



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2025 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Ytre kjennetegn og indre kvistegenskaper til kvalitetsevaluerte stokker av bjørk (*Betula pendula* Roth og *Betula pubescens* Ehrh.)

External Characteristics and Internal Knot Properties
of Quality-Assessed Birch Logs (*Betula pendula* Roth
and *Betula pubescens* Ehrh.)

Joel Eriksson

Skogfag

Forord

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA) har gitt meg muligheten å lære meg i videre og dypere forstand om noe av det mest interessante jeg kjenner- skog, trær og mennesket. Norges vakreste campus hadde ikke vært like vakkert uten de fine menneskene her. Jeg har møtt venner for livet.

Under denne dannelsesreisen har min forståelse for kunnskapsmangel bare vokst, og interessen for å lære mer følger etter. Det blir en sann glede å få omsette kunnskapen delt av landets klokeste skogfaglige hoder til praksis. Jeg retter også et takk i mitt indre til mine forfedre som alltid levde i skogen.

Jeg vil rette en takk til mine veiledere. Professor Geir Isak Vestøl ved Seksjon for fornybar energi og skogvitenskap, for inspirasjon i diskusjoner om egenskaper til trevirke og verdifull veiledning innen treteknologi og modellering. Og til Katrin Zimmer, forsker ved NIBIO, avdeling for treteknologi, for delt engasjement for bjørk, for innspill og oppfølging gjennom hele arbeidet.

Takk rettes også til grunneierne Simen Gjølshø og Hans Birger Stensrud for tilgang til prøvemateriale og interessante samtaler. Takk til Asbjørn Skybakmoen Korntorp, Elias Garvik, Gisle Orheim og Marius Garseg for støtte, hjelpelig innsats ved registreringer og delt interesse for det som i verden vokser.

Takk til min kjæreste Linn Mari Solberg, for alt vi deler.

*"O skog, skog! är det af harm
som löfven rodna, eller är det af hösten?"*

*"Men salig går jag under träden,
de tala med mig i drömmande ton..."*

*"Här är jag fri, här andas jag djupt,
här viskar jorden sin gamla sång."*

Till Skogen – August Strindberg

Sammendrag

Denne masteroppgaven undersøker hvordan ytre kjennetegn, særlig kvistarr, kan brukes til å forutsi indre kvistegenskaper i bjørk (*Betula pendula* Roth og *Betula pubescens* Ehrh.), med mål om å forbedre sortering og utnyttelse av bjørk som sagtømmer. Til tross for at bjørk utgjør en betydelig andel av det norske skogvolumet, er den sterkt underutnyttet som virke. En av hovedutfordringene er at indre kviststruktur reduserer mekaniske egenskaper og visuelle kvaliteten på trelast, og disse egenskapene blir først synlige etter felling. Studien er derfor relevant for å utvikle kostnadseffektive, visuelle feltbaserte indikatorer som kan gi informasjon om treets indre struktur før hogst.

Feltarbeidet ble utført i tre bestander i Sørøst-Norge med ulik bonitet og skjøtselshistorikk. Totalt ni trær ble valgt ut for dybdestudier. Etter felling ble 6 meter stokkene inndelt i avsnitt og stammeskiver, der både ytre og indre kvistkjennetegn ble målt. Kvistarrene ble registrert visuelt og målt med hensyn til høyde, bredde og areal, og klassifisert i fem klasser. Stammeskiver ble analysert ved radielle snitt for å registrere kvistegenskaper som lengde, høyde, diameter og kvistens utviklingstrinn fra frisk kvist til okklusjon.

Analysene viste klare forskjeller i kviststruktur mellom bestandene. Trær fra den lavproduktive, uskøttede bestanden (B63) hadde større kvister, lavere andel ren ved og tregere okklusjon enn trær fra den høyproduktive og skjøttede bestanden (B65), som viste mindre kvister, raskere okklusjon og høyere andel kvistfri ved. Dette peker på at skjøtsel og vekstforhold har stor betydning for treets indre kvalitet.

Ved hjelp av statistiske modeller, inkludert både lineære og blandede regresjonsmodeller, ble det påvist sterke sammenhenger mellom ytre mål på kvistarr og innvendige kvistegenskaper. Høyde og areal av kvistarr var spesielt gode prediktorer for kvistens volum, lengde og diameter, og flere av modellene oppnådde høy forklaringsgrad og lav residualspreddning. Modellene indikerer at enkle målinger av kvistarr i felt kan gi pålitelig informasjon om treets indre struktur, og dermed forbedre sorteringen til ulike bruksformål.

Til tross for begrenset utvalg gir studien et bidrag til forståelsen av kvistegenskaper i bjørk viser hvordan ytre kjennetegn kan brukes som verktøy i praktisk skogbruk. For fremtidig arbeid anbefales det å validere modellene på større og mer varierte datasett, samt å teste digitale målemetoder som kan øke nøyaktigheten.

Abstract

This master's thesis investigates how external characteristics, particularly branch scars, can be used to predict internal branch properties in birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.), with the aim of improving the evaluation of sorting birch as saw timber. Despite birch comprising a significant portion of Norway's forest volume, it is severely underutilized as an industrial resource. One of the main challenges is that internal branch structure reduces the mechanical traits and visual quality of sawn wood, and these features only become visible after felling. Therefore, the study is relevant for developing cost-efficient and visually field-based indicators that can provide information about a tree's internal structure before harvest.

Fieldwork was conducted in three stands in Southeastern Norway with varying site productivity and silvicultural history. A total of nine trees were selected for in-depth study. After felling, the 6m logs were divided into sections and stem disks, where both external and internal branch characteristics were measured. Branch scars were recorded visually and measured in terms of height, width, and area, and classified into five classes. Stem disks were analyzed through radial cuts to register branch traits such as length, height, diameter, and the developmental stage of the branch—from live to occluded.

The analyses revealed differences in branch structure between the stands. Trees from the low-productive, unmanaged stand (B63) had larger branches, a lower proportion of clear wood, and slower occlusion than trees from the high-productive and managed stand (B65), which showed smaller branches, faster occlusion, and a higher proportion of knot-free wood. This indicates that silviculture and growing conditions have a significant impact on internal wood quality.

Using statistical models, including both linear and mixed-effects regression models, strong correlations were found between external measurements of branch scars and internal branch characteristics. The height and area of branch scars were particularly good predictors of branch volume, length, and diameter, and several models achieved high explanatory power and low residual variance. The models suggest that simple measurements of branch scars in the field can reliably indicate internal tree structure and thus improve sorting for various end-uses.

Despite the limited sample size (nine trees), the study makes an important contribution to understanding branch development in birch and demonstrates how external traits can be used as a practical tool in forestry. For future work, it is recommended to validate the models on larger and more varied datasets, as well as to develop digital measurement methods that can increase accuracy and operationalize the use of branch scars in the field.

Innhold

1. Innledning	9
1.1. Bakgrunn.....	9
1.2. Relevans.....	9
1.3. Tidligere studier og problemstillinger.....	12
1.3. Liste over gjentakende symboler	14
2. Materiale og metode	15
2.1. Studieområde og bestander	15
2.2. Utvalg av prøvetrær	17
2.3. Prøvehåndtering	19
2.4. Avsnitt og kvistarr.....	21
2.5. Stammeskiver og kvistprofiler	25
2.6. Kviststruktur	28
2.7. Kvistutvikling	29
3. Statistiske analyser.....	30
3.1. Modellstruktur og generelt uttrykk	30
3.2. Modelltyper og evaluering	32
4. Resultater	32
4.1. Kviststruktur	32
4.1.1. Kvistegenskaper.....	33
4.1.2. Prediksjonsmodeller for indre kvistegenskaper	34
4.1.3. Kvistarr	38
4.2. Kvistutvikling	40
4.2.1. Kviststørrelser	44
5. Diskusjon	48
5.1. Kviststruktur	49
5.1.1. Kvistegenskaper.....	49

5.1.2.	Prediksjon av indre kvistegenskaper fra kvistarr	50
5.1.3.	Vertikal fordeling av kvistarrklasser	52
5.2.	Kvistutvikling	53
5.2.1.	Variasjon i kvistegenskaper mellom bestand	54
6.	Konklusjon.....	55
7.	Litteraturliste.....	56
8.	Vedlegg	59
8.1.	Skjema for feltevaluering.....	59
8.2.	Volum.....	60
8.3.	Gjennomsnittlig åringbredde	61
8.4.	Tabell og grafer for kvistutvikling	62
8.5.	Dokumentasjon avsnitt.....	63

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Dun- og hengebjørk, *B. pubescens* og *B. pendula*, hybridiserer i stor grad (Raulo, 1987) og betegnes heretter i denne studien samlet sett som bjørk. Det er det tredje mest tilgjengelige treslaget i produktiv norsk skog, og utgjør 15 % av det totale skogvolumet (Zimmer et al., 2023). Arten har bred økologisk gradient og forekommer fra lavlandet til høyereliggende fjellskogsområder (Kucera & Næss, 1999; Lidman et al., 2024; Raulo, 1987). Ifølge Landsskogtakseringens tall fra perioden 2017–2021 (referanseår 2019), utgjør det stående volumet av bjørk i Norge 168,4 millioner m³ under bark. Av dette volumet er 43,4 % på lav bonitet (B06–08), 39,7 % på middels bonitet (B11–14), og kun 16,9 % på høy bonitet ($\geq$ B17) (Zimmer et al., 2023). Til tross for et betydelig ressursgrunnlag, er bjørk i dag sterkt underutnyttet (Dubois et al., 2020). I 2021 ble kun 298 605 m³ lauvtretømmer avvirket for salg, hvorav en marginal andel – 1 537 m³ – ble klassifisert som sagtømmer. Det meste gikk til massevirke, mens ytterligere 1,4 millioner m³ ble hogd som brensel til ved. Dette står i skarp kontrast til bjørkas årlige tilvekst, som er estimert til 3,24 millioner m³, og et beregnet avvirkningspotensial på opptil 2 millioner m³ per år (Zimmer et al., 2023).

Resursens industrielle potensial må vurderes ut ifra kategorier som kvantifiserer utbredelse, mengde og fravær av feil. Disse kategorier kjennetegnes av forskjeller i bestandsegenskaper, bestandstetthet, treslagsblanding, trealder, treets sosiale status innen bestand, samt genetikk og sist, men ikke minst skogskjøtselstiltak (Zimmer et al., 2023). Bjørk har høye mekaniske egenskaper og vil egne seg som konstruksjonsvirke i høyere fasthetsklasser (Zimmer et al., 2023), særlig hvis virkesdefekter som innvokste kvister (Kučera, 1983) reduseres eller kontrolleres gjennom skogskjøtsel (Hynynen et al., 2010; Kilpeläinen, 2011; Luostarinen & Verkasalo, 2000).

1.2. Relevans

For å realisere ressurspotensialet er det viktig å utvikle vurderingsverktøy som er raske og presise – både i felt før hogst og ved foredling på sagbruk. Feltbaserte visuelle indikatorer som kan anslå innvendig struktur, særlig kvistegenskaper, kan gi bedre beslutningsgrunnlag for sortering, videre bearbeiding og kommersiell utnyttelse av bjørk som konstruksjonsvirke. Kvist

er en av de viktigste virkesfeilene ved vurdering av skurlastkvalitet hos bjørk (Dunham et al., 1999; Foley, 2003; Heräjärvi, 2001; Kilpeläinen, 2011; Kucera & Myhra, 1996; Kučera, 1983; Lemke et al., 2023; Mäkinen et al., 2003). I tillegg til å påvirke det visuelle utseendet, reduserer kvist trevirkets mekaniske egenskaper (Collins & Fink, 2022; Heräjärvi et al., 2004). Under bøyebelastning på skåren trelast oppstår ofte første sprekk ved en kvist, som deretter forplanter seg gjennom trestrukturen, noe som reduserer bæreevnen (Bucur, 2023; Foley, 2003; Kilpeläinen, 2011; Lemke et al., 2023; Mäkinen, 2002).

I homogent, kvistfritt trevirke følger fiberstrukturen hovedsakelig stammeaksen, hvilket gir maksimal styrke i lengderetningen (Kollmann, 1968). Når en kvist utvikler seg, avviker de nærliggende fibre lokalt for å omkranse kvisten (Foley, 2003; Shigo, 1985). Denne fiberforstyrrelsen, som både innebærer tangentielle og radiale avbøyninger, fører til anisotropiske spenninger og skaper det som betegnes som bruddinitieringspunkter – områder der påført mekanisk last konsentreres og hvor sprekkdannelse lettere starter (Foley, 2003). En utfordring for sagbruksindustri er at viktige kvistegenskaper og fiberforstyrrelser først blir synlige etter felling og bearbeiding (Kuehne et al., 2024; Zolotarev et al., 2020).

Verdipotensialet til bjørk som råstoff til konstruksjonsvirke og visuelt sortert trelast for interiør og møbler, avhenger i størst grad hvordan kvistkarakteristikker påvirker skuruttak og sorteringsklasser. NS-INSTA142 (Standard Norge, 2009) vurderer kvister først og fremst etter kvistens diameter (store kvister gir større fibervinkel og større svekkelse av tverrsnittet), kvistens plassering i skåren last (flat- eller kantsidekvist har ulik innvirkning på bøy- og strekkstyrken), kvistgrupper (summerer antall kvist til største tillate kvist) og kvisttype (gankkvist). Standarden skiller imidlertid ikke eksplisitt mellom frisk- og tørrkvist- noe som gjør at kvistens utvikling og dødsforløp er mindre relevant i standard styrkesortering, men desto viktigere for visuell sortering.

For sortering til interiørformål og møbelprodukter gir derimot visuelle defekter og mengde kvistfri ved langt større utslag. Ifølge Kučera (1983) er det spesifikasjoner knyttet til størrelse av kvist (diameter og lengde), kvisttype (frisk-, tørr-, råte-, barkring- eller løskvist), plassering (hornkvist, hjørne-, flat- eller kantsidekvist), mengde (kvistgruppe) og tørr- og friskkvistlengde som hovedsakelig avgjør klassifisering. Dermed har den indre kviststrukturen- og utvikling stor betydning. Med informasjon om den indre kviststrukturen er det mulig å tilpasse valg av tømmer og optimalisere skuruttak til produksjon av trelast med spesifiserte kvalitetskrav.

(Kilde et al., 2006) viser at bjørk har betydelige mekaniske egenskaper som gjør treslaget attraktivt også for bærende konstruksjoner. Testing av over 1200 lameller av nordisk bjørk viste at bjørk har en karakteristisk strekkfasthet på opptil 34 N/mm² (fasthetsklasse LTB 34) og en elastisitetsmodul på 14 300 N/mm² (Kilde et al., 2006). Disse verdiene tilsvarer eller overgår de som kreves for flere høye fasthetsklasser for limtre av bartre og gjør bjørk aktuelt for produksjon av limtrebjelker i høy styrkeklasse. Bjørk kombinerer høy densitet - 550–600 kg/m³ - med god strekk- og bøyestyrke (Dahlgren et al., 1999; Kucera & Næss, 1999; Lemke et al., 2023; NTI, 2009). Dessuten kan visuell styrkesortering – basert på kviststørrelse, fiberhelling og andre defekter – effektivt klassifisere materialer av bjørk i likhet som for bartrær- i henhold til NS-INSTA 142 (Standard Norge, 2009).

Likevel finnes det i dag ingen gyldige nasjonale standarder for kvalitets- og styrkesortering av bjørk som konstruksjonsvirke, etter at forskriften for måling av sagtømmer og spialtømmer av lauvtre ble opphevet i 2001 (Landbruksdepartementet, 1956). Dette har skapt et regulatorisk tomrom som begrenser utnyttelsen av bjørk og illustrerer et behov for mer systematisk og oppdatert sorteringspraksis for underutnyttede lauvtreslag (Dubois et al., 2020; Zimmer et al., 2023). Dette ble fremhevet for allerede 42 år siden av Kučera (1983) som ettersøkte et tydeligere sorteringsreglement for skurlast av lauvtre, og har siden blitt aktualisert gjennom nyere studier som viser hvordan virkesdefekter påvirker styrke og stivhet (Collins & Fink, 2022; Lemke et al., 2023).

Kviststruktur omfatter de målbare, geometriske egenskapene ved enkeltkvister, som lengde, høyde, diameter, form og vinkel. Disse strukturelle trekkene har betydning for trevirkets kvalitet, blant annet fordi de påvirker styrkeegenskaper (Foley, 2003) og mulighet for sorteringer og videre bearbeiding. Kvistutvikling refererer til de biologiske prosessene som styrer kvistens livssyklus – fra etablering og vekst, gjennom kvistdød og okklusjon, til opphevelse av fiberforstyrrelser. Denne utviklingen påvirkes av både interne faktorer som transport av assimilater og alder, og eksterne forhold, som lysforhold, konkurranse og skjøtselstiltak.

Kvistdød kan inntreffe som følge av flere faktorer, inkludert redusert lyssinnstråling, mekaniske skader, og konkurranse om assimilater (fotosyntese produkter) mellom treets organer (Hynynen et al., 2010). Lav lysintensitet i underskogen begrenser fotosyntesen i eldre, laterale greiner, noe som fører til at de svekkes og dør. I tillegg kan mekaniske belastninger,

som snøbrekk, vindskader eller fallende, nærstående trær, bidra til fysisk skade på greiner. Konkurransen om assimilater intensifiseres i tettere bestander, der veksten prioriteres mot toppskudd og dominante, kronedannende greiner, på bekostning av lavere kvister (Lintunen & Kalliokoski, 2010; Mäkinen, 2002; Mäkinen et al., 2003). Okklusjon betegner prosessen der en avbrutt, død eller beskåren kvist gradvis overvokses og innlemmes av det vaskulære kambiet gjennom sekundær tykkelsesvekst (Hoffmeyer, 1987). Denne prosessen, som kan ta flere år avhengig av arealet som skal overvokses, innebærer at nydannete vedceller omgir og til slutt dekker kvisten (Mäkinen, 2002; Niemistö et al., 2019; O'Hara, 2007).

Denne prosess etterlater en karakteristisk struktur i neveren kalt kvistarr. Dette arret, bestående av forstyrret bark og korkceller, kan observeres i lang tid etter lokal kvistdød- og okklusjon hos bjørk (Novitskaya, 1998). Kvistarrens størrelse og form vil kunne gi viktig informasjon om kvistens tidligere dimensjoner og utviklingshistorie. Gjennom analyser av kvistprofiler i radiell- eller tverrsnitt kan man rekonstruere vekstforløpet og undersøke sammenhenger mellom ytre og indre strukturer (Kuehne et al., 2024; Novitskaya, 1998; Racko, 2013; Torkaman et al., 2018).

1.3. Tidligere studier og problemstillinger

Tidligere studier på ulike lauvtreslag har vist at ytre kjennetegn, som kvistarr, kan brukes til å forutsi innvokste kvistegenskaper. Kuehne et al. (2024) fant sammenhenger mellom dimensjoner på kvistarr og indre kviststørrelse i bjørk. Spesielt var bredde av kvistarr og lengde av forsegling gode indikatorer for tidspunktet for kvistokklusjon. Racko (2013) bekreftet at for bøk kan forholdet mellom kvistarrets høyde og bredde kan brukes til å estimere kvistens plassering og andel ren ved. Thomas (2008) utviklet prediksjonsmodeller for å knytte ytre og indre karakteristikk hos poppel og påviste signifikante sammenhenger, selv om grove barkoverflater kunne svekke nøyaktigheten. Torkaman et al. (2018) viste en tilsvarende sterk korrelasjon for bøk, og påviste at bredde av kvistarr kan brukes til å forutsi kvistens lengde, og at forholdet mellom kvistarrens bredde og høyde anslår radius på tidspunktet for kvistens okklusjon.

De ovennevnte studiene viser potensialet for å bruke ytre trekk til å forstå indre kviststruktur, men det finnes fortsatt et behov for detaljert kunnskap om kvistegenskaper hos bjørk – særlig under norske vekstforhold. De fleste norske tretekniske studier på kvistegenskaper er

gjennomført på bartreslag (Vestøl, 1998; Vestøl & Høibø, 2001; Vestøl & Høibø, 2010). Spørsmål knyttet til variasjon i tidspunkt for kvistdød i høyden, varighet av okklusjonsprosessen og forskjeller mellom bestander med ulik skjøtsel er lite belyst.

Formålet med denne studien er å undersøke hvordan ytre kjennetegn, som kvistarr, sammenhenger med indre kvistegenskaper i rotstokken hos bjørk opp til 6 meters høyde. Studien analyserer variasjon i kviststruktur- og utvikling, og vurderer om enkle visuelle feltregistreringer kan brukes til å anslå kvistegenskaper og drøfte om sortering av kvalitet.

Problemstillinger:

I hvilken grad kan visuelle feltbaserte indikatorer som kvistarr brukes til å anslå indre kvistegenskaper og mengde kvistfri ved i bjørk, og hvilke tendenser kan observeres mellom bestander med ulik bonitet og skjøtselshistorikk?

Hvordan varierer kvistegenskaper- og andeler mellom prøvetrær?

Hvordan er den vertikale fordelingen av kvistarrklasser i stammen, og hvilke trekk kjennetegner dem?

I hvilken grad kan ytre kjennetegn brukes til å predikere indre kvistegenskaper som høyde, lengde, diameter og kvistvolum?

Hvordan påvirker bestandstype og tilvekst kviststruktur, mengde kvistfri ved og okklusjonsrate?

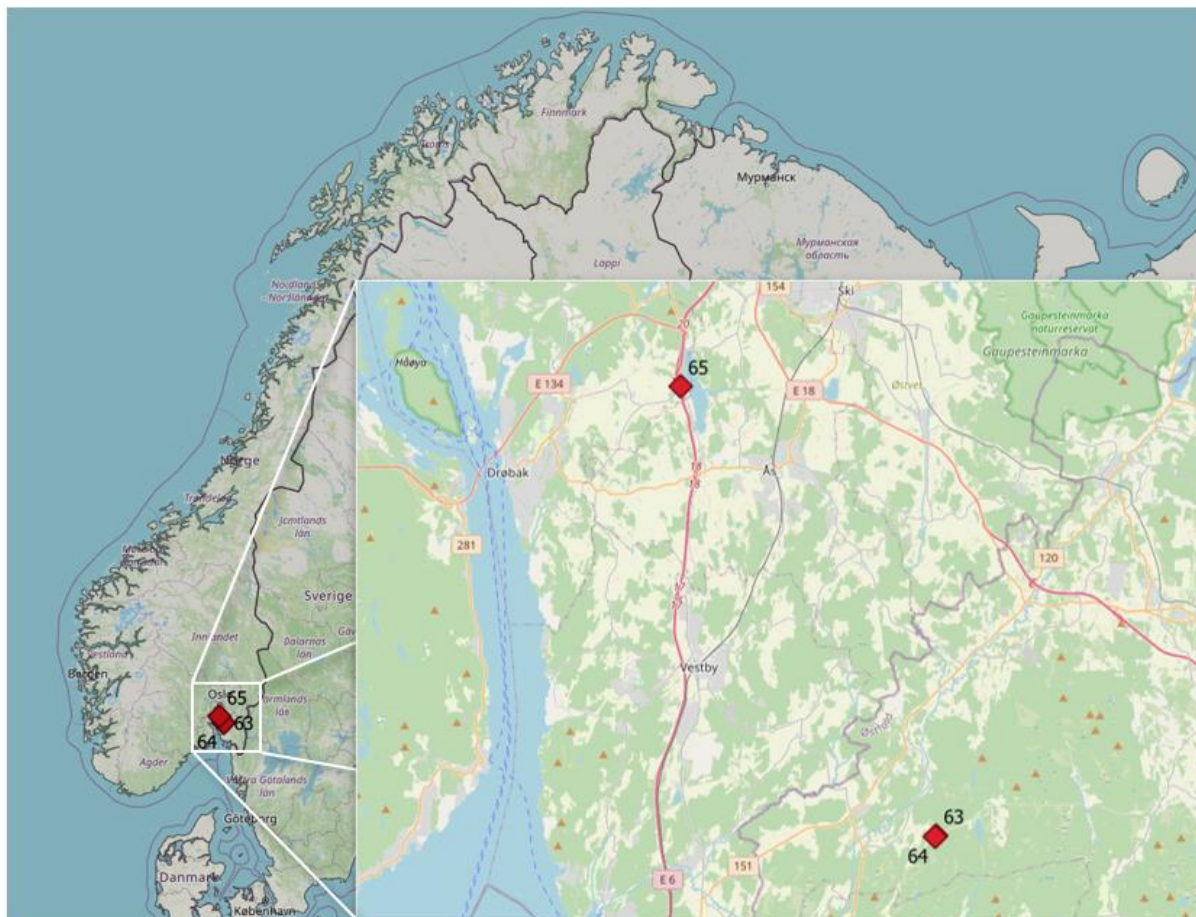
1.3. Liste over gjentakende symboler

Symbol	Variabel	Forklaring / Enhet
B _{ID}	Bestand ID	(prøveflate)
P _{ID}	Prøvetre ID	(tre og 6m rotstokk)
A _{ID}	Avsnitt ID	(60 cm høy seksjon av stokk)
K _{ID}	Kvist/kvistarr ID	(kvistarr og kvist korresponderer på stammeskive)
Dbh	Diameter i brysthøyde	(cm)
A _{Alder}	Avsnitt Alder	årringtelling
D _A	Avsnitt topp diameter	Gjennomsnitt av vinkelrette målinger (cm)
p _{KA}	Posisjon	Plassering (avsnitt, stokk), målt med målestokk (cm)
OR _{KA}	Orientering	Transversal vinkel fra stammens senter 0–360°
H _{KA}	Vertikal høyde av kvistarr	Målt med analogt skyvelær (cm)
B _{KA}	Horisontal bredde av kvistarr	Målt med digitalt skyvelær eller målebånd cm
A _{KA}	Areal av kvistarr	Geometrisk forenklet ved $(H_{KA} * B_{KA}) / 2$ (cm ²)
Θ _{KA}	Vinkel av kvistarr	Vinkel beregnet som $\text{inv.tan.}(H_{KA}/B_{KA})$ grader
Kl. _{KA}	Klassifisering av kvistarr	Arealbestemmelse og visuell bedømmelse
R _{OB}	Radius over bark	Avstand fra marg til ytterste mål (cm)
R _N	Radius til never	Avstand fra marg til laget av never (cm)
R _{UB}	Radius under bark	Avstand fra marg til floem (cm)
R _{UFF}	Siste fiberforstyrrelse	Avstand fra marg der fiberforstyrrelse fra kvist oppheves (cm)
Δ _R	Andel ren ved	$R_{UB} - R_{TK}$
R _{OK}	Radius okklusjon	Avstand fra marg der kvisten er helt overvokst/okkludert (cm)
R _{SK}	Radius til tørrkvist	Avstand fra marg til tørrkvistgrense (cm)
R _{GK}	Radius til friskkvist	Avstand fra marg til friskkvistgrense (cm)
L _K	Kvistens lengde	Diagonal kvistlengde langs vekstretning fra feste til marg (cm)
H _K	Kvistens høyde	Vertikal høyde fra marg til ytterpunkt (cm)
D _K	Kvistens diameter	Diameter på kvisten, målt ved friskkvist (cm)
K.VOL	Kvistvolum	Estimert etter formel 6 og 7
A _{UB}	Alder til prøveemne	Totalt antall årringer som er mulige å måle*
A _{UFF}	Alder uten fiberforstyrrelse	Årringer fra marg til punkt uten fiberforstyrrelser fra kvist
A _{OK}	Alder ved okklusjon	Årringer fra marg til punkt hvor kvisten er okkludert
A _{FK}	Alder til friskkvist	Årringer fra marg til punkt hvor friskkvisten levde

2. Materiale og metode

2.1. Studieområde og bestander

Feltarbeid utførtes høst 2024 i Ås, Akershus, og Bærøe i Indre Østfold i Sørøst-Norge (fig. 1).



Figur 1. Nasjonal- og lokal oversikt av bestand

Studieområdene ble valgt for å representere variasjon i bonitet og skjøtselshistorikk for rene bestander av bjørk i tilsvarende lik alder. Klimatiske forhold i samlet område preges av moderat årlig nedbør (748 – 764 mm) og gjennomsnittlige årstemperaturer på ca. 8,4–8,5 °C. Antall døgngrader over 5°C varierer mellom 2019 og 2096, noe som gir et relativt gunstig vekstklima for bjørk. De tre bestandene som ble studert karakteriseres som følgende:

B63: Lavproduktivt, naturlig forynget bestand på grunt, vannmettet jordsmonn. Ingen skjøtselstiltak. B64: Middels produktivt, naturlig forynget bestand på grunt jordsmonn med sporadisk utført tynning. B65: Høyproduktivt, plantet bestand på dyp jord, systematisk skjøttet med både tynning og kvisting.

Tabell 1 oppsummerer bestandsvariabler brukt innledningsvis i feltevalueringen av bjørkas produksjonspotensial. Bestandene utgjør en deskriptiv gradient i produksjonsevne og skjøtselshistorikk, og muliggjør dermed drøftelser for hvordan disse forutsetningene påvirker kvistegenskaper og potensiell virkeskvalitet.

Tabell 1. oppsummerer bestandsvariabler brukt innledningsvis i feltevalueringen av bjørkas produksjonspotensial

Symbol	Variabel	Enhet	B63	B64	B65
LAT	Breddegrad	grader (°)	59,549521	59,5491658	59,690001
LON	Lengdegrad	grader (°)	10,894679	10,8939926	10,736398
HOH	Høyde over havet	meter (m)	76	77	46
ÅMT	Årlig middeltemp.	°C	8,4	8,4	8,5
ÅMN	Årlig middelnedbør	(mm)	763,7	763,5	748,9
DD	Døgngader (>5°C)	°C	2019,0	2020,2	2096,1
RAD	Radius (prøveflate)	meter (m)	8,92	8,92	8,92
NT	Treantall (prøveflate)		31	26	15
BON	Bonitet	H40	B17	B20	B23
Balder	Bestandsalder	År	39	39	35
REG	Foryngelsestype	(N/P)	Naturlig	Naturlig	Plantet
SC	Skjøtselstiltak	tekst/kode	Ingen	Tynnet	Tynnet, kvistet

Notat 1: Interpolert klimadata for år 2024 er hentet fra <https://www.ibbr.cnr.it/climate-dt/>

Bestandsalder ble oppgitt av grunneiere som 30 år for B63 og B64, og 35 år for B65. For å kontrollere dette ble det gjort årringsmålinger i fem høyder (60– 600 cm) per prøvetre.

Trealder ble beregnet som gjennomsnittet av oppgitt alder og gjennomsnittlig avsnittsalder per tre. Estimert bestandsalder ble deretter beregnet som gjennomsnittet av tre alderne.

Den følgende formelen ble brukt:

$$B_{a_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i + A_i}{2} \right) \quad \text{Formel 1}$$

Hvor:

- B_{a_i} er beregnet alder for bestand i .
- O_i er alderen oppgitt fra grunneier for bestand
- A_i er gjennomsnittet av fem årringsmålinger for prøvetre i
- n er antall prøvetrær i bestanden

2.2. Utvalg av prøvetrær

En representativ prøveflate ble etablert per bestand, der senter ble kartfestet ($r = 8,92$ m; areal ~ 250 m²). For hver prøveflate starter registreringene med treet nærmest senter i nordlig retning og følger solen. Innledningsvis fikk alle bjørketrær over 10 cm (Dbh) i prøveflaten komplett feltregistrering av produksjonspotensialet etter eget skjema ([vedlegg](#) fig. 24), totalt 72stk. Diameter i brysthøyde (Dbh, to vinkelrette klavemålinger), trehøyde (H_{TRE}), høyde til full krone (H_{STEM}), kronelengde (K_{Ltre}) som resultat av $H_{TRE} - H_{STEM}$, høyde til første levende kvist (H_{GKtre}) samt høyde til første svarte kvist (H_{SKtre}) ble registrert for hver bjørk i prøveflata, der høyder registrertes med Vertex høydemåler (tabell 2).

I bestand B63 (*uskjøttet*) var gjennomsnittlig brysthøydiameter 14,8 cm med variasjon fra 6,5 til 28 cm. Trærne hadde en middelhøyde på 15,4 m (7,4 - 23,6 m), og en kronelengde på gjennomsnittlig 7,3 m. Det registrertes 31 trær innenfor prøveflaten, som tilsvarer en tetthet på 1240 trær per hektar. I bestand B64 (*tynnet*) var gjennomsnittlig brysthøydiameter høyere med 18,4 cm (9,3 - 28,5 cm) og trehøydene lå i snitt på 16,7 m (11,3 - 21 m). Kronelengden var i gjennomsnitt 7,6 m for de 26 trær som registrertes innenfor prøveflaten, som tilsvarer omtrent 1040 trær per hektar. Bestand B65 (*plantet, tynnet og kvistet*) viste høyest gjennomsnittlige brysthøydiameter på 22,4 cm (16,8 - 28,5 cm) og høyest trehøyde med 24,4 m i snitt (21,5 - 25,6 m). Kronelengden var også størst med 11,8 m i gjennomsnitt. Tettheten var lavere enn i de andre bestandene, med 15 trær på prøveflaten, tilsvarende 600 trær per hektar.

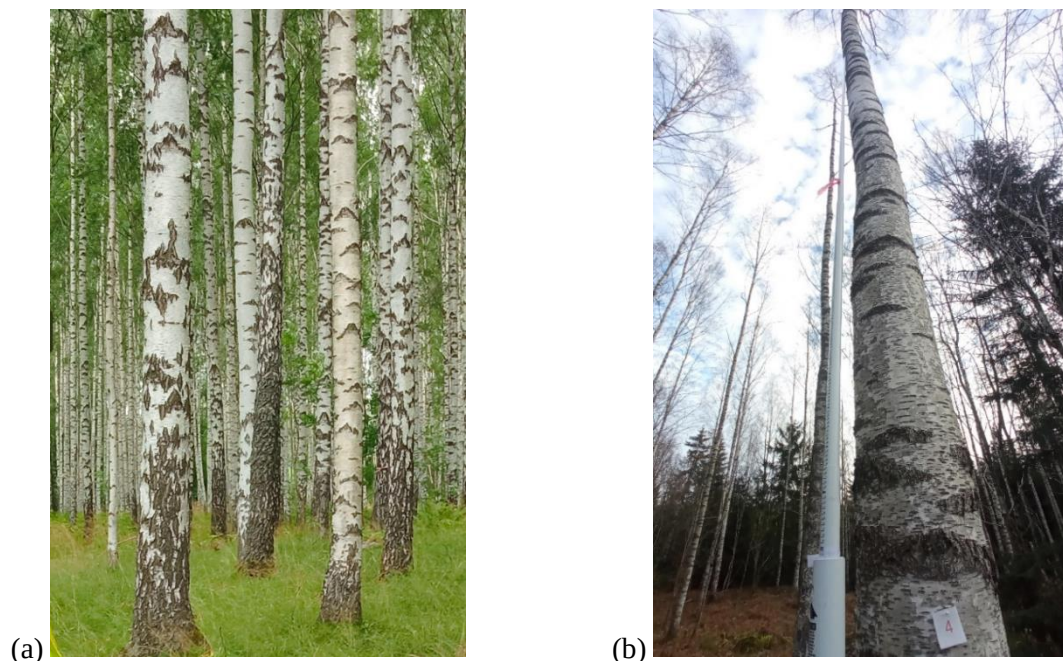
Alle bjørketrær på respektiv prøveflate ble evaluert om de oppfyller minstekrav til sagtømmer; der skader på stokken, føyre, krok (sleng, tverrkrok), langkrok over 3% av potensiell stokklengde (på 3 og 6 m), lenende stammer med mere enn 20 cm avvik fra rettvinklet (på 3 og 6 m (fig. 2b), antall kvist (5 kvist (grønn og svart samlet på 1,5 m) og gankvist, ble ansett som ekskluderingskriterier for videre kvalitetsevaluering og registrert for hvert tre ([vedlegg](#) fig. 24). Dette fulgte fremgangsmåten i prosjektet «Produksjons- og kvalitetstømmerpotensial av plantete og naturlig foryngete bjørkebestand på mineraljord» utført av NIBIO og finansiert av Utviklingsfondet for Skogbruket og Skogtiltaksfondet (2024-2025), der B63, B64 og B65 i denne studien er en del av.

Kriteriene om minstekrav ble valgt etter gjennomgang av eksisterende og tidligere sorteringsregler til bjørk og lauvtre fra Norge, Sverige og Finland (Biometria, 2021; Biometria, 2024; Biometria, 2025; Fjærtøft & Bunkholt, 1994; Herajarvi & Verkasalo, 2002; Landbruksdepartementet, 1956)

Tabell 2. Utvalg av representative variabler for produksjon- og kvalitets potensiale brukt ved registrering av prøvetrær

Symbol	Variabel	Enhet	B63P4	B63P12	B63P16	B64P5	B64P10	B64P14	B65P1	B65P8	B65P13
Dbh	Diameter brysthøyde	(cm)	10,3	23	17,5	17,8	15,8	24,3	17	17,3	26,5
H _{TRE}	Trehøyde	(m)	12,4	21,6	14,1	16,6	17,9	20,1	22,2	21,5	25,2
K _{Ltre}	Kronelengde	(m)	6,7	15,8	8,2	6,7	7,1	13,9	11	9,9	12,3
H _{STEM}	Høyde til krone	(m)	5,7	5,8	5,9	9,9	10,8	6,2	11,2	11,6	12,9
H _{GKtre}	Høyde til grønnkvist	(m)	5	5,8	5,9	9,9	10,8	6,2	11,2	11,6	12,9
H _{SKtre}	Høyde til svartkvist	(m)	5,3	6,9	2,6	7,3	8	-	2,9	9,5	11,8
Lean3	Lenende trær	(cm)	21	-	10	-	-	5	-	20	-
Lean6	Lenende trær	(cm)	-	-	-	-	-	-	-	25	-

Tabell 2 oppsummerer prøvetrevariabler brukt i feltevalueringen av bjørkas kvalitetspotensiale som sagtømmer. For å sikre et representativt utvalg med hensyn til kviststruktur og vekstegenskaper, ble ni prøvetrær tilfeldig trukket ut med 3 intervaller (dbh) mellom 10 og 30 cm ifra hvert bestand.



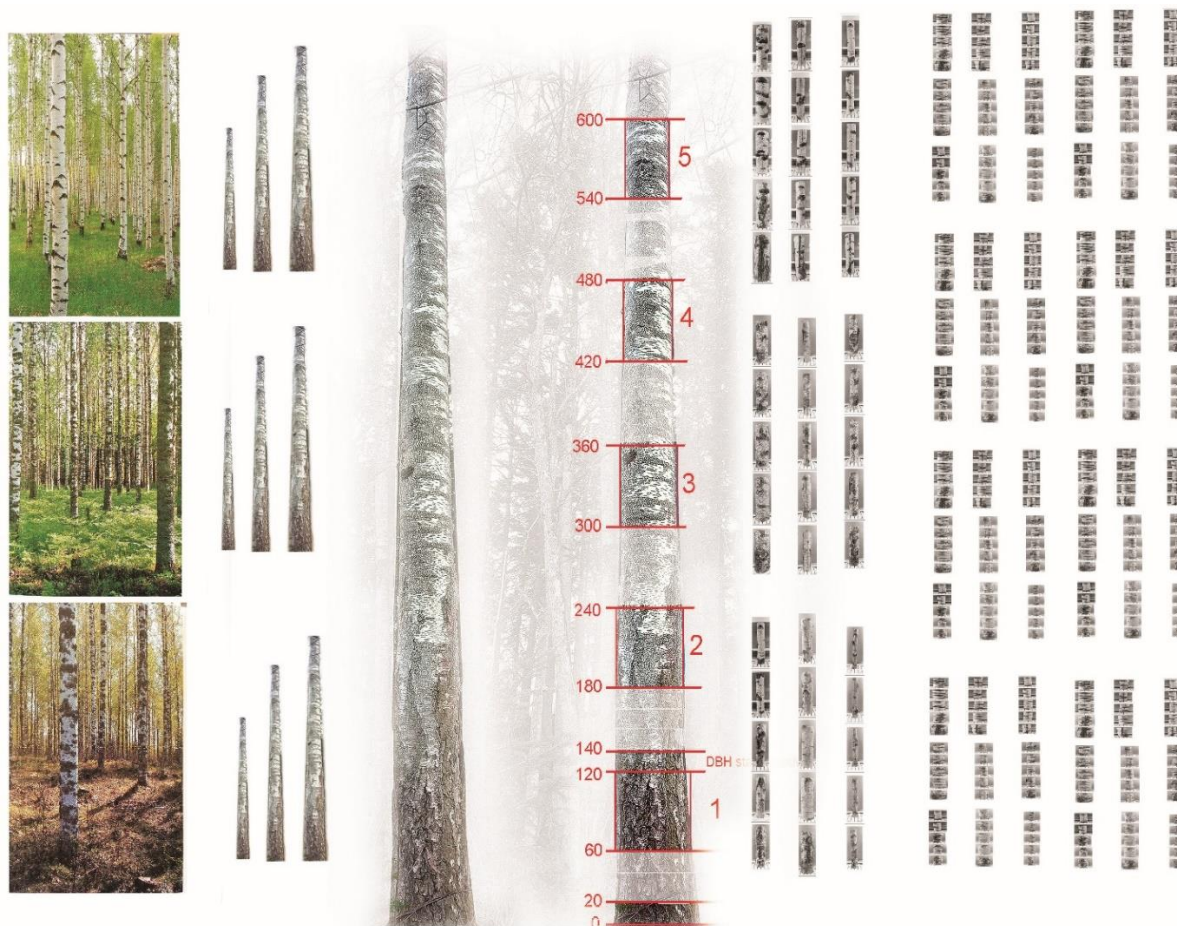
Figur 2.(a) Eksempel fra feltarbeid på bestand av bjørk i skurlastkvalitet.

Fig. 2.(b) Type- og krok blir målt ved vinkelrett avstand mellom stokk og loddrett teleskopstang på 3 m og 6 m

2.3. Prøvehåndtering

Etter feltregistrering av produksjon- og kvalitetspotensiale ble prøvetrærne merket med nordretning før felling. Dette for å dokumentere kvisters transversale (x, y) orientering (OR_{KA}) i forhold til vekstretningen (z). Rotstokker på 6,3 m målt 20 cm over bakkenivå fra deltes i 18 stokker for transport til NIBIOs verksted for videre prøvehåndtering.

Prøvehåndteringen (fig. 3) fulgte en standardisert kvistprofilanalyseprosess (Kuehne et al., 2024) hvor stukkene ble delt inn i fem avsnitt per prøvetre, i faste høydeintervaller målt fra bakkenivå (60–120 cm, 180–240 cm, 300–360 cm, 420–480 cm og 540–600 cm)- supplert med ekstra uttak av stammeskive ved 120–140 cm. Restmaterialet mellom avsnittene ble lagret på verksted.



Figur 3. Prøvehåndtering for ekstraksjon og disseksjon av bjørk: tre bestand, ni prøvetrær, 45 avsnitt og 375 stammeskiver. Under prøvehåndteringen ulike moment tildeltes en unik ID for hvert nivå: bestand (B_{ID}), prøvetre (P_{ID}), avsnitt (A_{ID}) og kvistarr/kvist (K_{ID}) – for eksempel B64P13A2K8.

Stokkvolum for de første 6 meterne av stammen ble beregnet for hvert prøvetre ved hjelp av Huber's formel, basert på registrert toppdiameter for fem 60 cm høye avsnitt:

$$v = \pi \left(\frac{D_A}{2} \right)^2 * H \quad \text{Formel 2}$$

hvor D_A er toppdiameter (cm) for avsnittet, og H er høyden til avsnittet, inkludert ekstrapolering. Volum ble omregnet til liter (dm^3) ved å dele på 1000. Denne metoden gir volumestimering ved jevn avsmalning som forventet til bjørketrærne (Hansen et al., 2023).

Data ([vedlegg](#); tab. 17, fig. 25) viser forskjeller i volum mellom prøvetrær innad og mellom bestandene, noe som bekrefter at utvalget dekker et representativt spenn av tilvekstforhold.

For eksempel hadde stokk B65P13 høyest volum (251 liter), mens stokk B63P4 hadde lavest (36 liter). Bestand B65 hadde gjennomgående høyere volum innen diameterintervallene, reflekterende høy bonitet og aktiv skjøtsel, mens B63 viste lavere verdier og større intern variasjon.

Gjennomsnittlig årringbredde (GÅB) ble beregnet for hvert prøvetre basert på alder og radius:

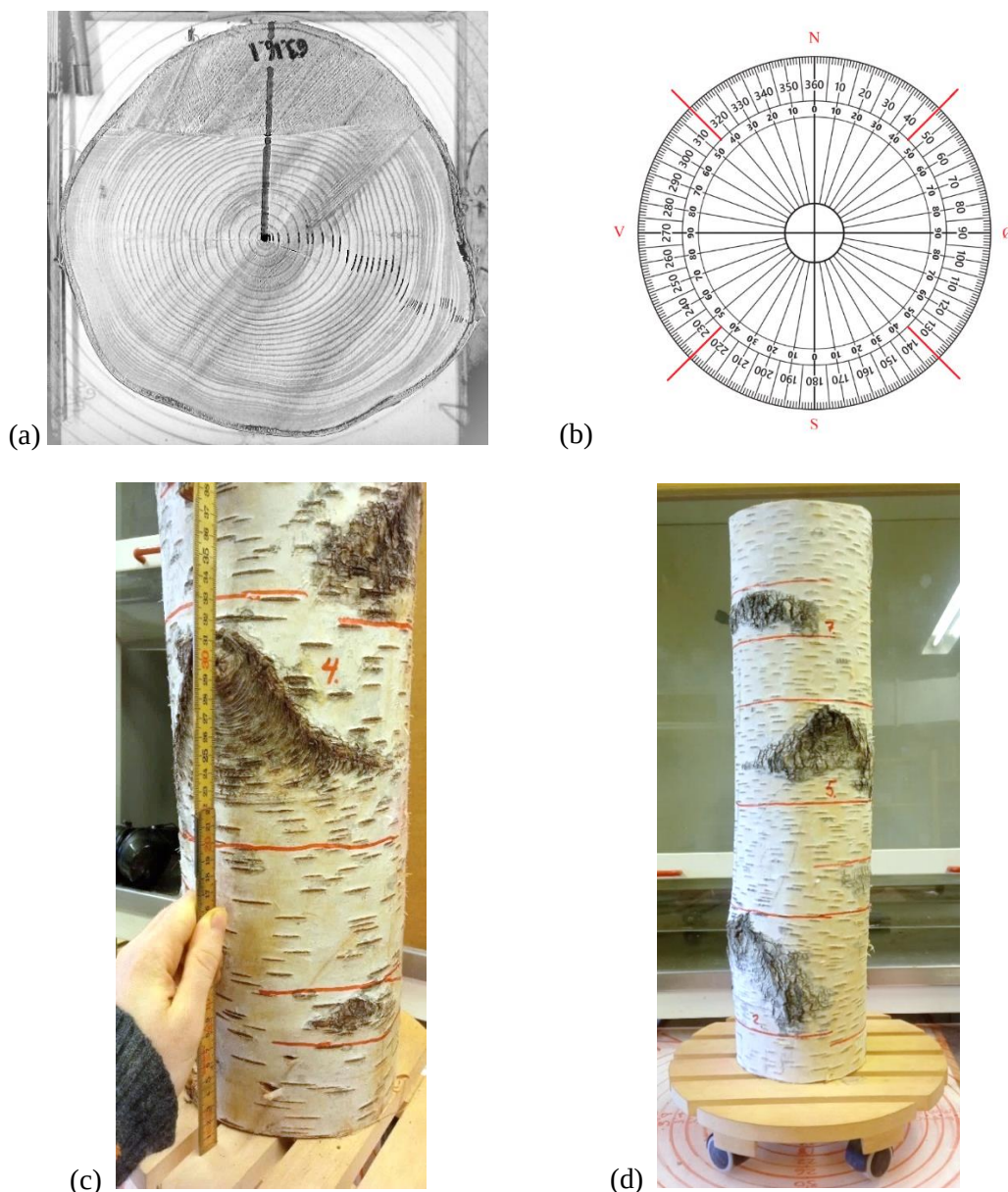
$$G\ddot{A}B = \left(\frac{R_{UB} * 10}{\frac{A_{\text{avsnitt}} + A_{\text{stammeskive}}}{2}} \right) \quad \text{Formel 3}$$

Hvor A_{avsnitt} og $A_{\text{stammeskive}}$ er antall årringer per henholdsvis tverr- og radielt snitt, og R_{UB} er avstand fra marg til under bark (cm). Beregningen forutsetter jevn tilvekst, og gir derfor et forenklet, men nyttig sammenligningsgrunnlag mellom prøvetrær og bestander ([vedlegg](#); tab. 18 og fig. 26, 27).

På bestandsnivå var gjennomsnittlig årringbredde lavest i B63 (1,89 mm) og høyest i B65 (2,66 mm). På prøvetrenivå varierte verdiene fra 1,33 mm (B64P4) til 3,02 mm (B65P13), og gir et rammeverk for å forstå variasjon i kvistutvikling og mengde kvistfri ved (Lintunen & Kalliokoski, 2010; Mäkinen, 2002).

2.4. Avsnitt og kvistarr

Totalt ble 45 avsnitt tatt ut for registreringer (se [vedlegg Dokumentasjon](#)). Tverrsnittet i toppen av hvert avsnitt ble høvlet for å sikre en jevn overflate for å tydeliggjøre årringer og hvor nord-retning ble markert (fig. 4a). Diameter ble målt i to vinkelrette retninger (øst–vest og nord–sør) over bark for å registrere eventuell eksentrisk diameterutvikling.



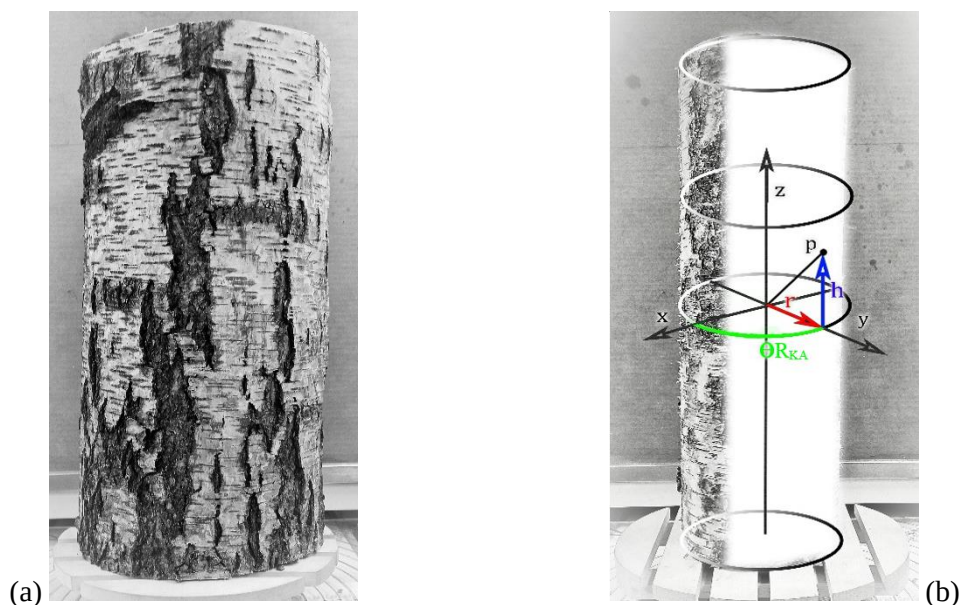
Figur 4. (a) viser øvre tverrsnitt til prøveemne B63P1A1 som er høvlet for å få frem årringstrukturen, kontrasten vises fra sagsporet helt øverst der ID og nord-retning er markert. Her, som dokumentasjonen i vedlegg viser for alle avsnitt, er det økende grad av komprimerte og falske årringer ved senere vekstfase.

Fig. 4 (b) 360° gradskive med kardinalretninger ($N = 315^\circ - 45^\circ$, $\emptyset = 45^\circ - 135^\circ$, $S = 135^\circ - 225^\circ$, $V = 225^\circ - 315^\circ$) ble lagt på tverrsnittet, matchet med nord-retning, så kunde registrering av orientering til kvistarr (OR_{KA}) registreres.

Fig. 4 (c) viser registrering av posisjon til ID_{KA} som starter ved nord-retning i bunn av hvert avsnitt samtidig som OR_{KA} registreres.

Fig. 4 (d) viser nummerering av kvistarr og skjærelinjer for stammeskiver.

Avsnittene plassertes enkeltvis på en rulletralle der alle registreringer starter nederst på nordsiden (fig. 5a). Studieobjektet roteres mot klokken slik at ytre kjennetegn registreres i spiral måte oppover. På hvert avsnitt markeres alle kvistarr med tall og planlagte skjærelinjer for stammeskiver (fig. 4d).



Figur 5. (a) Eksempel bild avsnitt: Nordsiden av B65P13A1.

Fig. 5.(b) Koordinatsystem av en sylinder: x , y , z viser til de ortogonale retningene. OR_{KA} viser til orientering (grader), r viser til alle mål tatt i radius, h er høyden til- og p er posisjon målt ved senter av forsegling til kvistarr

Registreringer for ytre kjennetegn (tabell 3) startet med posisjon (p_{KA}) til hvert kvistarr- som måles fra bunn av avsnitt til forsegling av okkludert kvist i senter av kvistarr (fig. 4c). Akkumulerte høyder ble brukt for å fastslå korrekt høydeposisjon i stokken. Orientering (OR_{KA}) mot kardinalretningene blir registrert ved hjelp av 360° gradskive, med referanse til nordmerking fra feltarbeid (fig. 4a, 4b).

Tabell 3. Utvendige registreringer på avsnitt

Symbol	Variabel	Enhet	Forklaring
A_{ID}	Avsnitt ID	-	1,2,3,4,5 fra bunn til topp
A_A	Avsnitt Alder	-	årringtelling
D_A	Avsnitt topp diameter	(cm)	Gjennomsnitt av vinkelrette målinger
p_{KA}	Posisjon	(cm)	Plassering, målt med målestokk
OR_{KA}	Orientering	(360°)	Vinkel fra stammens senter
H_{KA}	Vertikal høyde av kvistarr	(cm)	Målt med skyvelær
B_{KA}	Horisontal bredde av kvistarr	(cm)	Målt med skyvelær eller målebånd
Θ_{KA}	Vinkel av kvistarr	($^\circ$)	Vinkel beregnet som $\text{inv. tan.}(H_{KA}/B_{KA})$
A_{KA}	Areal av kvistarr	(cm^2)	$(H_{KA} * B_{KA}) / 2$
Kl_{KA}	Klassifisering av kvistarr	(cm^2)	Ut ifra areal og visuell bedømmelse

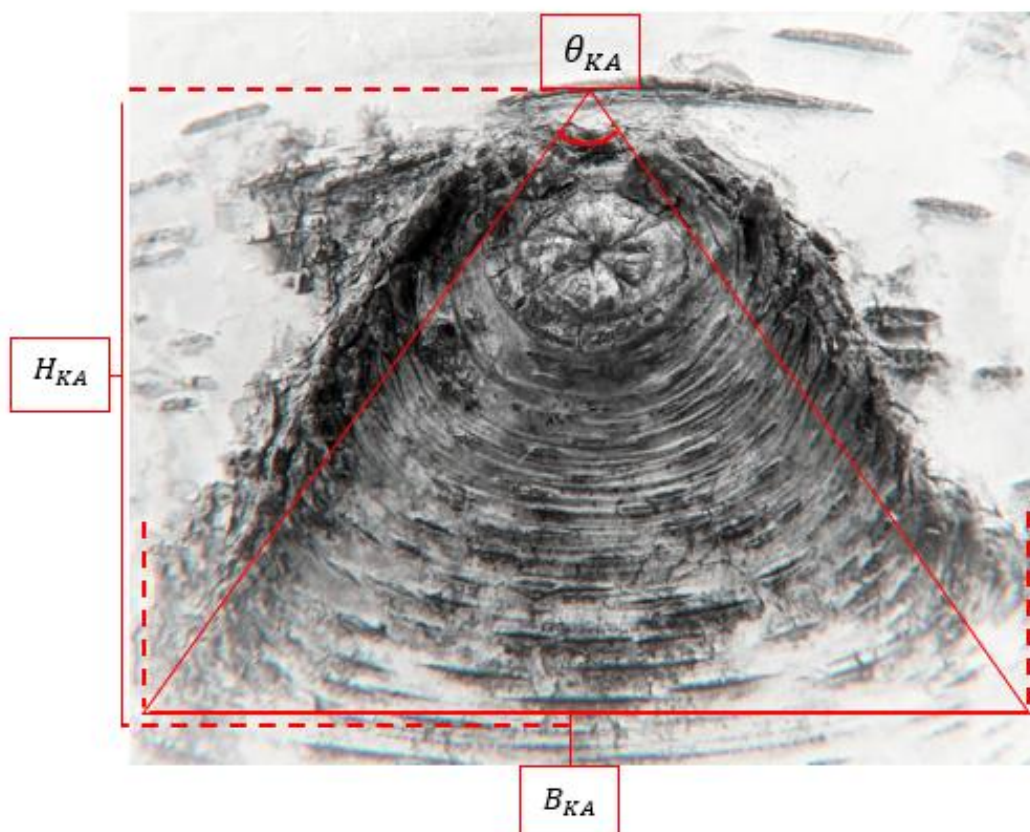
Totalt ble 375 ytre kjennetegn registrert. Klassifisering (tab. 4, fig. 8-10) og registreringer av kvistarr ble gjennomført manuelt med analogt skyvelær og målebånd, i cm med nøyaktighet på ± 1 mm. For kvistarrens form (fig. 6) registreres høyde (H_{KA}) og bredde (B_{KA}) hvor areal til kvistarr (A_{KA}) er beregnet ved bruk av formel 4.

Vinkel til kvistarr (θ_{KA}) beregnes ved å tilnærme kvistarrens form som en rettvinklet trekant, der høyden (H_{KA}) og bredden (B_{KA}) danner vinkelens motstående og hosliggende katet. Dette kan føre til at enkelte kvistarr ble feiltolket grunnet alder (Thomas, 2008) siden tilvekst og fibervinkel kan føre til asymmetrisk form, hvilket understreker behovet for økt forståelse av kvistarrens deformasjon over tid ved økende sekundærvækst.

Den gjennomsnittlige helningsvinkelen estimeres som:

$$\theta_{KA} = \tan^{-1} \left(\frac{H_{KA}}{B_{KA}} \right) * \left(\frac{180}{\pi} \right)$$

Formel 5



Figur 6. Registreringer for kvistarr med skyvelær for å måle direkte distanser mellom ytterpunkter for høyde (H_{KA}) og bredde (B_{KA}) av kvistarr

Utvalget for analysene av kvistprofiler ble trukket på representativt grunnlag ved å systematisk kategorisere karakteristikene etter kvistarrens areal, beregnet som:

$$A_{KA} = \frac{(H_{KA} * B_{KA})}{2} \quad \text{Formel 4}$$

Basert på de beregnede arealene ble observasjonene rangert og kategorisert som «Partall» eller «Oddetall». For videre analyser ble annenhver registrering fra begge grupper inkludert, som resulterte i et utvalg på totalt 181 stammeskiver.

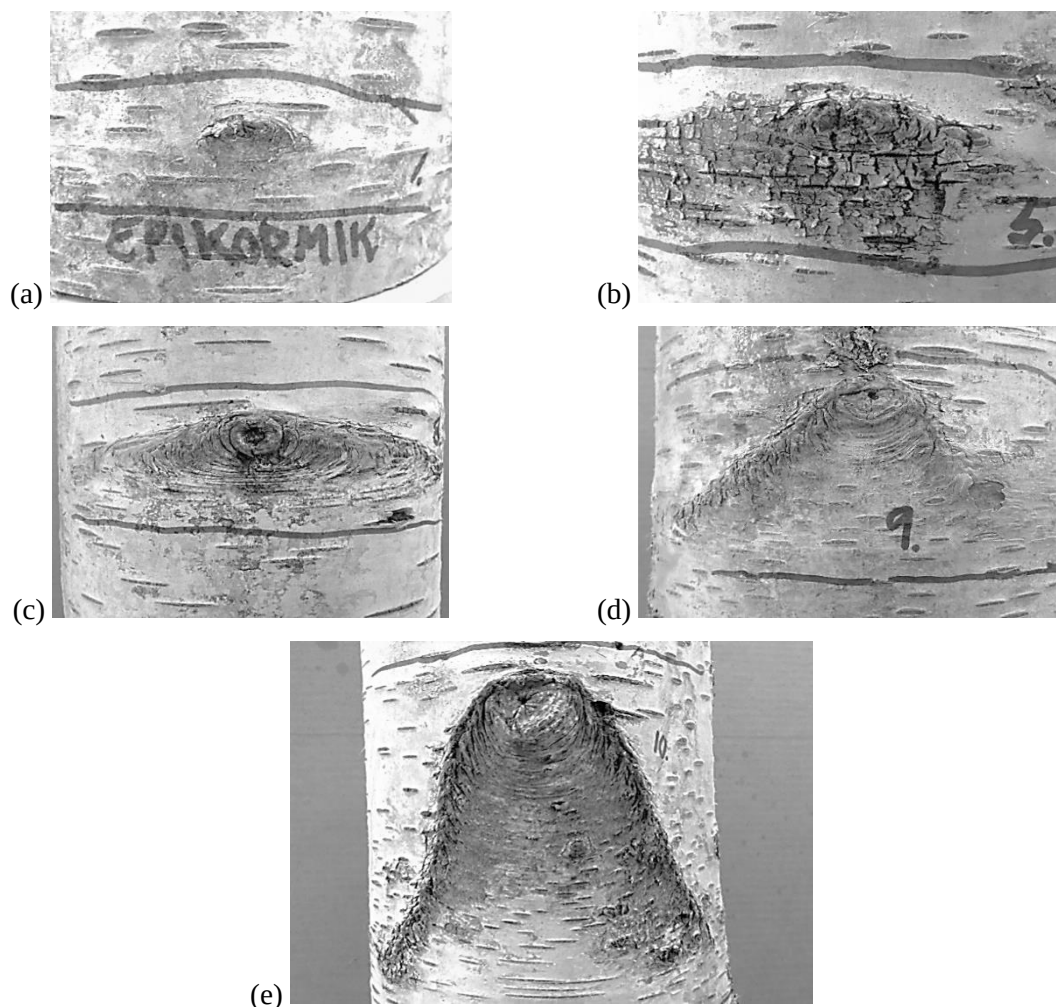
Ytre kjennetegn ble klassifisert i fem klasser (E, F, I, II, III) basert på kombinasjon av areal og visuell kontrast mellom kvistarr og omgivende never struktur (tabell 4, fig. 6 (a-e)).

Bestemmelsen ble notert som merknad i registreringsskjemaet og baserte seg på kvistarrens størrelse (A_{KA}), vinkel og hvor fremtredende korkcelleryggene var. Klassene E og F omfatter henholdsvis epikormiske skudd og forseglinger som ble registrert, men vurderes å ha liten relevans for virkeskvalitet. Klassene I-III representerer kvistarr med økende areal og visuell kontrast mellom arrets rygger og omgivende never.

Tabell 4. Klassifisering av ytre kjennetegn

Variabel	Kl. E	Kl. F	Kl. I	Kl. II	Kl. III
Forklaring	Epikormik	Forsegling	Kvistarr	Kvistarr	Kvistarr
Arealintervall (cm²)	< 8,4	< 8,4	8,5 - 20,9	21,0 - 46,2	> 46,3
Visuell bedømmelse	*	*	-	-	-

Notat: Ytre kjennetegn sorteres inn i klasser ved hjelp av midpunktene mellom klassenes gjennomsnittsarealer og visuell bedømmelse av arrets form, vinkel og kontrast mot øvrig never*.



Figur 7. (a) Kl. E: epikormiske skudd / vannris, opptrer som svak bule, uten rygger av korkceller. (b) Kl. F: forsegling av kvist igjen, uten markerte rygger av korkceller. (c) Kl. I: Kvistarr med svak vinkel og svake korkcellerygger. (d) Kl. II: kvistarr med moderat vinkel og moderate korkcellerygger. (e) Kl. III; Kvistarr med skarp vinkel og skarpe korkcellerygger.

2.5. Stammeskiver og kvistprofiler

Etter registrering og utvalg av ytre kjennetegn på avsnittene, ble stammeskiver skåret ut for videre analyser av kvistprofil og radielt snitt. Basert på seleksjonsprosessen ble totalt 181 stammeskiver skåret ut for måling av innvendig kvistegenskaper. Stammeskivene ble skåret ut vinkelrett på lengdeaksen, ved posisjoner markert ut fra tidligere registrering av kvistarr (fig. 4d). På stammeskivene noteres den endelige ID (fig. 8).



Figur 8. Figur Stammeskiver er sortert etter, - og merket med ID_B:ID_P:ID_A:ID_K

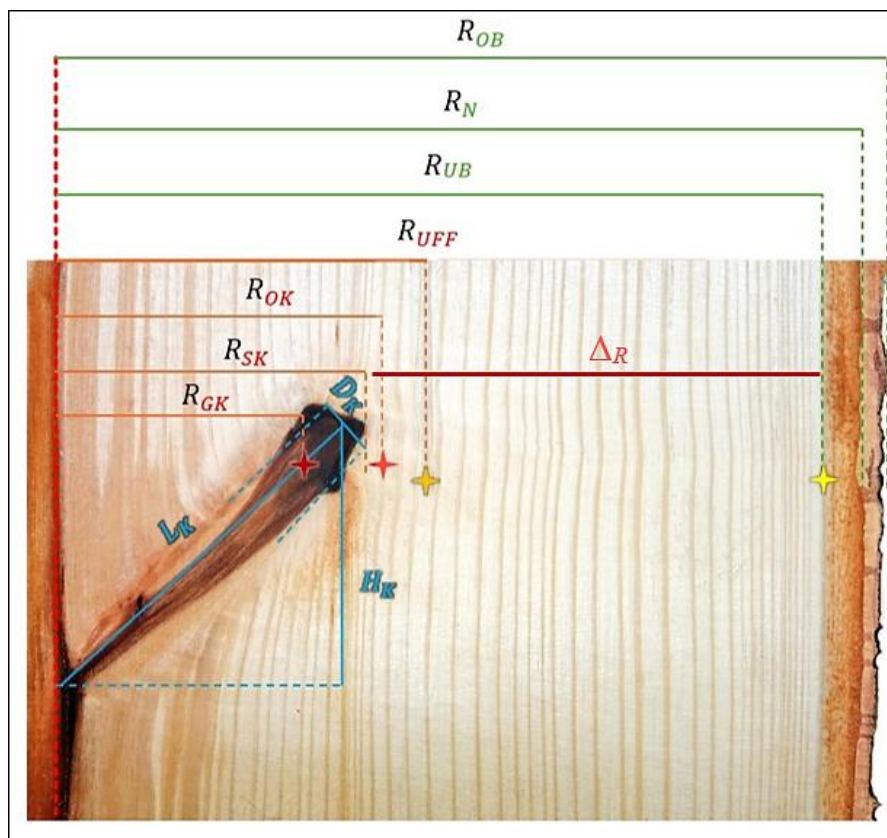
For å kunne analysere kvistprofil sages stammeskiver radialt med utgangspunkt fra senter av kvistarrens forsegling gjennom senter av marg. Noen stammeskiver viste innvirkningen av kvistprofilen på årringenes eksentriske form. Der fulgte sagsnittet fiberstrukturen, snarere enn å skjære rett radielt (fig. 9).



Figur 9. Årringenes eksentriske form gjorde det synlig for hvordan kvisten var orientert fra marg. For flere prøver var det bedre å skjære frihånd enn ren kløyvsaging.

Den ene av de todelte stammeskivene med best kvistprofil, tydeligst vekstsamband mellom kvistens og stammens marg, ble valgt ut som prøveemnene for kvistprofilanalyser.

Variabler (tabell 4) er registrert manuelt ved hjelp av digitalt skyvelær ($\pm 0,1$ mm), og aldersbestemmelser ble utført med lupe. Figur 10 illustrerer målepunktene. Målingene hadde som formål å kvantifisere treets og kvistens relative dimensjoner, samt alderstrinn knyttet til kvistens livssyklus: som frisk kvist, ved okklusjon, og ved opphevelse av fiberforstyrrelser.



Figur 10. Registreringer av kvistegenskaper ved lengde, høyde og diameter av kvistprofil.
 Kviststrukturen registreres ved den radielle utbredelsen gitt ved R- GK, - SK, - OK, - UFF.
 Kvistutviklingens aldersbestemmelser vises ved stjerner til variabler som markerer utviklingstrinn- og rate:
 -UB, -UFF, -OK og -GK.

Ut ifra de radielle målene (jf. Fig 10, tabell 5) kan man vurdere hvordan stadier i kvistutviklingen påvirker mengden av kvistfri ved, hvilket er avgjørende for trevirkets kvalitet (Lemke et al., 2023; Shigo, 1985).

R_{OB} representerer total radius inkludert ytre barklag for hvert prøveemne. R_N og R_{UB} dokumenterer tykkelsen på kork- og floemlaget.

R_{UFF} (siste fiberforstyrrelse), R_{OK} (radius ved okklusjon), R_{SK} (radius til tørrkvist), og R_{GK} (radius til friskkvist) markerer strukturen til kvistens stadier fra levende kvist, gjennom død tørrkvist, til full okklusjon (den første vertikale, sammenhengende årringen utenfor tørrkvist). ΔR (andel ren ved) beregnes ut ifra $R_{UB} - R_{SK}$.

Kvistegenskaper som lengde (L_K), høyde (H_K) og diameter (D_K) er grunnlaget for hvordan størrelse og form påvirker sannsynligheter for lokal bruddinitiering under mekanisk belastning (Foley, 2003; Kilpeläinen, 2011).

2.6. Kviststruktur

Kviststruktur omfatter de målbare, geometriske egenskapene ved enkeltkvister, som lengde, høyde, diameter, form og vinkel. Indre kvistegenskaper ble registrert på stammeskiver gjennom radielle snitt fra kvistens feste til marg (fig. 10). Mengde kvistfri ved ble estimert ved å sammenligne radius med og uten kvistandel, uttrykt både i absolutte og relative verdier.

Resultater ([vedlegg](#); tab. 15, fig. 29) viste tydelige forskjeller der B63 hadde 33 – 49 % ren ved, med høy andel kvist. B64 hadde moderat mengde kvistfri ved (37 – 56 %) og B65 hadde størst andel (44 – 56 %). Disse forskjellene vurderes som viktige, da mengde kvistfri ved kan relateres til treets sorteringskvalitet i henhold til Kucera og Myhra (1996). Det ble observert at trær med høy tilvekst hadde både høyere mengde kvistfri ved og lavere kvistandel. Dette antyder en sammenheng mellom vekstforhold, skjøtselstiltak og utvikling av kvistfrie soner i bjørk (Hynynen et al., 2010; Mäkinen, 2002; Niemistö et al., 2019).

Geometriske variabler som kvistens lengde (L_K), høyde (H_K) og diameter (D_K) ble registrert. Fra disse registreringer ble kvistvolum (K_{VOL}) beregnet som summen av en sylinder og en kjegle, justert med vinkel, ved:

$$K_{VOL} = v_{sylinder} + v_{kjegle} \quad \text{Formel 7}$$

$$v_{sylinder} = \pi \left(\frac{D_K}{2} \right)^2 * (R_{SK} - R_{GK}) / \cos(\theta) \quad \text{Formel 8}$$

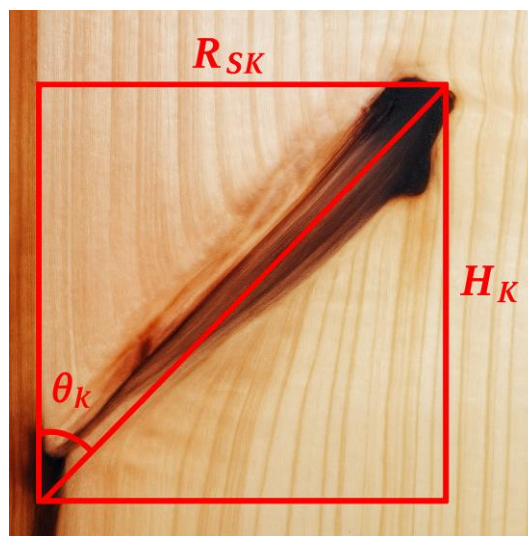
$$v_{kjegle} = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{D_K}{2} \right)^2 * R_{GK} / \cos(\theta) \quad \text{Formel 9}$$

Der K.vol - modellen prøver å ta hensyn til kvistens naturlige utvikling der kvisten holder jevn sylindrisk diameter fra tørrkvistgrense (R_{SK}) til friskkvistgrense (R_{GK}) som smalner til margen. Videre ble målene brukt som responsvariabler i modeller med variabler til kvistarr (H_{KA} , B_{KA} , og A_{KA}) som responsvariabler (tabell 3).

Kvistvinkel har betydning for hvordan fibre rundt kvisten forstyrres av videre diameterilvekst (Foley, 2003). I denne studien er vinkel til kvist (θ_K) beregnet som vinkelen mellom kvistens lengderetning og radien til stammen, ved hjelp av formelen:

$$\theta_K = \arctan\left(\frac{H_K}{R_{SK}}\right) \quad \text{Formel 5}$$

hvor H er høyden (vertikal avstand) og R er radien (horisontal avstand) fra kvistens forgreining fra marg. Vinkelen ble utregnet i JMP og uttrykkes i grader ($^{\circ}$) (fig. 12).



Figur 11. Kvistvinkel

2.7. Kvistutvikling

Aldersregistreringer ble innhentet ved å telle årringer i radialretning fra margen mot bark (jf. Tabell 10 og fig. 10) som gir innsikt når kvisten var frisk, hvor raskt kvistdød og påfølgende okklusjon skjer, og når fiberforstyrrelser oppheves. Hver målt alder er aggregert på avsnittsnivå per prøvetre og brukt som gjennomsnittlig estimat per bestand. Resultatene danner grunnlag for drøftelser for kvistens utvikling og okklusjonsprosess.

Tabell 5. Registreringer av innvendige karakteristikk. Enhet for radielle mål og Kvistgeometri er i cm.

Symbol	Variabel	Forklaring
Radielle mål		
R_{OB}	Radius over bark	Ytterste mål fra marg
R_N	Radius til never	Avstand fra marg til never
R_{UB}	Radius under bark	Avstand fra marg til floem
R_{UFF}	Siste fiberforstyrrelse	Avstand fra marg til punkt uten fiberforstyrrelser fra kvist
Δ_R	Andel ren ved	$R_{UB} - R_{SK}$
R_{OK}	Radius okklusjon	Avstand fra marg til punkt der kvist er okkludert
R_{SK}	Radius til tørrkvist	Avstand fra marg til ytterste punkt av tørrkvist
R_{GK}	Radius til friskkvist	Avstand fra marg til punkt hvor friskkvisten levde
Kvistgeometri		
L_K	Kvistens lengde	Diagonal kvistlengde langs vekstretning
H_K	Kvistens høyde	Vertikal høyde (fra marg til ytterpunkt)
D_K	Kvistens diameter	Diameter på kvisten, målt ved friskkvist
Aldersbestemmelser		
A_{UB}	Alder til prøveemne	Totalt antall årringer som er mulige å måle*
A_{UFF}	Alder uten fiberforstyrrelse	Årringer fra marg til punkt uten fiberforstyrrelser fra kvist
A_{OK}	Alder ved okklusjon	Årringer fra marg til punkt hvor kvisten er okkludert
A_{GK}	Alder til friskkvist	Årringer fra marg til punkt hvor friskkvisten levde

Notat 2: Alle radielle målinger er tatt fra marg mot bark, målt i mm, men konvertert til cm i senere analyser. *Aldere er de maks mulig tellbare antall årringer fra marg mot bark. Mer om dette i Diskusjon.

3. Statistiske analyser

Formålet med de statistiske analysene var å undersøke hvordan utvendige mål på kvistarr kan brukes til å anslå egenskaper ved innvokste kvister. For dette ble det utviklet et sett med modeller med varierende kompleksitet, fra enkle lineære til blandede modeller med tilfeldige effekter. Hensikten var å identifisere hvilke forklaringsvariabler som har størst betydning for de respektive responsvariablene, samt å vurdere hvilken modellstruktur som best fanger variasjonen i datasettet, inkludert variasjon mellom prøvetrær.

3.1. Modellstruktur og generelt uttrykk

Modellene ble spesifisert som multiple lineære regresjoner, delvis med tilfeldig intercept for å fange effekter knyttet til variasjon mellom trær. Den generelle modellstrukturen som ble brukt følger:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 H_{KA_{ij}} + \beta_2 B_{KA_{ij}} + \beta_3 H_{KA_{ij}} B_{KA_{ij}} + u_j + \varepsilon_{ij}$$

Formel 11

Der:

Y_{ij} er den avhengige variabelen (tabell 5) for kvist i for tre j

β_0 er konstantleddet

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ er faste effekter

$H_{KA_{ij}}, B_{KA_{ij}}$ er forklaringsvariabler (tabell 5) hver for seg eller som interaksjonsledd

$u_j \sim N(0, \sigma_u^2)$: tilfeldig effekt for prøvetre

$\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$ er residualledd

Alle kontinuerlige forklaringsvariabler ble sentrert rundt sitt gjennomsnitt for å redusere multikollinearitet mellom hoved- og interaksjonseffekter. Modellene ble estimert med minste kvadraters metode (OLS) eller Restricted Maximum Likelihood (REML) for modeller med tilfeldige effekter. Modellutvelgelse ble basert på informasjonsteoretiske kriterier (AIC, BIC), justert R^2 og diagnostikk av residualstruktur. Variabler med p-verdi $> 0,1$ ble vurdert for eksklusjon for å unngå overtilpasning.

I analysene ble følgende kvistegenskaper (tabell 6) benyttet som avhengige responsvariabler. Alle kontinuerlige forklaringsvariabler ble sentrert før modellering for å unngå korrelasjon mellom hoved- og interaksjonseffekter.

Tabell 6. Variabler brukt for modellering

Forklaringsvariabler	
H_{KA}	Vertikal høyde av kvistarr (cm)
B_{KA}	Horisontal bredde av kvistarr (cm)
A_{KA}	Areal av kvistarr (cm ²)
P_{ID}	Prøvetre ID (tre og stokk), behandlet som tilfeldig effekt
$H_{KA} * B_{KA}$	Eventuelt interaksjonsledd
Responsvariabler	
L_K	Kvistens lengde (cm)
H_K	Kvistens høyde (cm)
D_K	Kvistens diameter (cm))
R_{SK}	Tørrkvistens radius (cm))
Δ_R	Mengde kvistfri ved ($R_{UB} - R_{TK}$) (cm)
Vol_K	Kvistvolum (cm ³)

3.2. Modelltyper og evaluering

I analysene ble det benyttet både enkle og multiple lineære regresjonsmodeller, samt blandede modeller med- og uten tilfeldige effekter. Enkle regresjoner ble brukt som utgangspunkt for å vurdere styrken i bivariate sammenhenger mellom forklarings- og responsvariabler. De multiple modellene inkluderte i tillegg et interaksjonsledd der det var på måte biologisk og statistisk begrunnet.

For å fange mulige avhengigheter mellom observasjoner fra samme prøvetre, ble det testet blandede modeller med tilfeldig intercept for P_{ID} . Disse ble estimert med restricted maximum likelihood (REML). I tilfeller der residualstrukturen antydte en mønstret, gruppert varians – som for kvistvolum (Vol_K), mengde kvistfri ved (ΔR) og radius til tørrkvist (R_{SK}) – viste modeller med tilfeldige effekter bedre tilpasning enn modeller uten.

Modellutvalget ble basert på forklaringsgrad (justert R^2), informasjonskriterier (AIC, AICc, BIC), samt residualdiagnostikk. Variabler ble vurdert ut fra t-verdi, som sier hvor stor effekten er, relativt hvor usikker den er- og p-verdi som angir statistisk signifikans. Variabler med lav signifikans ($p > 0,1$) ble fjernet for å unngå overtilpasning og redusere multikollinearitet. Alle kontinuerlige forklaringsvariabler ble sentrert før modellering.

4. Resultater

4.1. Kviststruktur

For å undersøke kvistenes egenskaper- og utvikling i det radielle planet, ble det kartlagt flere punkter/variabler hvorav seks ble valgt ut i denne analysen: R_{OB} (over bark), R_{UB} (under bark), R_{OK} (okkludert), R_{SK} (tørrkvist) og R_{GK} (friskkvist). Målingene viser utviklingen til innvokst kvist og hvordan forløpet varierer med høyden i stammen. Som oppsummert i tabell 5 har bestand 63 gjennomgående høyere gjennomsnittsverdier for kvistrelaterte variabler sammenlignet med bestand 65. Dette gjelder spesielt for radius til tørrkvist (R_{SK}), friskkvist (R_{GK}) og okklusjon (R_{OK}), noe som antyder at kvistene i bestand 63 har større fysisk utbredelse og lever lenger før okklusjon.

4.1.1. Kvistegenskaper

Kvistens egenskaper hører til deres geometriske utforming. Størrelsesforholdet for enkeltkvister medfører egenskaper i levende tre, som overføres og endres under skåren og tørket trelast. (Kucera, 1998; Nordhagen & Gjølshø, 2013; Sverre Tronstad, 1995).

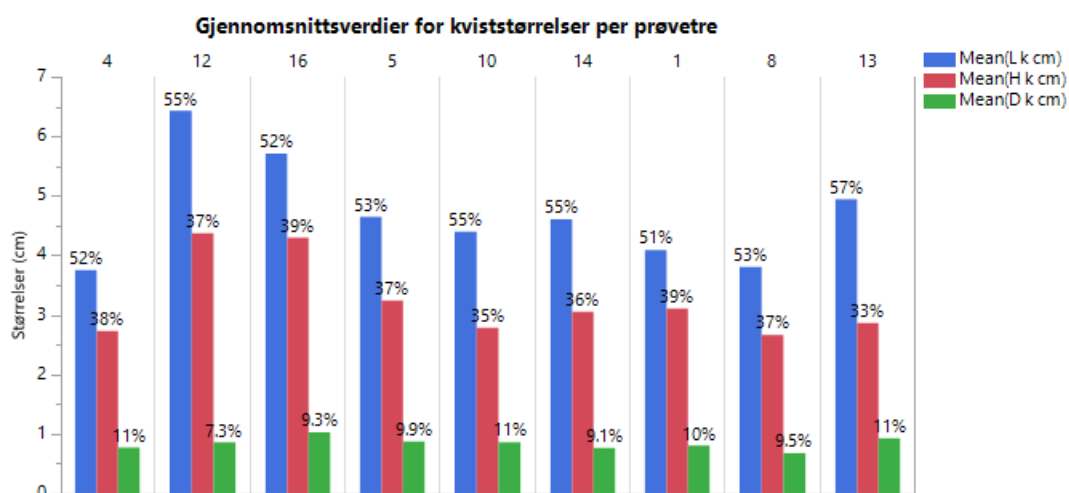
Kviststørrelser er gjennomsnittsverdier av alle stammeskiver per prøvetre. Gjennomsnittsverdiene for kvistlengde (L_k), kvisthøyde (H_k) og kvistdiameter (D_k) viser tydelige forskjeller både mellom prøvetrær og bestander.

Tabell 7. Kvistegenskaper per prøvetre ved gjennomsnitt, standardavvik, minimum og maksimum for lengde, høyde og diameter.

Bld	Pld	N	L k cm				H k cm				D k cm			
			Gj.Sn.	S.D.	Min	Maks	Gj.Sn.	S.D.	Min	Max	Gj.Sn.	S.D.	Min	Maks
63	4	17	3,8	1,2	2,0	6,6	2,7	1,5	0,5	5,2	0,8	0,3	0,3	1,3
	12	21	6,4	4,4	1,0	18	4,4	4,2	0,2	17	0,9	0,5	0,1	2,1
	16	17	5,7	3,3	1,8	13	4,3	3,0	0,9	10	1,0	0,5	0,3	2,3
64	5	16	4,6	2,2	0,3	8,3	3,2	2,1	1,1	8,4	0,9	0,3	0,4	1,4
	10	20	4,4	1,4	1,9	8,2	2,8	1,4	0,5	7,2	0,9	0,3	0,3	1,5
	14	12	4,6	2,7	1,5	11	3,1	2,4	0,5	9,6	0,8	0,4	0,2	1,7
65	1	19	4,1	2,3	0,8	8,9	3,1	2,6	0,4	8,4	0,8	0,6	0,1	2,2
	8	21	3,8	2,4	0,6	8,0	2,7	2,2	0,2	8,2	0,7	0,5	0,1	1,9
	13	20	4,9	2,0	2,0	8,2	2,9	1,8	0,4	6,2	0,9	0,5	0,2	2,4

B63 har høyest variasjon i kviststørrelse. Prøvetre 12 og 16 skiller seg ut med store kvister ($L_k > 5$ cm, $H_k > 4$ cm), og prøvetre 12 har også den høyeste maksimumsverdien ($L_k = 18$ cm, $H_k = 17$ cm). Dette tyder på enten tidligere kvistdød eller sen okklusjon, noe som reduserer andel ren ved. B64 viser jevne og mellomstore kvister ($L_k \approx 4,5$ cm), men også høy intern variasjon (f.eks. L_k fra 0,3 til 11 cm i prøvetre 14).

Dette indikerer et mer blandet kvistutviklingsforløp og muligens ulik primærvekst. B65 har de minste kvistene totalt sett, med L_k i området 3,8–4,9 cm og relativt lav standardavvik. Dette støtter tidligere observasjoner om rask kapsling og høy andel ren ved. Den lave kvistdiameteren ($D_k \approx 0,7$ – $0,9$ cm) styrker potensialet for høyere sorteringsklasse og god overflatekvalitet på skåren last.



Figur 12. Gjennomsnittlig kvistlengde (L_k), kvisthøyde (H_k) og kvistdiameter (D_k) for hvert prøvete. Størrelsene er uttrykt i centimeter (venstre akse), og prosentvis andel av total kviststørrelse (høyre akse). Figuren viser tydelige forskjeller i kvistdimensjoner mellom trær fra ulike bestander, hvor trær fra bestand B63 har størst kvister og høyest variasjon, mens B65 viser minst kvister og lavest standardavvik

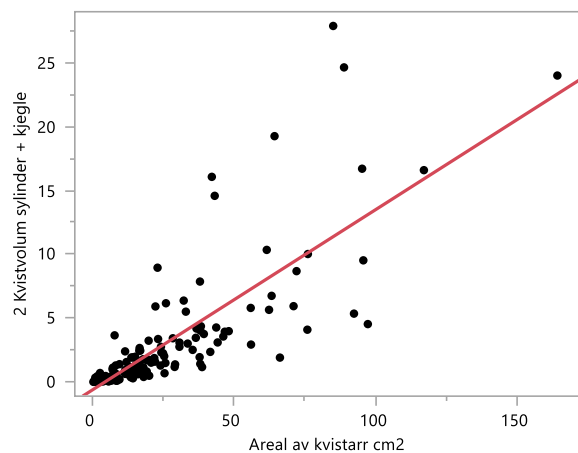
4.1.2. Prediksjonsmodeller for indre kvistegenskaper

Alle modeller som følger, er basert på innvokste kvister som er fullstendig okkludert. Greiner som er fortsatt levende diskrimineres da kvistarrene er påvirket. Målet her er å presentere de modellene som er utviklet for å predikere indre kvistegenskaper (tabell 13, 14, 15).

Tabell 8. Oppsummert tabell for Mixed Models

Modeller	Variabel	Estimat	SE	t-verdi	p-verdi	RMSE*
K _{·VOL}	Intercept	0,837	0,285	2,94	0,0040	2,45
	A _{KA}	0,193	0,034	5,74	<0,0001	
	B _{KA}	-0,292	0,083	-3,51	0,0007	
L _K	Intercept	0,791	0,201	3,93	<0,0001	1,30
	B _{KA}	0,121	0,027	4,54	<0,0001	
	H _{KA}	0,668	0,057	11,82	<0,0001	
H _K	Intercept	-0,269	0,149	-1,81	0,0725	0,92
	H _{KA}	0,776	0,042	18,64	<0,0001	
D _K	Intercept	0,155	0,039	4,00	<0,0001	0,36
	B _{KA}	0,022	0,005	4,36	<0,0001	
	H _{KA}	0,113	0,011	10,37	<0,0001	
	B _{KA} × H _{KA}	-0,002	0,001	-2,00	0,0471	
R _{GK}	Intercept	1,116	0,179	6,23	<0,0001	0,62
	B _{KA}	0,139	0,023	5,83	<0,0001	
	H _{KA}	0,453	0,050	9,02	<0,0001	
Δ _R	Intercept	6,961	0,366	19,05	<0,0001	1,97
	Areal _{KA}	0,057	0,015	3,87	0,0002	
	H _{KA}	-1,083	0,152	-7,15	<0,0001	
Vol. _K	Intercept	-0,027	0,273	-0,10	0,9703	2,45
	Areal _{KA}	0,153	0,027	5,74	<0,0001	
	B _{KA}	0,196	0,079	2,50	0,0134	

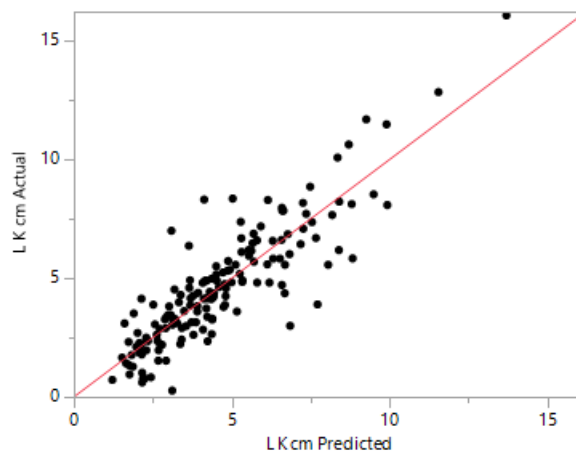
Notat: 1*RMSE (Root Mean Square Error) angir den gjennomsnittlige feilen mellom observerte og predikerte verdier; Den beregnes som kvadratroten av gjennomsnittet av kvadrerte residualer; og uttrykkes i samme enhet som responsvariabelen, Lavere RMSE betyr høyere presisjon,



Figur 13. Modell $K.VOL = 0,837 + 0,193 * A_{KA} - 0,292 * B_{KA}$

Modellen for å predikere kvistvolum ($K.VOL$) ble testet med forklaringsvariabler bredde (BKA), høyde (HKA) og areal (AKA) av kvistarr som ble vurdert hver for seg, og i kombinasjon. Interaksjonsleddet ble forkastet ($> 0,1$) og HKA ble forkastet ($p = 0,1964$). Etter sammenligning av flere modeller ble $K.VOL$ predikert ved en fast effekt-modell med areal og bredde, (mixed modell uten tilfeldige effekter av prøvetrær), som ga best resultat.

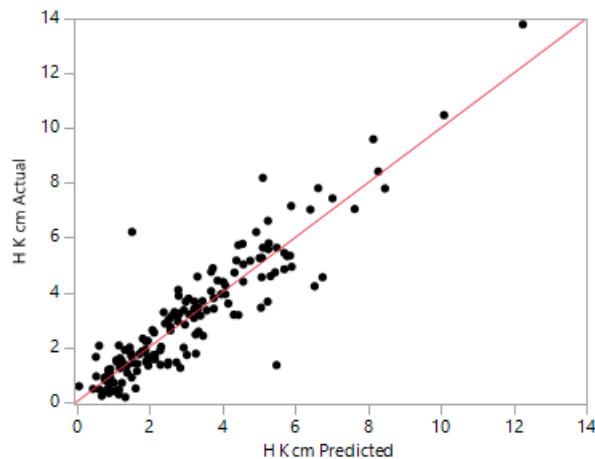
Modell L_K - Begge forklaringsvariabler var signifikante ($p < 0,0001$), og høyde viste den sterkeste sammenhengen ($t\text{-ratio} = 11,82$). Residualspredningen (RMSE) var 1,30 cm, og modellen forklarte en stor andel av variasjonen i kvistlengde. Den tilfeldige effekten fra PID forklarte omtrent 5 % av totalvariasjonen og bidro til en forbedring i AICc sammenlignet med modellen uten denne effekten, og ble derfor inkludert som en relevant modellkomponent.



Figur 14. $L_K = 0,791 + 0,121 * B_{KA} + 0,668 * H_{KA}$

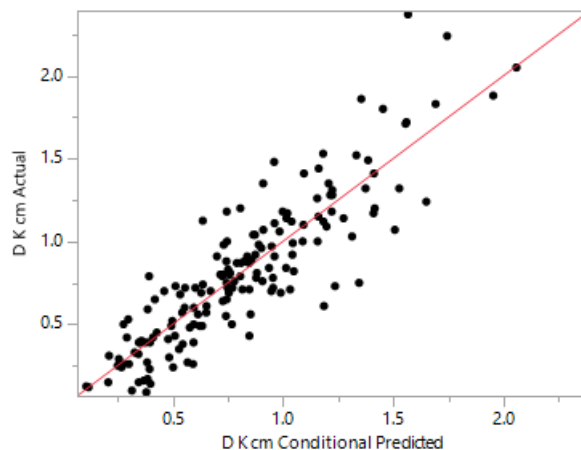
Modellen for lengde av kvist (LK) ble først testet med både kvistarrens bredde (BKA) og høyde (HKA) som forklaringsvariabler i en mixed modell med prøvetrær (PID) som tilfeldig effekt. Interaksjonsleddet mellom HKA og BKA ble testet, men utelatt på grunn av svak signifikans ($p > 0,1$).

Modell H_K – (høyde av kvist) ble testet med både høyde og bredde av kvistarr som forklaringsvariabler. H_{KA} var signifikant ($p < 0,0001$, $t = 18,64$), mens B_{KA} hadde lav signifikans ($p = 0,273$). Derfor ble modellen forenklet til en én-variabel regresjonsmodell. Tilfeldig effekt fra tre ble testet, men forklarte en svært liten andel av variasjonen og ble derfor ekskludert. Den enkle modellen ga lav residualspreddning (RMSE = 0,92 cm) og høy korrelasjon ($R^2 = 0,83$).



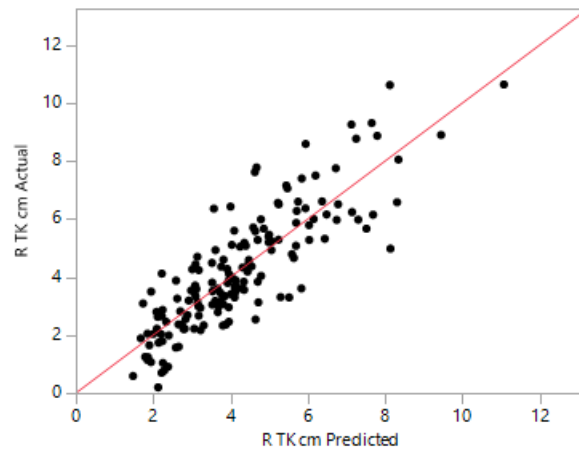
Figur 15. Modell $H_K = -0,269 + 0,776 * H_{KA}$

Modell D_K – (diameter av kvist) inkluderte bredde og høyde av kvistarr som forklaringsvariabler, samt interaksjonsledd mellom disse. Alle ledd var signifikante, og interaksjonen var meget svakt signifikant ($p = 0,0471$) men inkluderes da det forbedrer modelltilpasning. Mixed modell med P_{ID} som tilfeldig effekt ga lav residualspreddning (RMSE = 0,36 cm).



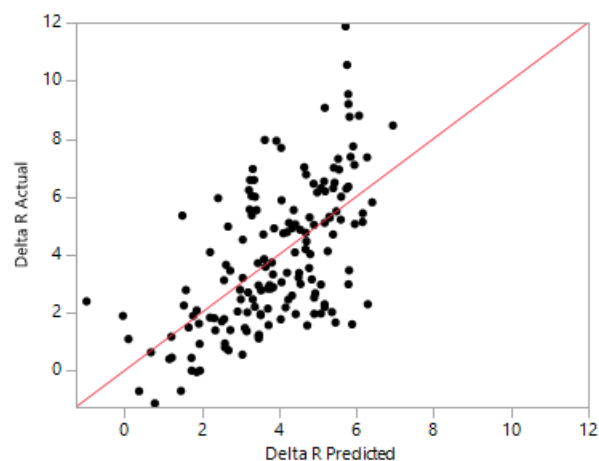
Figur 16. Modell $D_K = 0,117 + 0,026 * B_{KA} + 0,119 * H_{KA} - 0,00024 * (B_{KA} * H_{KA})$

Modell - R_{SK} (avstand fra marg til tørrkvistgrense) ble modellert som funksjon av B_{KA} og H_{KA} . Tilfeldige effekter fra P_{ID} ble testet, men forklarte kun marginalt. Begge variabler var signifikante ($p < 0,0001$), og modellen oppnådde god presisjon (RMSE = 0,62 cm).



Figur 17. Modell $R_{TK} = 1,116 + 0,139 * B_{KA} + 0,453 * H_{KA}$

Modell Δ_R - (mengde kvistfri ved) ble modellert med areal og høyde som forklaringsvariabler. Bredde (B_{KA}) var ikke signifikant ($p = 0,17$) og ble utelatt. Areal hadde positiv effekt, og høyde hadde negativ effekt. Mixed modell med tilfeldig effekt fa RMSE = 1,97 cm.



Figur 18. Modell $\Delta_R = 6,961 - 0,057 * Areal_{KA} - 1,083 * H_{KA}$

Tabell 9, Oversikt over modeller, variabler, presisjon og modellbruk

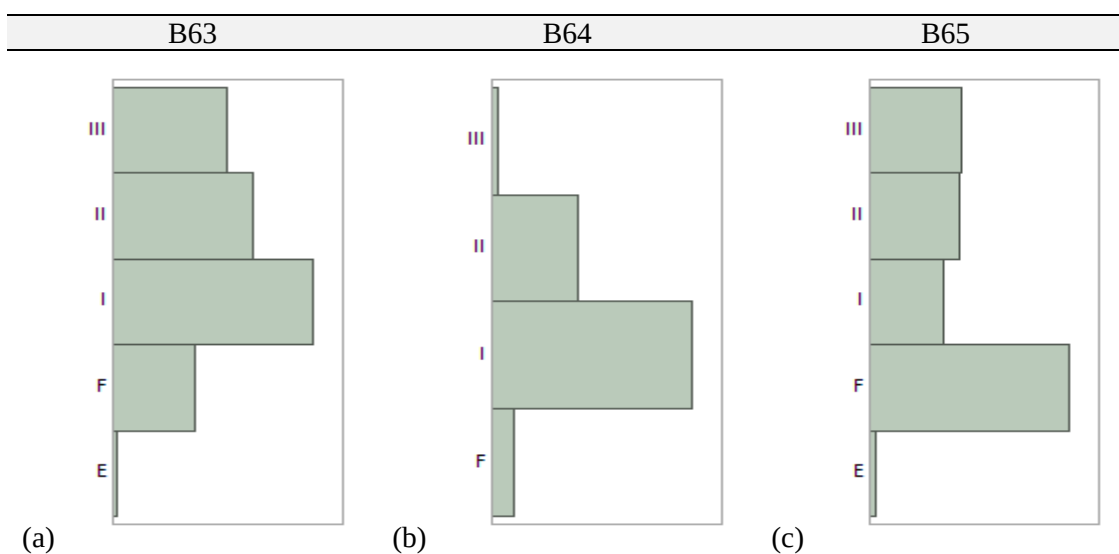
Modeller	Variabler	R ²	RMSE*	R. E.	modelltype
Vol. _K	A _{KA}	0,65	2,45	Nej	Fixed
L _K	B _{KA} , H _{KA}	0,74	1,30	Ja	Mixed
H _K	H _{KA}	0,83	0,92	Nei	Enkel
D _K	B _{KA} , H _{KA} , (B _{KA} × H _{KA})	0,73	0,36	Ja	Mixed
R _{TK}	_{KA} , H _{KA}	0,66	0,62	Nei	Enkel
Δ _R	A _{KA} , H _{KA}	0,64	1,97	Ja	Mixed

Tabell 10, Estimert varians og standardavvik for modeller med tilfeldige effekter

Modeller	σ_u^2 (P _{ID})	σ_e^2	σ_u	σ_e
L _K (cm)	0,085	1,612	0,29	1,27
D _K (cm)	0,009	0,121	0,09	0,35
Δ _R (cm)	0,451	3,431	0,67	1,85
Vol _K (cm ³)	0,782	5,221	0,88	2,28

4.1.3. Kvistarr

For å undersøke hvordan utvendige kvistkarakteristikk fordeler seg mellom bestandene, ble samtlige kvistarr manuelt klassifisert i én av fem kategorier: Kl. E (epikormik), Kl. F (forsegling), Kl. I, II og III (økende areal og kontrast). Klassifiseringen (jf. tabell 4 og figur 13.a–e) baserte seg på en kombinasjon av kvistarrens areal (A_{KA}) og visuelle trekk som form, kontrast og markerte korkcellerygger mot omkringliggende bark.



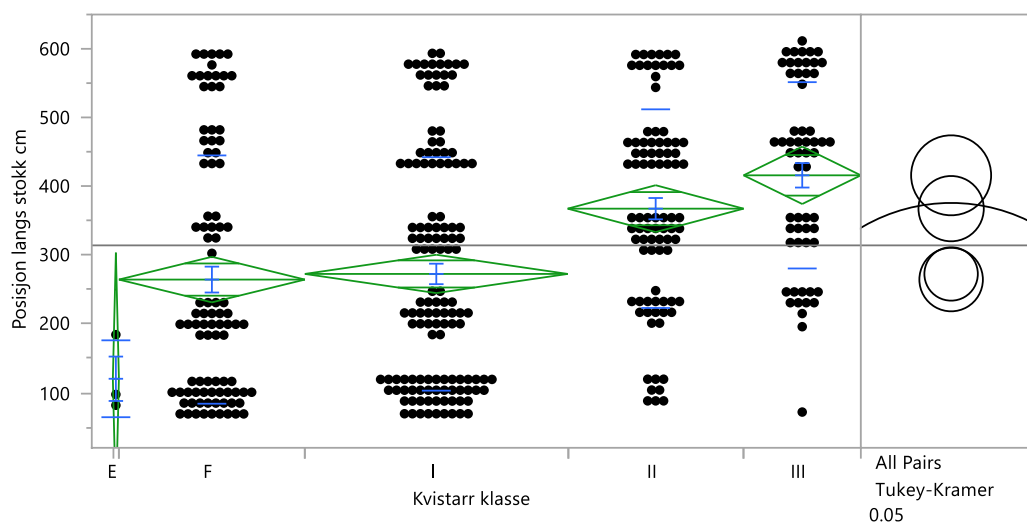
Figur 19.(a-c) viser fordeling kvistarrklasser

Figur 19.(a–c) viser hvordan fordelingen varierer mellom bestandene. B63 hadde flest kvistarr i Kl. I (N = 44) etterfulgt av Kl. II (N = 31) og Kl. III (N = 25), mens epikormiske og forseilte arr var få (N = 1 og 18). B64 domineres av Kl. I (N = 61), med lav forekomst av større kvistarr og kun 7 forseglinger. B65 utmerket seg ved en høy andel forseilte kvistarr (Kl. F, N = 67) og liten, relativt jevn fordeling av øvrige klasser. Klassene E og F ble dokumentert, men vurderes å ha liten betydning for trevirkets mekaniske egenskaper.

Tabell 11. Fordelinger av ytre kjennetegn langs høyden av stokk (n = 370)

Klasse	N	Gjennomsnittshøyde (cm)	Standardfeil (cm)	Nedre 95% KI (cm)	Øvre 95% KI (cm)
E	3	120,4	9,3	102	139
F	92	264,6	16,8	232	297
I	130	272,8	14,2	245	300
II	87	367,7	17,3	334	401
III	58	416,2	21,2	374	459

Gjennomsnittlig areal per klasse var henholdsvis: Kl. I = 15 cm², Kl. II = 27 cm², og Kl. III = 66 cm², beregnet på tvers av bestandene. For å undersøke om kvistarrklasser har systematisk vertikal fordeling langs stammen, ble det utført en enveis ANOVA med Posisjon langs stokk (p_{KA}) som responsvariabel og kvistarrklasse (E–III) som forklaringsvariabel (jf. Fig. 20 og tabell 4).



Figur 20. Gjennomsnittlig posisjon langs stokk for kvistarrklasser (E - III)

Resultatet viste en signifikant forskjell mellom klassene ($F = 13,55$; $p < 0,0001$), med forklaringsgrad $R^2 = 0,13$. Tukey-Kramer-testene indikerte at klasse III ligger signifikant høyere på stammen enn både klasse I og F. Gjennomsnittlig posisjon økte fra 120 cm (Kl. E) og 265 cm (Kl. F), opp til 416 cm for klasse III. Dette støtter hypotesen om at grovere kvistarr forekommer høyere i stammen.

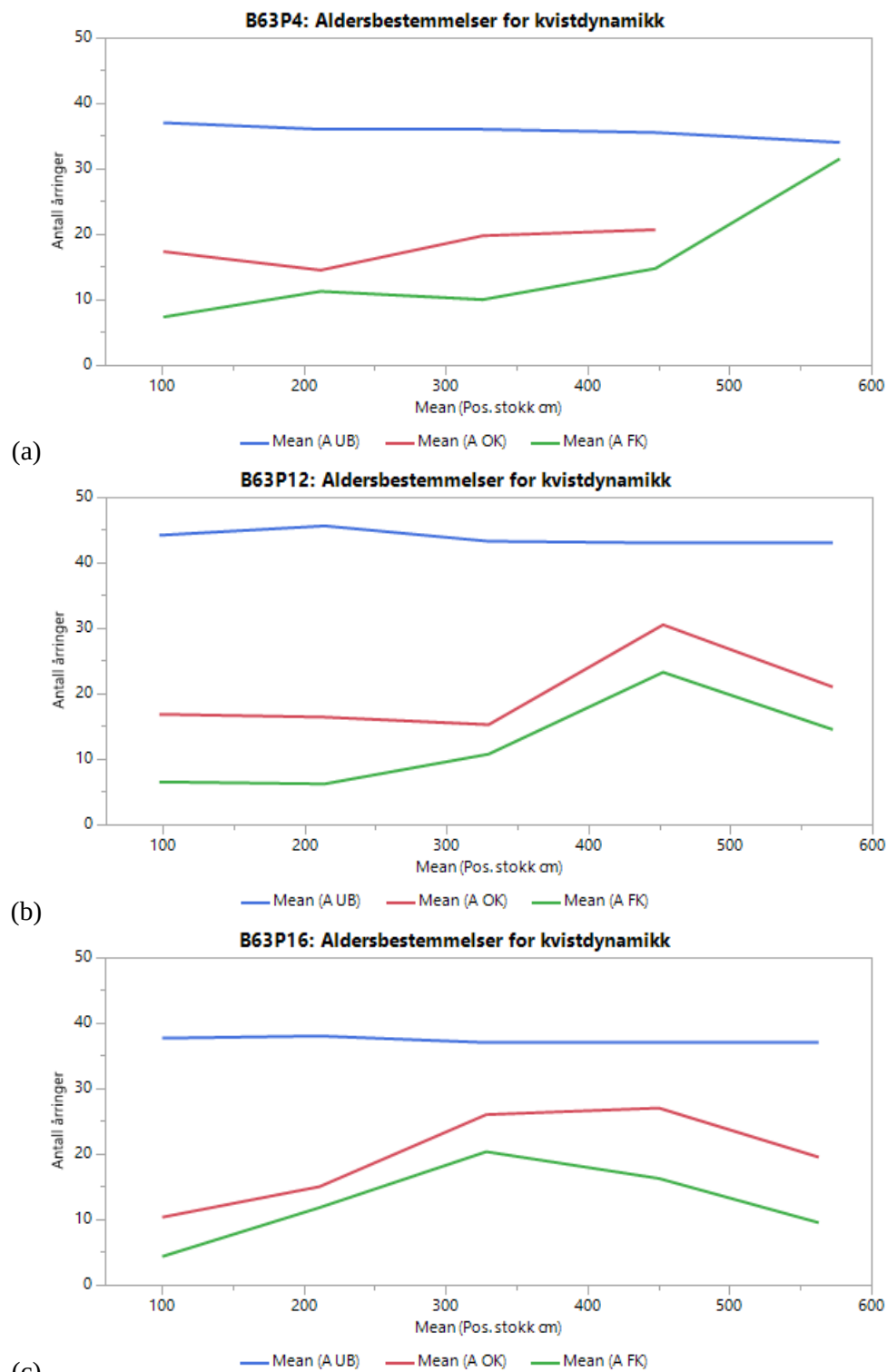
4.2. Kvistutvikling

Aldersbestemmelser for friskkvist, okklusjon og prøvetre kommer som et gjennomsnitt per avsnitt. Dette muliggjør illustrering av tidfesting / aldersbestemmelser ved bruk av grafer. Trær i B63 (lav bonitet, uskjøttet) hadde høy alder på okkluderte kvister ($\emptyset A_{OK} \approx 19$ år) og lang tid mellom kvistdød og okklusjon (~ 6 år). Lav tilvekst og svak kambial aktivitet ga sen overgroing og lav andel ren ved (fig. 21a-c). B64 (moderat bonitet) viste noe yngre kvister ($\emptyset A_{OK} \approx 20$ år), og lignende tid mellom A_{GK} og A_{OK} som B63 ($\sim 6-7$ år). Jevn utvikling og moderat tilvekst ga relativt god mengde kvistfri ved, med varierende potensial for videre sortering (fig. 22a-c). Trær i skjøttede og høyproduktive bestand (B65) har kortere tidsintervaller mellom friskkvist og okklusjon ($\emptyset A_{OK} \approx 13$ år ~ 5 år etter kvistdød), og tidligere utvikling av kvistfri ved (fig. 23a-c). Dette er i tråd med tidligere funn som viser at høy kambial aktivitet og god tilgang på assimilater fremmer rask okklusjon (Lintunen & Kalliokoski, 2010; Mäkinen, 2003; Wang et al., 2015)

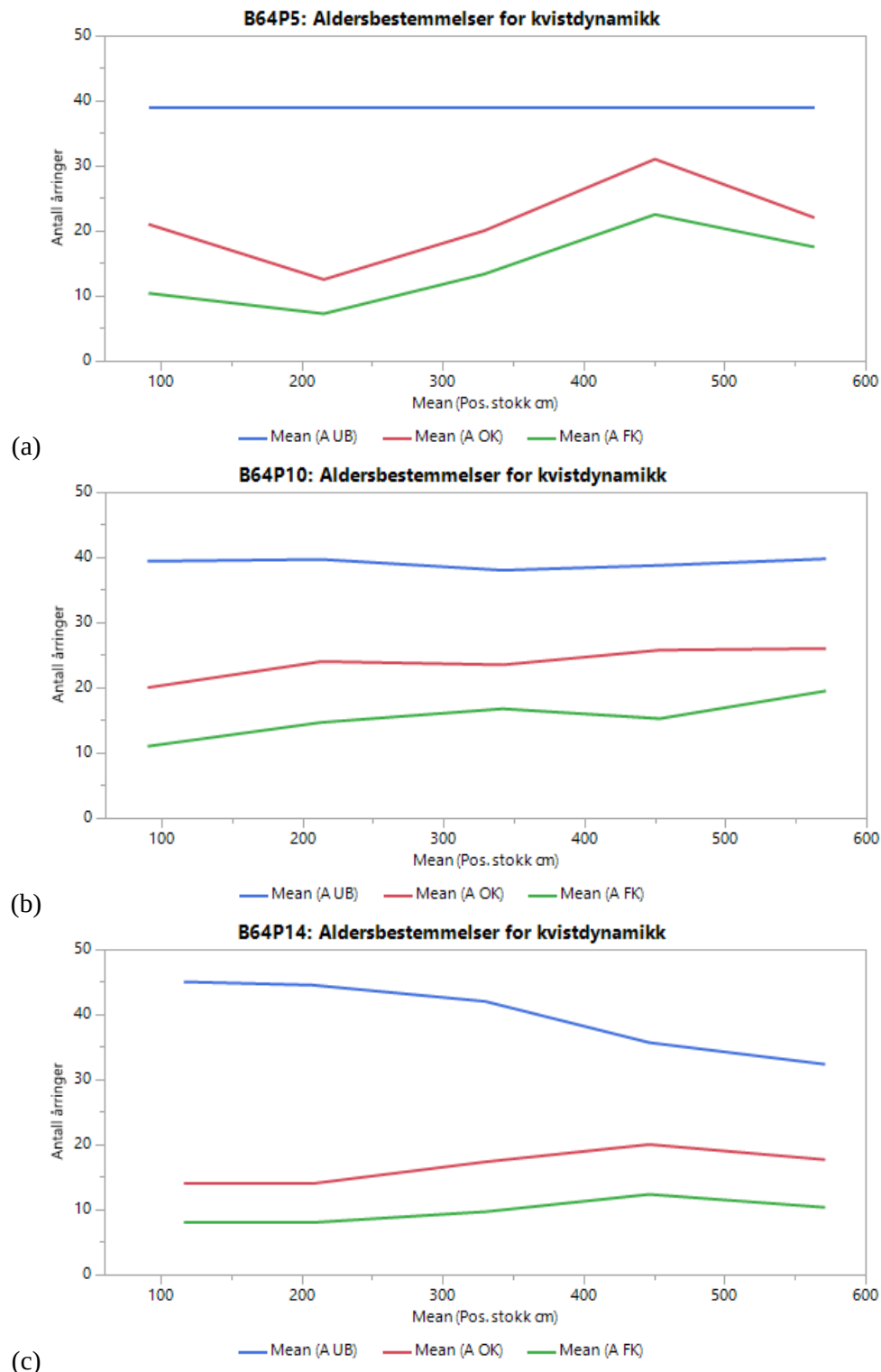
ID Bestand	ID Prøvetre	<i>A_{avsnitt}</i>			<i>A_{stammeskive}</i>			<i>A_{UFF}</i>			<i>A_{OK}</i>			<i>A_{GK}</i>		
		Gj.Sn.	S.D.	Range	Gj.Sn.	S.D.	Range	Gj.Sn.	S.D.	Range	Gj.Sn.	S.D.	Range	Gj.Sn.	S.D.	Range
63	4	43	1	2	36	1	3	30	3	8	18	7	24	13	9	26
	12	41	,4	1	44	2	6	19	9	28	19	12	35	11	8	27
	16	39	3	8	37	1	4	25	6	15	19	9	23	13	7	24
64	5	41	3	9	39	0	0	25	7	20	19	8	23	13	6	19
	10	37	2	6	39	3	12	29	5	15	24	7	26	15	5	18
	14	48	1	3	39	6	17	23	5	16	17	6	17	10	4	13
65	1	28	2	5	25	5	17	14	4	14	12	7	20	7	5	19
	8	33	3	7	30	5	15	20	8	25	13	7	22	7	4	12
	13	37	2	5	37	2	5	22	8	21	13	4	16	7	2	8

Det ble funnet tydelige forskjeller i okklusjonsrate og mengde kvistfri ved mellom bestandene. B65 viste raske okklusjon, lav kvistandel og høyere andel ren ved, i samsvar med tidligere rapporter fra Hynynen et al. (2010), Mäkinen et al. (2003), Niemistö et al. (2019) og Wang et al. (2024). Disse peker alle på at aktiv skjøtsel fremmer gunstige vedegenskaper.

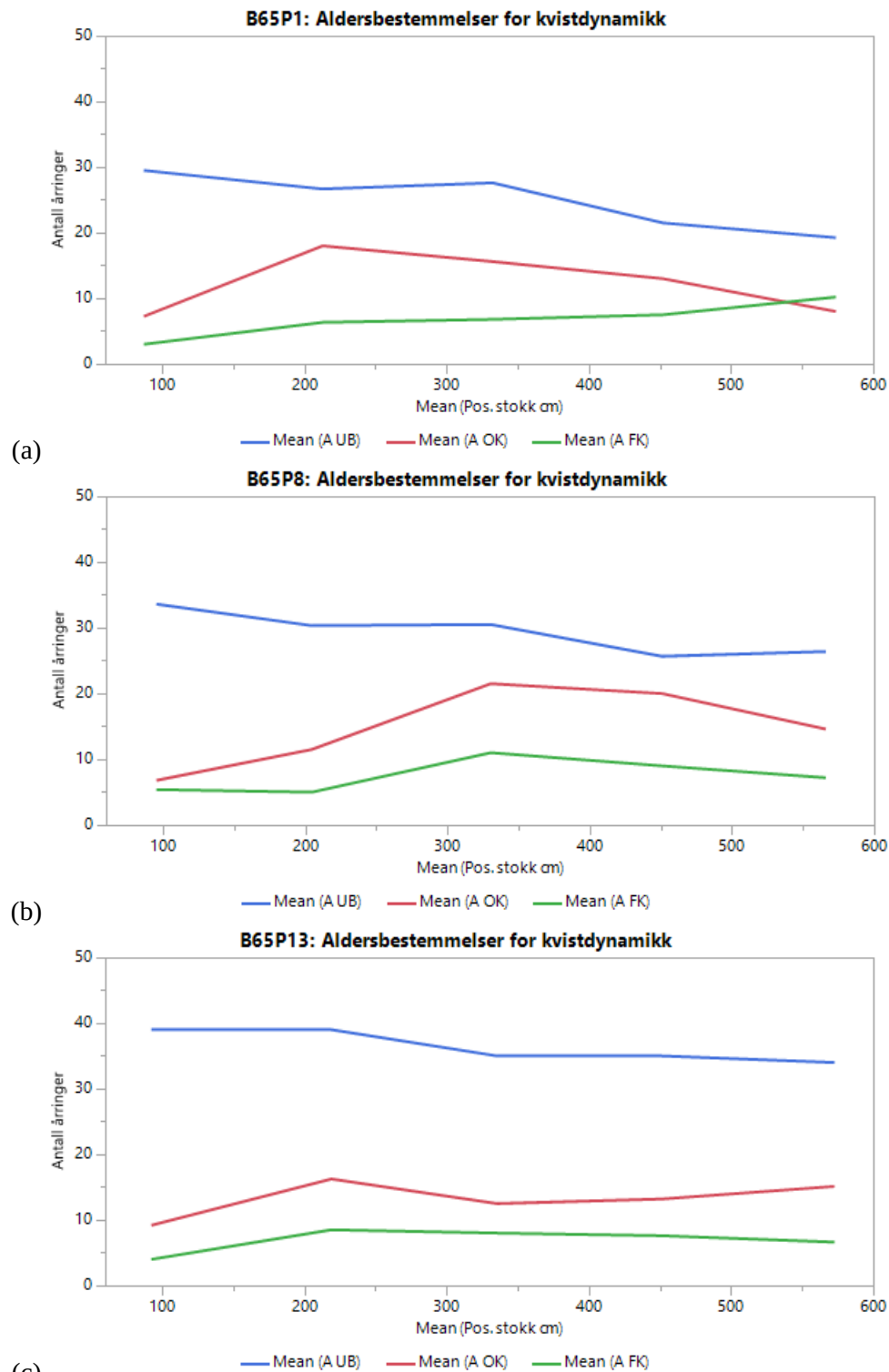
Viktig å bemerke for B65 er at det er plantet, så det er også genetiske effekter å ta hensyn til. Dette styrker tolkningen av resultatene, der rask og konsistent vekst under gode forhold fremmer jevn fiberstruktur og høyere andel ren ved. Likevel advares det mot å tolke høy mengde kvistfri ved som synonymt med høye mekaniske egenskaper. Som påpekt av Collins og Fink (2022) og Foley (2003) vil også fiberhellinger, krymping rundt kvister og mikrospenninger ved bruddinitieringspunkter redusere styrken i skåren last.



Figur 21. B63: Gjennomsnittlig alder basert på avsnitt var 41 år, med en tilnærmet lik verdi fra stammeskiver (39 år). Okkludert kvist hadde en gjennomsnittsalder på 18,7 år, mens friskkvist lå på 12,3 år. Figurene for stokkene B63P4, B63P12 og B63P16 viser et relativt stabilt mønster hvor okklusjon (A_{OK}) skjer omtrent 6 år etter kvistdød, og med en viss høydevariasjon. Dette antyder en moderat okklusjonshastighet, trolig knyttet til jevn, men ikke intensiv vekst.



Figur 22. B64: Her var gjennomsnittlig alder fra avsnitt noe høyere (42 år), mens alderen fra stammeskiver forble lik bestand 63 (39 år). Alderen for okkluderte kvister var i snitt 20 år, og for grønnkvist 12,7 år. Figurene for B64P5, B64P10 og B64P14 viser gjennomgående jevn utvikling, men med variasjon i kvistegenskaper i høyden. Sammenlignet med bestand 63 kan det tyde på en mer aktiv kvistutvikling, men med lignende tid mellom kvistdød og okklusjon.



Figur 23. B65: Denne bestanden skiller seg klart ut med lavere trealder (avsnitt: 32,7 år; stammeskive: 30,7 år) og betydelig yngre kviststruktur (okkludert: 12,7 år; friskkvist: 7 år). Figurene for B65P1, B65P8 og B65P13 viser høyere kambial aktivitet, og tidligere kvistdød og innkapsling. Dette samsvarer med forventningene for intensivt skjøttede og hurtigvoksende bestander, hvor rask okklusjon fremmes av god tilgang på assimilater og høy tilvekst.

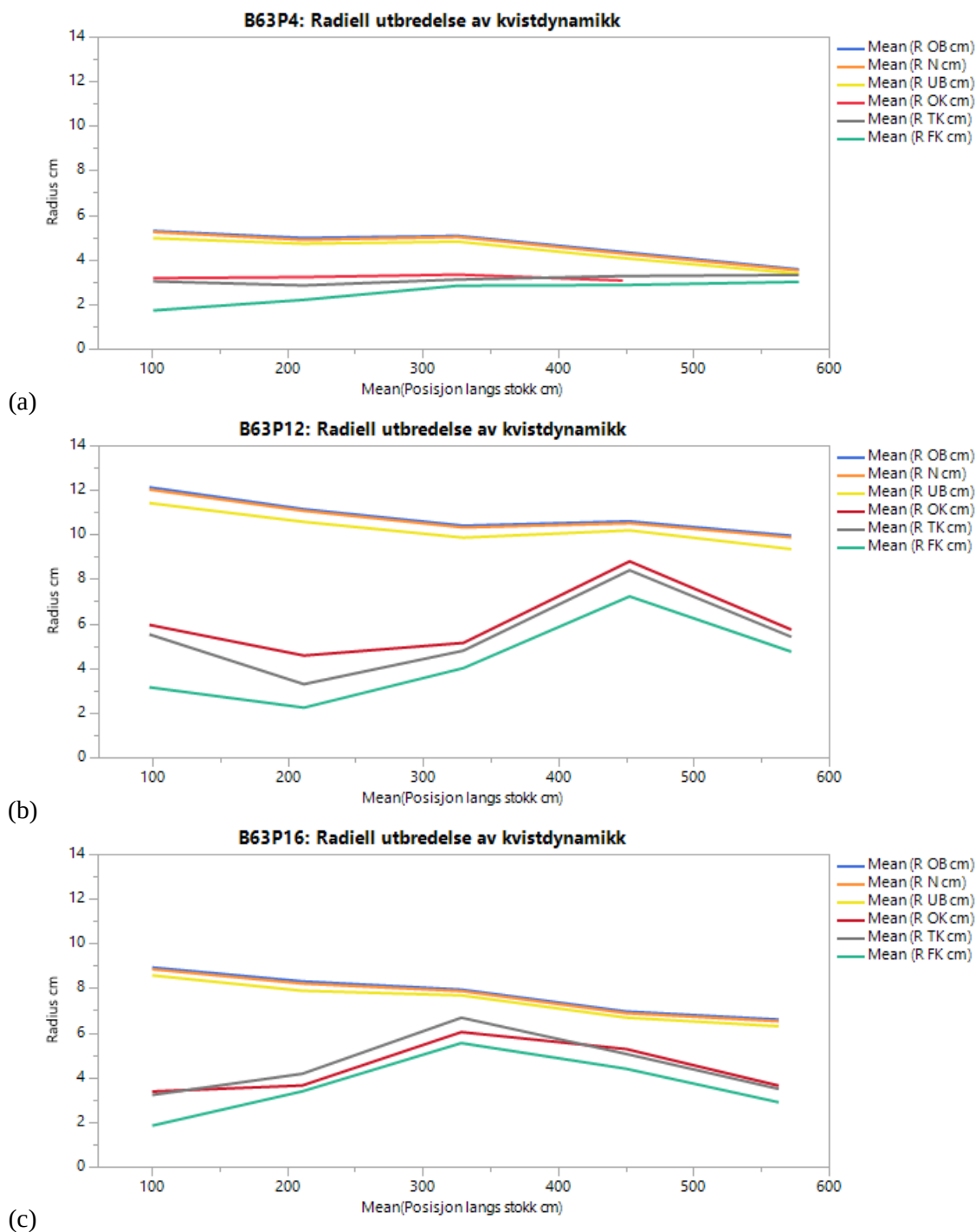
4.2.1. Kviststørrelser

Trærne i bestand 63 har gjennomgående lavere radius, med prøvetre 4 som det minste (4,7 cm) og prøvetre 12 som det største (11,0 cm). Andelen av radius som opptas av kvist (kvistandel) varierer fra 54 % til 68 %, mens andelen ren ved ligger mellom 27 % og 40 %. Dette indikerer at kvistene i denne bestanden er relativt dominerende i stammeprofilen, og mengde kvistfri ved er liten. Prøvetre 12 skiller seg positivt ut med størst mengde kvistfri ved.

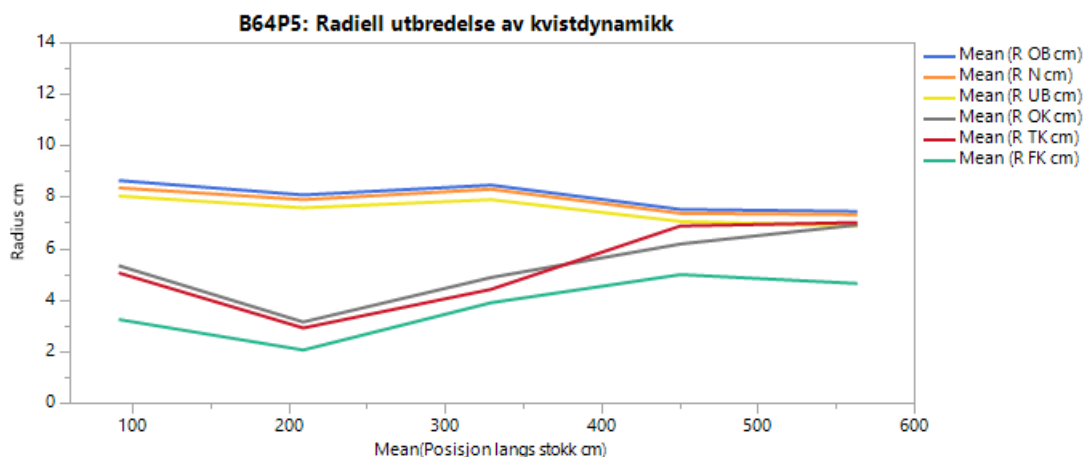
Bestand 63 har minst stammer og høy kvistandel, med lav mengde kvistfri ved ned mot 27 % (fig.24). Bestand 64 viser mer variabel vekst og moderat andel ren ved (fig. 25). Bestand 65 utmerker seg med størst diameter, lavest kvistandel og høy mengde kvistfri ved opp mot 49 % (fig. 26). Dette tyder på raskere okklusjon og kan indikere høyere fasthetsklasser i skjøttede bestander.

Tabell 12. Gjennomsnittsverdier for radielle mål for middeltreet per bestand

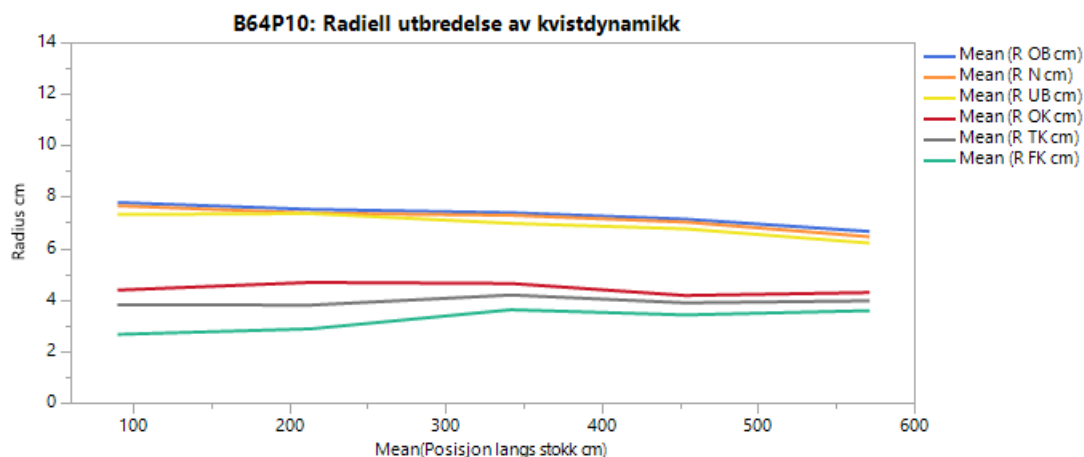
Bestand ID	R_{OB} (cm)	R_{UB} (cm)	R_{UFF} (cm)	R_{OK} (cm)	R_{SK} (cm)	R_{GK} (cm)
63	8,1	7,7	5,5	4,7	4,5	3,4
64	8,4	7,9	5,7	4,5	4,3	3,2
65	9	8,6	6,1	4,5	4	3



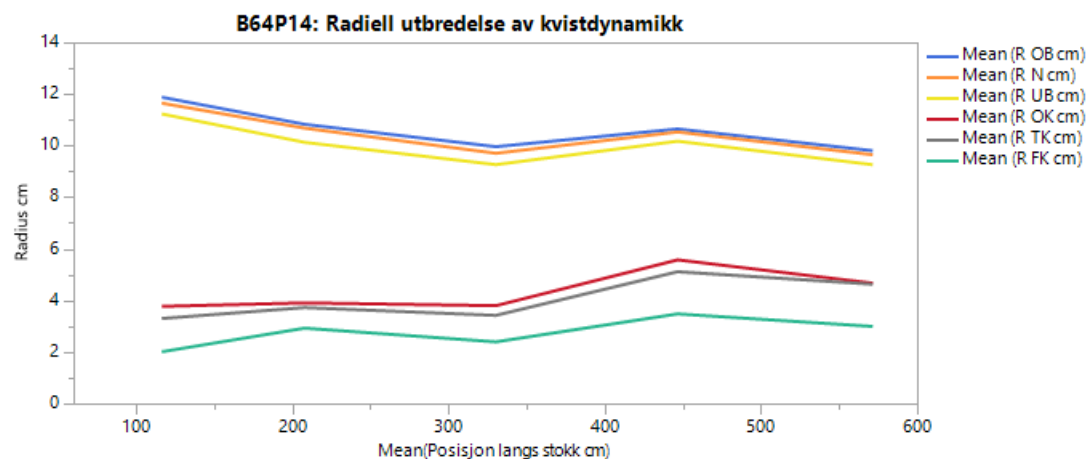
Figur 24. Kvistutvikling i prøvetrær: Trærne i bestand 63 har gjennomgående lavere radius, med prøvetre 4 som det minste (4,7 cm) og prøvetre 12 som det største (11,0 cm). Andelen av radius som opptas av kvist (kvistandel) varierer fra 54 % til 68 %, mens andelen ren ved ligger mellom 27 % og 40 %. Dette indikerer at kvistene i denne bestanden er relativt dominerende i stammeprofilen, og andel ren ved er liten. Prøvetre 12 skiller seg positivt ut med høyest andel ren ved.



(a)

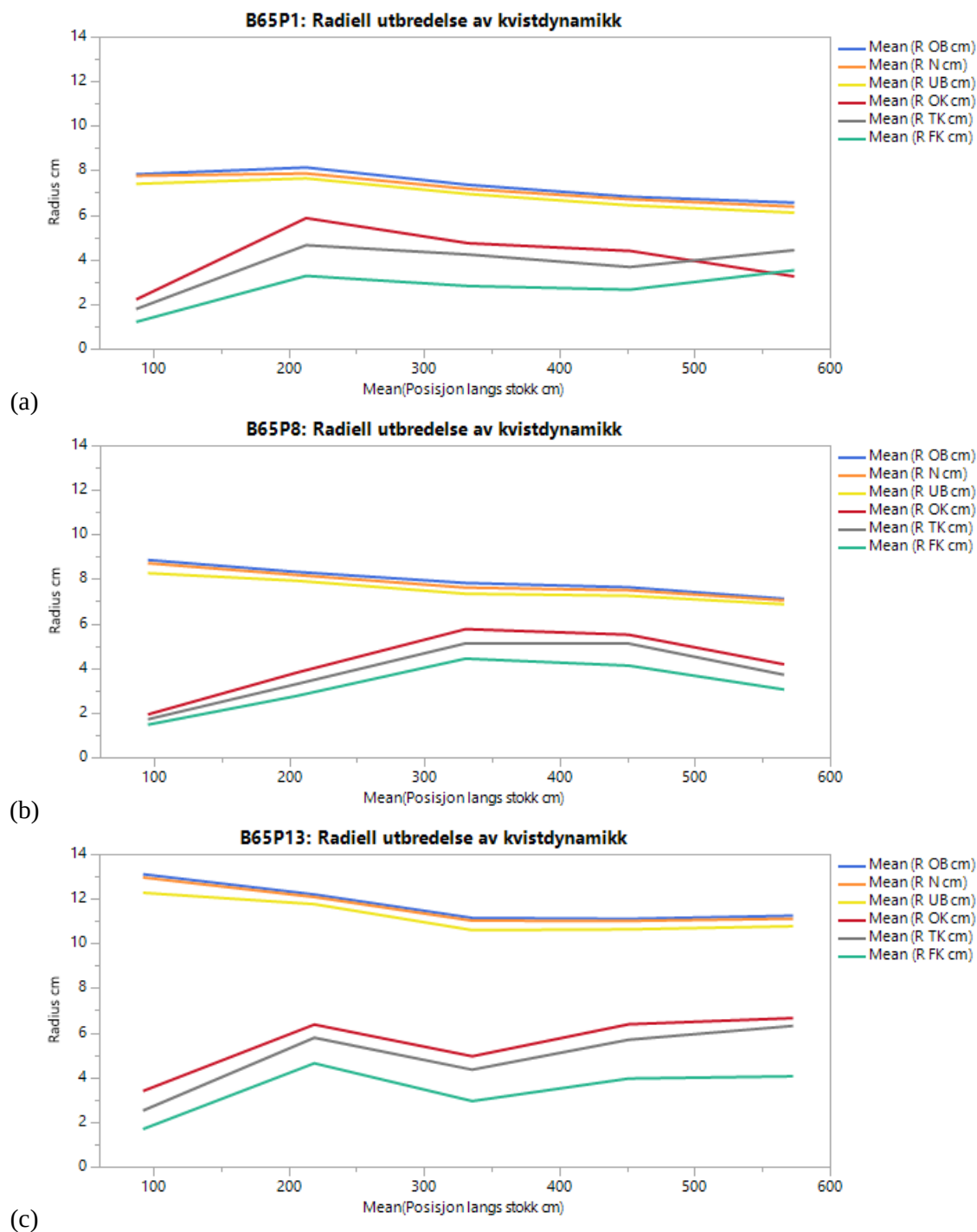


(b)



(c)

Figur 25. B64: Her ligger radielle verdier høyere og mer stabilt. Kvistandelen varierer fra 43 % til 60 %, og mengde kvistfri ved utgjør mellom 34 % og 51 % av radius. Særlig prøvetre 14 utmerker seg med både stor radius og høy mengde kvistfri ved(51 %). Dette kan indikere gunstig vekst og god potensiell virkeskvalitet. Prøvetre 10 har den høyeste kvistandelen (60 %), som kan være en begrensning for visuelle sorteringsformål.



Figur 26. B65: Dette er den mest robuste bestanden når det gjelder kombinasjonen av radius og ren ved. Prøvetre 13 har både størst radius (11,85 cm) og høy mengde kvistfri ved (48,5 %), tett fulgt av prøvetre 8 og 1. Kvistandelen er gjennomgående lavere enn i B63, noe som kan tolkes som resultat av høy tilvekst og effektiv okklusjon. Dette gjør B65 spesielt relevant for kvalitetsprodukter med krav til ren ved.

5. Diskusjon

Datagrunnlaget i denne studien består av ni trær fra tre bestand med ulik bonitet og skjøtselshistorikk. Til tross for det begrensede antallet trær, gir variasjonen mellom bestandene et informativt sammenligningsgrunnlag for å vurdere forskjeller i kviststruktur og utviklingsmønster. Resultatene gir dermed nyttig innsikt, men med begrenset generaliserbarhet – særlig i fravær av statistiske valideringer på uavhengige datasett.

Klassifiseringen av kvistarr bygger på tidligere studier (Kuehne et al., 2024; Racko, 2013; Thomas, 2008; Torkaman et al., 2018) og representerer en etterprøvbart, men fortsatt delvis subjektiv metode. Selv om kvistarrklassene er visuelle og enkle å registrere i felt, påvirkes nøyaktigheten av barkas tilstand, arrasymmetri og observatøreffekt. Det er derfor behov for videre utvikling – eksempelvis gjennom digital bildeanalyse – for å styrke metodens presisjon og reproduserbarhet.

Et sentralt funn er at selv med et begrenset sett av forklaringsvariabler, oppnådde flere modeller høy forklaringsgrad. Dette viser at kvistarr – særlig høyde (H_{KA}), bredde (B_{KA}) og areal (A_{KA}) – har høy prediktiv verdi, og styrker argumentet for at enkle visuelle indikatorer kan brukes operativt. Et styrket empirisk grunnlag for sammenhengen mellom ytre kjennetegn og indre egenskaper vil ha stor nytteverdi – både som referansedata for segmentering og klassifisering av punktskyer (f.eks. fra LiDAR eller fotogrammetri), og som kostnadseffektive indikatorer i feltbasert vurdering av tømmerkvalitet.

Aldersbestemmelse av kvistutvikling ble gjort ved visuell årringtelling i radielle snitt. Dette er metodisk utfordrende i bjørk, på grunn av artens homogene vedstruktur og svak kontrast mellom tidlig- og senvet. I tillegg var tilstedeværelsen av falske årringer og soner med komprimert vekst en feilkilde, spesielt nær floem. Årringene var tydeligst nær margen, noe som ga høyest nøyaktighet i kjernen og lavere presisjon utover i snittet. Dette understreker behovet for mer presise teknikker i fremtidige studier, som bruk av mikroskopering, digital bildeanalyse eller 3D-skanning, særlig for å kunne analysere fiberforløp og konkurransehistorikk mer detaljert.

I modelleringen ble det benyttet både lineære og blandede regresjonsmodeller. Den tilfeldige effekten av trær som grupperingsfaktor viste seg å være liten, noe som indikerer at modellene kan ha en viss overføringsverdi utover det spesifikke datasettet. Det er likevel en svakhet at modellene ikke er validert på uavhengige materialer, noe som begrenser konklusjonenes generaliserbarhet.

Et viktig metodisk aspekt er måten kvistarrenes dimensjoner ble målt. I denne studien ble skyvelær brukt for å registrere høyde og bredde – i motsetning til målebånd, som oftere brukes i felt og tar høyde for stammens krumning. Bruken av skyvelær gir en mer direkte måling av lineær avstand mellom to punkter, men kan underestimere verdier på sterkt buede stammer. Dette kan ha påvirket enkelte målinger og bør vurderes ved videre metodeutvikling.

5.1. Kviststruktur

5.1.1. Kvistegenskaper

Bestand B65, som ble skjøttet aktivt og hadde rask okklusjon og lav kvistandel, hadde høyere andel ren ved og jevnere fiberstruktur, og fremstår som særlig egnet for tekniske og styrkekrevenne formål. Trær fra B63 og B64, med større kvister og høyere kvistandel, har derimot fortsatt verdi – særlig i produkter der kviststruktur gir estetisk eller dekorativ effekt. Dette viser at ulike sorteringsformål kan hentes fra én stakk, så lenge man har god informasjon om kviststrukturen.

Slik peker studien mot en praktisk sorteringsmetodikk der kvistarr fungerer som en feltindikator for fremtidig bruk – og hvor modellene utviklet her kan støtte opp om skurplanlegging og optimalisering av råstoffutnyttelse. I en tid der bjørk etterspørres mer som lokalt, bærekraftig materiale, er dette en metode for å heve både uttak, verdi og presisjon i foredling. Videre utvikling, særlig med digitale registreringer og bildediagnostikk, kan ytterligere forbedre nøyaktighet og bidra til å lukke gapet mellom felldata og ferdig produkt.

5.1.2. Prediksjon av indre kvistegenskaper fra kvistarr

For å utvikle en robust prediksjonsmodell for kvistvolum ble det testet en flere modelltyper i rekkefølge: enkel lineær regresjon, generalisert regresjon, minste kvadraters metode, samt flere generaliserte og lineære mixed models. Den valgte modellen har god presisjon og forklarer en moderat andel av variasjonen i kvistvolum. Den hadde lavere AICc sammenlignet med både least squares og GLMM-varianter (AICc = 787,5), samt lav residualspreddning (RMSE = 2,45 cm³).

Selv om areal viste seg som den sterkeste prediktoren ($t = 5,74$), hadde B_{KA} en signifikant negativ koeffisient ($-0,292$; $p = 0,0007$). Dette antyder at kvistarrens bredde inneholder relevant informasjon om kvistens geometriske struktur også i K_{VOL} -modellen, men at samspillet mellom areal og bredde kan påvirke koeffisientens retning. Modellens residualspreddning (RMSE = 2,45 cm³) er lav nok til å gjøre den operativ i dette tilfelle men bør testes på uavhengige datasett. AICc ble lavere enn for både least squares og GLMM-variantene.

Dette er i tråd med tidligere arbeid fra Thomas (2008) og Racko (2013), som begge påpeker at kvistdiameter kan estimeres med relativt høy presisjon fra ytre mål, særlig kvistarrens bredde og areal. Dette gjør modellen egnet som en enkel, feltbasert tilnærming til prediksjon av volumetriske kvistegenskaper, selv om nøyaktigheten vil avhenge av visuell vurderingens presisjon og grad av asymmetri til kvistarr.

Kombinasjonen av B_{KA} og H_{KA} forklarte her 73 % av variasjonen i D_K – og i modellen for Vol_K påvirket disse i motsatt retning: økt areal ga høyere volum, mens økt bredde alene reduserte volum. Dette viser at det ikke er kvistarrens størrelse alene, men samspillet mellom formdannelse der høyden (H_{KA}) er direkte koblet til høyden og vinkelen av kvist, mens bredden har sekundære effekter av stammens diametertilvekst.

Flere av regresjonsmodellene for prediksjon av indre kvistegenskaper (lengde, høyde, diameter, volum, tørrkvistens utstrekning og andel ren ved) basert på kvistarr, ga middels til høy forklaringsgrad ($R^2 \approx 0,65 - 0,83$). Dette er noe svakere men i tråd med funnene til Kuehne et al. (2024), Racko (2013), Thomas (2008) og (Torkaman et al., 2018) som viser at ytre kjennetegn som kvistarr har sterk prediksjon for innvendige kvistegenskaper. Denne studien reduserte antallet av utvendige målinger i kontrast med ovennevnte studier, og påviste allikevel at enkle modeller oppnådde presisjon.

Mixed models hadde kun marginalt bedre ytelse enn lineære modeller. Dette antyder lav påvirkning av tilfeldige effekter fra prøvetrær, noe som til tross det begrensede datagrunnlaget indikerer overførbarhet. Det er en svakhet ved studien at modellene ikke ble testet og verifisert på et uavhengig datasett, og deres gyldighet i andre regioner er uvisst.

Resultatene fra denne studien viser at kvistarr, som ytre spor etter kvisters utvikling og okklusjon, har høy verdi som prediktor for indre kvistegenskaper i bjørk. Modellene som ble utviklet for kvistlengde (L_k), høyde (H_k), diameter (DK), tørrkvistens radius (RSK), kvistvolum (Vol_k) og andel ren ved (ΔR) har gjennomgående vist høy statistisk presisjon ($R^2 = 0,64\text{--}0,83$) og lav residualspreddning (RMSE 0,36–2,45 cm). Dette gir et sterkt empirisk grunnlag for å tolke kvistens livssyklus retrospektivt – gjennom enkle målinger i felt.

Koblet til biologiske prosesser underbygges dette av hvordan kambial aktivitet rundt kvister påvirker fiberretning og vedstruktur (Bonham & Barnett, 2002; Lintunen & Kalliokoski, 2010; Shigo, 1985). Radiell utvikling rundt kvist fører til fiberforstyrrelser som gir svekkelser i både visuell og mekanisk kvalitet (Foley, 2003; Lemke et al., 2023). Ved å bruke kvistarr som indikator på disse forstyrrelsene, kan man tolke både kvistens størrelse og innvirkning uten destruktive metoder.

Disse prediktive modellene har stor praktisk relevans for sortering av sagtømmer. Ifølge NS-INSTA 142 (Standard Norge, 2009) og standarder for visuelt sortert virke (Kilde et al., 2006; Kučera, 1983), er kviststørrelse, type og plassering avgjørende for sorteringsklassen – enten det gjelder bærende konstruksjon (visuell/teknisk sortering) eller møbel-/interiørformål (visuell kvalitet). Ved å kunne anslå kvistvolum og andel ren ved på stående trær eller stokk, kan tømmeret i prinsippet sorteres til ulike produktkategorier før sagbruk. Dette samsvarer med studier fra Kilpeläinen (2011), Luostarinen og Verkasalo (2000), og Collins og Fink (2022), som viser at visuelt og styrke-sorterte kvaliteter korrelerer med kvistgeometri- og utvikling.

Denne studien undersøkte ikke mekaniske egenskaper direkte, noe som begrenser tolkningen, siden forholdet mellom kvist og andelen ren ved ikke ble destruktivt testet. Derfor skal det understrekes at denne studien kan predikere dimensjoner av innvokst kvist, men ikke hvilke egenskaper det medfører. Fremtidige studier bør inkludere kombinasjoner av estimering av innvokste kvister fra kvistarr, med mekaniske tester for å etablere visuelle styrkesorteringsmodeller for bjørk.

5.1.3. Vertikal fordeling av kvistarrklasser

Resultatene viste at den grøvste kvistarrklassen (III) ligger i gjennomsnitt høyere i stammen enn epikormiske kvister og forseglinger (E, F). Dette samsvarer med at lystilgang i trekroner påvirker utvikling og plassering av kvister (Kostina et al., 2015; Possen et al., 2014; Uri et al., 2007). Ifølge Pipe-model teorien (Shinozaki et al., 1964), vil kvistplassering- og diameter også reflektere den hydrauliske funksjonen ved kapillæreffekten og lysbehovet i trekronen. Dertil er det viktig å understreke at Pipe-model teorien beskriver en avtakende diameter i ledningsvevet fra de laterale finrøtterne til kvister. I denne studien er det ingen forutsetninger for å uttale noe om rotsystem annet enn de observasjoner som gjordes for jordsmonn og fuktighet ved respektive bestand.

Fordelingen av ulike størrelser av kvistarr i lengdeaksen til stokkene sortertes i fem klasser (Kl._{KA}: E, F, I, II, III) basert på areal og visuell kontrast tilbyr en etterprøvbar metode for å kunne tolke indre kvistegenskaper. Klassene bygger delvis på begreper fra Kuehne et al. (2024), Torkaman et al. (2018) og Racko (2013). Hvorvidt klassene, med prediksjon for kvistegenskaper, kan brukes for å estimere egenskaper knyttet til virkeskvalitet (Lemke et al., 2023) bør gjøres med forsiktighet.

Det bør også understrekes at metodens nøyaktighet kan være påvirket av flere feilkilder. Kvistarrens varierende asymmetri ([vedlegg 8.5.](#)) krever flere registreringer for å øke nøyaktighet. Barken og neverens tilstand og tykkelse (Novitskaya, 1998; Thomas, 2008) kan medføre at kvistarr under- eller overvurderes i areal. Kvistegenskaper- død og okklusjon, i kombinasjon med kambialaktivitet, vil også påvirke kvistarrenes utforming (Bonham & Barnett, 2002; Luostarinen & Hakkarainen, 2019; Shigo, 1984). I tillegg er klassifiseringen delvis subjektiv ved bedømmelse av vinkel og struktur i form av korkcellerygger. Siden det ikke er målt variasjon mellom observatører i denne studien, svekkes metodens etterprøvbarhet og bør adresseres i videre studier.

Enveis ANOVA viste signifikante forskjeller i gjennomsnittlig høydeposisjon mellom kvistarrklassene ($F = 13,55$; $p < 0,0001$). Dette tyder på at minst én klasse har en gjennomsnittlig posisjon som skiller seg markant fra de andre. Til tross for at forklaringsgraden var lav ($R^2 = 0,13$), viser den høye F-verdien at forskjellene mellom klassene er vesentlig større enn variasjonen innen hver klasse. Det indikerer at klassifiseringen fanger opp systematiske forskjeller i kvistenes vertikale fordeling.

Samtidig bør det påpekes at posisjon alene ikke forklarer hele variasjonsbildet – individuelle faktorer som bonitet, konkurranse, skader, genetikk og skjøtsel kan også påvirke kvistplassering og utvikling. Et videre steg kan være å koble kvistegenskaper, fra levende greiner til døde, til fysiologiske data som ledningsvev eller selve transporten av assimilater (Maillette, 1982; Wilson, 1998).

5.2. Kvistutvikling

Variasjonen mellom bestandene B63, B64 og B65 var tydelig observerbar. B63 hadde større kvister og lav andel ren ved, mens B65, med høy bonitet og aktiv skjøtsel, viste rask kvistdød og høy andel ren ved (opptil 49 %). Dette samsvarer med resultater fra Niemistö et al. (2019), Hynynen et al. (2010) og Mäkinen (2002). Betydningen av dette er todelt: For konstruksjonsformål er rask okklusjon viktig da det reduserer antall bruddinitieringspunkter og dermed sprekkrisiko rundt døde kvister og fremmer homogenitet (Collins & Fink, 2022; Foley, 2003). For visuelt sortert virke, særlig listverk og møbelprodukter, gir tidligere okklusjon og høyere mengde kvistfri vedet mer attraktivt produkt (NTI, 2006; Kučera, 1983). Det foreslås derfor at vurdering av aldersdynamikk kan brukes til å identifisere trær med høyere potensial for spesifikke bruksformål – et viktig verktøy i skurplanlegging og sorteringsstrategier.

Tidspunkt for kvistdød og okklusjon ble analysert via årringtelling. I B65 var forskjellen mellom R_{GK} og R_{UFF} ned mot 5 år, mot 6–8 år i B63 og B64. Dette bekrefter hypotesen om at god ressurstilgang ved høyere boniteter gir raskere okklusjon. Studien peker også på forskjeller i vertikal fordeling av kvistarrklasser, der grove kvistarr (Kl. III) var plassert høyere i stammen enn epikormiske kvister (Kl. E og F). Dette støtter teorien om at kvistdannelse følger lysforhold og transport av assimilater (Kostina et al., 2015; Shinozaki et al., 1964). Bestandsegenskaper tolkes som effekt av ulik konkurranse, skjøtsel og genetisk bakgrunn. Trær i B65 har fått bedre lysforhold og ressurstilgang tidlig i utviklingen, noe som fremmer tidlig kvistdød og jevn vedstruktur (Wang et al., 2015).

Det er også verdt å merke seg at trær fra bestand B65 – som hadde rask okklusjon og lav kvistandel – viste høyere mengde kvistfri ved og jevnere fiberstruktur, og er dermed bedre egnet for styrkekrevede produkter. Dette støttes av studier som viser hvordan kombinasjonen av høy tilvekst, tidlig kvistdød og god kambial aktivitet gir ved med lavere forekomst av fiberforstyrrelser og høyere teknisk homogenitet (Collins & Fink, 2022; Wang et al., 2015; Niemistö et al., 2019). Samtidig har trær fra B63 og B64, med større kvister og høyere

kvistandel, fortsatt verdi – særlig innen synlige produkter hvor struktur og uttrykk er ønsket, så lenge kvistene er tette og overflaten er stabil. Samlet sett peker dette på at kvistarr kan være en nøkkel til økt utnyttelse og differensiering av bjørk i verdikjeden – fra feltvurdering til ferdig produkt. Det muliggjør sortering som ikke bare bygger på diameter eller høyde, men også på kvistens utviklingshistorikk og geometriske signatur. Ved videre utvikling og validering, særlig med støtte i digital bildediagnostikk og maskinlæring, kan slike metoder styrke bjørkas forutsetninger som sagtømmer med høy virkeskvalitet i nordisk treindustri.

5.2.1. Variasjon i kvistegenskaper mellom bestand

Resultater fra registrering av kvistegenskaper viser variasjon mellom bestander med ulik bonitet og skjøtselshistorikk. B63 hadde mindre mengde kvistfri ved, spesielt prøvetre 4 og 16, med hhv, 33 % og 39 %. Dette skyldes både mindre radius og større kvister, noe som gir mindre mengde kvistfri ved og antatt lavere virkesverdi for visuelle formål. B64 viser varierende resultater, men har flere prøvetrær over 50 % ren ved, spesielt prøvetre 14. B65 hadde høyest andel ren ved, med prøvetre 13 og 14 (begge > 56 %), noe som samsvarer med de minste kvistene og største stammeradiene. Disse funnene underbygger hypotesen om at økt vekstrate og aktiv skjøtsel fremmer raskere okklusjon som gir noe mer homogen stammeved (Foley, 2003; Lintunen & Kalliokoski, 2010; Mäkinen, 2002). Det er også i tråd med den fysiologiske beskrivelsen, hvor høyproduktive trær innkapsler og okkluderer raskere (Niemistö et al., 2019; Wang et al., 2015).

Videre bekrefter variasjonene mellom og innad bestandene tidligere funn fra Hynynen et al. (2010), Lintunen og Kalliokoski (2010), hvor kronens arkitektur og konkurranseforhold forklarer store deler av variasjonen i kvistdimensjon og levetid. Dette viser hvor komplekst kvistutvikling skjer som et resultat mellom genetiske, fysiologiske og standsmessige faktorer. Variasjonen i kvistandeler, observert som høyest i B63 (opptil 68 %) og lavest i B65 (ned til 35 %), har direkte følger for andel ren ved, og dermed, den potensielle sorteringsklassen for skurlast. Det er likevel viktig å presisere begrensingen av datasettet der det er utført målinger på 6 meter rotstokk av kun 9 trær fra 3 felt. Registreringer er et tilbakeblikk i tid og sier lite om videre produksjons- og kvalitetspotensial.

6. Konklusjon

Visuelle indikatorer som kvistarr kan brukes til å anslå indre kvistegenskaper og andel ren ved i bjørk med høy presisjon. Prediksjonsmodellene basert på enkle mål – bredde, høyde og areal – forklarte en betydelig del av variasjonen i kvistdimensjoner og volum. HKA fremsto som den mest stabile og informative prediktoren på tvers av modeller. Analysene av kvistutvikling viste at aktiv skjøtsel og høy bonitet gir raskere kvistdød og høyere andel ren ved. B65 viste seg å være den mest produktive bestanden med lav kvistandel og høy homogenitet, mens B63 hadde mer dominerende kvister og lavere mengde kvistfri ved. De radielle dataene dokumenterte tydelige forskjeller i okklusjon og kvistens livsløp. Vertikal fordeling av kvistarrklasser bekreftet at grove arr oftest forekommer høyere i stammen, noe som samsvarer med lysforhold og kroneutvikling. Samspillet mellom arrform og plassering kan brukes til å forutsi mekanisk og visuell kvalitet i stokken. Kvistarr har dermed potensial som et feltbasert verktøy for skurplanlegging og sortering i bjørk, men videre testing og metodisk standardisering er nødvendig for operasjonell bruk.

7. Litteraturliste

- Biometria. (2021). *Edanesågen - Stockmätning sågtimmer av björk*.
- Biometria. (2024). *Riga Wood - Björkfanértimmer*. I: Albinsson, T. (red.).
- Biometria. (2025). *Almo Hardwood AB - travmätning av björktimmer*. I: Albinsson, T. (red.).
- Bonham, V. A. & Barnett, J. R. (2002). Anatomy and structure of birch wood.
- Bucur, V. (2023). A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment. *Forests*, 14 (8): 1545.
- Collins, S. & Fink, G. (2022). Modeling the tensile mechanical properties of silver birch timber boards. *Construction and Building Materials*, 344: 128147.
- Dahlgren, T., Wiström, M. & Wistrand, S. (1999). *Nordiska träd och träslag*: Stift. ARKUS.
- Dubois, H., Verkasalo, E. & Claessens, H. (2020). Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe. *Forests*, 11 (3): 336. doi: 10.3390/f11030336.
- Dunham, R., Cameron, A. & Petty, J. (1999). The effect of growth rate on the strength properties of sawn beams of silver birch (*Betula pendula* Roth). *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14 (1): 18-26.
- Fjærtøft, F. & Bunkholt, A. (1994). *Sorteringsreglementer for toemmer og trelast av bjoerk: resultater fra skurforsøk*= *Grading rules for sawlogs and sawnwood of birch: results of sawing experiments*: Aas: Norsk Institutt for Skogforskning.
- Foley, C. (2003). Modeling the effects of knots in structural timber.
- Hansen, E., Rahlf, J., Astrup, R. & Gobakken, T. (2023). Taper, volume, and bark thickness models for spruce, pine, and birch in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 38 (6): 413-428. doi: 10.1080/02827581.2023.2243821.
- Herajarvi, H. & Verkasalo, E. (2002). Timber grade distribution and relative stumpage value of mature finnish *Betula pendula* and *B. pubescens* when applying different bucking principles.(Solid Wood Products). *Forest products journal*: 40-52.
- Heräjärvi, H. (2001). Technical properties of mature birch (*Betula pendula* and *B. pubescens*) for saw milling.
- Heräjärvi, H., Jouhio, A., Tammiruusu, V. & Verkasalo, E. (2004). Small-diameter Scots pine and birch timber as raw materials for engineered wood products. *International Journal of Forest Engineering*, 15 (2): 23-34.
- Hoffmeyer, P. (1987). The role of grain angle, knots, tension wood, compression wood, and other anomalies on the mechanical properties of wood.
- Hynynen, J., Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Brunner, A., Hein, S. & Velling, P. (2010). Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry*, 83 (1): 103-119.
- Kilde, V., Solli, K., Pitzner, B., Lind, P. & Bramming, J. (2006). Bjørk i synlige konstruksjoner (Birch in visible constructions). *Norsk Treteknisk Institutt, Rapport* (67).
- Kilpeläinen, H. L., Jari, Heräjärvi, H. Verkasalo, E. (2011). Saw Log Recovery and Stem Quality of Birch from Thinnings in Southern Finland. *Silva Fennica*, 45 (2): 282. doi: 10.14214/sf.117.
- Kollmann, F. C., W. Jr. (1968). *Principles of Wood Science and Technology*. Solid Wood, b. I. New York: Springer-Verlag New York Inc.
- Kostina, M., Barabanshikova, N., Bityugova, G., Yasinskaya, O. & Dubach, A. (2015). Structural modifications of birch (*Betula pendula* Roth.) crown in relation to environmental conditions. *Contemporary Problems of Ecology*, 8: 584-597.
- Kucera, B. & Myhra, H. H. (1996). Egenskaper hos de viktigste norske lauvtraer. *Rapport-Norsk Treteknisk Institutt (Norway). no. 33.(NLH accession no. RAP)*.
- Kucera, B. (1998). *TREETS OPPBYGNING OG VED ANATOMI*. NORSK INSTITUTT FOR SKOGFORSKNING. Høgskoleveien 12, 1432 Ås.
- Kucera, B. & Næss, R. M. (1999). *Tre: naturens vakreste råstoff*: Landbruksforl.
- Kučera, B. (1983). *Kvalitetskrav til skurlast av lauvtre*. Rapport 7. Norges Landbrukshøgskole: Norsk Treteknisk Institutt.
- Kuehne, C., Zimmer, K. & Smith, A. (2024). The relationship between branch scar attributes and knot features in birch (*Betula pendula* and *B. pubescens*). *Wood Science and Technology*, 58 (3): 907-921. doi: 10.1007/s00226-024-01554-1.
- Landbruksdepartementet. (1956: FOR-1956-01-19-1). *Forskrift om måling av skurtømmer og spesieltømmer av lauvtre*. Oslo: Landbruksdepartementet.
- Lemke, U., Johansson, M., Ziethén, R. & Briggert, A. (2023). *New criteria for visual strength grading of sawn timber from birch grown in Sweden*. World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023). 19-22 June 2023, Oslo, Norway.

- Lidman, F. D., Lundmark, T., Sängstuvall, L. & Holmström, E. (2024). Birch distribution and changes in stand structure in Sweden's young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 39 (3-4): 167-175. doi: 10.1080/02827581.2024.2349520.
- Lintunen, A. & Kalliokoski, T. (2010). The effect of tree architecture on conduit diameter and frequency from small distal roots to branch tips in *Betula pendula*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Tree Physiology*, 30 (11): 1433-1447. doi: 10.1093/treephys/tpq085.
- Luostarinen, K. & Verkasalo, E. (2000). Birch as sawn timber and in mechanical further processing in Finland. A literature study.
- Luostarinen, K. & Hakkarainen, K. (2019). Chemical composition of wood and its connection with wood anatomy in *Betula pubescens*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34 (7): 577-584. doi: 10.1080/02827581.2019.1662939.
- Maillette, L. (1982). Structural Dynamics of Silver Birch. I. The Fates of Buds. *Journal of Applied Ecology*, 19 (1): 203-218. doi: 10.2307/2403005.
- Mäkinen, H. (2002). Effect of stand density on the branch development of silver birch (*Betula pendula* Roth) in central Finland. *Trees (Berlin, West)*, 16 (4-5): 346-353. doi: 10.1007/s00468-002-0162-x.
- Mäkinen, H. (2003). Forest Science 49(2) 2003301 Predicting External Branch Characteristics of Planted Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) on the Basis of Routine Stand and Tree Measurements. doi: 10.1093/forests/49.2.301.
- Mäkinen, H., Ojansuu, R. & Niemistö, P. (2003). Predicting external branch characteristics of planted silver birch (*Betula pendula* Roth.) on the basis of routine stand and tree measurements. *Forest Science*, 49 (2): 301-317.
- Niemistö, P., Kilpeläinen, H. & Heräjärvi, H. (2019). Effect of pruning season and tool on knot occlusion and stem discolouration in *Betula pendula*—situation five years after pruning. *Silva Fennica*, 53 (1).
- Nordhagen, E. & Gjølsgjø, S. (2013). Heltretøking av bjørk. Syrefelling som metode for reduksjon av fuktighet i en heltrevelt av bjørk i Aumdalen, Tynset. *Oppdragsrapport fra Skog og Landskap*.
- Novitskaya, L. L. (1998). Regeneration of bark and formation of abnormal birch wood. *Trees*, 13 (2): 74. doi: 10.1007/s004680050189.
- NTI. (2009). *Treteknisk Håndbok*. 4 utg.
- O'Hara, K. L. (2007). Pruning wounds and occlusion: A long-standing conundrum in forestry. *Journal of Forestry*, 105 (3): 131-138.
- Possen, B. J. H. M., Rousi, M., Silfver, T., Anttonen, M. J., Ruotsalainen, S., Oksanen, E. & Vapaavuori, E. (2014). Within-stand variation in silver birch (*Betula pendula* Roth) phenology. *Trees*, 28 (6): 1801-1812. doi: 10.1007/s00468-014-1087-x.
- Racko, V. (2013). Verify the accuracy of estimation the model between dimensional characteristics of branch scar and the location of the knot in the beech trunk. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology* (84).
- Raulo, J. (1987). *Björkboken*. Jönköping: Svenska Skogsstyrelsen.
- Shigo, A. L. (1984). Compartmentalization: a conceptual framework for understanding how trees grow and defend themselves. *Annual Review of Phytopathology*. 22: 189-214., 22: 189-214.
- Shigo, A. L. (1985). How tree branches are attached to trunks. *Canadian Journal of Botany*, 63 (8): 1391-1401.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. & Kira, T. (1964). A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory: I. Basic analyses. *Japanese Journal of ecology*, 14 (3): 97-105.
- Standard Norge. (2009). *NS-INSTA 142:2009 Trelast – Visuell styrkesortering – Bartrær*. Oslo: Standard Norge.
- Sverre Tronstad, A. T. (1995). *Tøking av bjørk*. Rapport 29: Norsk Treteknisk Institutt.
- Thomas, R. E. (2008). Predicting internal yellow-poplar log defect features using surface indicators. *Wood and Fiber Science*: 14-22.
- Torkaman, J., Vaziri, M., Sandberg, D. & Mohammadi Limaei, S. (2018). Relationship between branch-scar parameters and knot features of oriental beech (*Fagus orientalis* Libsky). *Wood Material Science & Engineering*, 13 (2): 117-120.
- Uri, V., Lohmus, K., Ostonen, I., Tullus, H., Lastik, R. & Vildo, M. (2007). Biomass production, foliar and root characteristics and nutrient accumulation in young silver birch (*Betula pendula* Roth.) stand growing on abandoned agricultural land. *European Journal of Forest Research*, 126: 495-506.
- Vestøl, G. (1998). *Single-tree models of knot properties in Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.)*: Ås-NLH Norges Landbrukshøgskole (Agricultural University of Norway).
- Vestøl, G. I. & Høibø, O. A. (2001). Prediction of knot diameter in *Picea abies* (L.) Karst. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59 (1-2): 129-136. doi: 10.1007/s001070050484.
- Vestøl, G. I. & Høibø, O. (2010). Bending strength and modulus of elasticity of *Pinus sylvestris* round timber from southern Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25 (2): 185-195. doi: 10.1080/02827581003730757.

- Wang, C., Zhao, Z., Hein, S., Zeng, J., Schuler, J., Guo, J., Guo, W. & Zeng, J. (2015). Effect of Planting Density on Knot Attributes and Branch Occlusion of *Betula alnoides* under Natural Pruning in Southern China. *Forests*, 6 (4): 1343-1361. doi: 10.3390/f6041343.
- Wang, C., Guo, J., Wang, H., Hein, S. & Zeng, J. (2024). Natural Pruning and Branch Growth Dynamics of Young *Betula Alnoides* in Response to Planting Density. *Available at SSRN 4718356*.
- Wilson, B. F. (1998). Branches versus stems in woody plants: control of branch diameter growth and angle. *Canadian journal of botany*, 76 (11): 1852-1856.
- Zimmer, K., Hysten, G., Kühne, C., Hanssen, K., Fløistad, I. & Smith, A. (2023). *Bjørk i Norge*. NIBIO Rapport: NIBIO, Divisjon Skog og Utmark. Tilgjengelig fra: <https://hdl.handle.net/11250/3067785> (lest 17.04.2024).
- Zolotarev, F., Eerola, T., Lensu, L., Kälviäinen, H., Helin, T., Haario, H., Kauppi, T. & Heikkinen, J. (2020). Modelling internal knot distribution using external log features. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179: 105795.

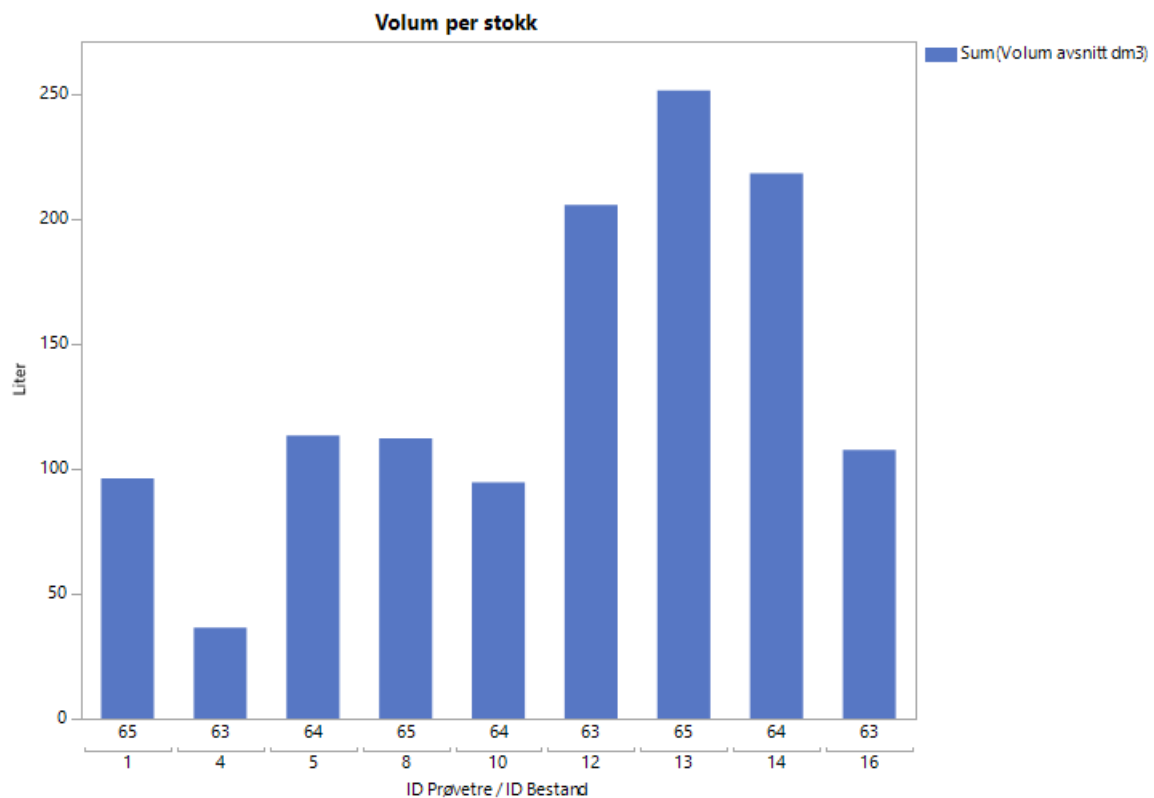
8. Vedlegg

8.1. Skjema for feltevaluering

Evalueringstabell med kommentarer											
bestand ID	For eksempel B.1	sted	Longitude/latitude/høyde over havet			antall trær	HKL	bonitet	bestandsalder		
forøngelse	Naturlig/planted	pleietiltak	Kvistet, tynnet, 1 gang eller flere ganger								
tre ID											
trehøyde											
BHD											
første grønn kvist											
første svart kvist											
høyde til krone	Krone + første grønn kvist, hvis ikke avstand er større enn 1 m										
temperatur	Omgivelsestemperatur til treet under ST300 måling										
avstand	Avstand mellom lesere										
ST300 [km/s]	Verdi fra instrumentet										
stokk ID											
stokk lengde (fra høyde)	3.1 m eller for eksempel 4 m stokklengde, vanlig høyde rotstokk 0,2m, merk høyde hvis start lengre opp										
stokk type	Rotstokk, andre eller tredje stokk										
bark	Skorpebark eller glatt hvit, eller innimellom										
langkrok	i cm over 3 m										
tverr-/ sleng-/ rotstokk	Ja eller nei										
totalt antall kvist	Grønn + tørr + store bart										
på en eller to sider											
antall frisk kvist											
kvistdiameter (<3cm>)	Antall friske kvist større eller mindre enn 3 cm										
antall tørr-/ råtekvist											
bart antall (stor)	Bart større enn 1/2 av stammediameteren ved stedet										
kvistknøler											
føyre											
hogstskader											
kommentarer											

Figur 27.. Evalueringstabell for Produksjonspotensialet se fra TRE ID- ved Trehøyde, DBH, første grønn kvist, første svart kvist, høyde til krone, temperatur, samt måling av akustisk lydhastighet. Sistnevnte måling førte registreringene over til Kvalitetspotensialet (se STOKK ID)

8.2. Volum

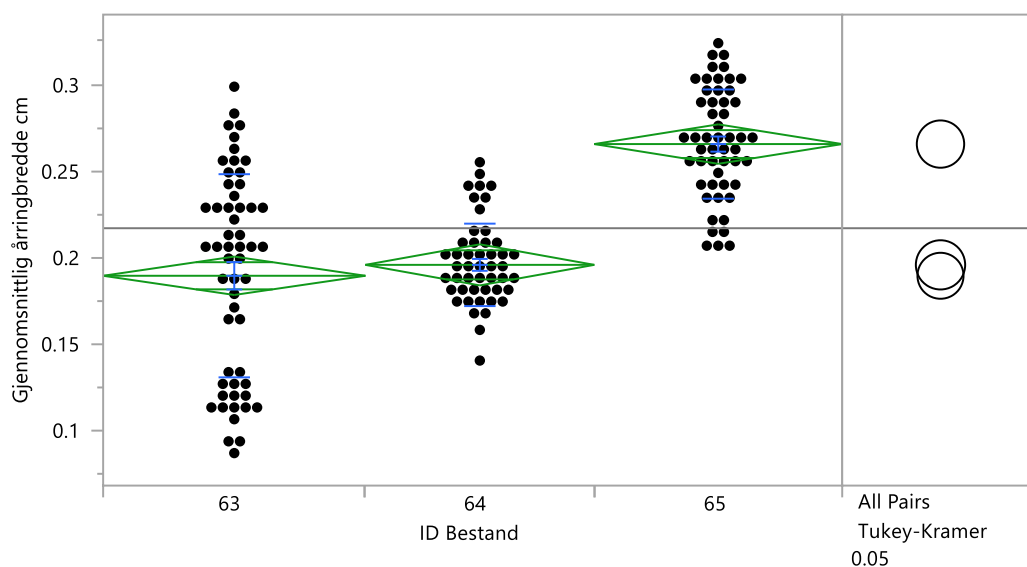


Figur 28. Volum estimer

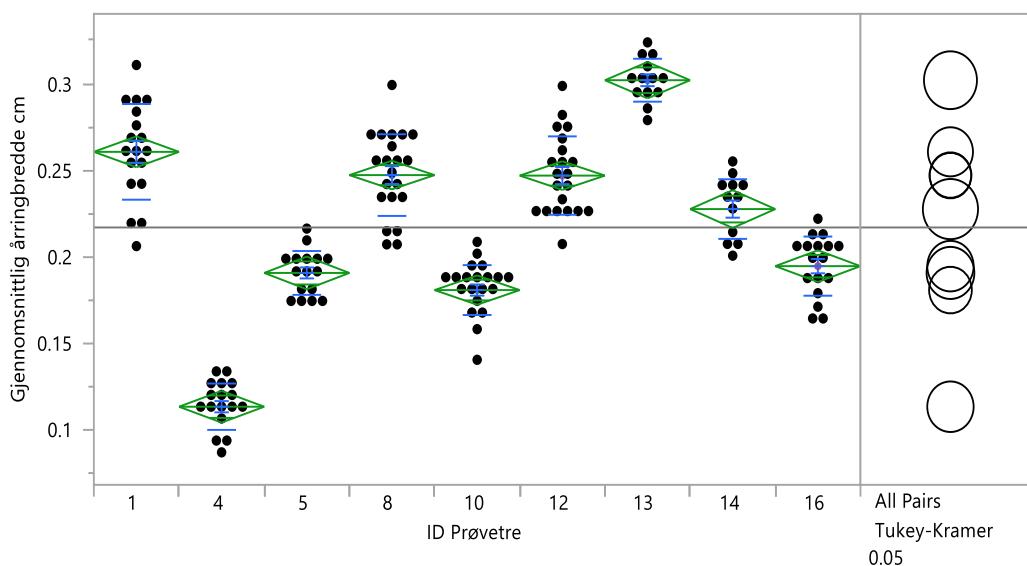
Tabell 13. Volumestimer for prøvetre (6 m stakk), og største og minste avsnitt (60 cm)

Bestand ID	Prøvetre ID	N	Sum (stakk (liter))	Min (avsnitt (liter))	Maks (avsnitt (liter))	Std. Dev. (avsnitt (liter))
63	4	5	36	4.1	9.7	2.3
	12	5	206	31	49	7.7
	16	5	108	15	29	5.9
64	5	5	113	19	28	3.5
	10	5	95	14	23	3.3
	14	5	218	36	54	7.1
65	1	5	96	14	25	4.3
	8	5	112	18	29	4.2
	13	5	251	41	63	8.4

8.3. Gjennomsnittlig årringbredde



Figur 29. Gjennomsnittlig årringbredde på bestandsnivå



Figur 30. Gjennomsnittlig årringbredde på prøvetrenivå

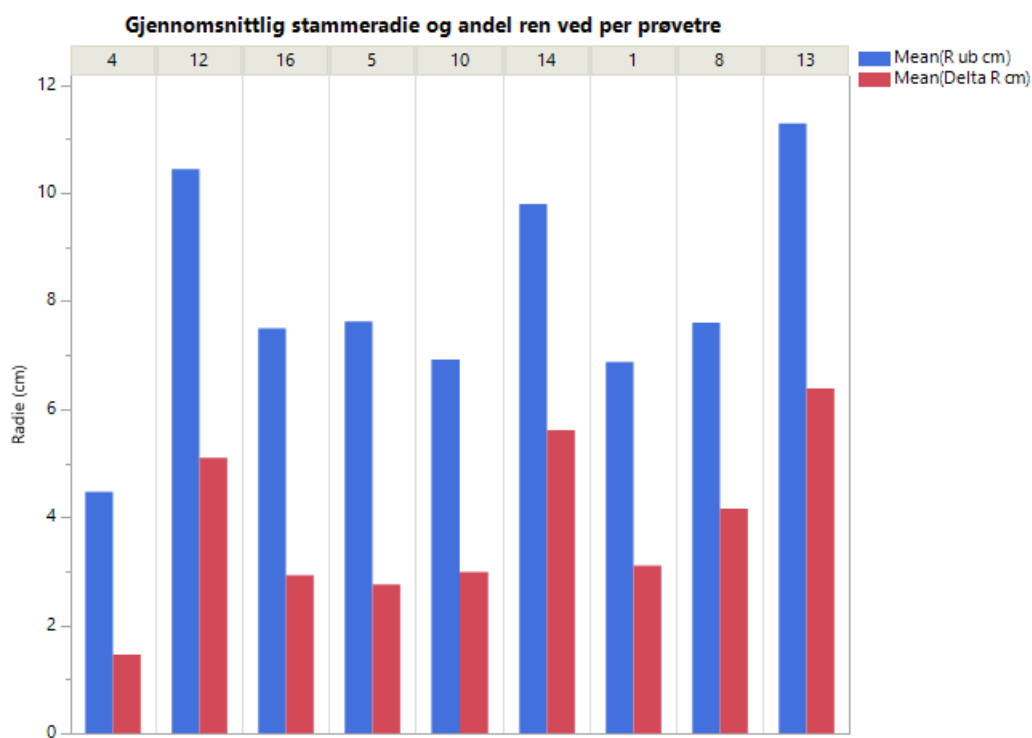
Tabell 14. Gjennomsnittlig årringbredde på bestands- og prøvetrenivå

ID Bestand	N	Gj.sn. Årringbredde (cm)	Std. avvik	Std. feil	95% KI nedre	95% KI Øvre
63	55	0,189	0,0586	0,00791	0,1736	0,2053
64	48	0,196	0,0238	0,00344	0,1889	0,2027
65	52	0,266	0,0315	0,00437	0,2568	0,2743
ID Prøvetre	N	Gj.sn. Årringbredde (cm)	Std. avvik	Std. feil	95% KI nedre	95% KI Øvre
1	18	0,261	0,0276	0,00651	0,2469	0,2744
4	17	0,113	0,0134	0,00325	0,1066	0,1203
5	16	0,191	0,0127	0,00316	0,1839	0,1974
8	21	0,247	0,0236	0,00514	0,2365	0,2579
10	20	0,181	0,0144	0,00322	0,1741	0,1892
12	21	0,247	0,0226	0,00494	0,2366	0,2572
13	13	0,302	0,0124	0,00343	0,2945	0,3094
14	12	0,228	0,0172	0,00497	0,2166	0,2385
16	17	0,195	0,0171	0,00414	0,1858	0,2034

8.4. Tabell og grafer for kvistutvikling

Tabell 15. Gjennomsnittsverdier for radielle mål per prøvetre

		ID Bestand / Prøvetre								
		4	63 12	16	5	64 10	14	1	65 8	13
R_{OB} (cm)	Mean	4,73	11,02	7,83	8,17	7,31	10,40	7,31	8,02	11,85
	Std Dev	0,61	1,07	0,89	0,57	0,62	0,65	0,78	0,80	1,16
	Min	3,54	9,20	6,25	7,41	5,50	9,50	5,98	6,26	10,35
	Max	5,52	14,01	9,25	9,19	8,44	11,88	9,12	9,51	15,57
R_{UB} (cm)	Mean	4,47	10,44	7,50	7,62	6,92	9,80	6,88	7,60	11,29
	Std Dev	0,58	1,03	0,88	0,57	0,63	0,65	0,79	0,73	1,03
	Min	3,31	8,71	5,87	6,70	5,20	9,00	5,38	5,99	9,96
	Max	5,25	13,29	8,99	8,48	7,94	11,23	8,54	9,05	14,51
R_{UFF} (cm)	Mean	4,29	6,13	5,75	5,76	5,60	5,66	4,53	5,35	8,17
	Std Dev	0,33	2,43	1,31	1,34	1,17	1,94	0,95	1,98	2,64
	Min	3,92	2,68	2,98	3,27	3,20	1,63	2,91	1,54	3,78
	Max	4,72	10,48	7,66	7,62	7,32	8,45	6,16	7,68	12,16
R_{OK} (cm)	Mean	3,20	5,99	4,34	4,78	4,41	4,48	4,04	3,87	5,54
	Std Dev	0,62	3,03	1,59	1,76	1,03	2,04	1,94	2,10	2,05
	Min	2,38	1,30	1,85	2,35	2,01	1,72	0,95	0,84	2,61
	Max	4,55	10,94	6,54	8,12	6,83	8,33	7,36	6,55	9,72
R_{SK} (cm)	Mean	3,08	5,38	4,57	4,86	3,93	4,19	3,77	3,44	4,90
	Std Dev	0,81	2,95	2,23	1,87	0,99	1,88	1,97	2,01	2,18
	Min	2,03	1,04	1,65	2,17	1,74	2,34	0,70	0,20	0,99
	Max	5,29	10,64	9,12	7,78	6,16	8,05	7,78	5,99	9,31
R_{GK} (cm)	Mean	2,51	4,02	3,67	3,45	3,22	2,87	2,71	2,87	3,44
	Std Dev	0,81	2,48	2,07	1,15	1,00	1,30	1,57	1,72	1,41
	Min	1,46	1,04	1,24	1,57	1,74	1,22	0,61	0,20	1,33
	Max	4,60	9,30	7,65	5,78	6,00	5,20	6,59	5,07	5,63



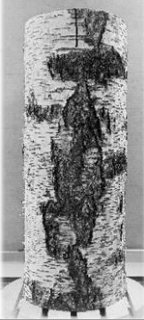
Figur 31. Gjennomsnittsverdier

Tabell 16. Mengde kvistfri ved per prøvetre

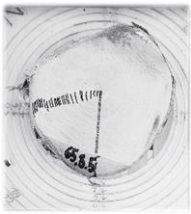
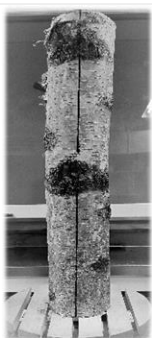
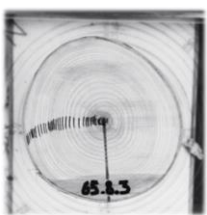
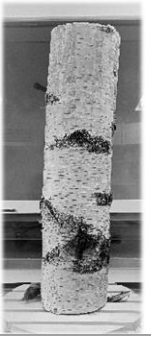
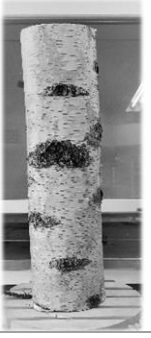
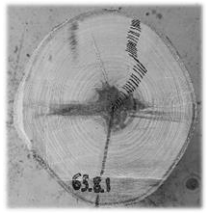
B_{ID}	P_{ID}	R_{UB} (%)	Δ_R (%)	Mengde kvistfri ved(%)
63	4	75	25	33,3
	12	67	33	49,3
	16	72	28	38,9
64	5	73	27	37
	10	70	30	42,9
	14	64	36	56,2
65	1	69	31	44,9
	8	65	35	53,8
	13	64	36	56,2

8.5. Dokumentasjon avsnitt

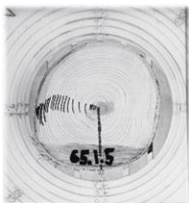
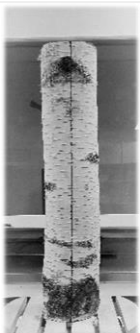
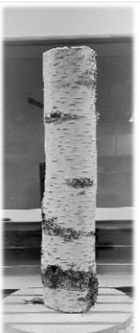
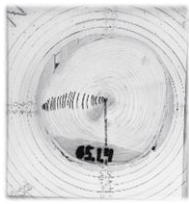
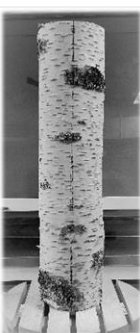
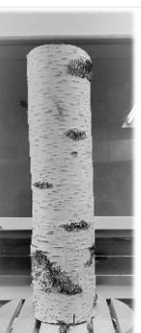
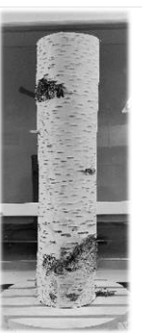
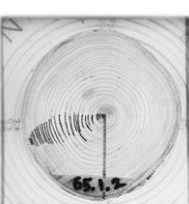
Tabell 17. Dokumentasjon: Avsnitt, (B65P13),

Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
4				
				
				
				

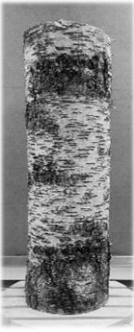
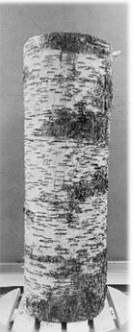
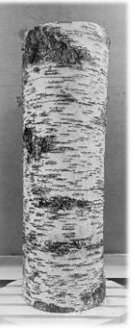
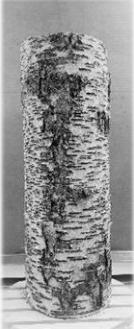
Tabell 18, Dokumentasjon: Avsnitt, (B65P8),

Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
				
				
				
				

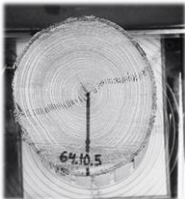
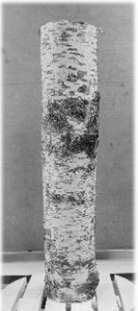
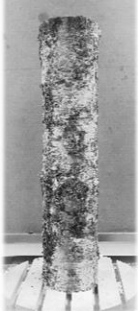
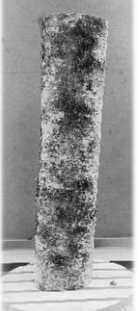
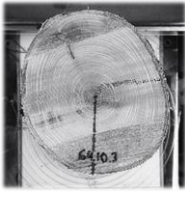
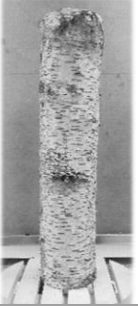
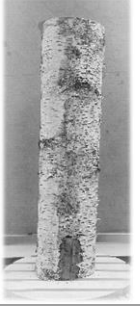
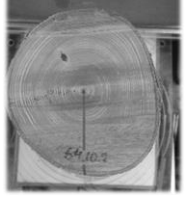
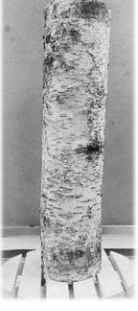
Tabell 19, Dokumentasjon: Avsnitt, (B65P1).

Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
				
				
				
				

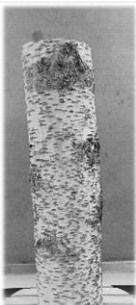
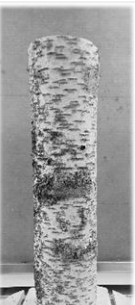
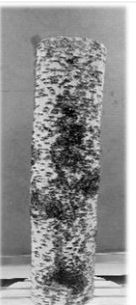
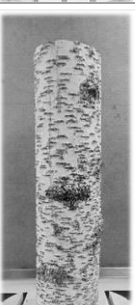
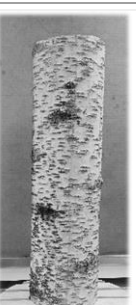
Tabell 20, Dokumentasjon: Avsnitt, (B64P14),

Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
5				
4				
3				
2				
1				

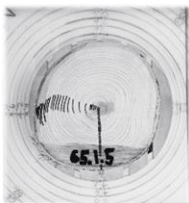
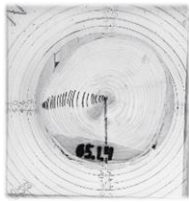
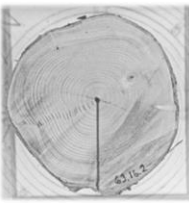
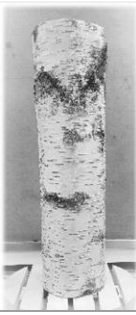
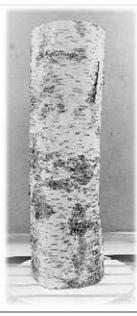
Tabell 21, Dokumentasjon: Avsnitt, (B64P10),

Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
				
				
				
				

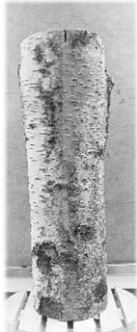
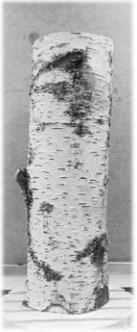
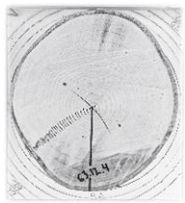
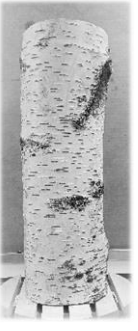
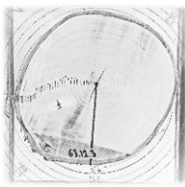
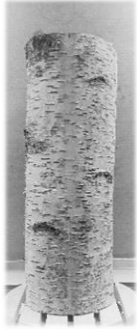
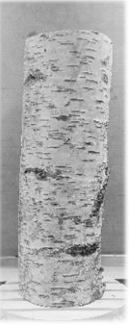
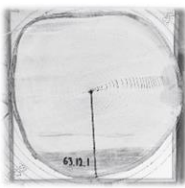
Tabell 22, Dokumentasjon: Avsnitt, (B65P5),

Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
5				
4				
3				
2				
1				

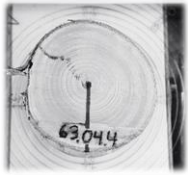
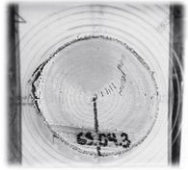
Tabell 23, Dokumentasjon: Avsnitt, (B63P16),

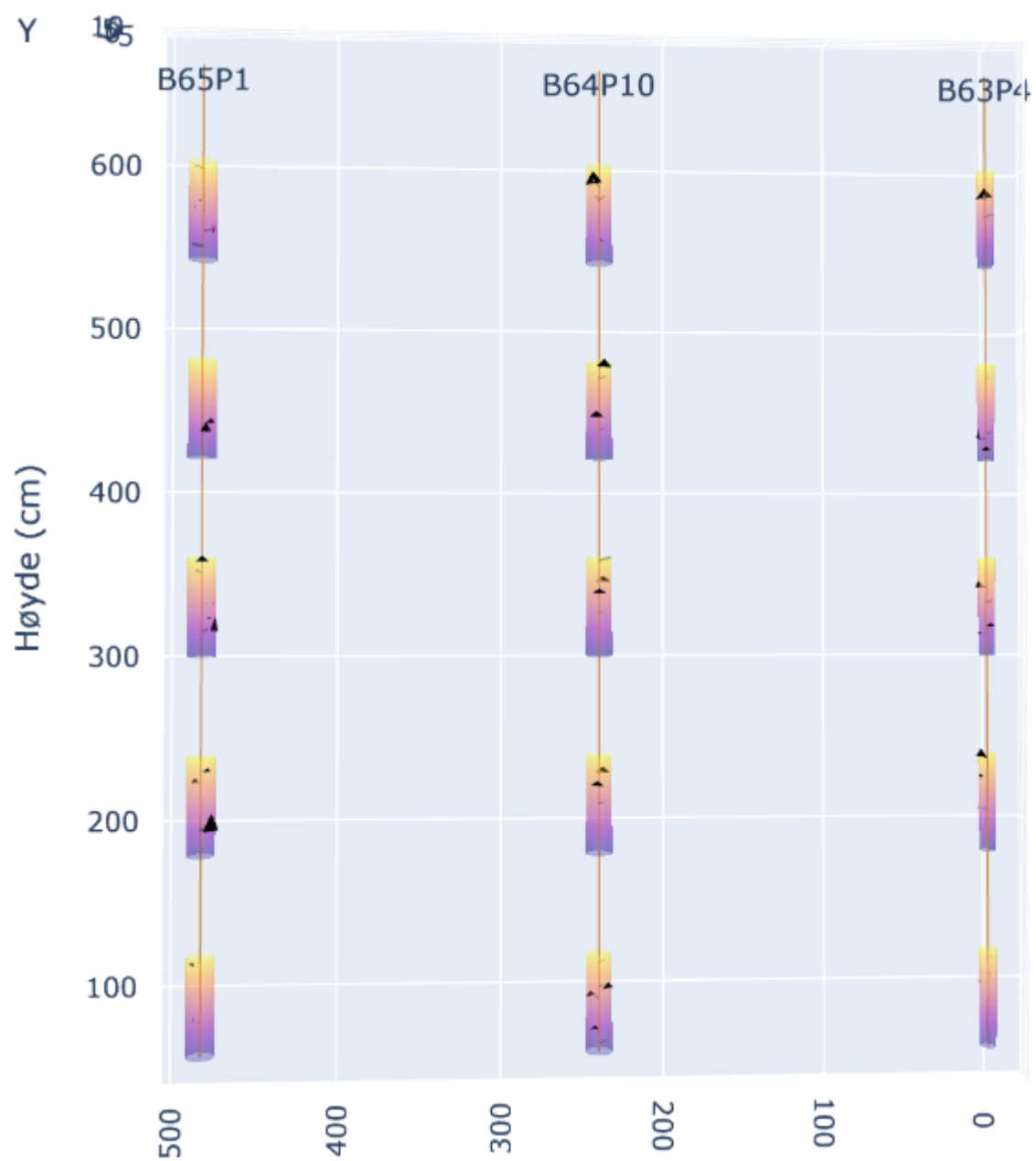
Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
				
				
				
				

Tabell 24, Dokumentasjon: avsnitt, (B63P12).

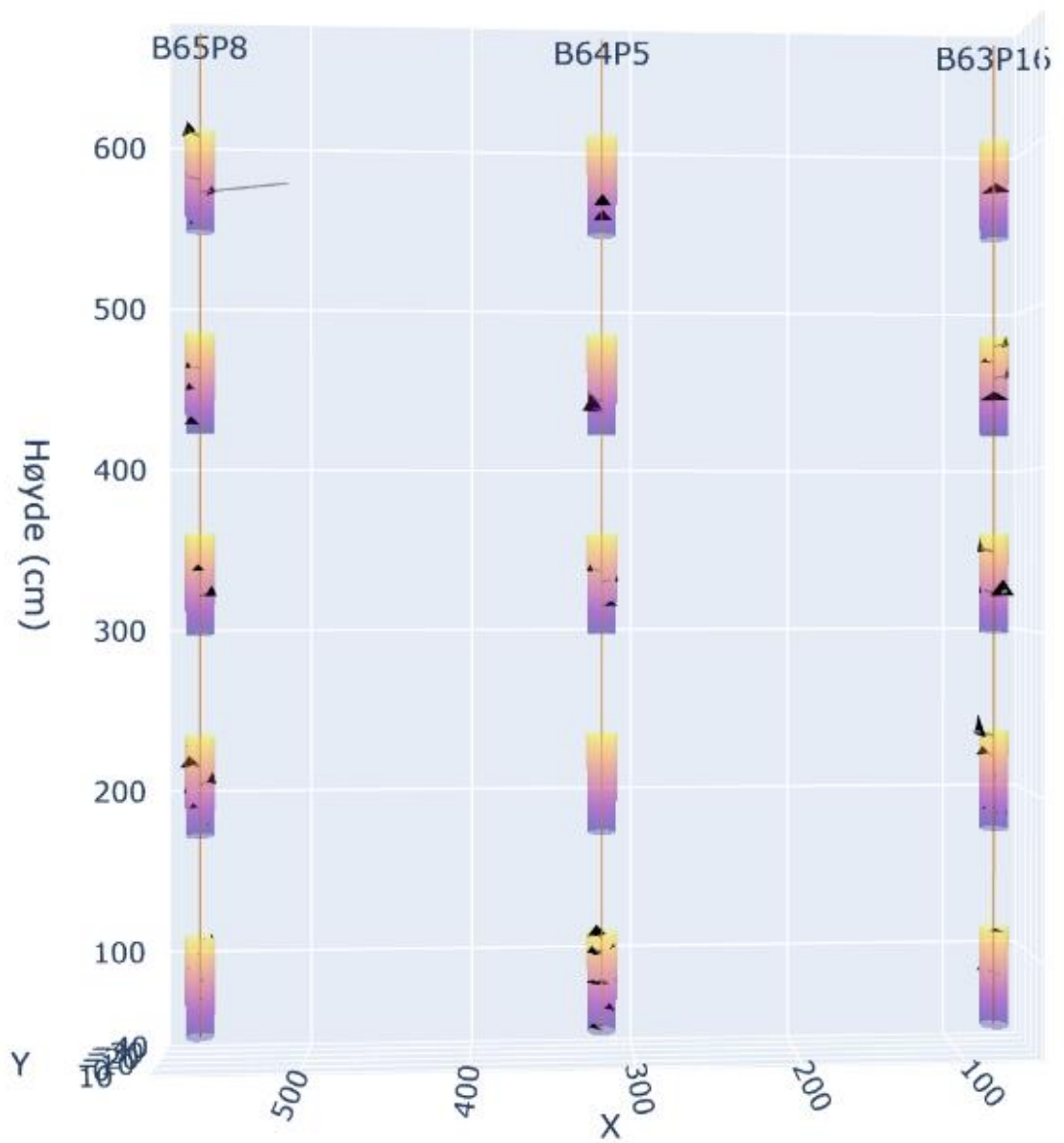
Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
				
				
				
				

Tabell 25, Dokumentasjon: Avsnitt (B63P4)

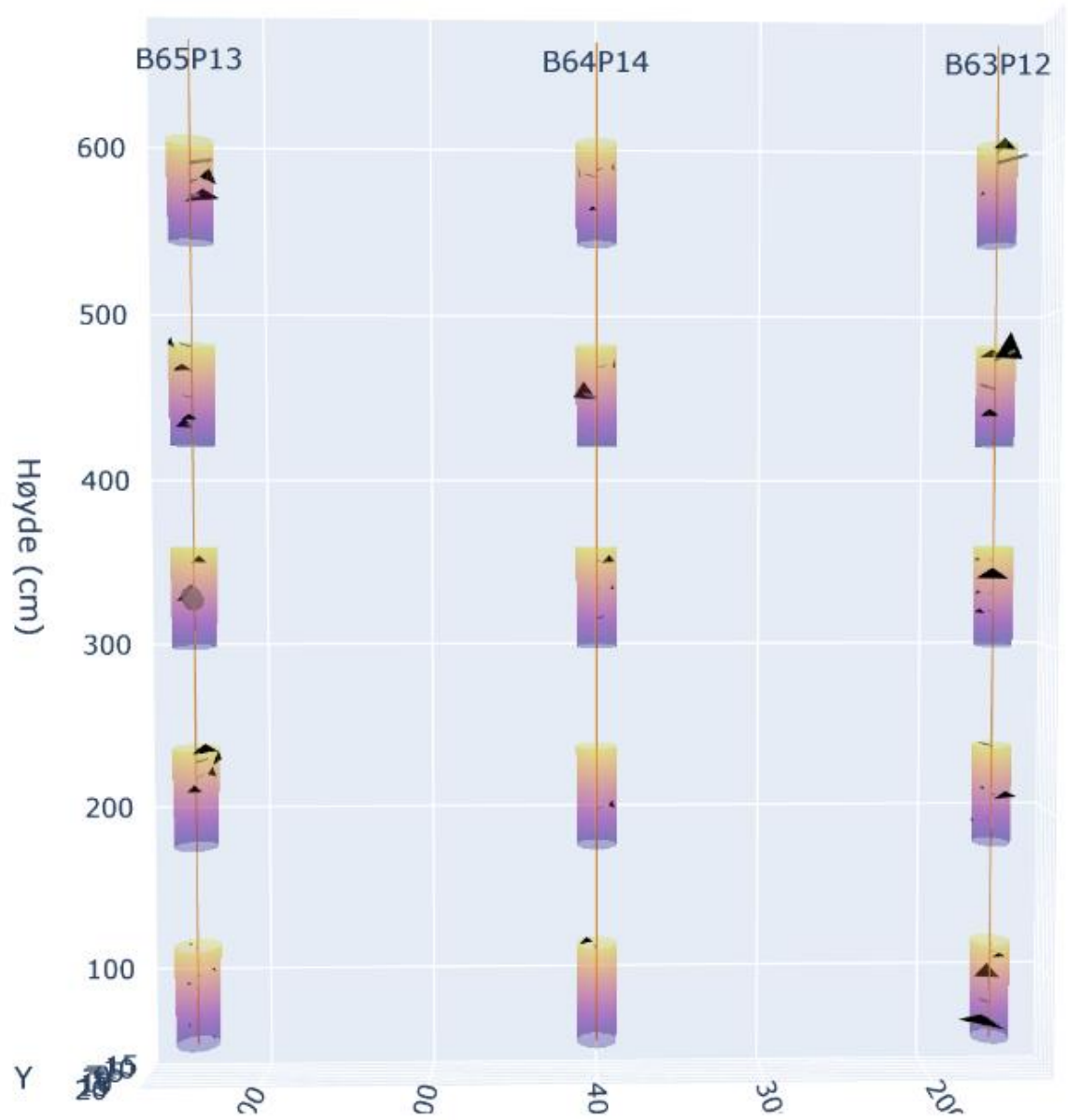
Avsnitt	Nord	Øst	Sør	Vest
				
				
				
				
				



Figur 32, Simulerte prøvetrær fra registreringer i klasse DBH_I



Figur 33, Simulerte prøvetrær fra registreringer i klasse DBH_II



Figur 34, Simulerte prøvetrær fra registreringer i klasse DBH_III



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway