

BESTEMMELSE AV KVISTEGENSKAPER HOS GRAN VED HJELP AV DATA FRA FLYBÅREN LASERSKANNING

DETERMINATION OF KNOT PROPERTIES OF NORWAY SPRUCE USING DATA FROM AIRBORNE LASER SCANNING

VEGARD LIEN

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR NATURFORVALTNING
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2007



Forord

Som sønn av en møbelsnekker har jeg fra tidlig alder fått høre mye om trevirke og dets egenskaper til forskjellige produkter. Gjennom skogfagutdannelsen ved Universitetet for miljø- og biovitenskap har jeg gjennom flere treteknologikurs fått innblikk i metoder for å måle egenskapene trevirket har. Skogsbiometrikurs har gitt innblikk i hvordan ikke bare ett enkelt tre, men hele skogsområder kan måles. Hvor mange kubikkmeter tømmer, hvilke treslag og så videre. Nye metoder har det også blitt introdusert i kursene, -spesielt flybårne laserskannere. Dette gir muligheter for å måle store områder effektivt, og ikke minst med stor nøyaktighet. Ved å forsøke å kople disse, i realiteten, to forskjellige fagfelt sammen, har jeg den troen, at bedre kunnskap om resurssene ute i skogene vil føre til bedre ressursutnyttelse og større verdiskapning.

Jeg vil takke mine to veiledere, Erik Næsset og Olav Høibø, begge ansatte ved Institutt for naturforvaltning, Universitetet for miljø- og biovitenskap for den hjelpen jeg har fått med oppgaven. Samt at de har hjulpet meg med finansieringen av forsøksmaterialet.

Terje Gobakken, John Gunnar Dokk, Fredrik Böhler og Andreas Brunner, også alle disse fra Institutt for Naturforvaltning, fortjener også en takk for all hjelp og støtte de har stilt opp med. Samt til slutt en takk til skogeierne Ole Jørgen Kolstad og Erik Glende i Aurskog-Høland, for at jeg fikk benytte deres skogteiger til intensive målinger og uttak av trær i forskningens tjeneste.

Vegard Lien

Ås 15. august 2007

Sammendrag

Målet for denne oppgaven har vært å undersøke om data innsamlet fra flybåren laser skanning (ALS) kan benyttes for å estimere forskjellige variabler knyttet til kvistegenskaper på enkelttrenivå hos gran. Tre hovedmodeller ble utviklet for å beskrive

- Maksimal kvistdiameter ved en gitt en høyde i treet.
- Sannsynligheten for at en kvist er tørr i overflaten av stammen, gitt høyde og kvistdiameter.
- Gjennomsnittlig friskkvistlengde inne i stammen

Samtlige av modellene ble utviklet for kun å behøve variabler avledet av ALS-målinger.

Enkelte delmodeller måtte først utvikles for å kunne finne noen av de nødvendige variablene i de tre hovedmodellene. Datagrunnlaget for disse modellene var materiale samlet inn fra to granbestand i Aurskog-Høland kommune. Enkelte av målingene som ble foretatt på forsøksmaterialet ble gjort ute i skogen, mens andre målinger ble utført inne på laboratoriet. Test av hovedmodellene ble foretatt opp mot det innsamlede materialet for å kunne gi estimer på feilnivåene til modellene. Testene viste at modeller for kvistegenskaper, der parameterne i modellene er avledet fra ALS-målinger, kan gi like gode resultater som klassiske modeller,

Summary

The aim of this work was to assess if data collected from an airborne laser scanner (ALS) can be used to predict various variables describing knot properties of Norway spruce at tree-level. Three main models were developed for prediction purposes:

- Maximum knot diameter at a defined height along the tree
- Probability of a knot being loose at the stem surface, given tree height and knot diameter
- Mean sound knot length inside the stem

All the developed models were estimated so that they only relied on variables derived from ALS measurements. Partial models had to be created to describe some of the necessary explanatory variables of the three main models. The models were created using data collected in two spruce stands in the municipality of Aurskog-Høland, southeast Norway. Some of the measurements were performed in the forest, while others were conducted in the laboratory. Tests of the main models were carried out upon collected measurements to derive estimates describing error levels of the models. The testing revealed that models utilizing ALS-derived variables may give results with error levels comparable to those of as classic models based on intensive field measurements.

Innholdsfortegnelse

1 Innledning.....	1
2 Material og metode.....	4
2.1 Felldata.....	4
2.1.1 Områdeutplukking.....	4
2.1.2 Totalklaving og posisjonering.....	4
2.1.2 Totalklaving og posisjonering.....	5
2.1.3 Utvelging og måling av prøvetrær	6
2.1.4 Hogst og oppmåling av felte trær.....	6
2.2 Treteknologiske undersøkelser.....	8
2.3 ALS-data	9
2.3.1 Generell informasjon om flybåren laser skanner (ALS).....	9
2.3.2 Beskrivelse av ALS-matereialet.....	9
2.3.3 ALS høydemålinger	10
2.4 Enkelttresegmentering av ALS-data	10
2.5 Friskkvistdiameterprofil, største kvister.....	10
2.6 Levende eller døde greiner / kvister	12
2.7 Friskkvistlengde	14
2.8 Generelle modeller	15
2.8.1 Kvistdiameter inne i stammen i forhold til greindiameter ved stammeoverflaten..	15
2.8.2 Greindiameter ved stammeoverflaten	16
2.8.3 Forskjell mellom sann trehøyde og målt laserhøyde.....	16
2.8.4 Kroneutstrekning basert på lasermålinger	16
2.8.5 Korrigering av kronemodellen for de største kvistene	18
2.8.6 Greinvinkel.....	19
3 Resultater.....	20
3.1 Kroneselementering av ALS-data	20
3.2 Generelle modeller	20
3.2.1 Kvistdiameter inne i stammen i forhold til greindiameter ved stammeoverflaten..	20
3.2.2 Greindiameter ved stammeoverflaten	21
3.2.3 Forskjell mellom sann trehøyde og målt laserhøyde.....	22
3.2.3 Forskjell mellom sann trehøyde og målt laserhøyde.....	23
3.2.4 Korrigering av kronemodellen for de største kvistene	23
3.2.5 Greinvinkel.....	25
3.3 Friskkvistdiameterprofil, største kvister.....	25
3.3 Friskkvistdiameterprofil, største kvister.....	26
3.4 Levende eller døde greiner / kvister	29
3.4 Friskkvistlengde	32
4 Diskusjon.....	34
4.1 Material og datainnsamling.....	34
4.2 ALS-data og enkelttresegmentering.....	34
4.3 Friskkvistdiameterprofil, største kvister.....	35
4.4 Levende eller døde greiner / kvister	36
4.5 Friskkvistlengde	37
4.6 Konklusjon	38
5 Referanseliste	40

1 Innledning

Produksjon av trevirke for trelast og masseindustrien er i dag den vanligste bruksmåten for økonomisk utbytte av en skogeiendom. Verdien av skog er ikke bare avhengig av mengden tømmer målt i kubikkmeter, men også forskjellige egenskaper hos trevirket. Trevirket skal videreforedles til produkter slik som konstruksjonsvirke, papir, møbler, panel og så videre. Innenfor hvert av disse produktene stilles det krav til egenskapene hos trevirket. For eksempel skal konstruksjonsvirket være så sterkt som mulig, mens paneler og listverk først og fremst skal ha estetiske kvaliteter. Jo bedre egnet råstoffet er til et bestemt bruksområde, desto mer er de som videreforedler råstoffet villige til å betale. Mange av egenskapene er gitt ved treslaget. Skal det lages impregnerte terrassebord brukes furu. Skal imidlertid trevirket brukes til papir foretrekker en vanligvis gran i Norge. Det er også stor variasjon i egenskapene innen de forskjellige treslagene. Densiteten varierer. Det gjør også fiberegenskapene og kjernevedandelen. De ulike egenskapene har betydning for hva virket kan brukes til. En ting som i stor grad påvirker mange bruksområder er kvistene i trevirket. Hvor store de er, om de er tørre eller friske og hvor i treet de befinner seg. Skal trevirket brukes til konstruksjonsvirke er det i de visuelle sorteringsreglene gitt at mange og store kvister gir materialer med lavere styrke, enn trevirke inneholdende få og små kvister (Standard Norge, 1997). For de som produserer panel er ikke trevirkets styrke det viktigste. Der betyr de estetiske kvalitetene mest. Kvistfrie produkter får produsentene av panel best betalt for. Jo mer kvist det er, desto lavere verdi får produktet. Når det gjelder døde kvister, er sorteringsreglene for panel enda strengere (Föreningen Svenska Sågverksmän, 1994). Dette har blant annet å gjøre med faren for at tørre kvister faller ut under høvling og gir panel med hull.

Dagens skogbrukstakster inneholder liten eller ingen informasjon knyttet til kvistegenskapene hos trevirket. Det man i hovedsak kan si noe om er tømmer volum fordelt på de forskjellige treslagene. Enkelte takster inneholder riktig nok treantall pr. hektar, og de første takstene med diameterfordeling begynner å komme (Prevista AS, 2007). Fortsatt er samtlige av tallene og størrelsene gitt i takstene gjennomsnittsverdier for områder i skogen, altså bestand. I fremtiden er det grunn til å tro at denne inndelingen i bestand i enkelte tilfeller kan bli mindre aktuelt og at man i stedet ser på hvert enkelt tre som et objekt med sine størrelser og egenskaper. Det er da her kvistegenskapene for hvert enkelt tre som vil kunne komme inn i bildet. Vet skogeieren hvilke egenskaper råstoffet har før hogsten skjer, er det også mulig at

enkelte kjøpere er villige til å betale mer for råstoffet hvis det fører til en økt ressursutnyttelse hos dem.

I denne oppgaven er det fokusert på kvistegenskapene hos gran. I dag er gran det viktigste treslaget for industrien i Norge (Statistisk Sentralbyrå, 2007), og dette er årsaken til at dette treslaget er undersøkt. En annen årsak er at en del av den tidligere utviklede metodikken som er benyttet i oppgaven, er utviklet for grandominerte bestand

Det er gjort mange arbeider på kvistegenskaper hos gran (Moberg, Høibø m. fl.) Her er det ofte benyttet bestandsegenskaper til å beskrive kvistegenskapene. Aktuelle bestandsegenskaper kan være tetthet og alder. Men også bestandshistorikken, for eksempel tynninger (Pape, 1999), har vært anvendt for å gi økt kunnskap om kvistegenskapene. Det som er nytt er at flybåren laserskanning, ALS (Airborne Laser Scanning), har kommet inn som et verktøy i skogbruksplanleggingen. ALS er en metode for å effektivt gjøre en hel masse høydemålinger over et område. Disse målingene kan brukes til å avlede både bestandsmessige og enkelttremessige variabler. Mye arbeid har blitt gjort for å estimere bestandsvolum (Næsset, 2004), men også andre bestandsvariabler slik som for eksempel grunnflatefordelingen har blitt estimert ut fra ALS-dataene (Gobakken & Næsset, 2005). Innenfor praktisk skogbruksplanlegging har flybåren laserskanning vært i operativ bruk noen år allerede. De ALS-målingene som er benyttet i denne oppgaven, har et relativt høyere antall målinger pr. kvadratmeter enn det som normalt blir benyttet i operativ skogbruksplanlegging. Dette oppnås med lavere flyhøyde og smalere flystriper, men også høyere kostnader. Teknologisk utvikling kan føre til reduserte kostnader, og dermed bedre informasjon for samme kostnad.

Formålet med denne oppgaven er å undersøke om tre forskjellige kvistegenskaper hos enkelttrær av gran kan avledes fra ALS-data. Spesielt er det undersøkt:

1. Hvordan diameteren til de største friske kvistene varierer med høyden i treet, gitt enkelttrespesifikke variabler avledet fra ALS-data.
2. Sannsynligheten for at ei grein er levende eller død ved en gitt høyde i treet basert på variabler avledet fra ALS-data.
3. Friskkvistlengden inne i stammen basert på variabler avledet fra ALS-data.

For å utvikle modeller for disse tre kvistegenskapene ble forskjellige delmodeller benyttet for å forklare nødvendige variabler i hovedmodellene. Delmodellene ble utviklet på grunnlag av data samlet inn i skogen og ved laboratoriemålinger. Det ble også benyttet eksisterende modeller for å finne enkelttrespesifikke variabler som var nødvendige i de tre hovedmodellene.

2 Material og metode

2.1 Felldata

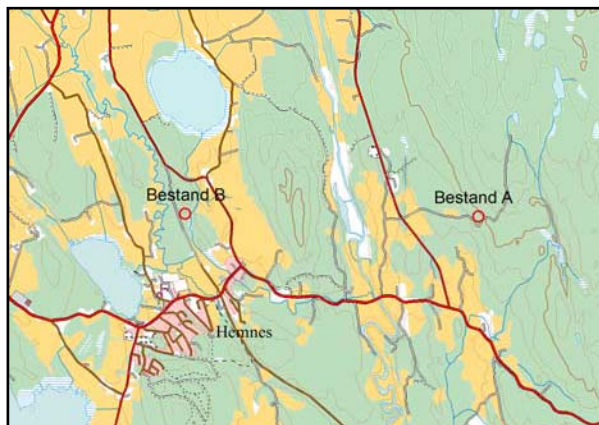
2.1.1 Områdeutplukking.

Forsøksdataene ble fordelt på to bestand i nærheten av Hemnes, sør i Aurskog-Høland kommune, Akershus fylke, se figur 1 og 2. Bestandene er i oppgaven benevnt som bestand A og B. I hvert bestand ble det lagt ut tre sirkulære prøveflater, hver med en diameter på 25,25 m, altså med en horisontal grunnflate på 2000 m². De to bestandene skiller seg primært ved at bestand A er av middels god bonitet, mens bestand B er av høy bonitet. I begge bestand skulle hovedtreslaget være gran. Med skogbruksleder Peter Beavan hos Havass BA sin hjelp ble aktuelle grunneiere kontaktet, og et besøk og en avtale om registreringer, og senere uttak av trær ble avtalt.

Premissene for utvelgingen av de tre prøveflatene på de to forskjellige stedene var at de skulle ligge innenfor samme bestand, at ALS-data var innsamlet over hele prøveflatens areal, samt at det ikke skulle være noen overlapp mellom prøveflatene. Ved å benytte et datasett fra Prevista AS over bestandsinndelingene i kommunen og en datafil som beskrev ytterpunktene til ALS-målingene, ble posisjonene flatene grovt tegnet inn i ArcMap 9.1. Senterposisjonene til flatene ble notert, og ble senere funnet igjen ute i bestandet ved hjelp av en håndholdt GPS-mottager (Garmin GPS12). Flatenes senterpunkt ble merket med et aluminiumspyd for at man også senere skal kunne finne senterpunktet, samt for et tydelig og robust senterpunkt for oppmålingsarbeidet.



Figur 1, Oversiktskart, Aurskog-Høland merket med rødt kryss



Figur 2, Deltaljkart, Bestand A og B er merket med rød sirkel

2.1.2 Totalklaving og posisjonering

I hver av de totalt seks prøveflatene ble senterpunktet målt inn mer nøyaktig ved hjelp av en Topcon Legacy-E GPS-mottager med den tilhørende antennen Topcon PG-A1. Logget data ble differensielt etterprosessert ved hjelp av programmet Pinnacle v. 1.0, også dette levert av Topcon, mot data innsamlet samtidig med tilsvarende utstyr ved en allerede kjent referanseposisjon mellom 1,3 og 3,5 km fra lokalitetene. Nøyaktigheten til de aktuelle flatesentrene er gjengitt i tabell 1. Koordinatsystemet som ble benyttet var UTM sone 32N, med WGS84 som datum.

<i>Flate</i>	<i>Posisjon Nord</i>	<i>Posisjon Øst</i>	<i>Høyde, Ellepsoidisk</i>	<i>Feil Nord, std.av, m.</i>	<i>Feil Øst, std.av, m.</i>	<i>Feil Høyde, std.av, m.</i>
A1	6623744.034	641143.152	222.208	0.002	0.001	0.002
A2	6623700.815	641184.571	227.940	0.001	0.000	0.001
A3	6623757.307	641227.318	239.331	0.227	0.311	0.310
B1	6623716.396	638191.042	173.047	0.001	0.001	0.002
B2	6623790.488	638159.572	175.852	0.003	0.002	0.006
B3	6623770.486	638211.489	177.142	0.008	0.012	0.016

Tabell 1, Prøveflateposisjoner

En totalstasjon av merket Sokkia SET5F ble benyttet sammen med et håndholdt 360 graders prisme for å finne vinkel og avstand til samtlige trær på hver av prøveflatene. Prismet ble holdt i brysthøyde foran treet, samt at treets brysthøydiameter også ble målt ved hjelp av en klave, med klavearmen pekende mot flatesenter. Treslaget ble registrert i klassene "Gran", "Furu" og "Lauv", samt merknader slik som om treet var dødt eller om det lente seg kraftig til en side. Vinklene ble i etterkant korrigert mot de allerede kjente posisjonene av de omliggende prøveflatene, slik at alle vinkelmålingene ble i forhold til koordinatsystemets nord. Senere ble de målte polare koordinatene konvertert til det kartesianske koordinatsystemet som UTM er, altså en X og en Y koordinat. Her ble også prismets avstand fra ytterkanten av treet til tenkt senter av treet lagt til. Dette er den halve diameter på treet pluss prismets radius, som var på 40 mm.

2.1.3 Utvelging og måling av prøvetrær

Innenfor hver enkelt prøveflate og hvert treslag ble trærne delt inn i fem diameterklasser. Klassene var 20 % persentilene av brysthøydediameterne. Innenfor hver av klassene ble det tilfeldig plukket ut tre grantrær. Det ble også tatt ut ei furu og ett løvtre i hver av de fem diameterklassene. For å kunne beregne konkurransesituasjonen for prøvetrærne må man imidlertid også vite noe om trær som befinner seg i nærheten, og da også utenfor prøveflatene. Derfor ble det satt som krav at prøvetrærne maksimalt skulle stå 20 m fra flatesenteret, men fortsatt med samtlige av prøveflatas trær som grunnlag for klasseinndelingen. Enkelte av flatene hadde få furu- og/eller lauvtrær, så kravet om maksimalt 20 m fra flatesenter ble ikke benyttet ved prøvetreutvelgelsen av furu og lauv.

De målingene som ble gjort på prøvetrærne er som følger:

- Totalhøyde.
- Høyde til første synlige døde grein.
- Høyde til første levende grein.
- Høyde til første krans der man har to levende greiner i samme greinkrans.
- Høyde til 180° krone, altså minst tre levende greiner pekende i minst 180° av horisontalplanet.
- Høyde til 360° krone, altså minst fire levende greiner pekende i 360° av horisontalplanet.
- Maksimal kroneutstrekning i de fire himmelretningene, nord, øst, sør og vest.

Til høydemålingene ble et hypsometer av typen Vertex III benyttet. Ved målingen av kroneutstrekningen ble himmelretningene tatt ut ved hjelp av et kompass, mens målebånd ble benyttet for å finne avstand i horisontalplanet fra treets senter til den maksimale utstrekningen av krona. Den maksimale utstrekningen av krona og dens loddlinje ble anslått subjektivt.

2.1.4 Hogst og oppmåling av felte trær

Av de totalt 15 utvalgte prøvetrærne av gran på hver flate, ble det i hver diameterklasse plukket ut ett tre for felling og videre målinger. Totalt ble det felt 30 trær fordelt på de seks

prøveflatene. Utvelgelsen av trærne ble gjort tilfeldig. Før treet ble felt ble treet tydelig merket i brysthøyde, altså ved 1,3 meter over midlere bakkenivå. Himmelretningene nord, øst, sør og vest ble avmerket på stammen. Det ble foretatt nye og mer detaljerte målinger av kroneutstrekning. Denne gangen ble det foretatt målinger i åtte himmelretninger målt ut med kompass. I stedet for maksimal utstrekning ble nå den faktiske utstrekningen til krona ved aktuell himmelretning målt. En Suunto vinkelmåler ble benyttet for å se til at målingene ble gjort nøyaktig under grenenes utstrekning.

Det aktuelle treet ble så felt, og et målebånd ble lagt langs stammen, slik at målebåndet sammenfalt med den avmerkede brysthøyden. For hver meter oppover treet ble det gjort målinger på to greiner pr. meter. Vilårene for utvelging av aktuelle greiner var at de skulle være levende, at de skulle være mulige å måle med hensyn på at de ikke skulle ligge klemte ned under treet eller til bakken på et annet vis. Av de greiene som da var aktuelle ble de to gråvste målt, altså de to med størst diameter ved stammen. Følgende registreringer ble gjort:

- Greinas høyde over bakken.
- Greinas diameter, målt 5 cm fra stammeoverflaten, samt i en vinkel på 45° på treet's lengde for å jevne ut eventuell ovalitet på greina.
- Avstand fra stamme til greinsspiss, målt direkte fra stamme til spiss.
- Vinkel fra oversiden av stammen ned til greina, altså den himmelretningen greina hadde.
- Vinkel fra stammeoverflate til greinsspiss.
- Vinkel på de første 10 cm av greina.
- Antall greiner/kvister i aktuell greinkrans.
- Ti siste skuddlengdene på greina.
- De 5-6 innerste centimeterne av greina ble sagnet av og tatt vare på, samt merket nøye for eventuelt senere årringtelling.
- Diameter og retning på eventuelle andre greiner og kvister i aktuell krans ble målt, samt registrert om disse var levende eller døde.

På det felte treet ble det også foruten kvistmålingene gjort følgende:

- 10 siste toppskuddlengdene ble målt.

- Stammen ble merket på oversiden langs hele treets lengde. Dermed vil rett himmelretning kunne bli funnet på greinene, samt at i etterkant kommer merkingen til nytte når stammeskiver tas ut og granskes nærmere inne på treteknisk laboratorium.
- Vinkelen mellom nordretningen og den langsgående merkingen ble målt.
- Treet ble til slutt kvistet og merket for hver andre meter oppover stammen, samt delt opp i letthåndterlige 3 meters lengder for utkjøring og transport til laboratoriet ved INA.

2.2 Treteknologiske undersøkelser

Hos de totalt 30 trærne ble det tatt stammeskiver inneholdende kvistkranser ved 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80 og 90 prosent av treets høyde. Det ble gjort enkelte tilpassninger for å få med noen av de kvistkransene som var målt i skogen. I tillegg til disse prosentvise høydene ble det også tatt ut en stammeskive ved 180° kronegrense, samt kvistkransen over og under denne grensen. Også en stammeskive ved den første kransen inneholdende to levende greiner ble tatt med. Stammeskivene ble godt merket med flatenummer og trenummer, samt ved hvilken høyde de var tatt ut. Deretter ble et utvalg på 10 av de 30 trærne tatt ut ved å tilfeldig trekke ett tre innenfor hver av de fem diameterklassene fra bestand A og B. Altså totalt fem trær fra bestand A og fem trær fra bestand B. På disse 10 trærne ble følgende måleinstruks fulgt:

Den langsgående merkingen som var gjort langs stammen, ble nå korrigert slik at sann nordretning på stammeskivene kunne bli funnet. I stammeskiven ble alle kvistene lokalisert, og gitt ett unikt nummer, og tilslutt merket med en strek fra margen og ut til kambiet over kvisten. Den radielle avstanden fra margen til kambiet ble målt, samt kvistens vinkel i horisontalplanet, altså himmelretningen til kvisten. Videre ble stammeskiven delt opp langs de påtegnede strekene. Deretter kunne ulike kvistegenskaper måles.

Følgende ble målt:

- Avstand fra marg til grensen mellom overvokst og tørr kvist.
- Avstand fra kambiet til grensen mellom tørr og frisk kvist.
- Antall år fra kambiet til grensen mellom overvokst/tørr kvist.
- Antall år fra kambiet til grensen mellom tørr/frisk kvist.

- Kvistdiameteren, målt vinkelrett på kvisten, enten i overgangen mellom tørr til frisk kvist eller helt ute ved kambiet / stammeoverflaten hvis kvisten var levende helt ut.

Målemetodene er beskrevet av Maguire & Hann (1987).

Årringmålinger ble foretatt for hvert tre på en stammeskive som ble tatt ut 1,3 m over bakken. Årringmålemaskin av typen ”ADDO, årringmålemaskin, type2” ble benyttet sammen med tilhørende programvare på en PC. Brysthøydealder, samt årringbredde ble målt langs den midlere radien av stammeskiven.

2.3 ALS-data

2.3.1 Generell informasjon om flybåren laser skanner (ALS)

Et flybåret laser skanner (Airborne Laser Scanner, ALS) system består av en laser og en sensor som mottar retursignalet fra bakken. Flyets eksakte posisjon i et koordinatsystem er kjent ved hjelp av GPS (Global Positioning System). I tillegg er vinklene flyet har i forhold til aksene i koordinatsystemet kjent ved hjelp av en treghetsplattform, IMU (Inertial Measurement Unit). Laseren sender ut lyspulser i en sideveis sveipende bevegelse ved hjelp av selve skanneren som fordeler pulsene på tvers av flyets bevegelse. Sammen med flyets retning fremover får man da dekket et areal nede på bakken med laserpulser. Ved å måle tiden det tar fra lyspulsene blir sendt til en refleksjon blir oppfattet for hver enkelt laserpuls kan man ut fra lyshastigheten finne en avstand fra flyet ned til refleksjonen. Ettersom flyets posisjon og vinkler i koordinatsystem er kjent, samt den vinkelen den sideveise sveipebevegelsen hadde, kan man beregne hvor lyspulsene traff et objekt. Man får da en posisjon i koordinatsystemet inneholdende x, y og z verdien der lyspulsene ble reflektert.

2.3.2 Beskrivelse av ALS-materieialet

ALS-dataene ble samlet inn og prosessert av Blom Geomatics den 12. juni 2006. ALS-instrumentet var av typen Optech ALTM 3100EA, og flytypen benyttet var PA31 Piper Navajo. Pulstettheten var i forsøksområdet ca. 78 000 pulser pr. hektar. Det gir en omtrentlig

avstand mellom hver puls nede ved bakken på 36 cm. Gjennomsnittlig flyhøyde var 800 m over bakken. Laserpulsene brer seg ut som en kjegle under flyet med en vinkel på 0,3 mrad, som ved den gjennomsnittlig flyhøyden ga en sirkulær lyspuls med 24 cm i diameter nede ved bakken.

2.3.3 ALS høydemålinger

Lasersensoren har mulighet til å registrere flere refleksjoner for hver utgående lyspuls. Den første refleksjonen er ofte den viktigste ved vegetasjonsmålinger, fordi den tenderer til å beskrive overflaten av bl.a. trekronene. Likeså er den siste refleksjonen viktig fordi den tenderer til å beskrive terrengoverflaten. Den siste kategorien refleksjoner brukes til å lage en terrengmodell, som alle refleksjonene relateres til. Man kan da beregne høyden fra bakkenivå opp til en gitt refleksjon, Δh . Det er høyden Δh som i dette arbeidet er benyttet i alle beregninger inneholdende ALS-data.

2.4 Enkelttresesegmentering av ALS-data

ALS-dataene ble brukt for å gjøre en enkelttresesegmentering av de aktuelle områdene. Selve metoden er beskrevet i artikkelen til Solberg et al. (2006). Metoden er implementert i programvare utviklet ved Institutt for Naturforvaltning ved UMB, og baserer seg på å konstruere en overflatemodell av trekronene ved hjelp av interpolering av laserpulsenes x, y og z verdier. Av den informasjonen kan enkeltrær skilles ut, og man får koordinatene til de enkelte trærnes topp. I tillegg kan man også få ut trehøyden, samt kroneutstrekningen til treet. Informasjonen om trærnes posisjon, høyde og kroneutstrekning ble brukt i dette arbeidet.

2.5 Friskkvistdiameterprofil, største kvister

På samme måte som at brysthøydiameteren til trær er positivt korrelert med høyden, er også det samme tilfellet mellom kvistdiameter og greinlengde. Det er også slik at kvistdiameteren øker med høyden over bakken til tyngden av krona, for så å avta igjen (Moberg 1999). Videre vil store vide kroner med lange greiner ha grovere kvist enn trær med smale kroner.

Stammens innvendige kviststruktur ble målt på kun 10 trær, samt at det kun var åtte av disse trærne som med sikkerhet kunne sies å ha blitt plukket ut i enkelttresegmenteringen. De 10 trærne ble brukt til å finne sammenhengen mellom innvendig kviststruktur og eksteriørmessige målinger av kvist som ble foretatt ute i skogen. Kvistdiameteren ved stammeoverflaten ble målt på 30 trær i skogen. Sammenhengen mellom kvistdiameter og utvendig målt diameter er vist i avsnitt 2.8.1.

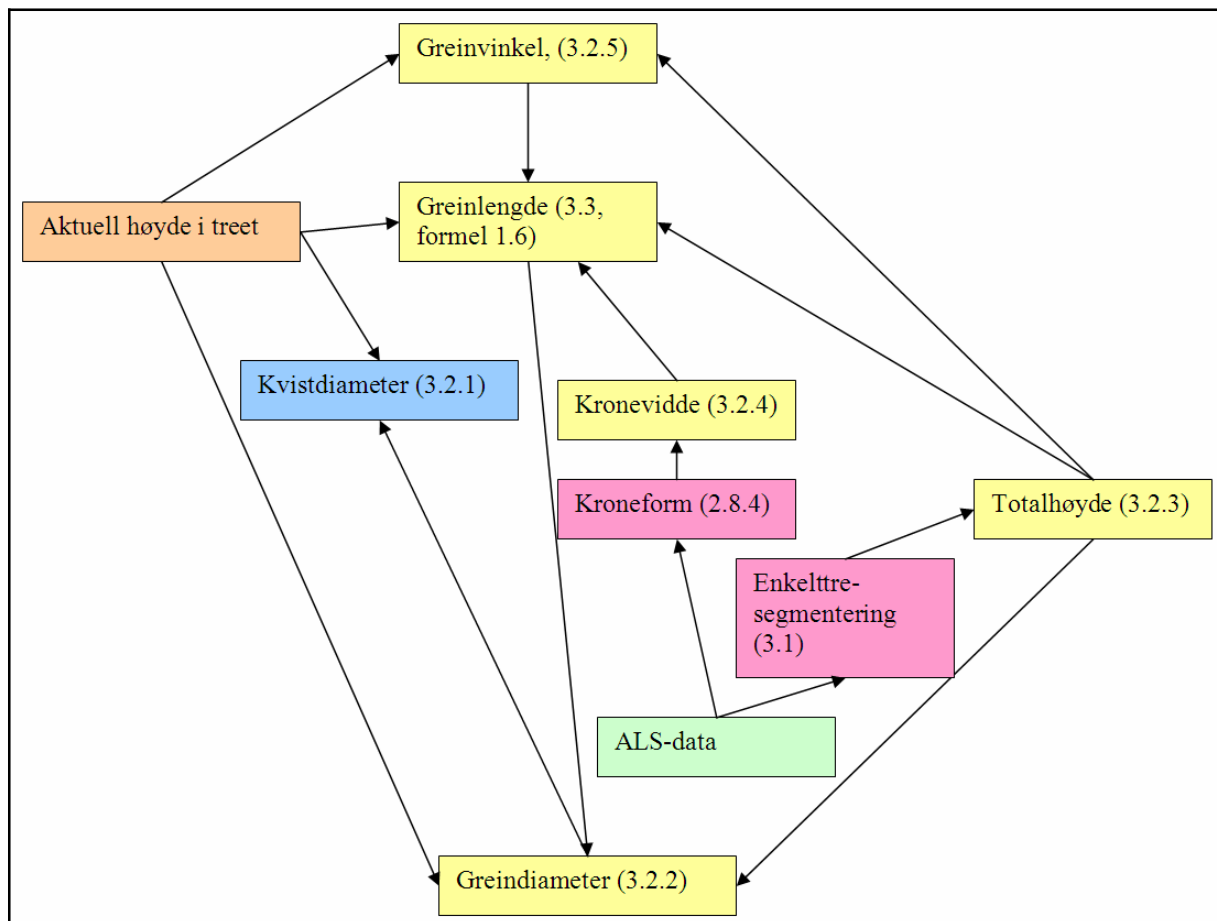
Det ble laget en modell for greindiameteren med utgangspunkt i den generelle sammenhengen mellom greinlengde og kvistdiameter. Datamaterialet for disse modellene var de ovenfornevnte 30 trærne. 638 greiner ble målt på disse trærne.

Totalhøyden til hvert enkelt tre gis i enkelttresegmenteringen fra ALS-dataene. Det vil imidlertid være et avvik mellom denne estimerte høyden og den sanne høyden. Derfor ble høyden fra enkelttresegmenteringen korrigert. Denne korrigeringen er beskrevet i avsnitt 2.8.3. Det er nå først når greinlengden skal estimeres at ALS-dataene virkelig kommer inn i bildet. Ettersom lasermålingene består av et antall høydemålinger med kjente geografiske posisjoner, må først en enkelttresegmentering foretas, der man får ut posisjoner til enkelttrær, samt trehøyde. Denne segmenteringen gir også utstrekningen til de enkelte træs kroner. Denne utstrekningen, kronesegmentene, brukes så til å knytte hvert enkelt av laserpunktene opp mot et unikt tre. Dermed får man en punktsverm, der hvert punkt, bortsett fra geografisk posisjon i horisontalplanet og høydeverdi, også har en unik identifikasjon opp mot ett enkelt tre. Denne punktsvermen ble brukt for å beregne en funksjon som beskriver de enkelte trekronas form. Dette er forklart i avsnitt 2.8.4. Denne funksjonen er lineær, og gir en verdi for kroneutstrekning langs stammen fra bakken opp til toppen av treet. Det er grunn til å tro at laserpulsene først og fremst treffer de ytre delene av krona, ettersom laserpulsene ikke så enkelt trenger gjennom overliggende greiner. Derfor bør det være samsvar mellom de målte greinlengdene og formen til krona. Ved å sammenligne greinspissposisjonene på de manuelt målte greinene (målt med målebånd) med lasermålingene, kan en over- eller underestimering av kronevidden fra ALS-målinger korrigeres. Metodikken er beskrevet i avsnitt 2.8.5.

Greinvinkelen blir nå nødvendig å estimere, både fordi den faktiske lengden til greina kan regnes ut med trigonometriske funksjoner ved hjelp av den horisontal utstrekning samt greinvinkelen, og fordi den horisontale utstrekningen gitt av modellen for kroneform er basert

på en høyde ute ved greinspissen, ikke inne ved stammen. Metoden er beskrevet i avsnitt 2.8.6.

Når alle disse enkeltmodellene knyttes sammen, vil man da kunne få et estimat for de grøvste kvistene ved en gitt høyde over bakken. Enkeltmodellene benyttet inneholder usikkerheter., derfor ble modellen for friskkvistdiameteren sammenlignet med kvistene som ble målt inne på laboratoriet, for å kunne få et uttrykk for hvor god modellen totalt sett var. Kvistmålinger fra åtte trær som med sikkerhet kan sies ble identifisert i enkelttresegmenteringen, og dermed har ALS-målinger, ble benyttet. Figur 3 viser hvilke delmodeller som blir benyttet for å estimere kvistdiameteren (blå boks i figuren) ut fra variabler avledet fra ALS-data (grønn boks).



Figur 3, Flyttdiagram over delmodellene med henvisning til avsnittet de er beskrevet.

2.6 Levende eller døde greiner / kvister

To modeller som beskriver statusen til ei grein med gitt høyde ble utviklet ved hjelp av statistikk programmet JMP ver. 5.1.2 Den ene av de to modellene forutsetter også

kvistdiameter som en avhengig variabel mens den andre ikke har med kvistdiameter som avhengig variabel. Ettersom statusen til en kvist enten er frisk eller tørr, altså at utfallet er kategorisk, ble en multippel logistisk modell valgt. Utfallet i modellen blir en sannsynlighet for at en kvist er frisk eller tørr. Den første modellen vil kunne si noe om sannsynligheten for en kvist som for eksempel er 10 mm i diameter vil være død ved en valgt høyde i treet. Igjen er det forskjellige avhengige variabler som er nødvendige for å utvikle modellen.

Datamaterialet som ligger til grunn for modellen er samtlige av de greindiametermålingene som ble foretatt ved de høydene der de to greinene med størst diameter pr. meter langs stammen befant seg. Var det ingen levende greiner innenfor en meters lengde ble heller ingen kvistdiameter målt, og dermed ingen status på død eller levende kvist. Totalt består datamaterialet av 1810 kvister fordelt på 17 trær. Følgende variabler ble forsøkt for å estimere og velge en modell:

Avhengige variabler satt som forutsetning i modellen:

- Aktuell greinhøyde
- Greindiameter

Trespesifikke variabler mulige å hente fra ALS-data:

- Totalhøyde
- Kroneareal
- Kronevolum
- Kronegrense

Kronegrensen er beregnet ved å ordne alle laserpunktene innenfor et tresegment i stigende rekkefølge, og etter det dele inn disse z verdiene i 5 % persentiler. Der hvor spranget i høyde fra en 5% persentil ned til den neste er størst blir kronegrenseverdien satt. Dette er samme metoden som er beskrevet i artikkelen til Solberg et al. (2006), bortsett fra at i den artikkelen ble benyttet 10 % persentiler i stedet for 5 %.

To logistiske modeller ble utviklet, der den ene inneholder greindiameter som en nødvendig forklaringsvariabel. Sammenhengen mellom greindiameter og kvistdiameter er gitt i avsnitt 2.8.1. Dermed kan man da finne en sannsynlighet for at man har en død grein med en diameter på for eksempel 10 mm ved en bestemt høyde i treet. Dette kan være viktig når det gjelder hvordan aptringen av treet skal foregå.

Den generelle formen på en logistisk modell er:

$$p(\text{ikke levende}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_N)}}$$

Merk at modellen ble utviklet ved at levende greiner ble gitt verdien 1 i grunnlagsmaterialet, mens døde greiner ble gitt verdien 0, så den generelle modellen over viser da sannsynligheten for at en grein ikke er levende. Blir sannsynligheten større enn 0,5 er det da grunn til å tro at greinen, og dermed kvisten er død.

Den andre modellen ble bygd opp på samme måte som den første modellen, men den har ikke med kvistdiameter som forklaringsvariabel, og vil da generelt si hvilken sannsynlighet det er for å finne en død kvist ved en gitt høyde i treet.

De to modellene ble prøvd ut på det materialet som var målt inne på laboratoriet, og man kan da se på hvor stor andel av kvistene som har en rett klassifisering, samt også like viktig, har en feil klassifisering.

2.7 Friskkvistlengde

Friskkvistlengden er den avstanden fra treets marg til den årringen kvisten går over til å bli tørr, altså det året det aktuelle greina døde. Her henger ikke kvisten sammen med stammen lengre. Dette kan by på problemer ved uttak av planker og bord av stokken, der man kan risikere at kvistene faller ut, og etterlater seg hull i materialene. Vet man derimot noe om denne avstanden, kan man ved sagbruket gjøre en postering, altså hvordan stokken deles opp, som tar hensyn til denne friskkvistlengden.

En modell for friskkvistlengden ble utviklet ut fra friskkvistlengdene målt på laboratoriet. Avstanden fra margen til kambiet ble målt på samtlige kvister, samt avstanden fra kambiet inn til grensen mellom frisk og tørr kvist. Friskkvistlengden blir da naturlig nok avstanden fra marg til kambium minus avstanden fra kambiet til frisk/tørr grensen. For hver kvistkrans som ble tatt ut av de forskjellige trærne, ble gjennomsnittet av denne friskkvistlengden benyttet.

Modellen baserer seg på regresjon etter minste kvadraters metode, der forklaringsvariabelen i modellen var aktuell høyde i treet. Fra ALS-dataene ble kronearealet og kronevolumet, regnet ut fra kroneformfunksjonen for hvert enkelt tre, se avsnitt 2.8.4, og brukt som forklaringsvariabler. Treets totalhøyde fra enkelttresegmenteringen, samt det kronegrensemålet funnet ut fra største høydesprang i 5 % persentilene til laserpulsene ble også forsøkt som forklaringsvariabler. Utrekningen av kronegrensen er vist i avsnitt 2.6. Flere av forklaringsvariablene ble forsøkt kryssset mot hverandre, samt for enkelte variabler, som for eksempel totalhøyden, ble også kvadrering eller logaritmen til variabelen forsøkt benyttet. Den modellen der samtlige forklaringsvariabler var signifikante ble valgt. Det ble også forsøkt å få en enklest mulig modell, altså med færrest mulige forklaringsvariabler. Grunnlagsmaterialet ble da åtte trær, med totalt 114 kvistkranser med gjennomsnittlige verdier for friskkvistlengde.

2.8 Generelle modeller

2.8.1 Kvistdiametre inne i stammen i forhold til greindiameter ved stammeoverflaten

Kvistmålingene gjort i laboratoriet ble manuelt koplet med greindiametermålingene utført i skogen. Gjennom å bruke kranshøyden og himmelretningen til greina ble de sammenfallende kvister og greiner hos det enkelte tre gitt en felles identifikasjon, og senere koplet sammen i en tabell som ble grunnlaget for utviklingen av modellen. Totalt 10 trær og 228 kvister / greiner ble benyttet til modelleringen.

For å finne sammenhengen mellom innvendige kvistdiametre og greindiameteren ved stammen ble regresjonsestimering basert på minste kvadraters metode benyttet. De variablene som ble forsøkt foruten greindiameteren inne ved rota, var totalhøyden til treet, hvor høyt oppe i treet kvisten befant seg, samt den relative høyden til kvisten i forhold til treets totalhøyde. Ulike transformeringer av variablene, som kvadrering og logaritmen ble også forsøkt.

2.8.2 Greindiameter ved stammeoverflaten

Diameteren på greina ved stammen er sterkt korrelert med greinlengden, samt hvor høyt opp i treet den befinner seg. Regresjonsestimering basert på minste kvadraters metode ble benyttet for å kunne finne en egnet funksjon som beskriver greindiameteren inne ved stammen.

Datamaterialet bestod av de totalt 638 greiene som ble målt på de 30 hogde trærne. Foruten kvistlengde, ble også aktuell høyde over bakken, treets totalhøyde og den relative høyden til kvisten i treet i forhold til treets totalhøyde brukt for å finne en egnet regresjonsmodell. Ulike transformerings av forklaringsvariablene ble også forsøkt.

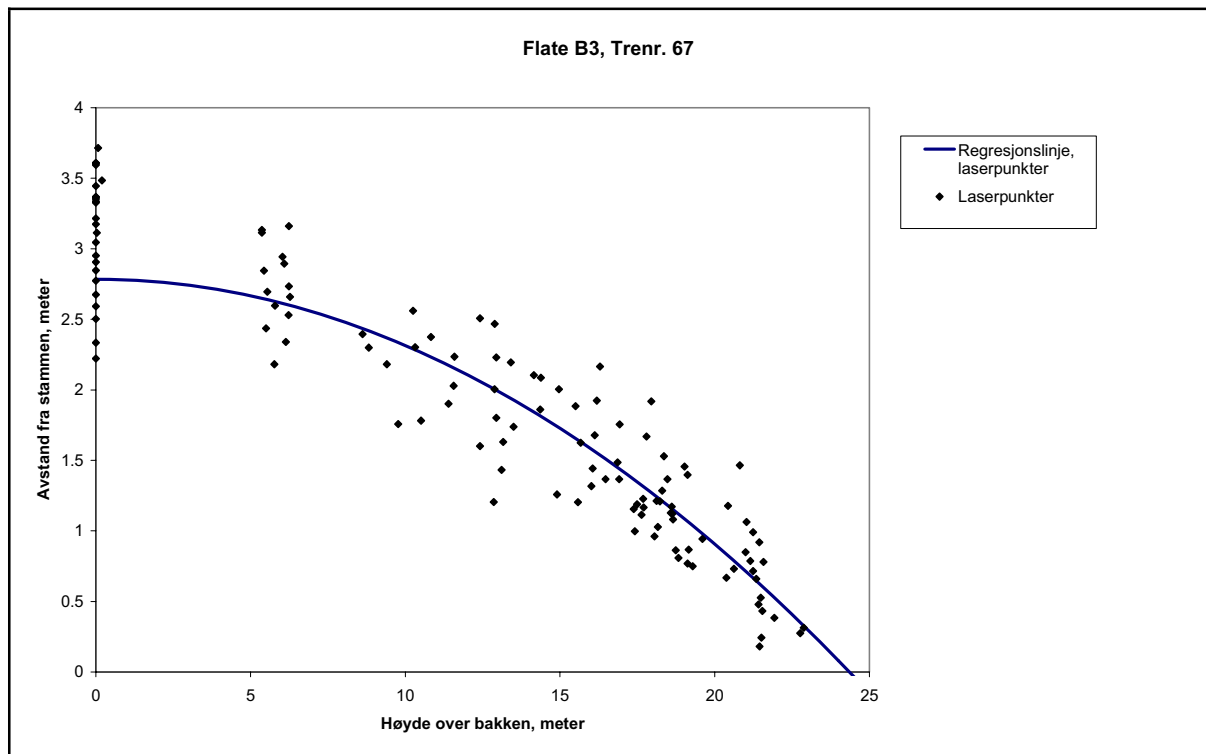
2.8.3 Forskjell mellom sann trehøyde og målt laserhøyde

Gjennom kronesegmenteringen blir trehøyden estimert ut fra kroneoverflatemodellen.

Ettersom denne modellen gir en trehøyde som er lik maksimumsverdien av høydeverdiene til ALS-punktene, er denne høyden vanligvis mindre enn den sanne trehøyden. Grunnen er at arealet av treets toppskudd er for lite til at en refleksjon av laserpulsene kan detekteres av ALS-systemet. Høyden gitt i kronesegmenteringen ble sammenlignet med trehøyden til de 19 identifiserte trærne. Trehøyden var på disse 19 trærne målt med målebånd langs stammen etter at treet var felt. Dermed kan trehøydene fra enkelttresegmenteringen korrigeres med den gjennomsnittlige differansen mellom segmentert og målt trehøyde.

2.8.4 Kroneutstrekning basert på lasermålinger

Ved å benytte ArcMap ble kronesegmentene, med den informasjonen disse hadde, bl.a. høyde og gjennomsnittlig radius, først koplet mot det treet fra totalklavingen som segmentet representerte. Etterpå ble informasjonen fra disse kronesegmentene tilordnet hver av alle de totalt 3385 laserpulsene som hadde truffet innenfor disse segmentene. Avstanden i horisontalplanet for hvert enkelt laserpunkt til senter av det aktuelle treet gitt i kronesegmenteringen ble beregnet med Pythagoras formel. Ved å bruke denne horisontalavstanden mot høydeverdien av laserpunktene ble en regresjonsfunksjon estimert for hvert enkelt tre. Et eksempel er vist i figur 4.



Figur 4, Eksempel på regresjonsfunksjon fra ALS-målinger, der vertikalaksen viser utstrekningen av krona gitt som en funksjon av høyden (horisontalaksen). Punktene viser dataene som var grunnlaget for modellen.

Som man ser av figuren, er ikke ALS-punktene lineært fordelt. Avstanden fra stammens senter ut til krona avtar ikke-lineært oppover i treet. Denne formen på punktsvermen var felles for alle trærne. Derfor ble regresjonsfunksjonen for de enkelte trærne estimert på grunnlag av den kvadrerte verdien av høyden i henhold til følgende modell:

$$\hat{x}_z = \beta_0 + \beta_1 \times z^2$$

der

$\hat{x}_z$ er den estimerte kroneutstrekningen ved høyde z (m)

β_0 er parameterestimatet for interceptet.

β_1 er parameterestimatet for forklaringsvariabelen z

z er en høyde fra ALS-punktene (m).

Selv om ALS instrumentet i flyet kan registrere flere høyder for den samme utgående pulsen, ble kun den første registrerte refleksjonen brukt. I tillegg ble alle registrerte punkter under 2 m utelatt fra grunnlaget for regresjonslinjen, ettersom det viste seg at den levende delen av krona sjelden gikk så langt ned mot bakken, samt at eventuell bakkevegetasjon ikke skal forstyrre regresjonsfunksjonen. Enkelte av trærne hadde helt tydelige punktregistreringer som ikke hørte til det aktuelle treet, og ble derfor manuelt utelatt før estimering av regresjonsfunksjonen.

2.8.5 Korrigering av kronemodellen for de største kvistene

Datamaterialet fra de greinene som ble målt ute i skogen inneholder både greinlengde, høyde over bakken og greinvinkel. Derfor kan man ved hjelp av trigonometriske funksjoner beregne greinspissens posisjon både i høyde over bakken (z) og avstand fra senter av treet (x).

Greinspissens avstand fra stammen er gitt ved funksjonen:

$$X_{greinspiss} = l \times \sin(\alpha)$$

der

l er greinas lengde (m)

α er greinvinkelen (grader)

Greinspissens høyde er gitt ved funksjonen:

$$Z_{greinspiss} = h + l \times \cos(\alpha)$$

der

h er greinas høyde langs stammen (m)

l er greinas lengde (m)

α er greinvinkelen (grader)

Kvistlengden som ble målt, var avstanden fra greinspissen til stammeoverflaten, mens laserdataene gir en avstand fra senter av stammen. Derfor må halve diameteren til treet i den aktuelle høyden legges til. Ettersom kun brysthøydediameteren er kjent, forutsettes en lineær avtagende diameter fra brysthøydediameteren opp til toppen der diameteren er lik 0. Denne avstanden ble så lagt til X-posisjonen til greinspissen.

Ved å benytte høydene gitt i greinmålingene kan man gjennom estimatene fra regresjonen av kronevidden estimere en kronevidde / greinvidde ved den aktuelle høyden. Ved å sammenligne disse verdiene mot den sanne greinspissposisjonen får man residualer som viser hvor god kroneformen fra laserdataene er til å predikere greinlengder og kvistdiametre. Residualene vil også avdekke systematisk over- eller underestimering av greinlengder og kvistdiametre.

2.8.6 Greinvinkel

Laserpulsene treffer naturlig nok i de ytre delene av krona og greinene. Siden greinene ikke vokser horisontal ut fra stammen, var det nødvendig å beregne vinkelen greinen har i forhold til stammens lengderetning, både for å få rett høydeangivelse langs stammen der hvor greina går inn i stammen, samt greinas reelle lengde. En regresjonsmodell basert på minste kvadraters metode ble utviklet for å beskrive sammenhengen mellom greinvinkel og høyde over bakken. Grunnlagsdata for modellen var 836 greinmålinger, der vinkel og høyde over bakken var målt.

3 Resultater

3.1 Kronesegmentering av ALS-data

En ting som viste seg vanskelig var å finne de mindre og undertrykte trærne i et bestand. Av de totalt 30 trærne som ble benyttet i dette forsøket, var det kun 19 trær som ble identifisert ved hjelp av enkelttresegmenteringen. En sammenligning av det som ble målt i skogen og det som ble avledet av ALS-dataene er vist i tabell 2.

Flate	Trenr	Målt høyde, m	Målt kroneareal, m ²	Laser høyde, m	Laser kroneareal, m ²	Diff. Høyde, %	Diff. Areal %
A1	10	20.4	16.2	19.9	33.7	-2	108
A1	23	10.1	4.4	8.7	12.4	-14	184
A1	100	10.7	10.9	9.7	11.8	-9	8
A1	130	25.0	23.5	24.5	25.7	-2	9
A1	140	18.8	5.3	17.1	7.6	-9	42
A2	28	4.1	6.1		Ikke funnet	-	-
A2	88	6.7	4.4		Ikke funnet	-	-
A2	155	24.0	17.2	23.2	16.9	-3	-1
A2	201	19.4	14.2	18.4	13.3	-5	-6
A2	204	13.3	11.0		Ikke funnet	-	-
A3	34	19.8	9.3		Ikke funnet	-	-
A3	80	11.4	10.4		Ikke funnet	-	-
A3	88	26.3	24.9	25.4	19.7	-3	-21
A3	121	8.8	4.3		Ikke funnet	-	-
A3	162	22.8	20.3	21.9	14.3	-4	-30
B1	51	19.5	8.3	18.3	11.9	-6	45
B1	53	23.0	2.8	22.0	6.6	-4	133
B1	76	26.0	17.4	24.2	14.7	-7	-16
B1	83	23.3	11.4	20.8	9.9	-11	-13
B1	126	8.1	2.5		Ikke funnet	-	-
B2	55	20.6	13.9	19.5	16.9	-5	22
B2	65	26.7	26.7	25.2	12.1	-6	-55
B2	166	18.3	7.9	16.9	8.1	-8	3
B2	211	10.1	6.9		Ikke funnet	-	-
B2	251	5.4	3.0		Ikke funnet	-	-
B3	13	8.7	5.3		Ikke funnet	-	-
B3	67	23.6	13.9	22.0	15.3	-7	10
B3	130	10.2	11.9	8.5	14.6	-17	22
B3	152	21.1	8.9	19.8	7.8	-6	-13
B3	200	8.7	9.3		Ikke funnet	-	-
Gjennomsnitt						-7	23

Tabell 2, Forskjeller mellom segmenterte og målte trær.

3.2 Generelle modeller

3.2.1 Kvistdiametre inne i stammen i forhold til greindiameter ved stammeoverflaten

Kvistdiameteren (d_{kvist}) var sterkt relatert til diameteren for en grein (d_{grein}). Høyden over bakken ga også økt forklaringsgrad for kvistdiameteren.

Regresjonsmodellen ble:

$$d_{kvist} = -0,376372 + 0,9397462 d_{grein} - 0,00644 h_{akt}^2 \quad (1.1)$$

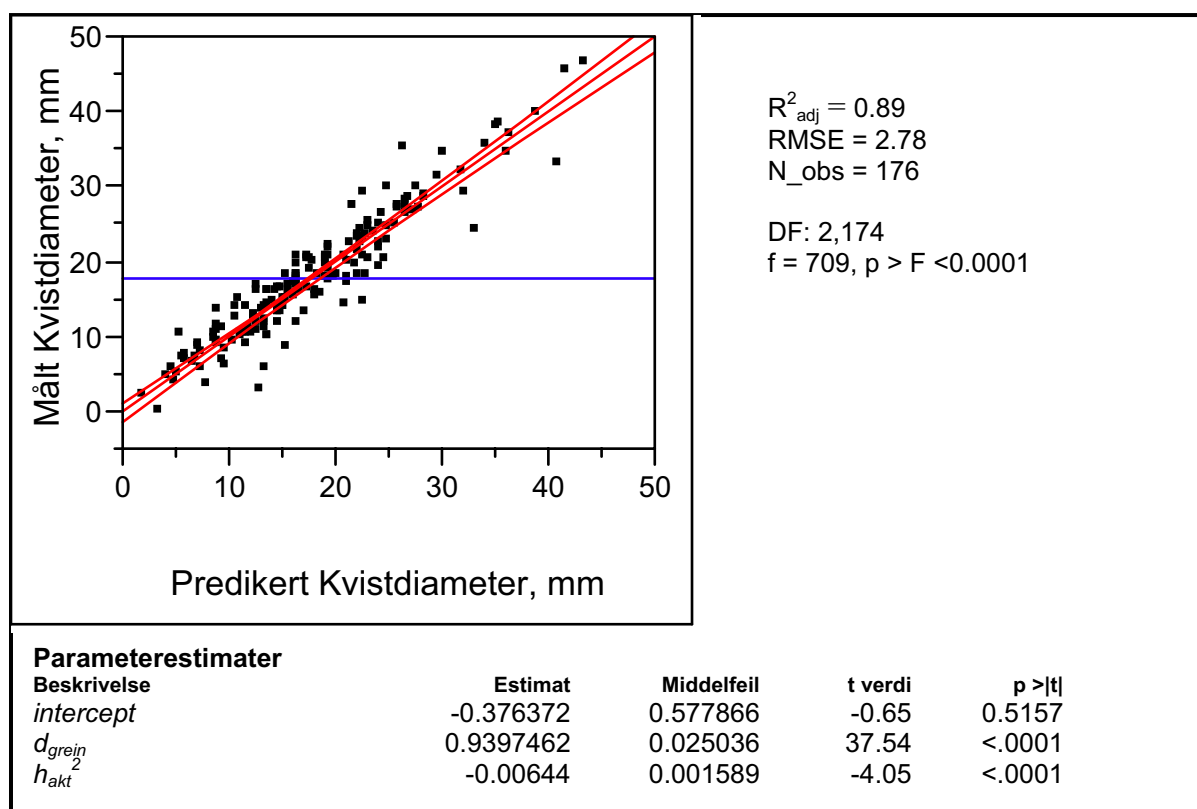
der

d_{kvist} er kvistdiameteren målt etter instruks (mm)

d_{grein} er greindiameter inne ved stammen (mm)

h_{akt} er aktuell høyde i treet langs stammen (m)

Resultatene av den valgte regresjonsmodellen med parameterestimaterne er vist i figur 5.



Figur 5, Resultater fra modellen for kvistdiametre.

3.2.2 Greindiameter ved stammeoverflaten

Det som best forklarte greindiameteren (d_{grein}) var den kvadrerte totalhøyden til treet (h_{tot}^2) og andelen høyde i treet. Greinlengden (l_{grein}) multiplisert med greinas høyde over bakken (h_{akt}) ga bedre forklaring enn de to variablene hver for seg.

Regresjonsmodellen som beskriver greindiameteren (d_{grein}) ble som følger.

$$d_{grein} = 20,183523 + 0,0048963 h_{tot}^2 + 0,5581378 (h_{akt} \times l_{grein}) - 17,88308 \left(\frac{h_{akt}}{h_{tot}} \right) \quad (1.2)$$

der

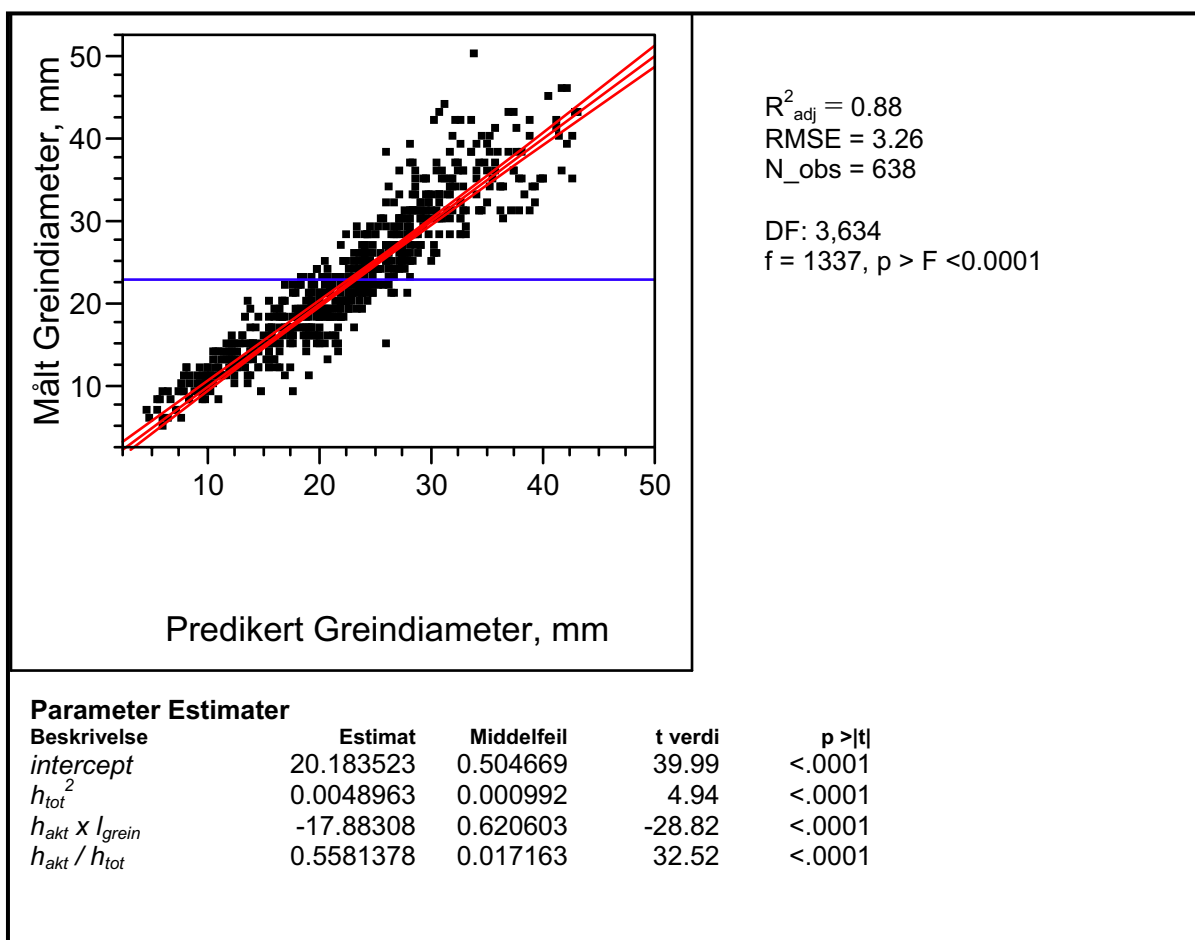
d_{grein} er greindiameter inne ved stammen (mm)

h_{tot} er totalhøyden til treet (m)

h_{akt} er aktuell høyde i treet langs stammen (m)

l_{grein} er den reelle lengden på greina (m)

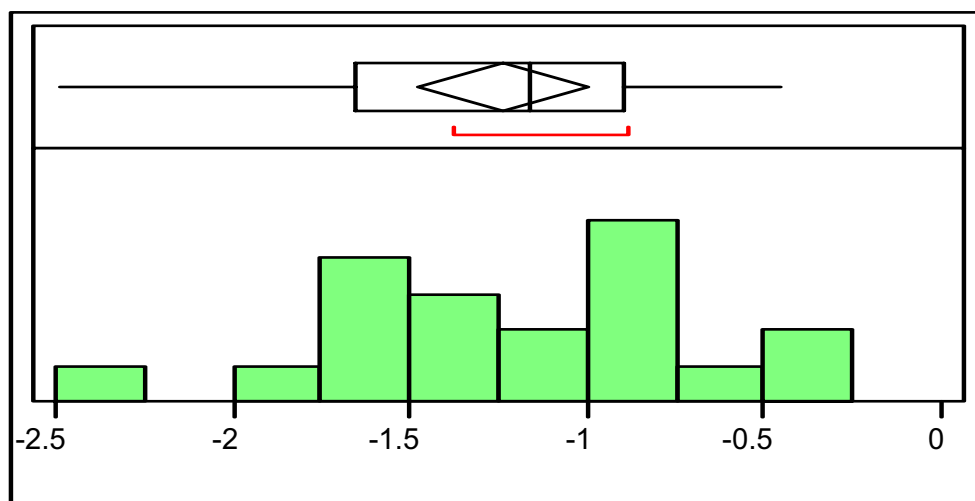
Resultatene av den valgte regresjonsmodellen med parameterestimatene er vist i figur 6.



Figur 6, Resultater fra modellen for greindiameter.

3.2.3 Forskjell mellom sann trehøyde og målt laserhøyde

For de 19 trærne som ble funnet i enkelttresegmenteringen, var estimert trehøyde i gjennomsnitt 1,24 m lavere enn de sanne høydene målt med målebånd langs trestammen. Standardavviket var på 0,50 m, mens middelfeilen ble 0,12 m. Resultatet er vist grafisk i figur 7.



Figur 7, Fordeling av differansen mellom sann høyde og høyde fra enkelttresegmenteringen

Den korrigerte totalhøyden for dette datamaterialet blir derfor:

$$h_{tot} = h_{\text{enkelttresegmentering}} + 1,24 \quad (1.3)$$

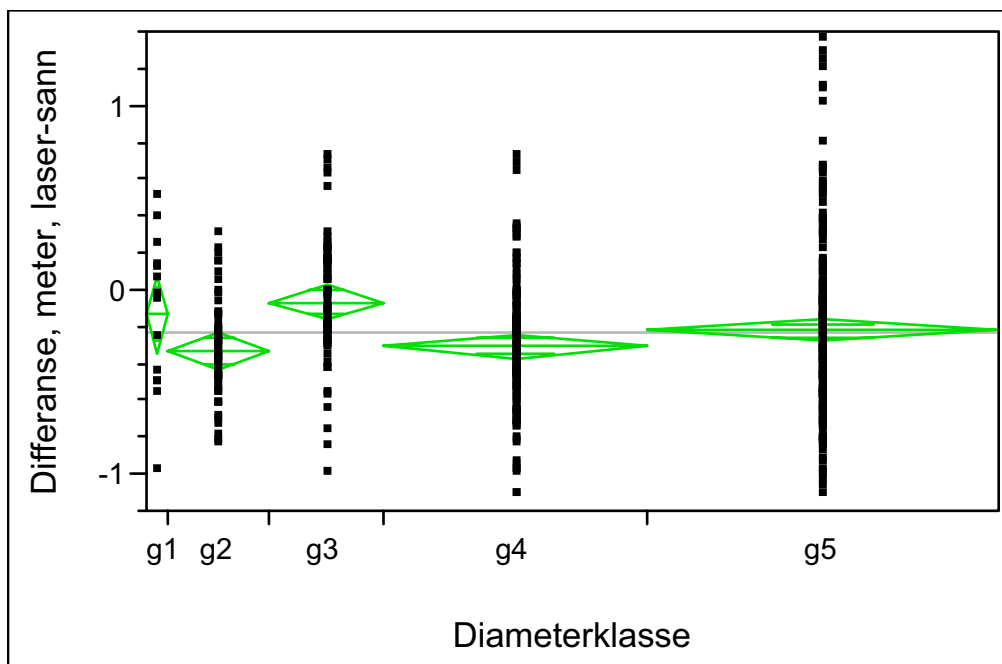
der

h_{tot} er totalhøyden til treet (m)

$h_{\text{enkelttresegmentering}}$ er totalhøyden til treet fra enkelttresegmenteringen (m)

3.2.4 Korrigering av kronemodellen for de største kvistene

Ved greinspiss høydene fra det målte datamaterialet gir kronemodellen for de enkelte trærne et avvik i forhold til utstrekningen til de grøvste greinene. Kronemodellen hadde i gjennomsnitt 0,232 m kortere utstrekning enn de målte greinene ved de samme høydene over bakken. Figur 8 viser forskjellen mellom kronemodellen og den målte utstrekningen til greinene fordelt på de fem diameterklassene.



Figur 8, Gjennomsnittlig differanse mellom kronemodell og målt greinutstrekning for diameterklasse 1 (g1) til 5 (g5) for gran vist med de grønne symbolene. Gjennomsnittet for alle diameterklassene er vist ved den grå streken.

Figuren viser at det er forskjell mellom den reelle greinutstrekningen hos de største greinene og den estimerte verdien fra kronemodellen. Det er signifikante forskjeller i gjennomsnittlig avvik hos trær i de forskjellige diameterklassene. Det ble valgt å bruke gjennomsnittet for samtlige trær for å korrigere kronemodellen slik at den stemmer bedre med utstrekningen til de grøvste kvistene. Gjennomsnittlig forskjell mellom de målte verdiene og regresjonsmodellen basert på ALS-målingene ble -0,232 m. Standardavviket ble 0,396 m.

Modellen for kronevidden blir derfor:

$$\hat{x}_z = (\beta_0 + \beta_1 \times z^2) + 0,232 \quad (1.4)$$

der

$\hat{x}_z$ er den estimerte kroneutstrekningen ved høyde z (m)

β_0 og β_1 er parameterestimatet i modellen

z er høyde over bakken (m)

3.2.5 Greinvinkel

Greinvinkelen (α) for et tre ved en gitt høyde (h_{akt}) ble foruten den aktuelle høyden, best forklart ved å bruke logaritmen av totalhøyden ($\ln(h_{tot})$), samt den kvadrerte verdien av høyden (h_{akt}^2).

Modellen ble:

$$\alpha = 50,366776 + 25,154216 \ln(h_{tot}) - 4,933116 h_{akt} + 0,0755006 h_{akt}^2 \quad (1.5)$$

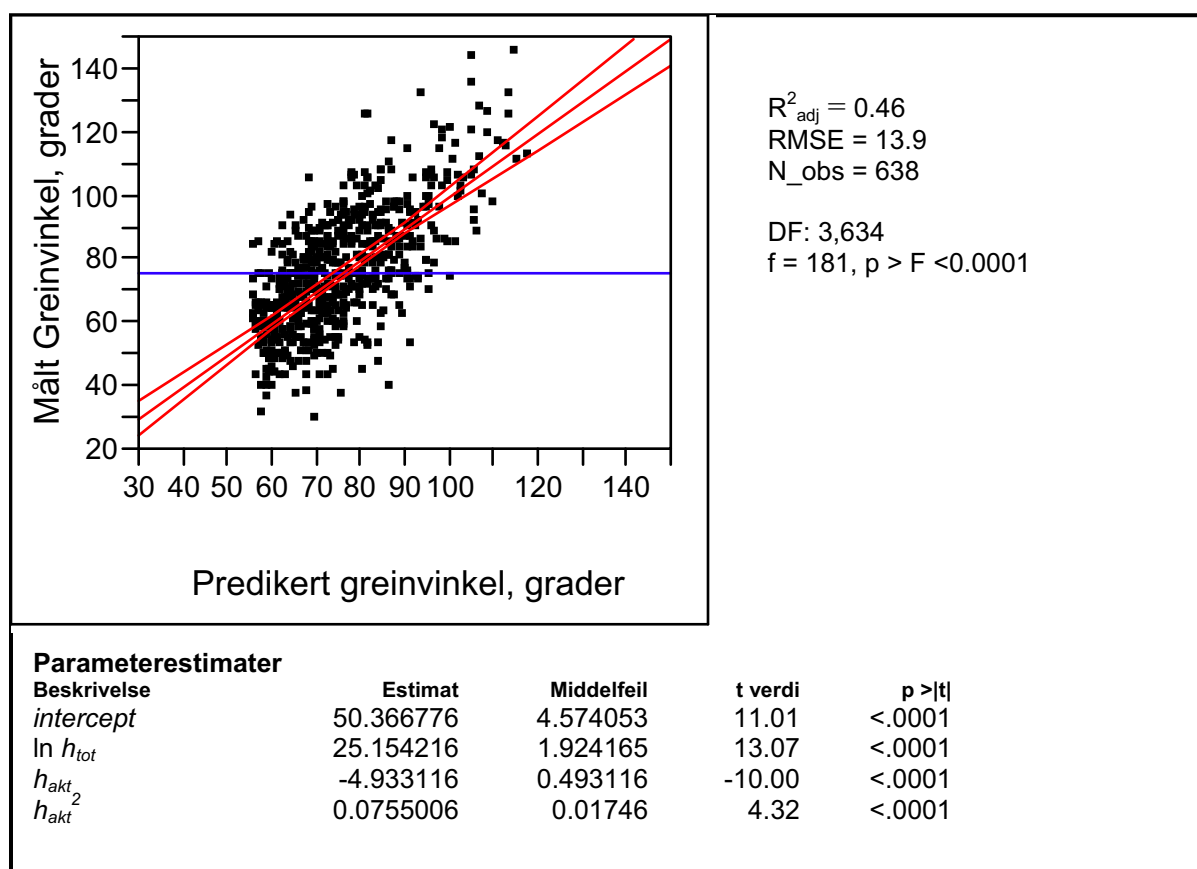
der

α er greinvinkelen i grader, 0 til 180 °, der 0 ° er parallelt med stammen oppover og 180 ° er parallelt med stammen nedover.

h_{tot} er totalhøyden til treet (m)

h_{akt} er aktuell høyde i treet langs stammen (m)

Figur 9 viser resultatene fra den valgte modellen.



Figur 9, Resultater fra modellen for greinvinkel.

3.3 Friskkvistdiameterprofil, største kvister

Gjennom å bruke de funksjonene som tidligere er blitt estimert, altså;

- Kvistdiametre i forhold til greindiameter ved stammeoverflaten, avsnitt 3.2.1
- Greindiameter ved stammeoverflaten, avsnitt 3.2.2
- Forskjell mellom sann trehøyde og målt laserhøyde, avsnitt 3.2.3
- Kroneutstrekning basert på lasermålinger, avsnitt 3.2.4
- Greinvinkel, avsnitt 3.2.5

kan ALS-målingene brukes til å lage en lineær funksjon for den maksimale kvistdiameteren av den levende/grønne delen til enkeltreet.

Funksjonen for kvistdiameteren er i avsnitt 3.2.1 gitt som:

$$d_{kvist} = -0,376372 + 0,9397462 d_{grein} - 0,00644 h_{akt}^2 \quad (1.1)$$

Der h_{akt} er en vilkårlig høyde i det aktuelle treet.

Man er da nødt til å kjenne greindiameteren (d_{grein}) ved den aktuelle høyden (h_{akt}) som fra avsnitt 3.2.2 er gitt ved

$$d_{grein} = 20,183523 + 0,0048963 h_{tot}^2 + 0,5581378 (h_{akt} \times l_{grein}) - 17,88308 \left(\frac{h_{akt}}{h_{tot}} \right) \quad (1.2)$$

Treets totalhøyde (h_{tot}) blir gitt av enkelttresegmenteringen, men korrigeres for underestimering gjennom:

$$h_{tot} = h_{enkelttresegmentering} + 1,24 \quad (1.3)$$

Greinlengden (l_{grein}) er da mulig å hente ut fra kronemodellen basert på ALS-punktene.

Den generelle kronemodellen, $\hat{x}_z = \beta_0 + \beta_1 \times z^2$, gir for hvert tre en modell for kroneformen, altså utstrekning ved en gitt høyde, z . Høyden z er ikke den samme som høyden h_{akt} , ettersom z er en høyde ute ved kroneoverflaten, og dermed tilnærmet lik høyden til greinspissen for ei grein.

Avsnitt 3.2.4 viste at det var en differanse mellom utstrekningen gitt i den generelle kroneutstrekningsmodellen og den faktiske greinutstrekningen hos de grøvste greinene.

Korrigeringen av den generelle modellen ble da:

$$\hat{x}_z = (\beta_0 + \beta_1 \times z^2) + 0,232 \quad (1.4)$$

Denne verdien ($\hat{x}_z$) vil dermed være tilnærmet lik utstrekningen til ei grein med greinspissen i en høyde z .

Neste trinn blir å finne greinlengden (l_{grein}) ut fra kunnskapen om greinenes utstrekning. Til det er det nødvendig å vite hvordan greinvinkelen (α) varierer langs treets høyde (h_{akt}).

Avsnitt 3.2.5 gav estimatet for greinvinkel.

Greinvinkelen, α , ved en gitt høyde ble estimert til:

$$\alpha = 50,366776 + 25,154216 \ln(h_{tot}) - 4,933116 h_{akt} + 0,0755006 h_{akt}^2 \quad (1.5)$$

Ved å sette $z=0$ i ligningen for kronevidden, $\hat{x}_z = (\beta_0 + \beta_1 \times z^2) + 0.232$, vil man da få den estimerte horisontale utstrekning helt nede ved bakken. Ved også å benytte treets totalhøyde får man da et triangel, der vinkelen mot toppen blir:

$$\angle_{topp} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{x}_{z=0}}{h_{tot}} \right)$$

der

$\angle_{topp}$ er toppvinkelen mellom stammen og kroneutstrekningens stigningstall

$\hat{x}_{z=0}$ er kroneutstrekningen ved $z=0$, altså

h_{tot} er treets totalhøyde.

Ved å benytte sinusproporsjonen:

$$\frac{\sin A}{a} = \frac{\sin B}{b} = \frac{\sin C}{c}$$

der A , B og C er vinkler i en trekant, mens a , b og c er lengden på de motstående sidene til vinklene med samme bokstav.

En hvilken som helst greinlengde langs stammen vil da være gitt ved uttrykket:

$$\frac{\sin(180 - \angle_{topp} - \alpha)}{(h_{tot}^2 - h_{akt}^2)} = \frac{\sin(\angle_{topp})}{l_{grein}}$$

der

l_{grein} er greinlengden (m)

α er greinvinkelen (grader).

som omskrevet blir

$$l_{grein} = \frac{(h_{tot}^2 - h_{akt}^2) \times \sin(\angle_{topp})}{\sin(180 - \angle_{topp} - \alpha)}$$

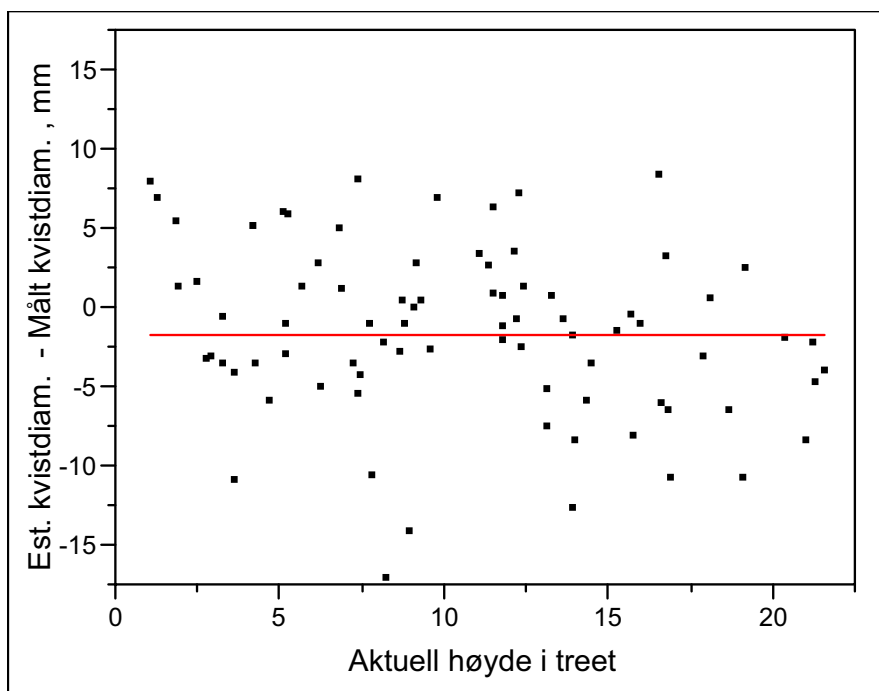
Tar man i tillegg med formelen for toppvinkelen, blir uttrykket for greinlengden:

$$l_{grein} = \frac{(h_{tot}^2 - h_{akt}^2) \times \sin(\tan^{-1}\left(\frac{\hat{x}_{z=0}}{h_{tot}}\right))}{\sin(180 - \alpha - \tan^{-1}\left(\frac{\hat{x}_{z=0}}{h_{tot}}\right))} \quad (1.6)$$

Dermed er alle de nødvendige parametrene i modellen for kvistdiameteren (d_{kvist}) beskrevet.

Den totale modellen ble nå prøvd på de trærne der kvistdiametre ble målt inne på laboratoriet og som var identifiserbare i enkelttresegmenteringen basert på ALS-data. Kun den største kvisten i hver av kvistkransene ble benyttet. I tillegg skulle kvistene være levende. Modellen ble kontrollert mot åtte trær og totalt 80 kvister.

Gjennomsnittlig ble kvistdiameteren underestimert med 2,6 mm. Standardavviket av de 80 residualene var på 5,6 mm, mens standardfeilen ble 0,62 mm. Residualplottet ved forskjellige kranshøyder er vist i figur 10.



Figur 10, Residualplott - Forskjeller mellom estimert og sann kvistdiameter.

3.4 Levende eller døde greiner / kvister

Resultatene fra den logistiske modellen inneholdende kvistdiameter som en variabel, er vist nedenfor. Den er basert på den generelle modellen for sannsynligheten for ei grein er død som er gitt ved:

$$p(død) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_N)}}$$

som ved estimering basert på foreliggende data blir:

$$p(død) = \frac{1}{1 + e^{-(-16,275809 - 0,6066701 h_{akt} + 10,1946778 \ln(h_{tot}) - 0,6346304 d_{grein} - 0,2844412 h_{krone} + 0,03331345 (h_{krone} \times d_{grein})}}}$$

(Formel 2.1)

der

$p(død)$ er sannsynligheten for at en kvist er død, (0 til 1)

d_{grein} er greindiameteren (mm)

h_{krone} er kronehøyden avledet fra ALS-dataene (m)

h_{tot} er totalhøyden til treet (m)

h_{akt} er aktuell høyde i treet langs stammen (m).

Modellen fikk en $R^2 = 0,61$ og fikk med parametrene benyttet i modellen en kji-kvadratsum på 1275, som gir en sannsynlighet $< 0,0001$ ved de fem frihetsgradene modellen inneholder, for at utfallet av modellen er helt tilfeldig, altså kji-kvadrat fordelt. Man kan dermed si at modellen er signifikant. Antall kvistmålinger benyttet som grunnlag for modellen var 1810. Tabell 3 viser parameterestimaterne.

Beskrivelse	Estimat	Middelfeil	Kji-kvadrat	p > Kji-kvadrat
<i>intercept</i>	-16.275809	1.3199455	152.05	<.0001
h_{akt}	-0.6066701	0.0343269	312.35	<.0001
$\ln h_{tot}$	10.1946778	0.6416599	252.43	<.0001
d_{grein}	-0.6346304	0.0418	230.51	<.0001
h_{krone}	-0.2844412	0.0563871	25.45	<.0001
$d_{grein} \times h_{krone}$	0.03331345	0.0031264	113.54	<.0001

Tabell 3, Parameterestimater fra logistisk modell som forklarer sannsynligheten for død kvist med greindiameter som en av forklaringsvariablene.

Testing av modellen ble foretatt på hele laboratoriematerialet. Totalt 415 målte kvister fra laboratoriemålingene ble benyttet. Totalt åtte av 10 trær målt på laboratoriet hadde blitt identifisert i enkelttresegmenteringen, og hadde dermed variabler basert på egenskapene avledet fra ALS-dataene.

Hvis sannsynligheten for død kvist var større eller lik 0,5 ble kvisten klassifisert som død. Var sannsynligheten mindre enn 0,5 ble kvisten klassifisert som levende.

Modellen inneholdt treets totalhøyde, men for å få en mer reell tilnærming til testingen, ble totalhøyden fra enkelttresegmenteringen benyttet. Høyden ble naturligvis korrigert med den gjennomsnittlige underestimeringen som ble funnet i datamaterialet, se avsnitt 3.2.3:

$$h_{tot} = h_{kronesegmentering} + 1,24 \quad (1.3)$$

Ettersom modellen inneholder greindiameteren, mens testmaterialet inneholder den målte kvistdiameteren inne ved stammen, benyttes ligningen for forskjellen mellom kvist- og greindiameter fra avsnitt 3.1.1:

$$d_{kvist} = -0,376372 + 0,9397462 d_{grein} - 0,00644 h_{akt}^2 \quad (1.1)$$

$$d_{grein} = \frac{0,376372 + d_{kvist} + 0,00644 h_{akt}^2}{0,9397462}$$

Av de 415 kvistene i datamaterialet ble 91 % av de 221 levende kvistene riktig klassifisert, mens for de 194 døde kvistene var resultatet 94 %. Totalt sett ble 383 av 415 kvister riktig klassifisert, altså 92 %

Modellen uten kvistdiameter som forklaringsvariabel ble naturlig nok ikke fullt så god, men beskriver hvor stor sjansen er for å finne døde kvister ved en gitt høyde i treet.

Den valgte modellen ble som følger:

$$p(død) = \frac{1}{1 + e^{-(-33,171742 - 0,3144887 h_{akt} + 19,5346816 \ln(h_{tot}) - 1,162932 h_{tot} - 0,2955761 h_{krone} + 0,02316052 (h_{krone} \times h_{tot}))}} \quad (2.2)$$

der

$p(død)$ er sannsynligheten for at en kvist er død, (0 til 1)

h_{krone} er kronehøyden avledet av ALS-dataene (m)

h_{tot} er totalhøyden til treet (m)

h_{akt} er aktuell høyde i treet langs stammen (m)

Modellen fikk en $R^2 = 0,24$ og fikk med parametrene benyttet i modellen en kji-kvadratsum på 511, som gir en sannsynlighet $< 0,0001$ ved de fem frihetsgradene modellen inneholder, for at utfallet av modellen er helt tilfeldig, altså kji-kvadrat fordelt. Man kan dermed si at modellen er signifikant. Antall kvistmålinger benyttet som grunnlag for modellen var 1810.

Tabell 4 viser parameterestimaterne.

Beskrivelse	Estimat	Middelfeil	Kji-kvadrat	p > Kji-kvadrat
<i>Intercept</i>	-33.171742	3.5608363	86.78	<.0001
h_{akt}	-0.3144887	0.0175742	320.23	<.0001
h_{krone}	-0.2955761	0.0836752	12.48	0.0004
h_{tot}	-1.162932	0.1303158	79.64	<.0001
$\ln h_{tot}$	19.5346816	2.0458214	91.18	<.0001
$h_{tot} \times h_{krone}$	0.02316052	0.0037725	37.69	<.0001

Tabell 4, Parameterestimater fra logistisk modell som forklarer sannsynligheten for død kvist.

Testingen av modellen foregikk på samme måte som ved den modellen som inneholdt kvistdiameter.

Hvis sannsynligheten for død kvist var større eller lik 0,5 ble kvisten klassifisert som død. Var sannsynligheten mindre enn 0,5 ble kvisten klassifisert som levende.

Også denne modellen inneholder treets totalhøyde, men også her benyttes høyden fra enkelttresegmenteringen for testingen av modellen, altså:

$$h_{tot} = h_{kronesegmentering} + 1,24 \quad (1.3)$$

Av de 415 kvistene i datamaterialet ble 91 % av de 221 levende kvistene riktig klassifisert, mens for de 194 døde kvistene var resultatet 66 %.

Totalt sett ble 329 av 415 kvister riktig klassifisert, altså 79 %.

3.4 Friskkvistlengde

Modellen som beskriver den gjennomsnittlige friskkvistlengden ved en gitt høyde er for et tre ble som følger:

$$\begin{aligned} \bar{l}_{frisk, h} = & 14,129169 + 24,915353 \ln(h_{akt}) + 1,0519228 h_{krone} + 0,1927606 v_{krone} \\ & - 51,14601 \left(\frac{h_{akt}}{h_{tot}} \right) - 3,360585 \left(\frac{h_{akt}^2}{h_{tot}} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

der

$\bar{l}_{frisk, h}$ er gjennomsnittlig friskkvistlengde (mm) ved en høyde, h .

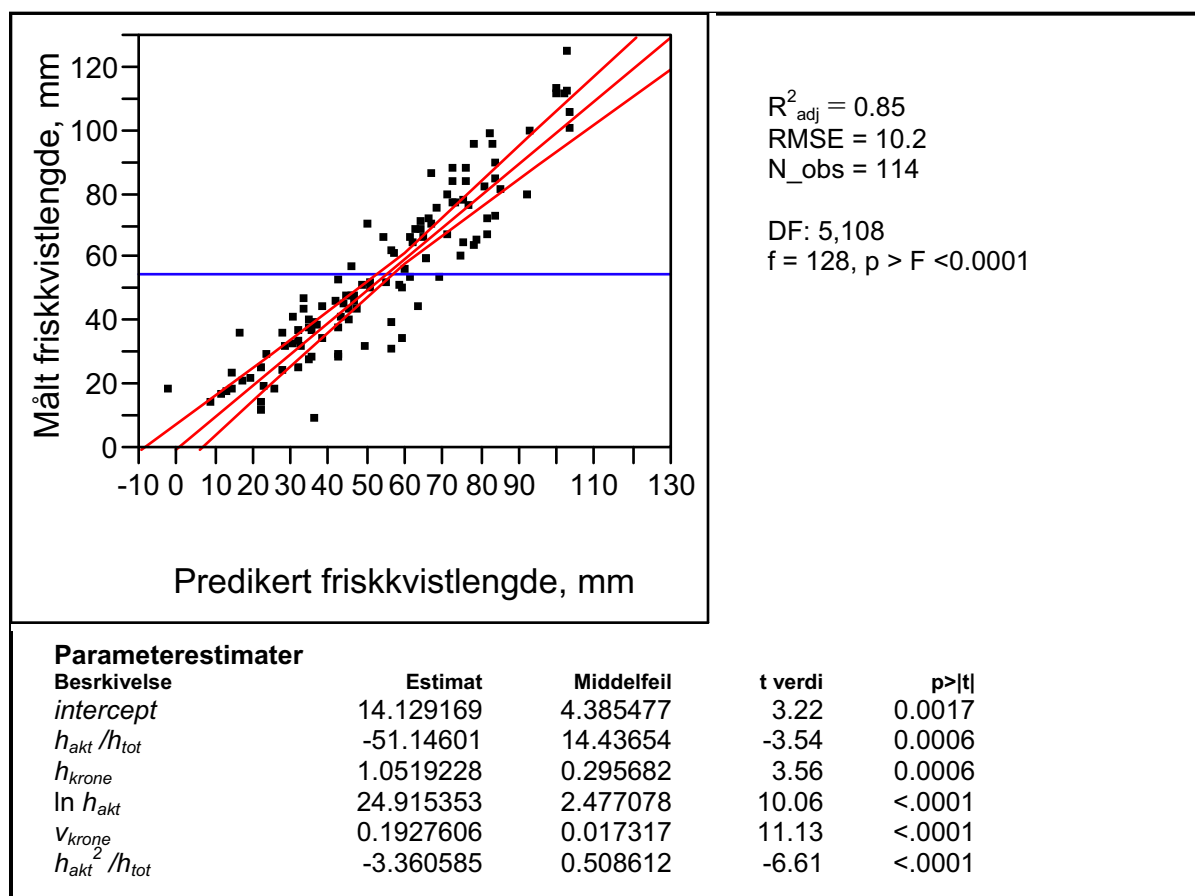
h_{tot} er totalhøyden til treet (m)

h_{akt} er aktuell høyde i treet langs stammen (m)

h_{krone} er kronehøyden ut fra ALS-dataene (m)

v_{krone} er kronevolumet ut fra ALS-dataene (m³)

Resultatene for den valgte modellen er vist i figur 11.



Figur 11, Resultater fra modellen for friskkvistlengde.

4 Diskusjon

4.1 *Material og datainnsamling*

Et stort ankepunkt mot de modellene som ble utviklet, er den begrensede geografiske fordelingen av prøveflatene. Selv om datamaterialet ble samlet inn fra to relativt forskjellige bestand, der det ene var på høyproduktiv mark mens det andre var på mer blokkrik mark med stort innslag av furu, så ligger de to bestandene i nærheten av hverandre. Avstanden mellom bestand A og B var om lag 3 km. Hvordan modellene fungerer i granbestand på andre lokaliteter er ukjent.

Ettersom de treteknologiske målingene er svært tidkrevende, ble kun et utvalg på 10 trær målt i laboratoriet. 30 trær ble imidlertid hogd og målt ute i skogen. I hvert av de to bestandene ble det lagt ut tre prøveflater. Det kan hende at det hadde vært bedre å legge ut to prøveflater i tre forskjellige bestand i stedet for tre prøveflater i to. Det ville ha ført til bedre geografisk spredning av datamaterialet, samt redusert faren for at en spesiell bestandshistorikk gjør modellene mindre generelle. Likevel satte ALS-materialet grensene for den geografiske spredningen, ettersom materialet kun var fra Aurskog-Høland kommune. Hadde i tillegg det innsamlede materialet vært større og mer geografisk fordelt kunne verifisering av modellene mot et uavhengig materiale blitt aktuelt.

4.2 *ALS-data og enkelttresegmentering*

Et av problemene for samtlige av de tre hovedmodellene som ble utviklet, er at de krever informasjon om de enkelte trærne. Selv om både materialet i dette arbeidet og metodikken for enkelttresegmenteringen ble utviklet i en fleraldret granskog, er det mange trær som ikke blir identifisert. I artikkelen som omhandler enkelttresegmenteringen (Solberg et al., 2006) vises det at av de dominerende trærne blir over 90 % av alle trærne identifisert. Av de undertrykte trærne blir kun 20 % funnet. Det er imidlertid de største trærne som er av mest betydning, siden de har størst volum og er de som vil bli avvirket først. Derfor er ekstra informasjon om hvilke kvaliteter disse trærne har av størst interesse.

En annen viktig aspekt angående enkelttresegmenteringen er klassifiseringen av treslaget. Resultatet av segmenteringen gir ingen informasjon på dette punktet. Ettersom det i det foreliggende arbeidet var gjort diametermålinger og treslagsklassifisering for samtlige trær på prøveflatene, ble denne informasjonen brukt som grunnlag ved utplukkingen av forsøksstrær. Videre utvikling av metodikken for enkelttresegmentering kan nok etter hvert gi gode resultater også for treslagsklassifiseringen.

Som grunnlag i dette arbeidet er også kronesegmentene benyttet, altså kroneutstrekningen til hvert av de segmenterte enkelttrærne. I og med at mindre trær ikke blir gjenkjent like bra som store trær, er det også muligheter for at de kronesegmentene som er benyttet ikke bare viser utstrekningen til ett enkelt tre, men at mindre trær i nærheten blir tatt for å være en del av et større tre. Dette kan igjen skape støy i målingene ved at noen av ALS-målingene som er blitt benyttet i de forskjellige beregningene ikke "hører til" hos det aktuelle treet.

4.3 Friskkvistdiameterprofil, største kvister

Modellen for kvistdiameterprofilen for de største kvistene består av flere delmodeller, der ingen av modellene er perfekte. Derfor ble modellene testet opp mot materialet målt i laboratoriet. En underestimering av den største kvisten på gjennomsnittlig 2,6 mm ble funnet. Grunner til dette kan være flere, men en av årsakene er antageligvis at grunnlagsmaterialet som ble brukt for utviklingen av modellen var basert på de ti grøveste greinene pr. meter langs stammen. Der hvor de to målte greinene satt på samme kvistkrans ble både den største og nest største greina målt. Derimot foregikk testingen av modellen på det laboratoriemålte materialet, der kun den største kvisten pr. kvistkrans ble benyttet. En annen årsak kan være at kvistmålingene ute i skogen bare kunne foretas på de greinene som ikke var klemte ned under det felte treet. Dermed er det mulig at det hos enkelte trær ikke var de to største greinene som ble målt, ettersom de kunne befinne seg under treet.

I motsetning til andre modeller utviklet for greindiameter, inneholder modellen ingen andre variabler enn det som kan avledes fra ALS-dataene. Eneste unntaket er treslaget, som ikke blir gitt i enkelttresegmenteringen, og dermed ble forutsatt som en kjent variabel. Både Øyen &

Høibø (1999) og Moberg (1999) benyttet blant annet treets diameter og bestandsalder som forklaringsvariabler. Det er grunn til å tro at disse to variablene, sammen med ALS-dataene, kunne ha gitt en bedre modell. Forskjellen mellom målt og estimert kvistdiameter hadde et standardavvik på 5,6 mm. Høibø et al. (2002) benyttet gjennomsnittlige årringbredder i brysthøyde, bonitet og kranshøyde for å forklare kvistdiameter. De fikk en RMSE-verdi på 3,5 mm for sin modell, altså en noe mindre residualspreddning enn modellen utviklet på grunnlag av ALS-dataene.

4.4 Levende eller døde greiner / kvister

Modellen som inneholdt kvistdiameter som en av forklaringsvariablene, (Modell 3.1), viste et bra resultat ved testing mot det laboratoriemålte materialet. 92 % av kvistene ble rett klassifisert. Modellen ble laget på grunnlag av målinger av 19 trær. Testingen av modellen foregikk på målinger fra 8 av disse trærne. Dette kan være grunner til at resultatene ble så gode. Modellen uten kvistdiameter ga også et ganske godt resultat. De forklaringsvariablene som er felles for de to modellene fikk like fortegn i begge modellene. Viser parameterestimaterne med negativt fortegn indikerer det redusert sannsynligheten for at en kvist er død. Det er spesielt aktuell høyde over bakken (h_{akt}) som skiller seg ut i begge modellene. Kji-kvadratsummen er for begge modellene størst for aktuell høyde. Fortegnet er negativt. Det betyr at det er mindre sannsynlighet for å få døde kvister jo lengre opp i treet en kommer. Det er logisk siden krona er yngre og det er mer lys jo lengre opp i krona en kommer. Totalhøyden (h_{tot}) gir også et betydelig bidrag i modellen. Den er i modell 2.1 positiv, altså større trær gir økt sannsynlighet for døde kvister. Dette virker også logisk, d.v.s. at større trær har en større andel av døde kvister enn mindre trær når man ser på det totale antallet kvister. Også i modell 2.2 viser totalhøyden seg som en viktig variabel, men logaritmen av totalhøyden har et annet fortegn enn totalhøyden uten noen form for transformeringer. Dette kan skyldes at det er ikke-lineære effekter ved totalhøyde som forklaringsvariabel for sannsynligheten for død eller levende kvist. Derimot gir ikke kronehøydemalet (h_{krone}) fra ALS-dataene noe særlig større bidrag i modellene. I både modell 2.1 og 2.2 har kronehøyden den minste kji-kvadratsummen, samtidig er også fortegnet negativt. Det betyr at en høyere kronegrense gir redusert sannsynlighet for døde kvister. Dette virker ulogisk. Derimot hvis kronegrensen krysses med andre forklaringsvariabler

greindiameter i modell 2.1 og totalhøyde i modell 2.2 er fortegnet positivt. Dette kan tyde på at kronegrensen er relatert til andre av treets størrelser og mål. Grunner til dette kan være metoden som blir benyttet for å sette kronegrensen ut fra ALS-punktene.

4.5 Friskkvistlengde

Modellen 4.1 estimerer den gjennomsnittlige friskkvistlengden fra roten til toppen av det enkelte treet. Vestøl & Høibø (1998) benyttet brysthøydiameteren og årringbredden til å estimere den gjennomsnittlige friskkvistlengden, men da i de nedre delene av trærne. I den levende delen av treets krone vil stort sett friskkvistlengden være lik stammeradiusen. Det kunne derfor vært mer hensiktsmessig at modellen for friskkvistlengde, modell 4.1, ble utviklet på grunnlag av kvistene fra bakkehøyde til et stykke opp i den levende krona, der variasjonen i friskkvistlengde er større.

Modellen inneholder trehøyde (h_{tot}) og aktuell høyde, (h_{akt}). Disse variablene er også mulige å fremskaffe uten bruk av ALS-målinger. Parameterestimatene til de to variablene er signifikante og variablene tilfører derfor økt forklaringsgrad til modellen. Kronevolum (v_{krone}) er en annen variabel som er benyttet i modellen. Denne er til forskjell fra trehøyde og aktuell høyde ikke vanlig å benytte i modeller, ettersom måling av denne størrelsen er vanskelig ved bruk av konvensjonelle metoder. Derimot har et mål for kronehøyden blitt benyttet ved estimering av friskkvistlengde (Vestøl & Høibø 1998; Moberg 1999). Da er det imidlertid høyde opp til et bestemt punkt oppe i treet der for eksempel den første levende greina sitter eller der det er to greiner i samme krans som har blitt benyttet. Den kronehøyden som ble benyttet i det foreliggende arbeidet er bestemt av den vertikale fordelingen av ALS-målinger og ikke ut fra høyden opp til et visst antall greiner eller lignende. Men denne høyden i modellen reduseres residualspredningen signifikant, men ikke like mye som de andre variablene

Regresjonsmodellen viste en god tilpasning til målingene med en R^2 på 0,85. RMSE verdien var på 10,2 mm. Vestøl & Høibø (1998) benyttet en litt annen tilnærming for å forklare friskkvistlengden. I stedet for en kontinuerlig funksjon utviklet de en modell for friskkvistlengde i hver av kvistkransene. 0, 10, 20, 30 og 40 % av treets høyde fikk hvert sin

modell. De verdiene de fikk for RMSE ligger mellom 10,4 og 17,3 mm i de nevnte andelene av treets høyde, med en gjennomsnittlig RMSE på 14,2 mm. Her bestod forsøksmaterialet av 60 trær mens det i foreliggende arbeid kun ble brukt åtte trær som grunnlag for modellen. En RMSE verdien på 10,2 mm, samt en høy f-verdi for kronevolumet avledet fra ALS-data kan imidlertid tyde på at kronevolumet sier vel så mye om friskkvistlengden som brysthøydediameteren og årringbredder, som ble benyttet av Vestøl & Høibø (1998).

4.6 Konklusjon

Dette arbeidet har vist at det er mulig å modellere kvistegenskaper hos gran ved hjelp av data fra flybåren laserskanning. Modellene gir resultater som ligger på høyde med tidligere modeller basert på manuelt målte variabler. Ankepunkter for modellene i arbeidet er at de har liten generell gyldighet, ettersom datagrunnlaget er fra et geografisk lite område. Treslaget gis ikke i enkelttresegmenteringen, og er derfor forutsatt kjent. Mengden datamateriale er også ganske lite, men modellene består av delmodeller som hver og en kan gjøres sikrere med et større datamateriale.

Ettersom modellene kun baserer seg på ALS-data trengs ingen ekstra bestandsvariabler. Hvis flybåren laserskanning benyttes kan tidkrevende feltmålinger vise seg å være unødvendige. Det må da forutsettes at ALS-målingene er av en slik kvalitet som er blitt benyttet som grunnlag for modellene. Likevel er ikke alt synlig fra et fly, og målingene som benyttes er i sin simpleste form kun et stort antall høydemålinger. Derfor kan også modeller som inneholder feltmålte data vise seg å være nødvendige hvis kvistegenskapene skal bli benyttet som et grunnlag for å anslå verdier av trevirket i en skogbrukstakst. Samtidig er det også viktig å huske på at trevirkets kvalitet er bestemt av mer enn bare kvistegenskaper. Kunnskapen om kvistegenskapene hos et tre må også relateres til konkrete egenskaper hos trebaserte produkter, for på den måten få en økonomisk verdi.

Et viktig grunnlag for modellene er kunnskap om hvert enkelt tre. Uten denne kunnskapen om blant annet treslag, trehøyde og kroneutstrekning, er det heller ikke mulig å avlede de nødvendige variabler for modellene. Det foregår mye arbeid på å gi bedre metoder for enkelttresegmentering. Med at de enkelte trærne med større sikkerhet kan identifiseres vil

dette både gi bedre grunnlag for kvistmodellene, samt at kvistegenskaper for trær som i dag ikke er mulige å identifisere kan estimeres. Dette vil da gi et helhetlig bilde av kvistegenskapene til et bestand, og dermed være mulig å benytte som et grunnlag for beslutninger som tas for bestandet, ett eksempel er valg av tidspunkt for hogst.

5 Referanseliste

Blom Geomatics, 2006. Oppdragsrapport NO06740

Föreningen Svenska Sågverksmän, 1994, Nordisk tre, Sorteringsregler for skurlast av furu och gran, ISBN: 91-7322-178-3

Gobakken, T., Næsset, E., 2005. Weibull and percentile models for lidar-based estimation of basal area distribution. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 490-502

Høibø, O.A., Turnerblom, E., Briggs, D., 2002. Vertical profiles of knot characteristics in young coastal U.S. Douglas-fir plantations. *Proceedings of the Fourth Workshop IUFRO WP S5.01.04. "Connection between Forest Resources and Wood Quality : Modelling Approaches and Simulation Software"* Harrison Hot Springs, British Columbia, Canada, September 8-15, 2002, Nepveu Editor, 274-281.

Maguire, D.A., Hann, D.W., 1987. A stem dissection technique for dating branch mortality and reconstructing past crown recession. *For. Sci.* 33: 858-871.

Moberg, L., 1999. Models of internal knot properties for *Picea abies*. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria* 121: 26 pp

Næsset, E., 2004. Practical Large-scale Forest Stand Inventory Using a Small-footprint Airborne Scanning Laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164-179

Optech inc. 2006. Specifications Optech ALTM 3100EA, www.optech.ca

Pape, R. 1999. Effects of Thinning Regime on the Wood Properties and Stem Quality of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 38-50

Prevista AS, 2007, Områdetakst Aurskog-Høland

- Solberg, S., Næsset, E. & Bollandsås, O., M., 2006. Single Tree Segmentation Using Airborne Laser Skanner Data in a Structurally Heterogeneous Spruce Forest. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72: 1369-1378
- Standard Norge, 1997. NS-INSTA 142, Nordiske regler for visuell styrkesortering av trelast
- Statistisk Sentralbyrå, 2007 Skogstatistikk 2005, Norges offisielle statistikk (NOS D 367). ISBN: 978-82-537-7128-1
- Vestøl, G.I., Høibø, O.A., 1998. Prediction of knot diameter in *Picea abies* (L.) Karst. In: Vestøl, G.I., Single-tree models of knot-properties in Norway spruce. Dep. For. Sci., Agric. U. Nor., Ås, Doctor Scientiarum Theses 1998:34, 17 pp.
- Øyen, O., Høibø, O.A., 1999. Sound knot length in relation to crown wryness and the annual ring width for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) In: Øyen, O., Wood quality in old stands of Norway spruce, Dep. For. Sci., Agric. U. Nor., Ås, Doctor Scientiarum Theses 1999:151