

Fredrik F. Sunde

**Styrkeegenskaper hos små, feilfrie prøver
av gran (*Picea abies* (L.) Karst.)**

Strength properties of small, clear wood specimens
of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)

Universitetet for miljø- og biovitenskap
Norwegian University of Life Sciences

Institutt for naturforvaltning
Mastergradsoppgave 30 stp. 2005



Forord

Jeg innså tidlig i studiet at mine interesser innen skogbruket var sterkest knyttet opp mot videreforedling. Underveis i studiet valgte jeg derfor å rette hovedfokus mot kurs relatert til treteknologi. Ved to anledninger var Knut Magnar Sandland, avdelingsleder for Kvalitet og prosessutvikling ved NTI (Norsk Treteknisk Institutt), foreleser i treteknologikurs. Min nysgjerrighet og interesse for hans arbeidssted ble utvidet gjennom flere faglige studieutferder dit. Min interesse for nettopp denne oppgaven ble fanget da Knut Magnar senere sendte en e-post med aktuelle problemstillinger for en mastergradsoppgave.

Materialet som allerede forelå var kommet til gjennom SSFF (Skogbrukets og Skogindustrienes Forskningsforening) prosjektet; et samarbeid mellom NTI, Skogforsk (Norsk institutt for skogforskning) og PFI (Papirindustriens Forskningsinstitutt). Jeg ble bedre innsatt i arbeidet som allerede var nedlagt av forsker Jan Bramming og forsker/doktorgradsstipendiat Audun Øvrum, begge ansatt ved avdeling Kvalitet og prosessutvikling ved NTI. Mitt arbeid er å betrakte som en delanalyse av noen av styrkeegenskapene i det innsamlede materialet.

Jeg vil med dette få rette en takk til min hovedveileder førsteamanuensis Olav Albert Høibø for god hjelp under arbeidet med denne avhandlingen. Min tilleggsveileder har vært professor Birger Eikenes. Begge er ansatt ved Institutt for naturforvaltning ved UMB (Universitetet for miljø- og biovitenskap). Forsker Kjell Vadla ved avdeling for økonomi, teknikk og foredling på Skogforsk skal ha takk for verdifulle opplysninger og innføring i prosjektet.

Mange takk går også til nevnte og unevnte medarbeidere på NTI, og andre involverte i SSFF prosjektet. Jeg er svært takknemlig for pengegaven jeg mottok fra NTI som bidrag til innkjøp av bærbar pc.

Ås, 18.mai 2005

Fredrik F. Sunde

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	3
1 Innledning	5
1.1 Faktorer som påvirker styrken	6
1.2 Problemstilling	8
2 Materiale og metode	9
2.1 Utvalg av bestand	9
2.1.1 Regioner	9
2.1.2 Høydelag	10
2.2 Utvalg av prøvetrær.....	13
2.3 Uttak av små, feilfrie prøver	14
2.4 Testing	16
2.4.1 Symbolforklaring	17
2.4.2 Gjennomsnittlig årringbredde	17
2.4.3 Basisdensitet.....	18
2.4.4 Elastisitetsmodul ved statisk bøyning	18
2.4.5 Bøyefasthet ved statisk bøyning.....	20
2.5 Bakgrunnsmateriale.....	21
2.6 Statistisk analyse	22
3 Resultater	23
3.1 Basisdensitet.....	23
3.2 E-modul.....	30
3.3 Bøyefasthet.....	35
4 Diskusjon	43
4.1 Basisdensitet.....	44
4.2 E-modul.....	46
4.3 Bøyefasthet.....	47
5 Konklusjon	49
6 Litteratur	51

Sammendrag

Formålet med denne mastergradsoppgaven er å beskrive styrkeegenskapene hos gran (*Picea abies* (L.) Karst.). Oppgaven er basert på analyse av små, feilfrie prøver. Prøvematerialet er samlet inn i regi av SSFF-prosjektets egenskapsundersøkelse. Innsamlingen av materialet startet i 2002 og undersøkelsen avsluttes i 2006. Resultatene fra SSFF-prosjektets egenskapsundersøkelse er ment som en beskrivelse av det framtidige råstoffet til industrien.

Denne oppgaven er basert på det prøvematerialet som Skogforsk gjennom egenskapsundersøkelsen samlet inn fra 22 granbestand på Sør- og Østlandet. Tabell 1 gir et innblikk i bestandenes kommunevise tilhørighet, hogstmodenhet og skogtype.

Det ble i hvert bestand foretatt et stratifisert, stokastisk utvalg, hvor det ble foretatt registreringer på seks trær. De seks trærne ble inndelt i tre grupper; herskende, medherskende og undertrykte, med to trær i hver gruppe.

Fra hvert tre ble det skåret ut 0,5 m lange kubber ved 0, 25, 50 og 75 % av trehøyden. Dette skulle avdekke variasjoner mellom ulike høydenivåer i treet. For hver kubbe ble det i vestlig retning, mellom marg og kambium, tatt ut så mange prøvestaver som dimensjonen tillot.

Styrketesting av prøvestavene ble foretatt på NTI. Resultatene fra materialinnsamlingen og testingen ligger til grunn for beregningene i denne mastergradsoppgaven. Analysearbeidet er foretatt i statistikkprogrammet JMP (SAS Institute 2000).

Bestandsboniteten (H_{40}) viste seg å kunne forklare 30 % av variasjonen i basisdensiteten. Bestandsboniteten hadde ikke signifikant betydning for E-modulen ($p > F = 0,089$). Sammenhengen mellom bøyefastheten og bestandsboniteten var derimot signifikant, men forklaringsgraden var bare på 5 %.

En økende tredominans medførte en tendens til avtagende basisdensitet. Tendensen var ikke signifikant ($p > F = 0,083$). Tendensen til avtakende E-modul med økende tredominans gjorde seg også gjeldende ($p > F = 0,063$). Økende dominans hadde imidlertid en signifikant betydning

for bøyefasthetens variasjon ($p > F = 0,014$). De herskende trærne hadde en signifikant lavere bøyefasthet enn de medherskende trærne.

Høydesonen var den undersøkte parameteren som gav best uttrykk for bestandets høyde over havet. Høydesonen ble derfor brukt videre i analysene. Høydesonen viste en signifikant sammenheng med basisdensiteten ($p > F = 0,012$). Trærne i høydesone H1 har en signifikant lavere basisdensitet enn i høydesone H2 og H3. Høydesonen hadde ingen signifikant sammenheng med hverken E-modulen ($p > F = 0,105$) eller bøyefastheten ($p > F = 0,384$).

Den innbyrdes plasseringen i treet hadde betydning for styrkeegenskapene. En variansanalyse av den vertikale plasseringen i treet avdekket en signifikant høyere basisdensitet i prøvehøyde IV enn i prøvehøyde I og II. E-modulen i prøvehøyde I var signifikant lavere enn i prøvehøyde II og III. Bøyefastheten var også signifikant lavere i prøvehøyde I enn i prøvehøyde II og III.

Den horisontale plasseringen mellom marg og kambium hadde ingen signifikant betydning for basisdensiteten. For E-modulen var det derimot en signifikant sammenheng med den horisontale plasseringen. Prøvene på plass nummer seks fra margen hadde en signifikant lavere E-modul enn prøvene på plass nummer tre fra margen. Den øvrige tendensen tilsa en avtagende E-modul fra marg mot kambium. Bøyefastheten viste også en signifikant sammenheng med den horisontale plasseringen av prøvene. Prøvene på plass nummer seks fra margen hadde en signifikant lavere bøyefasthet enn prøvene på plass nummer tre og fire fra margen. Tendensen var også for bøyefastheten avtagende fra marg mot kambium.

1 Innledning

Gjennom de siste hundre år har de norske skogene gått igjennom store endringer. Ved 1900-tallets begynnelse hadde vi et skogbilde som stedvis var preget av intens skogsdrift, spesielt i tilknytning til gruvedrift og mineralutvinning. I dag opplever vi nettotilvekst i skogene våre, og Landsskogstakseringens samlede volumenslag for norske skoger er mer enn doblet (NIJOS u.å.).

Resultatene av investeringer i planting og annen skogkultur har begynt å prege råstofftilgangen. Tømmeret på sagbruket kommer i dag like gjerne fra kulturskog som fra naturskog. Det stilles naturligvis en mengde krav til råstoffet.

Bartrærne gran (*Picea abies* (L.) Karst.) og furu (*Pinus sylvestris* L.) har i vår industrielle utvikling vært mest interessante for sagbruksnæringen. I dag er norsk treforbrukende industri i sterk konkurranse i et internasjonalt marked. Driftsmarginene er små, og derfor fokuseres det på å utnytte råstoffet på best mulig vis. En slik optimalisert utnyttelse kan oppnås ved tekniske framskritt, kombinert med bedre kjennskap til råvaren – tømmeret.

Styrkeegenskaper i råstoffet og sluttproduktene står sentralt i det meste av vår treforbrukende industri. Hvordan påvirkes råstoffet av sin opprinnelse? Hvor stor betydning har regionen, bestandet og enkelttreet for egenskapene til sluttproduktet? Med opphav i slike spørsmål ble egenskapsundersøkelsene i SSFF-prosjektet påbegynt, med de første innsamlingene av materiale av gran og furu i 2002. Prosjektet skal etter planen avsluttes i 2006.

Det meste av tidligere undersøkelser av styrkeegenskaper hos trevirke er utført på ferdig skåret trelast av Nagoda 1985, Eikenes 1991, Høibø 1991 og Høibø & Eikenes 1991. I nyere tid er det også utført undersøkelser av bl.a. Vestøl (1998) og Øyen (1999) for bedre å kunne skille mellom konstruksjonsvirke og friskkvistvirke.

Det er derimot utført få omfattende undersøkelser av styrkeegenskaper basert på små, feilfrie prøver. Ishengoma & Nagoda (1987) og Okstad (1987) har imidlertid basert sine undersøkelser av styrkeegenskaper av sitkagran (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) på nettopp små, feilfrie prøver.

Ved påbegynnelsen av arbeidet med denne mastergradsoppgaven, var innsamling og undersøkelser av materiale av gran kommet lengst i SSFF-prosjektets egenskapsundersøkelse. Det var derfor naturlig å avgrense oppgaven til å omhandle gran.

1.1 Faktorer som påvirker styrken

For å beskrive styrken, brukes gjerne begrepet fasthet. Det kan være snakk om strekk-, trykk-, skjær-, torsjons-, slagbrudd-, spalte- og bøyefasthet. De ulike formene for fasthet påvirkes av en hel rekke enkeltstående og samspillende faktorer.

Granas styrkeegenskaper kan uttrykkes gjennom flere standardiserte metoder. Den kan indirekte angis gjennom årringbredde eller densitet, siden begge disse parametrene er kjent for å kunne forutsi mye om styrken i trevirke. Mer direkte kan styrken måles i form av E-modul og bøyefasthet. Slike maskinmålte verdier gir en bedre beskrivelse av den reelle styrken til hver enkelt prøve.

Trevirke har en anisotrop oppbygning. Dette innebærer at styrkeegenskapene er høyst varierende i forhold til hvilken retning som belastes. Trevirke har en mye større fasthet langs fibre enn på tvers av dem. Kollmann og Côté (1968) anslår at fastheten normalt på fiberretningen for flere treslag bare utgjør 5-10 % av fastheten parallelt med fiberretningen.

Kvist er av stor betydning for trevirkets styrke, og er tett knyttet opp mot foregående punkt. Rundt både frisk- og tørrkvist oppstår det store fiberforstyrrelser. Fibrene får et forløp ”rundt” kvisten, slik at det oppstår fiberhelling. Kvist er mer svekkende for strekkstyrken enn for trykkstyrken (Kollmann og Côté 1968). Større kvist gir naturligvis mer fiberforstyrrelse. Ett av kriteriene til de små, feilfrie prøvene som denne oppgaven er basert på, er at det ikke skal forekomme kvist.

Densitet er en annen viktig faktor for styrken i trevirke, spesielt ved testing på små, feilfrie prøver. Densiteten er et uttrykk for tetthet, og oppgis som vekt dividert med volum. Okstad (1987) konkluderer med at det er en relativt sterk sammenheng mellom de viktigste mekaniske egenskaper og densitet i både sin egen og andres undersøkelser.

Densiteten påvirkes mest av vedfibrenes tykkelse. Tykkelsen til fibrene varierer sterkt mellom ulike treslag. Plasseringen innen hvert enkelttre vil trolig også ha en betydning for densiteten. Lindstrøm (1997) hevder at både årringbredden og kambiets alder har en signifikant innvirkning på granfibrenes dimensjon.

Densitet forklarer i de fleste undersøkelser en stor del av variasjonen i styrke (Taskjelle 1997). Densiteten har derfor i tillegg til kvist stått i fokus ved styrkeundersøkelser. Mye av dagens styrkesortering av konstruksjonsvirke baseres på en lyd-/densitetsmåling. Dynagrade er ett av systemene som baserer seg på nevnte styrkesorteringsmetode.

Som en følge av treets vekstsyklus dannes det i de fleste norske treslag tydelig avgrensede årringer. Årringene deles inn i vår- og sommerved. Vårveden består av kortere og mer tynnveggede fibre enn sommerveden, noe som gir vårveden en lavere densitet enn sommerveden. Sommerveden har derfor høyere styrke enn vårveden. Hos bartrær er sommervedandelen av årringen nokså fast, mens vårvedandelen øker i trær med god vekst. Denne sammenhengen fører til at trær med god vekst får lavere styrke.

Lackner & Foslie (1988) sier at årringbredden gir en god indikasjon for vekstforholdene, men at den generelt sett har liten informasjonsverdi. Det betraktes derfor mer naturlig å knytte årringbredden til densiteten og sommervedandel, framfor å bruke den som en egen styrkeparameter.

Ungdomsveden er å finne fra marginen og ut gjennom de 5-20 første årringene (Kučera 1989). Trær med gode oppvekstvilkår har som nevnt stor årringbredde, noe som resulterer i en stor andel ungdomsved. Sterk konkurranse eller undertrykking i ungdomsfasen gir smale årringer og derfor lite ungdomsved.

Ungdomsveden har betydelig dårligere virkesegenskaper enn modened. Tynne cellevegger med høy mikrofibrillvinkel kombinert med en liten andel sommerved fører til at ungdomsveden har lav densitet og svake styrkeegenskaper.

1.2 Problemstilling

Gjennom denne mastergradgradsoppgaven søker jeg å belyse følgende problemstilling:

Hvordan påvirkes styrkeegenskapene til gran av:

- i. bestandsboniteten?
- ii. treets dominans i bestandet?
- iii. bestandets høyde over havet?
- iv. plassering innad i treet?

2 Materiale og metode

Materialet i denne analysen stammer fra egenskapsundersøkelsene i det vidtspennende SSFF-prosjektet "Norsk Trevirke som råstoff – verdiskapningspotensial og industrielle muligheter". Undersøkelsen har som målsetning å kartlegge bestemte virkesegenskaper som er å finne i kommende års råstoff til norsk trebearbeidende industri.

Materialet var samlet inn fra sørlige og østlige regioner i Norge. Planen var å registrere egenskaper på område-, bestands- og enkelttrenivå. Uttaket av prøver ble utført av Skogforsk.

Hensikten med egenskapsundersøkelsen var å kartlegge råstoffvariasjoner mellom norske regioner og skogtyper. I tillegg ble det kartlagt egenskapene innen hvert enkelt tre; fra topp til rot og fra marg til kambium. Kartleggingen "Egenskaper i fremtidig råstoff" er gjennomført som et samarbeidsprosjekt mellom Skogforsk, Treteknisk og PFI.

Tilgangen til materialet fra egenskapsundersøkelsene i SSFF-prosjektet har dannet grunnlaget for analyser og modeller i denne mastergradsoppgaven.

2.1 Utvalg av bestand

2.1.1 Regioner

Materialet var tiltenkt å stamme fra to norske regioner:

R1: Lavlandet på Østlandet

R2: Dalstrøk på Østlandet og Sørlandet

Dette er en inndeling som allerede var tatt i bruk av NIJOS (Norsk institutt for jord- og skogkartlegging). Regionene kan mer detaljert beskrives som:

Region R1

Region R1 omfatter fylkene Vestfold, Østfold, Oslo og Akershus. Følgende av de lavereliggende kommuner av Hedmark, Oppland, Buskerud og Telemark tilkommer:

- Hedmark: Hamar, Kongsvinger, Ringsaker, Vang, Løten, Stange, Nord-Odal, Sør-Odal, Eidskog, Grue, Åsnes, Våler, Elverum, Trysil og Åmot.
- Oppland: Lillehammer, Gjøvik, Øyer, Gausdal, Østre Toten, Vestre Toten, Jevnaker, Lunner, Gran, Søndre Land, Nordre Land, Sør-Aurdal, Etnedal og Nord-Aurdal.
- Buskerud: Drammen, Kongsberg, Ringerike, Hole, Flå, Nes, Gol, Sigdal, Krødsherad, Modum, Øvre Eiker, Nedre Eiker, Lier, Røyken, Hurum, Flesberg og Rollag.
- Telemark: Porsgrunn, Skien, Notodden, Siljan, Bamble, Kragerø, Drangedal, Nome, Bø og Sauherad.

Region R2

Region R2 omfatter fylkene Vest-Agder og Aust-Agder, samt alle kommuner i Hedmark, Oppland, Buskerud og Telemark som ikke er nevnt under region R1.

Materialet som til nå er innsamlet, hadde sin opprinnelse fra bestand i region R1. Denne oppgaven ble derfor basert på materialet innsamlet i region R1.

2.1.2 Høydelag

Materialet stammer fra 3 forskjellige høydelag innen region R1:

H1: < 200 m.o.h.

H2: 200 - 399 m.o.h.

H3: 400 - 600 m.o.h.

I utvalget av prøveflater har man valgt å konsentrere seg om landets viktigste skogområder. Innenfor disse er det lagt ut flater som best mulig skal dekke variasjonene fra sør til nord og fra hav til fjell. Ifølge planen for innsamling av materialet (Vadla 2002) skulle det etterstrebtes å innhente materialet fra bestand der det var planlagt drifter samme år. Materialet stammet fra ordinære private og offentlige skogeiendommer.

Underveis i innhenting av materialet, viste det seg at ressursbruken tilsa en nedjustering av det totale treantallet fra 252 til 132. Siden det fra hvert bestand skulle innhentes informasjon om seks trær, tilsa dette en reduksjon i antall bestand fra 42 til 22. De 22 bestandene gis en kort beskrivelse i Tabell 1.

Tabell 1: Bestandsdata

Bestand ID	Kommune	Hogstmodenhet	Skogtype
1	Larvik	Hogstmoden	Naturskog
2	Stange	Hogstmoden	Naturskog
5	Siljan	Hogstmoden	Kulturskog
6	Stange	Hogstmoden	Kulturskog
7	Hurdal	Hogstmoden	Kulturskog
9	Larvik	Tynning	Kulturskog
10	Lardal	Hogstmoden	Naturskog
11	Stange	Hogstmoden	Naturskog
12	Aurskog	Hogstmoden	Kulturskog
13	Lunner	Hogstmoden	Kulturskog
14	Lardal	Hogstmoden	Kulturskog
15	Stange	Hogstmoden	Kulturskog
16	Hurdal	Hogstmoden	Kulturskog
18	Siljan	Tynning	Naturskog
19	Siljan	Tynning	Kulturskog
20	Siljan	Hogstmoden	Naturskog
21	Stange	Hogstmoden	Naturskog
22	Lunner	Hogstmoden	Naturskog
23	Gran	Hogstmoden	Naturskog
24	Siljan	Hogstmoden	Kulturskog
25	Eidsvoll	Hogstmoden	Kulturskog
28	Kongsberg	Tynning	Naturskog

De undersøkte bestandene var hovedsakelig tilhørende i hogstmoden natur- og kulturskog (Tabell 2). Det var plukket ut et betydelig mindre antall tynningsbestand.

Tabell 2: Frekvenstabell over bestandstilhørighet

Skogtype	Naturskog		Kulturskog	
	Hogstmoden	Tynning	Hogstmoden	Tynning
Hogstmodenhet				
Antall bestand	10	2	8	2

Tabell 3. Fylkestilhørighet og boniteter (H_{40}) for bestandene.

Bestand	Vestfold	Buskerud	Telemark	Akershus	Hedmark	Oppland
1	11,6					
2					20,5	
5			13,6			
6					23,4	
7				25,2		
9	26,6					
10	11,4					
11					17,0	
12				14,1		
13						17,7
14	20,4					
15					22,2	
16				21,2		
18			17,8			
19			17,4			
20			10,4			
21					15,4	
22						10,6
23						14,4
24			13,6			
25				20,2		
28		13,9				
Gjennomsnitt	17,5	13,9	14,6	20,2	19,7	14,2
Standardavvik	7,4		3,1	4,6	3,4	3,6

Den fylkesvise fordelingen av bestandene (Tabell 3) viste at det var samlet flest bestand i Hedmark og Telemark. Fra begge disse fylkene var det samlet fem bestand. Av de seks fylkene hadde Buskerud minst gjennomsnittsbonitet (13,9) og Akershus størst gjennomsnittsbonitet (20,2). Det største standardavviket knyttet til gjennomsnittsboniteten fant man i Vestfold (7,4).

Oppland, Telemark og Buskerud skilte seg ut med lavere gjennomsnittsbonitet enn de andre fylkene. Årsaken er at det i disse tre fylkene er store, høyereliggende områder som blir representert i bestandsutvalget.

Materialet hadde dessverre store mangler i de nøyaktige høyderegistreringene, men alle bestand var blitt registrert i en tilhørende høydesone. Ut fra registreringene lagde jeg en frekvenstabell over høydesone og fylkestilhørighet (Tabell 4).

Tabell 4. Bestandenes fylkestilhørighet og høydesonefrekvens.

Høydesone	Vestfold	Buskerud	Telemark	Akershus	Hedmark	Oppland
H1	2	0	1	1	2	0
H2	2	0	2	2	2	1
H3	0	1	2	1	1	2

Bestandenes høydesonetilhørighet (Tabell 4) bekreftet antagelsen om at Oppland, Telemark og Buskerud har hovedtyngden av sine bestand fra høyere liggende områder. Vestfold og Hedmark stod fram som de to fylkene med størst overvekt av bestand i lave høydesoner.

Ved å fordele bestandsbonitetene til de tilhørende høydesonene, kom jeg fram til gjennomsnittsverdiene presentert i Tabell 5.

Tabell 5. Gjennomsnittsboniteter i de ulike høydeklassene.

Høydeklasse	H1	H2	H3
Gj.snitt, bonitet	21,0	17,7	14,1
Std.av., bonitet	5,5	3,4	3,3

2.2 Utvalg av prøvetrær

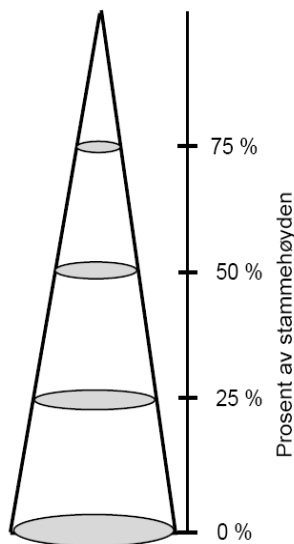
Utvalget av prøvetrær var foretatt i form av et stratifisert, stokastisk utvalg. På et representativt areal (ca. 0,5 daa) av bestandet ble det nummerert 24 tilfeldige trær. Trærne ble klavet i brysthøyde og delt inn i 3 grupper, slik at trærne med de største, mellomstore og minste brysthøydediametrene havnet i hver sin gruppe. Dette gav tre grupper med åtte trær i hver gruppe. Gruppene ble benevnt herskende, medherskende og undertrykte, fra henholdsvis største til minste brysthøydediameter. Fra hver av disse tre gruppene ble det ved tilfeldig utvalg tatt ut to trær, slik at det totale utvalget fra hvert bestand ble seks trær (Vadla 2002).

Med et stratifisert utvalg unngikk man at alle de seks prøvetrærne havnet i samme diameterkategori. Stratifisering er en teknikk som benyttes for å redusere variansen til en estimator (Løvås 1999).

Utover de ovenfor nevnte utvalgsriterier, var det gitt et minstekrav for brysthøydiameter på 17 cm og 10 cm for henholdsvis hogstmoden skog og tynningsvirke. Videre skulle unormale trær, kanttrær og trær med synlige feil ikke inngå som prøvetre (Vadla 2002).

2.3 Uttak av små, feilfrie prøver

Fra hvert prøvetre ble det kappet ut fire seksjoner; hver av disse av en lengde på 0,5 m. Seksjonene ble kappet ut ved rotavskjær (0 %), og ved 25, 50 og 75 % av trehøyden (Figur 1). De tre sistnevnte seksjonene ble i likhet med ved rotavskjæret kappet ut med nevnte trehøyder som nedre kapp (Vadla 2002).



Figur 1: Uttak av stammeseksjoner i forhold til stammehøyde (Bramming 2004).

Fra uttaket av seksjoner fram til ferdige feilfrie prøver er det hele tiden avgjørende med god merking. Kubbene (seksjonene) ble derfor merket på følgende vis:

- Region
- Høydelag
- Trenummer
- Høydenivå
- Nordretning

I tillegg ble en hel rekke av opplysninger notert på bestandsnivå.

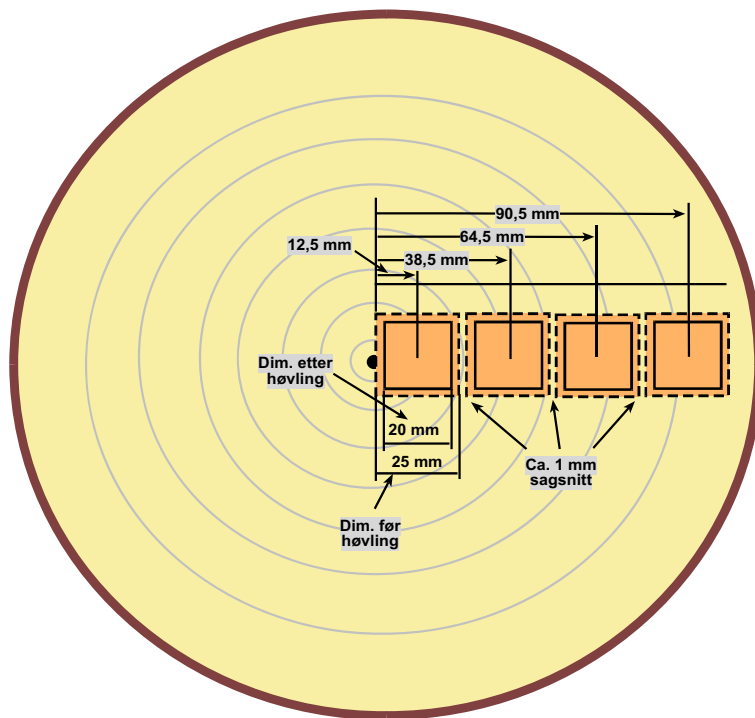
Den videre bearbeidelsen av kubbene for testing av styrkeegenskaper fant sted på NTI. For hver av kubbene ble det skåret ut så mange prøvestaver som kubbens dimensjon tillot (Figur 2). Prøvestavene ble tatt ut fra marg til kambium i vestretningen av kubbene. Bilde 1 og 2 illustrerer noe av arbeidet ved uttak av prøvestaver.



Bilde 1. Jan Bramming svinger motorsaga under prøveuttaket (Bramming 2004).



Bilde 2. Videre i prøveuttaket benyttes båndsg (Bramming 2004).



Figur 2: Uttak av prøvestaver og deres tilhørende dimensjoner (Bramming 2004).

På NTI ble følgende styrkerelaterte tester utført (dimensjoner i parentes):

- Bøystyrke (20*20*340 mm)
- E-modul (20*20*340 mm)
- Basisdensitet (20*20*25 mm)
- Årringbredde (valgfri dimensjon)

2.4 Testing

Alle målinger ble utført i overensstemmelse med SKANORM (Skandinaviske normer for testing av små feilfrie prøver) (Kučera 1992). Kapittel 2.4 kan ses på som et kort resymé av SKANORM 2, 4, 7 og 8.

2.4.1 Symbolforklaring

Symbol	Størrelse	Enhet
$A_{\text{gj.snitt}}$	gjennomsnittlig årringbredde	mm
b	prøvens dimensjon i radialretning (bredde)	mm
b_{max}	bredde ved fuktighet over FMP	m
E	elastisitetsmodul ved firepunkts statisk nedbøyning	N/mm^2
F	differansen mellom belastningene F_2 og F_1	N
F_{max}	bruddbelastningen	N
f	nedbøyningsdeformasjonen beregnet som differansen mellom middelverdiene ved belastningsnivåene F_2 og F_1	N
h	prøvens dimensjon i tangentialretning (høyde)	mm
h_{max}	høyde ved fuktighet over FMP	m
l_0	bredden av et bestemt antall årringer	mm
l_1	avstanden mellom opplagringspunktene	cm
l_2	avstanden mellom opplagringspunktene	mm
l_{max}	lengde ved fuktighet over FMP	m
m_0	masse i absolutt tørr tilstand	kg
m_1	masse i absolutt tørr tilstand	g
m_w	masse før tørking	g
n	antall hele årringer	årring
ρ	basisdensitet	kg/m^3
ρ_{12}	densitet ved 12 % trefuktighet	kg/m^3
σ	bøyefasthet ved trepunkts statisk bøyning	MPa
V_{max}	volum ved fuktighet over FMP	m^3
W	fuktighetsinnhold	%

2.4.2 Gjennomsnittlig årringbredde

Alle målingene av den gjennomsnittlige årringbredden ble utført i overensstemmelse med SKANORM 2. Én årringbredde utgjøres av treets årlige sekundære tykkelsesvekst.

Årringbredden uttrykkes i millimeter (mm).

På prøven trekkes det først en linje vinkelrett på årringene. Langs denne linjen (l_0) måles så et bestemt antall hele årringer (n).

Formel 1. Gjennomsnittlig årringbredde.

$$A_{gj.snitt} = \frac{l_0}{n}$$

2.4.3 Basisdensitet

Alle målinger er gjort i overensstemmelse med SKANORM 4 med noen justeringer. SKANORM 4 er i full overensstemmelse med ISO 3131 fra 1975.

Basisdensiteten er definert som vekt i absolutt tørr tilstand dividert med volum ved fuktighet over fibermetningspunktet (FMP), og måles ofte i kg/m^3 .

Formel 2: Basisdensitet (ρ).

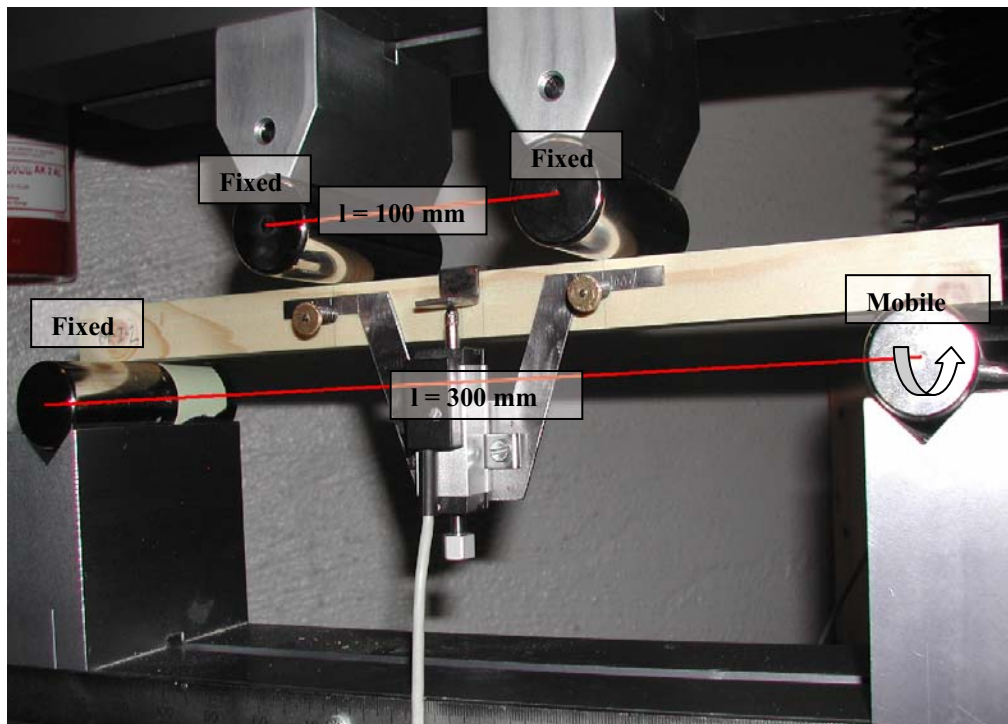
$$\rho = \frac{m_0}{b_{\max} \times h_{\max} \times l_{\max}} = \frac{m_0}{V_{\max}}$$

Ved måling av basisdensitet ble prøvene lagt i destillert vann ved 20°C i omtrent en uke, til de har sluttet å svulle. Maksimal bredde, lengde og høyde måles, og maksimalt volum bestemmes. Deretter tørkes prøvene i tørkeskap ved $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ i 24 timer, slik at vekten ikke lenger avtar. Etter 3-4 timers nedkjøling i eksikator kan tørrvekten bestemmes.

2.4.4 Elastisitetsmodul ved statisk bøyning

Målingene av E-modul ble utført i overensstemmelse med SKANORM 8 og ISO 3349 med noen justeringer. SKANORM 8 er i utgangspunktet i full overensstemmelse med ISO 3349, med unntak for selve belastningssystemet (Kučera 1992).

E-modul er et uttrykk for stivheten til prøven. E-modulen måles ved prøvens nedbøyning ved en gitt belastning. Nedbøyningen foregår i prøvens lineærelastiske område. En jevnt økende belastning påføres, og E-modulen beregnes ut fra forskjellen i nedbøyning/deformasjon ved to ulike belastninger. Testoppsettet er gjengitt i Bilde 3.



Bilde 3. Testoppsett for måling av E-modul (Bramming 2004).

Testprosedyre:

1. En kraft på 425 N påføres prøven
2. Den påførte kraften reduseres til 0 N
3. Punkt 1 og 2 repeteres seks ganger.

Kraften påføres i en hastighet av 2,5 mm/min. E-modulen beregnes for hver av de seks repetisjonene, og gjennomsnittsverdien av de fire siste repetisjonene noteres.

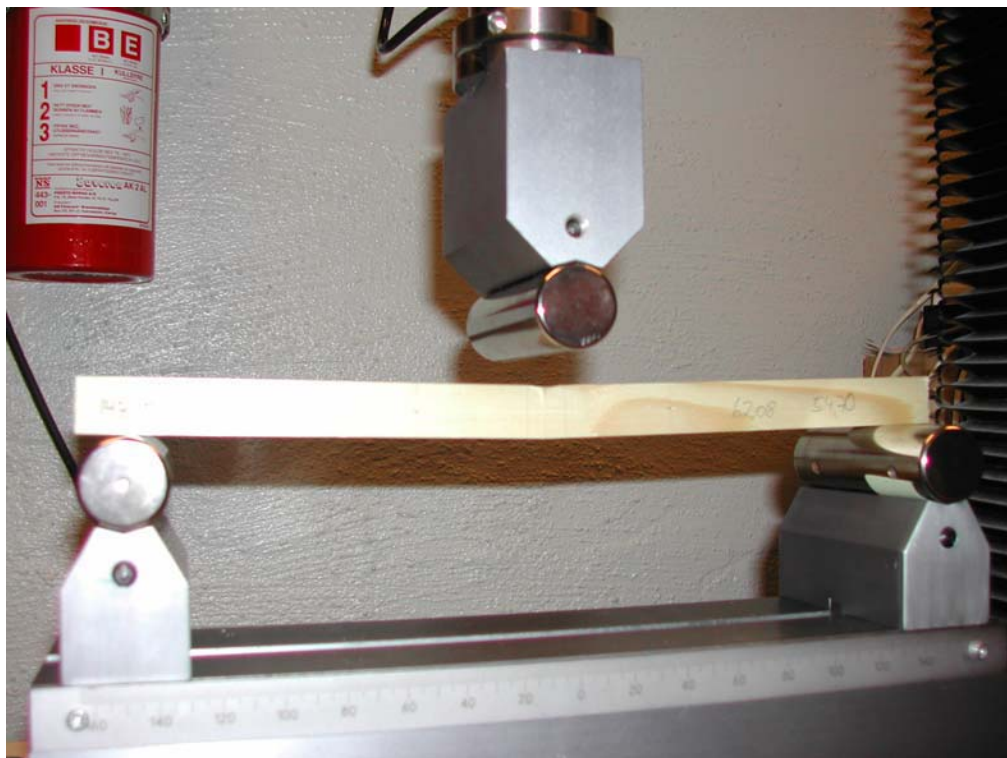
Formel 3: Elastisitetsmodul (E) ved firepunkts statisk bøyning (N/mm^2).

$$E = \frac{F \times l_1^3}{36 \times b \times h^3 \times f} \times 1000$$

2.4.5 Bøyefasthet ved statisk bøyning

Målingene av bøyefasthet ble utført i overensstemmelse med SKANORM 7 med noen justeringer. SKANORM 7 er i full overensstemmelse med ISO 3133 fra 1975 (Kučera 1992).

Bøyefasthet er den maksimale belastningen man kan påføre prøven. Denne belastningen oppnås samtidig som det oppstår brudd i prøven. Testoppsettet er gjengitt i Bilde 4.



Bilde 4. Testoppsett for måling av bøyefasthet (Bramming 2004).

Testprosedyre:

1. En økende kraft påføres på prøvens midt.
2. Ved størst mulig belastning vil prøven enten knekke rett av eller gradvis svekkes i styrke av småbrudd.
3. Hver prøve kan bare testes én gang, siden dette er en destruktiv test.

Formel 4: Bøyefasthet (σ) ved trepunkts statisk bøyning (MPa).

$$\sigma = \frac{3 \times F_{\max} \times l_2}{2 \times b \times h^2}$$

En jevnt økende belastning påføres prøven i en hastighet på 6 mm/min. Bøyefastheten kalkuleres av programvaren etter hver testsesjon.

2.5 Bakgrunnsmateriale

Alt tallfestet bakgrunnsmateriale som ble benyttet i denne oppgaven stammet fra et stort regneark utarbeidet ved NTI på bakgrunn av alle foreløpige registrerte verdier.

Det originale regnearket har jeg bearbeidet blant annet ved å opprette nye verdier for bestandsbonitet. Årsaken til at jeg så meg nødt til å gjøre dette, var store sprik mellom den opprinnelige bestandsboniteten og treboniteten. I mange av bestandene var den opprinnelige bestandsboniteten ikke registrert. I de tilfellene der den var registrert, var den hentet fra driftsplaner og lignende med ukjent nøyaktighet. Den nye bestandsboniteten er foretatt ved å tilnærme seg definisjonen av bonitet, nemlig det aritmetiske gjennomsnitt av trehøyden av de 100 trærne med størst diameter per hektar.

Siden det ikke var registrert data for alder i brysthøyde oppstod det et problem ved beregning av ny bestandsbonitet. Forsker Kjell Vadla ved Skogforsk var behjelpelig med å løse problemet. Ved hjelp av en kalkulator (Støtvig & Øyen u.å.) for bonitet og produksjonsevne hadde han allerede regnet ut boniteter for hvert enkelt tre. Alderen i brysthøyde ble beregnet ved å interpolere mellom alder i rotavskjær og alder ved 25 % av trehøyden. Vi forutsatte deretter at det skulle bonitetes på de to herskende trærne i hvert bestand, og at aritmetisk gjennomsnitt av disse to kunne betraktes som en ny bestandsbonitet. Den nye bestandsboniteten la jeg deretter til i regnearket.

Videre er det originale regnearket blitt modifisert, slik at de ulike parametrene uttrykker vektete gjennomsnittsverdier på enkelttrenivå. Vektingen er foretatt ved å la hver prøveplass mellom margen og kambiet representere hvert sitt areal; i form av en sirkelsone av stammetverrsnittet. Den ytterste prøven oppnår da en høyere vekt enn den innerste prøven,

fordi den ytterste prøven representerer en større andel av arealet i stammetverrsnittet og av treets volum. I regnearket fikk hver prøveplass en egen arealvekt. Denne ble deretter dividert på det totale arealet av alle prøvene, og multipliserte med antall uavhengige gjentak. Målsetningen om en vektet gjennomsnittsverdi på enkeltrenivå var dermed oppnådd.

Fuktigheten i trevirket har betydning for styrkeegenskapene. Fuktighet har større innvirkning på trykkfastheten enn på strekkfastheten. Før styrketestingen ble prøvene oppbevart i et klimaregulert rom, med temperatur lik 20°C og relativ luftfuktighet på 65 %.

Likevektsfuktigheten ved dette klimaet sørget for at alle prøvene innstilte seg på en tilnærmet lik trefuktighet på ca 12 %. Trefuktigheten var undersøkt på 491 av de totalt 1344 undersøkte prøvene. Gjennomsnittsverdien var 13,8 %, med et standardavvik på 0,9 %. Trefuktigheten ligger altså noe over ønskelig verdi. Da fuktigheten bare er undersøkt på en brøkdel av materialet, har jeg valgt å ikke korrigere styrkemålingene til 12 % trefuktighet.

Innenfor treteknologi er trefuktighet relatert til den tørre massen:

Formel 5: Fuktighetsinnhold i prosent, (W) (SKANORM 3)

$$W = \frac{m_w - m_1}{m_1} \times 100$$

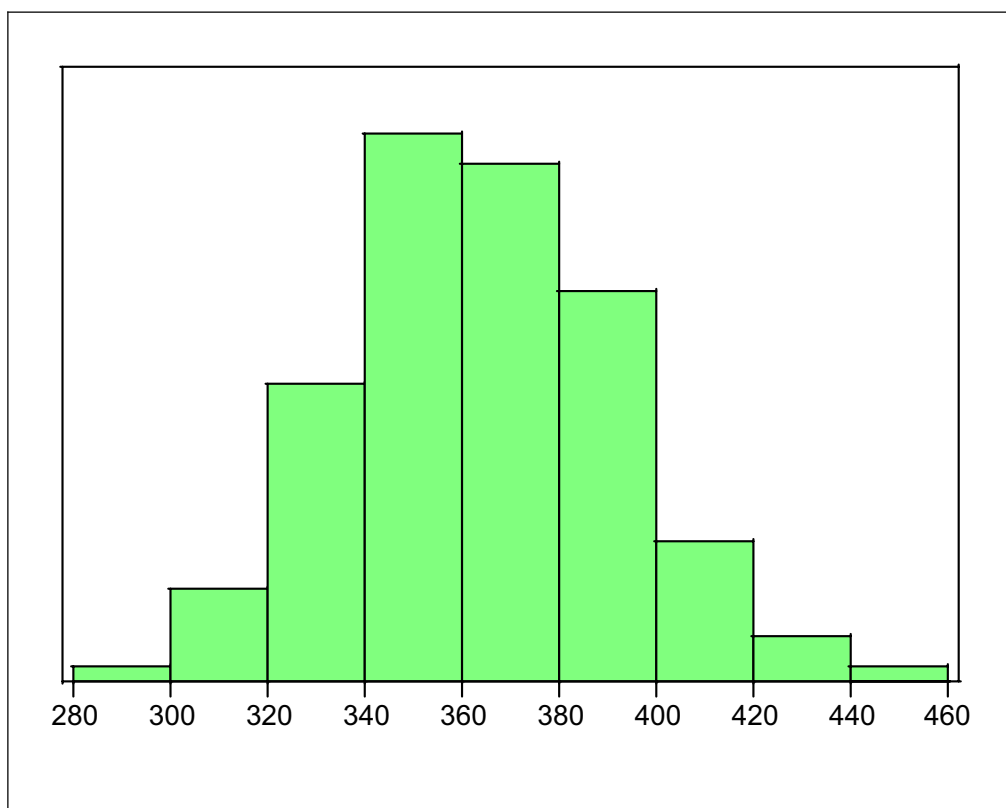
2.6 Statistisk analyse

Det er i oppgaven gjennomgående benyttet et signifikansnivå på 5 % dersom annet ikke er nevnt. All statistisk analyse og modellering er i denne oppgaven utført ved hjelp av statistikkprogrammet JMP (SAS Institute 2000).

3 Resultater

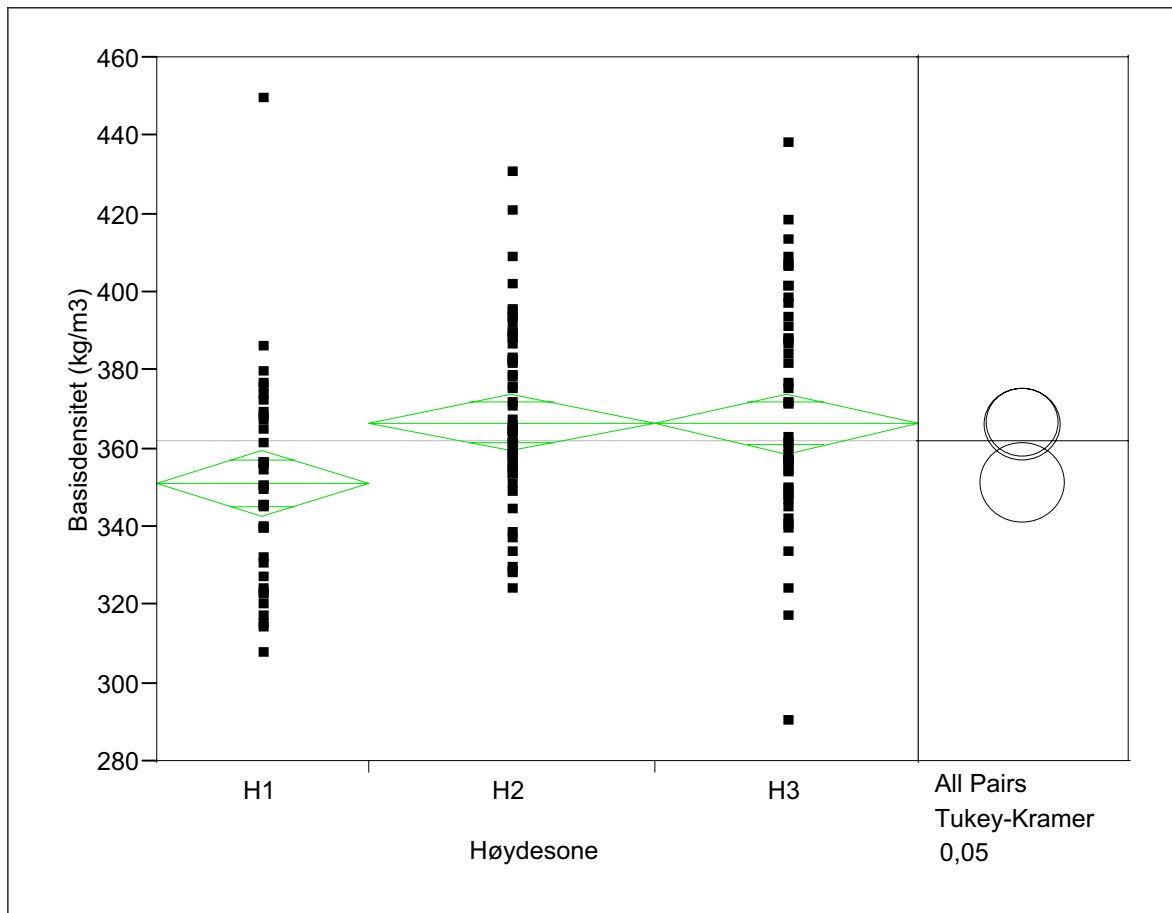
3.1 Basisdensitet

Ved testing av styrkeegenskaper er densiteten, som nevnt i kapittel 1.2.3, svært sentral. Den sterke sammenhengen mellom densitet og styrke er mye brukt i moderne styrketesting på trelast. Densitet vil trolig ha en ennå bedre sammenheng med styrken ved testing av små, feilfrie prøver, fordi disse ikke inneholder kvist.



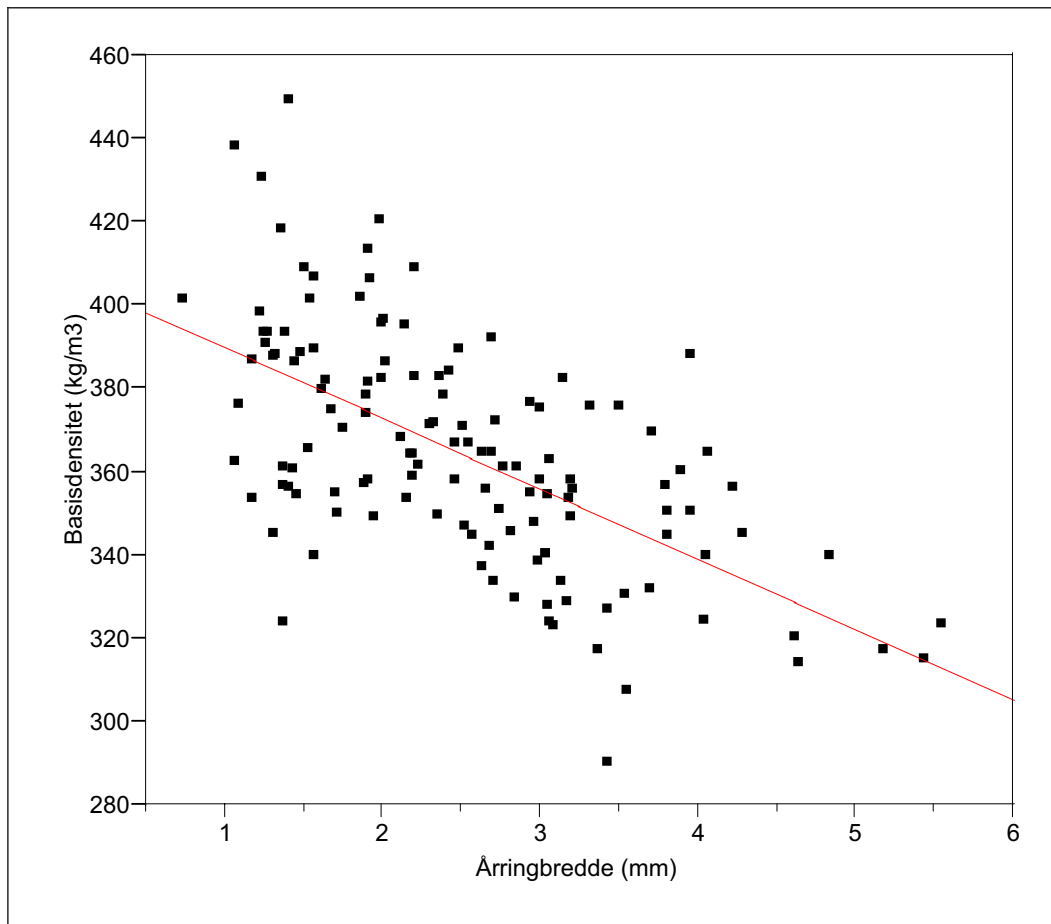
Figur 3. Fordelingen av basisdensiteten (kg/m^3).

Måleresultatene for basisdensiteten fordeler seg tilnærmet normalfordelt (Figur 3). En viss venstreforskyvning av toppen er likevel å spore. Gjennomsnittsverdien for basisdensiteten fra de 132 registrerte trærne er 364 kg/m^3 , med standardavviket 28 kg/m^3 .



Figur 4. Sammenhengen mellom basisdensitet og høydesone.

En variansanalyse (Figur 4) av basisdensiteten basert på høydesonen, gir resultatet ovenfor ($df=2-131$, $F=4,61$, $p>F=0,012$). Høydesonen har altså en signifikant betydning for variasjonen i basisdensiteten. En påfølgende Tukey-Kramer-analyse viser at høydesone H1 skiller seg signifikant fra de to andre høydesonene. Det er en signifikant lavere basisdensitet i høydesone H1, < 200 m.o.h., enn i høydesone H2 og H3.



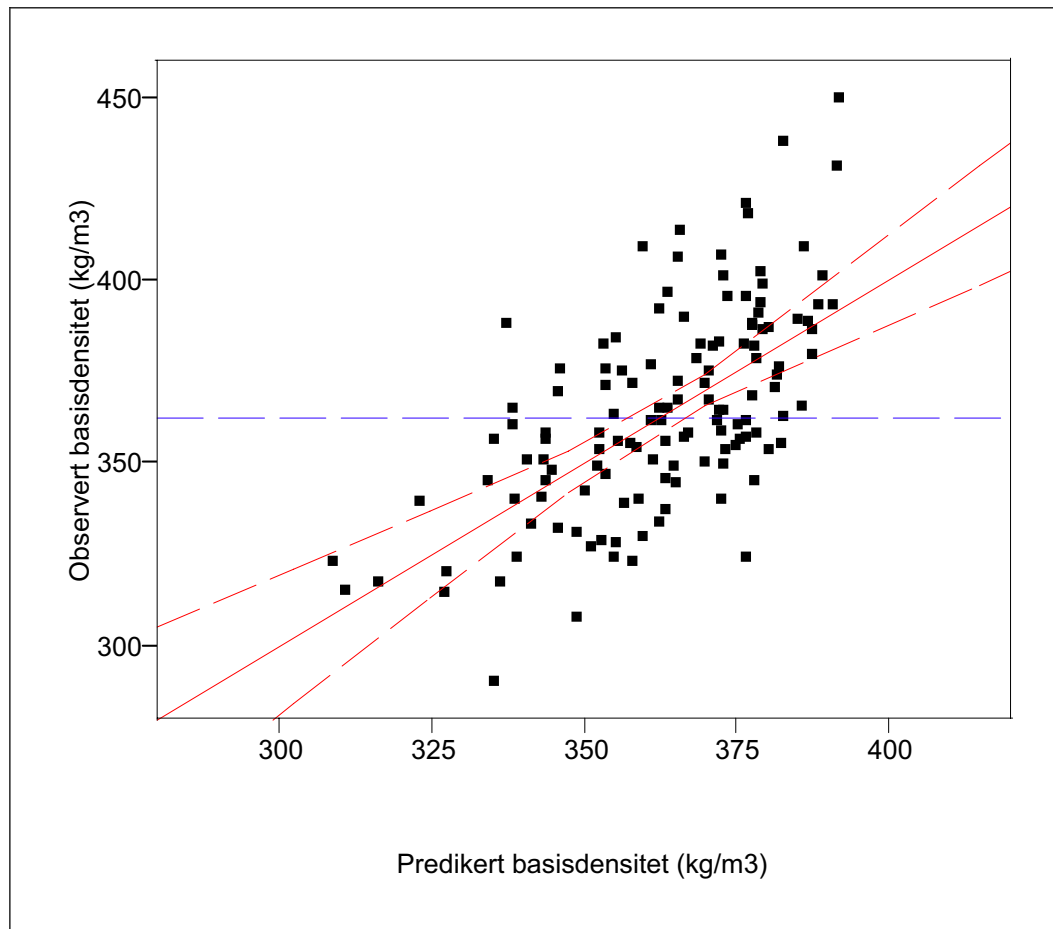
Figur 5. Sammenhengen mellom basisdensitet og årringbredde.

Det framkommer av en enkel lineær regresjon (Figur 5) at årringbredden forklarer 37 % av variasjonen i basisdensiteten ($df=1-131$, $F=78,0$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,370$, $RMSE=22,2$ kg/m^3). Sammenhengen tilsier at rask vekst med høy årringbredde fører til lav basisdensitet.

Den lineære sammenhengen mellom basisdensitet og årringbredde kan uttrykkes ved:

$$\rho = 406,6 - 16,9 * \text{årringbredden}$$

Både høydesonen og årringbredden viste seg som gode forklaringsvariable for basisdensiteten. Derfor kjørte jeg en multippel regresjon med både høydesone og årringbredde som forklaringsvariable.



Figur 6. Basisdensiteten forklart med høydesone og årringbredde.

En kovariansanalyse av basisdensiteten, med både høydesone og årringbredde som forklaringsvariable vises i Figur 6 ($df=3-131$, $F=29,8$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,397$, $RMSE=19,6$ kg/m^3). Høydesonen og årringbredden forklarer altså hele 40 % av variasjonen i basisdensiteten.

Tabell 6. Statistiske verdier for forklaringsvariablene.

Forklaringsvariabel	Observasjoner	DF	F-verdi	Signifikanssannsynlighet
Årringbredde (mm)	132	1	74,8	<0,0001
Høydesone	132	2	4,9	0,0091

Kovariansanalysen (Figur 6) viser hvordan høydesonen, når den korrigeres for årringbredden, forklarer variasjonen i basisdensiteten. Det framkommer av årringbreddens høye F-verdi og klare signifikans i Tabell 6, at årringbredden forklarer mye mer av variasjonen i basisdensitet enn det høydesonen gjør.

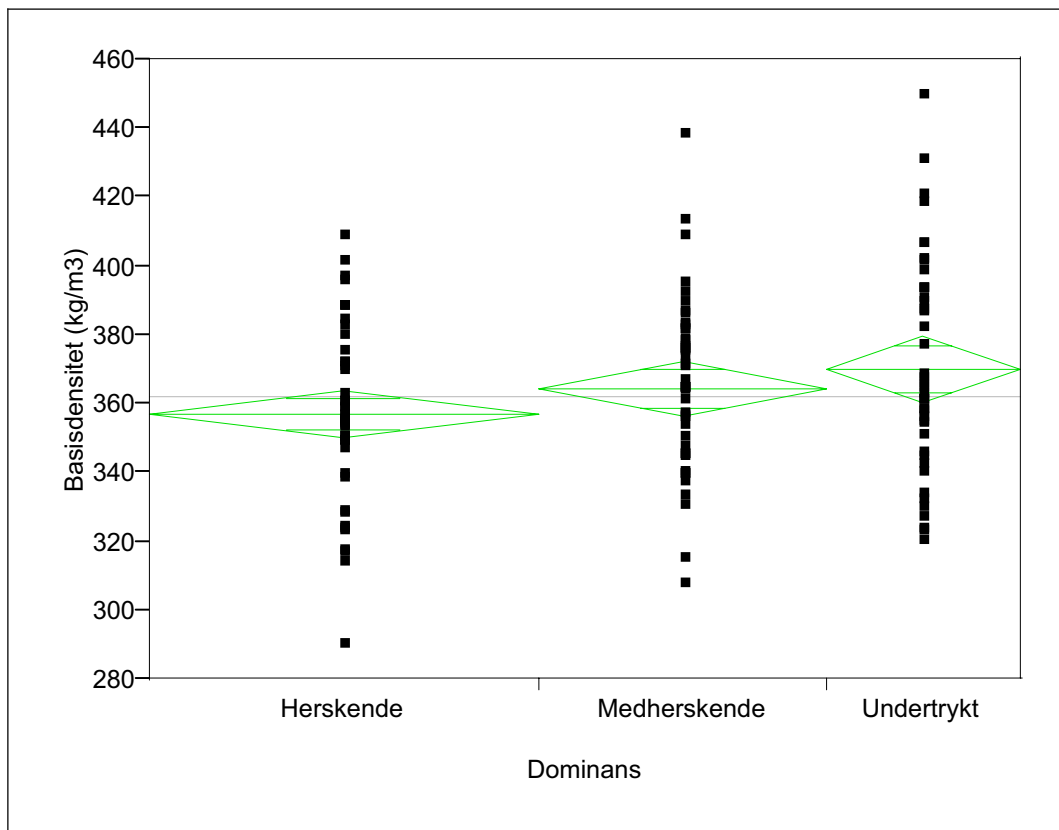
Parameterestimatene for kovariansanalysen av basisdensiteten gir følgende to modeller:

$$(1) \quad \rho = 413,1 + 6,49 \cdot \text{høydesone}(H1) - 20,0 \cdot \text{årringbredde}$$

og

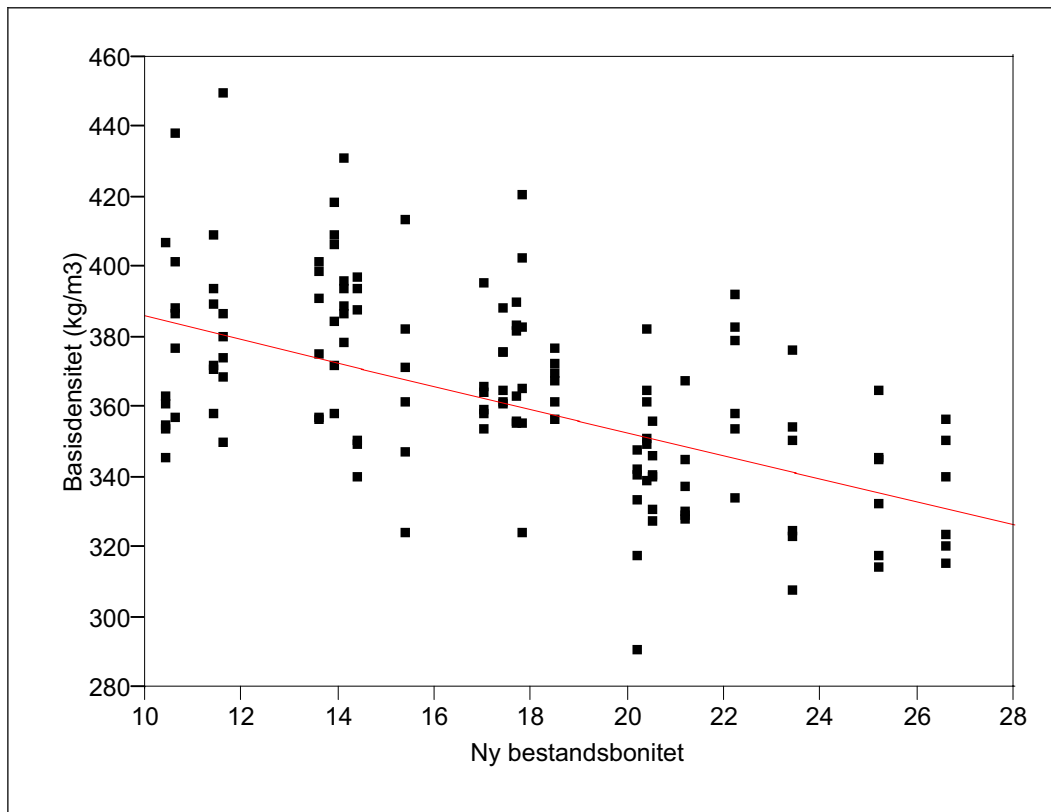
$$(2) \quad \rho = 413,1 + 2,97 \cdot \text{høydesone}(H2) - 20,0 \cdot \text{årringbredde}$$

Modellene viser at når høydesonen korrigeres for årringbredden, får høydesonen en motsatt virkning på basisdensiteten enn det som ble vist i Figur 4. Funksjonene viser her at densiteten er høyere i høydesone H1 enn i høydesone H2, dersom årringbredden er den samme.



Figur 7. Sammenhengen mellom basisdensitet og dominans.

Variansanalysen av dominansens betydning for basisdensiteten (Figur 7) viser en klar tendens til økende densitet hos undertrykte trær, selv om tendensen ikke er signifikant ($df=2-131$, $F=2,53$, $p>F=0,083$).



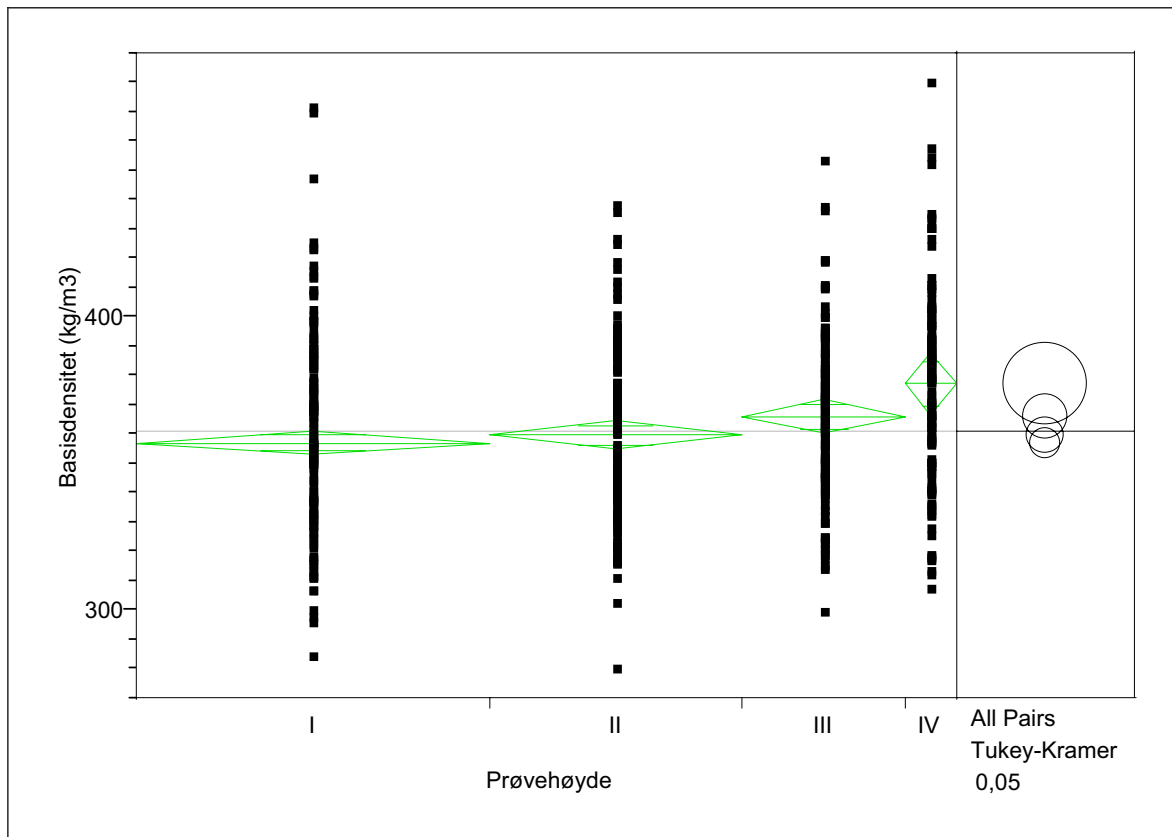
Figur 8. Sammenhengen mellom basisdensitet og ny bestandsbonitet.

Den nye bestandsboniteten forklarer 30 % av variasjonen i basisdensitet ($df=1-131$, $F=58,4$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,304$, $RMSE=21,1 \text{ kg/m}^3$). Sammenhengen viser at basisdensiteten avtar med en økende bestandsbonitet.

Den lineære sammenhengen mellom basisdensiteten og bestandsboniteten kan uttrykkes ved:

$$\rho = 419,0 - 3,31 \cdot \text{ny bestandsbonitet}$$

Videre utførte jeg en multipl regressjon hvor både den nye bestandsboniteten og årringbredden inngikk som forklaringsvariabler. Den nye bestandsboniteten korrigeres da for årringbredden. Dette medførte at den nye bestandsboniteten mistet sin signifikans ($p>F=0,134$), mens årringbredden viste klar signifikans.

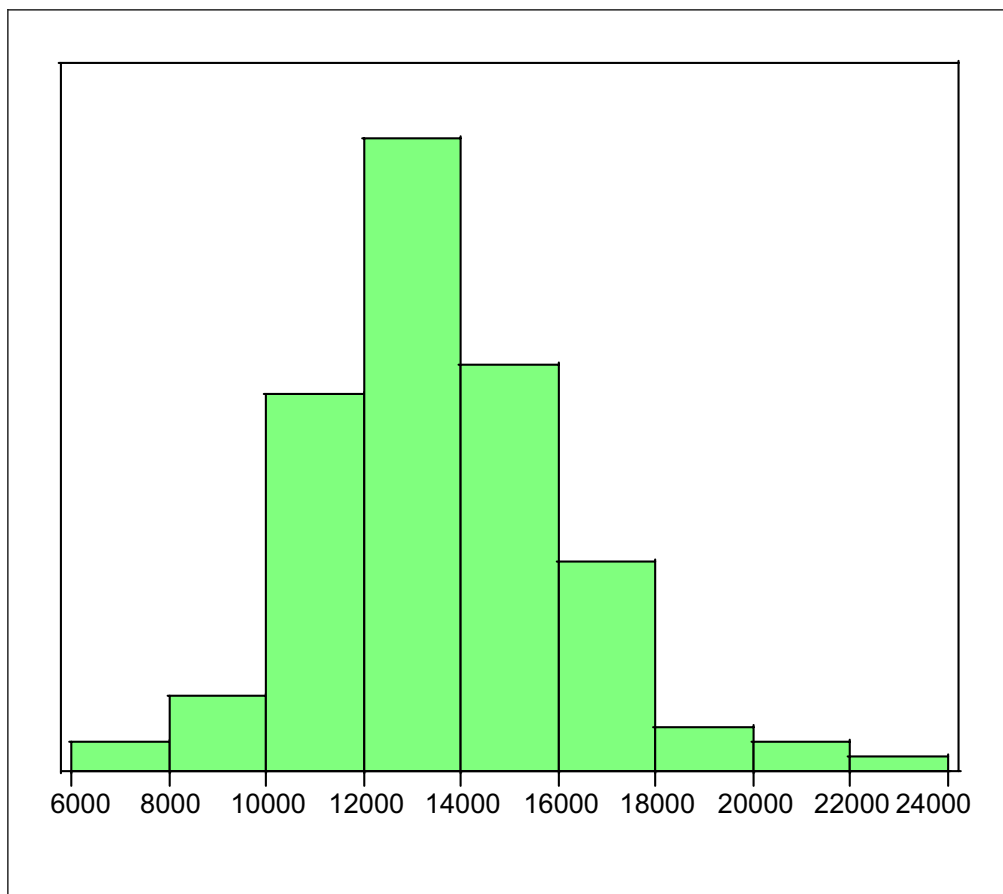


Figur 9. Variansanalyse av basisdensitet basert på prøvehøyde.

Variansanalysen (Figur 9) tilsier at prøvehøyden har signifikant betydning for variasjonen i basisdensiteten ($df=3-504$, $F=5,24$, $p>F=0,0014$). En Tukey-Kramer-analyse viser at basisdensiteten i prøvehøyde IV er signifikant høyere enn i prøvehøyde I og II.

Variansanalysen av prøvens horisontale plassering mellom marg og kambium har derimot ingen signifikant betydning for variasjonen i basisdensiteten ($df=6-518$, $F=1,05$, $p>F=0,395$).

3.2 E-modul

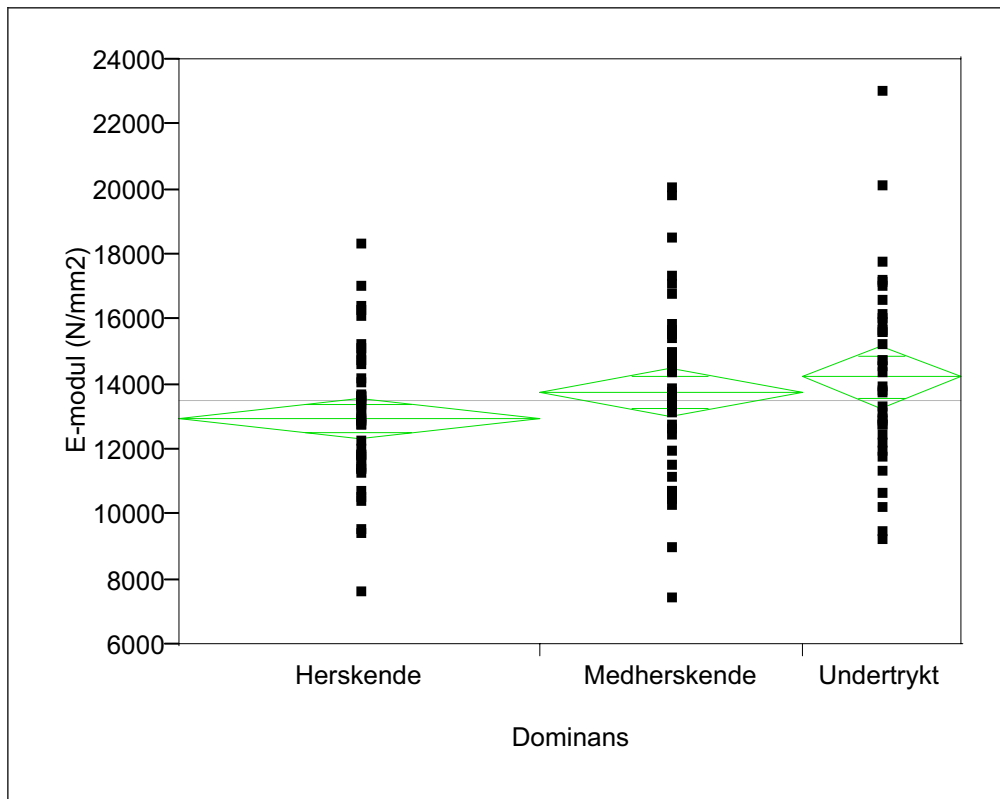


Figur 10. Fordeling av E-modulen (N/mm^2).

Måleresultatene for E-modulen fordeler seg som vist i Figur 10. Fordelingen er tilnærmet normalfordelt, med en liten hale mot høyre. Gjennomsnittlig E-modul på de 121 registrerte trærne er 13700 N/mm^2 , med et standardavvik på 2600 N/mm^2 .

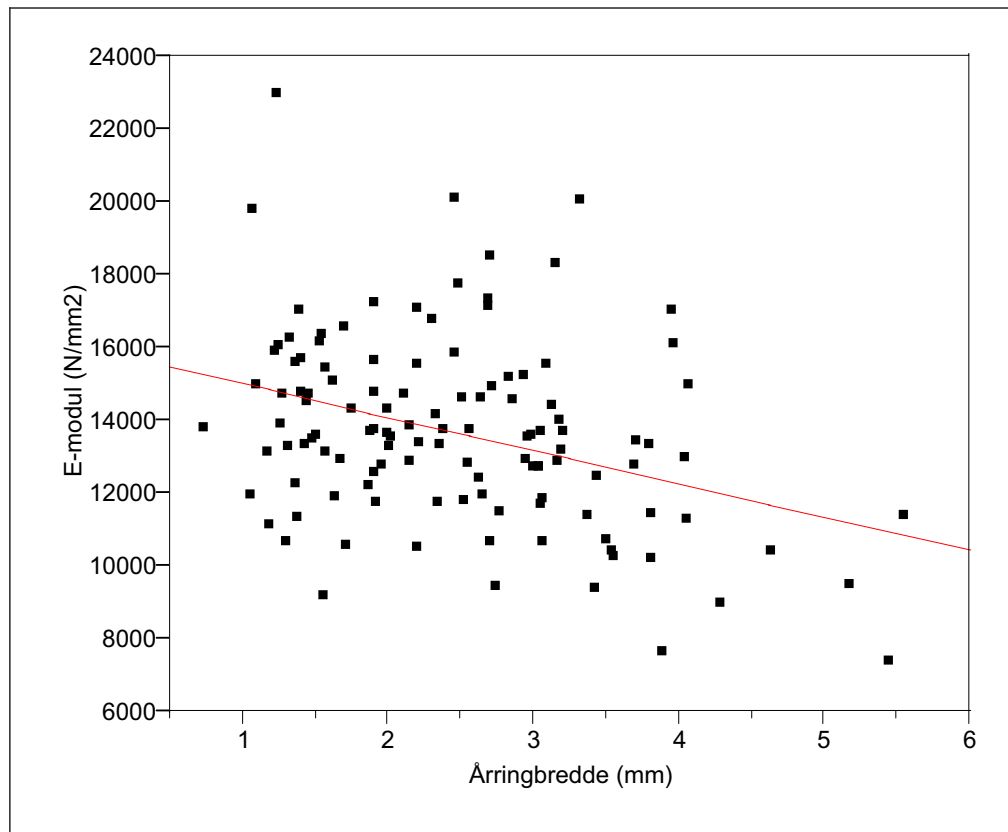
En variansanalyse viser ingen signifikant sammenheng mellom E-modulen og høydesonen ($df=2-120$, $F=2,30$, $p>F=0,105$).

I forhold til enkeltrærnes dominans viser det seg (Figur 11) at prøver hentet fra undertrykte trær har en høyere E-modul enn de hentet fra medherskende og herskende, selv om sammenhengen ikke er signifikant ($df=2-120$, $F=2,83$, $p>F=0,063$).



Figur 11. Sammenhengen mellom E-modul og dominans.

Det faktum at E-modulen viser en tendens til å øke mot undertrykte trær, antyder at årringbredden bør ha en god forklaringsgrad på E-modulen. På bakgrunn av denne antagelsen ble sammenhengen mellom E-modul og årringbredde testet (Figur 12).



Figur 12. Sammenhengen mellom E-modul og årringbredde.

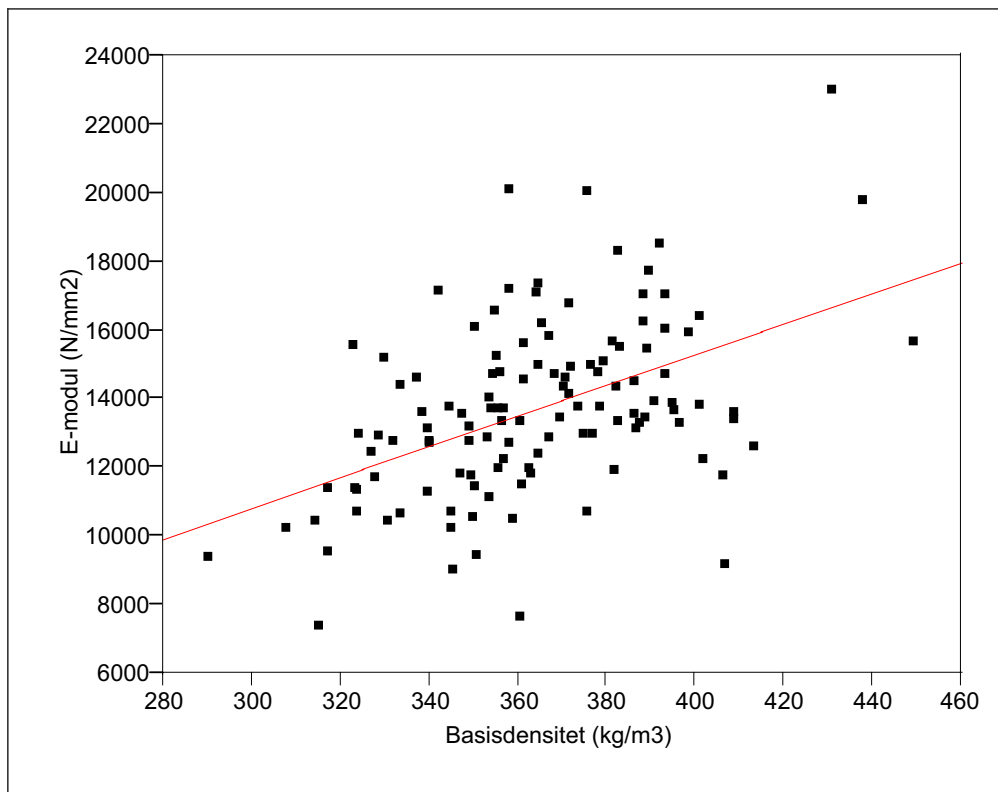
Årringbredden viste seg å ikke kunne forklare mer enn 12 % av variasjonen i E-modul ($df=1-120$, $F=17,0$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,117$, $RMSE=2424 \text{ N/mm}^2$). Det framgår av Figur 12 at større årringbredde medfører en lavere E-modul.

Den lineære sammenhengen mellom E-modul og årringbredde kan uttrykkes ved:

$$E = 15914 - 917 \cdot \text{årringbredde}$$

Tendensen til økt E-modul i undertrykte trær, lot seg ikke forklare så godt ved hjelp av bare årringbredden. Derfor lagde jeg en modell hvor både årringbredden og basisdensiteten inngikk som forklaringsvariable. Dette medførte at årringbredden mistet sin signifikans som forklaringsvariabel ($p>F=0,34$).

Basisdensiteten som eneste forklaringsvariabel til E-modulen, framstod som en god forklaringsvariabel. Derfor kjørte jeg en enkel lineær regresjon med basisdensitet som forklaringsvariabel (Figur 13).



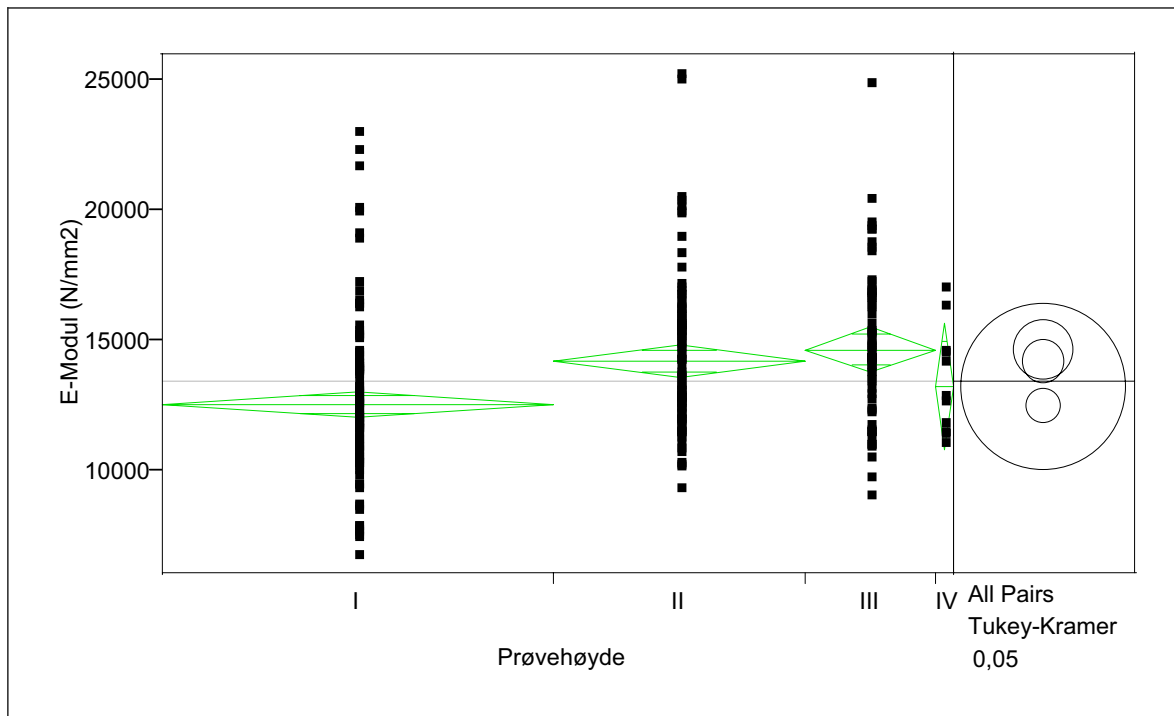
Figur 13. Sammenhengen mellom E-modul og basisdensitet.

Regresjonsanalysen i Figur 13 viser at basisdensiteten forklarer 23 % av variasjonen i E-modulen ($df=1-120$, $F=36,0$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,226$, $RMSE=2270 \text{ kg/m}^3$). Økende basisdensitet medfører en økende E-modul.

Den lineære sammenhengen mellom E-modul og basisdensitet kan uttrykkes ved:

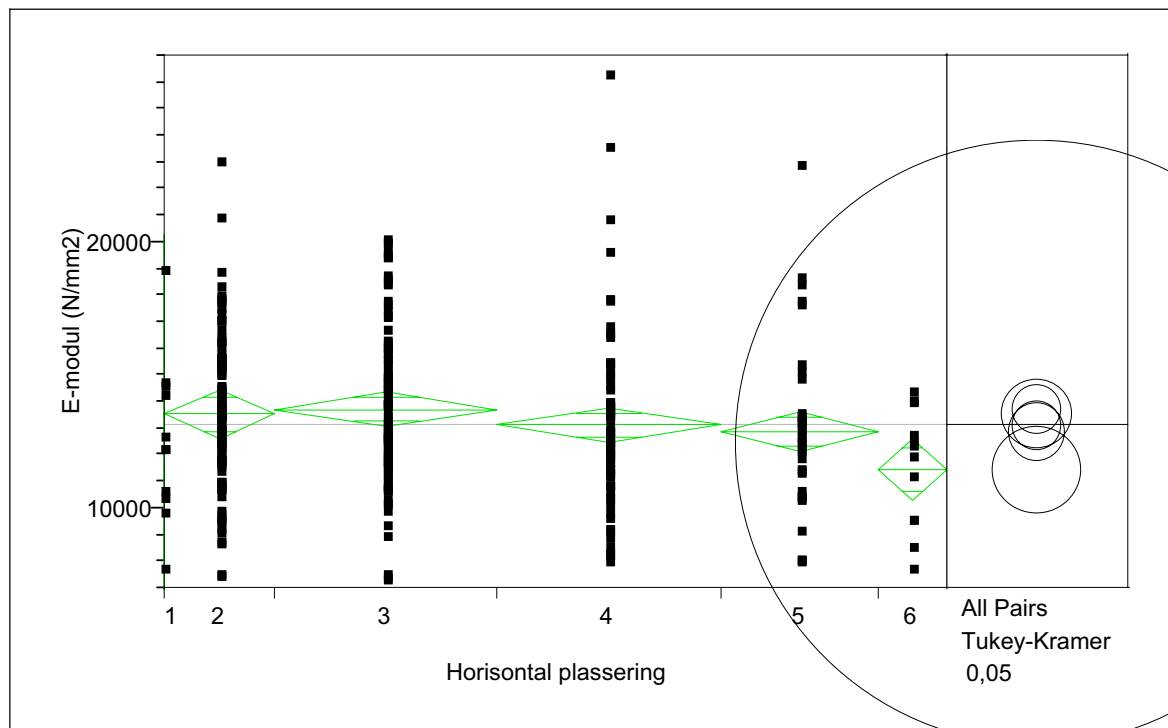
$$E = 2620 + 44,7 \cdot \text{basisdensitet}$$

En enkel lineær regresjon fortalte at den nye bestandsboniteten ikke hadde signifikant betydning for E-modulen ($df=1-120$, $F=2,93$, $p>F=0,089$, $r^2_{adj}=0,016$, $RMSE=2559 \text{ N/mm}^2$).



Figur 14. Variansanalyse av E-modulen, basert på prøvehøyden.

En variansanalyse (Figur 14) viser at prøvehøyden har en signifikant betydning for variasjonene i E-modulen ($df=3-264$, $F=8,82$, $p>F:<0,0001$). En påfølgende Tukey-Kramer-analyse viser at prøvehøyde I hadde en signifikant lavere E-modul enn i prøvehøyde II og III.

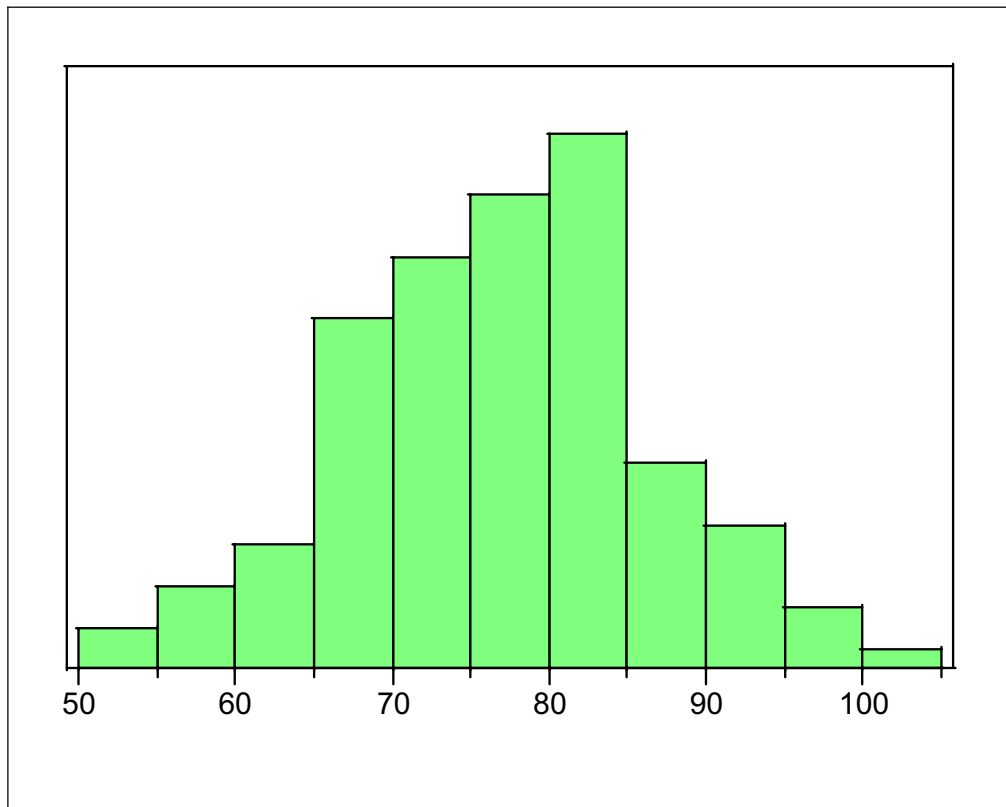


Figur 15. Variansanalyse av E-modulen, basert på horisontal plassering mellom marg og kambium.

Den horisontale plasseringen (Figur 15) har signifikant betydning for variasjonen i E-modulen ($df=5-323$, $F=2,63$, $p>F=0,024$). En Tukey-Kramer-analyse viser at prøvene på plass nummer seks fra margen har en signifikant lavere E-modul enn prøvene på plass nummer tre.

Variansen til prøveplassering nummer én viser seg enorm, siden det er svært få registreringer for denne plasseringen. Variansanalysen viser en tendens til at E-modulen avtar fra marg mot kambium.

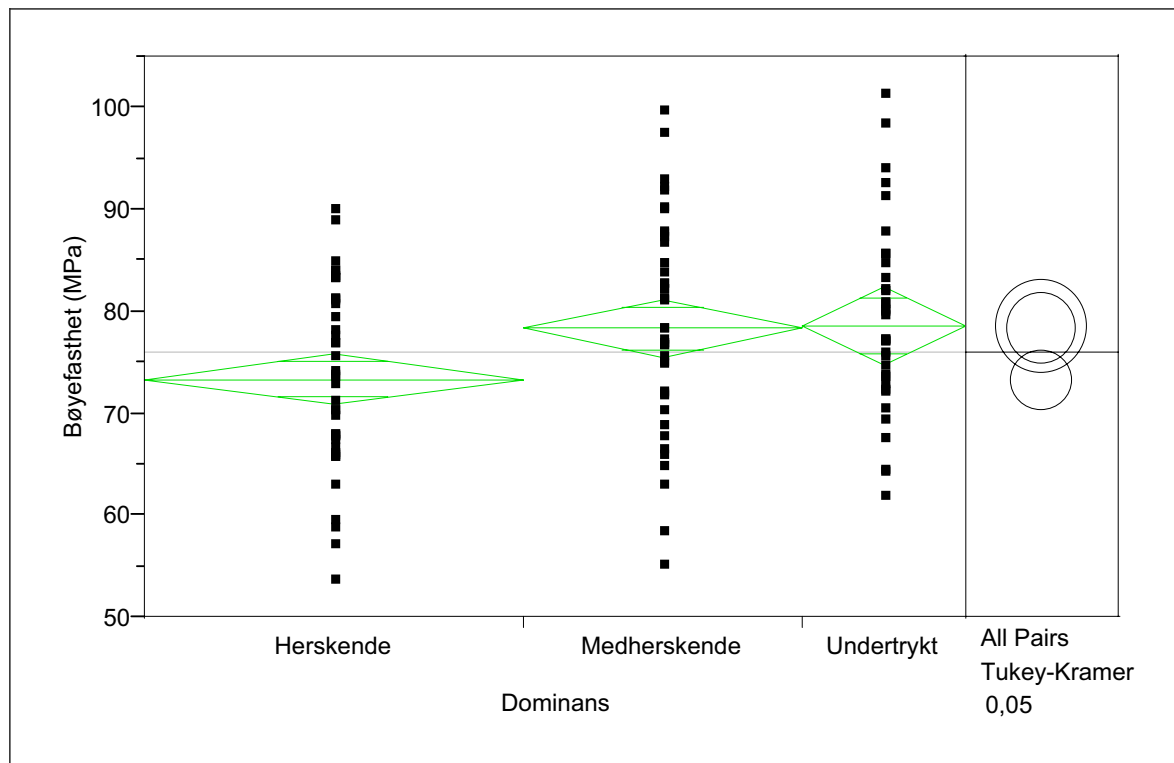
3.3 Bøyefasthet



Figur 16. Fordeling av bøyefastheten (MPa).

Måleresultatene for bøyefastheten fordeler seg som i Figur 16. Gjennomsnittsverdien for bøyefastheten ble på de 119 registrerte trærne 76,9 MPa, med et standardavvik på 9,8 MPa. Fordelingen er temmelig normalfordelt med en noe høyreforskjøvet topp.

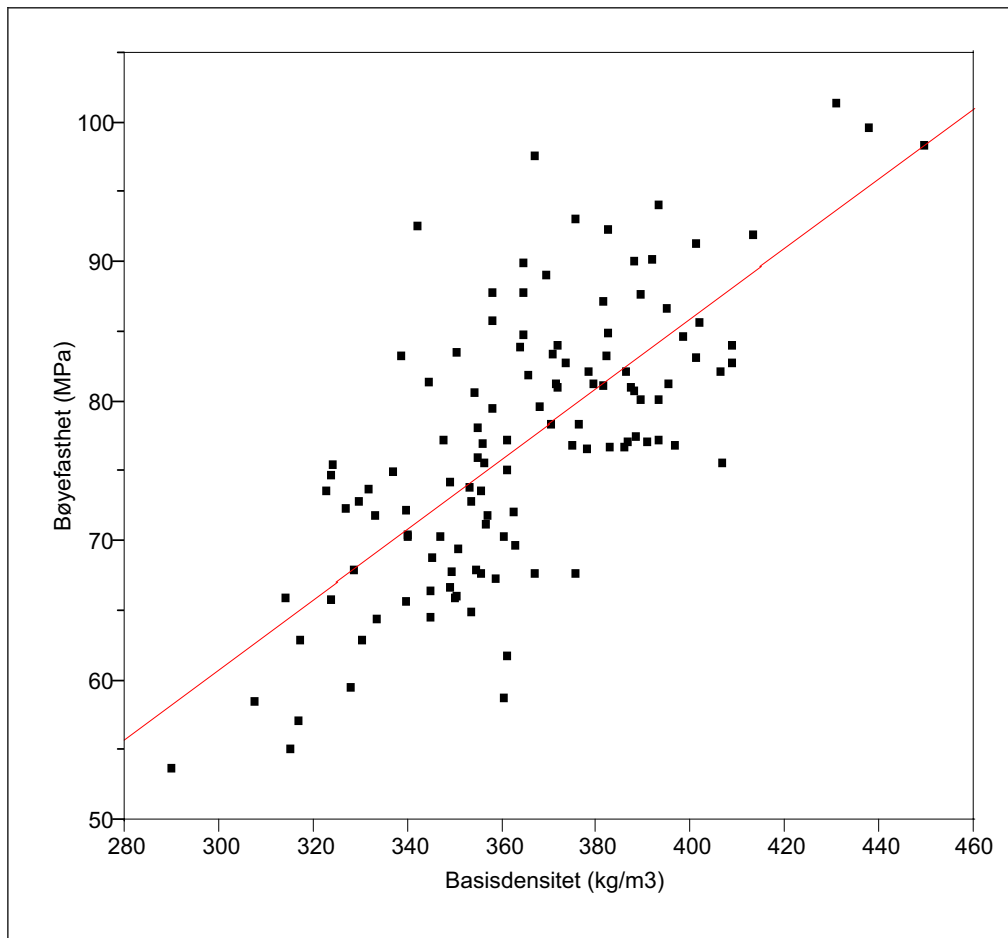
En variansanalyse slår fast at høydesonen ikke har noen signifikant betydning for variasjonen i bøyefastheten ($df=2-118$, $F=0,96$, $p>F=0,384$).



Figur 17. Variansanalyse av bøyefasthet basert på dominans.

Variansanalysen (Figur 17) framhever at dominansen har en signifikant betydning for variasjonen i bøyefastheten ($df=2-118$, $F=4,47$, $p>F=0,014$). Videre viser Tukey-Kramer-analysen, selv om det er vanskelig å se i Figur 17, at bøyefastheten til de herskende trærne er signifikant lavere enn for de medherskende trærne.

Årringbredden som eneste forklaringsvariabel forklarer 15 % av variasjonen i bøyefasthet ($df=1-118$, $F=21,3$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,147$, $RMSE=8,56$ MPa). Jeg lagde en modell for bøyefastheten, basert på årringbredde, basisdensitet og det kryssede produktet av dem. Hverken årringbredden ($p>F=0,197$) eller det kryssede produktet ($p>F=0,061$) hadde signifikant betydning i modellen. Jeg fjernet så det kryssede produktet fra modellen, men heller ikke da hadde årringbredden ($p>F=0,456$) signifikant betydning, hvorpå jeg forkastet denne forklaringsvariabelen i modellen. Basisdensiteten gjenstod som en god forklaringsvariabel for bøyefastheten (Figur 18).

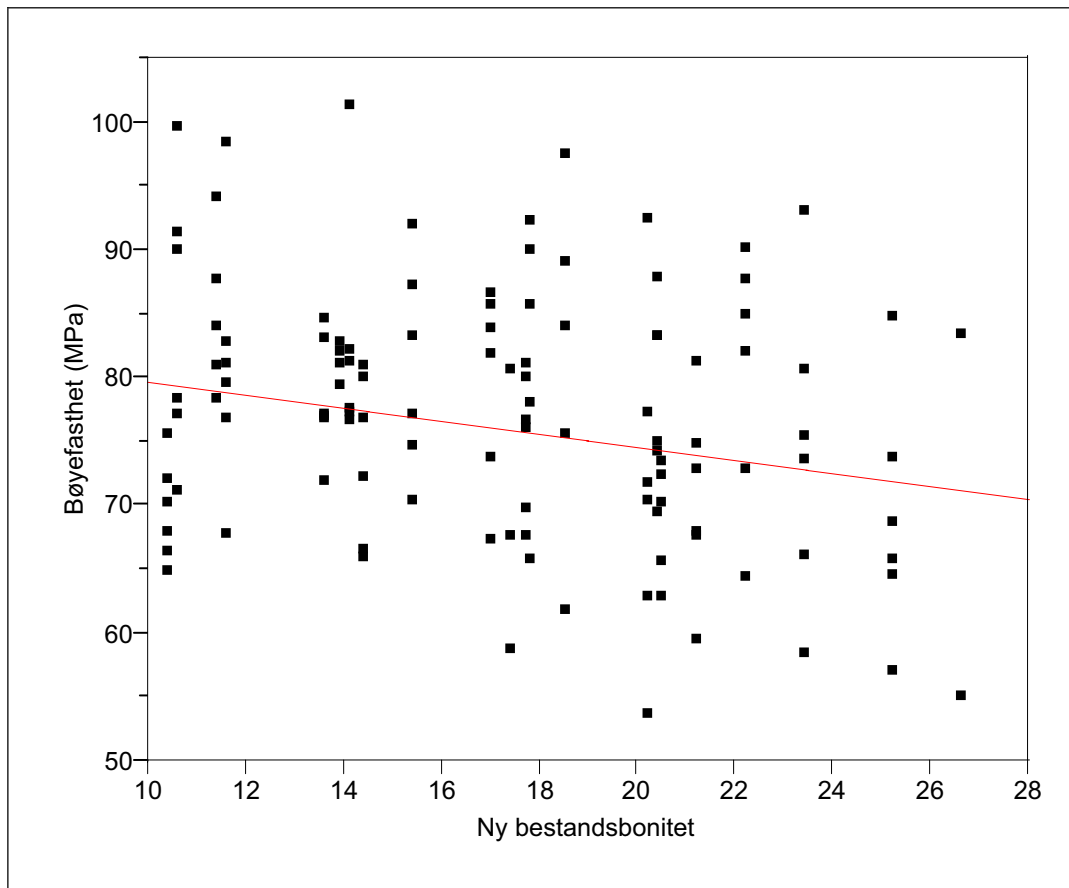


Figur 18. Sammenhengen mellom bøyefasthet og basisdensitet.

Basisdensiteten forklarer hele 51 % av variasjonen i bøyefastheten ($df=1-118$, $F=123,1$, $p>F:<0,0001$, $r^2=0,513$, $r^2_{adj}=0,509$, $RMSE=6,84$ MPa). Av Figur 18 ser man at bøyefastheten stiger med en økende basisdensitet.

Den lineære sammenhengen mellom bøyefasthet og basisdensitet kan uttrykkes ved:

$$\sigma = -14,7 + 0,25 \cdot \text{basisdensitet}$$

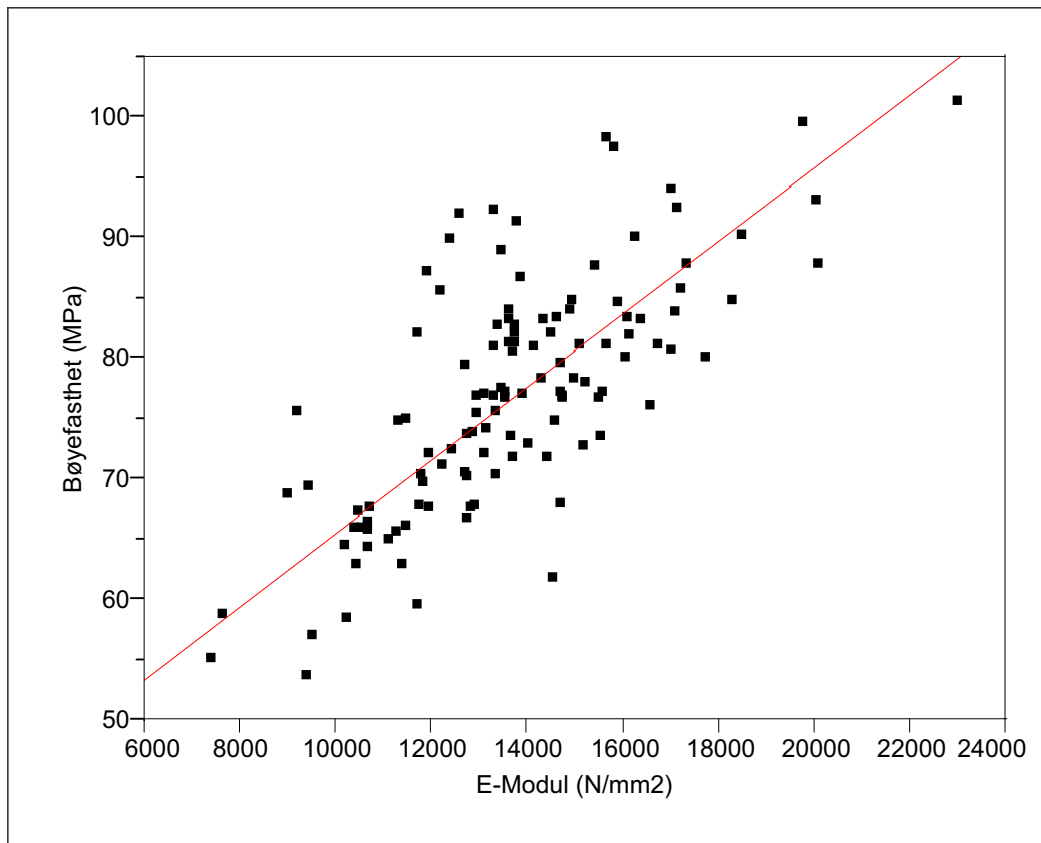


Figur 19. Sammenhengen mellom bøyefasthet og ny bestandsbonitet.

Den nye bestandsbonitetens forklaringsgrad til variasjonen i bøyefastheten er kun 5 % ($df=1-118$, $F=7,15$, $p>F=0,0086$, $r^2_{adj}=0,050$, $RMSE=9,03$ MPa). Av Figur 19 ser vi at bøyefastheten avtar svakt med en økende bestandsbonitet.

Den lineære sammenhengen mellom bøyefasthet og bestandsboniteten kan uttrykkes ved:

$$\sigma = 84,9 - 0,52 * \text{ny bestandsbonitet}$$



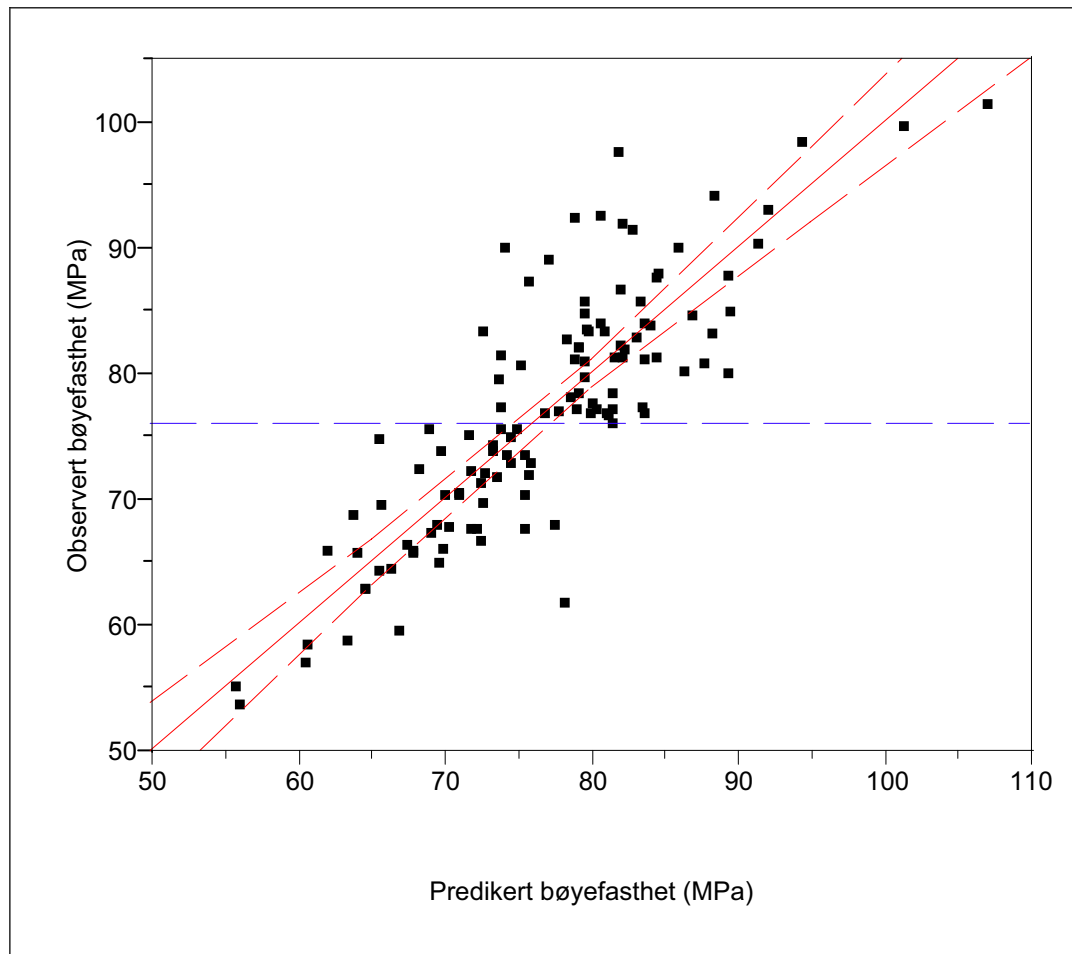
Figur 20. Sammenhengen mellom bøyefasthet og E-modul.

Sammenhengen mellom bøyefastheten og E-modulen bør være sterk. I undersøkelsen forklarer E-modulen hele 58 % av variasjonen i bøyefastheten (Figur 20). Regresjonsanalysen viser en signifikant sammenheng mellom E-modulen og bøyefastheten ($df=1-118$, $F=161,5$, $p>F:<0,0001$, $r^2_{adj}=0,576$, $RMSE=6,03$ MPa).

Den lineære sammenhengen mellom bøyefasthet og E-modul kan uttrykkes ved:

$$\sigma = 35,1 + 0,003 \cdot E\text{-modul}$$

En ennå bedre forklaringsgrad for variasjonene i bøyefastheten oppnås ved å benytte både E-modul og basisdensitet som forklaringsvariable i samme modell.



Figur 21. Bøøyfastheten forklart med E-modul og basisdensitet.

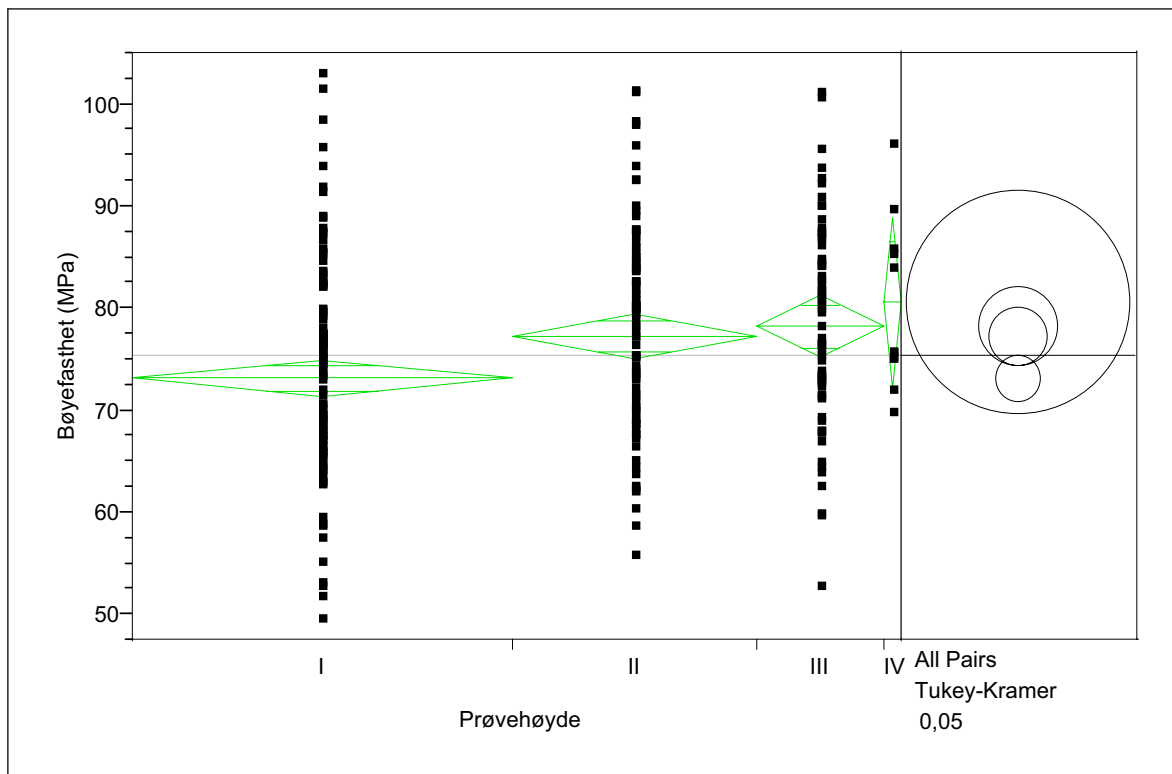
Tabell 7. Statistiske verdier for forklaringsvariablene.

Forklaringsvariabel	Observasjoner	DF	F-verdi	Signifikanssannsynlighet
Basisdensitet (kg/m³)	119	1	58,1	<0,0001
E-modul (N/mm²)	119	1	86,4	<0,0001

Modellen (Figur 21) har en forklaringsgrad på 72 % (df=2-118, F=149,2, p>F:<0,0001, $r^2_{adj}=0,715$, RMSE=4,94 MPa). Det er ingen stor forskjell mellom forklaringsvariablenes betydning for modellen. Av Tabell 7 ser man likevel av F-verdiene at E-modulen forklarer mer av variasjonen i bøøyfastheten enn hva basisdensiteten gjør.

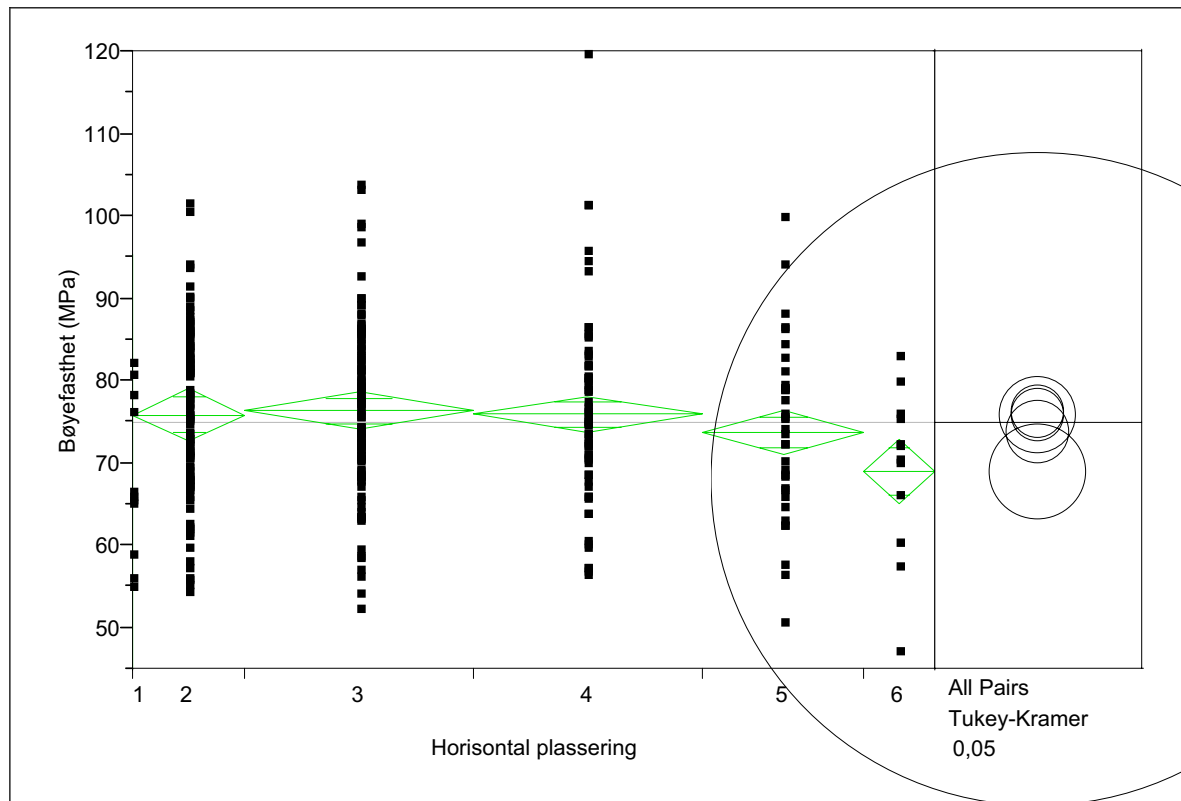
Den lineære sammenhengen for bøøyfastheten i modellen kan uttrykkes ved:

$$\sigma = -9,23 + 0,156 \cdot \text{basisdensiteten} + 0,002 \cdot \text{E-modulen}$$



Figur 22. Variansanalyse av bøyefasthet basert på prøvehøyde.

Variansanalysen av prøvehøydens innvirkning på bøyefastheten (Figur 22) viser at sammenhengen er signifikant ($df=3-262$, $F=4,93$, $p>F=0,002$). Bøyefastheten stiger med en høyere prøvehøyde. En påfølgende Tukey-Kramer-analyse viser at det er signifikant lavere bøyefasthet i prøvehøyde I enn i prøvehøyde II og III.



Figur 23. Variansanalyse av bøyefastheten, basert på horisontal plassering mellom marg og kambium.

Den horisontale plasseringen mellom marg og kambium har signifikant betydning for variasjonen i bøyefastheten ($df=5-320$, $F=2,52$, $p>F=0,030$). En Tukey-Kramer-analyse viser at prøvene på plass nummer seks fra margens har en signifikant lavere bøyefasthet enn prøvene på plass nummer tre og fire. Variansen til prøveplassering nummer én viste seg enorm, siden det er svært få registreringer for denne plasseringen. Variansanalysen viser en tendens til at bøyefastheten avtar fra marg mot kambium.

4 Diskusjon

Denne undersøkelsen er basert på et tallmateriale som er samlet inn og registrert gjennom SSFF-prosjektet. Jeg har møtt noen av dem i løpet av den tiden jeg har jobbet med oppgaven. Det har gitt meg mulighet til å stille oppklarende spørsmål angående planlegging, innsamling, registrering med mer. I tillegg har jeg fått tilgang til endel skriftlig materiell. Samlet har dette gitt meg den bakgrunnskunnskap som jeg har basert oppgaven på. Problemet er at det i et prosjekt av en slik størrelse er involvert mange mennesker, hvorav jeg har truffet et fåtall. Det vil alltid være spørsmål som burde vært stilt, opplysninger som burde vært gitt og så videre. Dette blir en svakhet i en oppgave som er basert på andres vurderinger og nøyaktighet under planlegging og innsamling av materiale. Samtidig kan det være styrkende, fordi man ikke i samme grad ser seg blind på sine egne metoder. Det er ofte lettere å se feil og mangler i andres arbeider enn i sitt eget.

Det mest mangelfulle i materialet viste seg å være bestandsboniteten. Det manglet bonitetsregistrering i mange av de 22 bestandene. Bestandsboniteten er en kritisk verdi å mangle i et slikt analysearbeid. Det faktum at det var foretatt målinger av trebonitet, gjorde at jeg kunne lage en ny bestandsbonitet, som nevnt i kapittel 2.5. Jeg lagde en ny bestandsbonitet ut fra de to herskende trærne som var registrert i hvert bestand. Dette vil bare være en slags tilnærming til virkeligheten, men ble etter min mening den beste tilpasningen.

Under arbeidet med bestandsboniteten ble det avdekket en annen mangel i det innsamlede materialet. Det var foretatt målinger i 0, 25, 50 og 75 % av trehøyden, men ikke i brysthøyde. Dette utgjør en stor svakhet ved materialet, fordi diameter i brysthøyde er ett sentralt mål for mange forstlige betraktninger.

Ved sammenligning av styrkeegenskaper i forskjellige undersøkelser, er det vanlig å sammenligne styrken justert etter en trefuktighet på 12 %. Da jeg valgte å ikke justere styrkeegenskapene i denne undersøkelsen til 12 %, begrenset jeg muligheten for en nøyaktig sammenligning. Det så jeg ikke konsekvensen av før jeg var kommet langt i arbeidet. Jeg mener likevel at trefuktigheten i prøvene var såpass nær den optimale trefuktigheten på 12 % at fuktighetsforskjellen ikke utgjør noen stor feil ved sammenligning med andre, fuktighetsjusterte styrker.

En stor svakhet ved å basere styrkeundersøkelser på små, feilfrie prøver (SKANORM), er at det er vanskelig å ta ut prøver nærmest margen. I de fleste tilfeller er det kvist i prøvestaven nærmest margen, noe som medfører at den ikke kan testes. Videre blir materialet mangelfullt ved analyse av variasjon i styrkeegenskaper innad i treet. Jeg hadde håpet å kunne avdekke svekkede styrkeegenskaper grunnet ungdomsved i området nærmest margen. Mangelen på prøver med posisjon innerst mot margen er trolig en medvirkende årsak til at det ikke ble avdekket signifikante forskjeller i styrkeegenskapene mellom flere av prøveplassene mellom marg og kambium.

4.1 Basisdensitet

Basisdensiteten er tilnærmet normalfordelt (Figur 3), og gjennomsnittet av de 132 registrerte trærne var på 364 kg/m^3 . Det har ikke vært vanlig å bruke basisdensitet som densitetsmål i tidligere undersøkelser av styrke basert på små, feilfrie prøver. Både Nagoda (1985) og Ishengoma & Nagoda (1987) bruker gjennomgående densitet ved 12 % trefuktighet, ρ_{12} , i sine undersøkelser. Okstad (1987) beskriver derimot små, feilfrie prøver av sitkagran fra Vestlandet ved hjelp av en gjennomsnittlig basisdensitet på 325 kg/m^3 . Høibø & Eikenes (1991) undersøkte et trelastmateriale fra kulturskog av gran plantet i store forband. Gjennomsnittlig basisdensitet for trelasten ble funnet å være 326 kg/m^3 . Heje & Nygaard (2000) oppgir i Norsk skoghåndbok at gjennomsnittlig basisdensitet for gran er 380 kg/m^3 .

En variansanalyse (Figur 4) viser at trær fra høydesone H1 har en signifikant lavere basisdensitet enn i høydesone H2 og H3. Det er trolig mange mulige forklaringer til denne sammenhengen. Den mest nærliggende forklaringen bør være de klimatiske forskjellene i de ulike høydesonene. Det er allment kjent at store høyder med tilhørende hardt klima gir seg uttrykk i lavere boniteter, lavere veksthastighet, tidligere vekstavslutning og følgelig mindre årringbredde. Tabell 5 viser at gjennomsnittsboniteten er avtagende med høyere høydesone også i denne undersøkelsen. Sammenhengen med økende basisdensitet ved større høyde over havet ville trolig blitt forsterket hvis det i tillegg hadde vært hentet inn materiale fra ennå større høyder.

Årringbredden gav i en enkel lineær regresjon en forklaringsgrad for basisdensiteten på 37 %. Basisdensiteten avtok ved en økende årringbredde. Det stemmer godt overens med tidligere

undersøkelser av blant annet Hakkila (1966) og Madsen *et al.* (1978). Pape (1999) fant tilsvarende sammenheng ved undersøkelse av tynningseffekten på høyproduktive arealer.

Kovariansanalysen som presenteres i Figur 6 er framstilt ved å benytte både høydesone og årringbredde som forklaringsvariable. Forklaringsgraden til kovariansanalysen ble 40 %.

Signifikanssannsynligheten og F-verdien til de to forklaringsvariablene

(Tabell 6) viser at det er årringbredden som er av størst betydning for modellen. Det mest interessante er likevel hvordan høydesonens betydning for basisdensiteten endrer karakter. I en enkel lineær regresjonsanalyse hvor det ikke ble tatt hensyn til årringbredden (Figur 4), hadde basisdensiteten vært signifikant lavere i høydesone H1 enn i høydesone H2 og H3. I kovariansanalysen i Figur 6 ble høydesonen korrigert for årringbredden. Det viste seg da at ved en lik årringbredde ville trærne i høydesone H1 ha en høyere basisdensitet enn trærne i høydesone H2. Det er med andre ord lett å trekke raske og feilaktige slutninger ved å fokusere på bare én forklaringsvariabel, når virkeligheten består av et komplekst samspill av dem.

Den nye bestandsboniteten kunne forklare 30 % av variasjonen i basisdensiteten (Figur 8).

Den lineære sammenhengen tilsa at basisdensiteten avtok med en økende bestandsbonitet. En økende bestandsbonitet forårsaker samtidig en økende årringbredde. Man opplever som nevnt et samspill av forklaringsvariabler som virker inn på hverandre. Noe av samspillet lot seg avdekke i en multipl regressjon, med både den nye bestandsboniteten og årringbredden som forklaringsvariable. Den nye bestandsboniteten korrigeres da for årringbredden. Det framkom at årringbredden viste klar signifikans, mens den nye bestandsboniteten mistet sin signifikans.

Innad i treet øker basisdensiteten vertikalt med økende prøvehøyde (Figur 9). Prøvehøyden har en signifikant betydning for variasjonen i basisdensiteten. Videre påviste Tukey-Kramer-analysen at prøvene fra prøvehøyde IV har en signifikant høyere basisdensitet enn i prøvehøyde I og II. Prøvenes horisontale plasseringen mellom marg og kambium hadde ingen signifikant betydning for basisdensiteten. Det er tidligere funnet en markert stigning i basisdensitet både ved økende prøvehøyde og fra marg mot kambium (Kučera 1994 ifølge Tronstad (1996)).

4.2 E-modul

E-modulen viste seg i Figur 10 å være tilnærmet normalfordelt, med en liten hale mot høyre. Gjennomsnittlig E-modul på de 121 registrerte trærne var 13700 N/mm². Til sammenligning fant Ishengoma & Nagoda (1987) en gjennomsnittlig E-modul på 10,2 GPa (10200 N/mm²) på sitkagran fra Norge. Langsethagen (2001) hadde en gjennomsnittlig E-modul på 13,9 GPa (13900 N/mm²) på sitt trelastmateriale.

Variansanalyser av E-modulen basert på henholdsvis høydesonen og dominansen (Figur 11) viste begge klare tendenser til at E-modulen øker mot høyere høydelag, og øker mot undertrykte trær. Jeg vil understreke at det er snakk om tendenser som ikke er signifikante på et 5 % signifikansnivå. For begge tilfellene kunne det være en mulig forklaring at årringbredden virket inn.

En enkel lineær regresjon med årringbredden som forklaringsvariabel, gav en forklaringsgrad til variasjonen i E-modulen på 12 %. E-modulen avtok med en økende årringbredde. Den lave forklaringsgraden avkrefte antagelsen om at årringbredden hadde betydelig innvirkning på E-modulen.

Resultatene fra basisdensiteten hadde vist tilsvarende tendens for dominansen (Figur 7) og sågar signifikant sammenheng med høydesonen (Figur 4), som jeg nå gjenkjente for E-modulen. Derfor lagde jeg en multippel lineær regresjon hvor både årringbredde og basisdensitet inngikk som forklaringsvariable. Det viste seg at årringbredden da fikk sin signifikanssannsynlighet drastisk redusert ($p > F = 0,34$), og jeg forkastet den som forklaringsvariabel i modellen.

Basisdensiteten framstod imidlertid som en god forklaringsvariabel for E-modulen, noe som lot seg bekrefte i en enkel lineær regresjon (Figur 13), hvor forklaringsgraden var 23 %. E-modulen steg med en økende basisdensitet. Ved enkel lineær regresjon fant Okstad (1987) i sin undersøkelse av norsk sitkagranvirke at 27 % variasjonen i E-modul lot seg forklare av densiteten.

Innad i treet var det som kjent tatt ut prøver både vertikalt og horisontalt. Den førstnevnte, vertikale plasseringen hadde en signifikant betydning for variasjonen i E-modulen. Tukey-Kramer-analysen i variansanalysen (Figur 14) påviste en signifikant lavere E-modul i prøve høyde I enn i prøve høyde II og III. Virket ved rotavskjær er med andre ord lettere deformerbart enn virket fra 25 og 50 % av tre høyden.

Den sistnevnte, horisontale plasseringen hadde i variansanalysen signifikant betydning for E-modulen. Tukey-Kramer-analysen viste at prøvene på plass nummer seks fra margen hadde signifikant lavere E-modul enn prøvene på plass nummer tre. Variansanalysen viste at E-modulen hadde en tendens til å være avtagende fra margen mot kambiet. Det er tidligere funnet at E-modulen for små prøver (10*10 mm) økte sterkt fra marg mot kambium (Wormuth 1993 ifølge Tronstad (1996)).

4.3 Bøyefasthet

Bøyefastheten til de 119 registrerte trærne var tilnærmet normalfordelt, med en noe høyreforskjøvet topp (Figur 16). Gjennomsnitt for målingene var på 76,9 MPa. Den gjennomsnittlige bøyefastheten til sitkagran på Vestlandet (Okstad 1987) var 67,5 MPa. Ishengoma & Nagoda (1987) fant en gjennomsnittlig bøyefasthet på 68,5 MPa på sitt norske materiale av sitkagran. Sammenligningene er på forskjellige treslag og tildels i ulike landsdeler, men er alle foretatt på små, feilfrie prøver. På små, feilfrie prøver fra plantet gran i Nord-Norge hadde det enkelte tre en gjennomsnittlig bøyefasthet på 62,7 MPa (Okstad & Kårstad 1985 ifølge Okstad (1987)).

En variansanalyse av dominansens innvirkning på bøyefastheten (Figur 17) viser at de herskende trærne har en signifikant lavere bøyefasthet enn de medherskende og undertrykte trærne. Denne sammenhengen har trolig sitt opphav i den avtagende tendensen basisdensiteten viste mot mer dominerende trær.

Basisdensiteten viste seg å kunne forklare hele 51 % av variasjonen i bøyefastheten. Basisdensiteten hadde dermed en betydelig bedre forklaringsgrad for bøyefastheten enn for E-modulen. Okstad (1987) fant også en sterk sammenheng mellom bøyefastheten og densiteten.

Han fant ved hjelp av en annengrads regresjonsberegning, at hele 74 % av totalvariasjonen i bøyefastheten kunne forklares av densiteten.

Både årringbredden og den nye bestandsboniteten viste signifikante sammenhenger med bøyefastheten, men forklaringsgradene var lave. Årringbredden forklarte 15 % av variasjonen i bøyefastheten, og den nye basisdensiteten forklarte 5 %. Som forklaringsvariable for bøyefastheten var de med andre ord ikke spesielt gode.

Sammenhengen mellom E-modulen og bøyefastheten er kjent for å være sterk. Det er den også for dette materialet, hvor E-modulen alene forklarer hele 58 % av bøyefasthetens variasjon (Figur 20). En ytterligere forbedring av forklaringsgraden oppnådde jeg ved å utføre en multippel regresjonsanalyse, med både E-modulen og basisdensiteten som forklaringsvariable (Figur 21). Forklaringsgraden til denne modellen ble hele 72 %.

Prøvenes vertikale plassering hadde en signifikant betydning for bøyefastheten (Figur 22). Tukey-Kramer-analysen viste en signifikant lavere bøyefasthet i prøve høyde I enn i prøve høyde II og III. Bøyefastheten steg altså mot en større tre høyde.

Prøvenes horisontale plassering mellom marg og kambium hadde også en signifikant betydning for bøyefastheten (Figur 23). I Tukey-Kramer-analysen hadde prøvene på plass nummer seks fra margin signifikant lavere bøyefasthet enn prøvene på plass nummer tre og fire. Variansanalysen viste en tendens til at bøyefastheten avtar fra marg mot kambium.

5 Konklusjon

- i. Bakgrunns materialet var preget av mangelfulle registreringer av bestandsboniteten. Jeg konstruerte derfor en ny variabel, som fikk benevnningen ny bestandsbonitet. Den nye forklaringsvariabelen gav en forklaringsgrad på 30 % for basisdensiteten. Den nye bestandsboniteten hadde ikke signifikant betydning ($p > F = 0,089$) for E-modulen. For bøyefastheten var sammenhengen med den nye bestandsboniteten signifikant, men forklaringsgraden var bare 5 %.
- ii. Basisdensiteten viste en tendens til å avta med økende dominans. Tendensen var ikke signifikant ($p > F = 0,083$). E-modulen viste også en tendens til å være avtagende med økende dominans, men denne sammenhengen var heller ikke signifikant ($p > F = 0,063$). For bøyefastheten var sammenhengen med dominansen derimot signifikant ($p > F = 0,014$). Gruppen av herskende trær viste seg å ha en signifikant lavere bøyefasthet enn de to gruppene med medherskende og undertrykte trær.
- iii. Bestandenes høyde over havet lot seg best beskrive gjennom hvilken høydesone de tilhørte. Basisdensiteten viste en signifikant sammenheng med høydesonen ($p > F = 0,012$). Trærne i høydesone H1 hadde en signifikant lavere basisdensitet enn i høydesone H2 og H3. E-modulen viste en tendens til å øke med høyere høydesone, men sammenhengen var ikke signifikant ($p > F = 0,105$). Høydesonen hadde heller ingen signifikant betydning for bøyefasthetens variasjon ($p > F = 0,384$).
- iv. Den vertikale plasseringen i treet hadde signifikant betydning for basisdensiteten ($p > F = 0,001$). Basisdensiteten i prøvehøyde IV var signifikant høyere enn i prøvehøyde I og II. Den horisontale plasseringen i treet hadde derimot ingen signifikant betydning for basisdensiteten ($p > F = 0,395$).

Den vertikale plasseringen i treet hadde signifikant betydning for E-modulen ($p > F = 0,0001$). E-modulen i prøvehøyde I var signifikant lavere enn i prøvehøyde II og III. Den horisontale plasseringen hadde også signifikant betydning for E-modulen ($p > F = 0,024$). Prøvene på plass nummer seks fra margin hadde en

signifikant lavere E-modul enn prøvene på plass nummer tre. Tendensen var at E-modulen avtok fra marg mot kambium.

Den vertikale plasseringen i treet hadde signifikant betydning for bøyefastheten ($p > F = 0,002$). Det var en signifikant lavere bøyefasthet i prøvehøyde I enn i prøvehøyde II og III. Bøyefastheten stiger altså mot en høyere prøvehøyde. Den horisontale plasseringen mellom marg og kambium hadde også signifikant betydning for bøyefastheten. Prøvene på plass nummer seks fra margen hadde en signifikant lavere bøyefasthet enn prøvene på plass nummer tre og fire. Tendensen var at bøyefastheten avtok fra marg mot kambium.

6 Litteratur

BRAMMING, J. 2002. Egenskaper i fremtidig råstoff - *Aktuelt fra SSFF-prosjektet*. Artikkel i Treteknisk Informasjon, nr. 3-2002, s. 33-34.

<http://www.treteknisk.no/ssff/prosjekt/publikasjoner/33-34.pdf> [14.03.05]

BRAMMING, J. 2004. SSFF – Wood properties testing. Beskrivelse til tysk student mars 2004. Upublisert. 10 s.

EIKENES, B. 1991. Egenskaper hos gran (*Picea abies* (L.) Karst) fra Vestlandet målt på trelast i hele dimensjoner. NLH, Institutt for skogfag, Ås 78 s.

HAKKILA, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 61(5), 98 s.

HEJE, K.K. & NYGAARD, J. 2000. Norsk skoghåndbok. Landbruksforlaget. 312 s.

HØIBØ, O. A. 1991. Sammenhengen mellom objektivt målbare egenskaper på skurlast og planteavstand hos gran (*Picea abies* (L.) Karst). Doctor Scientiarium Thesis 1991:13. NLH, Institutt for skogfag, Ås. 27 s.

HØIBØ, O. A. & EIKENES, B. 1991. Egenskaper hos granvirke (*Picea abies* (L.) Karst) plantet med stort forband. Del av Doctor Scientiarium Thesis 1991:13. NLH, Institutt for skogfag, Ås. 33 s.

ISHENGOMA, R. C. & NAGODA, L. 1987. Strength properties of small clear wood specimens of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Carr.). *Meddelelser fra Norsk institutt for skogforskning* 40(6): 31 s.

KOLLMANN, F. & CÔTÉ, W. 1968. Principles of Wood Science and Technology, Volume 1. Springer-Verlag, Berlin. 592 s.

KUČERA, B. 1989. Anatomiske og fysiske egenskaper hos granvirke (*Picea abies* L. Karst.) fra Spikkestad. Del fra Aktuelt fra Norsk institutt for skogforskning; nr. 1. 80 s.

KUČERA, B. 1992. Skandinaviske normer for testing av små feilfrie prøver av heltre. Skogforsk. 104 s.

LACKNER, R. & FOSLIE, M. 1988. Gran fra Vestlandet : styrke og sortering (Spruce from Western Norway : strength, stiffness and grading). Meddelelser fra Norsk Treteknisk Institutt; 74. 50 s.

LANGSETHAGEN, K. 2001. Modellering av styrkeegenskaper til trelast fra ensaldret skog av gran (*Picea abies* (L.) Karst.). Hovedfagsoppgave. Institutt for skogfag. 60 s.

LINDSTRØM, H. 1997. Fibre length tracheid diameter, and late wood percentage in Norway spruce: development from pith outwards. Wood and Fiber Science 29 (1): s. 21-34.

LØVÅS, G. G. 1999. Statistikk - for universiteter og høyskoler. Universitetsforlaget. 406 s.

MADSEN, T. L., MOLTESEN, P. & OLESEN P. O. 1978. The influence of thinning degree on basic density, production of dry matter, branch thickness and number of branches of Norway Spruce. Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark. 36(2), s. 181-204.

NAGODA, L. 1985. Styrkeegenskaper hos gran (*Picea abies* (L.) Karst.) fra Nord-Norge målt på trelast i hele dimensjoner. (Strength properties of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from Northern Norway tested in timber in structural sizes). Meddelelser fra Norsk institutt for skogforskning, 38(17): 31 s.

NIJOS. u.å. Historisk spørring. http://skog.nijos.no/historisk_sporring.php [03.05.05]

OKSTAD, T. 1987. Mekaniske egenskaper hos små feilfrie prøver av sitkagranvirke (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). (The mechanical properties of small clear specimens of Sitka spruce wood (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.)). Meddelelser fra Norsk institutt for skogforskning, 40(5): 33 s.

PAPE, R. 1999. Influence of thinning and tree diameter class on the development of basic density and annual ring width in *Picea abies*. Scandinavian Journal of Forest Research 14(1): s. 27-37

SANDLAND, K. M. & EIKENES, B. 1996. Virkesegenskaper hos sitkagran fra Vestlandet. (Wood properties of Sitka spruce from Western Norway). Rapport fra Skogforsk 5/96: 33 s.

SAS INSTITUTE. 2000. JMP[®] Introductory Guide, Version 4. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 159 s.

STØTVIG, S. & ØYEN, B-H. u.å. Kalkulator for bonitering og produksjonsevne.
<http://www.skogforsk.no/feltforsok/prodweb/bonKalk.cfm> [01.05.05]

TASKJELLE, O. 1997. Kva som gir grana styrke og om auga kan skilje den sterke frå den veike. Norsk treteknisk institutt. 26 s.

TRONSTAD, S. 1996. Øket sideborduttak. Kvalitet, utbyttepotensial, produksjonsmetoder og videreforedling. Forprosjekt. Norsk treteknisk institutt. Rapport 32. 44 s.

VADLA, K. 2002. Plan for innsamling av materialet til egenskapsundersøkelser i SSFF – prosjektet. Upublisert. 11 s.

VESTØL, G. I. 1998. Single-tree Models of Knot Properties in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Doctor Scientiarum theses, Agricultural University of Norway. 1998: 34.

ØYEN, O. 1999. Wood Quality in Old Stands of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). Doctor Scientiarum theses, Agricultural University of Norway. 1999: 15.