem nye celler var produsert per radielle fil. Det er likevel usikkert når de første forstørrede cellene ble produsert for de første trærne, men dendrometermålingene kan bidra til å gi mer informasjon. Basert på at både celledeling og forstørrelsen av minst fem celler hadde funnet sted før 12. mai, har nok trolig den første forstørrede cellen blitt produsert nærmere 4. mai enn 12. mai for tre 20. Ved tredje uke hadde tre 26 omtrent 10 forstørrede celler, noen flere enn tre 11. Det er ikke urealistisk at dendrometer estimatet for vekststart (5% tilvekst) 8. mai er langt fra riktig dato, ettersom tre 11 hadde estimert dato to dager etter

(Vedlegg 2). Ettersom jeg ikke hadde bilder av alle fem trær i alle ukene er det vanskelig å vurdere hvor store forskjeller det er mellom dendrometermålingene og mikrobørprøvene, likevel er forskjellene i veststart dato trolig mindre når 5% terskelen benyttes, enn terskelen på 0 μm .

Vekstkurvene til de fem grantrærne viser at radiell vekst var over 0 mikrometer og hadde startet 4. mai for alle trærne, selv om mikroskopibildene ved dette tidspunktet viser inaktivt kambium. Et av trærne (tre 22) produserte trolig sin første forstørrede celle og startet veksten mellom andre og tredje observasjonsdato (tidligst 12. mai), i dette tilfelle ville dendrometermålingene med terskelverdi 0 μm for vekststart indikert at sekundærveksten startet minst åtte dager før mikroskopibildene indikerer vekststart. For dette treet ville en vekststart basert på 5% terskelen indikert at treet startet veksten tre dager etter tidligste tidspunkt. Dermed kommer trolig 5% terskelen nærmere datoen for oppstart av veddannelse i gran, basert på mikroskopibildene. Mangelen på mikroskopibilder fra alle fem trær fra flere av ukene medfører at celleutviklingen for det individuelle treet ikke blir fanget opp over tid, og estimering av veddannelse ved bruk av dendrometermålinger blir vanskeligere og upresist. Ideelt sett skulle det ha vært mikroskopibilder fra alle trærne, spesielt ettersom mikrobørprøver er den mest nøyaktige måten å analysere veddannelse på (Mäkinen et al., 2008; Rathgeber et al., 2016).

Dendrometre har tidligere blitt kritisert for å være et mindre presist verktøy for å predikere veddannelsen enn mikrobørprøver (Mäkinen et al., 2008), men dagens dendrometre er svært nøyaktige. Et dendrometer gir mye informasjon og har potensiale til å fortelle oss mye om radielle endringer, men det største problemet er å skille de irreversible og reversible endringene (Zweifel, 2016). Å sette terskler som vekstmodellen må oppnå, er en metode for å håndtere de nevnte problemene med å ekstrahere informasjon om celleutvikling fra dendrometermålinger (Duchesne et al., 2012). Tersklene 5% og 95% av total årlig tilvekst kan benyttes som en definisjon på vekststart og vekstslutt ved bruk av dendrometermålinger (van der Maaten et al., 2018). Mikrobørprøver er en svært ressurskrevende metode, ettersom det ofte krever ukentlige prøver av trærne (Prislan et al., 2022), og produksjonen av mikroskopiprøver (Balzano et al., 2022) er både tidkrevende og ikke alltid vellykket.

I min studie var 5% terskelen for vekststart en bedre indikator på oppstart av veddannelsen enn dendrometermålinger med terskelverdi 0 μm . Med tillit til 5% terskelen som definisjon på vekststart hadde alle fem trærne startet radiell vekst 17. mai, som er 13 dager etter knoppsprett og ni dager før skuddene var ferdig utviklet. I samsvar med Mäkinen et al. (2008) viste dendrometre (med terskelverdi 0 μm) økning i stamme radius før mikrobørprøvene illustrerte starten av veddannelse, og terskelen på 5% viste mer nøyaktig når veddannelsen startet.

5 Konklusjon

Denne studien illustrerer forskjeller mellom et eviggrønt og et bladfellende treslag; oppstarten av primærvekst (knoppsprett) forekom tidligere enn sekundærveksten (radiell vekst) i bjørk i Nordskogen våren 2024, mens det i gran ble observert en synkronitet mellom prosessene. Bjørketrærne hadde knoppsprett før gran og knopp utviklingen var betydelig raskere.

Jeg fant at dendrometre potensielt kan predikere oppstarten av veddannelse, og i dette studiet var terskel på 5% av årlig vekst en bedre indikator på vekststart enn terskelen på 0 mikrometer. Mikroborprøver er imidlertid den mest presise måten å vurdere veddannelse på, men studien var for kort til å avklare hvordan produksjonen av mikroborprøver kunne blitt forbedret. For videre bruk av protokollen (Prislan, 2022) til vevsprøver av gran anbefaler jeg å produsere prøver både med og uten selvklebende glass og bruk av varmekammer, for å vurdere kvalitetsforskjeller mellom mikroskopiprøvene.

Økte temperaturer, som en konsekvens av global oppvarming, kan øke lengden på vekstsesongen i boreal skog (Breemen et al., 1998), fordi lave temperaturer er en begrensning for vekstsesongen. For å oppnå økt karbonlagring fra denne lengre vekstsesongen, må imidlertid *både* primær- og sekundærveksten starte tidligere og trærne må vokse like lenge utover høsten. Terskel temperaturen for å aktivere kambium har blitt observert å øke mer enn den for knopp utvikling under samme varmescenario, som forklarer den sterkere trenden for tidligere knoppsprett tidspunkt sammenlignet med starttidspunkt for veddannelse i gran (Lin et al. 2024). Dette kan tyde på at primær- og sekundærveksten påvirkes ulikt ved økte temperaturer, og at klimaendringer derfor kan ha ulik innflytelse på knopp utvikling og veddannelsen. Men mildere vårsesong vil ikke direkte resultere i tidligere knoppsprett, ettersom fotoperiode også spiller en viktig rolle i knopp utvikling og kan forhindre en tidligere start av primærveksten (Basler & Körner, 2012). Jeg fant at det var store individuelle forskjeller i sekundærvekst ved slutten av vekstsesongen blant bjørketrærne, og sett i lys av at den ene studien av bjørk som ikke fant tydelig mønster mellom primær- og sekundærvekst (Dox et al., 2022), er det usikkert hvordan bjørkens vekst vil påvirkes i fremtiden.

Hvordan klimaendringer påvirker vekst er av betydning for skogbruket, og det trengs flere studier som vurderer forholdet mellom primær- og sekundærvækst. Selv om gran er en av Europas viktigste treslag både økologisk og økonomisk (Caudullo et al., 2022), er det relativt få studier på forholdet mellom apikale- og laterale meristem i treslaget og deres respons på klimasignaler. Neste steg i forskningen bør være å studere primær- og sekundærvækst på samme sted over flere år for å se effekter av variasjoner i klima.

6 Litteraturliste

- Antonucci, S., Rossi, S., Deslauriers, A., Lombardi, F., Marchetti, M., & Tognetti, R. (2015). Synchronisms and correlations of spring phenology between apical and lateral meristems in two boreal conifers. *Tree Physiology*, 35(10), 1086-1094. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv077>
- Badeck, F. W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J., & Sitch, S. (2004). Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162(2), 295-309. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>
- Baldocchi, D. D., Black, T. A., Curtis, P. S., Falge, E., Fuentes, J. D., Granier, A., Gu, L., Knohl, A., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Wilson, K., Wofsy, S., Xu, L., & Yamamoto, S. (2005). Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology*, 49(6), 377-387. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0256-4>
- Balzano, A., Čufar, K., Merela, M., & Krže, L. (2022). Critical steps and troubleshooting in sample preparation for wood and phloem formation: from sampling to microscopic observation. *Les/Wood*, 71(1), 47-56. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n01a05>
- Basler, D., & Körner, C. (2012). Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 165, 73-81.
- Batley, N. H. (2000). Aspects of seasonality. *Journal of Experimental Botany*, 51(352), 1769-1780. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.352.1769>
- Breemen, N. V., Jenkins, A., Wright, R. F., Beerling, D. J., Arp, W. J., Berendse, F., Beier, C., Collins, R., Dam, D. V., Rasmussen, L., Verburg, P. S. J., & Wills, M. A. (1998). Impacts of Elevated Carbon Dioxide and Temperature on a Boreal Forest Ecosystem (CLIMEX Project). *Ecosystems*, 1(4), 345-351. <https://doi.org/10.1007/s100219900028>
- Bronson, D. R., Gower, S. T., Tanner, M., & Van Herk, I. (2009). Effect of ecosystem warming on boreal black spruce bud burst and shoot growth. *Global Change Biology*, 15, 1534-1543. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01845.x>
- Buttò, V., Deslauriers, A., Rossi, S., Rozenberg, P., Shishov, V., & Morin, H. (2020). The role of plant hormones in tree-ring formation. *Trees*, 34(2), 315-335. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01940-4>
- Caudullo, G., Tinner, W., & de Rigo, D. (2022). *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In J. San-Miguel-Ayanz, G. Caudullo, D. de Rigo, T. Houston Durrant, & A. Mauri (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*.
- Chen, Y., Rademacher, T., Fonti, P., Eckes-Shephard, A. H., Lemoine, J. M., Fonti, M. V., Richardson, A. D., & Friend, A. D. (2022). Inter-annual and inter-species tree growth explained by phenology of xylogenesis. *New Phytologist*, 235(3), 939-952. <https://doi.org/10.1111/nph.18195>
- Chuine, I., & Beaubien, E. G. (2001). Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters*, 4(5), 500-510. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00261.x>
- Čufar, K., Prislan, P., De Luis, M., & Gričar, J. (2008). Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees*, 22(6), 749-758. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0235-6>

- Cuny, H. E., Rathgeber, C. B. K., Lebourgeois, F., Fortin, M., & Fournier, M. (2012). Life strategies in intra-annual dynamics of wood formation: example of three conifer species in a temperate forest in north-east France. *Tree Physiology*, 32(5), 612-625. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps039>
- Diez, J. M., Ibáñez, I., Miller-Rushing, A. J., Mazer, S. J., Crimmins, T. M., Crimmins, M. A., Bertelsen, C. D., & Inouye, D. W. (2012). Forecasting phenology: from species variability to community patterns. *Ecology Letters*, 15(6), 545-553. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01765.x>
- Donnelly, A., Jones, M., & Sweeney, J. (2004). A review of indicators of climate change for use in Ireland. *International Journal of Biometeorology*, 49(1). <https://doi.org/10.1007/s00484-004-0215-5>
- Dox, I., Mariën, B., Zuccarini, P., Marchand, L. J., Prislan, P., Gričar, J., Flores, O., Gehrmann, F., Fonti, P., Lange, H., Peñuelas, J., & Campioli, M. (2022). Wood growth phenology and its relationship with leaf phenology in deciduous forest trees of the temperate zone of Western Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109229. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109229>
- Duchesne, L., Houle, D., & D'Orangeville, L. (2012). Influence of climate on seasonal patterns of stem increment of balsam fir in a boreal forest of Québec, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 162-163, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.016>
- Egger, B., Einig, W., Sclereth, A., Wallenda, T., Magel, E., Loewe, A., & Hampp, R. (1996). Carbohydrate metabolism in one- and two-year-old spruce needles, and stem carbohydrates from three months before until three months after bud break. *Physiologia Plantarum*, 96(1), 91-100.
- Fischlin, A., Midgley, G., Price, J., Leemans, R., & Gopal, B. (2007). Ecosystems, their properties, goods, and services, in: ParryML, CanzianiOF, PalutikofJP, van der LindenPJ, HansonCE, eds., *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Frankenstein, C., Eckstein, D., & Schmitt, U. (2005). The onset of cambium activity—A matter of agreement? *Dendrochronologia*, 23(2005), 57-62.
- Fu, Y. H., Campioli, M., Deckmyn, G., & Janssens, I. A. (2012). The Impact of Winter and Spring Temperatures on Temperate Tree Budburst Dates: Results from an Experimental Climate Manipulation. *PLoS ONE*, 7(10), e47324. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047324>
- Gonzalez, P., Neilson, R. P., Lenihan, J. M., & Drapek, R. J. (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 755-768. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x>
- Gričar, J., Prislan, P., Gryc, V., Vavřík, H., De Luis, M., & Čufar, K. (2014). Plastic and locally adapted phenology in cambial seasonality and production of xylem and phloem cells in *Picea abies* from temperate environments. *Tree Physiology*, 34(8), 869-881. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu026>
- Haeni, M., Knüsel, S., Wilhelm, M., Peters, R. L., & Zweifel, R. (2020). treenetproc - Clean, process and visualise dendrometer data. R package version 0.1.4. <https://github.com/treenet/treenetproc>
- Hannerz, M. (1999). Evaluation of temperature models for predicting bud burst in Norway spruce. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(1), 9-19. <https://doi.org/10.1139/x98-175>

- Heide, O. M. (2003). High autumn temperature delays spring bud burst in boreal trees, counterbalancing the effect of climatic warming. *Tree Physiology*, 23(13), 931-936. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.13.931>
- Huang, J. G., Deslauriers, A., & Rossi, S. (2014). Xylem formation can be modeled statistically as a function of primary growth and cambium activity. *New Phytologist*, 203(3), 831-841. <https://doi.org/10.1111/nph.12859>
- Häkkinen, R., Linkosalo, T., & Hari, P. (1995). Methods for combining phenological time series: application to bud burst in birch (*Betula pendula*) in Central Finland for the period 1896-1955. *Tree Physiology*, 15, 721-726. <https://doi.org/10.1093/treephys/15.11.721>.
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*.
- Kassambara, A. (2023). rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests_. R package version 0.7.2. <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>
- Kausrud, K., Vandvik, V., Flø, D., Geange, S. R., Hegland, S. J., Hermansen, J. S., Hole, L. R., Ims, R. A., Kausrud, H., Kirkendall, L. R., Nordén, J., Nybakken, L., Ohlson, M., Skarpaas, O., Wendell, M., de Boer, H., Eldegard, K., Hindar, K., Krokene, P.,... Velle, G. (2022). *Impacts of climate change on the boreal forest ecosystem*.
- Krutzsch, P. (1973). *Norway spruce development of buds*. (International Union of Forest Research Organizations, Vienna. Report IUFRO S2.02.11., Issue.
- Körner, C. (2015). Paradigm shift in plant growth control. *Curr. Opin. in Plant Biology*, 25, 107-114.
- Körner, C., & Basler, D. (2010). Phenology Under Global Warming. *Science*, 327(5972), 1461-1462. <https://doi.org/10.1126/science.1186473>
- Lin, S., Wang, H., Dai, J., & Ge, Q. (2024). Spring wood phenology responds more strongly to chilling temperatures than bud phenology in European conifers. *Tree Physiology*, 44(1). <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad146>
- Miller, T. W., Stangler, D. F., Larysch, E., Honer, H., Seifert, T., & Kahle, H. P. (2022). A methodological framework to optimize models predicting critical dates of xylem phenology based on dendrometer data. *Dendrochronologia*, 72, Article 125940. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125940>
- Mäkinen, H., Seo, J.-W., Nöjd, P., Schmitt, U., & Jalkanen, R. (2008). Seasonal dynamics of wood formation: a comparison between pinning, microcoring and dendrometer measurements. *European Journal of Forest Research*, 127(3), 235-245. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0199-x>
- Mølmann, J. A., Junttila, O., Johnsen, Ø., & Olsen, J. E. (2006). Effects of red, far-red and blue light in maintaining growth in latitudinal populations of Norway spruce (*Picea abies*). *Plant, Cell & Environment*, 29(2), 166-172. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01408.x>
- Norsk-klimaservicesenter. (2025). *Observasjoner og værstatistikk*. <https://seklima.met.no>
- Parmesan, C. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology*, 13(9), 1860-1872. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01404.x>
- Partanen, J., Koski, V., & Hanninen, H. (1998). Effects of photoperiod and temperature on the timing of bud burst in Norway spruce (*Picea abies*). *Tree Physiology*, 8(12), 811-816.
- Perrin, M., Rossi, S., & Isabel, N. (2017). Synchronisms between bud and cambium phenology in black spruce: early-flushing provenances exhibit early xylem formation. *Tree Physiology*, 37(5), 593-603. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx019>

- Pletsers, A., Caffarra, A., Kelleher, C. T., & Donnelly, A. (2015). Chilling temperature and photoperiod influence the timing of bud burst in juvenile *Betula pubescens* Ehrh. and *Populus tremula* L. trees. *Annals of Forest Science*, 72(7), 941-953. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0491-8>
- Prislan, P., Martinez del Castillo, E., Skoberne, G., Špenko, N., & Gričar, J. (2022). Sample preparation protocol for wood and phloem formation analyses. *Dendrochronologia*, 73, Article 125959. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125959>.
- Rathgeber, C. B. K., Cuny, H. E., & Fonti, P. (2016). Biological Basis of Tree-Ring Formation: A Crash Course. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00734>
- Rathgeber, C. B. K., Pérez-De-Lis, G., Fernández-De-Uña, L., Fonti, P., Rossi, S., Treydte, K., Gessler, A., Deslauriers, A., Fonti, M. V., & Ponton, S. (2022). Anatomical, Developmental and Physiological Bases of Tree-Ring Formation in Relation to Environmental Factors. In (pp. 61-99). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_3
- Richardson, A. D., Hollinger, D. Y., Dail, D. B., Lee, J. T., Munger, J. W., & O'Keefe, J. (2009). Influence of spring phenology on seasonal and annual carbon balance in two contrasting New England forests. *Tree Physiology*, 29(3), 321-331. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpn040>
- Rossi, S., Deslauriers, A., & Anfodillo, T. (2006). Assessment of Cambial Activity and Xylogenesis by Microsampling Tree Species: An Example at the Alpine Timberline. *IAWA Journal*, 27(4), 383-394. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000161>
- Rossi, S., Rathgeber, C. B. K., & Deslauriers, A. (2009). Comparing needle and shoot phenology with xylem development on three conifer species in Italy. *Annals of Forest Science*, 66(2), 206-206. <https://doi.org/10.1051/forest/2008088>
- Sarvas, R. (1972). Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Active period. *Commun Inst For Fenn*, 76, 1-110.
- Savidge, R. A. (1988). Auxin and ethylene regulation of diameter growth in trees. *Tree Physiology*, 4(4), 401-414. <https://doi.org/10.1093/treephys/4.4.401>
- Saxe, H., Cannell, M. G. R., Johnsen, Ø., Ryan, M. G., & Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149(3), 369-399. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x>
- Schaberg, P. G., Snyder, M. C., Shane, J. B., & Donnelly, J. R. (2000). Seasonal patterns of carbohydrate reserves in red spruce seedlings. *Tree Physiology*, 20(8), 549-555. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.8.549>
- Schmitt, R., Möller, R., & Eckstein, D. (2000). Seasonal wood formation dynamics of beech(*Fagus sylvatica* L.) and black locust(*Robinia pseudoacacia* L.) as determined by the “pinning” technique. *Angewandte Botanik*, 74(1/2), 10-16.
- Sundberg, B., Little, C. H. A., Cui, K., & Sandberg, G. (1991). Level of endogenous indole-3-acetic acid in the stem of *Pinus sylvestris* in relation to the seasonal variation of cambial activity. *Plant Cell Environment*, 14, 241-246.
- Sutinen, S., Partanen, J., Vihera-Aarnio, A., & Hakkinen, R. (2012). Development and growth of primordial shoots in Norway spruce buds before visible bud burst in relation to time and temperature in the field. *Tree Physiology*, 32(8), 987-997. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps063>
- Swidrak, I., Gruber, A., & Oberhuber, W. (2014). Xylem and phloem phenology in co-occurring conifers exposed to drought. *Trees*, 28(4), 1161-1171. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1026-x>

- Uggla, C., Magel, E., Moritz, T., & Sundberg, B. R. (2001). Function and Dynamics of Auxin and Carbohydrates during Earlywood/Latewood Transition in Scots Pine. *Plant Physiology*, 125(4), 2029-2039. <https://doi.org/10.1104/pp.125.4.2029>
- van der Maaten, E., Pape, J., van der Maaten-Theunissen, M., Scharnweber, T., Smiljanić, M., Cruz-García, R., & Wilmking, M. (2018). Distinct growth phenology but similar daily stem dynamics in three co-occurring broadleaved tree species. *Tree Physiology*, 38(12), 1820-1828.
- Von Allmen, E. I., Sperry, J. S., & Bush, S. E. (2015). Contrasting whole-tree water use, hydraulics, and growth in a co-dominant diffuse-porous vs. ring-porous species pair. *Trees*, 29(3), 717-728. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1149-0>
- Way, D. A., & Montgomery, R. A. (2015). Photoperiod constraints on tree phenology, performance and migration in a warming world. *Plant, Cell & Environment*, 38(9), 1725-1736. <https://doi.org/10.1111/pce.12431>
- Wolkovich, E. M., Cook, B. I., Allen, J. M., Crimmins, T. M., Betancourt, J. L., Travers, S. E., Pau, S., Regetz, J., Davies, T. J., Kraft, N. J. B., Ault, T. R., Bolmgren, K., Mazer, S. J., McCabe, G. J., McGill, B. J., Parmesan, C., Salamin, N., Schwartz, M. D., & Cleland, E. E. (2012). Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, 485(7399), 494-497. <https://doi.org/10.1038/nature11014>
- Wood, S. N. (2011). "Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models." *Journal of the Royal Statistical Society (B)*, 73(1), 3-36.
- Zweifel, R. (2016). Radial stem variations – a source of tree physiological information not fully exploited yet. *Plant, Cell & Environment*, 39(2), 231-232. <https://doi.org/10.1111/pce.12613>.

Vedlegg 1

Vedleggstabell 1: Informasjon om hver av de 32 trærne. DBH(cm) er diameter i brysthøyde (1.3 m) målt i cm. Målingene er gjennomført ved bruk av Field-Map programvaren (Field-map, IFER-Monitoring and mapping solutions) og tilhørende bakkelaser; posisjonering av trærne ble gjort ved bruk av kompass. Kroneprojeksjon ble analysert ved bruk av ArcGis Pro programvaren (ArcGIS Pro, esri).

Trenr.	Treslag	Gruppe	Kroneprojeksjon(m2)	DBH(cm)	Grunnflate(m2)	Mikroborprøve
1	Picea abies	kontroll	13,12	20,8	0,033962	
2	Picea abies	kontroll	24,0	29,0	0,066018	
3	Picea abies	kontroll	10,93	26,7	0,055961	
4	Picea abies	kontroll	14,46	25,1	0,049455	
5	Picea abies	kontroll	13,92	20,6	0,033312	
6	Picea abies	kontroll	10,0	17,6	0,024316	
7	Picea abies	kontroll	16,95	27,6	0,059798	
8	Picea abies	kontroll	10,87	28,7	0,064659	
9	Picea abies	kontroll	21,15	30,8	0,074468	
10	Picea abies	kontroll	20,18	25,8	0,052252	
11	Picea abies	tynning	12,50	26,2	0,053885	JA
12	Picea abies	tynning	11,59	17,7	0,024593	
13	Picea abies	tynning	8,66	24,6	0,047505	
14	Picea abies	tynning	14,47	23,4	0,042983	
15	Picea abies	tynning	8,73	27,3	0,058505	
16	Picea abies	tynning	11,60	27,1	0,057651	
17	Picea abies	tynning	13,35	26,3	0,054297	
18	Picea abies	tynning	12,28	23,6	0,043721	
19	Picea abies	tynning	15,17	27,0	0,057226	
20	Picea abies	tynning	9,73	21,5	0,036286	JA
21	Betula pendula	par				
22	Picea abies	par				JA

23	Betula pendula	par	
24	Picea abies	par	JA
25	Betula pendula	par	
26	Picea abies	par	JA
27	Betula pendula	par	
28	Picea abies	par	
29	Betula pendula	par	
30	Picea abies	par	
31	Betula pendula	par	
32	Picea abies	par	

Vedlegg 2

Vedleggstabell 2: Dagnummer (DOY) og datoene (Dato) for vekststart (5% av radiell tilvekst) og vekstslutt (95% av radiell tilvekst) i de fem grantrærne det ble tatt mikrobørprøver fra, basert på dendrometermålinger.

Trenummer	DOY 5%	DOY 95%	Dato 5%	Dato 95%
24	138	237	2024-05-17	2024-08-24
22	136	236	2024-05-15	2024-08-23
26	129	236	2024-05-08	2024-08-23
20	127	235	2024-05-06	2024-08-22
11	131	252	2024-05-10	2024-09-08

Vedlegg 3

Vedlegg 3: R koden for analysering av knopp utvikling. Koden er skrevet på engelsk ettersom min biveileder Danielle er den som har hjulpet meg med statistikk i R.

```
###                                BUD DEVELOPMENT                                ###

# The script is based on code from Cecilie P. Bjerkeset (60%) and
# Danielle Creek (40%).
# Chatgpt was mostly used for troubleshooting and learning new techniques in R

# Install packages and load the necessary libraries
install.packages("xtable")
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(mgcv)
library(purrr)
library(rstatix)
library(stringr)
library(gt)
library(officer)
library(xtable)

# Load the dataset
df <- read.csv("Cecilia_budburst.csv", stringsAsFactors = FALSE,
fileEncoding="ISO-8859-1")

# Convert date column to Date format
df$date <- as.Date(df$date, format="%d/%m/%Y")

# Convert date to day of year
df$doy <- as.numeric(format(df$date, "%j"))

# Remove all data points after stage 4 is reached for each tree
df <- df %>% group_by(tree_ID) %>% filter(cumsum(budstage == 4) <= 1) %>%
ungroup()

# Exclude stage 1 from modeling but retain it in the dataset
df_model <- df %>% filter(budstage > 1 & budstage <= 4)

#####                                TREATMENT EFFECT ON SPRUCE BUDS                                #####

# Statistical comparison of Picea abies treatments
picea_data <- df %>% filter(stringr::str_detect(species, "Picea"))
picea_comparison <- picea_data %>%
  group_by(budstage) %>%
  filter(n_distinct(treatment) > 1) %>% # Ensure there are at least two
treatments
  rstatix::kruskal_test(doy ~ treatment)
#if the p value is not significant, then it means we can treat all
#of the spruce together rather than separate according to treatment
#the p value is not significant= treatment have no effect on budstage
```

```

# Create a table with the statistical test of treatment effect on spruce buds
gt_table <- picea_comparison %>%
  gt() %>%
  tab_header(title="") %>%
  fmt_number(columns= c("budstage", ".y.", "n", "statistic", "df", "p", "method"),
decimals=3) %>%
  opt_table_font(font="Times New Roman")
gtsave(gt_table, filename="table_treatment_effect_buds.docx")

# No significant differences, combine Picea abies into one group
if (all(picea_comparison$p < 0.05) == FALSE) {
  df <- df %>% mutate(species = ifelse(str_detect(species, "Picea"),
"Picea_abies", species))
}

#####          SPECIES EFFECT ON BUDS          #####

# Statistical comparison between Picea abies and Betula pendula
species_comparison <- df %>%
  group_by(budstage) %>%
  filter(n_distinct(species) > 1) %>% # Ensure at least two species are present
  rstatix::kruskal_test(doy ~ species)
#checking to see if there is a difference between species
#significant difference between species bud development !!!

# Significance levels displayed
format_p_value <- function(p) {
  ifelse(p < 0.001, paste0(formatC(p, format="e", digits=2), "****"),
    ifelse(p < 0.01, paste0(formatC(p, format="e", digits=2), "***"),
      ifelse(p < 0.05, paste0(formatC(p, format="e", digits=2), "**"),
        formatC(p, format="e", digits=2))))
}

# Include the significance level into dataset
species_comparison <- species_comparison%>%
  mutate(`p` = format_p_value(`p`))

# Create a table with the statistics
gt_table_species <- species_comparison %>%
  gt() %>%
  tab_header(title="") %>%
  fmt_number(columns= c("budstage", ".y.", "n", "statistic", "df", "p", "method"),
decimals=3) %>%
  opt_table_font(font="Times New Roman")
gtsave(gt_table_species, filename="table_species_effect_buds.docx")

# Plots each tree individually overlayed (so you can get an idea of what it looks
like)
ggplot(df, aes(x = date, y = budstage, color = tree_ID, group = tree_ID)) +
  geom_line(alpha = 0.7) +
  geom_point() +
  labs(title = "Budburst Development Over Time - Pairs Treatment",
    x = "Date", y = "Budburst Stage") +

```

```
theme_minimal() +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))
```

```
#####                                LOESS PLOT                                #####
```

```
# Removes the space after betaula_pendula to help get legend
df <- df %>%
  mutate(species = str_trim(species)) # Remove leading/trailing spaces
unique(df$species)

# Visualization: Combined Picea abies and Betula pendula with a smoothed fit line
('loess')
ggplot(df, aes(x = doy, y = budstage, color = species)) +
  geom_smooth(method = "loess", se = TRUE, alpha = 0.3) +
  scale_color_manual(values=
c("Betula_pendula"="#8D1F5C","Picea_abies"="#9ad49f")) +
  labs(title = "Budburst Development Over Time - Picea vs Betula",
       x = "Day of Year", y = "Budburst Stage") +
  ylim(1, 4) +
  theme_minimal() +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1))

# NORWEGIAN version of the plot
ggplot(df, aes(x = doy, y = budstage, color = species, fill=species)) +
  geom_smooth(method = "loess", se = TRUE, alpha = 0.3) +
  scale_color_manual(values=
c("Betula_pendula"="#8D1F5C","Picea_abies"="#9ad49f"), labels=c("Bjork", "Gran"))
+ scale_fill_manual( values=
c("Betula_pendula"="#8D1F5C","Picea_abies"="#9ad49f"), labels=c("Bjork", "Gran"))
+labs( color= "Treslag",fill= "Treslag", x = "Dagnummer", y = "Knoppstadium") +
  ylim(1, 4) +
  theme_minimal()
```

```
#####                                MICROCORE TREES PLOT                                #####
```

```
# Collect the series numbers for the microcore trees
df$dendro_id <- as.factor(df$dendro_id)
selected_trees_bud <- c(92202224, 92202221, 92202162, 92202161, 92202165 )

# Select the DOYs for when I have microcores
selected_DOY_bud <- c(125,133,140,148)

# Create a dataset with only bud data from microcore trees at the selected DOYs
df_microcore_bud <- df %>% filter(doy %in% selected_DOY_bud)
df_microcore_bud <- df_microcore_bud %>%
  mutate(dendro_id = str_trim(dendro_id))
df_microcore_bud_dendro <- df_microcore_bud %>% filter(dendro_id %in%
selected_trees_bud)

# Plot the bud development for the five microcore trees
ggplot(df_microcore_bud_dendro, aes(x=doy, y=budstage, color=species)) +
```

```

    scale_color_manual(values=
c("Betula_pendula"="#8D1F5C", "Picea_abies"="#9ad49f"))+
    geom_line(alpha=0.8, position="identity") +
    geom_point() +
    scale_y_continuous(breaks=seq(2,4,by=1.0))+
    labs(x="Dagnummer", y="Knoppstadium", color="Treslag") +
    theme(axis.text.x =element_text(size=50))+
    theme_minimal()

#####          PREDICTED DOY  MODEL          #####

# Predict DOY for budburst stages 2, 3, and 4 with confidence intervals
predict_stage <- function(sub_df) {
  species <- unique(sub_df$species)
  if (n_distinct(sub_df$budstage) > 2) {
    model <- gam(doy ~ s(budstage, k = min(5, n_distinct(sub_df$budstage))), data
= sub_df, family = gaussian())
  } else {
    model <- lm(doy ~ budstage, data = sub_df) # Use linear model if GAM isn't
appropriate
  }

  new_data <- data.frame(budstage = c(2, 3, 4))
  predictions <- predict(model, newdata = new_data, se.fit = TRUE)
  data.frame(species = species, budstage = new_data$budstage,
    predicted_doy = predictions$fit, conf_interval = predictions$se.fit)
}

# Create final prediction for budstages based on species
final_predictions <- df %>%
  filter(budstage <= 4) %>%
  group_by(species) %>%
  group_split() %>%
  map_dfr(predict_stage)

# Print results to compare them
print(picea_comparison)
print(species_comparison)
print(final_predictions)
# treatments have no significant effect
# species show significant differences
# predicted DOY for budstages differ between species

# Create a table from the final predicted DOY
dt <- table(final_predictions)
print(xtable(final_prediction), type= "html", file="predicted_doy_table.html")

#####          PREDICTED DOY  PLOT          #####

# Removes the space after betaula_pendula to help get legend
final_predictions <- final_predictions %>%
  mutate(species = str_trim(species)) # Remove leading/trailing spaces
unique(final_predictions$species)

# Plot with predicted DOY for budstages and species

```

```

ggplot(final_predictions, aes(x = predicted_doy, y = budstage, color = species))
+
  geom_point(size = 3) +
  scale_color_manual(values=
c("Betula_pendula"="#8D1F5C", "Picea_abies"="#9ad49f")) +
  geom_errorbarh(aes(xmin = predicted_doy - conf_interval,
                    xmax = predicted_doy + conf_interval), height = 0.2) + #
Error bars
  labs(x = "Predicted DOY", y = "Bud Stage", color = "Species") +
  theme_minimal()

# Norwegian version of predicted DOY plot
ggplot(final_predictions, aes(x = predicted_doy, y = budstage, color = species))
+
  geom_point(size = 3) +
  scale_color_manual(values=
c("Betula_pendula"="#8D1F5C", "Picea_abies"="#9ad49f"), labels=c("Bjork", "Gran"))
+
  geom_errorbarh(aes(xmin = predicted_doy - conf_interval,
                    xmax = predicted_doy + conf_interval), height = 0.2) + #
Error bars
  labs(x = "Predikert dagnummer", y = "Knoppstadium", color = "Treslag") +
  scale_y_continuous(breaks=c(2,3,4)) +
  theme_minimal()

```

```
##### AVERAGE DATES FOR BUDSTAGES #####
```

```

# Average date for budstages in spruce
df %>%
  filter(species=="Picea_abies") %>%
  group_by(budstage) %>%
  summarise(
    MeanDate =as.Date(mean(as.numeric(date))),
    StdErr = sd(as.numeric(date)) / sqrt(n())
  )

# Average date for budstages in birch
df %>%
  filter(species=="Betula_pendula") %>%
  group_by(budstage) %>%
  summarise(
    MeanDate =as.Date(mean(as.numeric(date))),
    StdErr = sd(as.numeric(date)) / sqrt(n())
  )

# Table with average date for budstages in birch
table_average <- df %>%
  filter(species=="Betula_pendula") %>%
  group_by(budstage) %>%
  summarise(
    MeanDate =as.Date(mean(as.numeric(date))),
    StdErr = sd(as.numeric(date)) / sqrt(n())
  )

```


Vedlegg 4

Vedlegg 4: R koden for analyse av dendrometerdata. Koden er skrevet på engelsk ettersom min biveileder Danielle er den som har hjulpet meg med statistikk i R.

```
###                                DENDROMETERDATA                                ###

# Line 1-343:script made by Danielle Creek + Michaela Locorotondo (for cleaning
dendrodata)
# Line 343-696: script made by Cecilie P. Bjerkeset
# Chatgpt was mostly used for troubleshooting and learning new techniques in R

# Install packages and load the necessary libraries
install.packages("readxl")
library(devtools)
library(treenetproc)
library(zoo)
library(chron)
library(viridis)
library(dplyr)
library(readr)
library(lubridate)
library(tidyverse)
library(readxl)
library(stringr)

# Set target directories
setwd("C:/Users/cecbjerk/OneDrive - Allskog
SA/Dokumenter/MASTEROPPGAVE/Dendrometer data")

# Read in data as character (to avoid coercion issues)
ds <- read_delim("data_92202167_2025_02_17_0.csv",
                 delim = ";", escape_double = FALSE, col_names = FALSE,
                 col_types = cols(X2 = col_character(),
                                X4 = col_number(), X7 = col_integer()), trim_ws
= TRUE)
# Remove duplicated timestamps
ds <- ds[!duplicated(ds$X2), ]

# Rename columns
names(ds) <- c("ID", "ts", "a", "temp", "b", "c", "growth", "d", "e", "f")

# Assign series ID
ds$series <- "92202167"

# Remove junk data where growth = 0
ds <- ds %>% filter(growth != 0)

# Define possible timestamp formats (handling midnight correctly)
format_list <- c("%Y-%m-%d %H:%M:%S", "%d/%m/%Y %H:%M:%S", "%Y-%m-%d %H:%M",
                 "%d/%m/%Y %H:%M", "%Y/%m/%d %H:%M:%S", "%d-%m-%Y %H:%M:%S",
                 "%Y/%m/%d %H:%M", "%d-%m-%Y %H:%M", "%Y-%d-%m %H:%M:%S",
                 "%Y/%d/%m %H:%M:%S", "%Y-%d-%m %H:%M", "%Y/%d/%m %H:%M")
```

```

# Parse timestamps dynamically
ds$ts <- parse_date_time(ds$ts, orders = format_list, tz = "UTC")

# Convert timestamps explicitly to correct format
ds$ts <- as.POSIXct(ds$ts, format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S", tz = "UTC")

# Remove rows where ts is NA (after all fixes)
ds <- ds[complete.cases(ds["ts"]), ]

# Convert growth and temperature to numeric before subsetting
ds$growth <- as.numeric(ds$growth)
ds$temp <- as.numeric(ds$temp)

# Create data frame with columns of interest
ds3 <- subset(ds, select = c(series, ts, temp, growth))

# Split data into temperature and growth datasets for treenetproc
value_final <- subset(ds3, select = c(series, ts, growth))
temp_final <- subset(ds3, select = c(series, ts, temp))

colnames(temp_final) <- c("series", "ts", "value")
colnames(value_final) <- c("series", "ts", "value")

# Convert ts to character before using proc_L1() (Fixes error!)
value_final$ts <- format(value_final$ts, "%Y-%m-%d %H:%M:%S")
temp_final$ts <- format(temp_final$ts, "%Y-%m-%d %H:%M:%S")

# Convert values to numeric to avoid errors
value_final$value <- as.numeric(value_final$value)
temp_final$value <- as.numeric(temp_final$value)

# Run treenetproc analyses: time alignment
dendro_L1 <- proc_L1(data_L0 = value_final,
                    reso = 60,
                    date_format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S",
                    tz = "UTC")

temp_L1 <- proc_L1(data_L0 = temp_final,
                  reso = 60,
                  date_format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S",
                  tz = "UTC")

# treenet proc analyses: error detection and processing
dendro_L2 <- proc_dendro_L2(dendro_L1, temp_L1 = temp_L1,
                           plot_period = "monthly", plot_name =
"92202167_L2_allyears.pdf",
                           plot_export = TRUE,
                           frag_len = NULL,
                           tz="UTC")

##### only use if errors in correction #####
#manual corrections for data if automatic ones do not work or overcorrect.
##See ??corr_dendro_L2 for more info

help("corr_dendro_L2")

```

```

dendro_L2 <- corr_dendro_L2(
  dendro_L1 = dendro_L1,
  dendro_L2,
  reverse = c(),
  force = NULL,
  delete = NULL,
  series = NULL,
  n_days = 5,
  plot = TRUE,
  plot_export = TRUE,
  tz = "UTC"
)

dendro_L2 <- corr_dendro_L2(
  dendro_L1 = dendro_L1,
  dendro_L2,
  reverse = NULL,
  force = c("2024-06-06", "2024-06-12", "2024-06-27"),
  delete = NULL,
  series = NULL,
  n_days = 21,
  plot = TRUE,
  plot_export = TRUE,
  tz = "UTC"
)
#####
#check to see what data looks like now
plot(value ~ ts , data= dendro_L2)

#save all years of corrected growth data
if ("ts" %in% names(dendro_L2)) {
  dendro_L2$ts <- format(as.POSIXct(dendro_L2$ts, format = "%Y-%m-%d %H:%M:%S",
  tz = "UTC"), "%Y-%m-%d %H:%M:%S")
}
dendro_L2$temp <- temp_L1$value
write.table(dendro_L2, "92202167_L2_allyears.csv", sep = ";", col.names=NA)

#save graph of zero growth after L2
pdf( "92202167_L2_allyears_graph.pdf", width = 8, height = 7)

#create plot of zero growth (grey) and corrected data (blue)
plot(data =dendro_L2 ,
  value ~ ts,
  type = "n",
  ylab = paste0("L2 (", "\u00b5", "m)"),
  las = 1)
lines(data = dendro_L2 , max ~ ts, col = "grey70")
lines(data = dendro_L2 , value ~ ts, col = "#08519c")

dev.off()

#####

```

```

#### manual set grow start for 2024 ####
#####
dendro_L2$ts <- as.Date(dendro_L2$ts)

#plot only the area of interest for 2024 to see where the zero growth method
#has determined 'growth has started for the year (grey line)

plot_data <- dendro_L2 %>%
  filter(ts >= as.Date("2024-03-01") & ts < as.Date("2024-09-30"))

plot(data = plot_data,
      value ~ ts,
      type = "n",
      ylab = paste0("L2 (", "\u00b5", "m)"),
      las = 1)
lines(data = plot_data, max ~ ts, col = "grey70")
lines(data = plot_data, value ~ ts, col = "#08519c")

#now you can set your own 0 growth for the year (choose the most flat period
occurring in April/May)
dendro_L1 <- dendro_L1 %>% filter(ts > "2024-05-03" & ts < "2024-09-30")
temp_L1 <- temp_L1 %>% filter(ts > "2024-05-03" & ts < "2024-09-30")

# treenet proc analyses: error detection and processing
dendro_L2_24 <- proc_dendro_L2(dendro_L1, temp_L1 = temp_L1,
                             plot_period = "monthly", plot_name =
"92202167_L2_24.pdf",
                             plot_export = TRUE,
                             frag_len = NULL,
                             tz="UTC")

###correct any issues
dendro_L2_24 <- corr_dendro_L2(
  dendro_L1 = dendro_L1,
  dendro_L2_24 ,
  reverse = c( 6:290),
  force = NULL,
  delete = NULL,
  series = NULL,
  n_days = 5,
  plot = TRUE,
  plot_export = TRUE,
  tz = "UTC"
)

plot(value ~ ts , data= dendro_L2_24)

#save graph of zero growth after L2 for 2024
pdf( "92202167_L2_24.pdf", width = 8, height = 7)

```

```

#create plot of zero growth (grey) and corrected data (blue)
plot(data =dendro_L2_24 ,
      value ~ ts,
      type = "n",
      ylab = paste0("L2 (", "\u00b5", "m)"),
      las = 1)
lines(data = dendro_L2_24, max ~ ts, col = "grey70")
lines(data = dendro_L2_24, value ~ ts, col = "#08519c")

dev.off()

###save files

# Ensure ts column is in the correct format
if ("ts" %in% names(dendro_L2_24)) {
  dendro_L2_24$ts <- format(as.POSIXct(dendro_L2_24$ts, format = "%Y-%m-%d
%H:%M:%S", tz = "UTC"), "%Y-%m-%d %H:%M:%S")
}

# Ensure temp column is correctly assigned
dendro_L2_24$temp <- temp_L1$value

# Save using write_delim() instead of write.table()
write_delim(dendro_L2_24, "92202167_L2_24.csv", delim = ";", col_names = TRUE)

#####
#### combine all files into one #####
#once cleaning is complete for ALL files

# Define the folder containing your files
folder_path <- 'C:/Users/cecbjerk/OneDrive - Allskog
SA/Dokumenter/MASTEROPPGAVE/Dendrometer data'

# List all files ending in _L2_24 (adjust pattern for .csv, .xlsx, etc.)
files <- list.files(path = folder_path, pattern = "_L2_24\\.csv$", full.names =
TRUE)

# Read all files ensuring correct delimiter and column names
dendro_all <- files %>%
  lapply(function(file) {
    read_delim(file, delim = ";", col_types = cols(.default = "c")) # Read with
correct delimiter
  }) %>%
  bind_rows() # Combine all dataframes

# Ensure the ts column is properly formatted before saving
if ("ts" %in% names(dendro_all)) {
  dendro_all$ts <- as.character(dendro_all$ts) # Convert to character to retain
time info
}

```

```

# Save the dataframe with proper formatting
write.table(dendro_all, "dendro_all.csv", sep = ";", row.names = FALSE, quote =
FALSE)

#####
####  calc growth per year + grow start and stop #####
#####
# Defines df as the combined file with all dendrometerdata
df <- dendro_all

# Convert timestamp to POSIXct format
df$ts <- as.POSIXct(df$ts)

# Extract Day of Year (DOY) and year
df$DOY <- as.numeric(format(df$ts, "%j")) # %j gives day of the year
df$Year <- as.numeric(format(df$ts, "%Y")) # %Y gives the year

# Step 3: Group the data by 'Plot', 'logger', and year
grouped_data <- df %>%
  group_by(series, Year)
df$gro_yr <- as.numeric(df$gro_yr)

# Annual growth per dendrometer
max_gro_per_year <- df %>%
  group_by(series, Year) %>%
  filter(row_number() == which.max(gro_yr))

# Max growth per day per dendrometer
max_gro_per_day_per_sensor <- df %>%
  group_by(series, DOY, Year) %>%
  summarize(max_gro_per_day = max(gro_yr, na.rm = TRUE))

# Arrange the data by logger, year, and DOY
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  arrange(series, Year, DOY)

# Calculate the daily growth (GRO_d) by subtracting the previous day's value from
the current day's value for each sensor and each year
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series, Year) %>%
  mutate(GRO_d = max_gro_per_day - lag(max_gro_per_day),
         GRO_d = ifelse(is.na(GRO_d), 0, GRO_d))

# Group the data by 'logger' and 'Year', and calculate the maximum value of
'max_gro_per_day' for each group
max_max_gro_per_year <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series, Year) %>%
  summarize(annual_growth = max(max_gro_per_day))

# Merge the maximum values back into the original DataFrame

```

```

max_gro_per_day_per_sensor <- left_join(max_gro_per_day_per_sensor,
max_max_gro_per_year, by = c("series", "Year"))

# Arrange the data by logger, year, and DOY
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  arrange(series, Year, DOY)

# Calculate the cumulative sum of daily growth
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series, Year) %>%
  mutate(GRO.yr = cumsum(GRO_d))

# Calculate the total growth for each sensor and year, and includes growth per
day
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series, Year) %>%
  mutate(Total_Growth = max(GRO.yr ))

# Calculate the cumulative percentage of daily growth
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  mutate(GRO_pc = (GRO.yr/ annual_growth) * 100)

# Calculate the percentage of annual growth of GRO_d
max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series, Year) %>%
  mutate(dGRO_pc = (GRO_d / sum(GRO_d, na.rm = TRUE)) * 100)

###remove unnecessary columns
#max_gro_per_day_per_sensor <- max_gro_per_day_per_sensor %>% select(-
annual_growth, -max_gro_per_day)

###I included the species and treatment in the script
# Include a species & treatment column
dendro_all <- read.csv("dendro_all.csv", sep=";")
species <- read_xlsx("species.xlsx")
dendro_all_species <- merge(dendro_all, species, by="series", all.x=TRUE)

# Fixing problem with the series column & rerunning the species code
species <- species %>%
  mutate(series= str_trim(series))
unique(dendro_all$series)
unique(species$series)

# Merging the species column with the dendrometerdata
dendro_all <- merge(dendro_all, species, by="series", all.x=TRUE)
df <- merge(df, species, by="series", all.x=TRUE)

# Define the output file name
output_dir <- "C:/Users/cecbjerk/OneDrive - Allskog
SA/Dokumenter/MASTEROPPGAVE/Dendrometer data"
output_file <- file.path(output_dir, "dendro_GRO.csv")

```

```

# Write the combined data frame to a single CSV file
output_file <- file.path(output_dir, "dendro_GRO.csv")
write.csv(max_gro_per_day_per_sensor, output_file, row.names = FALSE)

#####          GROWTH START (5%) & STOP (95%)          #####

# Defining the 5% and 95% threshold
threshold <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series) %>%
  mutate(
    total_growth= annual_growth,
    cum_growth=cumsum(GRO_d),
    threshold_5=0.05 * total_growth ,
    threshold_95=0.95 * total_growth
  ) %>%
  ungroup()

# Find the DOY where 5% and 95% threshold was reached
growth_threshold <- threshold %>%
  group_by(series) %>%
  summarise(
    DOY_5=DOY[which.min(abs(cum_growth - threshold_5))],
    DOY_95=DOY[which.min(abs(cum_growth - threshold_95))]
  )
print(growth_threshold)

### Create table with growth start and stop
# First: installing and opening the packages needed
install.packages("flextable")
install.packages("officer")
install.packages("magrittr")
library(flextable)
library(officer)
library(magrittr)
# Second: converting dataframe to a flextable
ft <- flextable(growth_threshold)
ft <- font(ft,font="Times New Roman", part="all")
ft
# Third: printing the table into a docx file
doc <-read_docx () %>%
  body_add_flextable(ft) %>%
  body_add_par("", style="heading 1")
print(doc, target="growth_5%_95%_species.docx")

###      ANOVA TEST      ###

# Convert table of growth start and stop to long format
growth_threshold_long <- growth_threshold %>%
  pivot_longer(cols=c(DOY_5,DOY_95), names_to="Vekst", values_to= "DOY")

# ANOVA test for thinning effect on average onset date and average cessation date
subset_treatment_5 <- subset(growth_threshold_long, Vekst == "DOY_5" & treatment
%in% c("kontroll", "tynning"))

```



```

anova_result <- aov(DOY ~ treatment, data=subset_treatment_5)
summary(anova_result)
subset_treatment_95 <- subset(growth_threshold_long, Vekst == "DOY_95" & treatment
%in% c("kontroll", "tynning"))
anova_result <- aov(DOY ~ treatment, data=subset_treatment_95)
summary(anova_result)
#No clear statistical difference in stop date between kontroll and thinned spruce
#However there could be a minor effect of thinned spruce on growth start date

# ANOVA test for species effect on average onset date and average cessation date
subset_species_5 <- subset(growth_threshold_long, Vekst == "DOY_5" & treatment
%in% c("par"))
anova_result <- aov(DOY ~ species, data=subset_species_5)
summary(anova_result)
subset_species_95 <- subset(growth_threshold_long, Vekst == "DOY_95" & treatment
%in% c("par"))
anova_result <- aov(DOY ~ species, data=subset_species_95)
summary(anova_result)
#No clear statistical difference in start and stop date between spruce and birch

```

```

#####          GROWTH THRESHOLD  25% AND 50%          #####

```

```

# Defining the 25% and 50% threshold
threshold_25_50 <- max_gro_per_day_per_sensor %>%
  group_by(series) %>%
  mutate(
    total_growth= annual_growth,
    cum_growth=cumsum(GRO_d),
    threshold_25=0.25 * total_growth ,
    threshold_50=0.50 * total_growth
  ) %>%
  ungroup()

# Find the DOY where threshold was reached
growth_threshold_25_50 <- threshold_25_50 %>%
  group_by(series) %>%
  summarise(
    DOY_25=DOY[which.min(abs(cum_growth - threshold_25))],
    DOY_50=DOY[which.min(abs(cum_growth - threshold_50))]
  )
print(growth_threshold_25_50)

# Dataset with both date and DOY
growth_threshold_date_25_50 <- growth_threshold_25_50 %>%
  mutate(
    Date_25=as.Date(DOY_25 -1, origin=paste0(2024,"-01-01")),
    Date_50=as.Date(DOY_50 -1, origin=paste0(2024, "-01-01"))
  )
print(growth_threshold_date_25_50)

# Add species column
growth_threshold_25_50 <- merge(growth_threshold_25_50, species, by="series",
all.x=TRUE)

```

```

# Converting dataset to long format, making it easier to plot later
growth_threshold_long_25_50 <- growth_threshold_25_50 %>%
  pivot_longer(cols=c(DOY_25,DOY_50), names_to="Vekst", values_to= "DOY")

###          ANOVA TEST          ###

# ANOVA test for treatment effect on date when the 25% and 50% threshold was
reached
subset_treatment_25 <- subset(growth_threshold_long_25_50, Vekst == "DOY_25" &
treatment %in% c("kontroll", "tynning"))
anova_result <- aov(DOY ~ treatment, data=subset_treatment_25)
summary(anova_result)
subset_treatment_50 <- subset(growth_threshold_long_25_50, Vekst == "DOY_50" &
treatment %in% c("kontroll", "tynning"))
anova_result <- aov(DOY ~ treatment, data=subset_treatment_50)
summary(anova_result)
#No clear statistical difference in dates for 25% and 50% threshold between
kontroll and thinned

# ANOVA test for species effect on date when the 25% and 50% threshold was
reached
subset_species_25 <- subset(growth_threshold_long_25_50, Vekst == "DOY_25" &
treatment %in% c("par"))
anova_result <- aov(DOY ~ species, data=subset_species_25)
summary(anova_result)
subset_species_50 <- subset(growth_threshold_long_25_50, Vekst == "DOY_50" &
treatment %in% c("par"))
anova_result <- aov(DOY ~ species, data=subset_species_50)
summary(anova_result)
#No clear statistical difference in dates for 25% and 50% threshold between
spruce and birch

#####          THINNING EFFECT ON ANNUAL GROWTH  IN SPRUCE          #####

# Creating a dataset with only spruce from kontroll and thinned "treatment"
treatment_dataset <- max_gro_per_year[max_gro_per_year$treatment %in% c(
"kontroll","tynning"), ]

# Running a ANOVA test to check if there is a thinning effect on annual growth
anova_result <- aov(gro_yr ~ treatment, data=treatment_dataset)
summary(anova_result)

### Creating a table with the ANOVA results
# First: installing and opening needed packages
install.packages("broom")
install.packages("flextable")
install.packages("officer")
library(broom)
library(flextable)
library(officer)

```

```

# Second: converting ANOVA results into a table
anova_table <- tidy(anova_result)
print(anova_table)
# Third: the table is converted to a docx file
doc <- read_docx ()
doc <- doc %>%
  body_add_par("Effect of treatment", style="heading 1")%>%
  body_add_flextable(flextable(anova_table))
print(doc, target = "Effekt_behandling.docx" )

#####          SPECIES EFFECT  ON  ANNUAL GROWTH          #####

# Creating a dataset with only the 6 spruce and 6 birch from the pair-treatment
species_dataset <- max_gro_per_year[max_gro_per_year$treatment == "par", ]

# Running a ANOVA test to check if there is a species effect on annual growth
anova_result <- aov(gro_yr ~ species, data=species_dataset)
summary(anova_result)

### Creating a table with the ANOVA results
# packages already installed in code over
# First: converting ANOVA results into a table
anova_table <- tidy(anova_result)
print(anova_table)
# Second: the table is converted to a docx file
doc <- read_docx ()
doc <- doc %>%
  body_add_par("Effect of species", style="heading 1")%>%
  body_add_flextable(flextable(anova_table))
print(doc, target = "Effekt_treslag.docx" )

#####          PLOTS   &   TABLES          #####

# Install ggplot for plotting
install.packages("ggplot2")
library(ggplot2)

# Renaming species to norwegian name
df$species[df$species == "Betula_pendula"] <- "Bjork"
df$species[df$species == "Picea_abies"] <- "Gran"

###   THINNING EFFECT IN SPRUCE   ###

# First: creating a dataset with only spruce from thinned and controll plot
df_spruce <- df %>% filter(species=="Gran", treatment== c("kontroll","tynning"))

# Second: plotting the growth for controll and thinned
ggplot(df_spruce, aes(x=DOY, y=gro_yr, color=treatment, group=series)) +
  geom_line(alpha=0.8, position="identity", linewidth=1) +
  scale_color_manual(values= c("kontroll"="#7cc5c4", "tynning"="#5e3400")) +
  facet_wrap(~treatment) +

```

```

labs(x="Dagnummer", y=expression(paste("Vekst (", mu, "m)")), color= "") +
theme_minimal()

###      SPRUCE  VS      BIRCH      ###

# First: creating a dataset with 6 spruce and 6 birch from pair treatment
df_par <- df %>% filter(treatment=="par")

# Second: plotting the growth per species
ggplot(df_par, aes(x=DOY, y=gro_yr, color=species, group=series)) +
  geom_line(alpha=0.8, position="identity", linewidth=1) +
  scale_color_manual(values= c("Bjork"="#8D1F5C", "Gran"="#9ad49f"), labels=
c("Bjork", "Gran")) +
  facet_wrap(~species) +
  labs( x="Dagnummer", y=expression(paste("Vekst (", mu, "m)")), color= "") +
  theme_minimal()

###      MICROCORE TREES GROWTH      ###

# Collect the series numbers for the microcore trees
selected_trees <- c(92202224, 92202221, 92202162, 92202161, 92202165)

# Select the DOYs for when I have microcores
selected_DOY <- c(125,133,140,148)

# Create a dataset with only dendrometerdata from microcore trees at the selected
DOYs
df_microcore <- df %>% filter (series%in% selected_trees)
df_microcore <- df_microcore %>% filter(DOY %in% selected_DOY)

# Rename series number to tree number
series_values <- c("92202224" = "11",
                  "92202221" = "20",
                  "92202162" = "22",
                  "92202161" = "24",
                  "92202165" = "26")
df_microcore <- df_microcore %>%
  mutate(series =as.character(series),
         series= series_values[series])

# Plot the growth for the five microcore trees
ggplot(df_microcore, aes( x=DOY, y= gro_yr, color=as.factor(series))) +
  geom_line( alpha=0.4, linewidth=0.8) +
  geom_point( size= 2, alpha=0.5) +
  labs (x="Dagnummer", y=expression(paste("Vekst (", mu, "m)")),
color="Tre") +
  theme_minimal()

###      GROWTH START (5%)  & STOP (95%)      ###

```

```

# Find average dates per treatment and species for onset and cessation
average_dates <- growth_threshold_long %>%
  group_by(treatment, species, Vekst) %>%
  summarise(avg_DOY =mean(DOY, na.rm=TRUE),
            sd_DOY=sd(DOY, na.rm=TRUE))
print(average_dates)

# Color assigning the treatments and species
average_dates <- average_dates %>%
  mutate(color_group = case_when (
    treatment == "tynning" ~ "tynning",
    treatment == "kontroll" ~ "kontroll",
    treatment == "par" & species == "Picea_abies" ~ "Gran",
    treatment == "par" & species == "Betula_pendula" ~ "Bjork"
  ))
my_colors <- c(
  "tynning"= "#5e3400",
  "kontroll"= "#7cc5c4",
  "Gran"= "#9ad49f",
  "Bjork" = "#8d1f5c"
)

# The treatment comparison should only include the thinned and kontroll
average_dates$new_treatment <- ifelse(average_dates$treatment %in% c("kontroll",
"tynning"), "kontroll/tynning", average_dates$treatment)

# Plot: treatments and species on two different lines in plot
ggplot(average_dates, aes(x=avg_DOY, y=new_treatment, color= color_group,
shape=Vekst)) +
  geom_point(size=7, alpha=0.9)+
  geom_errorbarh(aes(xmin= avg_DOY - sd_DOY, xmax= avg_DOY + sd_DOY),
                height=0.2, linewidth= 0.8)+
  scale_color_manual(values=my_colors) +
  scale_x_continuous(breaks = seq(100,280, by=20))+
  scale_shape_manual(values=c(16,17), labels=c("Vekststart 5%", "Vekstslutt
95%"))+
  labs(x="Gjennomsnittlig dagnummer", y="", color="", shape="")+
  theme_minimal()

```

25% AND 50% GROWTH

```

# Find average dates per treatment and species for onset and cessation
average_dates_25_50 <- growth_threshold_long_25_50 %>%
  group_by(treatment.x, species.x, Vekst) %>%
  summarise(avg_DOY =mean(DOY, na.rm=TRUE),
            sd_DOY=sd(DOY, na.rm=TRUE))
print(average_dates_25_50)

# Color assigning the treatments and species
average_dates_25_50 <- average_dates_25_50 %>%
  mutate(color_group = case_when (

```

```

    treatment.x == "tynning" ~ "tynning",
    treatment.x == "kontroll" ~ "kontroll",
    treatment.x == "par" & species.x == "Picea_abies" ~ "Gran",
    treatment.x == "par" & species.x == "Betula_pendula" ~ "Bjork"
  ))
my_colors <- c(
  "tynning" = "#5e3400",
  "kontroll" = "#7cc5c4",
  "Gran" = "#9ad49f",
  "Bjork" = "#8d1f5c"
)

# The treatment comparison should only include the thinned and kontroll
average_dates_25_50$new_treatment <- ifelse(average_dates_25_50$treatment.x %in%
c("kontroll", "tynning"), "kontroll/tynning", average_dates_25_50$treatment.x)

# Plot: treatments and species on two different lines in plot
ggplot(average_dates_25_50, aes(x=avg_DOY, y=new_treatment, color= color_group,
shape=Vekst)) +
  geom_point(size=7, alpha=0.9)+
  geom_errorbarh(aes(xmin= avg_DOY - sd_DOY, xmax= avg_DOY + sd_DOY),
    height=0.2, linewidth= 0.8)+
  scale_color_manual(values=my_colors) +
  scale_x_continuous(breaks = seq(100,280, by=20))+
  scale_shape_manual(values=c(16,17), labels=c("25% vekst", "50% vekst"))+
  labs(x="Gjennomsnittlig dagnummer", y="", color="", shape="")+
  theme_minimal()

```