



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2023 30 stp

Miljøvitenskap og naturforvaltning, MINA

Bruk av hogstmaskin til å modellere Styrkeklasser

Using a logging Harvester to model
Strength classes

Atle Aasberg Hellumbråten

Master skogfag

Forord

Jeg vil takke mine to veiledere Geir Isak Vestøl (hovedveileder) og Olav Høibø (Tilleggsveileder), for god veiledning og oppfølging. Jeg valgte oppgaven fordi jeg syntes at kvaliteten på tømmeret er noe som ikke har så stort fokus i skogbruket i Norge. Oppgaven har vært vanskelig, men også ganske lærerik og jeg hadde ikke klart det uten så bra veiledning.

Abstract

Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) is the most important commercial tree species in Norway, and structural timber of Norway spruce is among the most important products from Norwegian sawmills. Structural timber has specific requirements when it comes to density, stiffness properties and strength properties, and where modulus of elasticity (MOE) and bending strength are among the most important properties and those that are required to be documented for approving of a strength grading method. Today's sorting system is based on testing of sawn and dried timber. This means that there is limited possibilities to adapt choice of raw materials and sawing pattern to the wood properties when producing structural timber. The properties of Norway spruce can vary a lot, and the variation is related to elevation, site index, age, growth, knot size and geography. If one could have prior knowledge about the properties of the timber before it was cut into lumber, one could theoretically get a higher grade yield and a better utilization of the timber. The aim of this thesis was to study if data from forest harvester can be used to describe density, MOE and bending strength of structural spruce timber beyond what can be described by site-level forest inventory data.

In the thesis I have used data from a project where data was collected from airborne laser, manually measured stand- and tree data and data from a wood harvester in four spruce stands in the Hadeland region. Density, modulus of elasticity and bending strength have been tested, and I have modelled these properties with site-level stand data and data from the harvester. A linear model with relative distance from stump in proportion to the tree height was the basis for all models, and it was found that MOE and bending strength decreased with the distance from the stump, while density increased.

The stand-level variables that explained the most in the models were stand age and elevation. Increasing stand age gave higher values for all properties, and increasing elevation gave lower values for all the properties. When it came to the variables for the harvester, the diameter at breast height (dbh) and the taper of the log were used. Dbh from the harvester was significant in all models and increasing dbh led to lower values for all properties. The tapering of the log was significant for density and MOE, but not for bending strength. Increasing taper led to higher density and lower MOE.

Sammendrag

Gran (*Picea abies* (L.) Karst) er det kommersielt viktigste treslaget i Norge, og konstruksjonsvirke av gran er blant de viktigste produktene fra norske sagbruk.

Konstruksjonsvirke har spesifikke krav til densitet, stivhetsegenskaper og fasthetsegenskaper, hvor henholdsvis E-modul og bøyefasthet er blant de viktigste egenskapene og som kreves dokumentert i forbindelse med godkjenning av styrkesortering. Dagens sorteringsordning baserer seg på testing av ferdig skåret og tørket trelast. Det gjør at man har begrenset mulighet til å tilpasse valg av råstoff og skuruttak til virkesegenskapene når man produserer konstruksjonsvirke. Egenskapene til konstruksjonsvirke av gran kan variere mye, og variasjonen er knyttet til voksestedets høyde over havet, bonitet, alder, tilvekst, kvist og geografi. Hvis man kunne hatt forkunnskaper om tømmerets egenskaper før det ble skåret til trelast, kunne man teoretisk fått bedre sorteringsutbytte og en bedre utnyttelse av tømmeret. Hensikten med oppgaven er å studere om data fra hogstmaskin kan brukes til å beskrive densitet, E-modul og bøyefasthet til konstruksjonsvirke av gran utover det som kan beskrives med geografiske data og skoglige data på bestandsnivå.

I oppgaven er det benyttet data fra et prosjekt hvor det ble samlet inn data fra flybåren laser, manuelt målte bestands- og tredata og data fra hogstmaskin i fire bestander i

Hadelandsregionen. Densitet, E-modul og bøyefasthet til trelasten fra prøvetrærne har blitt testet, og jeg har modellert disse egenskapene med bestandsdata og data fra hogstmaskinen. En lineær modell med relativ avstand fra rotavskjæret i forhold til trehøyden var utgangspunktet for alle modellene, og det ble funnet at E-modulen og bøyefastheten avtok med avstanden fra rotavskjæret, mens densiteten økte.

Bestandsvariablene som forklarte mest i modellene var bestandsalder og høyde over havet. Økende bestandsalder gav høyere verdier for alle egenskapene, og økende høyde over havet ga lavere verdier for alle egenskapene. Når det kom til variablene fra hogstmaskinen, så ble det brukt diameter i brysthøyde (dbh) og stokkens avsmalning. Dbh fra hogstmaskinen var signifikant i alle modellene, og økende dbh førte til lavere verdi for alle egenskapene.

Stokkens avsmalning var signifikant for densitet og E-modul, men ikke for bøyefastheten. Økende avsmalning førte til høyere densitet og lavere E-modul.

Resultatene samsvarte med det som er funnet ut fra før I fischer et al. (2018), men ikke med det Øvrum (2013) fant ut. Modellene gav en begrenset forklaring av variasjon i egenskapene.

Innhold

Forord.....	1
Abstract.....	2
Sammendrag.....	3
Innledning:	5
Materiale og metoder	10
Feltarbeid	10
Lab tester.....	11
Statistiske analyser.	13
Modeller.....	15
Resultater	16
Densitet	16
E-modul	17
Bøyefasthet.....	19
Diskusjon	21
Litteraturliste	26

Innledning:

Gran er det mest utbredte treslaget i Norge og utgjør majoriteten av norsk skog. Av 995 millioner m³ med totalt skogvolum i Norge så utgjør grana 436 millioner m³ av dette i 2021(SSB, u.å.). I 2022 ble det avvirket 8,4 millioner m³ med grantømmer i Norge og av dette var 4821000m³ sagtømmer (SSB, u.å.) Dette gjør gran til det viktigste treslaget økonomiske sett i Norge, og det er det mest tilgjengelige sagtømmeret på markedet.

Skurutbyttet på norske sagbruk ligger på rundt 55%, og det som ikke blir trelast går som regel til flis og biomasseprodukter (Stick, 2022).

Konstruksjonsvirke er trelast som er styrkesortert for å brukes i bærende konstruksjoner (Øvrum, 2012. S.2). Konstruksjonsvirke sorteres i fasthetsklasser med ulike krav til E-modul, Densitet og Bøyefasthet som er definert i Norsk standard NS-EN 338 (Standard-Norge, 2016a).

Gran er som regel godt egnet til konstruksjonsvirke, men kvaliteten kan variere mye (Høibø & Vestøl, 2010. s.1). Kvalitet er et relativt begrep, men for konstruksjonsvirke handler dette om de ulike styrkene til trelasten. Styrken til trelasten blir målt på hvilke egenskaper materialene har i e-modul, bøyefasthet og densitet. E-modul er et mål på stivheten i materialene.

Bøyefasthet er hvor mye materialet tåler før brudd. Densiteten er bare masse per volum, men den er viktig for E-modulen, bøyefastheten og andre egenskaper i trevirke. Målene på disse egenskapene er for å vite hvor mye materialene tåler så de blir brukt riktig i bygg og konstruksjoner. Metoder for testing av densitet og mekaniske egenskaper til trelast er beskrevet i Norsk standard NS-EN 408 (Standard-Norge, 2012).

Krav til styrkesortering er definert Norsk standard NS-EN 14081-1 (Standard-Norge, 2019). Styrkesorteringen på sagbrukene foregår med ikke-destruktiv testing, i form av visuell sortering eller maskinell sortering. Visuell styrkesortering følger Norsk standard NS-INSTA 142 (Standard-Norge, 2009) og innebærer klassifisering av trelasten etter visuelle kriterier, hvor kviststørrelse er viktigst. Maskinell styrkesortering innebærer at man måler en eller flere fysiske egenskaper til trelasten som er korrelert med densitet, e-modul og bøyefasthet. De større sagbrukene i Norge bruker maskinell styrkesortering, med styrkesorteringsmaskiner som er godkjent i henhold til Norsk standard NS-EN14081-2 (Standard-Norge, 2022a). Det finnes også en mulighet for maskinell styrkesortering med produksjonskontroll i henhold til NS-EN14081-3 (Standard-Norge, 2022), men denne metoden er det så vidt jeg vet ikke i bruk på norske sagbruk. De mest vanlige styrkesorteringsmaskinene er basert på å måle resonansfrekvensen og den dynamisk e-modul til trelasten. Dynagrade er en maskin som er

basert på måling av resonansfrekvens og dimensjoner til trelasten, og av dette beregnes en såkalt «indicating property» som er korrelert med densitet, e-modul og bøyefasthet (Fischer et al., 2018. S.4). Precigrader er en annen maskin fra samme produsent, og den registrerer også densitet til trelasten, og kan da regne ut en dynamisk e-modul som «indicating property». Fasthetsklassene som plankene sorteres til i Norge går som regel ifra c14-c30, hvor c30 er den sterkeste klassen (Stick, 2022). C14 som er den laveste klassifiseringen, den har ikke veldig sterke egenskaper og selges noen ganger som «ikke bærende trelast» til bruk i forskalinger og lignende. I tillegg så finnes det T-klasser med egne krav. For å kunne styrke sortere plank på en sag må det prioriteres hvilke fasthetsklasser som er ønsket, siden tømmeret bare kan sorteres en gang i henhold til standard NS-EN 408 (Standard-Norge, 2012). Det å prioritere en høyere fasthetsklasse kan føre til en høyere andel vrak i sorteringen. Vrak er noe man helst vil unngå, siden det er kostbart å skjære plank som man ikke får solgt som konstruksjonsvirke. Derfor prioriterer mange produksjonen på C24 for å mindre vrakandel, spesielt hvis prisdifferansen mellom klassene er liten.

Den dynamiske E-modulen som brukes på sagbrukene for å sortere tømmeret inn i fasthetsklasser, skal forklare egenskapene til virket. De faktiske egenskapene til virke blir beskrevet best av Densitet, e- modul og bøyefasthet som også er de viktigste egenskapene for konstruksjonsvirke (Øvrum, 2012. s. 2). Dette er egenskaper som lar seg best teste i labb under kontrollerte forhold og derfor brukes det dynamisk e modul på sagbruk, siden det lar seg gjøre i praksis. Styrkesorteringen gjennomføres etter at trelasten er skåret og tørket, og da er det begrenset hva man gjøre for å forbedre kvalitetsutbyttet. I praksis vet man svært lite om de ulike egenskapene før trelasten er skåret og styrkesortert. En forhåndssortering kan bidra til høyere utbytte siden man kan prioritere dimensjoner som er ettertraktet som konstruksjonsvirke fra tømmer som egner seg til å konstruksjonsvirke i høyere fasthetsklasser. Har man en forsortering på tømmeret og kan forutsi egenskapene til trelasten det vil gi, så kan man tilpasse produksjonen til egenskapene til tømmeret. Tømmer som kan gi trelast i høyere fasthetsklasser kan bli utnyttet bedre og produksjonen på kvalitet kan styres bedre en i dag. Lengde på stokken er noe som også er viktig for konstruksjonsmaterialer og er viktig for hva de kan brukes til. Lengre planker kan ofte ha flere bruksområder i forhold til dimensjonene i bygg og målene der. Det er lettere også kappe en planke enn å skjøte den. Tømmerlengdene bestemmes ved aptering i skogen, og med en forhåndssortering av tømmer til konstruksjonsvirke i skogen kan man tilpasse lengdene på stökkene som egner seg for å skjære konstruksjonsvirke i høyere fasthetsklasser. Da kan man også levere ønskete lengde på

konstruksjonsvirket. Ved å forhåndssortere det beste tømmeret vil man kunne produsere mer av de høyere fasthetsklassene og få en bedre utnyttelse av det beste tømmeret. Vet man at tømmeret har gode egenskaper så kan man prioritere å produsere trelast høyere fasthetsklasser. Tømmeret som ikke sorteres ut vil kunne sorteres som før uten noen endring i metode.

Mye av variasjonen i egenskapene kan bli forklart av vekstforholdene og enkeltrærnes vekst. Mye av skogens vekstforhold og geografiske data finnes i bestandsdataene og er tilgjengelig for de fleste skogeiendommer. I bestandsdataene finner man informasjon som Geografiske data, bonitet, treslag, alder osv. Bestandsdata brukes i dag som grunnlag for investeringer og tiltak, for å kunne drive skogen godt økonomisk (Norges Skogeierforbund, u.å.).

Geografi er noe som påvirker treets egenskaper og har vist at egenskaper varierer med lokasjon i Norge (Vestøl et al., 2020. S.1) Egenskaper kan også variere fra bestand til bestand og innad i bestandet (Vestøl et al. 2016. S.1).

Økende høyde over havet påvirker som regel vekstforholdene negativt. Økende høyde over havet gir dårligere vekstforhold og påvirker densiteten negativt selv ved liten diametervekst (Granli, 2015. S.42). Økende høyde over havet gir som regel lavere årlig gjennomsnittstemperatur og kortere vekstsesong som påvirker både densitet og diametervekst negativt (Wilhelmsson et al. 2002. S.1). Øverum, (2013. S. 432) fant ut at høyde over havet og treets høyde delt på brysthøydiameter, var viktig for å forklare IP-verdiene fra maskinell styrkesortering med dynagrade. Høyde over havet (HOH) er lett tilgjengelige data og finnes i alle bestandsdata og kart. HOH er noe som varierer en del i Norge og fører til stor variasjon i egenskaper.

Tettheten i bestandet påvirker ikke bare diameterveksten på enkelttrær, men også kvistdannelse. Mye og grov kvist fører til fiberforstyrrelser. Dette reduserer både e-modul og bøyefasthet, men effekten er størst på bøyefasthet. Kvistdannelse er noe som varierer med bonitet og tetthet. Det er stor variasjon mellom enkelttrær i bestand og med høyden i trærne, og det er ingen gode mål på kvisten tilgjengelig i bestandsdataene. Variasjonen i kvist innad i bestandet er korrelert med trærnes relative størrelse i forhold til resten av bestandet (Vestøl & Høibø, 2001. S.135). Dominerende trær vil ofte utvikle grove kvist, mens undertrykte vil ha liten kvist. Variasjonen i fasthetsegenskapene vil også da variere med plankens posisjon i trær siden kvist og diametervekst er varierer med trelastens høyde i treet.

Boniteten i bestanden viser til vekstpotensialet som er viktig for treets og bestandets vekst.

Vi vet fra før av at høyere bonitet påvirker densiteten negativt (Vestøl et al. 2016. S.761). Økende høyde over havet gjør at effekten av boniteten avtar (Vestøl et al. 2016. S.761). De negative effektene av bonitet på densitet er også avhengig av tettheten i bestandet. Lav tetthet vil gi mer diametertilvekst på enkelttrær og høy tetthet gir mindre diametertilvekst på enkelttrær (Granli, 2015. S7). Granli (2015. S.7) fant at økende diametertilvekst påvirker densiteten negativt, og for stor diametertilvekst vil påvirke fasthetsegenskapene negativt. Diametertilveksten forklarer mye av densiteten oss gran, og er en viktig variabel. Granli (2015. S.40) fant ut at økende diametertilvekst gikk ut over densiteten og egenskapene til grana. Større diametertilvekst er positiv for skogeier som selger tømmeret som får betalt etter volum, men det er ikke det beste for egenskapene til tømmeret. Kvalitetsmessig er større diametertilvekst dårlig for egenskapene i til konstruksjonsvirke.

Hogstmaskinene registrer diameter i faste intervaller langs stammen og bruker dette for å optimere aptering og kapping i forhold til kapplister, og for å måle volum på tømmeret. Kapplister er viktig med tanke på betalingen for tømmeret og hva som er etterspurt av kjøper. Dette er data som også kan brukes til å estimere variabler, som kan brukes for å predikere densitet og mekaniske egenskaper til trelast. Diameter i brysthøyde eller andre posisjoner langs stammen er en viktige trevariabler, som kan registreres med hogstmaskin. Kombinert med bestandsdata fra skogbruksplanen kan man forklare egenskaper som blir påvirket av diametertilveksten til treet. Data fra hogstmaskinen kan også brukes til å definere stokkvariabler, som f.eks. avstand fra rotavskjær og avsmaling. Fischer et al.,(2018. S.7) fant ut at dynamisk E-modul avtar med avstanden fra rotavskjæret, så man kan forvente at dette gjelder for bøyefasthet og E-modul. Kvist og kvistdiameter er noe som blir større oppover i treet og vil påvirke både E-modul og bøyefasthet (Vestøl & Høibø. 2001. S.130). Avsmalning kan også regnes ut i hele eller deler av treet og Fischer et al.,(2018. S.7) fant ut av at økende avsmalning påvirker den Dynamiske E-modulen negativt.

For å kunne styrke sortere plank på en sag må det prioriteres hvilke styrkeverdier man vil produsere for å følge gjeldende sorteringskrav i NS-EN 408. Det å prioritere en høyere styrkeverdi kan føre til en høyere vrak andel i sorteringen. Forhåndskunnskaper om tømmerets egenskaper kan gjøre prioriteringer i sorteringen lettere. Hvis man kan bruke allerede eksisterende data til å si noe mer om kvaliteten på tømmeret, så kan man bruke tømmeret bedre.

Det er ingen som sorterer tømmer etter kvalitet ute i skogen i dag, og sorteringen etter kvalitet foregår på sagbrukene. Det har vært metoder for sortering på kvalitet for tømmer som var i bruk før, men det brukes ingen kommersielle metoder for dag i Norge.

En grunn til dette kan være at tømmerkjøper får de kvalitetene som trengs uansett i dagens marked. Får tømmerkjøper sortert tømmeret selv med på sagbruket tilfredsstillende lønnsomhet, så fungere dagens system helt fint.

Konstruksjonsvirke brukes først og fremst av bygg og anleggsbransjen og mye av etterspørselen kommer fra hus og boligbygging. Med endring i etterspørselen fra bygg og anleggsbransjen, så må sagbrukene prøve å dekke denne etterspørselen. Politiske klimamålsettinger allerede begynt å påvirke bygg og anleggsbransjen og kommer mest sannsynlig til å påvirke materialvalg i bygg i tiden fremover (Trefokus, u.å.). Økt bruk av tre i bygg øker etterspørselen av konstruksjonsvirke og prisene følger der etter, som man kunne se i perioden 2019-2021 (Treindustrien, 2021). Bedre sorteringsmetoder på sagtømmer kan bli et nyttig verktøy som fører til bedre utnyttelse av sagtømmeret. Bedre utnyttelse sagtømmer til bygg kan bli viktig økonomisk for sagbrukene og for de politiske klimamålsettingene.

Fischer et. Al (2018) bruker data fra hogstmaskin og flybåren laser til å modellere dynamisk e- modul målt med styrkesorteringsmaskin på sagbruk. Dette er IP-verdien som brukes i maskinell styrkesortering, og kan brukes til å predikere sorteringsutfallet med den aktuelle styrkesorteringsmetoden. For å finne en metode for å forhåndssortere tømmer, uavhengig av styrkesorteringsmetode, må man modellere egenskapene som det er krav til i fasthetsklassene, dvs. densitet, e-modul og bøyefasthet.

Målet med denne studien er å se om tilgjengelige bestands- og maskindata kan brukes til å estimere fasthetsegenskapene til sagtømmer i gran. Jeg kommer til å se på hva som bestandsdataene forklarer av egenskaper og hvilke begrensinger det gir. Så kommer jeg til å se hvor mye mer som forklares av dataene som er tilgjengelige fra hogstmaskinen.

Materiale og metoder

Studien er basert på testing av densitet, E-modul og bøyefasthet til trelasten som ble samlet inn i forbindelse med prosjektet «Sustainable Utilization of Forest Resources in Norway». Jeg har ikke deltatt i feltarbeidet i bestandene eller arbeidet på sagbruket. Beskrivelsene av dette er basert på publikasjoner, notater, og opplysninger fra dem som deltok i arbeidet. Jeg har heller ikke deltatt i testingen av trelasten på lab, men har testet et annet parti etter samme metode og standard. Data fra testingen er kombinert med geografiske data, skog-, tre- og stokkdata fra datasettet bak artikkelen som ble publisert i prosjektet (Fischer et al. 2018).

Datamaterialet til denne studien er hentet ut fra fire bestand sør for Gjøvik i hadelandsregionen (Tabell 1). Området var på forhånd registrert med flybåren laser og med fem punkter pr m² i gjennomsnitt (Fischer et al. 2018. S.3). Bestandene ble valgt ut blant bestand som skulle avvirkes i to ulike høydeler, og det var to gjentak av bestand i hvert høydeler. De to gjentakene skulle i utgangspunktet ha forskjellig bonitet, men det var mindre bonitetsforskjell enn forventet mellom de to bestandene fra det høyeste høydeleret. De var lokalisert i nærheten av hverandre. Bestandene varierte i gjennomsnittlige alder fra 80 til 147 år (Tabell 1) og Heier 1 og Skari hadde stor aldersvariasjon innad i bestandene. Bonitet ble bestemt etter trehøyde og alder i brysthøyde på de tre største trærne i hver bestand. Boniteten varierte fra 12 til 22 m, og bestandet Grettegref som skilte seg ut med klart høyest bonitet (Tabell 1).

Tabell 1 bestandsoversikt.

Bestand	lengdegrad	breddegrad	bonitet	høyde over havet	Gjennomsnittsalder
Grettegref	60.278538	10.466939	22	370	80
Heier1	60.258672	10.536933	13	640	113
Heier2	60.25944	10.534197	13	600	147
Skari	60.457896	10.538272	12	440	125

Feltarbeid

Det ble hentet inn bestandsdata med manuelle mål av bestandene og laserdata fra fly. I hver bestand ble det ble valgt ut et område med 100 prøvetrær som alle fikk målt brysthøydiameter (dbh). Trærne som var over 20cm i brysthøyde ble så delt inn i 5 diameterklasser med likt treantall i hver klasse. Etter dette ble det valgt ut fire tilfeldige trær

fra hver diameterklasse. Det ga 20 prøvetrær fra hver bestand, og totalt 80 prøvetrær. Trær med feil som ikke er godkjent som sagtømmer ble selektert bort, siden de i praksis hadde blitt vraket på sagbruket. De manuelle målene som ble gjort på prøvetrærne var Brysthøydiameter(dbh), barktykkelse, kron høyde, kronevidde mot nord, øst, sør og vest, årringbredde, alder i brysthøyde. Bonitet ble bestemt ut ifra borprøve og høyde på de tre største trærne i bestandet. Årringbredde ble målt på borprøver tatt i brysthøyde. Variabler som er brukt i modellene er definert i Tabell 2, mens øvrige variabler er beskrevet av Fischer et al. (2018).

Bestandene ble avvirket med hogstmaskin, og stammefiler med data for prøvetrærne ble samlet inn. Hogstmaskinen brukt i dette forsøket tar diameter mål hver tiende cm, som gjør at man får hele stokkens volum og form digitalt. Målene er svært presise så lenge maskinen er kalibrert riktig og er derfor et godt egent måleinstrument (Dale, Ø & Nitteberg, M, 1999. S.3) Trærne og stokkene hadde id-merking som gjorde det mulig å følge stokkene fra skog til ferdig plank. Dataene som er hentet inn fra hogstmaskinen består av trenummer, stokknummer, stokklengde, brysthøydiameter (diameter 130cm), diameter ved rotavskjær, diameter hver tiende cm og stokkvolum. Variablene som ble brukt i modellene fra hogstmaskinen var DBH og stokkens avsmalning, definert som differansen mellom stokkens diameter i hver ende delt på lengden. Sagstokkene i ble delt i 4,2 eller 3,6 meter avhengig av stokkens toppdiameter. Stokker som ikke var store nok til å skjæres til 50x200 ble kappet på 3,6m. Testoppsettet i NS-EN 408 krever at plankelengden er minst 19 ganger dimensjonshøyden. Dimensjonene som ble skåret til testene var 100, 150 og 200 mm med 50 mm tykkelse. Plankene ble merket med stokknummer og trenummer som gjør at man vet hvor i treet stokken kom i fra, og LH_rel ble beregnet som stokklengden / 2 for å finne midten av stokken og neste stokk blir da stokklengde 1+ (stokklengde 2 / 2) osv. Da får man midten av planken pluss tidligere stokklengder. Dette ble igjen del på total trehøyde.

Lab tester

De 80 prøvetrærne ga 475 planker som ble styrketest i labb på NMBU. Densitet, bøyefasthet og e-modul ble testet i labb på NMBU Ås i henhold til NS-EN 408. Før testing ble det målt lengde, bredde, høyde, største kvistdiameter, største kvistgruppe og andre feil som gir nedklassing etter NS-INSTA 142 (Norsk-standard, 2009). I tillegg ble det målt vekt og

resonansfrekvens med Brookhuis MTG 960. Målingen av e-modul og bøyefasthet ble testet ved firepunkts nedbøying i henhold til Norsk standard NS-EN 408. (se figur 1).

Deformasjonen ble målt som lokal nedbøying over et område med lengde lik fem ganger dimensjonshøyden midt mellom de to belastningspunktene, og E-modulen blir beregnet som lokal E-modul. Under målingen av E-modul ble lastgrensene satt til henholdsvis 10% og 40% av antatt nedre bruddlast. Nedre bruddlast var estimert til 20 N/mm^2 . Lastgrensen ble satt lik for all trelasten, så E-modulen kunne bli målt i et lineært område. E-modulen blir målt først fordi den ikke er destruktiv og bruker noen instrumenter for å måle nedbøyingen rundt belastningsområdet og blir målt i kN/mm^2 .

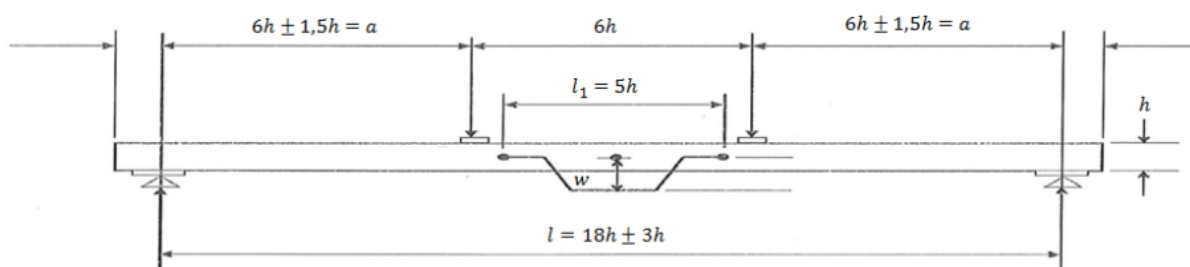


Figure 1. Testoppsett E-modul. kilde (Aanerød, 2014. s.16).

Etter at e-modulen ble målt så ble måleinstrumentene fjernet og prøven ble kjørt til brudd, og bøyefastheten målt i N/mm^2 . Bøyefastheten ble kjørt i samme testoppsett som E-modulen i Figur 1.

Etter at bøyefastheten er målt ble det tatt ut et helt planketverrsnitt med tykkelse ca 5 cm uten kvist eller andre feil så nært bruddet som mulig. Prøven ble så målt for vekt, volum og fuktighet ved testing for å få densiteten. Prøvene ble tørket to døgn i tørkeskap med $103 \text{ }^\circ\text{C}$ og veid på nytt. Fuktighet ble beregnet som forholdet mellom massetapet under tørking og tørr masse.

Formler for egenskapene:

Formelen brukt for E-modul

$$E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$$

Formelen brukt for bøyefasthet.

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$$

Formelen brukt for Densitet

$$\rho_W = \frac{m_W}{V_W}$$

Tegnforklaring formler

a = avstanden mellom last punkt og nærmest støttepunkt i mm.

b = bredden på tverrsnittet I testen I mm.

Em,l = Den lokale MOE, i N/mm²

F2-F1 = en økning av lasten i N på regresjonslinjen med en korrelasjonskoeffisient på 0,99 eller Bedre

h = dybden av tverrsnittet i mm

I = (b*h³)/12

w = deformasjonen I mm

w2-w1 = Økningen av deformasjon i millimeter tilsvarende F2-F1

F = Last i N

fm = Bruddstyrken i N/mm²

ρW = Densiteten på testtidspunktet

mW = Massen på prøven på testtidspunktet

VW = Volumet på prøven

Korreksjoner for fuktighet

Det ble gjort korreksjoner på fuktighet for densitet og E-modul. Korreksjonene for fuktighet og dimensjon er gjort i henhold til NS-EN 384 (Norsk-standard,2016).

Kravet for densitet var et fuktighetsnivå mellom 8%-18% som skulle korrigeres til 12% med følgende formel.

$$\rho = \rho_u(1 - 0,005(u - 12))$$

ρ er densiteten korrigert til 12% fuktighet

u er fuktighetsnivået under testing (%)

Korreksjonen for E-modul ble gjort med følgende formel:

$$E_0 = E_{0,u} (1 + 0,01 (u - 12))$$

E0 Er E-modulen korrigert til 12% fuktighet

u er fuktighetsnivået under testing (%)

Statistiske analyser.

Variablene som ble brukt i modellene var: LH_rel, HOH, AlderBH, DBH og avsmaling se tabell 2.

Modellene ble laget med en random coefficient model. Utgangspunktet for modellen er å beskrive en liner sammenheng med LH_rel. Koeffisientene i modellen (konstantledd og stigningstall) varierer tilfeldig mellom trær, og variasjonen antas å være normalfordelt.

Det ble fjernet ytterlige to trær fra datamaterialer som hadde ganske usannsynlige høydetilvekster, som mest sannsynlig er feilregistrering. Det var et veldig gammelt og et ungt med veldig mye høydetilvekst.

Variablene som ble brukt i analysene og modellene kan ses nedenfor i tabell 2.

Tabell 2 Variabler i analyse:

Variabel Brukt i Modeller	Forkortelse	enhet
Trelastens posisjon i treet med avstanden mellom rotavskjæret og trelastens midpunkt.	LH_rel	
Bestandsalder gjennomsnittlig alder i bestandet	AlderBH	år
Høyde over havet, bestandets høyde over havet	HOH	m
Brysthøydediameter fra Hogstmaskin med bark	DBH	mm
Avsmalning, er avsmalningen på hver enkelt stokk. Differansen mellom diameter topp og bunn delt på stokkens lengde.	Avsmalning	mm/m
Densitet $\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$	Densitet	kg/m ³
Bøyefasthet $f_m = \frac{3Fa}{bh^2}$	MOR	N/mm ²
Lokal -modul $E_{m,l} = \frac{al_1^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)}$	MOE	kN/mm ²

Modeller

Modellene er laget som «random coefficient» modeller i JMP. Utgangspunktet var en lineær modell med LH_rel som forklaringsvariabel, og både konstantleddet og stigningstallet varierte tilfeldig mellom trær. Parametrene og residualene ble antatt å være normalfordelte, og variansene ble estimert. σ^2_a er variansen på interseptet, σ^2_b er variansen på stigningstallet σ^2_e er residualer. Det ble utviklet tre modeller for hver av de tre egenskapene bøyefasthet, E-modul og Densitet.

1. Grunnmodellene har LH_rel som fast effekt og forklarer hvordan trelastens posisjon i treer varierer med avstanden til rotavskjæret. Grunnmodellene er modell 1.0, 2.0 og 3.0

2. Bestandsmodellene er med bestandsvariabler i tillegg til LH_rel. Modellene med kun bestandsvariabler viser hvor mye som kan forklares med bestandsdata, og er sammenligningsgrunnlaget for maskinmodellen. Variablene som er brukt her er allerede tilgjengelige data i en skogbruksplan og er praktisk tilgjengelig. Bestandsvariabel modellene er modell 1.1, 2.1 og 3.1

3. Maskinmodellene er med data fra hugstmaskin i tillegg til LH_rel og bestandsvariabler. Maskinvariablene som ble brukt var DBH og avsmalning i stokken. Maskinmodellene er modell 1.2, 2.2 og 3.2

Resultater

Gjennomsnittlig e-modul, bøyefasthet og densitet til trelasten fra hver bestand er presentert i Tabell 3. Trelasten fra Skari hadde de høyeste verdiene for alle egenskapene. Det var også noe høyere verdier for trelasten fra Heier 2 enn fra Heier1. De to bestandene var fra det høyeste høydelaget, hadde samme bonitet, men Heier2 hadde høyere bestandsalder enn Heier1 (Tabell 1).

Tabell 3. Gjennomsnittlige egenskaper

Bestand	prøverantall	Gjennsnit. MOE	Gjennsnit. MOR	Gjennsnit. Densitet
Grettegref	144	12.48026279	46.92279648	441.1755541
Heier1	104	11.48716503	42.11588005	433.3718782
Heier2	123	12.79472631	50.74056215	450.310565
Skari	89	14.74725683	56.37430138	493.5665331

Densitet

Densitetsmodellene er presentert i Tabell 4. Grunnmodellen (Model 1.0 i Tabell 4) viser signifikant økende densitet med relativ høyde i trærne ($p < 0,0001$). Både konstantleddet ($p < 0,0001$) og stigningstallet ($p = 0,0002$) varierer signifikant mellom trær. Når man tar med både faste og tilfeldige effekter i modellen, er r^2 0,915 og RMSE er $12,7 \text{ kg/m}^3$.

Modell 1.1 (Tabell 4) beskriver parameterne i grunnmodellen med bestandsvariabler som faste effekter. Konstantleddet øker med HOH ($p < 0,0001$) og avtar med bestandsalder, ($p < 0,0001$) mens stigningstallet avtar med HOH ($p = 0,0177$) og øker med bestandsalder ($p = 0,0083$). Økende alder gir høyere densitet og økt HOH gir lavere densitet. Effekten av HOH og bestandsalder er derfor størst i rotstokken og avtar med avstanden fra rotavskjæret. De faste effektene i modellen reduserer variansen med 25,9 % ($r^2 = 0,259$) og RMSE er $37,3 \text{ kg/m}^3$ (Tabell 4). Det er signifikant restvarians mellom trær, både når det gjelder konstantleddet ($p < 0,0001$) og stigningstallet ($p = 0,0005$).

I Modell 1.2 er Modell 1.1 utvidet med variabler som kan registreres med hogstmaskin (Tabell 4). Konstantleddet avtar med DBH ($p < 0,0001$) og det øker med stokkavsmaling ($p < 0,0001$), mens stigningstallet øker med DBH ($p = 0,0051$). Økende DBH gir lavere densitet mens økt avsmalning gir en høyere densitet. Effekten av DBH er størst i rotstokken og avtar med avstanden til rotavskjær. Alle bestandsvariablene fra Modell 1.1 er fortsatt signifikante (Tabell 4). De faste effektene i modellen reduserer variansen med 35,8 % ($r^2 = 0,358$) og RMSE er $35,2 \text{ kg/m}^3$ (Tabell 4). Det er signifikant restvarians mellom trær, både når det gjelder konstantleddet ($p < 0,0001$) og stigningstallet ($p = 0,0003$).

Tabell 4. Densitetsmodeller.

Variabler	Model 1.0	Model 1.1	Mod 1.2
σ^2_a	2376.5	1550.4	1205.4
σ^2_b	3640.2	3087.7	2889.5
σ^2_c	207.9	208.1	192.7
p-verdi, σ^2_a	<.0001	<.0001	<.0001
p-verdi, σ^2_b	0.0002	0.0005	0.0003
Oppsummeringsstatistikk fra modelltrinn, inkludert bare faste effekter			
R2	-	0.259	0.358
RMSE	-	37.3	35.2
Oppsummeringsstatistikk fra modelltrinn, inkludert tilfeldige og faste effekter			
R2	0.915	0.915	0.922
RMSE	12.7	12.7	12.2
p-verdier for de faste effektene I modellen			
LH_rel	<.0001	<.0001	<.0001
HOH		<.0001	<.0001
AlderBH		<.0001	<.0001
AlderBH X LH_rel		0.0083	0.0168
HOH X LH_rel		0.0177	0.0266
DBH			<.0001
Avsmalning			<.0001
DBH X LH_rel			0.0051

Parameter Estimerer for faste effekter:

Model 1.0: 437.49481 +75.410178LH_rel

Model 1.1: 419.78201 +77.362962LH_rel -0.296046HOH + 1.4537903AlderBH -1.296046 SITE_AGE X LH_rel + 0.2550221 HOH X LH_rel

Model 1.2: 521.08534 +97.343038LH_rel -0.282033HOH +1.3003667AlderBH+ 0.5267718 Avsmalning l -0.32771DBH +0.4136593 DBH X LH_rel -1.162834 AlderBH X LH_rel +0.2382339HOH X LH_rel

E-modul

Modellene for E-modul er presentert i Tabell 5. Modell 2.0 er grunnmodellen og viser en signifikant økende E-modul med relativ høyde i trærne (p=0,0463). Konstantleddet varierer signifikant mellom trær (p<0,0001), mens stigningstallet ikke varierer signifikant(p=0,0771) mellom trær. Når man tar med både faste og tilfeldige effekter i modellen, er r² 0,732 og RMSE er 1,33 kN/mm².

Modell 2.1 (Tabell 5) beskriver parameterne i grunnmodellen med bestandsvariabler som faste effekter. Konstantleddet øker med HOH (p<0,0001) og avtar med bestandsalder

($p < 0,0001$). Økende HOH havet gir lavere E-modul, og økende alder gir høyere E-modul. De faste effektene i modellen reduserer variansen med 19 % ($r^2 = 0,197$) og RMSE er 1,97 kN/mm² (Tabell 5). Det er signifikant restvarians mellom trær på konstantleddet ($p < 0,0001$), men ikke på stigningstallet ($p = 0,0795$).

I Modell 2.2 er Modell 2.1 utvidet med variabler som kan registreres med hogstmaskin (Tabell 5). Konstantleddet avtar med DBH ($p < 0,0089$) og det øker med stokkavsmalning ($p < 0,0445$). Økende DBH gir lavere E-modul, og også økt avsmalning gir en lavere E-modul. Alle bestandsvariablene fra Modell 1.1 er signifikante (Tabell 5). De faste effektene i modellen reduserer variansen med 27,4 % ($r^2 = 0,274$) og RMSE er 1,9 kN/mm² (Tabell 5). Det er signifikant restvarians mellom trær når det gjelder konstantleddet ($p < 0,0002$), men ikke når det gjelder stigningstallet ($p = 0,0767$).

Tabell 5. Modeller for E-modul (MOE).

Variabler	Model 2.0	Model 2.1	Model 2.2
σ_a^2	5.1	3.2	2.5
σ_b^2	6.5	6.1	6.4
σ_e^2	1.6	1.6	1.6
p-verdi, σ_a^2	<.0001	<.0001	0.0002
p-verdi, σ_b^2	0.0771	0.0795	0.0767
Oppsummeringsstatistikk fra modelltrinn, inkludert bare faste effekter			
R2	-0.0008104	0.19017284	0.27408095
RMSE	2.197282	1.973373	1.886394
Oppsummeringsstatistikk fra modelltrinn, inkludert tilfeldige og faste effekter			
R2	0.73187081	0.72969475	0.73362621
RMSE	1.133069	1.138663	1.135454
p-verdier for de faste effektene I modellen			
LH_rel	0.0463	0.0667	0.0231
HOH		<.0001	<.0001
AlderBH		<.0001	<.0001
DBH			0.0089
Avsmalning			0.0445

Parameter Estimer for faste effekter:

Model 2.0: 13.304896 -1.077836LH_rel

Model 2.1: 13.8181274 -0.974795LH_rel -0.012579HOH +0.0507878AlderBH

Model 2.2: 16.926496 -1.419956LH_rel -0.01137HOH +0.0452298AlderBH - 0.018715Avsmalning -0.008547DBH

Bøyefasthet

Bøyefasthetsmodellene presentert i Tabell 6. Modell 3.0 er grunnmodellen og viser minkende densitet med økende relativ høyde i trærne, men effekten er ikke signifikant ($p < 0,3327$). Både konstantleddet ($p < 0,0001$) og stigningstallet ($p = 0,0365$) varierer signifikant mellom trær. Når man tar med både faste og tilfeldige effekter i modellen, er r^2 0,663 og RMSE er 7,95 N/mm². Modell 3.1 (Tabell 6) beskriver parameterne i grunnmodellen med bestandsvariabler som faste effekter. Konstantleddet øker med HOH ($p < 0,0001$) og avtar med bestandsalder ($p < 0,0001$). Økende HOH havet gir lavere bøyefasthet og økende alder gir høyere bøyefasthet. De faste effektene i modellen reduserer variansen med 17,2 % ($r^2 = 0,172$) og RMSE er 10 N/mm² (Tabell 6). Det er signifikant restvarians mellom trær når det gjelder både konstantleddet ($p < 0,0005$) og stigningstallet ($p = 0,0381$).

I Modell 3.2 er Modell 3.1 utvidet med variabler som kan registreres med hogstmaskin (Tabell 6). Konstantleddet avtar med DBH ($p < 0,0001$). Økende DBH gir lavere bøyefasthet. Alle bestandsvariablene fra Modell 3.1 er signifikante (Tabell 6) med unntak av LH_rel. De faste effektene i modellen reduserer variansen med 33,1 % ($r^2 = 0,331$) og RMSE er 9,0 N/mm² (Tabell 6). Det er signifikant restvarians mellom trær når det gjelder både konstantleddet ($p = 0,002$) og stigningstallet ($p = 0,0283$).

Tabell 6. Bøyefasthetsmodeller (MOR).

Variabler	Model 3.0	Model 3.1	Model 3.2
σ_a^2	121.7	69.3	46.9
σ_b^2	171.9	174.7	193.47
σ_e^2	49.7	49.5	49.3
p-verdi, σ_a^2	<.0001	0.0005	0.002
p-verdi, σ_b^2	0.0365	0.0381	0.0283
Oppsummeringsstatistikk fra modelltrinn, inkludert bare faste effekter			
R2	-	0.17150433	0.33069333
RMSE	-	9.996726	9.029818
Oppsummeringsstatistikk fra modelltrinn, inkludert tilfeldige og faste effekter			
R2	0.66256025	0.66230954	0.66161811
RMSE	7.949227	6.360444	6.4268104

p-verdier for de faste effektene I modellen			
LH_rel	0.3327	0.5028	0.6023
HOH		<.0001	<.0001
AlderBH		<.0001	<.0001
DBH			<.0001

Parameter Estimer for faste effekter :

Model 3.0: 50.656017 -2.239193LH_rel

Model 3.1: 48.029826 -1.90502LH_rel -0.059684HOH +0.2834566AlderBH

Model 3.2: 73.636059 -1.504972LH_rel -0.050728HOH +0.2298871 AlderBH -
0,076652DBH

Diskusjon

Bestandene hadde begrenset geografisk spredning som gjør at det ble begrenset hvilke variabler som kunne brukes. Breddegrad har vist seg å påvirke densiteten til gran negativt i Vestøl et al. (2016. S.761), men bestandene i datasettet som jeg har brukt har for liten spredning til at de variablene kan påvirke noe betydelig. Breddegrad ble testet mot densiteten og var signifikant, økte forklaringen og senket variansen, men dette er mest sannsynlig en utvalgseffekt på grunn av de få bestandene med liten spredning. Hadde datasettet hatt større geografisk spredning så kunne det vært med på å kunne utvikla en bedre modell som også tar høyde for effekter av lengde og breddegrad. Modellen har derfor et begrenset bruksområde og kan ikke brukes uten videre for andre steder som er geografisk forskjellig fra forsøksområdet. Modellen vil ikke nødvendigvis kunne forklare variasjonen i egenskapene som blir påvirket av forskjeller i lengde og breddegrad.

Bestandsalderen varierte en god del mellom bestandene og innad i bestandene (Tabell 1). Det yngste bestandet hadde en bestandsalder på 89 med og den eldste bestandet hadde bestandsalder på 147år med en god del variasjon i alder i de fleste av bestandene. Et viktig spørsmål er om det kan påvirke resultatet med tanke på at vanlig avvirkingsalder og hogstmoden alder er mye lavere enn dette i praksis. Modellene viste at økt alder gir høyere bøyefasthet, e-modul og densitet. Modellen skal ta høyde for alder som variabel, men det er ukjent om effekten av alder er lineær i aldersspennet som er i datasettet. Hvis effekten av alder lineær i hogstmoden skog, kan modellene forklare egenskaper utover det som finnes i datamaterialet. Modellene gir vanlig vis sikrest estimat nær gjennomsnittet av datasettet som i dette tilfellet er en god del over normal økonomisk hogstalder som er avhengig av bonitet. 3 av 4 bestand var relativt gamle og med lav bonitet, så modellene vil kanskje ikke være like godt egnet for skog som er yngre.

De gjennomsnittlige egenskapene i datasettet var ganske likt det som er funnet i andre studier av gran i Norge hvis man ser (Vestøl et al., 2016. S.761).

Bestanden hadde lit liten variasjon i bonitet som man kan se i tabell 1. Ideelt hadde det vært bedre med å ha to bestander med betydelig forskjellig bonitet i de to forskjellige høydslagene for å kunne få forklart mer av hva som påvirket egenskapene. Tre av bestandene hadde lav bonitet, mens Grettegref var den eneste med høy bonitet. Bonitet var korrelert med bestandsalder, og under utviklingen av modellene gav bestandsalder bedre presisjon en

bonitet. Derfor ble ikke boniteten brukt i modellene. Boniteten og bestandsalderen kunne ikke brukes samtidig i en modell på grunn av kovarians som «ødelegger» modellen. Bonitet er som kjent korrelert med densitet, men liten bonitetsvariasjon mellom bestandene kan ha påvirket resultatene. Det var mye mer variasjon i bestandsalder, og det kan være grunnen til at det forklarte egenskapene bedre. Bestandsalderen viste seg å være bedre til å forklare egenskapene siden den da mest sannsynlig forklarte litt av diametertilveksten når den ble kombinert med brysthøydiameter.

Bestandsalder kan i noen tilfeller også være mer nøyaktig i skogbruksplaner og bestandsdata. Bonitering er noe som ikke har vært veldig nøyaktig i mange skogbruksplaner (Kvaalen et al., 2015. s.2), så praktisk sett så er bestandsalder en bedre og kanskje mer nøyaktig variabel. Det er ikke alltid at bestandsalder stemmer heller, med den endrer seg ikke på samme som boniteten kan gjøre, f.eks. med endringer i klima (Kvaalen et al., 2015. s.2). Bonitet er brukt i flere modeller for egenskaper, blant annet i Fischer et al.(2018. S.7), hvor boniteten er målt i forbindelse med forsøket. En nøyaktig bonitering i felt vil koste penger i motsetning til ferdige data, som man finner i en skogbruksplan fra før av. Et problem med å bruke bestandsalder er at trær som er eldre og større enn bestanden vil få en høy diametertilvekst i modellene, selv om det ikke har hatt høy diametertilvekst. Et gammelt tre med stor brysthøydiameter vil da mest sannsynlig virke som et tre med stor diametertilvekst siden den individuelle alderen ikke kommer med. Den vanligste metoden for host i dag er flatehogst og de fleste bestandene er mer eller mindre ensaldret, så dette er kanskje ikke et så stort problem, men det begrenser bruksområde til modellene.

Økende avsmalningen på stokken gav uventede resultater siden større avsmalning førte til høyere densitet, men det motsatte på E-modulen. Jeg fant ingen signifikant effekt av avsmalningen på bøyefastheten og det ble da ikke brukt i modellen for bøyefasthet. Øvrum (2013. S.432) fant ut at trehøyde delt på diameter i brysthøyde(H/dbh) var positivt korrelert med dynamisk E-modul. Fischer et al (2018. S.7) fant en negativ effekt av avsmalningen på dynamisk E-modul. Jeg fant at avsmalningen hadde en negativ effekt på E-modulen, som samsvarer med det som Fischer et al (2018. S.7) fant ut. Avsmalning på stokken ser derfor ut til å være en viktig faktor for E-modulen i trelasten. Jeg her brukt avsmalningen fra hver enkelt stokk og ikke enkelte seksjoner som Fischer et al.(2018). Effekten av avsmalningen kan være fra de eldste trærne som hadde liten diametertilvekst til tross for at de har vært dominerende. Avsmalningen påvirket densiteten positivt og effekten var like stor i hele stammen.

Dbh fra manuelle mål ble også prøvd ut i modellene. De manuelle målene var kanskje litt mer nøyaktige, men gav ikke veldig mye mer reduksjon i variansen. Den manuelt målte brysthøydediameteren er kanskje mer nøyaktig siden den bruker gjennomsnittlig dbh på treet, mens hogstmaskinaggregatet ikke får rotert på stokken og tar da en diameter fra en retning. Dette er en begrensning med å bruke hogstmaskinaggregatet som måleinstrument, selv om det er praktisk anvendbart vil de ha en liten unøyaktighet ved måling av dbh selv om nøyaktigheten på utstyret er bra.

Densitetsmodellene hadde mange signifikante variabler i modellen som bidro til reduksjon i variansen i både stigningstallet og konstantleddet. Variablene i modellen oppførte seg som forventet hvor økende bestandsalder ga høyere densitet og økende hoh ga lavere densitet. Effekten av hoh og bestandsalder avtok med avstanden til rotavskjæret, så rotstokken så ut til å bli påvirket mest. Rotstokken er kanskje den viktigste stokken i treet siden den utgjør størst volum og minst kvistdiameter som gjør at de mekaniske egenskapene er gode. Den gjennomsnittlige densiteten var normal, hvis man sammenligner med andre forsøk og bestander i Norge (Vestøl et al., 2016. S.761), men Skari hadde en god del høyere densitet enn de tre andre bestandene se (tabell 3). Med unntak av Grettegref hadde bestandene relativt høy alder og relativt lav bonitet. Densiteten var ganske gjennomsnittlig i Grettegref, men med mye lavere gjennomsnittsalder og mye høyere bonitet enn de tre andre bestandene. Den relativt høye alderen for de andre betyr også at bestandene har hatt liten diametervekst i flere år siden tilveksten avtar med alderen. Maskinvariabelmodellen ga litt bedre resultater enn bestandsvariabelmodellen (Tabell 4). Økende avsmalningen på stokken var noe som gav høyere densitet, som igjen vil påvirke E-modulen og bøyefastheten.

Modellene for E-modul

Modellene for E-modul hadde en god del signifikante variabler, men de bidro kun med reduksjon i variansen for konstantleddet. Variablene i modellen oppfører seg som forventet, økning i Hoh gav lavere E-modul og økning i alder gav høyere E-modul. LH_rel var ikke signifikant i bestandsvariabelmodellen, men den oppførte seg likt som i grunnmodellen og maskinvariabelmodellen. Større avstand fra rotavskjæret ga lavere E-modul. Dette er de motsatte av variasjonen i densitet som økte med avstanden fra rotavskjæret. Kvistdiameter øker oppover i stammen (Vestøl & Høibø, 2001. S.130) og er mest sannsynlig det som

motvirker effekten av den økende densiteten. Dette kan man også se (Høibø et al. 2013. S.131) hvor E-modulen avtar med høyden i treet noe av det samme.

Både brysthøydiameteren og avsmalning var signifikante og økte forklaringen litt. E-modul modellene fikk ikke veldig mye mer forklaring av maskinvariabelmodellen. E-modulen er den egenskapen som ligner mest på dynamisk E-modul som er den som brukes i praksis på mange sagbruk. Maskinmodellen for E-modul økte forklaringen litt sammenlignet med bestandsmodellene se (tabell 5.) og den viser at variablene påvirker det samme oss både E-modul og dynamisk E-modul, hvis man sammenligner med Fischer et al.(2018. S.7). Øvrum (2013. S432) fant det motsatte effekten av avsmalning, men hadde andre bestander.

Modellene for bøyefasthet hadde litt begrenset med variabler ettersom det bare var noen få som var signifikante. LH_rel var ikke signifikant i noen av modellene, men trenden var at bøyefastheten avtok med avstanden fra rotavskjæret. Bøyefasthetsmodellene oppfører seg litt som modellene for E-modul, men med færre signifikante variabler.

Både Hoh og bestandsalderen oppførte seg som forventet. Økt høyde over havet gav lavere bøyefasthet og økt bestandsalder ga høyere bøyefasthet.

Bøyefastheten blir påvirket kraftigere og av flere ting enn densitet og e-modul blir påvirket av. Fiberhelling, kvistsetting og kviststørrelse kan gå utover bøyefastheten. (Vestøl et al. (2012. S.85) viser at kvistdiameter har en større effekt på bøyefastheten enn på E-modulen. Høibø et al. (2013. S.131) viser at bøyefasthet også kan variere med trelastens høyde i treet som da igjen blir påvirket av boniteten. Jeg fant som nevnt tidligere ikke en signifikant effekt av trelastens avstand fra rotavskjæret på bøyefastheten, selv om bøyefastheten avtok med avstanden fra rotavskjæret. Det er litt rart siden bøyefastheten egentlig skal avta, med økende kvistdiameter. Av dataene som ble brukt i modellen var det ingen som direkte gir noe forklaring av kvist i bestandene. Brysthøydiameter en av de bedre variablene til å forklare bøyefastheten (Høibø et al. (2013. S.131).

Dbh var den eneste maskinvariabelen som jeg fant var signifikant og bidro til en reduksjon i variansen. Brysthøydiameteren sammen med alderen kan forklare diameterveksten, som blir påvirket av tettheten og vekstforholdene i bestandet. Vekstforholdene og tettheten i bestandet påvirker igjen kvistsettingen (Vetsøl & Høibø, 2001. S.). Kvist skaper fiberforstyrrelser i veden og økende kvistdiameter er negativt korrelert med bøyefasthet (Vetsøl & Høibø, 2001. S.). Brysthøydiameteren klarer å forklare en god del mer av bøyefastheten enn det den klarte for densitet og E-modul. De fleste bestandene hadde

gjennomsnittsverdier for bøyefasthet som var ganske nær det som er funnet fra før (Vestøl et al., 2016. S.761), med unntak av Skari som hadde høyere bøyefasthet se (tabell 3).

Maskinvariabelene var med på å øke forklaringen for alle egenskapene, men forklaringen var begrenset. Maskinvariabelene kan være med på å forklare egenskapene i tømmeret og er relativt tidsbesparende sammenlignet med manuelle mål av tømmeret. Det er som nevnt tidligere ikke helt ideelle forhold når det kom til variasjon i bonitet og geografi, som begrenser modellene litt. Modellene bruker også kun eksisterende data i skogbruket og viser hva som kan gjøres med nåværende teknologi, som kan bygges videre på med andre datakilder.

Litteraturliste

Aanerød, Runa S. (2014). Modeling Density and Mechanical Properties in Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) by Forest Inventory Data. [Masteroppgave]. Norges miljø-og biovitenskapelige universitet.

Carolin Fischer, Olav A. Høibø, Geir I. Vestøl, Marius Hauglin, Endre H. Hansen & Terje Gobakken (2018): Predicting dynamic modulus of elasticity of Norway spruce structural timber by forest inventory, airborne laser scanning and harvester-derived data, *Scandinavian Journal of Forest Research*, DOI: 10.1080/02827581.2018.1427790

Dale, Ø. & Nitteberg, M. (1999). Målenøyaktighet for diameter og lengderegistreringene på hogstmaskiner. (Rapport fra Skogforsk 4/99). Norsk institutt for skogforskning. Hentet fra: <https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/2560248/Skogforsk-Rapport1999-04.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Granli, Andreas S.(2015). Effekter av årringbredde, bonitet og klima på egenskaper til konstruksjonsvirke av gran (*Picea abies* (L.) Karst.) fra Sør-Norge.[Masteroppgave]. Norges miljø-og biovitenskapelige universitet.

Høibø, Olav & Vestøl, Geir. I. (2010). Modelling the variation in modulus of elasticity and modulus of rupture of Scots Pine round timber. *Can. J. For Res.* 40: 668-678. doi:10.1139/X10-021

Høibø, Olav. Vestøl, Geir I. Fischer, Carolin. Fjeld, Ludvig and Øvrum, Audun. (2013). Bending properties and strength grading of Norway spruce: variation within and between stands. *Can. J. For. Res.* 44: 128–135 (2013) dx.doi.org/10.1139/cjfr-2013-0187.

Høibø, Olav & Vestøl, Geir. I. (2010). Modelling the variation in modulus of elasticity and modulus of rupture of Scots Pine round timber. *Can. J. For Res.* 40: 668-678. doi:10.1139/X10-021

Kvaalen, Harald. Solberg, Svein & May, Johannes. (2015). Aldersuavhengig bonitering med laserskanning av enkelttrær. (VOL.: 1, NR.: 67). NIBIO.<https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/2375817/NIBIO%20RAPPORT%201%2867%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Norges Skogeierforbund. (u.å.). Skogbruksplan. Hentet 18.april 2023. skog.no <https://skog.no/skogfaglig/skogbruksplan/>

Standard-Norge. (2009). Nordiske regler for visuell styrkesortering av trelast [Nordic visual strength grading rules for timber]. Norsk Standard NS-INSTA 142:2009

Standard-Norge. (2012). Trekonstruksjoner Konstruksjonstre og limtre Bestemmelse av noen fysiske og mekaniske egenskaper [Timber structures Structural timber and glued laminated timber Determination of some physical and mechanical properties]. Norsk standard NS-EN 408:2010+A1:2012

Standard-Norge. (2016a). Konstruksjonstrevirke fasthetsklasser [Structural timber strength classes]. Norsk standard NS-EN 338.

Standard-Norge. (2016.) Konstruksjonstrevirke — Bestemmelse av karakteristiske verdier for mekaniske egenskaper og densitet. [Structural timber — Determination of characteristic values of mechanical properties and density]. Norsk standard NS-EN 384:2016.

Standard-Norge. (2019). Trekonstruksjoner - Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt - Del 1: Generelle krav [Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements]. Norsk standard NS-EN 14081-1:2016+A1:2019

Standard-Norge. (2022a). Trekonstruksjoner Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt Del 2: Maskinell sortering; Tilleggskrav for typeprøving [Timber structures Strength graded structural timber with rectangular cross section Part 2: Machine grading; additional requirements for type testing]. Norsk standard NS-EN 14081-2:2018+A1

Standard-Norge. (2022). Trekonstruksjoner Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt Del 3: Maskinell sortering; tilleggskrav for produsentens produksjonskontroll [Timber structures Strength graded structural timber with rectangular cross section Part 3: Machine grading; additional requirements for factory production control]. Norsk standard NS-EN 14081-3:2022.

Statistisk Sentralbyrå (SSB). (u.å). Fakta om skogbruk. Hentet 12.april 2023. ssb.no.
<https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/faktaside/skogbruk>

Stick, Marius W. (2022, 7. april). Trelastproduksjon: saging, tørking og justering. ndla.no.
<https://ndla.no/nb/subject:169ba831-b3cd-4207-b9b8-7d06bf03328b/topic:f60b7e1a-4410-467b-8390-0e9e4ce28e72/topic:310cef6e-da1c-4871-b912-d703bc1c8786/resource:0391e85e-58e2-4388-8d0f-34b86123aaee>

Treindustrien. (2021, 21. oktober). Nyttig å vite om trelastpriser. Trelast.no.
<https://trelast.no/aktuelt/nyttig-a-vite-om-trelastpriser>

Trefokus. (u.å.) Regjeringens ekspertutvalg anbefaler økt bruk av tre. Hentet 13.april 2023.
Trefokus.no.
<http://www.trefokus.no/aktuelt/regjeringens-ekspertutvalg-anbefaler-okt-bruk-av-tre>

Vestøl, Geir I. Høibø, Olav. (2001). Prediction of knot diameter in *Picea abies* (L.) Karst. Holz als Roh- und Werkstoff. 59:129-136. <https://doi.org/10.1007/s001070050484>

Vestøl GI, Høibø O, Langsethagen KG, Skaug E, Skyrud REA. 2012. Variability of density and bending properties of *Picea abies* structural timber. Wood Material Science and Engineering. 7:76-86. <https://doi.org/10.1080/17480272.2012.662698>

Vestøl, Geir I. Fischer, Carolin & Høibø, Olav (2020) Simulation of structural timber properties based on geographical data and stand-level forest inventory data, Scandinavian Journal of Forest Research, 35:5-6, 286-295, DOI: 10.1080/02827581.2020.1799067

Vestøl GI, Fischer C, Høibø O, Øvrum A. (2016). Between- and within-site variation of density and bending properties of *Picea abies* structural timber from Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 31:758-765. <https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1174733>

Wilhelmsson, Lars. Arlinger, John. Spångberg, Kalle. Lundqvist, Sven-Olof. Grahn, Thomas. Hedenberg, Örjan & Olsson, Lars. (2002). Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17:4, 330-350, DOI: 10.1080/02827580260138080

Øvrum, Audun. (2013). In-forest assessment of timber stiffness in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) *Eur. J. Wood Prod.* 71:429–435. DOI 10.1007/s00107-013-0694-3.

Øvrum, Audun, Vestøl, Geir I. & Høibø, Olav A. (2008). Modeling the longitudinal variation of sawn timber grades in Norway spruce (*Picea abies*(L.) Karst.) *Holz Roh Werkst.* 66: 219–227. DOI 10.1007/s00107-008-0237-5

Øvrum, Audun. (2012). Konstruksjonsvirke. (Fokus på tre nr.43). Norsk treteknisk institutt. <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/43-Konstruksjonsvirke.pdf>



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway