



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp

Fakultetet for Miljøvitenskap og naturforvaltning

Nøyaktighet og presisjon ved høydemålinger på enkeltrær

Accuracy and precision in field measurements of
individual tree height

Elisabeth Annie Anderheim Hansen

Skogfag

Forord

Denne masteroppgaven på 30 studiepoeng markerer en fullført mastergrad i skogfag og slutten av en 5-årig utdannelse ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven handler om feil ved målinger av høyde på enkeltrær.

Først og fremst ønsker jeg å takke min hovedveileder; Dr. Ole Martin Bollandsås for god veiledning, både i statistikk og gjennom hele skriveprosessen. Videre vil jeg takke professor Tron Eid og statistikkveileder Hilde Vinje for gode råd og tips. Jeg vil også takke alle ansatte og studenter ved NMBU som stilte opp og målte trehøyder under feltarbeidet til denne oppgaven. Takk til Maria Åsnes Moan og Lars Magnus Hansen for korrekturlesing.

Til slutt vil jeg takke min far, øvrige familie og venner for all støtte jeg har fått på veien. Takk til medstudenter for fem innholdsrike år ved NMBU.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Steinkjer, 28. april 2021

Elisabeth Annie Anderheim Hansen

Sammendrag

For å kunne ta rasjonelle beslutninger knyttet til forvaltning av skog er det viktig at det finnes oppdatert og pålitelig informasjon om skogressursene. Ved hjelp av takseringer kan en hente ut informasjon om skogressursene, og i slike skogtakster er målinger av høyde og diameter i brysthøyde av enkeltrær grunnleggende elementer. Feil i målingene vil direkte påvirke nøyaktighet og presisjon av estimerte tømmervolum eller karbonbeholdninger. Hovedmålet med denne studien var å kvantifisere nøyaktighet og presisjon på høydemålinger på individuelle trær. Datamaterialet til studien ble samlet inn i Ås kommune, Viken fylke, og besto av 71 trær av gran og furu. I tillegg representerte trærne tre forskjellige høyde- og tetthetsklasser. Fasithøydene til trærne ble funnet ved hjelp av en totalstasjon. Høydemålingene ble utført av 13 ulike forsøkspersoner som hadde erfaring med høydemålinger. Forsøkspersonene ble gruppert etter grad av erfaring, med henholdsvis litt og mer erfaring. De statistiske analysene ble gjort i programmet R Studio, og omfattet gjennomsnittlig differanse, gjennomsnittlig standardavvik og RMSE (root mean square error). For å undersøke hvordan målefeil varierer med treslag, tetthet og høyde, ble det gjort variansanalyser og laget en blandet lineær modell. Resultatene viste en systematisk, tilfeldig og total feil for alle målinger på henholdsvis 0.9 %, 6.5 % og 6.6 %. Det var signifikante forskjeller i målefeil mellom enkelte av forsøkspersonene, men når forsøkspersonene ble gruppert etter grad av erfaring kunne det ikke påvises signifikante forskjeller mellom gruppene. Feil varierte mellom grupper av tetthetsklasser, høydeklasser og treslag, men det var kun målinger mellom treslag som var signifikant forskjellig fra null. Lineærmodellen forklarte 6.1 % av de totale variasjonene i målingene, der tetthet, høyde og treslag forklarte kun 1.3 % av variasjonene, mens effekten av ulike personer forklarte 4.1 %.

Abstract

Making the right decisions in forest management requires updated and reliable information about forest resources. Obtaining information about quantitative and qualitative properties of forests through inventories, is a prerequisite for rational decision making related to management of forests. In such forest inventories, measurements of height and diameter breast height of individual trees are important elements. Errors in the measurements are directly affecting the accuracy and precision of estimated timber volumes or carbon stocks. The main objective of this study was to quantify accuracy and precision of measurements on individual tree height. The data collection consisted of 71 sample trees, of Spruce and Pine, at a study area in Ås, Viken county. The sample trees also represented three different height- and density classes. The actual height for all trees were measured with a theodolite total station. The sample trees were measured independently by 13 observers, which had experience in height measurements. The observers were also grouped after degree of experience. Statistical calculations were done in the programme R Studio, and consisted of mean difference, standard deviation and RMSE (root mean square error). In order to investigate how measurement errors vary between tree species, density and height, the data was analysed with an analysis of variance and mixed linear model. Systematic, random and total error for the whole dataset were 0.9 %, 0.6 % and 6.6 %, respectively. The results from the analysis of variance showed that there was clear significant difference between observers. However, experience could not explain the differences. Measurement errors differed between groups of density, height and tree species, only measurement errors between tree species were significantly different from zero. The linear model explained 6.1 % of the total variation in height measurements errors, and only 1.3 % of this variation was explained by tree species, density and height. The variation due to different observers was 4.1 %.

Innholdsfortegnelse

Forord	III
Sammendrag	IV
Abstract.....	V
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Landsskogtakseringen.....	4
1.3 Skogbruksplantakster	4
1.4 Metoder for manuelle høydemålinger.....	7
1.5 Årsaker til målefeil	9
1.6 Problemstilling.....	14
2. Materiale og metode	15
2.1 Studieområde	15
2.2 Datainnsamling	16
2.3 Dataprosessering	17
2.4 Statistiske analyser.....	18
3. Resultater	26
3.1 Tilfeldige og systematiske feil for datamaterialet som helhet	26
3.2 Systematiske og tilfeldige feil på gruppenivå	28
3.3 Faste og tilfeldige effekter på differanser	33
4. Diskusjon	34
5. Konklusjon.....	41
6. Litteratur	42

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Skog er en begrenset ressurs og vokser over et langt tidsperspektiv. Det tar omtrent 80 til 100 år før en nyplantet skog kan produsere tømmer. I tillegg til produksjonen av tømmer har skogen andre goder og funksjoner som skal ivaretas samtidig. Skogen produserer også drikkevann, mat og fornybar energi. Skogen har regulerende funksjoner som pollinering og klimaregulering og kulturelle funksjoner som friluftsliv og rekreasjon. Skogen må derfor forvaltes på en bærekraftig måte slik at skogressursene ivaretas for framtidige generasjoner. For å kunne ta rasjonelle beslutninger knyttet til forvaltning av skog er det viktig at det finnes oppdatert og pålitelig informasjon om skogressursene. Dette gjelder for all forvaltning både på globalt, regionalt, nasjonalt og lokalt nivå.

På globalt nivå er informasjon om skogressursene viktig for at en rekke internasjonale organisasjoner skal kunne forvalte de globale skogressursene på en bærekraftig måte. I slike organisasjoner forplikter medlemslandene til å forvalte de nasjonale skogressursene etter organisasjonens lover, regler eller avtaler. De forente nasjoner (FN) er en global organisasjon som jobber for økt kunnskap og løsning av internasjonale problemstillinger innenfor en rekke fagområder. Norge rapporterer om landets skogressurser blant annet til FNs organisasjon for ernæring og landbruk (FAO), som har som sin viktigste oppgave å gjøre slik informasjon tilgjengelig som grunnlag for en god forvaltning. FNs klimakonvensjon har laget avtaler som skal gi løsninger på klima- og miljøutfordringer i verden. Et eksempel er Parisavtalen som har til hensikt å begrense de globale utslippene av klimagasser. Medlemslandene er forpliktet til å følge retningslinjene i avtalen, hvor målet er å begrense den globale oppvarmingen slik at gjennomsnittstemperaturen ikke stiger mer enn to grader før det 21. århundre er over. I henhold til Parisavtalen bruker Norge blant annet informasjon om ressursene i skogen for å rapportere om årlig utslipp og binding av karbon.

Den Europeiske Union (EU) er et eksempel på en regional organisasjon som også bruker informasjon om skogressurser i sitt arbeid. EU utarbeider og vedtar direktiver blant annet rettet mot forvaltning av skog i et klimaperspektiv, som må følges opp av EUs medlemsland. Norge må, som en følge av EØS-avtalen, både rapportere informasjon om skogressursene til EU og følge opp direktiver som kommer fra EU. Til gjengjeld gir EØS-avtalen Norge mulighet til å selge varer og tjenester til Europa, blant annet tømmer.

I tillegg skal myndighetene i Norge definere rammebetingelser for hvordan forvaltning av skog skal foregå på nasjonalt nivå, slik at både globale og nasjonale mål blir oppfylt. For at myndighetene skal gjøre dette er det viktig at det finnes oppdatert informasjon om skogressursene i Norge. Myndighetene utformer tiltak og virkemidler i skogsektoren som skal peke ut retningen for hvordan skogressursene skal forvaltes. Et eksempel på relevant informasjon i denne sammenheng er tilvekst av skog. Dersom tilveksten er lav sammenlignet med tidligere år, så kan myndighetene utforme tiltak som har til formål å øke planting eller redusere hogstaktivitet. Skogpolitiske tiltak og virkemidler kan implementeres i form av skattepolitikk, økonomiske støtteordninger eller lovgivning. Skogbruket har spesielle skattepolitiske virkemidler, eksempelvis gjennom skogfondsordningen, som forplikter skogeiere til å sikre finansieringen av en bærekraftig forvaltning av skogressursene. En skogfondskonto er skogeierens egen konto, der de skal avsette 4 til 40 % av bruttoverdien til tømmer fra hogst for å sikre finansiering av videre investeringer i egen skog. Midlene som blir satt av til skogfond kan blant annet benyttes til skogkultur, bygging og vedlikehold av skogsveger, skogbruksplanlegging og miljøtiltak (Meld. St. 6, 2016-2017). Skogeiere kan også søke om økonomiske støtteordninger, i form av tilskudd, som skal stimulere til økt verdiskapning, bærekraftig utnyttelse av skogressursene og bevaring av miljøverdier i skog. Tilskuddsordninger administreres på kommunalt nivå. Skogeieren kan blant annet få tilskudd til skogkultur, skogsveger, tømmerkaier, skogbruksplanlegging og klimatiltak i skog (Meld. St. 6, 2016-2017). Et eksempel på tilskudd som klimatiltak er tettere skogplanting, der målet er å stimulere til økt karbonbinding. Informasjon om skogressursene på eiendommene til de enkelte skogeierne på kommunalt nivå er nødvendig for at kommunen skal kunne innvilge tilskuddsordningene.

Skogeiere har også interesse av informasjon fra skogen. Skogeiere har forskjellige mål og ønsker i forvaltningen av egen eiendom. Eiendomsstørrelse kan være en årsak til dette. En av hovedårsakene er at skogeiere har individuelle preferanser. Det er også ulike tradisjoner for bruk av eiendom i ulike deler av landet. Videre er naturgrunnet og terrengforholdene forskjellig i Norge. I 2019 ble det registrert omtrent 125 000 skogeiendommer i Norge med et areal større enn 25 dekar (SSB, 2020b). Skogeiendommene omfatter alt fra mange små eiendommer på 25-99 dekar til noen få store eiendommer på over 20 000 dekar. Svært mange (60 %) av eiendommene er mindre enn 250 dekar. Informasjonen som er av interesse for skogeier vil avhenge av hvilke mål skogeieren har for sin skog og hvor stor skogeiendom eieren har. Mange skogeiere har tidligere vært, og er fortsatt, opptatt av å utnytte skogens økonomiske

potensiale. Da vil skogeieren sannsynligvis ha interesse av informasjon om for eksempel tømmervolum og treslagsfordeling. Andre skogeiere er mer opptatt av det biologiske mangfoldet og vil forvalte skogen med en målsetting om å verne og ta vare på viktige arter i skogen. Da kan for eksempel informasjon om andel død ved i skogen være aktuelt for skogeieren, ettersom død ved er næring og habitat for insekter. Noen skogeiere ønsker å kombinere både tømmerproduksjon og rekreasjon i form av jakt og friluftsliv. For å avveie utnyttelsen av både tømmerressurser og viltressurser på en bærekraftig måte, vil for eksempel informasjon om fôrtilgang til viltbestander være viktig for beslutninger i en slik sammenheng. Naturgrunnlaget varierer rundt omkring i Norge. Noen områder har mye produktiv skog, som kan gi økonomisk utbytte, mens andre områder har ikke det. Eiendommer med mye produktiv skog vil ha større potensiale for skogeiere som har økonomiske målsettinger, sammenlignet med eiendommer med lite produktiv skog. Terrengforhold har også betydning for hvor hvilken målsetting skogeier velger. Det kan for eksempel være krevende å drive skogbruk i bratt terreng, der driftskostnadene er større enn inntektene tømmeret gir, noe som kanskje vil utelukke økonomiske målsettinger.

Informasjon om skogressursene kan skaffes ved å gjennomføre en datainnsamling. En datainnsamling av kvantitative og kvalitative egenskaper i skog blir som regel gjort gjennom en taksering, også kalt ressurskartlegging. I en taksering gjøres det først registreringer av ulike størrelser ute i skogen. På bakgrunn av registreringene blir det videre gjort beregninger for å skaffe ønsket informasjon. Det finnes ulike typer takseringer, avhengig av hvilke ressurser som skal kartlegges og dermed ulike typer registreringer av størrelser. Dersom skogeieren for eksempel ønsker å utnytte skogens økonomiske potensiale, vil registreringer av størrelser som treslag, høyde og diameter brysthøyde (1.3 m over bakken) være relevant for å beregne tømmervolum eller biomasse. Derimot vil andre størrelser være viktigere dersom skogeier ønsker å ta vare på biologisk mangfold og miljøverdier i skog. Et eksempel på en ressurskartlegging som overvåker miljøverdier i skog er Miljøregistreringer i Skog (MiS). Gjennom MiS registreres ulike typer livsmiljøer, som er levested for en rekke arter i skogen. Eksempler på livsmiljøer som kartlegges i MiS er død ved og gamle trær. Registreringer av furu og løvtréslag som rogn, osp og selje vil være aktuelt for å kombinere tømmerproduksjon med forvaltning av bestandsstørrelser av elg, ettersom disse treslagene inngår som fôr til elgen. Registreringer og målinger av enkeltrær er grunnleggende for ulike typer takseringer. Målet for alle skogtakster er å kvantifisere ressurser av interesse for et definert område, men i mange tilfeller er disse ressursene volum av trevirke eller biomasse. I mange land er det vanlig å ha et

nasjonalt program for overvåkning av skogen gjennom skogtaksering på nasjonalt nivå, i tillegg til at det utføres takseringer på lokalt nivå. Landskogtakseringen er et eksempel på et nasjonalt overvåkningsprogram for skog i Norge. På lokalt nivå gjennomføres det takseringer for skogeiendommer gjennom skogbruksplantakster.

1.2 Landsskogtakseringen

Landsskogtakseringen er et nasjonalt overvåkningsprogram for Norge. Gjennom Landsskogtakseringen samles det inn data om skogressursene i Norge basert på repeterte målinger på permanente prøveflater. Prøveflatene har en størrelse på 250 m² og er lokalisert i et systematisk rutenett på 3x3 km som dekker hele landet. Prøveflatene blir målt på nytt hvert femte år, og dermed blir skogtilstanden overvåket. Disse dataene er en del av Norges offisielle statistikk og blir brukt blant annet av offentlig forvaltning, skognæringen, forskning og miljødirektoratet, i tillegg til internasjonal- og nasjonal rapportering. I offentlig forvaltning blir dataene brukt som grunnlag for utforming av skogpolitikk og kontroll av effekten av skogpolitiske tiltak. Skognæringen bruker informasjonen fra landskogtakseringen til strategisk planlegging for bioenergi, treforedlings- og sagbruksindustri. Dataene blir også brukt i forskningen for å gi økt kunnskap om skogens dynamikk og til utvikling av modeller for ulike formål. Miljødirektoratet rapporterer om opptak og utslipp av klimagasser fra skog, i henhold til FNs klimakonvensjon. På nasjonalt nivå rapporteres statistikk om skog til statistisk sentralbyrå. Blant annet rapporterte Landsskogtakseringen at stående volum i Norge for 2019 var estimert til 978 millioner m³, mens årlig tilvekst var 24.1 millioner m³ (SSB, 2020a).

1.3 Skogbruksplantakster

Det gjennomføres også skogtakseringer på lokalt nivå som skal gi et grunnlag for forvaltning og oversikt over skogressursene for den enkelte skogeiendom, i form av en skogbruksplan. Utarbeidelsen av en skogbruksplan til skogeiere innenfor en eller flere kommuner blir administrert av fylkeskommunen. Fylkeskommunen oppretter en prosjektgruppe med representanter fra blant annet skogeierne, som samarbeider med planavdelinger fra ulike skogeierlandslag. Planavdelingene må her presentere en beskrivelse av hvordan de skal gjennomføre takseringene for å få levert estimer for skogressursene med ett visst nivå av nøyaktighet og en kostnad for takseringene. Fylkeskommunen bestemmer hvilke av planavdelingene som får tildelt prosjektet på bakgrunn av kvalitet og pris. Skogbruksplanen inneholder først og fremst en beskrivelse av skogtilstanden, både på eiendomsnivå og for

enkeltbestand. En skogeiendom er delt inn i bestand som er områder, på minst 2 dekar, der trærne har samme behandlingsenhet og enhetlig treslagsfordeling. Omtrent alle skogeiendommer i Norge har en skogbruksplan som inneholder informasjon om volum og annen viktig informasjon om skogen. Etter en viss tid (10-20 år) blir det som regel gjennomført en ny taksering for å oppdatere skogbruksplanene. I tillegg blir skogbruksplanene oppdatert underveis når skogbehandling og tiltak blir gjennomført i de enkelte bestand på eiendommene.

Skogtakseringene blir i dag basert på en to-steps metode som kalles arealbasert lasertakst. Skogen blir som regel først taksert med flybåren laserskanning for det aktuelle takstområdet. Deretter blir det gjennomført en utvalgskartlegging med feltmålinger i form av prøveflater. Flybåren laserskanning eller LiDAR (Light detection and ranging) er en aktiv fjernmålingsteknikk, der en sensor er plassert under et fly og sender ut lysbølger som reflekteres tilbake når de treffer bakken og toppen av trærne. Sensoren registrerer tidspunkt for returene og beregner avstanden mellom bakken og tretoppene. Basert på denne metoden kan trehøyder måles fra fly (Wang et al., 2019). Trehøyder fra den arealbaserte taksten gjør det mulig å estimere for eksempel middelhøyde, treantall og tømmervolum over store områder (Næsset, 2004). I utvalgskartleggingen blir feltmålinger brukt til å kalibrere statistiske modeller for å kunne få et godt forhold mellom laserdata og felldata.

I planleggingsprosessen for en utvalgskartlegging blir skogarealet først delt inn i strata, som er klasser for skog basert på treslag, alder og produktivitet/bonitet. Stratifiseringen blir gjort ved hjelp av fototolkning. Et visst antall prøveflater blir systematisk fordelt for hver strata i et systematisk rutenett. Prøveflatene må ha et kjent areal, for eksempelvis 250 m². I selve gjennomførelsen av utvalgskartleggingen, besøker en taksator prøveflatene i felt og registrerer diameter, treslag, høyde og andre viktige egenskaper til enkeltrærne. I felt navigerer taksatoren seg fram til dit flaten skal plasseres ved hjelp av satellittposisjonsutstyr og registrerer posisjonen til sentrum av prøveflata. Deretter klaves alle klavetrær på prøveflaten, der trærne blir registrert med diameter og treslag. Videre velges det ut et antall prøvetrær hvor det skal gjøres ytterligere målinger, for eksempelvis trehøyde. Trehøyden blir ikke målt for alle trær på prøveflaten, men kun for et utvalg av trærne, da målingene er tidkrevende samt at det kan være vanskelig å måle trehøyden i bestand med tett kronedekke. (Fortin & DeBlois, 2010). Prøvetrærne blir som regel valgt ut gjennom en bestemt regel som er proporsjonal med trærnes grunnflate. Høyden til trærne som ikke ble med utvalget, kan bli predikert fra et forhold mellom høyde og diameter som passer til utvalget i prøveflaten (Fortin & DeBlois, 2010). Andre egenskaper kan også

vrderes eller måles på prøveflaten, slik som bonitet, men i denne sammenheng er høyde og diameter det viktigste. Målinger av høyde og diameter til enkelttrær blir videre brukt til å beregne viktige skogvariabler, som for eksempel volum og biomasse, på hver av prøveflatene.

Stående volum kan ikke bli målt direkte uten å felle trærne. Stående volum for enkelttrær blir derfor predikert ved hjelp av volummodeller avhengig av diameter og høyde (Fortin & DeBlois, 2010). I Norge er det utviklet ulike modeller som beskriver volum for enkelttrær eller bestand. Volummodellene til Vestjordet (1967) og Brantseg (1967) brukes ofte til å predikere volum til enkelttrær av henholdsvis gran og furu. Estimater for volumet av en prøveflate er summen av volumprediksjonene for enkelttrær. Prøveflatene blir som nevnt posisjonert ved hjelp av satellittposisjoneringsutstyr som gir nøyaktigheter på cm-nivå, slik at de korresponderende laserskanningsdataene kan relateres til variablene fra prøveflatene ved hjelp av statistiske modeller. Modellene gjør det mulig å predikere variabler på et areal der laserskanningsdata er tilgjengelig. Nøyaktigheten og presisjonen til de statistiske modellene, og dermed kvaliteten til prediksjonene og estimatene, avhenger av feilnivået til målingene av diameter og høyde.

Volumestimatet for en prøveflate i en utvalgskartlegging er påvirket av flere feilkilder som akkumuleres i kjeden av målinger og beregninger. Hovedkildene til feil på bestands- eller stratumnivå er utvalgsfeil, prediksjonsfeil og målefeil (Fortin & DeBlois, 2010). Utvalgsfeil er feil knyttet til at utvalget aldri vil representere variasjonene i skogforholdene fullt ut og slike feil akkumuleres videre til volumestimatet for et bestand eller et skogområde (Temesgen et al., 2015). For eksempel vil en forflytting av en prøveflate noen hundre meter lengre nord resultere i et annet volumestimat sammenlignet med opprinnelig plassering. Utvalgsfeilen er også påvirket av størrelsen til utvalget, der et utvalg med mange prøveflater vil gi mindre feil enn et utvalg med få prøveflater på et tilsvarende totalareal. Prediksjonsfeil er feil som oppstår i prediksjonene av variabler når modellene blir anvendt med målinger som det er knyttet usikkerhet til. Det kan for eksempel oppstå prediksjonsfeil på grunn av at volummodellene er basert på et forhold mellom høyde og diameter med predikerte høyder istedenfor observerte høyder for noen av trærne på prøveflaten. Predikerte høyder på et utvalg av trærne på en prøveflate, istedenfor observerte høyder, kan føre til at variansen i volumprediksjonene for prøveflata blir dobbelt så stor (Fortin & DeBlois, 2010). Målefeil er feil som oppstår i målingene av variabler på prøveflaten. Innenfor kilder av feil kan det være forskjellige typer feil, systematiske feil og tilfeldige feil. Systematiske feil er feil som ensidig slår ut i en retning

av korrekt verdi, mens tilfeldige feil er feil som slår ut i begge retninger av korrekt verdi. Systematiske feil kan for eksempel være forårsaket av feil bruk av måleinstrumentet, og vil påvirke nøyaktigheten til målingene. Tilfeldige feil kan for eksempel være avlesningsfeil, og vil påvirke presisjonen til målingene. Målefeil vil ha betydning for nøyaktigheten og presisjonen til volumprediksjonen for den enkelte prøveflate. Målinger vil direkte påvirke nøyaktighet og presisjon av estimerte tømmervolum eller karbonbeholdninger. Dersom feilene til målingene er store, vil feilene i estimatet for tømmervolum og karbonbeholdning også være store. Det er derfor viktig å ha et feilestimat knyttet til ulike skogparameterne som blir estimert fra målingene. Slik kan brukerne av den estimerte informasjonen evaluere hvor mye de kan stole på estimatene.

Det er ikke bare feilkilder fra feltbasert takst med utvalgskartlegging som vil kunne bidra til feil i estimater for skogvariabler på bestands- eller skognivå. Det er også usikkerhet knyttet til den arealbaserte lasertaksten. Det vil for eksempel være usikkerhet i den romlige oppløsningen til laserdataene, som er avhengig av pulstetthet, flyhøyde og takstbredden til laserinstrumentet. Utvalgsfeil i denne sammenhengen vil være knyttet til hva slags romlig oppløsning lasertaksten har, i tillegg til kanteffekten som er forårsaket av at prøveflatene ikke er store nok til å registrere trærne som står i kanten av prøveflatene. Dette fører til at det oppstår feil i sammenhengen mellom laserdata og felldata (Mauya et al., 2015). Den største usikkerheten i den arealbaserte lasertaksten er knyttet til modellene som beskriver sammenhengen mellom laserdata og felldata. Sammenhengen mellom laserdata og felldata vil være avgjørende for hvor store prediksjonsfeil som vil være knyttet til prediksjonen av ulike skogvariabler.

1.4 Metoder for manuelle høydemålinger

Det finnes forskjellige metoder for å måle trehøyde fra bakken. Trehøyden defineres i denne sammenhengen som avstanden mellom stubbeavskjær og tretoppen. Den enkleste metoden for høydemålinger er å løfte en teleskopstang med kjent lengde til toppen av treet som skal måles. Denne metoden er imidlertid begrenset til å måle små trær (Larjavaara & Muller-Landau, 2013). For store trær blir høydemålinger ofte gjort med lette, håndholdte instrumenter som brukes til å måle trærne fra en avstand (Larjavaara & Muller-Landau, 2013), såkalte manuelle høydemålere. Instrumenter som brukes til høydemåling kan bygge på to ulike trigonometriske metoder, tangensmetoden og sinusmetoden.

Den tradisjonelle metoden for høydemålinger har lenge vært den såkalte tangensmetoden. Tangensmetoden er basert på at instrumentet måler vinkler mellom avstander fra taksatorens målested til toppen og bunnen av treet, der taksatoren må stå på en avstand som tilsvarer en trelengde eller lengre. I dag er det også vanlig å bruke avstandsmålere med laser som tillater en alternativ metode, kalt sinusmetoden. I motsetningen til tangensmetoden, kan målinger basert på sinusmetoden bli utført nært treet, ettersom trehøyden blir målt direkte med en laser avstandsmåler (Goodwin, 2004). Larjavaara og Muller-Landau fant ut at målinger med tangensmetoden viste små systematiske feil, men noe større tilfeldige feil. For sinusmetoden var det derimot store systematiske feil ved lave høyder og små tilfeldige feil.

I Norge har det i mange år vært vanlig å bruke høydemålingsinstrumentene fra finske Suunto og svenske Haglöf. Disse instrumentene er basert på tangensmetoden. Suunto høydemåler er et instrument med en innebygd vinkelmåler som omgjør vinkler til høyder. Ved bruk av instrumentet må taksatoren stå på en avstand på 15 eller 20 m fra treet, og inne i instrumentet er det to skalaer for hver av disse avstandene (Fitje, 1988). Høydemålingsinstrumentet Vertex IV fra Haglöf baserer seg på ultralydteknologi og en elektronisk sensor som registrerer instrumentets helling. Høydemålingene med Vertex er avhengig av en transponder som festes på treet. Transponderen blir brukt til å måle avstanden mellom instrumentet og treet. Instrumentet måler deretter vinkelen mellom denne avstanden og tretoppen når taksatoren sikter på tretoppen (Larjavaara & Muller-Landau, 2013). Selv om instrumentene Suunto og Vertex IV er basert på ulike teknologier er likevel prinsippene for høydemåling like, der vinkelen mellom bunnen og toppen av treet bør være mindre eller lik 45 grader (Goodwin, 2004).

I en studie fra 1960-tallet der studenter målte trehøyder med ulike instrumenter (Fitje, 1967), ble det konkludert med at målingene med Suunto var de mest nøyaktige blant de undersøkte instrumentene. Målingene med Suunto hadde en tilfeldig feil på 0.8 - 0.9 m mellom studenter og det var en overestimering av høyde på 0.35 m i gjennomsnitt (Fitje, 1967). Vertex var imidlertid ikke med i denne studien på grunn av at instrumentet ikke var utviklet enda. Päivinen og Nousiainen (1992) studerte nøyaktigheten til høydemålinger med Suunto, der resultatene var en tilfeldig feil på 0.67 m og en systematisk feil på -0.32 m. Tabell 1 viser en oversikt over resultater fra tidligere studier, der det er benyttet ulike typer instrumenter.

1.5 Årsaker til målefeil

Nøyaktigheten og presisjonen til målinger i felt blir påvirket av mange faktorer. Tettheten i skogen er en faktor, da det kan være vanskeligere å identifisere tretoppene i en tett skog, sammenlignet med skog med færre stammer. Wang et al. (2019) sammenlignet høydemålinger gjort i felt med flybåren laserskanning (ALS) og bakkebasert laserskanning (TLS). Høyder målt i felt var i økende grad forskjellig fra høyder målt ved både ALS og TLS etter hvert som kompleksiteten i skogstrukturen økte. Ganz et al. (2019) gjorde en tilsvarende studie, og sammenlignet nøyaktighet mellom feltbaserte, ALS og fototolkede høydemålinger på douglasgran, med felte trær som kontrolldata. Høyder målt i felt med en manuell høydemåler ble underestimert med 0.66 m, og det var ingen signifikante forskjeller i differanse mellom fasit og manuelle høydemålinger for ulike høydeklasser.

Jurjević et al. (2020) sammenlignet manuelle høydemålinger med Vertex IV på 122 eiketrær med ulike fjernmålingsteknikker, og brukte en totalstasjon til å finne fasithøyder. De konkluderte med at trehøyde påvirket feilnivået og økte med økende kronedekning. I en studie på høydemålinger på tre vanlige japanske løvtrær ble det funnet at differansen mellom fasit og manuelle høydemålinger økte når trehøyden økte, sammenlignet med høyder målt ved hjelp av ALS (Moe et al., 2020). Andersen et al. (2006) brukte en totalstasjon til å finne fasithøyder, for å sammenligne høydemålinger fra LiDAR med vanlige feltbaserte metoder. De fant en signifikant forskjell for gjennomsnittlig høyde mellom LiDAR og manuelle høydemålinger, der sistnevnte hadde mer nøyaktigere estimer. De fant også en systematisk feil på -0.27 m for manuelle høydemålinger. Holmgren (2019) undersøkte pålitelighet til høydemålinger ved bruk av Vertex, ALS og fototolkning i Sverige, og brukte data fra TLS som referanse. De manuelle høydemålingene viste størst usikkerhet blant de tre metodene.

Videre har forskjellige treslag ulike kroneformer som kan påvirke feilnivået til høydemålingene. En årsak til dette kan være at det er vanskeligere å måle trehøyden for treslag med runde kroneformer, sammenlignet med treslag som har en trekantet kroneform. Sterenczak et al. (2019) undersøkte nøyaktigheten på høydemålinger for en rekke tempererte og boreale treslag i Polen. For furu fant de en større gjennomsnittlig total feil enn for gran. Sibona et al. (2016) gjorde en tilsvarende studie med gran, furu og lerk i Italia, der manuelle høydemålinger ble sammenlignet med kontrollmålinger av felte trær. De fant en større total feil for gran enn for furu, som er det motsatte av funnet til Sterenczak et al. (2019)

Terrengforhold kan også spille en rolle for nøyaktigheten, blant annet er helling en faktor som kan påvirke feilnivået til høydemålingene. En årsak til dette er at det kan være vanskeligere å se tretoppen for et tre som står i helling, sammenlignet med tre som står på flat mark. En annen årsak er knyttet til vinkelen mellom tretoppen og taksatoren, som vil være større dersom taksatoren står i bunnen av en bakke, sammenlignet med samme avstand på flat mark. En vinkelfeil vil også få større effekt etter hvert som målevinkelen blir brattere. Helling var en av de faktorene som bidro til en total feil på over 10 % i funnene til Sterenczak et al. (2019). En annen faktor som kan påvirke nøyaktigheten til høydemålingene er at trær kan være skjeve, slik at målt høyde blir feil. Dette er på grunn av at høydemålingsinstrumentet måler den vertikale avstand fra bunnen til toppen av treet. Dersom et lodd ble sluppet ned fra tretoppen og loddet ikke treffer stammen, men en vissavstand unna, er treet skjevt. Denne faktoren kan imidlertid begrenses ved at taksatoren måler trehøyden fra den siden der treet er skjevt.

Feilnivå til høydemålinger kan også være forårsaket av at høydemålinger er gjort av ulike taksatorer og det kan være variasjon i målinger og i bruken av ulike instrumenter. Sterenczak et al. (2019) fant ut at type instrument hadde en liten relativ effekt på nøyaktigheten på høydemålingene. De fant derimot at det var noe større effekt av de ulike taksatorene som utførte høydemålingene. Taksatorer med ulik grad av erfaring eller trening med instrumentene vil ha forskjellig praksis for målinger og enkelte taksatorer kan bruke instrumentet feil. Kitahara et al. (2010) vurderte kvaliteten for diameter- og høydemålinger mellom uerfarne observatører på ulike stadier av trening med bruk av Vertex. Det fant en signifikant endring i differanser mellom målinger fra første til andre runde med trening, der observatørene oppnådde betydelig bedre kvalitet etter andre runde med trening.

I en studie som undersøkte nøyaktigheten til høydemålinger med smarttelefoner og sammenlignet dette med høydemålinger med Vertex, ble det funnet en tilfeldig og systematisk feil for høydemålinger med Vertex på henholdsvis på 1.2 % og -0.3 % (Villasante & Fernandez, 2014). Krause et al. (2019) gjorde en studie om nøyaktighet på høydemålinger med Vertex for et datamateriale på 34 furutrær, hvor trærne deretter ble felt for kontrollmåling. De fant en systematisk og tilfeldig feil på henholdsvis 0.9 % og 1.6 %. Luoma et al. (2017) undersøkte presisjon ved målinger av diameter og høyde, basert på et datamateriale med 319 trær og utført av 4 ulike testpersoner. Gjennom variansanalyser fant de ingen signifikant forskjell mellom høyde- og diametermålinger utført av de ulike personene. Det var heller ingen forskjell i

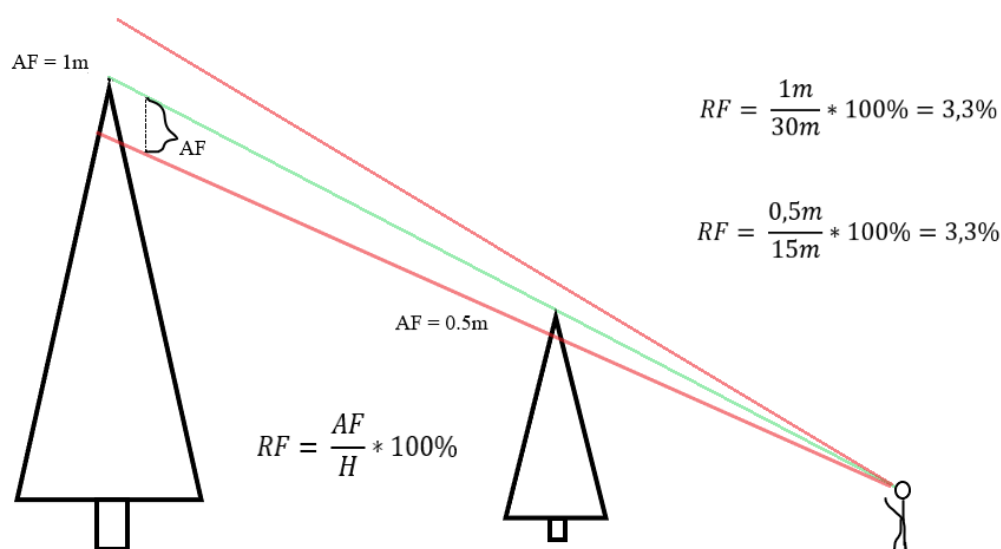
presisjon som følge av trestørrelse. Tilsvarende gjorde Fitje (1967) på 10 grantrær i Ås, Norge og fant ingen sammenheng mellom feil og trehøyde.

Tabell 1: Oversikt over resultater for nøyaktighet og presisjon knyttet til høydemålinger fra tidligere studier, der resultater innen treslag er notert med F for furu og G for gran.

Lokasjon	Treslag	Instrument	Fasit-målinger	Tilfeldig feil, m (%)	Systematisk feil, m (%)	Total feil (RMSE), m (%)	Referanse
Norge	Gran	Suunto	Ja	0.8-0.9 m (4.0)	0.35 m (1.7)		Fitje (1967)
Finland	Gran, Furu	Suunto	Ja	0.65 m	-0.32 m		Päivinen og Nousiainen (1992)
Tyskland	Douglas Lerk	Vertex	Ja		-0.66 m (-1.1)	1.02 m (2.9)	Ganz et al. (2019)
Kanada	Ponderosa furu, Lerk	Impulse 100	Ja	0.27 m (1.4)	-0.27 m (-1.4)		Andersen et al. (2006)
Polen	Furu, Gran mfl.	Vertex	Ja			F: -0.32 m (-1.2) G: -0.11 m (-0.2)	Sterenczak et al. (2019)
Italia	Lerk, Gran Furu	Truepulse	Ja			1.08 m (4.6) F: 0.94 m (5.8) G: 1.34 m (6.7)	Sibona et al. (2016)
Finland	Gran, Furu, Bjørk	Vertex	Ja	0.5 m (2.9)			Luoma et al. (2017)
Spania		Vertex	Nei	(1.2)	(-0.3)		Villasante og Fernandez (2014)
Tyskland	Furu	Vertex	Ja	0.27 m (1.6)	0.14 m (0.9)	0.30 m (1.8)	Krause et al. (2019)

Flere av studiene som er nevnt i Tabell 1, har rapportert feilnivået i både relative og absolutte størrelser, mens enkelte studier har rapportert feilnivået i kun en av størrelsene. En relativ feil beskriver den absolutte feilen i forhold til gjennomsnittshøyden. I en situasjon der det skal gjøres beregninger av samlet usikkerhet til et estimat på volum for et område, og der en må ta hensyn til usikkerhet både med tanke på utvalget og de enkelte målingene som ligger til grunn

for beregningene, er det mer hensiktsmessig å forholde seg til relative størrelser istedenfor absolutte størrelser med ulik benevnning. Når det gjelder høydemålinger er det i tillegg en kompliserende faktor at måleusikkerheten i absolutte størrelser i de aller fleste tilfeller er avhengig av trehøyden. Sterenczak et al. (2019) fant at absolutte feil økte med økende trehøyde, mens relative feil ikke viste tilsvarende mønster. Årsaken til dette er at usikkerheten for høydemålinger er knyttet til vinkelmålingen mellom basis av treet og tretoppen. Forutsatt at målingen blir foretatt omtrent en trelengde unna, vil målevinkelen være uavhengig av trehøyden, og dermed vil også den relative måleusikkerheten være uavhengig av trehøyden. Dette er illustrert i Figur 1, der et tre på 30 m med en absolutt tilfeldig feil på 1 m, og hvor feilen er knyttet til vinkelmålingen i en høydemåler, vil ha samme relative tilfeldige feil som et tre på 15 m med en absolutt tilfeldig feil på 0.5 m.



Figur 1: Skisse som visualiserer definisjonen av relative og absolutte feil. Et tre på 30 m i høyde med en absolutt tilfeldig feil på 1.0 m, hvor feilen er knyttet til vinkelmålingen i en høydemåler, vil ha samme relative tilfeldige feil som et tre på 15 m i høyde med en absolutt tilfeldig feil på 0.5 m.

Det er ingen studier som har undersøkt feil i høydemålinger med Vertex IV og hvordan usikkerheten varierer med ulike faktorer i Norge. Det er gjort noen få studier i andre land, men de har ofte stor variasjon i størrelsen på datamateriale, og ulike metoder for målinger gjør det krevende å sammenligne resultater direkte. Noen studier har sammenlignet høydemålinger fra manuelle høydemålere med kontrollmålte høyder ved hjelp av en totalstasjon eller felte trær, mens andre studier har sammenlignet med høyder fra ALS eller TLS. Ulike studier har også benyttet ulike typer manuelle høydemålere. Det er få studier som har undersøkt systematiske

og tilfeldige feil mellom testpersoner. Flesteparten av studiene har utført målingene ved å benytte kun én testperson som er ekspert på manuelle høydemålinger. Med denne metoden vil ikke resultatene reflektere en gjennomsnittlig taksator. Usikkerheten er ofte påvirket av ulike faktorer som for eksempel skogforhold. Det er stor variasjon i skogforhold mellom studier, spesielt når det gjelder treslag, og skogforholdene i andre land reflekterer ikke nødvendigvis norske skogforhold. Det er derfor interessant å gjøre en norsk studie som undersøker sammenhengen mellom feil ved høydemålinger på enkelttrær og ulike skogforhold. For det første, er det viktig å forbedre estimater på usikkerhet knyttet til tømmervolum og biomasse. For det andre er det viktig å identifisere de faktorer som bidrar til feil slik at en kan redusere eventuelle feilkilder.

1.6 Problemstilling

Hovedmålet med denne studien var å kvantifisere og evaluere nøyaktighet og presisjon på høydemålinger for individuelle trær utført med Haglöf Vertex IV hypsometre. Studien tok sikte på å besvare følgende tre delproblemstillinger:

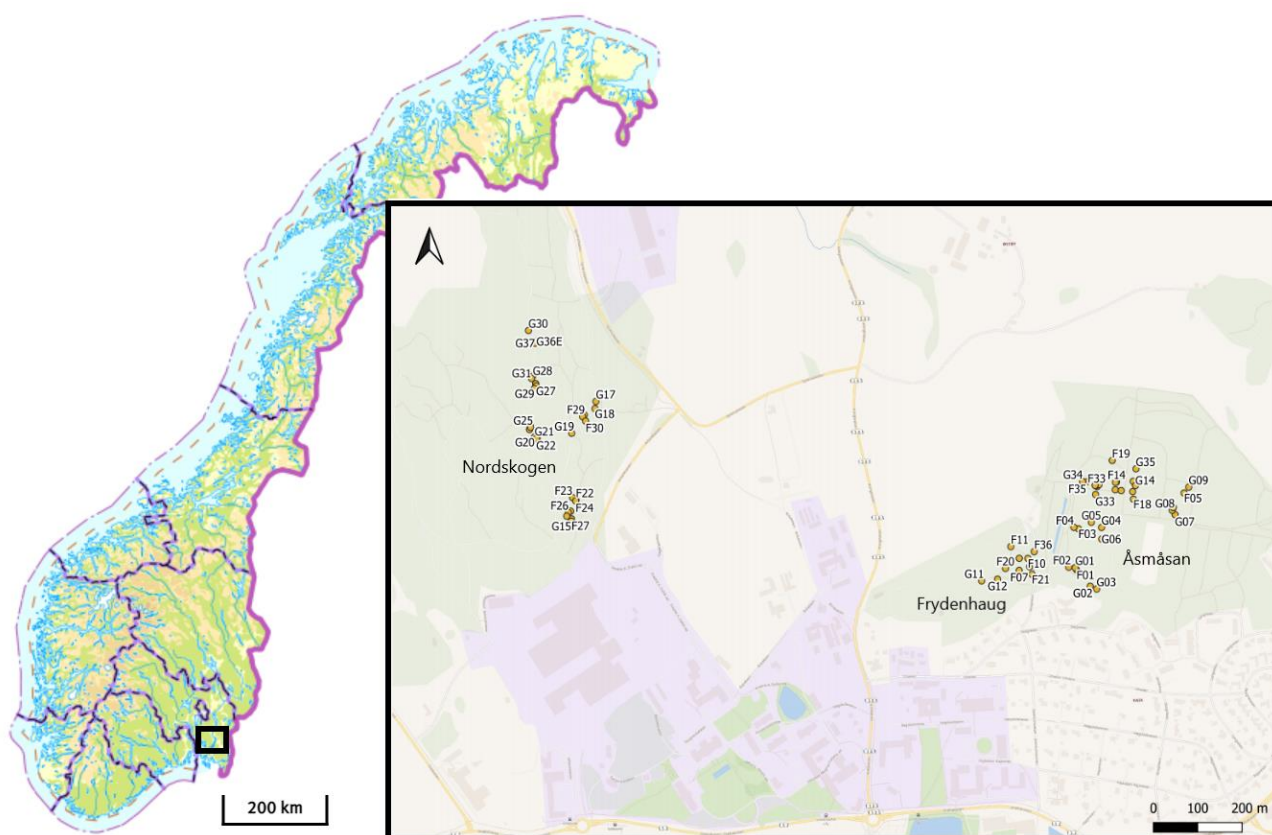
- 1) Er den absolutte, tilfeldige målefeilen avhengig av trehøyden?
- 2) Er det forskjeller i målefeil mellom forsøkspersoner og grupper av forsøkspersoner?
- 3) Er det forskjeller i målefeil mellom treslag, tetthetsklasser og høydeklasser?

Først testes det om den tilfeldige målefeilen i absolutte størrelser er avhengig av trehøyden. Deretter beregnes tilfeldige, systematiske og totale feil for datasettet som helhet og grupper av forsøkspersoner. Tilsvarende beregninger blir gjort for grupper av treslag, tetthetsklasser og høydeklasser. Forskjeller i målefeil mellom forsøkspersoner og mellom grupper av forsøkspersoner med ulik grad av erfaring, analyseres ved hjelp av variansanalyser. Videre analyseres effekt av treslag, høyde- og tetthetsklasser på høydemålinger ved hjelp av en variansanalyse og en blandet lineær modell.

2. Materiale og metode

2.1 Studieområde

Studieområdet er lokalisert i Ås kommune, Viken Fylke, og omfatter skogen til Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Universitetsskogen har en rekke norske og utenlandske treslag. Hovedtreslagene er furu (*Pinus sylvestris*), gran (*Picea abies*) og bjørk (*Betula pubescens*). Datamaterialet ble samlet inn på tre områder i universitetsskogen; Nordskogen, Frydenhaug og Åsmåsan (fig. 2).



Figur 2: Oversiktskart over studieområde, med GPS-posisjoner til alle trær fordelt på områdene Nordskogen, Frydenhaug og Åsmåsan.

2.2 Datainnsamling

Feltarbeidet ble planlagt og gjennomført i tre ulike steg.

2.2.1 Preliminære vurderinger

I steg 1 ble det gjort vurderinger av hvor mange trær som skulle inkluderes i datamaterialet og hvilke ytre faktorer som skulle være representert i målingene. De ytre faktorene som ble valgt var treslag, høyde og tetthet. Treslagene ble begrenset til gran og furu. Disse to treslagene ble valgt fordi de representerer de mest økonomisk viktige treslagene i Norge, i tillegg til at de har to ulike kroneformer som kan ha ulik vanskelighetsgrad med tanke på måling. I tillegg ble det bestemt å velge ut trær som skulle representere tre forskjellige høyde- og tetthetsklasser. Høydeklassene ble definert etter høyder mindre enn 15 m, mellom 15 og 25, og over 25 m. Tetthetsklassene ble definert etter grunnflate og fordelt på mindre enn 10 m²/ha, mellom 10 og 20, mellom 20 og 30, og over 30 m²/ha. Det var viktig at det ble nok trær innen de ulike klassene. Samtidig måtte antallet begrenses etter hvor mye tid og ressurser som var til rådighet. I utgangspunktet var det ønskelig å fordele trærne på faktorene og ha så mange gjentak som mulig i hver av klassene. Antall gjentak ble bestemt ut ifra en vurdering av hvor mange trær det var realistisk å la en forsøksperson måle i løpet av en dag uten at det skulle gå utover presisjonen i arbeidet til vedkommende. En kom fram til at 72 trær var et realistisk antall, der fordelingen på klassene ble tre trær i hver klasse. Ettersom det er relativt flatt på Ås, ble det ikke vurdert å ha med bratthetsklasser. Derimot skulle helling bli notert for alle trær, slik at en i analysene likevel kunne ta hensyn til helling. I sum ble det planlagt at datamaterialet skulle bestå av 72 trær, fordelt likt på gran og furu, og med tre trær i hver av de aktuelle klassene.

2.2.2 Utvelgelse av trær og bestemmelse av fasit

I steg 2 ble det gjort en utvelgelse av trærne i felt og bestemmelse av fasithøyde. Det ble brukt en totalstasjon til å finne eksakt høyde, «fasithøyden», ved å måle vinkler og lengder fra totalstasjonen til stubbeavskjær og toppen av treet. Alle trær som ble valgt ble merket med bånd, gitt en ID og deretter posisjonert ved hjelp av en håndholdt GPS-mottaker, slik at det skulle være enkelt å finne de igjen. For at det skulle bli enda enklere for forsøkspersonene å finne trærne, ble trærne valgt ut i klynger på fem eller mer med en viss avstand fra hverandre. I en av klassene ble det valgt ett ekstra tre. Totalt ble det valgt ut 73 trær, hvor 37 var gran og 36 var furu.

2.2.3 Rekruttering av forsøkspersoner og innsamling av høydemålinger

I steg 3 ble det først laget et registreringsskjema for datainnsamling og det ble diskutert hvilke personer som kunne egne seg for å utføre høydemålingene. Ettersom høydemålinger i dagens skogtakster gjøres av taksatorer som har trening i takst og måling av høyder, så var det viktig at studien besto av personer som hadde erfaring i nettopp høydemålinger. Instrumenttypen som ble benyttet var Haglöf Vertex IV hypsometre. Kravet var at personene som skulle måle hadde erfaring med dette instrumentet. Forsøkspersonene som ble valgt ut besto av studenter og ansatte ved NMBU som alle hadde erfaring med måling av høyde med Vertex, men de hadde ulik grad av erfaring. For eksempel så hadde noen erfaring fra skogbruksplantakster eller landskogtaksering, mens andre hadde erfaring fra forskningsprosjekter eller undervisning. Til sammen var det 15 personer som skulle utføre datainnsamlingen til studien.

Alle forsøkspersonene fikk utdelt en Vertex høydemåler, registreringsskjema, kart og målebånd. Alle fikk også beskjed om å kalibrere instrumentet med et målebånd før de begynte med høydemålingene, slik at instrumentet hadde riktige innstillinger for avstandsmåling. Videre fikk de beskjed om at de ikke kunne kommunisere med hverandre om målinger. Alle målte 73 trær, med unntak av to som målte henholdsvis 72 og 8 trær.

2.3 Dataprosessering

Bare 71 av de 73 registrerte trærne ble valgt med videre i dataprosessen. To trær, en gran og en furu, ble ekskludert fra datamaterialet. Grantreet mistet båndet i løpet av innsamlingsperioden og det er usikkerhet om rett tre ble gjenmerket. For furutreet var avvikene store og ensidige. Antageligvis er fasithøyden feil ettersom svært tett skog medførte vanskeligheter med å finne riktig topp ved bruk av siktemidlene på totalstasjonen. I tillegg ble målingene til to av de erfarne forsøkspersonene ekskludert fra studien på grunn av at de hadde problemer med instrumentene. Til slutt besto datamaterialet av 871 observasjoner, fordelt på 71 trær og 13 forsøkspersoner. For å ta hensyn til grad av erfaring, ble forsøkspersonene delt inn i to grupper med litt og mer erfaring. Gruppen «litt erfaring» besto av tre forsøkspersoner som har noe erfaring med høydemålinger fra tidligere. Gruppen «mer erfaring» besto av de resterende 10 forsøkspersonene som hadde erfaring med høydemålinger i forbindelse med jobb eller prosjekter.

2.4 Statistiske analyser

De statistiske analysene ble gjort i programmet R Studio, og omfattet gjennomsnittlig differanse, gjennomsnittlig standardavvik og RMSE (root mean squared error). Det ble beregnet relative verdier, i tillegg til absolutte verdier, for alle beregninger. Et signifikansnivå på 0.05 ble brukt for alle analyser.

2.4.1 Feilberegninger

Feilberegninger ble gjort for datamaterialet som helhet og for ulike grupperinger av datamaterialet. Først ble det beregnet differanser mellom hver av de målte høydene og de korresponderende fasithøydene. Disse differansene er utgangspunktet for alle videre beregninger.

$$d_{ij} = \widehat{h}_{ij} - h_j \quad (1)$$

$$d\%_{ij} = \frac{(\widehat{h}_{ij} - h_j) \times 100}{h_j} \quad (2)$$

der d_{ij} og $d\%_{ij}$ er differanse mellom målt høyde ($\widehat{h}_{ij}$) utført av forsøksperson i på tre j , og fasithøyden (h_j) for tre j . I det følgende er kun beregninger basert på absolutte størrelser (d_{ij}) vist, men tilsvarende beregninger for relative termer ($d\%_{ij}$) ble også beregnet, og videre i denne oppgaven er disse indikert med suffikset «%» (som vist over).

Beregninger for datasettet som helhet

Som grunnlag for videre beregninger ble systematiske feil ($\bar{d}$) beregnet som gjennomsnittet av d_{ij} for hvert enkelt tre og hver enkelt forsøksperson. Gjennomsnittlig differanse for tre j ($\bar{d}_j$) ble beregnet som

$$\bar{d}_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} d_{ij}}{n_j} \quad (3)$$

der $\bar{d}_j$ er gjennomsnittlig differanse for tre j , i indekserer målingene utført av de ulike forsøkspersonene, n_j er antall målinger utført for tre j .

Gjennomsnittlig differanse for forsøksperson i ($\bar{d}_i$) ble beregnet som

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}}{n_i} \quad (4)$$

der $\bar{d}_i$ er gjennomsnittlig differanse for forsøksperson i , og j målingene utført for tre j , n_i er antall målinger utført av forsøksperson i .

Tilfeldige feil ble beregnet som standardavviket til differansene, fordelt på trær og forsøkspersoner på samme måte som for de gjennomsnittlige differansene. Standardavvik mellom målinger for tre j (s_j) ble beregnet som

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (d_{ij} - \bar{d}_j)^2}{n_j - 1}} \quad (5)$$

der s_j er standardavviket mellom målinger for tre j , i indekserer målingene utført av de ulike forsøkspersonene, n_j er antall målinger utført for tre j . Standardavvik mellom målinger for forsøksperson i (s_i) ble beregnet som

$$s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_i} (d_{ij} - \bar{d}_i)^2}{n_i - 1}} \quad (6)$$

Total feil (RMSE) mellom målinger for forsøksperson i ($RMSE_i$) ble beregnet som

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\bar{d}_i^2}{n_i}} \quad (7)$$

der $RMSE_i$ er kvadratroten av $\bar{d}_i^2$ dividert med n_i , der $\bar{d}_i^2$ er kvadrert gjennomsnittlig differanse for forsøksperson i , n_i er antall målinger utført for forsøksperson i , og i indekserer målingene utført av de ulike forsøkspersonene.

Beregninger innen grupper av erfaring

Forsøkspersonene ble som nevnt delt inn i grupper etter erfaring, med henholdsvis «litt erfaring» og «mer erfaring». Systematiske, tilfeldige og totale feil innen disse gruppene ble beregnet på samme måte som datasettet som helhet, men det var kun målingene til forsøkspersonene i de respektive gruppene som ble brukt som grunnlag.

Beregninger innen grupper av trær

Den gjennomsnittlige systematiske feilen innen ulike grupper ble beregnet som et vektet gjennomsnitt av de gjennomsnittlige differansene på trenivå ($\bar{d}_j$) i den aktuelle gruppen, der antall målinger (n_{jm}) på det enkelte tre (j) i den aktuelle gruppen (m) ble brukt som vekt:

$$\bar{d}_m = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n_{jm}} n_{jm}} \sum_{j=1}^{n_{jm}} \bar{d}_{jm} \times n_{jm} \quad (8)$$

der $\bar{d}_m$ er vektet, gjennomsnittlig differanse for gruppe m , $\bar{d}_{jm}$ er gjennomsnittlig differanse for tre j i gruppe m , og n_{jm} er antall trær i gruppe m og n_{jm} er målinger som ligger til grunn for $\bar{d}_{jm}$ (antall målinger for tre j i gruppe m).

Den gjennomsnittlige tilfeldige feilen for ulike grupper av trær ($\bar{s}_m$) ble beregnet som kvadratroten av gjennomsnittlig, vektet varians (s_{jm}^2) for differansene, der antall målinger for hvert tre innen den aktuelle gruppen (n_{jm}) ble brukt som vekt:

$$\bar{s}_m = \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1}^{n_{jm}} n_{jm}} \sum_{j=1}^{n_{jm}} s_{jm}^2 \times n_{jm}} \quad (9)$$

der $\bar{s}_m$ er vektet standardavvik for gruppe m , s_{jm}^2 er vektet varians for tre j i gruppe m , og n_{jm} er antall trær i gruppe m , og n_{jm} er målinger som ligger til grunn for $\bar{s}_m$ (antall målinger for tre j i gruppe m).

Total feil for ulike grupper av trær ble beregnet som RMSE, der antall målinger (n_{jm}) på det enkelte tre (j) i den aktuelle gruppen (m) ble brukt som vekt.

Total feil for gruppe m ($RMSE_m$) ble beregnet som

$$RMSE_m = \sqrt{\frac{\bar{d}_{jm}^2}{n_{jm}}} \quad (10)$$

der $RMSE_m$ er kvadratroten av $\bar{d}_{jm}^2$ dividert med n_{jm} , der $\bar{d}_{jm}^2$ er kvadrert gjennomsnittlig differanse for tre j i gruppe m , og n_{jm} er antall målinger som ligger til grunn for $\bar{d}_{jm}$.

2.4.2 Feil i relative og absolutte størrelser

For å besvare delspørsmålet om den absolutte, tilfeldige målefeilen er avhengig av trehøyde, ble en nullhypotese (H_0) testet mot en alternativ hypotese (H_1). Dersom absolutte størrelser var avhengig av trehøyden ble alle analyser basert på relative differanser fremfor absolutte differanser.

H_0 : Tilfeldige målefeil i absolutte størrelser er ikke avhengig av trehøyden

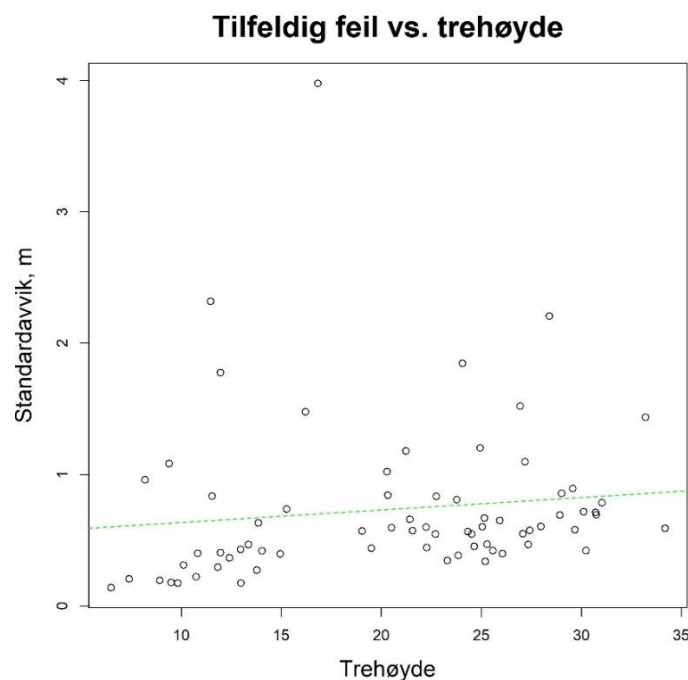
H_1 : Tilfeldige målefeil i absolutte størrelser er avhengig av trehøyden.

For å teste hypotesen ble det konstruert lineære modeller ($y=a+bx$) for sammenhengen mellom trehøyde (x) og standardavviket (y) til målefeilene for hver av de 71 trærne. Modeller for y i både relative- og absolutte termer ble konstruert. Nullhypotesen ble forkastet dersom parameterestimer (b) for trehøyde var signifikant forskjellig fra null på 95 % konfidensnivå.

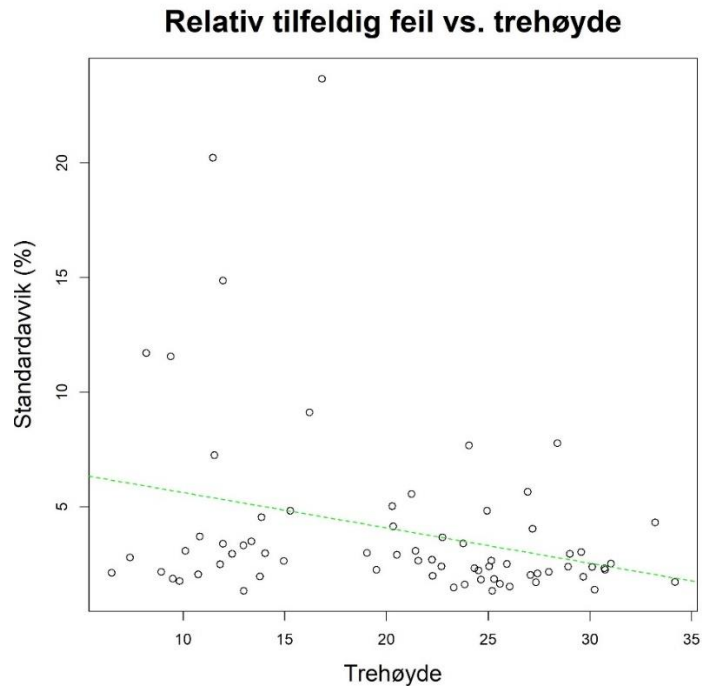
Figur 3 viser en grafisk framstilling over fordelingen av standardavvik (m) til målingene på de enkelte trærne i studien, plottet mot korresponderende trehøyde. Den grønne linjen viser den lineære modellen mellom trehøyde og det absolutte standardavviket, og denne antyder at det var en tendens til at de absolutte tilfeldige feilene økte langs gradienten av trehøyder. Trenden var likevel ikke signifikant. Dette betyr at H_0 ikke kunne forkastes, og at en ikke kunne påstå at en tilfeldig feil i meter er avhengig av trehøyden.

Figur 4 viser en grafisk framstilling over fordelingen av standardavvik (%) til målingene på de enkelte trærne i studien og korresponderende trehøyde. Den grønne linjen i figuren viser en motsatt trend, sammenlignet med Figur 3, der feilene synker med stigende høyder. Trenden i relative tilfeldige feil viste seg å være signifikant, men viste kun svake sammenhenger mellom relative tilfeldige feil og trehøyde.

I Figur 4 kan en se at det er fem trær som har et standardavvik over 10 %, og som er svært avvikende sammenlignet med resten av målingene. Grunnen til at standardavviket er høyt for disse trærne er at de har en observasjon hver som avviker med 5-13 m fra fasithøyde. For å undersøke hvor stor betydning disse observasjonene hadde for hypotesetesten, ble nullhypotesen testet på nytt uten disse fem observasjonene. Dette resulterte i at trenden i absolutt tilfeldig feil var signifikant forskjellig fra null, i motsetning til trenden i Figur 3, som betyr at en tilfeldig målefeil i meter er avhengig av trehøyden. Disse fem observasjonene viste seg å ha innflytelse på hypotesetesten ettersom H_0 ikke kunne bli forkastet når observasjonene var inkludert. Det ble valgt å bruke feil i relative størrelser fremfor absolutte størrelser i analysene på grunn av at trendene var svake og at hypotesetesten var sterkt påvirket av noen ekstreme observasjoner.



Figur 3: Grafisk framstilling av sammenhengen mellom standardavviket (m) til målingene på de enkelte trærne i studien og korresponderende trehøyde. Grønn linje viser den lineære trenden for standardavvik med økende trehøyde ($p > 0.05$).



Figur 4: Grafisk framstilling av sammenhengen mellom standardavviket (%) til målingene på de enkelte trærne i studien og korresponderende trehøyde. Grønn linje viser den lineære trenden for standardavvik med økende trehøyden (p -verdi < 0.05).

2.4.3 Variansanalyser

Ved hjelp av variansanalyse, ANOVA, ble det testet om $d\%$ var forskjellig mellom grupper. En forutsetning for å bruke variansanalyser er at residualene til variansanalysen er normalfordelte og at det er lik varians i hver gruppe. I dette datasettet er det tilnærmet lik varians i gruppene, slik at residualene er normalfordelte og dermed oppfyller kravene til metoden. For å besvare om det er signifikant forskjell mellom forsøkspersoner, ble det først gjort en enveis variansanalyse med person som forklaringsvariabel og relative differanser som responsvariabel. Videre ble det gjort en ny variansanalyse med erfaring som forklaringsvariabel, ettersom forsøkspersonene ble delt inn i to grupper med litt og mer erfaring. Dette ble gjort for å teste om grad av erfaring kunne forklare forskjeller mellom forsøkspersoner. Resultatene fra denne testen ble brukt for å avgjøre om de videre analysene skulle skille mellom personer med eller uten erfaring.

2.4.4 Blandet lineær modell

Det ble gjort to ulike analyser for å besvare spørsmålet om hvordan feil varierer med faktorer som tetthet, høyde og treslag. Først ble målingene analysert ved hjelp av en enveis variansanalyse for å teste om det var signifikant forskjell mellom grupper av faktorer. I variansanalysen var relative differanser responsvariabel og de tre forklaringsvariablene var faktorene som ble analysert; tetthetsklasser, høydeklasser og treslag. Resultatene av variansanalysene ble framstilt sammen med et boksplott, der signifikante forskjeller mellom grupper av faktorer ble indikert med bokstaver. Grupper som ikke var forskjellig fra hverandre, fikk like bokstaver som f.eks. «A», for å indikere at det ikke er forskjell mellom grupper. Grupper som er signifikant forskjellig fra hverandre fikk ulike bokstaver for å indikere at det er forskjell mellom grupper.

Dersom det var signifikant forskjell mellom grupper av faktorer, var det interessant å undersøke hvilke faktorer som hadde effekt på relative differanser. I tillegg var det interessant å undersøke om effektene av de ulike faktorene kunne forklares av at målingene er gjort av 13 ulike personer. Det ble derfor gjort en ytterligere analyse ved hjelp av en blandet lineær modell. I motsetning til variansanalysen, som kun viser hvilke faktorer som er forskjellig fra hverandre kan lineærmodellen skille mellom faste og tilfeldige effekter som har en påvirkning på responsvariabelen. Faste effekter er variabler som er av interesse for undersøkelsen og er forventet å ha en effekt på responsvariabelen, mens tilfeldige effekter er andre variabler som ikke undersøkes, men som likevel kan ha en påvirkning på responsvariabelen. I denne sammenhengen er faste effekter de faktorene som skal undersøkes, det vil si tetthet, høyde og treslag. Tilfeldige effekter er i denne sammenhengen personer, og forklarer hvor stor andel variasjon i målinger som skyldes at målingene er gjort av ulike personer. Responsvariabelen er relative differanser.

Relative differanser for målinger mellom faktorer er gitt ved modellen,

$$d\%_{ijabc} = \beta_0 + \beta_1 tetthetskl_{.ija} + \beta_2 høydekl_{.ijb} + \beta_3 treslag_{ijc} + u_i + e_{ijabc}$$

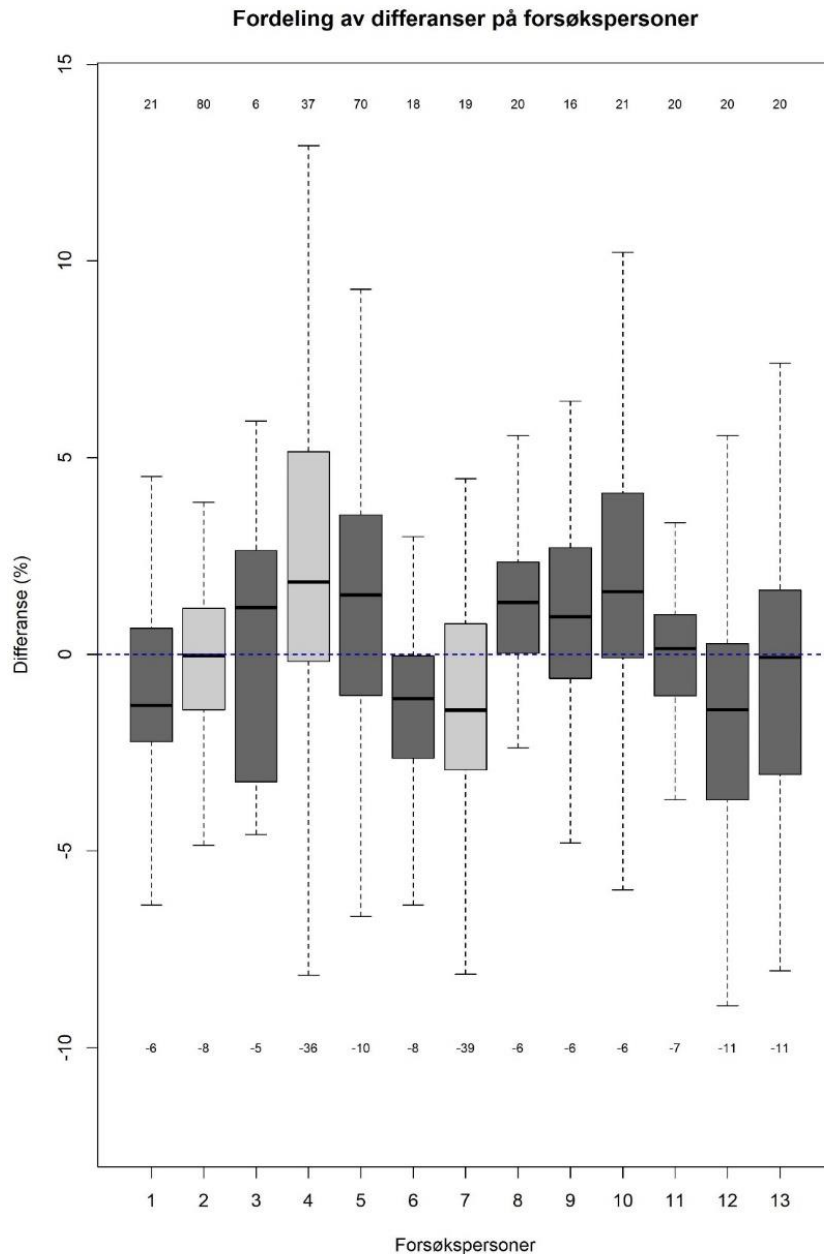
der $d\%_{ij}$ er relativ differanse for person i og tre j , i tetthetsklasse a , høydeklasse b og treslag c , β er fast effekt av de respektive faktorene, u_i er tilfeldig effekt for person i , og e_{ijabc} er andel uforklart variasjon tilknyttet person i og tre j , i tetthetsklasse a , høydeklasse b og treslag c .

Modellen forteller hvor mye variasjon i relative differanser som kan forklares av tetthet, høyde og treslag, og resterende variasjon til tilfeldige effekter fra personer og annen uforklart variasjon. De faste effektene kommer til uttrykk gjennom parameterestimaterne i modellen. Den tilfeldige effekten av person er hvor mye variasjon i $d\%$ som kan forklares av at det er forskjellige personer som måler etter at de faste effektene allerede er i modellene. Modellen har dermed justert for effekten av at målingene er gjort av mange personer, og kan dermed observere effektene som er knyttet til tetthetsklasse, høydeklasse og treslag. Modellen viser også hvor mye variasjon som ikke kan forklares av person, tetthet, høyde eller treslag, som er andel uforklart variasjon.

3. Resultater

3.1 Tilfeldige og systematiske feil for datamaterialet som helhet

Figur 5 viser fordelingen av relative differanser for de ulike forsøkspersonene som boksplott. Forsøkspersoner med ID 2, 4 og 7 ble klassifisert til å ha litt erfaring, og er i figur 5 indikert med lysegrå farge. De resterende forsøkspersonene ble klassifisert til å ha mer erfaring og er i figuren indikert med mørkegrå farge. For å begrense utstrekningen av y-aksen, markerer endepunktene på linjene ut fra nedre og øvre del av hver boks henholdsvis 2.5- og 97.5-persentilen i stedet for ekstremverdier, og maksimums- og minimumsverdier er indikert med tall for relative differanser. Maksimums- og minimumsdifferanser varierer fra henholdsvis 80 % til 6 % og -39 % til -5 %. Dette indikerer at noen observasjoner ligger langt fra fasithøyden, selv om de fleste er innenfor en relativ differanse på ± 5 %.



Figur 5: Fordelingen av relative differanser (%) for de ulike forsøkspersonene. Forsøkspersoner med ID 2, 4 og 7 ble klassifisert til å ha litt erfaring, og er indikert med lysegrå farge. De resterende forsøkspersonene ble klassifisert til å ha mer erfaring og er indikert med mørkegrå farge. For å begrense utstrekningen av y-aksen, markerer endepunktene på linjene ut fra nedre og øvre del av hver boks henholdsvis 2.5- og 97.5-persentilen i stedet for ekstremverdier, og maksimums- og minimumsverdier er indikert med tall for relative differanser.

Tabell 2 viser gjennomsnittlige feil, tilfeldige (s_i) og systematiske ($\bar{d}_i$), for målinger utført av personer med ulikt erfaringsnivå. Det fremgår av Tabell 2 at $\bar{d}_i$ var noe større for personer med litt erfaring enn for personer med mer erfaring, med $\bar{d}_i$ på 1.1 % og 0.8 % for henholdsvis litt

og mer erfaring. s_i for de respektive gruppene var 9.2 % og 5.3 %. Total feil ($RMSE_i$) for forsøkspersoner med litt erfaring var 9.3 %, mens forsøkspersoner med mer erfaring hadde en total feil på 5.4 %. For alle målinger samlet var s_i , $\bar{d}_i$ og $RMSE_i$ henholdsvis 6.5 %, 0.9 % og 6.6 %. Variansanalysen viste at det var signifikante forskjeller mellom forsøkspersoner. Derimot kunne ikke klassifisering av erfaring forklare forskjeller mellom personer. Dermed ble videre analyser gjort med bakgrunn i alle målinger.

Tabell 2¹: Standardavvik (s_i), gjennomsnittlig differanse ($\bar{d}_i$) og $RMSE_i$ for alle målinger og målinger gjort av forsøkspersoner med “litt erfaring” og “mer erfaring”.

Kategori	s_i , m (%)	$\bar{d}_i$, m (%)	$RMSE_i$, m (%)
Litt erfaring	1.61 (9.2)	0.30 (1.1) *	1.63 (9.3)
Mer erfaring	0.91 (5.3)	0.17 (0.8) *	0.92 (5.4)
Alle	1.12 (6.5)	0.20 (0.9) *	1.13 (6.6)

$p\text{-verdi} < 0.05 = *$

3.2 Systematiske og tilfeldige feil på gruppenivå

Tabell 3 viser systematiske feil ($\bar{d}_m$) og tilfeldige feil ($\bar{s}_m$) innen ulike grupper av tetthetsklasser, høydeklasser og treslag. Innenfor de ulike gruppene varierte $\bar{s}_m$ fra 3.1 % til 6.7 %, hvor målingene i høydeklasse «<15 m» hadde størst tilfeldig feil. $\bar{d}_m$ varierte fra 0.3 % til 1.4 % for de ulike gruppene, hvor furu og tetthetsklasse «10-20 m²/ha» viste størst systematisk feil. Total feil (RMSE) varierte mellom 4.1 % til 8.4 %.

Mellom tetthetsklasser varierte $\bar{s}_m$ fra 3.3 % til 6.6 %, og $\bar{d}_m$ fra 0.4 % til 1.4 %. Mellom høydeklasser varierte $\bar{s}_m$ fra 3.1 % til 6.7 % og $\bar{d}_m$ fra 0.3 % til 1.2 %. For gran og furu viste resultatene at $\bar{s}_m$ var 3.8 % og 5.2 %, mens $\bar{d}_m$ var 0.4 % og 1.4 % for henholdsvis gran og furu. Likevel var differansene mellom målte og kontrollmålte høyder for de fleste grupper av tetthet, høyde og treslag ikke signifikant forskjellig fra null, med unntak for høydeklasse «15-25 m» og furu.

¹ s_i , $\bar{d}_i$ og $RMSE_i$ viser til ligning (4), (6) og (7)

Tabell 3²: Standardavvik ($\bar{s}_m$) og gjennomsnittlig differanse ($\bar{d}_m$) for grupper av tetthet, høyde og treslag.

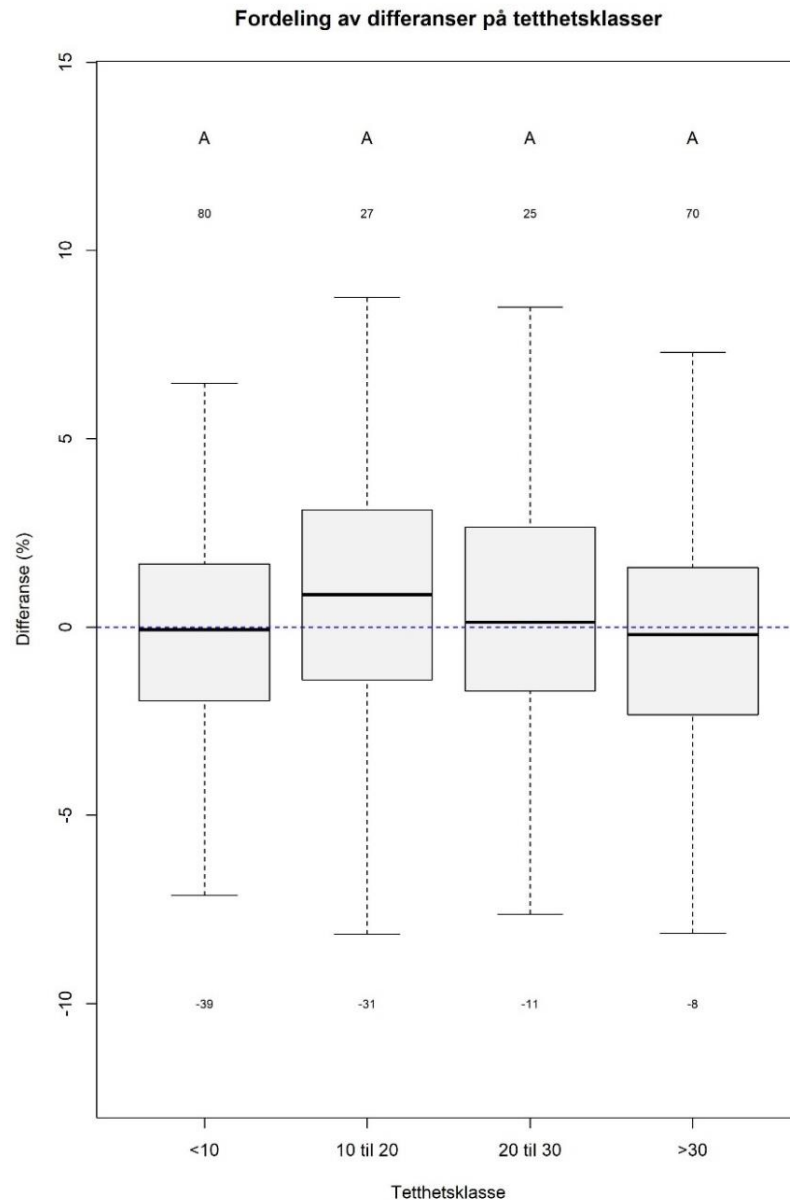
Kategori	$\bar{s}_m$, m (%)	$\bar{d}_m$, m (%)	$RMSE_m$, m (%)
Tetthet >30	0.91 (4.5)	0.08 (0.4)	1.03 (6.6)
Tetthet 20-30	0.74 (3.5)	0.19 (0.6)	0.92 (4.1)
Tetthet 10-20	0.71 (3.3)	0.24 (1.4)	1.00 (6.3)
Tetthet <10	1.31 (6.6)	0.27 (0.9)	1.51 (8.4)
Høyde <15	0.76 (6.7)	0.05 (0.3)	0.94 (8.3)
Høyde 15-25	1.18 (5.4)	0.25 (1.2) *	1.24 (6.6)
Høyde >25	0.86 (3.1)	0.29 (1.1)	1.22 (4.4)
Gran	0.78 (3.8)	0.13 (0.4)	0.98 (5.5)
Furu	1.08 (5.2)	0.26 (1.4) *	1.28 (7.5)

p-verdi <0.05 = *

3.2.1 Tetthetsklasser

Figur 6 viser fordelingen av relative differanser ($\bar{d}\%$) i tetthetsklasser. Figur 6 og Tabell 3 antyder at det er størst gjennomsnittlig differanse i tetthetsklassen «10-20 m²/ha». En variansanalyse viste at $\bar{d}\%$ ikke var signifikant forskjellig fra null i noen av tetthetsklassene. Maksimums- og minimumsverdier av relative differanser for alle observasjoner innenfor de ulike tetthetsklassene er vist i Figur 6. Maksimumsverdier i relative differanser for de ulike tetthetsklassene varierer fra 80 % til 25 %, mens minimumsverdier varierer fra -39 % til -8 %.

² $\bar{s}_m$, $\bar{d}_m$ og $RMSE_m$ henviser til ligning (8), (9) og (10)

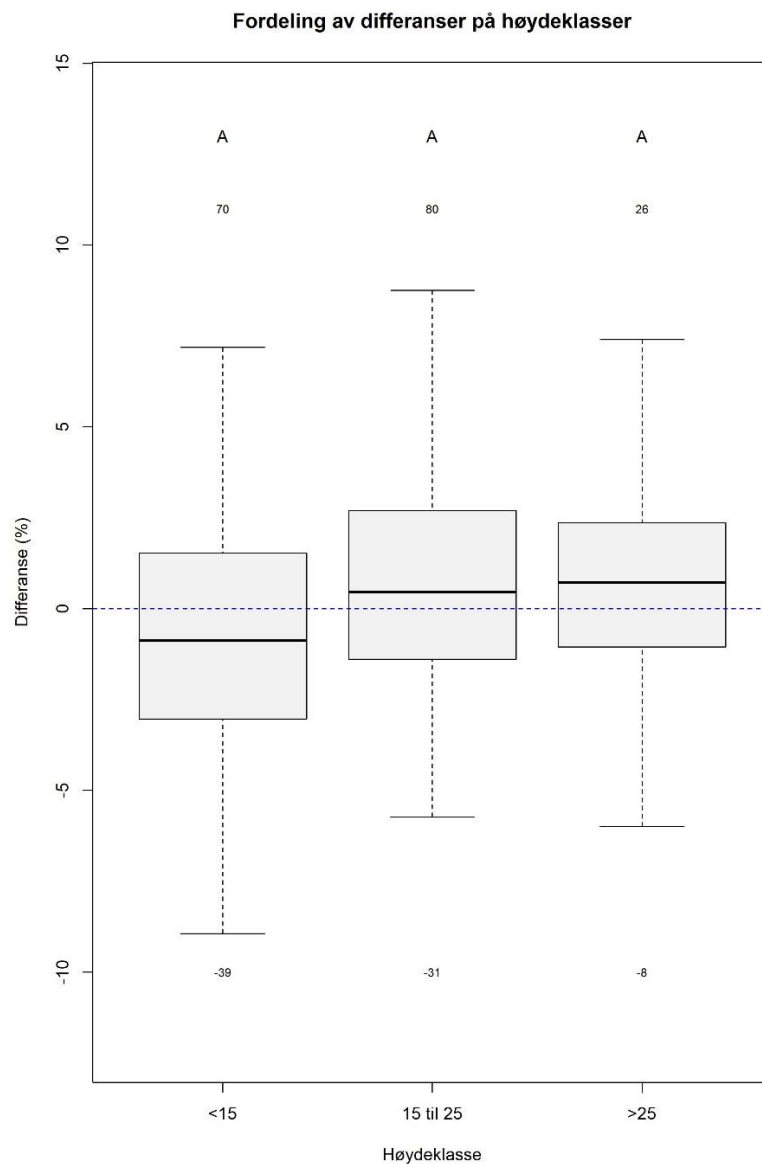


Figur 6: Fordelingen av differanser etter tetthetsklasser. For å begrense utstrekningen av y-aksen, markerer endepunktene på linjene ut fra nedre og øvre del av hver boks henholdsvis 2.5- og 97.5-persentilen i stedet for ekstremverdier, og maksimums- og minimumsverdier er indikert med tall for relative differanser. «A» på alle tetthetsklasser henviser til at det er ingen signifikante forskjeller i målinger mellom tetthetsklasser.

3.2.2 Høydeklasser

Figur 7 viser fordelingen av relative differanser i høydeklasser. Figur 7 og Tabell 3 antyder at det er størst gjennomsnittlig differanse i høydeklassen «15-25 m». En variansanalyse viste at $\bar{d}\%$ ikke var signifikant forskjellig fra null i noen av høydeklassene. Maksimums- og minimumsverdier av relative differanser for alle observasjoner innenfor de tre høydeklassene

er vist i Figur 7. Maksimumsverdier i relative differanser for de ulike høydeklassene varierer fra 80 % til 26 %, mens minimumsverdier varierer fra 39 % til -8 %.

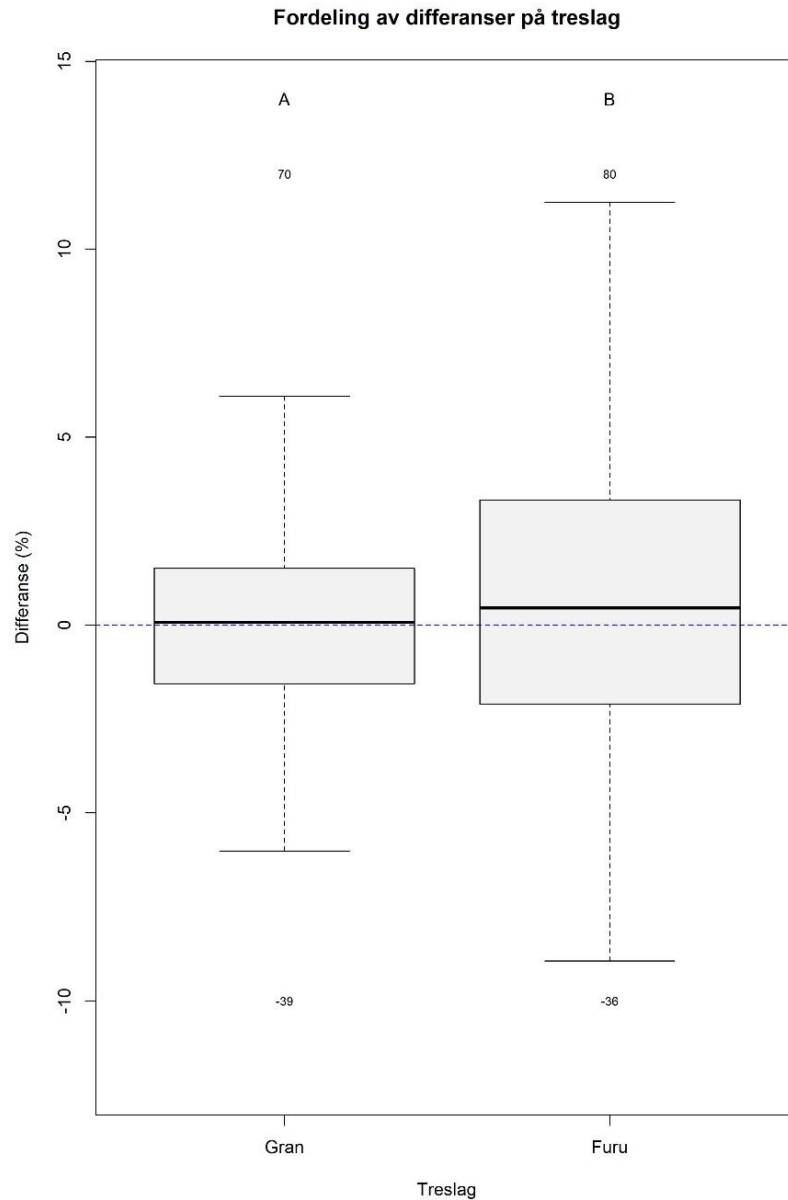


Figur 7: Fordelingen av relative differanser mellom høydeklasser. For å begrense utstrekningen av y-aksen, markerer endepunktene på linjene ut fra nedre og øvre del av hver boks henholdsvis 2.5- og 97.5-persentilen i stedet for ekstremverdier, og maksimums- og minimumsverdier er indikert med tall for relative differanser. «A» på alle høydeklasser henviser til at det er ingen signifikante forskjeller i målinger mellom høydeklasser.

3.2.3 Treslag

Figur 8 viser fordelingen av differanser mellom treslag. Figur 8 og Tabell 3 antyder at furu viser større fordeling av differanser enn gran. Resultatene fra variansanalysen viste at $\bar{d}\%$ var signifikant forskjellig fra null mellom treslagene gran og furu. Maksimums- og

minimumsverdier av relative differanser innen treslag er vist i Figur 8. Maksimums- og minimumsverdier for relative differanser varierer fra 70 % til -39 % for gran og 80 % til -36 % for furu.



Figur 8: Fordelingen av relative differanser på treslag. For å begrense utstrekningen av y-aksen, markerer endepunktene på linjene ut fra nedre og øvre del av hver boks henholdsvis 2.5- og 97.5-persentilen i stedet for ekstremverdier, og maksimums- og minimumsverdier er indikert med tall for relative differanser. «A» og «B» henviser til at det er signifikante forskjeller mellom treslagene gran og furu.

3.3 Faste og tilfeldige effekter på differanser

En blandet lineær modell forklarte hvilke grupper av tetthet, høyde og treslag som hadde effekt på relative differanser når variasjonen i målinger fra ulike personer ble tatt bort. Tabell 4 viser fordelingen av effekter mellom grupper av de undersøkte faktorene. Forskjeller i effekt kommer til uttrykk gjennom parameterestimaterne, som er avvik fra den generelle effekten «intercept», for hver av faktorene, det vil si fra «basiskombinasjonen» av faktorer som var «tetthetsklasse <10», «høydeklasse <15» og «Gran». Parameterestimaterne for faktorene «tetthet» og «høyde» var ikke signifikant forskjellig fra null. Derimot viste parameterestimatet for faktoren «treslag» at d% for furutrær var et prosentpoeng større enn for grantrær. Dette parameterestimatet var signifikant forskjellig fra null. Resultatene fra modelleringen var derfor med på støtte opp under funnene fra variansanalysene.

Tabell 4: Parameterestimer for avvik i d% for grupper av tetthet, høyde og treslag. Parameterestimer et uttrykt som avvik fra «intercept», som er den gjennomsnittlige relative differansen for graner med «tetthetsklasse <10» og «høydeklasse <15».

Faste effekter:	Parameter	Parameterestimat
«Intercept»	β_0	-0.1822
Tetthetsklasse 10 til 20	β_1	0.5062
Tetthetsklasse 20 til 30	β_2	-0.2164
Tetthetsklasse >30	β_3	-0.4870
Høydeklasse 15 til 25	β_4	0.8711
Høydeklasse >25	β_5	0.8223
Furu	β_6	0.9910 *

p-verdi <0.05 =*

Tabell 5 viser hvor mye variasjon som kunne forklares av de undersøkte faktorene, tetthet, høyde og treslag, i tillegg til person og andre faktorer. Total variasjon i målinger som kunne forklares av modellen var 6.1 %, der tetthet, høyde og treslag forklarte kun 1.3 %. Derimot forklarte person en større del av total variasjonen i målinger sammenlignet med de undersøkte faktorene, 4.1 %. Resterende variasjon skyldes andre faktorer, og var derfor uforklart variasjon.

Tabell 5: Andel forklart og uforklart variasjon i forhold til total variasjon i målinger

Faste effekter:	Variasjon (%)
Tetthet	0.3
Høyde	0.4
Treslag	0.6
Tilfeldige effekter:	
Person	4.1
Total forklart variasjon	6.1
Uforklart variasjon	93.9
Total variasjon	100

4. Diskusjon

Målet med denne studien var å kvantifisere nøyaktighet og presisjon på høydemålinger på individuelle trær. I denne studien ble høydemålingene sammenlignet med fasithøyder målt med totalstasjon, på samme måte som Andersen et al. (2006). Andre studier har bestemt fasithøyder ved å felle trær og måle trelengden etter felling ved hjelp av et målebånd (Ganz et al., 2019; Krause et al., 2019; Sibona et al., 2016; Sterenczak et al., 2019). Felling av trær var ikke et alternativ i denne studien på grunn av et forholdsvis stort antall trær, og felling var heller ikke ønskelig for skogeier (NMBU). Det er en viss usikkerhet knyttet også til fasithøydene. Vinkel- og avstandsmåling med totalstasjon er i seg selv svært presist, så det er hovedsakelig andre faktorer enn instrumentet som potensielt bidrar til denne usikkerheten. Én faktor kan være at trær heller til en side. Det var noen tilfeller av skjeve trær, men det ble konkludert med at det ikke var et problem for fasitmålingene, da det kun var snakk om små avvik i målt fasithøyde. I tett skog kunne det være utfordrende å finne korrekt tretopp i siktemidlene til totalstasjonen. Årsaken til dette er at totalstasjonen hadde en kikkert med stor forstørrelse og følsom zoom, og dette gjorde at det i enkelte tilfeller var usikkert om det en så i kikkerten virkelig var toppen på treet som skulle måles. Utvendige, grove siktemidler uten optikk, gjorde imidlertid at man kunne rette inn kikkerten med rimelig grad av sikkerhet. I tillegg er avstandsmåling fra totalstasjonen følsom for tett underskog. Avstandsmåleren er basert på lasermåling og hvis laserpulsene blir reflektert fra et objekt mellom trestammen og oppstillingspunktet, vil beregningen av fasithøyden bli feil. Det ble imidlertid brukt mye tid på å sikre at dette ikke skulle skje. For et av furutreene som ble målt i studien var det store utfordringer med å finne riktig topp med siktemidlene på totalstasjonen. For dette treet ble det funnet store og ensidige avvik mellom fasithøyden og målingene til forsøkspersonene. Det ble derfor antatt at en ved målingen av fasithøyden har siktet mot feil topp og treet ble derfor fjernet fra datamaterialet. Andre faktorer kan være avlesningsfeil eller skrivefeil. Selv om alle vinkel- og avstandsmålinger fra totalstasjonen ble nøye notert ned, kan det være tilfeller av feil. Felte trær gir en mer nøyaktig fasithøyde sammenlignet med en totalstasjon, ettersom målebåndet måler lengden langs trestammen etter felling. Forskjellene i disse to metodene for kontrollmåling vil sannsynligvis være små og ikke ha stor betydning for nøyaktigheten til fasitmålingene. Kitahara et al. (2010) brukte hverken felte trær eller en totalstasjon til å bestemme fasithøyder, men utførte heller kontrollmålinger av erfarne taksatorer. Denne metoden vil sannsynlig bidra til større usikkerhet enn de to førstnevnte metodene, ettersom selv erfarne taksatorer kan måle feil.

Det er stor variasjon i størrelsen på datamaterialer brukt i ulike studier. I denne studien besto datamaterialet av 71 trær, fordelt på treslagene gran og furu. Sterenczak et al. (2019) bestemte nøyaktigheten til høydemålinger for 2388 trær, fordelt på åtte ulike treslag, mens Fitje (1967) hadde et datamateriale på 10 grantrær. I foreliggende studie var antall trær i datamaterialet bestemt ut i fra hvor mange høydemålinger en forsøksperson kunne gjennomføre i løpet av en arbeidsdag. I tillegg ble trær valgt ut for å representere forskjellige faktorer som tetthet, høyde og treslag. Dataene skulle representere norske skogforhold, men skogforholdene vil variere etter hvor i landet en befinner seg. Denne studien representerer i større grad skogforholdene i Ås enn Norge generelt. Fitje (1967) hadde også Ås som studieområde, men foreliggende studie dekker en større variasjon i trestørrelser og skogforhold enn studien til Fitje (1967). Treslagene som befinner seg i Norge, er også vanlig i andre skandinaviske land. Tidligere studier fra Finland har sett på nøyaktigheten til høydemålinger for bjørk, i tillegg til gran og furu (Luoma et al., 2017; Päivinen & Nousiainen, 1992). Løvtreslag ble utelatt i denne studien fordi forsøket da ville blitt for stort.

Resultatene viste en tilfeldig feil på 6.5 % for datasettet som helhet. Flere studier har oppnådd en lavere tilfeldig feil på manuelle høydemålinger enn dette (Fitje, 1967; Luoma et al., 2017). Fitje (1967) fant en tilfeldig feil på 4.0 % for målinger med Suunto, som er lavere enn foreliggende studie. For målinger med Suunto var det ingen signifikante forskjeller mellom personer. Luoma et al. (2017) fant en tilfeldig feil på 2.9 %, der høyden på 319 trær ble målt av fire ulike taksatorer. I likhet med Fitje (1967) var det ingen forskjell i målinger mellom de fire taksatorene (Luoma et al., 2017). Derimot var det klar forskjell i målinger mellom personer i foreliggende studie, noe som kan forklare en høyere tilfeldig feil. Den tilfeldige feilen er sannsynligvis lavere i nevnte studier (Fitje, 1967; Luoma et al., 2017) fordi taksatorene her målte noenlunde likt, i motsetning til denne studien der målingene mellom forsøkspersonene var signifikant forskjellige. I denne studien ble høydemålingene utført av 13 forsøkspersoner. Også flere tidligere studier sammenlignet høydemålinger mellom observatører (Fitje, 1967; Kitahara et al., 2010; Luoma et al., 2017; Päivinen & Nousiainen, 1992; Sterenczak et al., 2019), mens andre kun har brukt én observatør. (Andersen et al., 2006; Ganz et al., 2019; Krause et al., 2019; Sibona et al., 2016). Ettersom forsøkspersonene hadde noe ulik grad av erfaring fra høydemålinger, ble det valgt å gruppere forsøkspersonene i litt og mer erfaring. Resultatene viste at erfaring ikke kunne forklare forskjeller mellom forsøkspersoner. Likevel var den gjennomsnittlige tilfeldige feilen noe høyere for «litt erfarne» (9.2 %) enn for «mer erfarne» (5.3 %). Resultatene viste også at det var en liten forskjell i gjennomsnittlig systematisk feil

(signifikantnivå 0.05), med 1.1 % og 0.8 % for forsøkspersoner med henholdsvis «litt erfaring» og «mer erfaring». For å relatere effekten av erfaring på målefeil, er det gjort studier der man har fulgt enkeltpersoner gjennom en serie målinger før og etter et opplæringsprogram (Kitahara et al., 2010). Kitahara et al. (2010) fant at det var signifikante endringer mellom første og andre runde med trening på høydemålinger ved bruk av Vertex. I andre runde fikk observatørene på forhånd tilbakemelding om resultatene fra første trening. Ved første trening og andre trening oppnådde observatørene en systematisk feil på henholdsvis 4.5 % og 3.5 %, ved målinger av bartrær (Kitahara et al., 2010). Her er den systematiske feilen lavere i andre trening enn ved første trening. Dette kan sammenlignes med resultatene i denne studien, hvor også systematisk feil er lavere for forsøkspersoner med «mer erfaring» enn forsøkspersoner med «litt erfaring». Ettersom både den tilfeldige og systematiske feilen går ned med erfaring, vil sannsynligvis forsøkspersonene levere mer presise og nøyaktige målinger jo mer trening de har. Dermed vil trening med instrumentet være viktig for å oppnå presise og nøyaktige målinger. Grupperingen av erfaring var noe skjevfordelt, der tre forsøkspersoner representerte «litt erfaring» og de resterende forsøkspersonene representerte «mer erfaring». I denne studien skulle forsøkspersonene representere dagens skogtaksatorer, men dette vil være avhengig av hvilket feilnivå det er på målinger som utføres av skogtaksatorer i dag. Enkelte av forsøkspersonene hadde erfaring fra feltarbeid i forbindelse med skogtaksering, mens andre ikke hadde det. Ettersom det var stor variasjon i målinger mellom forsøkspersoner, i tillegg til at det var ulik grad av erfaring mellom forsøkspersoner, vil de antageligvis ikke representere dagens skogtaksatorer. Opprinnelig var ideen bak denne studien å analysere feilnivå for en rekke taksatorer som i dag jobber med skogtaksering i en rekke skogeierandelslag. Da ville datamaterialet vært større med blant annet flere forsøkspersoner og målinger av trær fordelt på ulike studieområder, sammenlignet med foreliggende studie. Den gjennomsnittlige tilfeldige feilen ville i et slikt tilfelle kanskje vært lavere enn denne studien ettersom de fleste som jobber i skogplanlegging har mye erfaring med høydemålinger ute i felt. På grunn av nedstengingen som ble forårsaket av Covid-19-pandemien i 2020 lot det seg ikke å gjennomføre målinger gjort av ulike skogeierandelslag.

Et annet mål med denne studien var å undersøke om målefeil varierte for ulike grupper av treslag, tetthet- og høydeklasser. Resultatene fra variansanalysen viste at $d\%$ ikke var signifikant forskjellig for hverken tetthetsklasser eller høydeklasser. Sterenczak et al. (2019) fant ingen signifikante forskjeller i målinger av trehøyde for hverken bartrær eller løvtrær. Tilfeldige feil varierte fra 2.6 % til 3.4 % innen fire definerte høydeklasser i Finland. Likevel

var det ingen signifikante forskjeller mellom høydeklasser (Luoma et al., 2017). Resultatene fra disse tidligere studiene samsvarer altså med resultatene i denne studien. Derimot viste variansanalysen i denne studien at det var signifikante forskjeller mellom målinger av gran og furu. Krause et al. (2019) undersøkte nøyaktigheten til høydemålinger av Vertex på 34 furutrær, som ble målt av en erfaren taksator. Studien fant en gjennomsnittlig systematisk feil på 0.9 %. Systematisk feil for furu viste seg å være høyere i foreliggende studie (1.4 %), som også baserte seg på et datamateriale med 34 furutrær. Derimot viste resultatene i denne studien ingen systematisk feil i målinger av gran. Sterenczak et al. (2019) fant en høyere total feil (RMSE) for furu enn for gran, med henholdsvis -1.20 % og -0.29 %. Andre studier har i likhet med foreliggende studie funnet en høyere tilfeldig feil for furu, enn for gran (Luoma et al., 2017; Päivinen & Nousiainen, 1992). Dette tyder på at det er vanskeligere å få en nøyaktig måling på furu enn gran. Mulige kilder til feil for måling av furu kan komme av den runde og butte kroneformen til eldre furu, noe som kan gjøre det vanskelig å indentifisere toppen av krona. Noen furutrær kan ha vært utsatt for toppbrekk og toppskuddet kan dermed være skjevt eller hengende. Dette kan også føre til at det blir vanskeligere å utføre en korrekt høydemåling. I likhet med variansanalysen viste resultatene fra lineærmodellen at det var forskjell i differanser mellom furu og gran. Resultatene viste at d% var et prosentpoeng større for furu enn for gran. Likevel forklarte faktoren treslag kun en liten del av den totale variasjonen i differansene. Treslag forklarte 0.6 %, mens personer forklarte 4.1 %. Av den totale variasjonen var det kun 6.1 % som kunne forklares av enten person, tetthet, høyde eller treslag mens det resterende (93.9 %) skyldes andre faktorer som ikke kunne forklares av modellen. Dette er ikke nødvendigvis faktorer som kan indentifiseres, men som er forårsaket av tilfeldigheter.

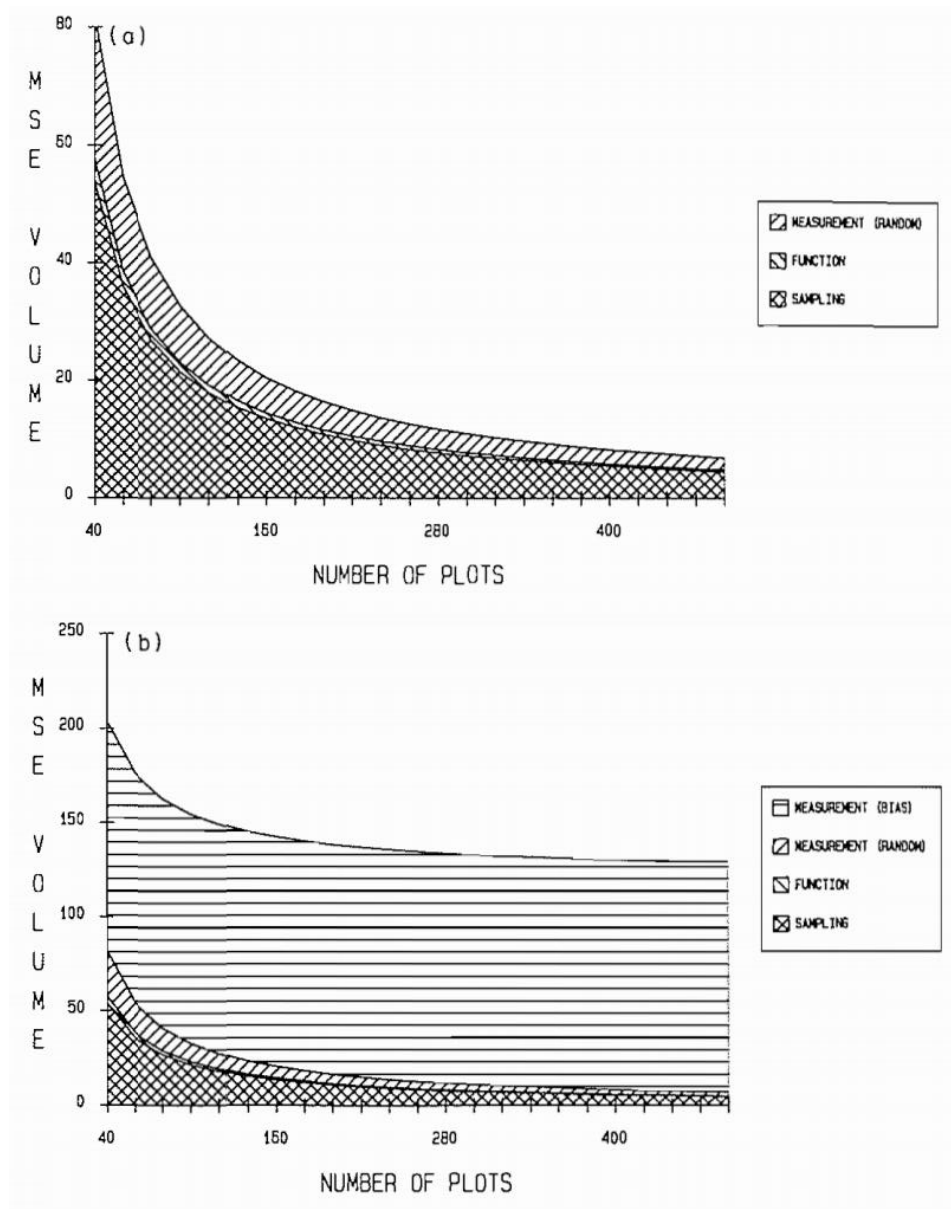
Sterenczak et al. (2019) undersøkte blant annet faktorer som høyde over havet, bestandsstruktur (en- eller flersjiktet skog) og alder, der alder og høyde over havet bidro til den relative totale feilen med over 10 %. Ettersom høyde over havet er relativt konstant i Ås, vil sannsynlig dette ikke ha stor betydning i denne studien. Likevel kan høyde over havet ha en indirekte effekt på egenskapene til skogen og trærne, som er den direkte årsaken. Alder er også en indirekte effekt som kan påvirke, men dette ble ikke registrert fordi det er tidkrevende å måle. Andre årsaker til at det er stor variasjon blant målinger kan være knyttet til bruk av instrument og rutiner for målingene. Ettersom forsøkspersonene hadde erfaring i høydemåling med Vertex, fikk de ikke noen ytterligere instruksjoner foruten kalibrering av instrumentet før målinger. Det kan imidlertid være store variasjoner mellom forsøkspersoner på grunn av ulik bruk av instrumentet, samt at de har vært inkonsekvent med rutinene for målingene. For eksempel kan det være at

forsøkspersonene ikke måler på lang nok avstand. Dersom forsøkspersonen står i samme avstand fra et høyt tre som for et lavt tre, blir vinkelen mellom basis av treet og trekrona større jo høyere treet er. Det er anbefalt at forsøkspersonen skal stå langt nok unna, slik at vinkelen fra bunnen til toppen av treet blir mindre eller lik 45° , som vil tilsvare en trelengde (Goodwin, 2004). Derimot kan det være at forsøkspersonen sikter for høyt opp, på grunn av vanskeligheter med å skille de øverste greinene fra tretoppen (Larjavaara & Muller-Landau, 2013). Andre årsaker kan være terrenghelling. Dersom forsøkspersonen står i bunnen av en bakke og måler et tre som står i bakken blir vinkelen større enn hvis forsøkspersonen står på flat bakke. Motsatt blir vinkelen mindre dersom forsøkspersonen måler ovenfor bakken og treet står i en nedoverbakke. Helling var en av flere faktorer (trehøyde, treslag, alder og høyde over havet) som bidro til en relativ total feil på over 10 % (Sterenczak et al., 2019). Foreliggende studie hadde ikke nok observasjoner av trær stående i helling, og kan dermed ikke si noe om effekt av helling på høydemålinger. Temperatur og nedbør kan også ha en påvirkning på instrumentet, ettersom Vertex er sensitiv for temperaturendringer. Dette ble tatt høyde for ved å kalibrere instrumentet før målinger. Likevel kan det være tilfeller der forsøkspersonene ikke har vært nøye nok med kalibrering.

Feil fra manuelle høydemålinger på enkeltnivå vil akkumuleres videre til prøveflate- og bestandsnivå. Ettersom manuelle høyde- og diametermålinger er grunnleggende i en feltbasert takst, ville det også vært interessant å undersøke feilnivåene i målinger av diameter. Andre studier har undersøkt feilnivåene for målinger av diameter i brysthøyde, og har funnet en systematisk feil på 1.6 % og en tilfeldig feil på 1.5 % (Elzinga et al., 2005; Luoma et al., 2017). Feil på diameter vil sammen med feil i høyde ha konsekvenser for estimerer for biomasse og volum. En relativ feil i diameter vil føre til en dobbel så stor relativ feil i volum, mens en relativ feil i høyde vil føre til en like stor relativ feil i volum (Fitje, 1988).

Gertner (1990) presenterte en metode for å anslå og evaluere konsekvensene av tilfeldige og systematiske målefeil av diameter for volumestimatet på bestandsnivå, sammen med utvalg- og prediksjonsfeil fra prøveflater. Figur 10a viser gjennomsnittlig total feil for volum (m^3/ha) ved varierende antall prøveflater, fordelt etter utvalgsfeil, prediksjonsfeil og målefeil, hvor bonitet er antatt å være korrekt og diameter har en tilfeldig feil på 20 % (Gertner, 1990). I dette tilfellet er andel variasjon som er knyttet til målefeil betydelig mindre sammenlignet med variasjonen som skyldes utvalgsfeil. Dersom målefeilen i diameter skyldes en systematisk feil på 2 %, i tillegg til den tilfeldige feilen, vil total feil i volum øke betraktelig (Fig.10b). Etter hvert som

antall prøveflater øker, vil også den relative påvirkningen av systematisk feil i diameter øke. Dette kan forklares med at den systematiske feilen i volum øker med økende utvalgsintensitet, mens variasjonen som skyldes utvalgsfeil, tilfeldig målefeil og prediksjonsfeil synker med økende utvalgsintensitet. Uansett størrelse i prøveflata vil tilfeldige målefeil ha betydning for nøyaktige volumestimater (Gertner, 1990).



Figur 10: Total feil (MSE) for volum (m^3/ha), fordelt på utvalgsfeil, prediksjonsfeil og målefeil. (a) Relativ tilfeldig feil for diameter i brysthøyde er 20 %. (b) Relativ tilfeldig feil for diameter er 2 % (Gertner, 1990).

Gertner (1990) viser at systematiske feil kan være «skumle», og at en relativt stor tilfeldig variasjon på målinger kan gi en neglisjerbar effekt på feilen på volumestimatet med et økende

antall observasjoner. En kan på bakgrunn av dette argumentere for at bestandsestimatet for volum med en gjennomsnittlig systematisk og tilfeldig feil på henholdsvis 0.9 % og 6.5 % i høyde, vil kunne gi et større usikkerhetsestimat for volum i forhold til om bestandsestimatet kun var påvirket av tilfeldige feil. Likevel er den systematiske feilen relativt lav, sammenlignet med andre studier. En høy tilfeldig feil er imidlertid ikke like alvorlig ifølge Gertner (1990), sammenlignet med en systematisk feil på 2 %. Eksempelvis er stående kubikkmasse i Norge estimert til å være 978 millioner m³ (SSB, 2020a). Dette volumestimatet er basert på Landskogtakseringen prøveflater, med et antall på omtrent 20 000 prøveflater (Breidenbach et al., 2020). Med en så stor utvalgsintensitet vil volumestimatet være minimalt påvirket av tilfeldige målefeil. Ut fra dette kan en konkludere med at en forholdsvis lav systematisk feil på 0.9 % og en noe høyere tilfeldig på 6.5 %, som påvist i den foreliggende studien, vil ha minimal påvirkning for volumestimatet dersom utvalgsintensiteten er stor nok. Generelt er det vanskelig å si noe konkret om hvor stor betydning feilnivåene i foreliggende studie har på volum, ettersom det vil variere etter utvalgsintensitet i takseringer. Dersom en i tillegg tar Fitje (1988) sin tilnærming til betraktning i denne sammenhengen, så vil målefeil i diameter generelt sett gi dobbelt så stor feil i volum, sammenlignet med målefeil i høyde. Dermed vil konsekvensene av målefeil i diameter være større for volumestimatet enn målefeil i høyde.

I likhet med volum, vil estimatet for biomasse også akkumulere feil. Målefeil er ikke den største kilden til feil for et estimat for hverken volum eller biomasse. Derimot er den viktigste kilden til usikkerhet knyttet til modellen som er brukt til å predikere estimatet for et område (Chave et al., 2004; Molto et al., 2013). Et tilhørende feilestimat til estimatet for volum og biomasse vil kunne gi informasjon om usikkerheten knyttet til volumvekst og biomasseendringer i skogen. Dette vil være nødvendig for at skogeiere og myndigheter skal kunne forvalte skogressursene og rapportere karbonbinding til globale klimaavtaler. Generelt vil feil i volum eller biomasse kunne føre til beslutninger som ikke vil være hensiktsmessig for en bærekraftig forvaltning av skog.

5. Konklusjon

I denne studien ble nøyaktighet og presisjon ved høydemålinger på enkelttrær undersøkt. Studien kunne ikke påvise at den absolutte, tilfeldige målefeilen var avhengig av trehøyden. Det ble i analysene valgt å bruke feil i relative størrelser fremfor absolutte størrelser på grunn av at hypotesetesten var sterkt påvirket av noen ekstreme observasjoner.

Resultatene viste en gjennomsnittlig systematisk, tilfeldig og total feil for alle målinger på henholdsvis 0.9 %, 6.5 % og 6.6 %. Det var signifikante forskjeller i målefeil mellom forsøkspersoner, mens gjennomsnittlige målefeil mellom grupper av forsøkspersoner ikke var det. Dermed kunne ikke grad av erfaring forklare forskjeller i målefeil.

Feil varierte mellom grupper av tetthetsklasser, høydeklasser og treslag, men det var kun forskjell i gjennomsnittlig målefeil mellom gran og furu. En blandet lineærmodell forklarte 6.1 % av total variasjon i målinger, der tetthet, høyde og treslag forklarte kun 1.3 % av variasjonen i målinger. Variasjonen knyttet til at målingene var gjort av ulike personer var 4.1 %. Ettersom høyde- og diametermålinger er grunnleggende for prediksjon av volumestimatet på prøveflate- og bestandsnivå, er det viktig å evaluere nøyaktighet og presisjon knyttet til disse variablene. Et tilhørende feilestimat for volum eller biomasse vil være viktig for å vurdere usikkerhet knyttet til skogtakseringer generelt.

6. Litteratur

- Andersen, H.-E., Reutebuch, S. E. & McGaughey, R. J. (2006). A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian journal of remote sensing*, 32 (5): 355-366. doi: 10.5589/m06-030.
- Brantseg, A. (1967). Furu sønnafjells : kubering av stående skog : funksjoner og tabeller = Volume functions and tables for Scots pine : South Norway. *Volume functions and tables for Scots pine : South Norway*: 689-739.
- Breidenbach, J., Granhus, A., Hylen, G., Eriksen, R. & Astrup, R. (2020). A century of National Forest Inventory in Norway – informing past, present, and future decisions. *Forest ecosystems*, 7 (1): 46-46. doi: 10.1186/s40663-020-00261-0.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S. & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 359 (1443): 409-420. doi: 10.1098/rstb.2003.1425.
- Elzinga, C., Shearer, R. C. & Elzinga, G. (2005). Observer Variation in Tree Diameter Measurements. *Western Journal of Applied Forestry*, 20 (2): 134-137. doi: 10.1093/wjaf/20.2.134.
- Fitje, A. (1967). Feil ved høydemåling på enkelttrær = Errors in the height measurement of individual trees. *Errors in the height measurement of individual trees*: 103-137.
- Fitje, A. (1988). Tremåling. I: *Tremålingslære*, s. 23-70. Ås,: Landbruksforlaget.
- Fortin, M. & DeBlois, J. (2010). A statistical estimator to propagate height prediction errors into a general volume model. *Revue canadienne de recherche forestière*, 40 (10): 1930-1939. doi: 10.1139/X10-107.
- Ganz, S., Käber, Y. & Adler, P. (2019). Measuring Tree Height with Remote Sensing—A Comparison of Photogrammetric and LiDAR Data with Different Field Measurements. *Forests*, 10 (8). doi: 10.3390/f10080694.
- Gertner, G. Z. (1990). The sensitivity of measurement error in stand volume estimation. *Canadian Journal of Forest Research*, 20 (6): 800-804. doi: 10.1139/x90-105.
- Goodwin, A. (2004). Measuring tall tree heights from the ground. *Tasforests* Vol.15.
- Holmgren, R. (2019). *Reliabilitet i mätning av trädhöjd*: SLU.
- Jurjević, L., Liang, X., Gašparović, M. & Balenović, I. (2020). Is field-measured tree height as reliable as believed – Part II, A comparison study of tree height estimates from conventional field measurement and low-cost close-range remote sensing in a deciduous

- forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 169: 227-241. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.09.014.
- Kitahara, F., Mizoue, N. & Yoshida, S. (2010). Effects of training for inexperienced surveyors on data quality of tree diameter and height measurements. *Silva Fennica*, 44 (4). doi: 10.14214/sf.133.
- Krause, S., Sanders, T. G. M., Mund, J.-P. & Greve, K. (2019). UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. *Remote Sensing*, 11 (7). doi: 10.3390/rs11070758.
- Larjavaara, M. & Muller-Landau, H. C. (2013). Measuring tree height: a quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*. doi: 10.1111/2041-210X.12071.
- Luoma, V., Saarinen, N., Wulder, M., White, J., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyyppä, J. (2017). Assessing Precision in Conventional Field Measurements of Individual Tree Attributes. *Forests*, 8 (2). doi: 10.3390/f8020038.
- Mauya, E. W., Hansen, E. H., Gobakken, T., Bollandsås, O. M., Malimbwi, R. E. & Næsset, E. (2015). Effects of field plot size on prediction accuracy of aboveground biomass in airborne laser scanning-assisted inventories in tropical rain forests of Tanzania. *Carbon Balance Manag*, 10 (1): 1-14. doi: 10.1186/s13021-015-0021-x.
- Meld. St. 6. (2016-2017). *Verdier i vekst. Konkurransedyktig skog- og trenæring.*: Regjeringen.
- Moe, K., Owari, T., Furuya, N. & Hiroshima, T. (2020). Comparing Individual Tree Height Information Derived from Field Surveys, LiDAR and UAV-DAP for High-Value Timber Species in Northern Japan. *Forests*, 11 (2). doi: 10.3390/f11020223.
- Molto, Q., Rossi, V. & Blanc, L. (2013). Error propagation in biomass estimation in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution*, 4 (2): 175-183. doi: <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00266.x>.
- Næsset, E. (2004). Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian journal of forest research*, 19 (2): 164-179. doi: 10.1080/02827580310019257.
- Päivinen, R. & Nousiainen, M. K., Kari T. (1992). Puutunnusten mittaamisen luotettavuus = Accuracy of certain tree measurements. *Metsäntutkimuslaitos (Folia forestalia, 787)*.
- Sibona, E., Vitali, A., Meloni, F., Caffo, L., Dotta, A., Lingua, E., Motta, R. & Garbarino, M. (2016). Direct Measurement of Tree Height Provides Different Results on the Assessment of LiDAR Accuracy. *Forests*, 8 (1). doi: 10.3390/f8010007.

- SSB. (2020a). *Landsskogtakseringen, 2015-2019*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/statistikker/lst/aar/2020-08-28#content>.
- SSB. (2020b). *Skogeiendommer*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/statistikker/stskog/aar>.
- Sterenczak, K., Mielcarek, M., Wertz, B., Bronisz, K., Zajackowski, G., Jagodzinski, A. M., Ochal, W. & Skorupski, M. (2019). Factors influencing the accuracy of ground-based tree-height measurements for major European tree species. *J Environ Manage*, 231: 1284-1292. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.09.100.
- Temesgen, H., Affleck, D., Poudel, K., Gray, A. & Sessions, J. (2015). A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. *Scandinavian journal of forest research*, 30 (4): 326-335. doi: 10.1080/02827581.2015.1012114.
- Vestjordet, E. (1967). Funksjoner og tabeller for kubering av stående gran = Functions and tables for volume of standing trees, Norway spruce. *Functions and tables for volume of standing trees, Norway spruce*: 539-574.
- Villasante, A. & Fernandez, C. (2014). Measurement errors in the use of smartphones as low-cost forestry hypsometers. *Silva Fennica*, 48 (5). doi: 10.14214/sf.1114.
- Wang, Y., Lehtomäki, M., Liang, X., Pyörälä, J., Kukko, A., Jaakkola, A., Liu, J., Feng, Z., Chen, R. & Hyypä, J. (2019). Is field-measured tree height as reliable as believed – A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147: 132-145. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2018.11.008.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway