



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

Predikering av friskkvistlengde i furu med skog- og trevariabler og data det er mulig å ekstrahere fra industriell CT-skanning

Predicting sound knot length in Scots pine with
forest and tree variables and data that can be
extracted from industrial CT-scanning

Kristoffer Vatnar

Skogfag

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten for mastergrad i skogfag ved Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA) på Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU).

Jeg vil rette en stor takk til min hovedveileder professor Olav Albert Høibø og medveileder professor Geir Isak Vestøl ved NMBU. Takk for all hjelp og støtte gjennom hele prosessen. Takk til overingeniør Roar Økseter for veiledning under datainnsamling og laboratoriearbeid. Takk til NIBIO for kjernevedreagens til datainnsamling og overingeniør Annie Aasen for opplæring i laboratoriearbeid. Det rettes også en takk til Tor-Åsmund Hovda og Eirik Anders Nygaard som har samlet inn store deler av datagrunnlaget i samband med sin masteroppgave.

Takk til medstudenter for to fine år ved NMBU på Ås.

Ås, 31. mai 2021

Kristoffer Vatnar

Sammenheng

Formålet med denne studien er å utvikle friskkvistmodeller som baserer seg på variabler som kan registreres ved CT-skanning av tømmerstokker. Trelast med frisk kvist har visuelle egenskaper som er attraktive i forhold til trelast med tørr kvist. Virkeskvalitet er avgjørende for den økonomiske avkastningen i sagbruksindustrien. Generelt er kvist den viktigste kvalitetsreducerende faktoren i trelast. Tidligere studier på kvistegenskaper har fokusert spesielt på kvistdiameter, og det er funnet god korrelasjon mellom kvistdiameter og friskkvistlengde. CT-skannere kan registrere kvistdiameter på en god måte i kjerneveden i furu (*Pinus Sylvestris*). Friskkvistlengden kan også estimeres, men det er vanskelig å bestemme denne presist direkte fra kvistbildene en får fra en CT-skanner, fordi forskjellen i densiteten til tørrkvist og friskkvist er relativt lik. En kan imidlertid bruk andre variabler som kan måles med CT-skanner til å modellere friskkvistlengden.

43 furutre fra 7 forsøksfelt forvaltet av Sveriges Landbruksuniversitet (SLU) inngår i studien. Kvistkranser ble dissekert og friskkvistlengde, kvistdiameter og andre kvistparametre, samt data om kransene, trærne og bestandene ble registrert. Lineære miksa modeller ble utarbeidet ved å bruke «restricted maximum likelihood»-metoden (REML) i Mixed Model-plattformen i JMP Pro.

Kvistdiameter står frem som den viktigste variabelen i studien. Årringbredde for de første 20 årringene og stammeradius ved den enkelte kvist fremstår også som viktige variabler som kan registreres med en CT-skanner. En modell basert på variabler som er mulig å registrere med CT-skanner fikk en feilmargin (RMSE) på 10 mm og R^2 på 0,645 i denne studien. Ved å tilføre breddegrad, en lett registrerbar og anvendelig variabel, som forklaringsvariabel ble RMSE redusert til 8,85 mm og R^2 økte til 0,722. Den best tilpassede modellen inneholdt også informasjon om den vertikale plasseringen av kvisten i treet, noe som reduserte RMSE betraktelig, til 5,31 mm. R^2 til denne modellen ble 0,899.

Abstract

The purpose of this study is to develop sound knot models that are based on variables that can be registered by a CT scanner. Lumber with sound knots has visual properties that are more attractive than lumber including dry knots. Wood quality is crucial for the economic return in the sawmill industry. In general, knots are the most important quality-reducing factor in lumber. Previous studies on knot properties have focused on knot diameter and a good correlation between knot diameter and sound knot length has been found. CT-scanners can detect knot diameter in heart wood of pine (*Pinus Sylvestris*) in a good way, but precise predictions of sound knot length are difficult to make from CT-pictures directly, since density of sound knot wood and dry knot wood is relatively equal. However, it is possible to use other variables possible to measure with CT-scanners to model the sound knot length, like for instance knot diameter.

43 pine trees (*Pinus sylvestris*) from 7 experimental fields managed by the Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) are included in the study. Knot whorls were dissected and sound knot length, knot diameter and other knot parameters, as well as data about the whorls, trees and stands have been recorded. Linear mixed models were developed using the "restricted maximum likelihood" method (REML) in the Mixed Model-platform in JMP Pro.

Knot diameter stands out as the most important variable in this study. Annual ring width for the first 20 annual rings and stem radius at the individual knot also appear as important variables that can be registered by a CT-scanner. A model based on variables that are possible to extract from CT-scanners was developed. The RMSE was 10 mm and $R^2 = 0.645$. When adding latitude, an easily detectable and usable variable, as an explanatory variable, RMSE was reduced to 8.85 mm and R^2 increased to 0.722. The best model in the study contained information about the vertical position of the knots in the tree. This model got an RMSE of 5.31 mm and R^2 of 0.899.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innledning	1
Material og metode	5
<i>Statistikk</i>	<i>8</i>
Resultater	10
Diskusjon	14
<i>Modell 1</i>	<i>14</i>
<i>Modell 2</i>	<i>14</i>
<i>Modell 3</i>	<i>15</i>
<i>Modell 4</i>	<i>16</i>
<i>Modell 5</i>	<i>17</i>
Konklusjon og anvendelse	18
Litteraturliste	19

Innledning

Virkeskvaliteten er avgjørende for den økonomiske avkastningen i sagbruksindustrien. Sluttproduktene består av en lang rekke produkter med forskjellige egenskaper og kvalitet. Trevirke er et levende materiale som vil ha store individuelle forskjeller, både når det gjelder utseende og mekaniske egenskaper. Derfor er det viktig å indentifisere egenskapene og sortere trelasten for å finne passende anvendelse. Evaluering av egenskapene til en plank gjøres enten ved visuell inspeksjon og/eller ved forskjellige typer automatiske målesystemer slik at planken kan bli klassifisert basert på regler for de forskjellige kvalitetsklassene. De vanligste kriteriene er de som er viktige for visuelt utseende og de som er viktige for ulike mekaniske egenskaper.

Generelt er kvist den viktigste kvalitetsreducerende faktoren i trelast. For produkter hvor styrkeegenskapene er viktig betyr kvistdiameteren mye, siden kvist med stor diameter gir mer fiberforstyrrelser, og med det redusert fasthet og stivhet, enn kvist med liten diameter. For trelast hvor utseendet er viktig betyr også andre kvistegenskaper mye, for eksempel om kvisten er frisk eller tørr, eventuelt rått. Kvaliteten på sluttproduktet har stor innvirkning på verdien, derfor er det veldig viktig for lønnsomheten å vite hvilke faktorer som påvirker kvaliteten, og kontrollere prosessene i verdikjeden slik at man oppnår størst mulig volum av høykvalitetsprodukter.

Kvistene i furu (*Pinus sylvestris*) befinner seg i kranser, med en krans per vekstsesong. Informasjon om disse kan brukes som grunnlag for å analysere kviststrukturen til en stokk. Kviststrukturen kan spesifiseres som antall kvist per krans eller per lengdeenhet, kvistdiameter, kvistlengde, friskkvistlengde, avstand mellom kranser og kvistfritt trevirke. God kunnskap om kvistegenskapene kan brukes til å ta bedre beslutninger om hvordan stokken kan deles opp. For å oppnå best mulig verdiutbytte fra skurprosessene er det derfor ønskelig å vite mest mulig om kviststrukturen i stokken før stokken skjæres.

Studier på kvistegenskaper skiller seg fra annen, kanskje mer tradisjonell skogforskning, ved at det fokuseres på ulike utnyttelsesaspekter av individuelle trær. Studiene gjenspeiler kvistens viktighet for sluttproduktene og økonomien for sagbruket. De fleste av studiene har fokusert på kvistdiameteren. Denne studien fokuserer på friskkvistlengden og hvordan den blant annet korrelerer med kvistdiameteren (Björklund & Moberg, 1999; Høibø & Turnblom,

2017; Høibø et al., 1997; Moberg, 2001, 2006; Vestøl et al., 1997). Høibø og Turnblom (2017) fant at vertikal variasjon i friskkvistlengde, eller friskkvistlengdeprofil, i stor grad følger samme mønster som kvistdiameterprofilen. Øyen (1999) fant en økning i friskkvistlengde med økende avstand fra bakken til 20 % stammehøyde for gran (*Picea Abies*). Deretter var friskkvistlengden relativt konstant til bunnen av den levende kronen. Videre avtok friskkvistlengde med stammeradiusen lenger opp i treet. Høibø et al. (1999) fant et lignende mønster for furu. Øyen (1999) fant også en positiv sammenheng mellom diameter-tilvekst og friskkvistlengde.

Forskjellige modelleringsmetoder er blitt anvendt for å beskrive hvordan kvistdiameteren varierer innen og mellom trær. En del eldre studier har brukt vertikal fordeling av utvendige grendiameter sammen med vekstmodeller og krone-resesjonsmodeller for å modellere den interne kvistdiameteren (Houllier et al., 1995; Maguire et al., 1991). I en annen tilnærming har Høibø et al. (1997) brukt data fra dissekering av kvistkranser til å predikere største kvistdiameter i hver krans med modeller som bruker ulike tre og bestandsvariable. Med sistnevnte tilnærming unngår man å kombinere ulike modeller. Modellen kan brukes til å forutsi kviststørrelse mer direkte. Slike modeller er lettere å bruke og man unngår en vanskelig sammensatt modeller (Houllier et al., 1995).

Björklund (1997) utførte en studie på indre kviststruktur i furu ved å bruke 185 CT-skannede furutrær. Den interne kviststrukturen ble brukt til å identifisere forskjellige kvistsoner i ulike høyder i furutrær. Den første sonen, i bunnen, kalte Björklund «etablering». Den kjennetegnes av økende kvistdiameter med økende avstand fra rota, som følge av kronevekst og økende biomasse. Andre sone kalte Björklund «konstant vekst». Her foregår høydeveksten og resesjon av kronen i omtrent samme hastighet. Kviststørrelsen er konstant eller litt økende i denne sonen. Tredje sone kalles «stagnering». Her finner man økende kviststørrelse på grunn av avtagende høydevekst, samt redusert konkurranse blant de gjenværende trærne i eldre bestand. Fjerde og siste sone kalles «krone» og består av den grønne, levende krona. Her avtar kviststørrelsen mot toppen på grunn av avsmalning i stammen. Kvistdiameteren er korrelert med treetts vekst og variabler som beskriver denne (Vestøl & Høibø, 2001). Stamme og kvistutvikling påvirkes begge av bestandstettheten. Et glissent bestand med lav tetthet vil få lenger og tykkere grener sammenlignet med trær i tettere bestand (Braastad, 1979; Johansson, 1992). Innen jevnaldrende bestand av gran er kvistdiameteren i den nedre delen av stammen relatert til diameteren i brysthøyde (Braastad, 1979; Johansson, 1992). Ovennevnte studier

vurderer alle kvistdiameterer i forskjellige høyder i nedre del av stammen. Kvistdiameteren til gran øker oppover i nedre del av stammen (Braastad, 1979; Colin & Houllier, 1991). Den maksimale grendiameteren til et tre finnes i den nedre delen av den levende kronen (Colin & Houllier, 1991). Petersson (1998) har funnet ut at gjennomsnittet av største kvistdiameter i kransene i Björklunds (1997) andre fase med konstant vekst kan modelleres med årringbredde og breddegrad som viktige forklaringsvariabler. Informasjon om kvist og hvilke variabler som påvirker kvistsettingen i trær kan brukes til å utvikle modeller som beskriver den indre kviststrukturen. Modellering av indre kviststruktur vil kunne gi viktig informasjon til sagbrukene om hvordan tømmeret skal skjæres for å utnytte stokkene best mulig.

Datatomografi eller CT-skanning kan brukes til å måle de indre egenskapene til trær. I dag er metoden i bruk på to sagbruk i Sverige. Opprinnelig ble Datatomografi designet som et diagnostisk hjelpemiddel innen medisin. Det har senere blitt introdusert i jord- og plantevitenskap. Metoden er en ikke-destruktiv teknologi som produserer et bilde ved å sende røntgenstråler gjennom objektet og registrere hvor mye av strålingen som går igjennom. En CT-skanner er bygd opp som en sylinder med en røntgenkilde som roterer rundt objektet og sender røntgenstråler fra alle vinkler. Røntgenbilder i 2-D blir deretter satt sammen til å lage et tredimensjonalt bilde av den indre strukturen til objektet. Grunnlaget for et røntgenbilder er at røntgenenergien absorberes av gjenstanden den passerer gjennom, jo høyere tetthet materialet har, jo mer røntgenenergi vil den absorbere. Ulike deler av treet har ulik tetthet, kvister har for eksempel høyere tetthet enn den omkringliggende veden. Derfor kan disse sees i 3-D bildet fra CT-skanninger (Beaulieu & Dutilleul, 2019).

Oja (2000) evaluerte nøyaktigheten til ulike kvistparametere, med fokus på kvistdiameteren, målt automatisk med en CT-skanner. Hver kvist ble beskrevet med 10 parametere som ga en relativt presis beskrivelse av kviststrukturen. For å evaluere nøyaktigheten ble stokkene etter CT-skanning sagt til plank og kvistdiameterne ble registret på plankene. Studien viser at CT-skanning gir en nøyaktig beskrivelse av antall, plassering og størrelse til kvisten.

Kvistdiameteren ble målt med en gjennomsnittlig negativ undervurdering på 2 mm og standardavvik på 3 mm. Grensen mellom friskkvistdelen og tørrkvistdelen har imidlertid vist seg å være noe vanskeligere å registrere presist på grunn av små densitetsforskjeller (Stängle et al., 2015). Siden planker som ikke inneholder tørre kvister kan brukes til andre og mer verdifulle produkter enn planker som inneholder tørrkvist, fører lite presis registrering av friskkvistgrensen til en mindre optimal skurprosess. Det er derfor ønskelig å forbedre

predikeringen av friskkvistlengden i forhold til det en i dag greier med de industrielle CT-skannerne.

Modellering av friskkvistlengde basert på ulike bestands og trevariable er gjennomført i noen studier. Øyen (1999) modellerte friskkvistlengde fra 20 % stammehøyde til kronegrensen som en sylinder hvor overflaten skulle inneholde 85 % friske kvister. Han modellerte diameteren til denne sylinderen med ulike tre og bestandsvariable. Modellene skulle brukes i hogstmaskiner til å optimere apteringen av tømmeret til henholdsvis tømmer som skulle gi trelast med friske kvister og trelast med tørre kvister. Høibø og Turnblom (2017) fant at friskkvistlengden i Douglasgran (*Pseudotsuga menziesii*) kan predikeres ved bruk av samme variabler som for kvistdiameter. Høibø & Turnblom fant at årringbredde for forskjellige intervaller var viktige forklaringsvariable. Moberg (2006) lagde en lineær miksa modell ved å bruke gjennomsnittlig og relativ kvistdiameter, årringsbredde nær margin, relativ brysthøydiameter og forskjellige kronemål som forklaringsvariable. Begge studiene fant friskkvistlengden med en RMSE (root mean square error) på rett over 10 mm.

Formålet med denne studien er å lage en modell som beskriver friskkvistlengden på bakgrunn av data som kan registreres ved CT-skanning, samt modeller som benytter bestand og enkelttrevariable sammen med data som kan registreres i CT-skanner for å oppnå høyere presisjon i forbindelse med predikering av friskkvistlengde enn det en CT-skanner og en statistisk modell, som baserer seg på praktisk målbare bestands og trevariable, hver for seg kan greie.

Material og metode

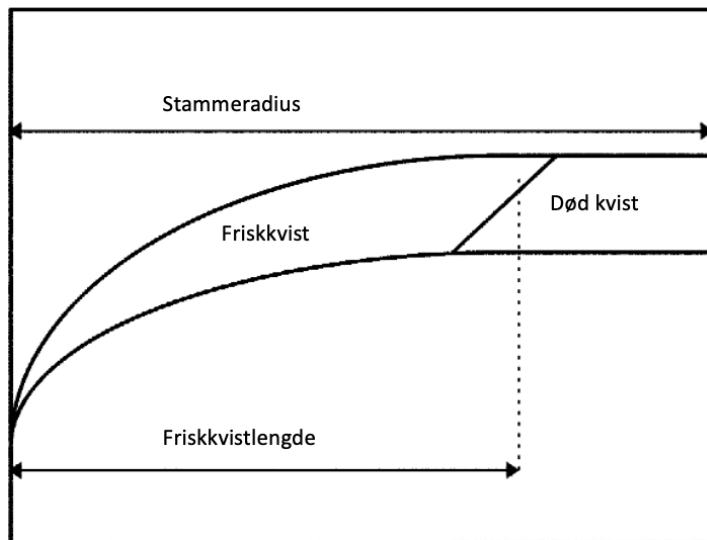
Store deler av datagrunnlaget kommer fra en masteroppgave av Hovda og Nygaard (2007) som tok for seg kvistegenskaper hos furu fra ulike tynningsregimer. Ytterligere data for årringbredder for hver enkelt kvistkrans ble gjennomført i samband med dette studiet.

I denne studien ble det brukt 43 furutrær fra Sverige. Trærne ble samlet fra 7 forskjellige forsøksfelt med ulike tynningsregimer. Trærne ble felt i buffersonen til forsøksfeltene. Disse hadde samme behandling som selve forsøksfeltet. Forsøksfeltene er forvaltet av Sveriges Landbruksuniversitet (SLU) og det foreligger detaljert informasjon om historikken til feltene. Fra hver lokasjon ble det felt prøvetrær i ett bestand som var høytynnet og ett bestand som var lavtynnet. For hvert bestand ble trærne klavet og sortert etter diameter i brysthøyde. Trærne ble deretter fordelt i klassene undertrykte, medherskende og dominante trær etter diameter, med likt antall trær i hver klasse. Det ble felt ett tre for hver klasse for hvert tynningsregime, det vil si totalt 6 trær per forsøksfelt. Bestandenes totalalder varierte fra 57 til 90 år. Boniteten varierte fra 18 til 31 målt i forhold til en bonitetsalder på 100 år (H100). Høyde over havet for feltene var fra 80 til 330 meter. Feltene strekte seg fra 59° til 67° nordlig bredde (Tabell 1).

Tabell 1. Alder, bonitet, høyde over havet og breddegrad for forsøksfeltene.

STEDSNAVN	ALDER	BONITET H100	BREDDEGRAD	HØYDE OVER HAVET
BJÖRNA	66	25	63°	200m
DEGERFORS	81	24	59°	80m
DJURSNÄS	80-84	22	59°	80m
HAMRA	63	31	60°	180m
JOKKMOKK	57	24	67°	180m
PAJALA	79	18	67°	200m
ÅSELE	90	19	64°	330m

Etter felling ble nordretning markert med et snitt langs stammen. Deretter ble største og minste diameter målt i brysthøyde ved bruk av klave. Barktykkelsen ble også registrert. Etter felling ble total trehøyde og høyde til nederste levende kvist, 50% krone og full krone registrert med målebånd. Kvistkranser ble tatt ut med store nok kubber til å få med hele kvisten fra marg til bark. I tillegg ble en kvistfri skive tatt ut rett over/under kvistkransen. Kvistkransene ble tatt ut for hver 5% av stammehøyde fra stubbeavskjær til og med 20% av trehøyden. Fra 20% til 90% av trehøyden ble det tatt ut kvistkranser for hver 10% økning i stammehøyde. I denne studien ble kun kvistkranser opp til 50 % grønn krone brukt. Den tettere samlingen i nedre del av stammen skyldes større vertikal variasjon i kvistmorfologi i denne delen av treet (Moberg, 2001).



Figur 1. Friskkvistlengde i henhold til friskkvistgrense definert av Maguire og Hann (1987).

For hver krans ble kvistene identifisert og nummerert med utgangspunkt i nordretning, i tillegg ble himmelretningen (vinkel) og stammeradius over kvisten registrert for hver kvist. Deretter ble kransen delt opp gjennom hver kvist så nær kvistmargen som mulig. For kvistene ble det registret friskkvistlengde, antall år kvisten hadde levd, antall år tørrkvist, kvistfri grense og kvistdiameter i overgangen mellom frisk og død kvist. Kvistdiameteren ble målt vinkelrett på lengdeaksen til kvisten. Grensen mellom frisk og død kvist ble bestemt etter definisjonen til Maguire og Hann (1987). Friskkvistlengde består av stammeradius fra marg ut til grensen mellom død og frisk kvist (Figur 1). Kvist med diameter under 7 mm ble ikke analysert. Alle målinger ble utført med digitalt skyvelær med avlesningsnøyaktighet på 0.01 mm.

På de kvistfrie skivene fra brysthøyde ble det utført årringbreddemålinger. Største og minste diameter på skiva ble registrert og målingene ble utført ved der avstand fra marg til kambium tilsvarte halve middeldiameteren. Skivene ble fuktet opp til fibermetning og et snitt ble skjært ved hjelp av mikrotomkniv for å få en bedre overflate å måle på. Antall årringer og bredden per årring ble registrert ved bruk av en årringmålemaskin, stereolupe og motorbord.

Ytterligere målinger ble gjennomført i sammenheng med denne studien. De bestod av årringsmålinger for hver kvistkrans utover skiva i brysthøyde som allerede var registrert. Største og minste diameter ble registrert for skiva, deretter ble middeldiameteren beregnet. Tilsvarende ble gjort for radiusen målt fra marg. Årringmålinger ble gjennomført i middelradien i første treffpunkt målt med klokken fra utgangspunkt i nordretning. Det ble skåret ut en prøve fra bark til og med marg langs den markerte radien og overflaten ble behandlet ved hjelp av en håndoverfres. Disse prøvene ble fuktet til fibermetning. Deretter ble avstanden fra marg til femte, tiende, femtende, tjuende og så videre årring registrert ved hjelp av digitalt skyvelær. For det ytterste årringintervallet ble totalt antall årringer registrert. Fra målingene ble middelårringbredde for hvert intervall av 5 årringer fra marginen beregnet. I tillegg ble totalt antall år for stammeskiven beregnet. Intervallene ble målt med 0,1 mm avlesningsnøyaktighet.

Kjernevedandel ble registrert på de samme prøvene som årringsmålingene. Dette ble gjennomført ved hjelp av kjemiske løsninger som farger kjerneved oransje/rød. De ble brukt følgende blandinger i en 1:1 bruksløsning:

Løsning 1: 10 ml HCl + 490 ml vann + 5 g o-Anisidin

Løsning 2: 50 g Natriumnitritt + 500 ml vann

Denne løsningen gav varierende resultat og kjernevedandelen ble kun registrert på 131 prøver av 279 mulige. Kjernevedgrensen ble registrert ved digitalt skyvelær.

Statistikk

Statistiske analyser ble utført med statistikkprogrammet JMP Pro 15.0.0 (SAS Institute Inc. Cary, North Carolina). Fordelingen av friskkvistlengder i vertikal retning i treet skulle tilsi at en andregradsfunksjon ville passe materialet best. Andregradsfunksjoner ble prøvd, men programmet fikk ikke modellene til å konvergere. Derfor ble en lineær modell valgt som grunnmodell når KH var representert i modellen (Modell 1).

$$[1] \quad FKL_{ik} = \bar{\alpha} + a_i + \beta \cdot KH + e_i$$

Hvor FKL_{ik} representerer friskkvistlengden for kvist k i kransummer i nestet under trenummer. KH er kranshøyden. a_i representerer bidraget til nivået fra den enkelte krans, nestet under trenummer.

I tillegg ble det også tatt utgangspunkt i en grunnmodell 2 (Modell 2) i de tilfellene en kun ønsket å bruke forklaringsvariable som er mulig å ekstrahere fra en CT skanner.

$$[2] \quad FKL_{ik} = \bar{\alpha} + a_i + \beta \cdot KD + e_i$$

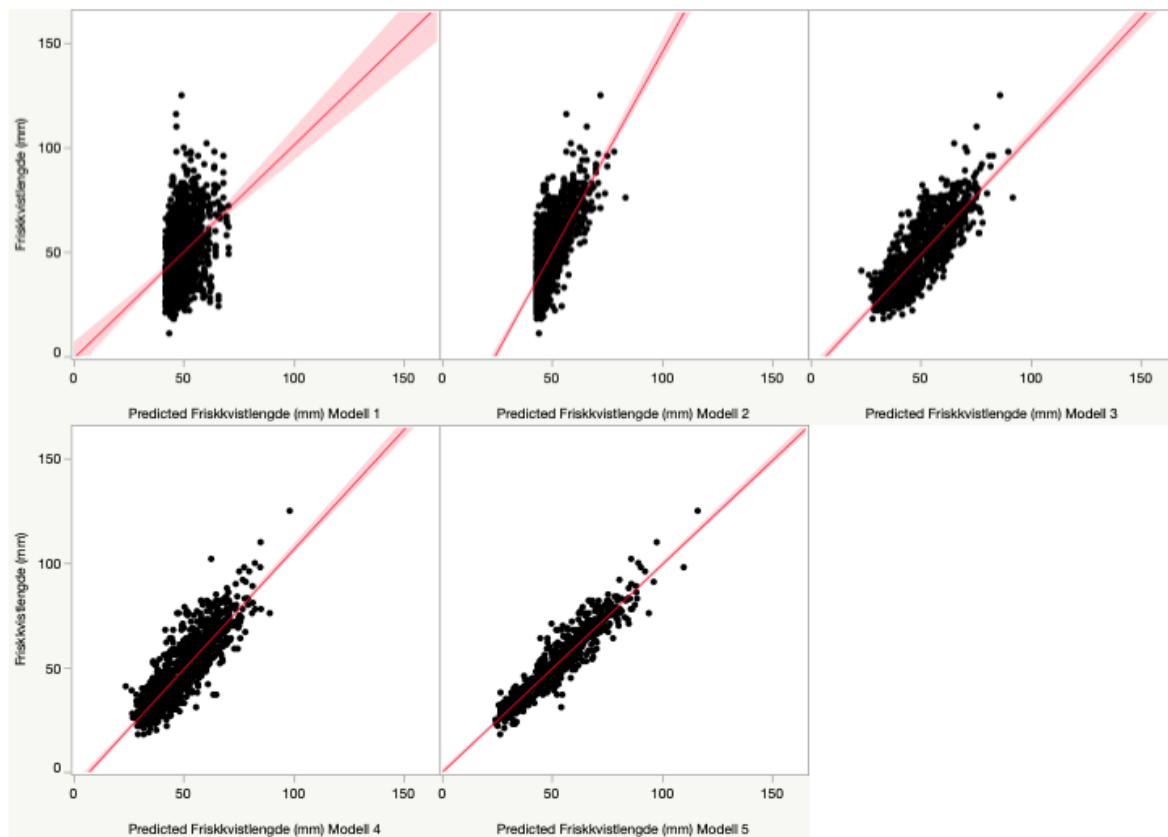
Hvor FKL_{ik} representerer friskkvistlengden for kvist k i kransummer i nestet under trenummer. KD er kvistdiameteren. a_i representerer bidraget til nivået fra den enkelte krans, nestet under trenummer.

Deretter ble det prøvd med forskjellige variabler for den enkelte kvist, krans, tre og bestand for å forklare så mye av variasjon som mulig. Variablene som ble brukt finner man i Tabell 2. De lineære miksa modellene ble beregnet ved å bruke «restricted maximum likelihood»-metoden (REML) i Mixed Model-plattformen i JMP Pro (versjon 15.0.0, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina). Nullhypotesene ble forkastet hvis sannsynligheten for type I feil var mindre enn 0,05. Kransnummer nestet under trenummer ble lagt inn som tilfeldig effekt. R^2 og RMSE-verdier ble hentet direkte fra modeller som inkluderte både faste og tilfeldige effekter. I tillegg ble R^2 og RMSE-verdier beregnet når kun de faste effektene var inkludert. Disse ble beregnet ut fra residualene fra lineære regresjoner mellom registrerte og predikerte verdier fra modellene. Modellen ble da tvunget til å gå igjennom 0 og ha et stigningstall på 1 i disse analysene.

Tabell 2. Variabler som ble brukt i modelleringen.

VARIABELNAVN	ENHET	FORKLARING
KH	cm	Høyde til krans i vertikal retning av treet
KD	mm	Kvistdiameter
KR	mm	Stammeradius ved kvist
ÅB₀₋₂₀	mm	Gjennomsnittlig årringbredde første 20 år i krans
D_{KRANS}	cm	Middeldiameter til krans
KVG	mm	Kjernevedgrense
ÅR_{KRANS}	År	Alder til krans
H_KR_180	dm	Høyde til 50% grønn krone
BG	Grader	Breddegrad

Resultater



Figur 2. Modellerte verdier plottet mot observerte verdier av friskkvistlengde.

Figur 2 viser predikerte verdier mot de observerte for de forskjellige modellene. Modell 5 er den best tilpassede modellen og punktsvermen rundt regresjonslinja viser mindre variasjon enn for de andre modellene.

Grunnmodell 1 (Modell 1) består av variabelen kranshøyde (KH) ($F=51,85$) som korrelerer positivt med friskkvistlengde (FKL). R^2 for regresjonslinjen uten tilfeldige effekter er 0,124 og RMSE er 15,78 mm (Tabell 3, Modell 1).

Modell 2 består av variabelen kvistdiameter (KD) ($F=648,77$) som korrelerer positivt med friskkvistlengden. R^2 for regresjonslinjen uten tilfeldige effekter er 0,393 og RMSE er 13,15 mm. KD som enkeltvariabel forklarer langt mer av variasjonen i friskkvistlengde enn Modell 1 som bruker KH som forklaringsvariabel. Varianskomponenten for nivået til regresjonslinjen ble redusert fra 220,21 for modell 1 til 150,68 for Modell 2, henholdsvis var det også en reduksjon fra 41,48 til 28,49 for varianskomponenten til residualene (Tabell 3).

Modell 3 er basert på variabler som kan måles gjennom CT-skanning av tømmeret. R^2 for Modell 3 uten tilfeldige effekter er 0,645 og RMSE er 10 mm. Variablene KD ($F=512,06$), stammeradius for kvisten (KR) ($F=94,79$), og gjennomsnittlig årringbredde for første 20 år for hver krans ($\hat{A}B_{0-20}$) ($F=96,77$) har et positivt fortegn i modellen, og variabelen diameter til krans (D_{Krans}) ($F=31,87$) har et negativt fortegn. Samspillet mellom $\hat{A}B_{0-20}$ og KD ($F=41,87$) og $\hat{A}B_{0-20}$ og D_{Krans} ($F=13,52$) har et negativt fortegn (Tabell 3, Modell 3). Ved lave verdier for $\hat{A}B_{0-20}$ har D_{Krans} og KD et positivt stigningstall, men fortegnet endrer seg fra positivt til negativt ved økende verdier for $\hat{A}B_{0-20}$. Samspillet mellom D_{Krans} og KD ($F=42,98$) har et positivt fortegn. Det gav en økende positiv effekt av KD ved økende diameter til kransen. Variabelen kjernevedgrense (KVG) er en variabel som kan måles ved CT-skanning. Den ble testet i ulike modeller, men variabelen falt raskt ut som følge av for høye p-verdier. Begge varianskomponentene for Modell 3 hadde lavere verdier enn Modell 2, henholdsvis en reduksjon fra 150,68 til 82,05 for nivået til regresjonslinjen og fra 28,49 til 21,5 for residualene (Tabell 3).

Modell 4 er basert på variabler som kan måles gjennom CT-skanning av tømmeret, samt breddegrad (BG). Ved å innføre den nye variabelen breddegrad og noen samspill med denne variabelen, økte R^2 fra 0,645 for Modell 3 til 0,722 for modell 4. RMSE ble redusert fra 10 mm for Modell 3 til 8,85 mm for Modell 4 (Tabell 3). Variablene KD ($F=517,97$), $\hat{A}B_{0-20}$ ($F=44,99$) og D_{Krans} ($F=25,32$) fikk et positivt fortegn i modellen, og variabelen KR ($F=151,19$) og BG ($F=62,8$) fikk et negativt fortegn. Samspillene mellom $\hat{A}B_{0-20}$ og KD ($F=41,87$), $\hat{A}B_{0-20}$ og D_{Krans} ($F=13,52$) og D_{Krans} og BG ($F=10,68$) har alle negative fortegn (Tabell 3, Modell 4). Ved lave verdier for $\hat{A}B_{0-20}$ har KD et positivt stigningstall som går mot null ved økende verdier for $\hat{A}B_{0-20}$. Ved lave verdier for $\hat{A}B_{0-20}$ har D_{Krans} et stigningstall tilnærmet null og får ved økende verdier for $\hat{A}B_{0-20}$ et større negativt stigningstall. Ved lave verdier for D_{Krans} har BG et positivt stigningstall, men fortegnet endrer seg til å bli negativt ved store verdier for D_{Krans} . Samspillene mellom D_{Krans} og KD ($F=51,87$) og KR og BG ($F=45,65$) har positive fortegn. For D_{Krans} og KD gir økende diameter på kransen et høyere stigningstall for KD. Ved lave verdier for KR er stigningstallet til BG svakt negativt, men dette endrer seg til et positivt stigningstall ved økende verdier for KR. Begge varianskomponentene hadde lavere verdier enn Modell 3. Varianskomponenten til residualene ble svakt redusert, fra 21,5 til 20,24. Reduksjonen av varianskomponenten var større for nivået, som gikk fra 82,05 for Modell 3 til 64,71 for Modell 4 (Tabell 3).

Den best tilpassede modellen (Modell 5) består av variabler som kan måles i CT-skanning, enkelttre- og bestands-variabler. I forhold til Modell 4 falt variabelen D_{Krans} ut og variablene KH, alder til krans (\hat{A}_{Krans}) og høyde til 50% grønn krone (H_{Kr_180}) ble lagt til modellen. Noen samspill falt også ut og nye kom til. Med de nye variablene økte R^2 markant fra 0,722 for Modell 4 til 0,899 for modell 5. RMSE ble markant redusert, fra 8,85 mm for Modell 4 til 5,31 mm for Modell 5 (Tabell 3). Denne forbedringen av modellen ser man også i Figur 2 der punktsvermen rundt regresjonslinjen er presset sammen og viser mindre variasjon rundt linjen. Variablene KD ($F=493,26$) og $\hat{A}_{\text{B}0-20}$ ($F=36,17$) fikk positive fortegn i modelleringen, og variabelen KH ($F=339,11$), KR ($F=370,27$), \hat{A}_{Krans} ($F=0,79$), H_{Kr_180} ($F=82,61$) og BG ($F=24,48$) fikk negative fortegn. Variabelen \hat{A}_{Krans} har ikke signifikant effekt som enkeltvariabel ($P=0,3758$), men inngår i samspill som er signifikante. Samspillet mellom $\hat{A}_{\text{B}0-20}$ og KD ($F=9,45$) og H_{Kr_180} og KR ($F=4,79$) har begge negative fortegn (Tabell 3, Modell 5). Ved lave verdier for KD har $\hat{A}_{\text{B}0-20}$ et positivt stigningstall, men går mot og blir negativt ved økende verdier for KD. Ved økende verdi for KR får H_{Kr_180} et høyere negativt stigningstall. Samspillene mellom KH og KR ($F=97,3$), KR og BG ($F=7,26$) og KD og \hat{A}_{Krans} ($F=81,53$) har positive fortegn (Tabell 3, Modell 5). For KH og KR vil økende verdier for variablene gi høyere positive stigningstall for samspillet, denne effekten finner vi også for samspillet mellom KR og BG. Ved lave verdier for KD vil stigningstallet til \hat{A}_{Krans} være svakt negativt, men dette endrer seg til et positivt stigningstall ved økende verdier for KD. Varianskomponenten for nivået ble vesentlig redusert i forhold til Modell 4. Den ble redusert fra 64,71 for Modell 4 til 12,47 for Modell 5. Også varianskomponenten for residualene ble redusert, fra 20,24 for Modell 4 til 17,86 for Modell 5 (Tabell 3).

KD er den viktigste variabelen i alle modeller der variabelen er til stede og dette framgår av gjennomgående høyest F-verdi av variablene. KR fremstår også som en viktig variabel, spesielt i Modell 5 der F-verdien er vesentlig høyere enn i Modell 3 og 4. $\hat{A}_{\text{B}0-20}$ er en viktig variabel for Modell 3, men mister noe av forklaringsgraden når ytterligere variabler blir tilført i Modell 4 og 5. For Modell 5 blir KH og H_{Kr_180} lagt til i modellen. Det førte til en betydelig økning i forklaringsgrad (Tabell 3).

Tabell 3. Oppsummering av statistikk

	KH		KD		CT		CT+BG		CT+TRE		
	Modell 1		Modell 2		Modell 3		Modell 4		Modell 5		
N	1253		1249		925		925		764		
Varians komponenter fra modellsteg											
Nivå til regresjonslinje	220,21		150,68		82,05		64,71		12,47		
Residualer	41,48		28,49		21,50		20,24		17,86		
Faste og tilfeldige effekter											
R2	0,892		0,926		0,943		0,946		0,948		
RMSE	6,44		5,34		4,64		4,50		4,23		
Faste effekter											
R2	0,124		0,393		0,645		0,722		0,899		
RMSE	15,78		13,15		10,00		8,85		5,31		
Variabler	<i>F-ratio</i>	<i>P-verdi</i>	<i>F-ratio</i>	<i>P-verdi</i>	<i>F-ratio</i>	<i>P-verdi</i>	<i>F-ratio</i>	<i>P-verdi</i>	<i>F-ratio</i>	<i>P-verdi</i>	
KH	51,85	<,0001*							339,11	<,0001*	
CT-skanner variabler											
KD			648,77	<,0001*	512,06	<,0001*	517,97	<,0001*	493,26	<,0001*	
KR					94,79	<,0001*	151,19	<,0001*	370,27	<,0001*	
ÅB_0-20					96,77	<,0001*	44,99	<,0001*	36,17	<,0001*	
D(krans)					31,87	<,0001*	25,32	<,0001*			
År(Krans)									0,79	0,3758	
Trevariabler											
H_Kr_180									82,61	<,0001*	
Bestandsvariabler											
Breddegrad							63,80	<,0001*	24,48	<,0001*	
Samspill											
ÅB_0-20*KD					41,87	<,0001*	52,31	<,0001*	9,45	0,0022*	
D(krans)*KD					42,98	<,0001*	51,87	<,0001*			
ÅB_0-20*D(krans)					13,52	0,0003*	11,32	0,0009*			
KR*BG							45,65	<,0001*	7,26	0,0075*	
D(krans)*BG							10,68	0,0011*			
KH*KR									97,30	<,0001*	
KD*År(Krans)									81,53	<,0001*	
H_Kr_180*KR									4,79	0,0294*	
Modell 1: FL= 41,45 + 0,01639*KH											
Modell 2: FL = 35,68 + 1,034*KD											
Modell 3: FL = -21,53 + 1,014*KD + 0,2547*KR + 34,92*ÅB ₀₋₂₀ - 0,2924*D _{Krans} - 0,5372* ÅB ₀₋₂₀ *KD + 0,07788* D _{Krans} *KD - 0,9698* ÅB ₀₋₂₀ * D _{Krans}											
Modell 4 : FL = 14,45 + 1,014*KD - 3,859*KR + 28,85* ÅB ₀₋₂₀ + 12,82* D _{Krans} - 0,5186*BG - 0,5783* ÅB ₀₋₂₀ *KD + 0,08258* D _{Krans} *KD - 0,8016* ÅB ₀₋₂₀ * D _{Krans} + 0,06835*KR*BG - 0,2172* D _{Krans} *BG											
Modell 5: FL = 46,88 - 0,003304*KH + 0,2035*KD - 0,7790*KR + 7,969* ÅB ₀₋₂₀ - 0,3238*År _{Krans} - 0,05797*H_Kr_180 - 0,5485*BG - 0,1917* ÅB ₀₋₂₀ *KD + 0,0003691*KH*KR + 0,01926*KR*BG + 0,02448*KD* År _{Krans} - 0,001353*H_Kr_180*KR											

Diskusjon

Antall observasjoner for modellene synker når flere variabler blir lagt til. Det skyldes ulikt antall observasjoner per variabel. Det er antatt at dette ikke har påvirket resultatene og konklusjonene i denne studien betydelig.

Trenummer ble i utgangspunktet valgt som tilfeldig effekt, men denne variabelen fungerte ikke så bra som ønsket. Derfor ble kransnummer for den enkelte krans, nestet under variabelen Trenummer brukt som tilfeldig effekt. Det førte blant annet til at R^2 og RMSE (Root mean square error), også for de mer kompliserte modellene, ble mer i samsvar med datatilpasning gjort med minste kvadraters metode.

Modell 1

Modell 1 viser at friskkvistlengden (FKL) øker med kranshøyden (KH). Dette stemmer overens med Björklund (1997) inndeling av kvistsoner med økende kviststørrelse i rotenden, deretter relativt jevn kviststørrelse oppover stammen til man finner de største kvistene i nedre del av den levende krona. Vestøl og Høibø (2000) fant en økende FKL oppover til 40% av total trehøyde i en studie på gran i Norge. Om lag halvparten av trærne i studien til (Vestøl & Høibø, 2000) hadde økende FKL helt opp til grønn krone, mens resterende halvpart hadde en svak reduksjon i FKL rett før grønn krone. Denne reduksjonen skyldes nok avsmalning i stammen. På grunn av friskkvistlengdens krumme forløp med kranshøyden er det naturlig at en enkel lineær regresjon mellom FKL og KH vil gi en relativt dårlig tilpasning og lav R^2 (0,124).

Modell 2

Effekten av kvistdiameter (KD) som variabel vises godt i Modell 2. R^2 verdien på 0,393 viser at KD forklarer en betydelig del av variasjonen i FKL (Tabell 3, Modell 2). KD sin betydning underbygges videre av at KD har de høyeste F-verdiene av alle forklaringsvariablene, også for modellene 3,4 og 5 (Tabell 3). Flere studier har slått fast at det er sterk korrelasjon mellom KD og FKL (Björklund & Moberg, 1999; Høibø et al., 1997; Moberg, 2001, 2006). Høibø og Turnblom (2017) konkluderte også med at FKL og KD kan modelleres med de samme variablene. Kvistdiameteren er en god indikator på hvor mange år kvisten har levd. Siden FKL består av akkumulert radial vekst i stammen frem til kvisten dør, er det naturlig at KD,

som registreres i overgang mellom den friske og døde delen av kvisten, korrelerer godt med FKL. Moberg (2006) brukte gjennomsnittlig og relativ kvistdiameter i en modell for friskkvistlengde og mente den reflekterer tidspunktet når kvisten dør relativt godt.

Modell 3

Bakgrunnen for utvikling av Modell 3 er bruk av variabler som bør kunne måles ved CT-skanning av tømmeret. KD fremstår som den klart viktigste variabelen, men variablene KR (Stammeradius ved kvist), $\bar{A}B_{0-20}$ (middel årringbredde for de 20 første årringen fra margen for den aktuelle kransen) og D_{Krans} (diameteren til kransen) bidrar også til å redusere residualspredningen i tillegg til KD alene, Modell 2 (Figur 2). KR alene har et positivt parameterestimat i Modell 3. Det er naturlig at KR korrelerer positiv med FKL siden stor radius innen en krans betyr at kvisten peker i retning med der diametertilveksten i stammen har vært størst og sannsynligvis der kvistene i en skjev krone har levd lengst. Fortegnet til KR endrer seg imidlertid til å bli negativt i Modell 4 og 5. Det kan nok forklares med at KR inngår i samspill med andre variabler med positive fortegn i disse modellene. Ved å kun endre KR i modellene vil økende KR føre til økende FKL.

Årringbredde for de 20 første årene i hver krans fremstår som en robust variabel. $\bar{A}B_{0-20}$ er den variabelen som har nest høyest F-verdi i Modell 3, men den mister noe av forklaringssevnen ved innføring av andre variabler i Modell 4 og 5. Variabelen har et positivt parameterestimat for alle modeller den er med i. At sammenhengen er positivt er naturlig fordi rask diametertilvekst når kvisten lever vil gi større friskkvistlengde. Flere studier har slått fast at årringbredder i forskjellige intervaller sier mye om kvistsettingen (Björklund & Moberg, 1999; Høibø & Turnblom, 2017; Moberg, 2001, 2006; Vestøl & Høibø, 2000). Høibø og Turnblom (2017) fant i sin studie på friskkvistlengder i Douglasgran at årringbredde i brysthøyde og årringbredde i bestemte intervaller i brysthøyde var de beste variablene i studien. De mente også at middel årringbredde for intervallene 6.-10. og 11.-15. årring i brysthøyde kan erstatte variabler som beskriver bestandshistorikk fordi de reflekterer forhold mellom bonitet, tetthet, kronedynamikk og diametertilvekst. Björklund og Moberg (1999) fant i sin studie at årringbredde nær marg (Intervallene 1-20 og 1-50) står fram som viktige variable for de fleste kvistegenskaper, derunder friskkvistlengde. Björklund og Moberg (1999) mener dette indikerer at tidlig vekst i treets utvikling har stor betydning for hvordan kvistegenskapene blir videre i treet. Vestøl og Høibø (2001) fant også at FKL korrelerte med

årringbredder i brysthøyde. I denne studien ble det også funnet at denne sammenhengen varierte med bonitet, høyere bonitet gav en sterkere sammenheng. Moberg (2006) benyttet seg av årringbredder i intervallet 1-20 i sin studie da han modellerte FKL.

Diameter til kransene fremstår som den minst viktige enkeltvariabelen i Modell 3 og Modell 4. D_{Krans} har et negativt parameterestimert i Modell 3, men dette endrer seg til positivt når breddegrad tilføyes i Modell 4. For begge modeller inngår D_{Krans} i flere samspill med både negative og positive fortegn. Isolert sett vil en økning i D_{Krans} føre til en lavere FKL siden diameterprofilen til et tre vil være «motsatt» av det vertikale profilet til FKL. D_{Krans} i nedre del av bunnstokken vil sammenfalle med diameter i brysthøyde (DBH) som i tidligere studier har fremstått som en svært viktig variabel (Moberg, 1999; Øyen, 1999). DBH sier mye om det enkelte tre sin posisjon i bestandet og at DBH gir indirekte informasjon om bonitet og tetthet i bestandet.

Modell 4

Når breddegrad (BG) innføres som variabel for å styrke modellen som benytter seg av variabler som kan registreres ved CT-skanning øker R^2 og RMSE reduseres i forhold til Modell 3. Ifølge F-verdiene for denne modellen (Tabell 3, Modell 4) tilfører BG betydelig forklaringsgrad. Residualspredningen reduseres betydelig. Breddegrad fremstår som den tredje viktigste variabelen etter KD og KR. Breddegrad er en svært enkel variabel å registrere. For sagbruksindustrien vil bruk av breddegrad derfor være et enkelt og effektivt grep for å forbedre modeller som baserer seg på CT-teknologi. Når breddegrad blir brukt som enkeltvariabel korrelerer den positivt med FKL. I Modell 4 har derimot BG et negativt parameterestimert som enkeltvariabel. Her inngår imidlertid BG også i to samspill med både negativt ($D_{Krans} * BG$) og positivt ($KR * BG$) parameterestimert. Breddegrad har betydning for lysforholdene til trærne. Mot nord vil lyset få en annen frekvensfordeling. Det vil være større grad av diffust lys, siden lyset går igjennom mer atmosfære på grunn av lavere solvinkel. En får også mindre variasjon i lysintensitet fra toppen av krona til bunnen av krona, siden lysintensiteten er mindre i nord enn i syd. Alt dette vil kunne påvirke formen og størrelsen på krona til trærne. Tanabe et al. (2001) gjennomførte et studie på kroneformer for japansk hvit bjørk (*Betula platyphylla*) fra forskjellige breddegrader. Der kom det fram at det var lenger og slankere koniske kroneformer ved høyere breddegrad og kortere kuppelformede kroner ved sydlige breddegrader. Vermeulen (2014) kom derimot fram til, fra simuleringer, at lavere

solvinkel ved økende breddegrad bør føre til mindre kronehøyder på grunn av skyggeeffekten av nabotrær ved lave solvinkler. Lysforholdene vil endres med breddegrad og sammen med tetthet i bestand vil dette påvirke lysforholdene og kroneutviklingen til det enkelte tre. Utvikling, størrelse og form på krona vil videre påvirke utvikling og størrelse til kvisten. En dypere krone fører til at kvistene lever lenger og FKL blir større. I materialet i dette studiet var det noe dårligere bonitet i feltene med de nordligste breddegrader. Dette kan gi grunnlag for lavere tetthet i bestand som igjen fører til bedre lysforhold for det enkelte tre.

Modell 5

Modell 5 er den modellen som gir best tilpasning i denne studien. Her er KH tatt inn igjen i modellen og viser seg som en svært viktig variabel, med høy forklaringsgrad og stor betydning for reduksjon av residualspreddingen. Gjeninnføring av KH reduserte variansekomponentene betraktelig og det kan tyde på at vertikal plassering i treet er viktig informasjon for predikering av kvistegenskaper. Det er naturlig siden friskkvistlengden varierer med høyden i treet (Høibø et al., 1997; Vestøl & Høibø, 2000). Også KR øker F-verdien sin betraktelig sett imot Modell 3 og 4. Disse to variablene sammen med KD står for mye av forklaringsgraden for denne modellen. I denne modellen ble høyde til 50 % krone ($H_{Kr_{180}}$) og alder til krans ($\text{\AA}_{Kr_{rans}}$) innført som nye variabler. $H_{Kr_{180}}$ hadde et negativt parameterestimat som enkeltvariabel og inngår i et samspill med KR. En høy verdi for $H_{Kr_{180}}$ vil si at kronen er liten og dette kan tyde på at kroneresejon har hatt et høyt tempo. Tidlig og kraftig resesjon av kronen vil føre til mindre friskkvistlengder. Det er derfor naturlig at $H_{Kr_{180}}$ har et negativt parameterestimat. Øyen (1999) fant i sin studie at forskjellige kronemål var viktige variabler for å beskrive størrelsen på friskkvistsylindren. $\text{\AA}_{Kr_{rans}}$ har et negativt parameterestimat i denne modellen. Antall åringer oppover i treet vil avta med økende høyde og den negative sammenheng med FKL er dermed å forvente siden FKL øker med økende høyde opp til krona, som er det området som er undersøkt i denne studien.

Konklusjon og anvendelse

Målet med studien var å utvikle en modell som kan brukes til å predikere friskkvistlengde i tømmer på et sagbruk ved bruk av variabler som kan måles i en CT-skanner. Modell 3 representerer en slik modell og oppnår en RMSE på 10 mm. Modell 4 drar inn breddegrad som er en svært enkel variabel å registrere og bruke i praksis. Den forbedrer modellen betydelig og reduserer RMSE til 8,85 mm.

Det som er interessant i tillegg er mulighetene som informasjon om kransehøyde tilfører i Modell 5. Hvis kransehøyde kan registreres for alle stokker, vil man kunne oppnå en markant forbedring av prediksjonen av friskkvistlengden. Hogstmaskiner har i dag utstyret og muligheten til å individuelt markere hver enkelt stokk, og dette muliggjør utvikling av systemer som blant annet gir informasjon om individuelle stokker til sagbruk (Murphy, 2018). Stängle et al. (2015) utførte en studie på optimalt utbytte for sagbruk ved å benytte CT-skanning til optimalisering for kvistsetting. Studien ble utført på bøk (*Fagus sylvatica*) og fokuserte på optimal rotasjon av stokken ved saging. Resultatene viste en økning i økonomisk utbytte på 24% i forhold til gjennomsnittlig utbytte uten optimalisering. Berglund et al. (2013) utførte en lignende studie på gran og furu. De brukte ytre karakteristikk for å forsøke å finne optimal stokkrotasjon. Studien til Berglund fant at optimal stokkrotasjon fører til økt økonomisk utbytte, men han greide ikke å beskrive optimal rotasjon med ytre karakteristikk. Berglund et al. trekker fram at videre studier bør fokusere på indre egenskaper. Så lenge betalingsvilligheten til kvalitetsprodukter er tilstede, vil det være naturlig å tenke seg at modeller som beskriver indre kvistegenskaper som baserer seg på CT-skanning kan øke det økonomiske utbytte for sagbrukene betydelig.

Litteraturliste

- Beaulieu, J. & Dutilleul, P. (2019). Applications of computed tomography (CT) scanning technology in forest research: a timely update and review. *Canadian journal of forest research*, 49(10), 1173-1188. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0537>
- Berglund, A., Broman, O., Grönlund, A. & Fredriksson, M. (2013). Improved log rotation using information from a computed tomography scanner. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 152-158.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.012>
- Björklund, L. (1997). The interior knot structure of *Pinus sylvestris* stems. *Scandinavian journal of forest research*, 12(4), 403-412.
<https://doi.org/10.1080/02827589709355429>
- Björklund, L. & Moberg, L. (1999). Modelling the inter-tree variation of knot properties for *Pinus sylvestris* in Sweden. *Studia forestalia Suecica*, (207).
<https://pub.epsilon.slu.se/3012/>
- Braastad, H. (1979). Vekst og stabilitet i et forbandsforsøk med gran: Growth and stability in a spacing experiment with *Picea abies*. *Meddeleser fra Norsk institutt for skogforskning*, 34(7), 174-215.
- Colin, F. & Houllier, F. (1991). Branchiness of Norway spruce in north-eastern France— modeling vertical trends in maximum nodal branch size. *Annals of Forest Science* 48(6), 679-693. <https://doi.org/10.1051/forest:19910606>
- Houllier, F., Leban, J.-M. & Colin, F. (1995). Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest ecology and management*, 74(1), 91-102.
[https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03510-4](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03510-4)
- Hovda, T.-Å. & Nygaard, E. A. (2007). *Kvistegenskaper i furu (Pinus sylvestris (L.)) fra ulike tynningsregimer: Knot properties in scots pine (Pinus sylvestris (L.)) from different thinningregimes*[Masteroppgave]. Univeritetet for miljø- og biovitenskap.
- Høibø, O., Vestøl, G. & Øyen, O. (1999). *Modelling sound knot length in Scots pine*[Paperpresentasjon]. Third workshop, Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation software, La Londe-Les-Maures.

- Høibø, O. A. & Turnblom, E. C. (2017). Models of Knot Characteristics in Young Coastal US Douglas-Fir: Are the Effects of Tree and Site Data Visibly Rendered in the Annual Ring Width Pattern at Breast Height? *Forest Products Journal*, 67(1-2), 29-38.
<https://doi.org/10.13073/fpj-d-16-00011>
- Høibø, O. A., Vestøl, G. I., Sundby, H. J. & Molteberg, D. E. (1997, 26-31 August). *Modelling knottiness and knot characteristics of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst): the influence of diameter and height growth on knot characteristics*[Paperpresentasjon]. Second Workshop "Connection between Silviculture and Wood Quality through Modelling Approaches and Simulation Softwares ", Berg-en-Dal, Kruger National Park, South Africa.
- Johansson, K. (1992). Effects of initial spacing on the stem and branch properties and graded quality of *Picea abies (L.) karst.* *Scandinavian journal of forest research*, 7(1-4), 503-514. <https://doi.org/10.1080/02827589209382743>
- Maguire, D. & Hann, D. (1987). A Stem Dissection Technique for Dating Branch Mortality and Reconstructing Past Crown Recession. *Forest Science*, 33, 858-871.
- Maguire, D. A., Kershaw, J. A., Jr. & Hann, D. W. (1991). Predicting the Effects of Silvicultural Regime on Branch Size and Crown Wood Core in Douglas-Fir. *Forest Science*, 37(5), 1409-1428. <https://doi.org/10.1093/forestsience/37.5.1409>
- Moberg, L. (1999). *Models of knot properties for Norway spruce and Scots pine* [Doktorgradsavhandling]. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Moberg, L. (2001). Models of internal knot properties for *Picea abies*. *Forest ecology and management*, 147(2), 123-138. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00471-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00471-0)
- Moberg, L. (2006). Predicting knot properties of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* from generic tree descriptors. *Scandinavian journal of forest research*, 21(7), 49-62.
<https://doi.org/10.1080/14004080500487011>
- Murphy, G. (2018). Log Level Chain of Custody Tag, Track and Trace Systems: From Harvester Head Through to Ship Loading. Forest Industries Research Centre Bulletin 2, July 2018. *University of the Sunshine Coast*.
https://research.usc.edu.au/discovery/fulldisplay/alma99451101602621/61USC_INS
 T:ResearchRepository

- Oja, J. (2000). Evaluation of knot parameters measured automatically in CT-images of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Holz als Roh- und Werkstoff*, 58(5), 375-379. <https://doi.org/10.1007/s001070050448>
- Petersson, H. (1998). Prediction of branch variables related to timber quality in *Pinus sylvestris*. *Scandinavian journal of forest research*, 13(1-4), 21-30. <https://doi.org/10.1080/02827589809382958>
- Stängle, S. M., Brüchert, F., Heikkilä, A., Usenius, T., Usenius, A. & Sauter, U. H. (2015). Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection. *Annals of Forest Science*, 72(1), 57-65. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0385-1>
- Tanabe, S.-I., Toda, M. J. & Vinokurova, A. V. (2001). Tree shape, forest structure and diversity of drosophilid community: Comparison between boreal and temperate birch forests: Drosophilid diversity in birch forests. *Ecological research*, 16(3), 369-385. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2001.00402.x>
- Vermeulen, P. J. (2014). Crown depth as a result of evolutionary games: decreasing solar angle should lead to shallower, not deeper crowns. *The New Phytologist*, 202(4), 1249-1256. <http://www.jstor.org/stable/newphytologist.202.4.1249>
- Vestøl, G. I. & Høibø, O. A. (2000). Internal distribution of sound and dead knots in *Picea abies* (L.) Karst. *Holz als Roh- und Werkstoff (Germany)*, 58(1-2), 107-114. <https://doi.org/10.1007/s001070050395>
- Vestøl, G. I. & Høibø, O. A. (2001). Prediction of knot diameter in *Picea abies* (L.) Karst. *Holz als Roh- und Werkstoff (Germany)*, 59(1-2), 129-136. <https://doi.org/10.1007/s001070050484>
- Vestøl, G. I., Høibø, O. A., Moltenberg, D. E. & Sundby, H. J. (1997, 26-31 August). *Modelling knottiness and knot characteristics of Norway spruce [Picea abies (L.) Karst]. Differences in the distribution of sound and dead knots between suppressed and dominant trees*[Paperpresentasjon]. Second Workshop «Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares», Berg-en-Dal, Kruger National Park, South Africa.
- Øyen, O. (1999). *Wood quality in old stands of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.): Virkeskvalitet i skog av gammel gran (Picea abies (L.) Karst.)*[Doktorgradsavhandling]. Department of Forest Sciences, Agricultural University of Norway, Ås.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway