

PREDIKSJON AV TYNNINGSBEHOV VED HJELP AV DATA FRA FLYBÅREN LASERSKANNING.

PREDICTING NEED FOR THINNING BY MEANS OF AIRBORNE LASER SCANNING
DATA.

SILJE UNDELAND LYSBAKKEN

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR NATURFORVALTNING
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2012



Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet i forbindelse med avslutningen av mitt fem år lange studie i Skogfag ved Instituttet for Naturforvaltning (INA) på Universitetet for Miljø- og biovitenskap (UMB).

I 2010 ble det for første gang gjennomført områdetakst ved bruk av flybåren laserskanner i Notodden kommune. Ressursbeskrivelsen som ble produsert bestod blant annet av et kart med tynningsanbefalinger. I etterkant av områdetaksten ble det reist flere spørsmål rundt nøyaktigheten til disse tynningsanbefalingene. Da jeg selv er skogeier i Notodden kommune, og ingen kunne gi noen gode svar angående nøyaktigheten til slike tynningsanbefalinger, valgte jeg å benytte anledningen til å undersøke dette temaet nærmere. Tynningsanbefalinger utarbeidet ved bruk av flybåren laserskanning er en ny metode som virker fremtidsrettet. Gjennom denne oppgaven ønsket jeg derfor å bidra til en økt forståelse for hvordan slike tynningsanbefalinger kan utarbeides, og hvilken nøyaktighet man kan forvente.

Det rettes en stor takk til mine veiledere ved INA, Dr. Ole Martin Bollandsås og Dr. Terje Gobakken. De har gjennom hele prosessen med å skrive denne oppgaven kommet med gode råd og kritiske innspill, slik at arbeidet ble en spennende og lærerik prosess for meg. I tillegg vil jeg takke Mjøsen Skog BA, Foran Norge AS og INA på UMB for at jeg fikk benytte meg av data de hadde samlet inn. Glommen Skog BA fortjener en takk for utarbeidelse av tynningsdiagrammene som var en sentral del av denne oppgaven. Stipendiat Roar Økseter må til slutt takkes for gode innspill angående tekstbehandling.

Universitetet for miljø- og biovitenskap

Ås, 15. mai 2012

Silje Undeland Lysbakken

Sammendrag

Tynningsanbefalinger basert på data fra flybåren laserskanning er et nytt produkt fra takstselskapene, men metodene som ligger til grunn for anbefalingene er i dag lite kvalitetssikret. Hovedproblemstilling i denne oppgaven var å vurdere to alternative metoder for utarbeidelse av tynningsanbefalinger i barskog ved hjelp av data fra flybåren laserskanning.

Det ble benyttet data fra et 40 500 hektar stort skogsområde i Kongsvinger og Sør-Odal kommuner. For hver prøveflate på 250 kvadratmeter ble det predikert tynningsbehov på to alternative måter. Metode 1 gikk ut på å estimere grunnflate og overhøyde fra laserdata. Deretter ble tynningsbehovet bestemt ut fra tynningsdiagram med de estimerte parametrene som inngangsverdier. Metode 2 gikk ut på å predikere tynningsbehovet direkte ut fra laserdata ved bruk av logistiske regresjonsmodeller. Metodenes nøyaktighet ble vurdert på to ulike datasett. Det ene omfattet predikert tynningsbehov i hogstklasse III-V, og det andre omfattet predikert tynningsbehov kun i hogstklasse III-IV. Ved validering av metodene ble det predikerte tynningsbehovet sammenlignet med det faktiske tynningsbehovet. Det faktiske tynningsbehovet ble fastsatt ved bruk av grunnflatebaserte tynningsdiagrammer (Glommen Skog, 2005).

Valideringen viste at metode 1 var best egnet til å predikere tynningsbehov, uavhengig av datasett. Denne metoden predikerte korrekt tynningsbehov på 83 % og 79 % av prøveflatene, i henholdsvis hogstklasse III-V og hogstklasse III-IV. Metoden fikk en kappa-indeks på henholdsvis 0,77 og 0,76. Noe som kan tilsi en betydelig evne til å predikere korrekt tynningsbehov (Landis & Koch, 1977). Ved bruk av metode 2 ble korrekt tynningsbehov predikert på henholdsvis 67 % og 65 % av prøveflatene. For denne metoden var kappa-indeksen på henholdsvis 0,51 og 0,6. Dette kan indikere en moderat evne til å predikere korrekt tynningsbehov (Landis & Koch, 1977).

Opgaven har vist at det var mulig å utarbeide tynningsanbefalinger ved bruk av data fra flybåren laserskanning. Resultatene viste at prediksjon av tynningsbehov ved bruk av estimert grunnflate og overhøyde (metode 1) gav høyest nøyaktighet. Ut fra praktiske hensyn er denne metoden også å foretrekke da den baserer seg på parametre som vanligvis utarbeides i forbindelse med lasertakst.

Abstract

Recommendations on the need for thinning based on data from airborne laser scanning is a new product by forest inventory companies, but the quality of the methods are today not well documented. In this study the main objective was to evaluate two alternative methods for recommending the need for thinning in conifer forests by means of airborne laser scanning data.

Data from a 40 500 hectare forest area in Kongsvinger and Sør-Odal was used. For each sample plot of 250 square meters the need for thinning was predicted using two alternative methods. Method 1 was based on estimating basal area and dominant height from laser data. A thinning diagram was then used to determine the need for thinning by means of the estimated parameters. Method 2 was based on predicting the need for thinning directly from laser data by using logistic regression models. The accuracy of the methods was evaluated using two different sets of data. One where the need for thinning was predicted in development class III-V, and one where the need for thinning was predicted only in development class III-IV. Validation of the methods compared the predicted need for thinning to the actual need for thinning. The actual need for thinning was determined using a thinning diagram based on basal area and dominant height (Glommen Skog, 2005).

Validation showed that method 1 was best suited to predict the need for thinning regardless of data sets. The method predicted correct need for thinning in 83 % and 79 % of the sample plots, respectively in development class III-V and development class III-IV. The kappa-index for this method was respectively 0,77 and 0,76. This may indicate a substantial ability to predict correct need for thinning (Landis & Koch, 1977). Method 2 predicted correct need for thinning in respectively 67 % and 65 % of the sample plots. The kappa-index for this method was respectively 0,51 and 0,6. This can indicate a moderate ability to predict correct need for thinning (Landis & Koch, 1977).

This study has indicated that it was possible to prepare recommendations, concerning the need for thinning, based on data from airborne laser scanning. The results showed that using estimated basal area and dominant height (method 1) to predict the need for thinning had highest accuracy. Based on practical considerations this method is preferable because it is based on parameters that normally are prepared in connection with laser scanning.

Innholdsfortegnelse

1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Tynning	1
1.3 Flybåren laserskanning.....	3
1.4 Flybåren laserskanning data til estimering av skoglige parametre.....	5
1.5 Flybåren laserskanning data til prediksjon av tynningsbehov.....	6
1.6 Problemstilling	7
2. Materiale og metode.....	8
2.1 Materiale.....	8
2.1.1 Studieområdet.....	8
2.1.2 Felldata	9
2.1.3 Laserdata.....	11
2.1.4 Valideringsdata	13
2.2 Metode.....	14
2.2.1 Klargjøring av datamaterialet.....	14
2.2.2 Identifisering av reelt tynningsbehov	15
2.2.3 Estimering av grunnflate og overhøyde (metode 1)	18
2.2.4 Prediksjon av tynningsbehov ut fra estimerte parametre (metode 1).....	21
2.2.5 Prediksjon av tynningsbehov ved logistisk regresjon (metode 2).....	21
2.2.6 Validering.....	23
3. Resultater.....	26
3.1 Estimering av grunnflate og overhøyde (metode 1).....	26
3.1.1 Stratumsesifikke modeller.....	26
3.1.2 Validering av stratumsesifikke modeller	27
3.2 Prediksjon av tynningsbehov ut fra estimerte parametre (metode 1).....	27
3.2.1 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-V med stratifisering og metode 1.....	27
3.2.2 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-IV med stratifisering og metode 1.....	28
3.3 Prediksjon av tynningsbehov ved logistisk regresjon (metode 2).....	28
3.3.1 Tilpassede logistiske regresjonsmodeller.....	28
3.3.2 Prediksjon av tynningsbehov med stratifisering og metode 2	30
3.3.3 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-V og metode 2	30
3.3.4 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-IV og metode 2.....	31

4. Diskusjon.....	32
4.1 Registrering av tynningsbehov	32
4.2 Estimering av grunnflate og overhøyde (metode 1)	34
4.3 Prediksjon av tynningsbehov ut fra estimerte parameter (metode 1)	35
4.4 Prediksjon av tynningsbehov ved logistisk regresjon (metode 2)	36
4.4.1 Tilpassede logistiske regresjonsmodeller	36
4.4.2 Prediksjon av tynningsbehov ved bruk av metode 2	37
4.5 Evaluering	39
4.6 Materiale og metode	40
4.6.1 Studieområde	40
4.6.2 Laserdata	40
4.6.3 Valideringsdata	41
4.6.4 Klargjøring av datamaterialet	41
4.7 Praktisk bruk av metodene	42
5. Konklusjon	44
Litteraturliste	45
Vedlegg: Tynningsdiagrammer i Glommen Skog.....	50

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Forvaltning av en skogeiendom krever at skogbrukeren har en målsetning for driften. Hvilket mål man ønsker å oppnå er individuelt. Noen skogbrukere kan ha et ønske om å maksimere sin økonomiske nytte av skogen, mens andre ønsker å drifte skogen sin med fokus på biologisk mangfold. Uansett hvilket mål man har vil det være skranker (lovpålagte eller selvpålagte) som begrenser handlingsrommet. Begrensningene kan for eksempel være retningslinjer for bærekraftig skogbruk etter Levende Skog standarden, eller strengere miljøhensyn etter skogbrukerens eget ønske. Rasjonell forvaltning av skog i henhold til en målsetning krever en god ressursbeskrivelse, slik at beslutningene knyttet til ulike tiltak blir basert på objektiv informasjon. Den informasjonen man trenger er som regel tilgjengelig i en ressursbeskrivelse som utarbeides på bakgrunn av en områdetakst. I Norge i dag gjennomføres om lag 90 % av alle områdetakster ved bruk av flybåren laserskanning (FLS). Ressursbeskrivelsen utarbeides da på bakgrunn av laserskanningen og en prøveflatetakst, samt flybilder og fototolkning. Den gir en samlet oversikt over skogens ressurser, samtidig som den per bestand viser skoglige parametre som bonitet, volum, alder, høyde og grunnflate.

I tillegg til de tradisjonelle skoglige parametrene som rapporteres i ressursbeskrivelsen, tilbyr de fleste takstinstitusjoner i dag også tynningsanbefalinger. Utarbeidelsen av tynningsanbefalinger er basert på ulike metoder som feltregistreringer, fototolkning eller data fra FLS. Tynningsanbefalinger basert på data fra FLS er en relativ ny, men lovende metode. Normalt sett utarbeides disse ved at estimerer for overhøyde og grunnflate, eller treantall, benyttes som beslutningskriterier i etablerte skjøtselsregler for tynning (f.eks. tynningsmaler). Tynningsanbefalinger basert på data fra FLS er lite kvalitetssikret, og etter det forfatteren kjenner til er kun publisert en internasjonal forskningsartikkel der data fra FLS benyttes til å predikere tynningsbehov.

1.2 Tynning

Formålet med tynning er å fristille et ønsket antall fremtidstrær, og sørge for at de tilgjengelige vekstressursene prioriteres til disse trærne. Tynning skilles fra ungskogpleie ved at de avvirkede trærne har dimensjoner som gjør de attraktive for videreforedling. Ved salg av virket kan tynning gi en positiv differanse mellom innbetalinger og utbetalinger, noe som fører til at man får en netto innbetaling på et tidlig tidspunkt i bestandet omløp. I Norge utgjør

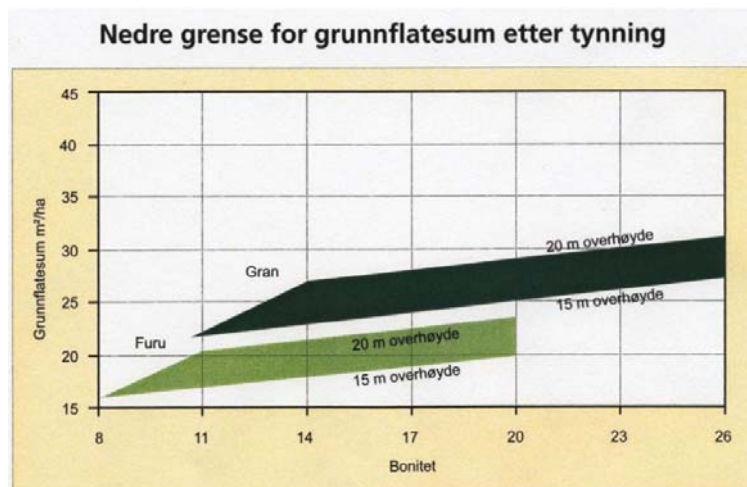
tynningsvirke i underkant av 10 % av årlig avvirket kvantum, men kan i enkelte regioner komme opp i 20 % (SSB, 2004).

Tynning vil påvirke både den totale volumproduksjonen i bestandet og veksten til de gjenstående trærne. De gjenstående trærne vil få en økt diametertilvekst og volumtilvekst grunnet redusert konkurranse (f. eks. Mäkinen & Isomäki, 2004b, 2004d). Tynning kan imidlertid også føre til at de gjenstående trærne får økt avsmalning og redusert oppkvisting (f. eks. Mäkinen & Isomäki, 2004b, 2004d), så korrekt tidspunktet for tynning er viktig å vurdere. Den totale volumproduksjonen i bestandet blir redusert grunnet tynning, men hvor stor reduksjonen blir avhenger av treslag og tynningsstyrke (f. eks. Mäkinen & Isomäki, 2004a, 2004c). Det er derfor anbefalt at grunnflaten ikke reduseres med mer enn 40 %, inkludert uttaket i stikkveiene (Glommen Skog, 2008). Ved tynning ivaretar man virke som ellers ville gått tapt gjennom selvtynning, og man øker muligheten for en optimal utvikling hos de gjenstående trærne. Tynning kan også føre til at bestandet samlet sett får en kvalitetshevning hvis trær med dårlig egenskaper tas ut (Agestam, 2009).

Etter skogbrukslova (2005) er det ingen krav til å gjennomføre tynning. Om skogbrukeren velger å tynne avhenger derfor blant annet av økonomiske og driftstekniske vurderinger, samt hvilken målsetning man har. Et tynningsfritt omløp er et alternativ om man ønsker maksimal volumproduksjon, men ønsker man å produsere kvalitetsvirke er det anbefalt med flere tynninger i løpet av et omløp. For å oppnå større handlefrihet med tanke på fremtidig skjøtsel er tynning en forutsetning. Tynning bør være gjennomført i bestand som skal gjødsles, da det sikrer at de gjenstående trærne har stort nok produksjonsapparat (krone og røtter) til å utnytte vekstpotensialet gjødslingen gir. Ved bruk av foryngelseshogster som frørestilling og skjermstilling er tynning en forutsetning for å oppnå stabile frøtrær og skjermtrær.

Tidspunkt for gjennomføring av tynning kan grovt sett bestemmes på bakgrunn av bestandets oppkvisting og overhøyde. Før det gjennomføres tynning bør en tredjedel av trehøyden være oppkvistet for gran, og halve trehøyden for furu (Glommen Skog, 2008). Disse anbefalingene er basert på et ønske om å redusere antallet grov kvist i den nedre og mest verdifulle delen av treet. I tillegg er det ikke anbefalt å tynne når overhøyde er over 20 meter for furu og 18 meter for gran (Glommen Skog, 2008; SKI, 2010). Slike høydegrensener er satt med tanke på stabilitet etter tynning, da svensk forskning har vist at faren for vind- og snøskader øker med økende overhøyde ved inngrep (Agestam, 2009).

I tillegg til de generelle retningslinjene for tynningstidspunkt, kan tidspunktet bestemmes på bakgrunn av flere tilgjengelige skjøtelsesregler. I Norge er disse skjøtelsesreglene tilgjengelige i form av tre ulike tynningsmaler. Den eldste tilgjengelige tynningsmalen er et tynningsslips utarbeidet i 1977 ved Skogbrukets kursinstitutt (SKI, 2010). Dette tynningsslipset benytter treslag, treantall per dekar og overhøyde som inngangsverdier. Tynningsbehovet defineres ut fra en optimal utviklingsbane for bestandet og en grense for når selvtytning inntreer. Det ble i 2006 utarbeidet en ny tynningsmal som er grunnflatebasert, og som benytter grunnflatesum (m^2/ha), bonitet (H_{40}) (Tveite, 1977; Braastad, 1980), treslag og overhøyde som inngangsverdier (SKI, 2006). Denne tynningsmalen viser en nedre grense for grunnflatesum etter tynning (Figur 1), og et tynningspotensial defineres hvis grunnflatesummen er over denne grensen. Det er også tilgjengelig andre grunnflatebaserte tynningsdiagrammer som er ”oversatt” fra svenske til norske forhold av Glommen Skog BA (Glommen Skog, 2005). Disse tynningsdiagrammene har også grunnflatesum (m^2/ha), bonitet (H_{40}), treslag og overhøyde som inngangsverdier (Figur 4). Tynningsbehovet blir her definert ut fra en maksimal anbefalt grunnflate. Bestand med grunnflate som er høyere enn denne grensen har tynningsbehov.



Figur 1: Eksempel på en grunnflatebasert tynningsmal som er tilgjengelig i Norge (Figuren er hentet fra SKI, 2006).

1.3 Flybåren laserskanning

FLS er en fjernmålingsteknikk som i tillegg til å registrere skog blant annet blir brukt innen terrengmodellering, klassifisering av areal og registrering av isens utbredelse i polare strøk. Interessen for bruk av FLS til registreringer i skog startet i Sovjet Unionen i 1977. Deretter startet forskningen i Canada og USA tidlig i 1980-årene (Næsset et al., 2004).

I Norge startet forskning på bruk av FLS til skogregistreringsformål i 1995 (Næsset, 1997a, 1997b). FLS har siden 2002 blitt brukt operasjonelt til områdetaksering i Norge (Næsset et al., 2004), og er i dag den ledende metoden for registrering av skog. Eid et al. (2004) viste i en kostnads- og tapsanalyse at nåverditapet grunnet feil i ressursbeskrivelsen og påfølgende feilaktige beslutninger, ble redusert ved bruk av lasertakst sammenlignet med fototakst. I tillegg viste studien at totalkostnaden (takstkostnad og nåverditap) ved bruk av lasertakst ble halvert i forhold til fototakst.

I dag er det hovedsaklig to ulike systemer av flybårne lasere på markedet, kontinuerligbølgesystem (continuous wave system) og diskretpulssystem (pulse ranging system / discrete return system) (Næsset et al., 2004). Kontinuerligbølgesystem benytter en flybåren laser som sender kontinuerlige lyspulser. Avstanden fra sensoren til et objekt beregnes på bakgrunn av faseendringene i den kontinuerlige strømmen av retursignaler (Lim et al., 2003). Slike systemer har som regel store fotavtrykk (large-footprint) noe som vil si at radien til den sirkulære lyspulsen er åtte meter eller større (Lim et al., 2003). Dette gir god informasjon om både den horisontale og den vertikale strukturen til biomassen. I Norge i dag er kontinuerligbølgesystem lite brukt til skogregistreringsformål.

Det vanligste systemet i Norge er diskretpulssystem. Systemet sender korte laserpulser fra en flybåren sensor, vanligvis med en punktetthet (punkt/m²) på mellom en og ti pulser per kvadratmeter. Laserpulsene blir distribuert på tvers av flyretningen slik at pulsene treffer bakken og objekter på bakken i en korridor under flyet. Denne korridoren kan ha en bredde på alt i fra 100 til over 1000 meter. Når pulsene blir reflektert fra treffpunktet dannes det et retursignal (ekko) som registreres i sensoren. Sensoren logger tiden fra pulsen forlot sensoren til retursignalet registreres. Ved å multiplisere denne tiden med lysets hastighet og dividere med to kan avstanden mellom sensoren og treffpunktet regnes ut for hvert retursignal (Næsset et al., 2004). Posisjonering av retursignalene er også mulig da sensorens orientering i rommet og skannevinkel blir registrert når pulsen sendes fra sensoren. Ved bruk av avstand og posisjonering får man for hvert retursignal tredimensjonale koordinater. Det kan registreres mer enn ett retursignal for hver puls. Treffer lyspulsen en kompakt overflate vil hele pulsens energi returneres samtidig, og kun ett retursignal vil registreres. Hvis derimot pulsen treffer kronen på et tre vil kun en liten del av energien i pulsen reflekteres med en gang, mens resten av energien i pulsen trenger videre inn i trekronen. Det vil da registreres flere returer fra samme puls. Ved bruk av diskretpulssystem kan man registrere opptil fem ulike returer fra samme puls. Det mest vanlige er å registrere første og siste retur (Lim et al., 2003).

Diskretpulssystem har lite fotavtrykk (small-footprint), det vil si at den sirkulære laserpulsen har en radius som er i underkant av en meter. Dette fører til at hvert enkelt retursignal kun beskriver en liten del av biomassen (Lim et al., 2003). Punkttettheten kan derfor være avgjørende for hvor god helhetlig beskrivelse av biomassen man får.

Etter skanningen blir en digital terrengmodell (DTM) konstruert. Dette gjøres ved at retursignalene fra terrengoverflaten identifiseres ved hjelp av en algoritme som evaluerer naboskap mellom retursignalene i tre dimensjoner (Axelsson, 2000). Høyden over terrenget kan dermed regnes ut for alle andre retursignaler ved å projisere dem ned på DTMen. Retursignaler fra bygninger og andre koordinatfestede faste objekter fjernes deretter fra datasettet. Høydefordelingene til de resterende retursignalene (vegetasjonstreff) kan benyttes til å utarbeide ulike laservariable. Laservariablene kan deretter benyttes i regresjonsmodeller for å estimere skoglige parametre som grunnflate og overhøyde. Vegetasjonstreff med høyde under to meter vil med stor sannsynlighet være retursignaler fra steiner, busker eller undervegetasjon. Slike retursignaler fjernes som regel fra datasettet da de kun bidrar med støy når sammenhenger mellom felt- og laserobservasjoner skal utarbeides (Nilsson, 1996; Næsset, 1997a).

1.4 Flybåren laserskanning data til estimering av skoglige parametre

Innledningsvis var forskningen på bruk av FLS-data til estimering av skoglige parametre rettet mot bestandsdata. Spesielt parametre som var knyttet til volumproduksjon som for eksempel volum, middelhøyde og overhøyde (Næsset, 1997a, 1997b; Nilsson, 1996). Etter som interessen for de biologiske aspektene ved skogbruket har økt, har det blitt fokusert på utvidet bruk av FLS-data (Næsset et al., 2004). Studier har vist at man for eksempel kan benytte laserdata til å beskrive enkeltrær (Persson et al., 2002; Ørka et al., 2010) og diameterfordeling i bestand (Gobakken & Næsset, 2004).

Det er i dag vanlig ved bruk av FLS-data at estimater for skoglige parametre som volum, grunnflate og overhøyde utarbeides ved bruk av den såkalte arealmetoden. Metoden er en tostegs prosedyre som tar utgangspunkt i observerte sammenhenger mellom felldata og laserdata (Næsset & Bjerknes, 2001; Næsset, 2002). Steg en går ut på å tilpasse regresjonsmodeller for sammenhengen mellom feltregistrerte skoglige parametre og laservariable på oppmålte prøveflater. I steg to benytter man regresjonsmodellene til å estimere skoglige parametre ut fra laservariable på resten av det takserte området der man kun har laserdata tilgjengelig. Tostegs prosedyren har blitt brukt til å estimere grunnflate og

overhøyde i flere ulike studier i Norge (Næsset, 2002, 2004a, 2004b og 2007).

Forklaringsgraden til stratumspesifikke regresjonsmodeller har for grunnflate variert mellom 69 % (Næsset, 2002) og 94 % (Næsset, 2004a), og for overhøyde mellom 74 % og 93 % (Næsset, 2002). Standardavviket til differansen mellom feltregistrerte og estimerte verdier har for grunnflate variert fra 1,83 m²/ha (Næsset, 2004a) til 4,88 m²/ha (Næsset, 2004b), mens differansen for overhøyde har variert fra 0,58 meter (Næsset, 2007) til 1,55 meter (Næsset, 2004b).

Egenskapene til laservariablene som benyttes i regresjonsmodelleringen avhenger av retursignalenes høydefordeling, og dermed også biomassens romlige fordeling. Ved stratifisering av laservariablene etter den romlige fordeling av biomassen oppnår man tilnærmet like egenskaper for laservariablene i hvert stratum. Siden ungskog og gammelskog har ulik romlig fordeling av biomassen (Lefsky et al., 1999), vil stratifisering etter alder, bonitet og treslag gir regresjonsmodeller med bedre forklaringsgrad (Næsset, 1997a, 2002). Barskog med mye løvtrær gir laservariable med andre egenskaper enn ren barskog. Gitt samme stammevolum, har løvtrær og bartrær ulik fordeling av biomassen. Studier (f.eks. Næsset, 2004a) har vist at bruk av laserdata fra skoger med høy løvandel gjør det vanskeligere å utarbeide gode regresjonsmodeller. Dette er en utfordring man må være klar over ved bruk av FLS i skogsområder med høy løvandel.

1.5 Flybåren laserskanning data til prediksjon av tynningsbehov

De nyeste tynningsmalene som er tilgjengelig for å identifisere tynningsbehov er grunnflatebaserte, og de har grunnflate og overhøyde som inngangsverdi. Både grunnflate og overhøyde er skoglige parametre som med god nøyaktighet lar seg estimere ut fra data registrert med FLS. Dermed kan man bruke FLS-data indirekte til å predikere tynningsbehov. Først estimeres skoglige parametre ut fra laserdata, og deretter predikers tynningsbehov ved bruk av estimerte parametrene som inngangsverdier i tynningsmalene.

Det kan også være mulig å predikere tynningsbehov direkte ut fra laserdata. De registrerte retursignalene, og dermed laservariablene, beskriver biomassens romlige fordeling. Biomassefordelingen i skog med tynningsbehov vil ofte skille seg fra biomassefordelingen i skog uten tynningsbehov. En finsk studie (Vastaranta et al., 2011) har vist at det er mulig å benytte FLS-data til å predikere tynningsbehov ved bruk av logistiske regresjonsmodeller. Studien viste at prøveflater med umiddelbart tynningsbehov ble predikert med en nøyaktighet på 83 %.

Ved Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) har det blitt skrevet flere elevoppgaver om bruk av FLS-data til å registrere tynningsbehov. Sjödin (2010) benyttet volumtetthet, definert som forholdet mellom stående volum i dag ved høyde H og stående volum i en sluttet skog med lik høyde H , til å registrere områder med tynningsbehov. Regresjonsmodellen som forklarte sammenhengen mellom volumtetthet og laservariablene hadde en forklaringsgrad på 83 %. Björn (2008) benyttet FLS-data indirekte til å predikere tynningsbehov. Han utarbeidet regresjonsmodeller for treantall og overhøyde ut fra FLS-data, og predikerte ut fra dette et tynningsbehov ved hjelp av tynningsmaler. Björn (2008) predikerte tynningsbehovet med en nøyaktighet på 70 %.

1.6 Problemstilling

Hovedproblemstillingen for oppgaven var å analysere egnetheten til to alternative metoder for utarbeidelse av tynningsanbefalinger i barskog ved hjelp av data fra FLS.

Metode 1 gikk ut på først å utvikle regresjonsmodeller for grunnflate og overhøyde fra laserdata. Deretter ble tynningsbehovet bestemt ved hjelp av tynningsdiagrammer med estimert grunnflate og overhøyde som inngang. I metode 2 ble tynningsbehovet predikert direkte fra FLS-data ved hjelp av logistisk regresjonsmodeller.

Hver metode ble validert på to ulike datasett.

2. Materiale og metode

2.1 Materiale

2.1.1 Studieområdet

Kongsvinger (66°N 67°Ø) og Sør-Odal (66°N 65°Ø) kommuner i Hedmark fylke (Figur 2), ble i 2008 og 2009 taksert av Mjøsen Skog BA og Foran Norge AS. Det totale registrerte produktive skogarealet var 40 500 hektar. Området bestod hovedsakelig av barskog, med en treslagsfordeling på 65 % furu (*Pinus sylvestris* L.) og 35 % gran (*Picea abies* (L.) Karst.). Tilnærmet halvparten (57 %) av barskogen var lokalisert på god bonitet ($H_{40} \geq 14$). Hogstklasse fordelingen i området var 33 %, 29 % og 17 % for henholdsvis hogstklasse III, IV og V.



Figur 2: Illustrasjon av studieområde. Til venstre vises kartutsnitt av Norge der Hedmark fylke er markert. Til høyre vises Hedmark fylke der Kongsvinger og Sør-Odal kommuner er markert.

Datamaterialet som ble brukt i denne oppgaven ble i utgangspunktet samlet inn i forbindelse med et samarbeidsprosjekt mellom Mjøsen Skog BA, Foran Norge AS og INA på UMB. Målet med prosjektet var å studere hvordan prøveflateutvelgelse ved hjelp fra laserdata kunne forbedre prediksjonen av skoglige parametre. For nærmere beskrivelse av prosjektet henvises det til Gobakken & Næsset (2010).

2.1.2 Felldata

Det ble gjennomført en systematisk prøveflatetakst med totalt 271 prøveflater i hogstklasse III-V. Prøveflatene var fordelt over studieområdet etter prinsippet for knippesampling (klustersampling), da dette reduserer transportkostnadene mellom den enkelte prøveflate (Schreuder et al., 1993). Prøveflatene ble lagt ut i grupper med fire kilometer mellom hver gruppe. Hver gruppe besto av ni prøveflater ordnet i et rektangulært mønster med 250 meter mellom hver prøveflate. Størrelsen på hver flate var 250 kvadratmeter.

Felldataene ble samlet inn 18. august til 1. oktober 2009. Feltregistreringene ble gjennomført av Mjøsen skog BA i Kongsvinger, og Foran Norge AS i Sør-Odal.

Hver prøveflate ble nøyaktig stedfestet med differensiel GPS for å ha mulighet til å koble prøveflatene fra den systematiske prøveflatetaksten med laserdata fra samme område. Posisjonsdata fra prøveflaten (roverdata) ble etterprosessert mot en basestasjon. Avstand mellom rover og basestasjon var i gjennomsnitt 38 kilometer i Kongsvinger og 21 kilometer i Sør-Odal, og det ble benyttet en loggetid for roveren på minst 20 minutter på hver flate. I prosjektrapporten (Gobakken & Næsset, 2010) beskrives instrumenter og programvare som ble benyttet til å stedfeste prøveflatene, og forfatteren henviser til denne prosjektrapporten for detaljert informasjon.

For å oppnå en korrekt størrelse på prøveflaten ble den horisontale radiusen (8,92 meter) målt med elektronisk avstandsmåler. Deretter ble hver prøveflate totalklavet med dataklave. Diameter i brysthøyde (*dbh*) ble målt med klavelinjalen vinkelrett på flateradien. Alle trær med brysthøydiameter over fire centimeter ble registrert. Utvalg av prøvetrær ble gjort med en sannsynlighet proporsjonal med grunnflaten for hvert tre. Basert på grunnflatesummen, målt med relaskop i flatesentrum, valgte dataklaven gjennomsnittlig ut 10 prøvetrær per prøveflate. Antall prøvetrær per flate varierte mellom fire og 16. For hvert prøvetre ble det registrert treslag, *dbh* (mm) og trehøyde (dm).

I etterkant av feltregistreringene ble det for hver prøveflate beregnet grunnflatemiddeldiameter, grunnflatesum, grunnflateveid middelhøyde og overhøyde. I denne oppgaven ble kun grunnflatesummen og overhøyden benyttet.

Grunnflatesummen (*G*) ble beregnet per hektar (m^2/ha). Grunnflaten til alle klavede trær på prøveflaten ble summert og delt på arealet av prøveflaten (0,025 hektar).

Overhøyde (H_O) i meter, ble som utgangspunkt beregnet som aritmetisk middel av høyden til to dominerende trær på prøveflaten. Dersom alle trærne på prøveflaten ble registrert som prøvetrær (dvs. under ti trær på flaten) ble høyden til de to grøvste trærne etter diameter benyttet. Dersom ikke alle trærne på prøveflaten ble registrert som prøvetrær, ble diameterklassen som inneholdt prøveflatens grøvste tre etter diameter identifisert. Var det to prøvetrær i denne diameterklassen ble høydene til disse benyttet for å beregne en overhøyde. Var det kun et prøvetre i denne diameterklassen ble denne høyden satt som overhøyde. Var det ingen prøvetrær i denne diameterklassen ble overhøyde satt lik høyden til det høyeste prøvetreet.

Bonitet ble funnet ved hjelp av fototolking. På prøveflatene varierte boniteten (H_{40}) fra 8 til 23. Hovedtyngden av prøveflatene (106 prøveflater) hadde bonitet 14.

Dataene i oppgaven ble på bakgrunn av tidligere studier (Næsset, 1997a, 2002) stratifisering etter treslag, hogstklasse og bonitet (Tabell 1). Stratum I omfattet skog i hogstklasse III på alle boniteter. Stratum II omfattet grandominert skog i hogstklasse IV-V på middels og dårlige boniteter, mens grandominert skog i hogstklasse IV-V på gode boniteter utgjorde stratum III. Stratum IV bestod av furudominert skog i hogstklasse IV-V på alle boniteter.

Tabell 1: Stratifisering av dataene etter hovedtreslag, hogstklasse og bonitet.

Stratum	hovedtreslag	hogstklasse	bonitet
I	Gran/Furu	III	Alle
II	Gran	IV-V	≤ 14
III	Gran	IV-V	> 14
IV	Furu	IV-V	Alle

I feltdataene varierte G i stratum I mellom $4 \text{ m}^2/\text{ha}$ og $40 \text{ m}^2/\text{ha}$ (Tabell 2). I stratum III var gjennomsnittlig G ($30 \text{ m}^2/\text{ha}$) høyere enn i stratum II ($28 \text{ m}^2/\text{ha}$). Standardavviket for G var størst ($11,6 \text{ m}^2/\text{ha}$) i stratum III. Gjennomsnittlig H_O i stratum I var 15 meter, mens i stratum II og III var den henholdsvis 19 meter og 22 meter (Tabell 2). I stratum III var standardavviket for H_O høyest (4 meter).

Tabell 2: Felldata og antall prøveflater (n) fordelt på strata. Tabellen viser gjennomsnitt (\bar{x}), minimumsverdi (min), maksimumsverdi (maks) og standardavvik (std) for grunnflate (G) (m^2/ha) og overhøyde (H_o) (meter).

Stratum	n	Variabel	\bar{x}	min	maks	std
I	64	G	21	4	40	8,4
		H_o	15	8	23	3,4
II	50	G	28	9	48	9,4
		H_o	19	9	27	3,7
III	51	G	30	6	58	11,6
		H_o	22	11	32	4,0
IV	69	G	24	7	47	8,5
		H_o	18	10	24	3,2

2.1.3 Laserdata

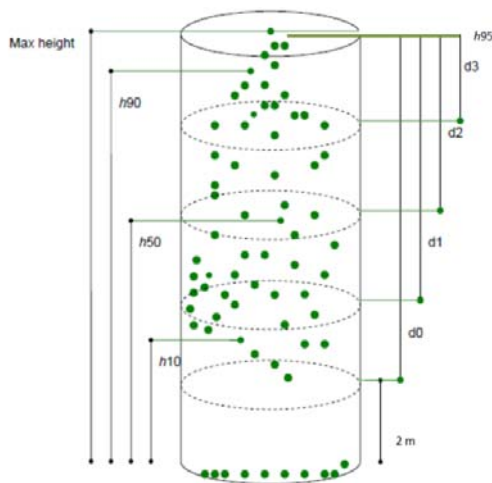
Terratec AS gjennomførte laserskanningen 5., 17. og 26. juli, 29. august, 28. september, 5. og 19. oktober 2008. Det ble benyttet et diskretpulssystem, og lasersensoren som ble benyttet var av typen Leica ALS50-II Multipulse laser skanner. Maksimal skannevinkel var 17 grader, flyhøyden var ca 2700 meter og gjennomsnittlig flyhastighet var 278 km/time. Dette gav en gjennomsnittlig punktetthet på 0,7 punkt/ m^2 .

Terratec AS gjennomførte også etterprosessering av de registrerte retursignalene. Det ble utarbeidet en digital terrengmodell (DTM). Deretter ble høyden til første og siste registrerte retursignal satt i forhold til DTM. Alle retursignaler karakterisert som vegetasjonstreff under to meter ble fjernet for å unngå støy. Et geografisk informasjonssystem ble benyttet for å selektere retursignalene innenfor samme prøveflate slik at de videre kunne behandles som en enhet.

Retursignalenes høydefordeling ble videre bearbeidet for å kunne gi informasjon om prøveflatens tredimensjonale biomassefordeling. Det ble utarbeidet to hovedtyper av laservariable, høydevariable og tetthetsvariable (Nelson et al., 1997; Næsset, 1997a; Means et al., 2000; Næsset & Bjerknes, 2001). Høydevariablene ble uttrykt ved den maksimale høyden for en gitt akkumulert prosent av totalt antall retursignaler på prøveflaten. For eksempel, den høyden der 10 % av retursignalene var lavere og 90 % var høyere (10ende persentil) definerte verdien til høydevariabel h_{10} . En verdi på 6 meter for h_{10} vil si at 10 % av alle retursignalene hadde registrerte høyder som var under eller lik 6 meter. I denne oppgaven ble høydefordelingen til retursignalene representert med ti slike høydevariable, det vil si for 10 % (h_{10}), 20 % (h_{20}) og opp til 100 % (h_{max}) av retursignalene (Figur 3). Det ble utarbeidet

høydevariable for både første og siste retursignal, noe som gjorde at det til sammen var tilgjengelig 20 høydevariable. Høydevariablene for først og siste retursignal skilles med ending *_f* for første retur (h_{10_f}) og *_l* for siste retur (h_{10_l}). I tillegg ble høydevariable h_{mean} utarbeidet for både første og siste retursignal. Denne høydevariabelen representerte gjennomsnittlig høyde for retursignalene. Standardavviket (h_{sd}) og variasjonskoeffisienten (h_{cv}) til høydene for retursignalene ble også registrert.

Tetthetsvariablene beskrev retursignalenes tetthet, og var et uttrykk for den horisontale fordelingen av biomassen. For utarbeidelse av tetthetsvariablene ble det etablert en tenkt sylinder med høyde lik h_{95} og radius lik prøveflate størrelsen (8,92 meter). Denne sylindren ble deretter delt horisontalt inn i ti like store deler (Figur 3) mellom terskelnivået to meter og høyden til h_{95} . Hver tetthetsvariabel uttrykte hvor stor andelen av retursignalene som ble lokalisert over den høyden tetthetsvariabelen representerte (Bollandsås et al., 2008). Dette vil si at tetthetsvariabel d_9 med verdi 0,14 viste at 14 % av alle retursignalene var høyere enn 9/10 eller 90 % av høyden til h_{95} . I denne oppgaven ble den horisontale fordelingen av biomassen representert ved ti tetthetsvariable med benevnning d_0, d_1, d_2 og opp til d_9 . Det ble utarbeidet tetthetsvariable for både første og siste retur, noe som gjorde at det til sammen var tilgjengelig 20 tetthetsvariable. Tetthetsvariablene for først og siste retursignal skilles ved hjelp av ending *_f* for første retur og *_l* for siste retur.



Figur 3: Illustrasjon av hvordan høyde- og tetthetsvariablene ble utarbeidet. Sylindren skal illustrere prøveflaten, de grønne prikkene illustrerer retursignalene innen prøveflata. Høydevariablene er illustrert til høyre, og tetthetsvariable er illustrert til venstre (Figuren er utarbeidet av Bollandsås et al., 2008, og modifisert av Gobakken & Næsset, 2010).

I tillegg ble antall retursignaler totalt (n_t), og antall retursignaler klassifisert som vegetasjonstreff over terskelnivået på to meter (n_c), registrert for både første og siste retur.

Dette førte til at det totalt var tilgjengelig 50 høyde-, tetthets- og variasjonsvariable for hver prøveflate (Tabell 3).

Tabell 3: Beskrivelse av laservariable som ble utarbeidet fra retursignalene.

Variabelnavn	Forklaring av laservariable
$h_{10}, h_{20}, \dots, h_{90}$	Høyden ved 10 %, 20 %, ..., 90 % av registrerte retursignaler
h_{max}	Høyden til høyeste registrerte retursignal
h_{mean}	Gjennomsnittlig høyde av alle retursignaler
h_{sd}	Standardavviket til de målte høydene for retursignalene
h_{cv}	Variasjonskoeffisienten til de målte høydene for retursignalene
d_0, d_1, \dots, d_9	Andelen retursignaler ved 0 %, 10 %, ..., 90 % relativ høyde for retursignalene
n_t	Antall retursignaler totalt
n_c	Antall retursignaler klassifisert som vegetasjonstreff over terskelnivå på 2m

Variasjonen til laservariabelen h_{max} , for både første og siste registrerte retur, øker ved avtagende punkt tettheten på prøveflaten (Gobakken & Næsset, 2008; Næsset & Gobakken, 2005). På bakgrunn av dette ble ikke h_{max} tatt med som forklaringsvariabel for utarbeidelse av regresjonsmodeller. Laservariablene n_c og n_t for første og siste retursignal ble heller ikke tatt med. Årsaken til dette var at d_0 , som viser andel retursignaler to meter over bakkenivå, gir samme informasjon som en kombinert bruk av variablene n_c og n_t . Dette førte til at det ble benyttet til sammen 44 høyde-, tetthets- og variasjonsvariable som utgangspunkt for regresjonsmodelleringen.

2.1.4 Valideringsdata

Valideringsdataene ble samlet inn i samme studieområde som datasettet benyttet til modellutvikling. I valideringsdataene ble utvelgelsen av prøveflater til den systematiske prøveflatetaksten gjennomført ved bruk av forhåndsinformasjon fra laserdataene. Hele studieområdet ble dekket med sirkulære flater på 250 kvadratmeter, og laservariable (Tabell 3) utarbeidet for hver flate. Deretter ble prøveflatene i hvert stratum valgt ut slik at variasjonsbredden i $h_{70,f}$ og $d_{0,f}$ ble representert. For mer detaljert beskrivelse av utvelgelsen henvises det til prosjektrapporten (Gobakken & Næsset, 2010). Den systematiske prøveflatetaksten bestod av totalt 240 prøveflater.

Feltregistreringene ble gjennomført i perioden 1. september til 30. oktober 2009 av Mjøsen skog BA i Kongsvinger og Foran Norge AS i Sør-Odal. Registrering av skoglige parametre på prøveflatene ble gjennomført på identisk måte som beskrevet i punkt 2.1.2. Generelt sett var gjennomsnittlig G og H_O (Tabell 4) noe høyere i alle strataene i valideringsdataene i forhold

til datasettet brukt til modelltilpassing (Tabell 2). I valideringsdataene var standardavvikene for både G og H_o høyest i stratum III (Tabell 4).

Tabell 4: Valideringsdata og antall prøveflater (n) fordelt på strata. Tabellen viser gjennomsnitt (\bar{x}), minimumsverdi (min), maksimumsverdi (maks) og standardavvik (std) for grunnflate (G) (m²/ha) og overhøyde (H_o) (meter).

Stratum	n	variabel	\bar{x}	min	maks	std
I	49	G	21	9	41	8,4
		H_o	16	9	24	3,6
II	44	G	28	10	49	9,2
		H_o	21	13	31	3,4
III	51	G	32	10	53	10,1
		H_o	23	12	39	4,6
IV	61	G	22	3	47	9,5
		H_o	18	9	25	3,6

2.2 Metode

All behandling av data og alle statistiske analyser i denne oppgaven ble gjennomført i SAS 9.2 (Anon, 2008).

2.2.1 Klargjøring av datamaterialet

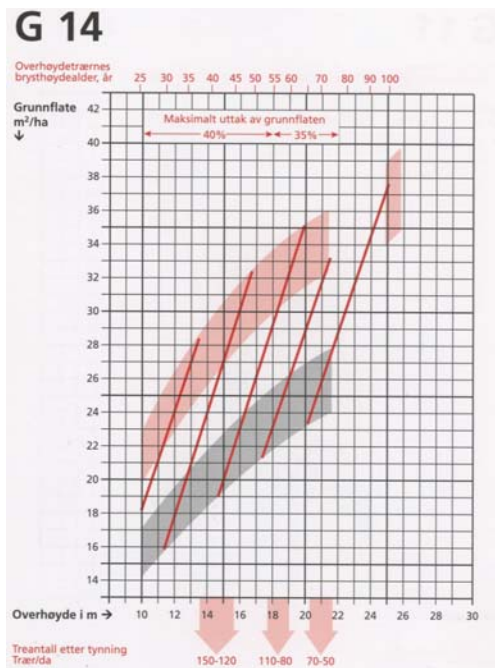
Datasettet som ble benyttet til modelltilpassingen bestod av totalt 271 prøveflater. Åtte prøveflater ble slettet etter inspeksjon av flybilder, da det var gjennomført skogbehandling i tidsrommet mellom lasertakseringen og felttakseringen. I tillegg ble ytterligere syv prøveflater slettet grunnet manglende laserdata eller bonitetsregistreringer. Alle prøveflater med andel løvtrær over 30 % ble slettet for å fjerne en kjent kilde til støy (f.eks. Næsset, 2004a). For gjeldende datasett var dette 22 prøveflater. Det endelige datasettet for modelltilpassing i oppgaven bestod etter dette av totalt 234 prøveflater. Dette datasettet vil videre i oppgaven betegnes som modelleringsdata.

I modelleringsdatasettet var det registrert andel gran, furu og løvtrær for hver prøveflate. Det ble ut fra dette definert et hovedtreslag for å kunne registrere et tynningsbehov. Gran ble definert som hovedtreslag på prøveflatene der andelen gran var større eller lik andelen furu, og furu ble definert som hovedtreslag der andelen furu var størst. Det ble laget en indikator variabel ($treslag$), som fikk verdien 1 når hovedtreslaget var gran og ellers verdien 0. I alt 144 prøveflater hadde gran som hovedtreslag ($treslag = 1$) og 90 prøveflater hadde furu som hovedtreslag ($treslag = 0$).

2.2.2 Identifisering av reelt tynningsbehov

For å kunne vurdere nøyaktigheten til de to metodene, måtte det utarbeides en ”fasit” for tynningsbehovet. Dette blir videre i oppgaven omtalt som reelt tynningsbehov. Det reelle tynningsbehovet ble identifisert ved bruk av tynningsdiagrammer som var grunnflatebasert med G , H_0 og bonitet som inngangsverdier.

Tynningsdiagrammene som ble benyttet var fra 1984 (Figur 4). De ble laget ved SLU, av Harry Eriksson ved institutt for skogproduksjon og professor Björn Elfving ved institutt for skogskjøtsel. I august 2005 tilpasset Glommen Skog BA tynningsdiagrammene fra nord Sverige til norske forhold (Glommen Skog, 2005). Den svenske boniteten (H_{100}) ble oversatt til norsk bonitet (H_{40}), ved bruk av svenske høydemaler der høyden ved 40 år alder ble registrert som bonitet (H_{40}). Tynningsdiagrammene definerte en maksimal anbefalt grunnflate, og var bonitets- og treslagsspesifikke (Figur 4). Den maksimale grunnflaten vil videre i oppgaven bli kalt kritisk grunnflate (KG).



Figur 4: Tynningsdiagram tilpasset av Glommen Skog BA. Figuren viser tynningsdiagram for bonitet G14 (H_{40}). Rødt felt viser tynningsbehov. Den kritiske grunnflaten (KG) defineres som underkant av rødt felt, det vil si den maksimale anbefalte grunnflaten. Grått felt viser hvor bestanden bør ligge etter tynning, og røde streker viser utviklingsbaner. (Figuren er hentet fra Glommen Skog, 2005).

For å kunne benytte tynningsdiagrammene til å identifisere et reelt tynningsbehov ble det utarbeidet en multippel lineær regresjonsmodell for KG for hvert treslag og bonitet. Dette var nødvendig da funksjonene som danner grunnlaget for tynningsdiagrammene ikke var tilgjengelig. Sammenhengen mellom KG og H_0 ble manuelt avlest, og en regresjonsanalyse

ble gjennomført ut fra disse avlesningene. Da den observerte sammenhengen mellom KG og H_O var konveks ble en modell med tredjegrads polynom tilpasset (Mendenhall & Sincich, 2003). Forklaringsvariablene som var tilgjengelig for modelltilpassing var H_O , kvadrert H_O (H_O^2) og tredjegrads transformasjon av H_O (H_O^3). Den generelle formel for de multiple lineære regresjonsmodellene var:

$$KG = \beta_0 + \beta_1 H_O + \beta_2 H_O^2 + \beta_3 H_O^3 + \varepsilon \quad \text{antar } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{Formel 1})$$

Der KG er i m^2/ha og H_O er i meter. Feilleddene (ε) er normalfordelt og uavhengige, med varians lik σ^2 .

Variabelutvelgelsen ble gjort med stegvis utvelgelse (proc reg / selection = stepwise) og signifikansnivå for forklaringsvariablene på 5 %. Flere detaljer om lineære regresjonsmodeller beskrives i punkt 2.2.3.

For bonitet G11, G20, F8, F11 og F17 var ikke regresjonskoeffisienten β_1 statistisk signifikant, og forklaringsvariabelen H_O ble derfor utelatt i modellene for disse bonitetene. For de resterende bonitetene (G8, G14, G17 og F14) var alle regresjonskoeffisientene statistisk signifikante, og modellene inneholdt alle tilgjengelige forklaringsvariable. De tilpassede modellene for alle boniteter hadde forklaringsgrad (R^2) lik 1.

Det ble tilpasset en felles modell for bonitet G20 og G23 etter tynningsdiagrammet for G20, da det ikke var tilgjengelig tynningsdiagram for G23. Det ble også tilpasset en modell for F6 og F8 etter tynningsdiagrammet for F8, da tynningsdiagram F6 ikke var tilgjengelig.

Det reelle tynningsbehovet ble registrert som en kategorisk variabel for alle prøveflatene. Variabelen *tynning* hadde verdi 1 på prøveflater med tynningsbehov, og verdien 0 på prøveflater uten tynningsbehov. Først ble det definert en KG for hver prøveflate ut fra de bonitetsspesifikke modellene. Deretter ble et reelt tynningsbehov registrert på prøveflaten hvis KG hadde lavere verdi enn G (Tabell 5). For å ta hensyn til stabilitet ble det satt en øvre grense for H_O . Prøveflater med H_O over 18 meter for gran og 20 meter for furu fikk ikke registrert reelt tynningsbehov (Tabell 5). Dette vil si at selv om en prøveflate fikk registrert et reelt tynningsbehov ut fra G kunne den på grunn av H_O registreres uten tynningsbehov.

Tabell 5: Generelle kriterier for registrering av reelt tynningsbehov (*tytning* = 1) og ikke tynningsbehov (*tytning* = 0) ut fra kritisk grunnflate (*KG*), feltregistrert grunnflate (*G*) og feltregistrert overhøyde (*Ho*) for ulike treslag. Alle kriteriene må være oppfylt for å få registrert et reelt tynningsbehov.

<i>tytning</i> = 1		<i>tytning</i> = 0	
Gran og Furu	$KG \leq G$	Gran og Furu	$KG > G$
Gran	$Ho \leq 18 \text{ m}$	Gran	$Ho > 18 \text{ m}$
Furu	$Ho \leq 20 \text{ m}$	Furu	$Ho > 20 \text{ m}$

Det reelle tynningsbehovet ble identifisert i to ulike datasett. I det ene datasettet ble reelt tynningsbehov identifisert i hogstklasse III-V, og dette datasettet omtales videre i oppgaven som modelleringsdata 1. I det andre datasettet ble reelt tynningsbehov kun identifisert i hogstklasse III-IV, og datasettet omtales videre som modelleringsdata 2. Bakgrunnen for at modelleringsdata 2 ble benyttet var at det i praktisk sammenheng ikke er aktuelt å tynne i hogstklasse V. Fristilte trær i hogstklasse V vil ikke vokse fort nok eller lenge nok til å utnytte de frigitte resursene før de avvirkes.

I modelleringsdata 1 (hogstklasse III-V) ble det identifisert 95 prøveflater med reelt tynningsbehov og 139 prøveflater uten reelt tynningsbehov (Tabell 6). Stratum I og stratum IV hadde både flest og størst relativ andel prøveflater med reelt tynningsbehov (Tabell 6).

Tabell 6: Antall prøveflater med identifisert reelt tynningsbehov (*tytning* = 1) og ikke tynningsbehov (*tytning* = 0) fordelt på strata, for modelleringsdata 1 (reelt tynningsbehov i hogstklasse III-V). Andelen (%) av prøveflater med reelt tynningsbehov i forhold til totalt antall prøveflater er oppgitt i parentes.

Stratum	<i>tytning</i> = 1	<i>tytning</i> = 0
I	40 (63)	24
II	11 (22)	39
III	3 (6)	48
IV	41 (59)	28
Totalt	95 (41)	139

I modelleringsdata 2 (hogstklasse III-IV) ble det identifisert 77 prøveflater med reelt tynningsbehov (Tabell 7). Stratum II og stratum IV fikk størst reduksjon i antall prøveflater med reelt tynningsbehov i modelleringsdata 2 i forhold til modelleringsdata 1.

Tabell 7: Antall prøveflater med identifisert reelt tynningsbehov (*tytning* = 1) og ikke tynningsbehov (*tytning* = 0) fordelt på strata, for modelleringsdata 2 (reelt tynningsbehov i hogstklasse III-IV). Andelen (%) av prøveflater med reelt tynningsbehov i forhold til totalt antall prøveflater er oppgitt i parentes.

Stratum	<i>tytning</i> = 1	<i>tytning</i> = 0
I	40 (63)	24
II	9 (18)	41
III	2 (4)	49
IV	26 (38)	43
Totalt	77 (33)	157

2.2.3 Estimering av grunnflate og overhøyde (metode 1)

Den ene metoden som ble vurdert, videre omtalt som metode 1, gikk ut på å predikere et tynningsbehov ut fra estimert grunnflate (\hat{G}) og overhøyde (\hat{H}_O). Det var da behov for å utarbeide modeller for estimering av disse parametrene. Modeller for sammenhenger mellom G og laservariable, og H_O og laservariable, for hvert stratum ble utarbeidet ved bruk av regresjonsanalyse. Den generelle formelen for en multipl lineær regresjonsmodell er:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad \text{antar } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{Formel 2})$$

Der Y er responsvariabelen, lik G (m²/ha) eller H_O (m). X_k er forklaringsvariablene, lik de 44 høyde-, tetthets- og variasjonsvariable utarbeidet fra laserdata (Tabell 3). Det forutsettes lineær sammenheng mellom responsvariabelen og forklaringsvariablene, og at feilleddene (ε) er normalfordelt og uavhengige, med varians lik σ^2 (Mendenhall & Sincich, 2003).

For å oppnå linearitet og konstant varians ble både forklaringsvariablene og responsvariabelen transformert ved hjelp av den naturlige logaritmen (\ln). Tidligere studier har vist at slik transformering gav forbedrede resultater ved estimering av grunnflate og overhøyde (Nelson et al., 1997; Næsset, 2002, 2004b). Den multipl lineære regresjonsmodellen er da:

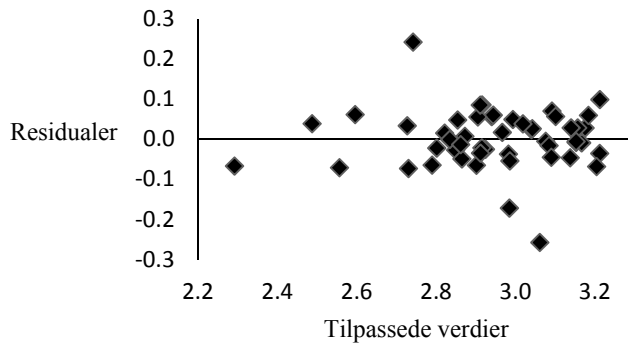
$$\ln(Y) = \ln\beta_0 + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) + \dots + \beta_k \ln(X_k) + \varepsilon_{\ln} \quad (\text{Formel 3})$$

Der $\ln(Y)$ er den naturlige logaritmen av G eller H_O , $\ln(X_k)$ er den naturlige logaritmen av forklaringsvariablene og ε_{\ln} er feilleddet til den transformerte modellen.

Modelltilpassingen ble gjort med minste kvadraters metode, det vil si at kvadratavvikene mellom observerte og estimerte verdier skal være så liten som mulig (Mendenhall & Sincich, 2003). Variabelutvelgelsen ble gjort med stegvis utvelgelse (proc reg / selection = stepwise) med signifikansnivå (α) for forklaringsvariablene på 5 %.

De stratumsesifikke tilpassede modellene ble undersøkt og vurdert etter forutsetningene lagt til grunn for modellen. Det ble gjennomført residualanalyse, der antagelsen om linearitet, uavhengige feilledd (ε) med forventning 0 og konstant varians ble undersøkt.

Residualanalysen ble gjennomført ved å plote tilpassede verdier (\hat{y}_i) mot residualene ($\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i$) (Mendenhall & Sincich, 2003), deretter ble punktenes plassering om verdien 0 visuelt undersøkt (Figur 5).



Figur 5: Figuren viser et residualplott for en modell der antagelsene om linearitet, uavhengige feilledd med forventning lik 0 og konstant varians er oppfylt.

Det ble også undersøkt om forklaringsvariablene i de tilpassede modellene hadde signifikant effekt på responsen med en F-test. Det ble testet: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ mot $H_1: \beta_j \neq 0$ for minst en j , med signifikansnivå (α) 5 %. Blir H_0 forkastet kan man påstå at minst en av forklaringsvariablene har signifikant effekt på responsen (Mendenhall & Sincich, 2003). I tillegg ble alle regresjonskoeffisientene (β_j) testet for å undersøke om forklaringsvariabelen (x_j) hadde lineær sammenheng med responsvariabelen, gitt at de andre forklaringsvariablene var med i den tilpassede modellen. Det ble gjort med en t-test: $H_0: \beta_j = 0$ mot $H_1: \beta_j \neq 0$, med signifikansnivå (α) 5 %. Blir H_0 forkastet kan det påstås at det er en lineær sammenheng mellom forklaringsvariabelen og responsen.

Determinasjonskoeffisienten (R^2) ble benyttet til å vurdere hvor god den tilpassede modellen var. R^2 til en tilpasset modell sier hvor stor del av den totale variasjonen til responsvariablene (y) som kan forklares av modellen gitt de utvalgte forklaringsvariablene (x_i) (Mendenhall & Sincich, 2003), og gis ved formel:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (\text{Formel 4})$$

Der y_i er observert respons, \hat{y}_i er estimert respons og \bar{y}_i er gjennomsnittlig respons. R^2 er et tall mellom 0 og 1, jo høyere R^2 jo større del av variasjonen i responsen forklares av modellen. R^2 vil også øke når antall forklaringsvariable øker, dette er uheldig ved bruk av multippel regresjon. Det anbefales da å benytte justert determinasjonskoeffisient (R_a^2) til vurdering av den tilpassede modellen (Mendenhall & Sincich, 2003). Uttrykt i prosent gis den ved formel:

$$R_a^2 = \left(1 - \frac{n-1}{n-(k+1)}(1 - R^2)\right) 100 \quad (\text{Formel 5})$$

Der n er antall observasjoner og k er antall forklaringsvariable. Ved vurdering av de tilpassede modellene var det ønskelig med størst mulig justert determinasjonskoeffisient (R_a^2). I oppgaven vil R_a^2 også omtales som modellens forklaringsgrad.

Multikolaritet er et problem som kan oppstå hvis noen av forklaringsvariablene i en multippel regresjonsmodell er korrelert (tilnærmet lineær sammenheng mellom to eller flere forklaringsvariable). De korrelerte forklaringsvariablene bidrar da med samme informasjon til modellen, og tilpassingen kan bli misvisende. En måte man kan oppdage multikolaritet på er ved hjelp av variansinflasjonsfaktoren (VIF_i) til forklaringsvariabelen (x_i) (Mendenhall & Sincich, 2003) som gis ved formel:

$$VIF_i = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (\text{Formel 6})$$

Der R_i^2 er R^2 for en modell for forklaringsvariabelen x_i basert på de andre forklaringsvariablene. Hvis en forklaringsvariabel i stor grad forklares av de andre forklaringsvariablene får vi en stor R_i^2 og en stor VIF_i . Er VIF_i over 10 indikerer dette at man har multikolaritet. I alle de tilpassede modellene ble forklaringsvariablenes VIF_i undersøkt, og ved problemer ble forklaringsvariabelen med høyest VIF verdi fjernet og ny modelltilpassing ble gjennomført.

Root Mean Square Error (RMSE) ble også benyttet for å vurdere de tilpassede modellene. RMSE er kvadratroten til gjennomsnittet av de kvadrerte residualene, og viser variasjonen mellom observerte og estimerte verdier. Det var ønskelig med en modell der denne variasjonen var så lav som mulig.

Ved bruk av kriteriene beskrevet over ble de stratumspesifikke tilpassede modellene for den naturlige logaritmen av grunnflaten ($\ln G$) og den naturlige logaritmen av overhøyden ($\ln H_O$) vurdert, og de beste modellene valgt ut.

Modellene ble så tilbaketransformert slik at \hat{G} og \hat{H}_O ble oppgitt i original skala. Tilbaketransformeringen skjedde ved bruk av grunntallet for den naturlige logaritmen (e) og man får da regresjonsmodellen i multiplikativ form:

$$Y = \beta_0 X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \dots X_k^{\beta_k} \varepsilon_m \quad (\text{Formel 7})$$

Der Y er \hat{G} eller \hat{H}_O , X_k er forklaringsvariablene og ε_m er feilleddet til modellen i multiplikativ form. Ved tilbaketransformering oppstår det bias, og for å korrigere for denne feilen ble halvparten av variansen lagt til konstantleddet før tilbaketransformering (Goldberger, 1968).

2.2.4 Prediksjon av tynningsbehov ut fra estimerte parametre (metode 1)

For å predikere et tynningsbehov ved bruk av metode 1 ble det for hver prøveflate estimert en grunnflate og overhøyde ved bruk av stratumspesifikke modeller. Deretter ble \hat{G} og \hat{H}_O benyttet som inngangsverdier for å registrere et tynningsbehov på prøveflaten etter samme kriterier som for registrering av det reelle tynningsbehovet (Tabell 5).

2.2.5 Prediksjon av tynningsbehov ved logistisk regresjon (metode 2)

Den andre metoden som ble vurdert gikk ut på å finne en direkte sammenheng mellom det reelle tynningsbehovet på prøveflaten og laservariablene ved bruk av logistisk regresjon. Denne metoden er videre i oppgaven omtalt som metode 2. Flere alternative logistiske regresjonsmodeller ble tilpasset.

Utvikling av logistiske regresjonsmodeller:

Det reelle tynningsbehovet ble definert som en binomisk variabel med to mulige utfall: tynningsbehov eller ikke tynningsbehov (jf punkt 2.2.2). Ved bruk av det reelle tynningsbehovet som responsvariabel i en regresjonsanalyse var det da mest hensiktsmessig å benytte multipl logistisk regresjonsmodell, med generell formel:

$$y = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k}} \quad \text{der } y = \begin{cases} 1 & \text{hvis reelt tynningsbehov} \\ 0 & \text{hvis ikke reelt tynningsbehov} \end{cases} \quad (\text{Formel 8})$$

X_k er forklaringsvariablene, det vil si de 44 høyde-, tetthets- og variasjonsvariable utarbeidet fra laserdata (Tabell 3) samt bonitet og treslag, og e er grunntallet til den naturlige logaritmen. Responsvariabelen (y) uttrykker sannsynligheten for reelt tynningsbehov ($y = 1$) for gitte verdier av forklaringsvariablene (x_i). Det vil med andre ord si $y = P(y=1 \mid x_i)$. Den estimerte sannsynligheten for reelt tynningsbehov (\hat{y}) får en verdi mellom 0 og 1 (Mendenhall & Sincich, 2003).

En logistisk regresjonsmodell slik den er beskrevet over er basert på antagelser om at sammenhengen mellom responsvariabelen (y) og forklaringsvariablene (x_i) utgjør en sigmoid kurve. Den tilsvarende lineære logistiske regresjonsmodellen beskriver et lineært forhold mellom responsvariabelen $\text{logit}(y)$ og forklaringsvariabelen (x_i). $\text{Logit}(y)$ er da en logaritmisk transformasjon av sannsynligheten for å observere reelt tynningsbehov ($y=1$). Ved bruk av

logistisk regresjon (proc logistic) i SAS 9.2 (Anon, 2008) var det denne modellformen som ble tilpasset. Den lineære logistiske regresjonsmodellen har generell formel (Agresti, 2007):

$$\text{logit}(y) = \ln\left(\frac{y}{1-y}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (\text{Formel 9})$$

Modelltilpassingen ble gjennomført med sannsynlighetsmaksimering (maximum likelihood estimation), det vil si at de tilpassede parametrene gav høyest mulig verdi for sannsynlighetsfunksjonen til de observerte dataene. Dette gir lavere standardfeil enn om man skulle benyttet minste kvadraters metode da variansen til en binomisk fordeling ikke er konstant (Agresti, 2007). Det ble benyttet stegvis utvelgelse (proc logistic / selection = stepwise) ved variabelutvelgelsen. Signifikansnivå (α) for forklaringsvariable var på 5 %.

De alternative logistiske modellene ble evaluert med en modelltest og en regresjonskoeffisienttest. Modelltesten viste om en eller flere av forklaringsvariablene i den tilpassede modellen bidro signifikant til responsen. Det ble testet: $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ mot $H_1: \beta_j \neq 0$ for minst en j , med signifikansnivå (α) 5 % (Agresti, 2007). Hvis H_0 blir forkastet vil det si at minst en av forklaringsvariablene i den tilpassede modellen bidrar til å forklare sannsynligheten for reelt tynningsbehov. Det ble også gjennomført en test av regresjonskoeffisientene (β_i) for alle forklaringsvariable (x_i) for å undersøke om responsen var avhengig av forklaringsvariabelen (x_i), gitt at de andre forklaringsvariablene var med i den tilpassede modellen. Det ble da testet: $H_0: \beta_i = 0$ mot $H_1: \beta_i \neq 0$, med signifikansnivå (α) 5 % (Agresti, 2007). Blir H_0 forkastet vil dette si at sannsynligheten for reelt tynningsbehov blir beskrevet ved hjelp av forklaringsvariabelen (x_i).

En Hosmer-Lemeshow test ble gjennomført på hver modell. Denne testen viser sannsynligheten for sammenheng mellom observert og estimert sannsynlighet for tynningsbehov. Det ble testet: $H_0 =$ observert sannsynlighet og estimert sannsynlighet er uavhengige, mot $H_1 =$ observert sannsynlighet og estimert sannsynlighet er ikke uavhengige. Ved signifikansnivå (α) på 5 % kan man forkaste H_0 hvis det er 95 % sannsynlighet for sammenheng mellom observert og estimert sannsynlighet for tynningsbehov (Agresti, 2007).

Ved bruk av kriteriene beskrevet over ble det til sammen utviklet seks alternative logistiske regresjonsmodeller på formen $\text{Logit}(y)$. Fire av modellene var stratumspesifikke, og ble tilpasset ved bruk av modelleringsdata 1. De vil videre bli omtalt som Logit modell 1 til 4, for henholdsvis stratum I til IV. Det ble også utarbeidet en ustratifisert modell basert på

modelleringsdata 1, vider omtalt som Logit modell 5. I tillegg ble det utarbeidet en ustratifisert modell på bakgrunn av modelleringsdata 2, videre omtalt som Logit modell 6.

Prediksjon av tynningsbehov ved bruk av logistiske modeller:

De logistiske modellene ble tilbaketransformert ved bruk av grunntallet for den naturlige logaritmen (e) for at sannsynligheten for reelt tynningsbehov skulle oppgis i original skala. Dette ble gjort ved bruk av Formel 8.

Sannsynlighet for reelt tynningsbehov ble estimert som et tall mellom 0 og 1 for hver prøveflate. Et tynningsbehov ble registrert på prøveflaten hvis den estimerte sannsynligheten var over eller lik 0,5.

2.2.6 Validering

Vurdering av de to metodene, samt vurdering av regresjonsmodellene for både grunnflate, overhøyde, ble gjort ved validering på et uavhengig datasett. Før valideringsdataene kunne benyttes måtte datasettet klargjøres på samme måte som modelleringsdataene. Datasettet bestod opprinnelig av 240 prøveflater. Etter sletting av prøveflater med andel løvtrær over 30 % og prøveflater med stor andel døde trær bestod datasettet av 205 prøveflater. Datasettet vil videre i oppgaven betegnes som valideringsdata.

Det reelle tynningsbehovet på prøveflatene i valideringsdataene ble identifisert på samme måte som det reelle tynningsbehovet i modelleringsdataene (punkt 2.2.2). To ulike datasett ble benyttet. Et der det reelle tynningsbehovet ble identifisert i hogstklasse III-V, videre omtalt som valideringsdata 1. Og et der det reelle tynningsbehovet ble identifisert i hogstklasse III-IV, videre omtalt som valideringsdata 2. I valideringsdata 1 ble det identifisert 69 prøveflater med reelt tynningsbehov, hvorav de aller fleste var lokalisert i stratum I og stratum IV (Tabell 8). Det ble identifisert relativt sett færre prøveflater med reelt tynningsbehov i valideringsdata 1 (Tabell 8) sammenlignet med modelleringsdata 1 (Tabell 6).

Tabell 8: Antall prøveflater med identifisert reelt tynningsbehov ($tyning = 1$) og ikke tynningsbehov ($tyning = 0$) fordelt på strata i valideringsdata 1 (reelt tynningsbehov i hogstklasse III-V). Andelen (%) av prøveflater med reelt tynningsbehov i forhold til totalt antall prøveflater er oppgitt i parentes.

Stratum	<i>tyning</i> = 1	<i>tyning</i> = 0
I	25 (51)	24
II	6 (13)	38
III	6 (11)	45
IV	32 (52)	29
Totalt	69 (34)	136

I valideringsdata 2 ble det identifisert 52 prøveflater med reelt tynningsbehov (Tabell 9). Som følge av at det ikke kunne registreres tynningsbehov i hogstklasse V fikk stratum IV en stor reduksjon i antall prøveflater med reelt tynningsbehov (Tabell 9) i forhold til valideringsdata 1 (Tabell 8).

Tabell 9: Antall prøveflater med identifisert reelt tynningsbehov (*tyinning* = 1) og ikke tynningsbehov (*tyinning* = 0) fordelt på strata i valideringsdata 2 (reelt tynningsbehov i hogstklasse III-IV). Andelen (%) av prøveflater med reelt tynningsbehov i forhold til totalt antall prøveflater er oppgitt i parentes.

Stratum	<i>tyinning</i> = 1	<i>tyinning</i> = 0
I	25 (51)	24
II	5 (11)	39
III	6 (12)	45
IV	16 (26)	45
Totalt	52 (34)	153

De stratumspesifikke modellene for grunnflate og overhøyde ble validert ved bruk av valideringsdata 1. Som del av valideringen ble differansen mellom estimerte og feltmålte verdier for hver prøveflate regnet ut etter formel:

$$dif\ G = \hat{G} - G \quad (\text{Formel 10})$$

$$dif\ H_O = \hat{H}_O - H_O \quad (\text{Formel 11})$$

Der \hat{G} er estimert grunnflate, G er feltregistrert grunnflate, \hat{H}_O er estimert overhøyde og H_O er feltregistrert overhøyde. Gjennomsnittet og standardavviket til differansene ble funnet for hvert stratum. Standardavviket ble utregnet etter formel:

$$std\ dif = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (dif_i - \bar{x}\ dif)^2} \quad (\text{Formel 12})$$

Der n er antall prøveflater i stratomet, dif er differansen på prøveflate i , $\bar{x}\ dif$ er gjennomsnittlig differanse over alle n prøveflater. Det ble testet om differansen var forskjelling fra null ved en tosidig t-test med signifikansnivå (α) på 5 %.

Validering av metode 1 ble gjort i både valideringsdata 1 og 2. Stratifisering ble benyttet i begge datasettene, da modellene for G og H_O var stratumspesifikke. Metode 2 ble validert ved bruk av de seks alternative logistiske modellene. Logit modell 1 til 4 ble benyttet på stratifisert valideringsdata 1, mens Logit modell 5 ble benyttet på ustratifisert valideringsdata 1. Logit modell 6 ble benyttet på ustratifisert valideringsdata 2.

Som ledd i valideringen av metode 1 og 2 ble det utarbeidet krysstabeller (Tabell 10) for å sammenligne det reelle tynningsbehovet og det predikerte tynningsbehovet for hver prøveflate. I krysstabellen ble prøveflatene fordelt i kategorier etter hvilket reelt og predikert tynningsbehov de hadde. Kriteriene for fordeling til de ulike kategoriene er vist i Tabell 10. For eksempel ble en prøveflate kategorisert med *true positive* (TP) hvis den hadde reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov.

Tabell 10: Krysstabellen viser kriteriene for de ulike kategoriene og kategorinavn.

		Reelt tynningsbehov	
		1	0
Predikert tynningsbehov	1	<i>true positive</i> (TP)	<i>false positive</i> (FP)
	0	<i>false negative</i> (FN)	<i>true negative</i> (TN)

Det ble også beregnet Cohens kappa-indeks (κ) for begge metodene. Cohens kappa-indeks gis ved formel:

$$\kappa = \frac{\rho_o - \rho_c}{1 - \rho_c} \quad (\text{Formel 13})$$

Der ρ_o er antall prøveflater i kategori *true positive* og ρ_c er antall prøveflater i kategori *true positive* ved tilfeldig satt tynningsbehov (Cohen, 1960). Cohens kappa-indeks beskriver hvor godt metoden er egnet til å predike korrekte tynningsbehov i forhold til en tilfeldig prosess. Kappa-indeksen bør være så høy som mulig. For vurdering av hvor godt metoden var egnet til å predikere korrekt tynningsbehov ble det benyttet en skalering som var presentert i Landis & Koch (1977). For eksempel indikerte en kappa-indeks på 0,21-0,40 en rimelig evne til å predikere korrekt tynningsbehov, mens 0,41-0,6 indikerte en moderat evne og 0,61-0,80 en betydelig evne til predikere korrekt tynningsbehov.

I tillegg ble den såkalte TP-raten kalkulert for å vurdere nøyaktigheten til metodene. TP-raten viste andelen korrekte predikerte tynningsbehov, i forhold til alle prøveflater med reelt tynningsbehov.

$$TP - rate = \left(\frac{TP}{TP+FN} \right) 100 \quad (\text{Formel 14})$$

Der TP er antall prøveflater med korrekt predikert tynningsbehov (*true positive*), FN er antall prøveflater med reelt tynningsbehov som ikke har fått predikert tynningsbehov (*false negative*). $TP + FN$ blir da det totale antallet prøveflater med reelt tynningsbehov. Jo høyere denne TP-raten ble desto bedre var nøyaktigheten til metoden.

3. Resultater

3.1 Estimering av grunnflate og overhøyde (metode 1)

3.1.1 Stratumspesifikke modeller

De stratumspesifikke modellene for $\ln G$ hadde enten $\ln h_{sd_f}$ eller $\ln h_{90_l}$ som forklaringsvariable, i tillegg til ulike logaritmisk transformerte tetthetsvariable (Tabell 11). I stratum I hadde modellen for $\ln G$ høyest forklaringsgrad, med en R_a^2 på 90 % (Tabell 11). I de andre strataene hadde modellen for $\ln G$ en R_a^2 på 80 %, 88 % og 79 % for henholdsvis stratum II, III og IV. RMSE varierte fra 0,14 i stratum I til 0,18 i stratum II og IV (Tabell 11).

Tabell 11: Signifikante forklaringsvariable i tilpasset modell for estimering av den naturlige logaritmen av grunnflaten ($\ln G$) fordelt på strata. Justert determinasjonskoeffisient (R_a^2) i prosent og root mean square error (RMSE).

Stratum	Forklaringsvariable ^a	R_a^2	RMSE
I	$\ln h_{sd_f}$, $\ln d_{1_f}$, $\ln d_{6_l}$	0,90	0,14
II	$\ln h_{90_l}$, $\ln d_{1_f}$	0,80	0,18
III	$\ln h_{sd_f}$, $\ln d_{5_l}$	0,88	0,17
IV	$\ln h_{sd_f}$, $\ln d_{3_f}$	0,79	0,18

^a laservariabler definert i Tabell 3 transformert med den naturlige logaritmen.

Modellen for $\ln H_O$ hadde i alle strataene $\ln h_{90_f}$ som signifikant forklaringsvariable, alene eller i kombinasjon med logaritmisk transformerte høyde- og tetthetsvariable (Tabell 12). Høyest forklaringsgrad fikk modellen for $\ln H_O$ i stratum III og stratum I, med R_a^2 på henholdsvis 92 % og 91 % (Tabell 12). Modellen for $\ln H_O$ i stratum II og stratum IV hadde noe dårligere forklaringsgrad, med R_a^2 på henholdsvis 88 % og 87 %. Modellene for $\ln H_O$ hadde generelt en høyere forklaringsgrad enn modellene for $\ln G$ (Tabell 11). RMSE varierte lite, og var på 0,06 eller 0,07 (Tabell 12).

Tabell 12: Signifikante forklaringsvariable i tilpasset modell for estimering av den naturlige logaritmen av overhøyden ($\ln H_O$) fordelt på strata. Justert determinasjonskoeffisient (R_a^2) i prosent og root mean square error (RMSE).

Stratum	Forklaringsvariable ^a	R_a^2	RMSE
I	$\ln h_{20_f}$, $\ln h_{90_f}$, $\ln d_{4_l}$, $\ln d_{6_f}$	0,91	0,07
II	$\ln h_{90_f}$	0,88	0,07
III	$\ln h_{30_l}$, $\ln h_{90_f}$, $\ln d_{0_f}$, $\ln d_{8_l}$	0,92	0,06
IV	$\ln h_{90_f}$	0,87	0,07

^a laservariabler definert i Tabell 3 transformert med den naturlige logaritmen.

3.1.2 Validering av stratumsesifikke modeller

Validering av de stratumsesifikke modellene for grunnflaten viste at den gjennomsnittlige differansen mellom \hat{G} og G var høyest i stratum II med 1,1 m²/ha (Tabell 13). Den gjennomsnittlige differansen var ikke signifikant forskjelling fra null for noen strata (Tabell 13). Standardavviket til den gjennomsnittlige differansen var høyest for stratum III (Tabell 13).

Tabell 13: Minimumsverdi (min *dif*), gjennomsnitt (\bar{x} *dif*), maksimumsverdi (maks *dif*) og standardavvik (std *dif*) for differansen mellom \hat{G} og G (*dif G*) i m²/ha fra valideringsdata 1 fordelt på strata. Resultat fra tosidig t-test av differansen vises i parentes.

Stratum	min <i>dif</i>	\bar{x} <i>dif</i>	maks <i>dif</i>	std <i>dif</i>
I	-9,13	-0,61 (NS)	7,54	3,72
II	-9,13	1,1 (NS)	10,97	4,3
III	-13,1	0,32 (NS)	12,5	6,31
IV	-8,25	0,4 (NS)	11,5	4,17

Validering av de stratumsesifikke modellene for overhøyden viste at gjennomsnittlig differanse mellom \hat{H}_O og H_O , i absolutte tall, var høyest i stratum III (Tabell 14). Differansen var på -0,45 meter. Ingen av strataene hadde gjennomsnittlig differanse som var signifikant forskjellig fra null (Tabell 14). I stratum III var standardavvik for gjennomsnittlig differansen størst (Tabell 14).

Tabell 14: Minimumsverdi (min *dif*), gjennomsnitt (\bar{x} *dif*), maksimumsverdi (maks *dif*) og standardavvik (std *dif*) for differansen mellom \hat{H}_O og H_O (*dif H_O*) i meter fra valideringsdata 1 fordelt på strata. Resultat fra tosidig t-test av differansen vises i parentes.

Stratum	min <i>dif</i>	\bar{x} <i>dif</i>	maks <i>dif</i>	std <i>dif</i>
I	-2,7	-0,07 (NS)	3,1	1,22
II	-2,26	-0,28 (NS)	5,28	1,46
III	-3,02	-0,45 (NS)	5,18	1,61
IV	-3,94	0,1 (NS)	2,96	1,33

3.2 Prediksjon av tynningsbehov ut fra estimerte parametre (metode 1)

3.2.1 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-V med stratifisering og metode 1

Anvendelse av metode 1 på valideringsdata 1 predikerte til sammen 66 prøveflater med tynningsbehov. Det reelle tynningsbehovet i valideringsdata 1 var 69 prøveflater (Tabell 8). Den totale TP-raten for metode 1 var 83 %, og Cohens kappa-indeks var på 0,77 (Tabell 15). TP-raten i stratum II var 100 %, mens TP-raten i både stratum I og stratum IV var 88 % (Tabell 15). TP-raten i stratum III var lavest, på kun 17 %. Lignede tendenser ble observert for kappa-indeksen. Kappa-indeksen i stratum II var høyest (0,83), og i stratum III var kappa-indeksen lavest (0,26) (Tabell 15).

Tabell 15: Validering av metode 1 på valideringsdata 1 (tynningsbehov i hogstklasse III-V). Fordeling av prøveflater i forhold til samsvar mellom reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov fordelt på strata. Andelen av korrekt predikert tynningsbehov (TP-rate) og Cohens kappa-indeks.

Stratum	TP ^a	FN ^b	TN ^c	FP ^d	TP-rate	kappa-indeks
I	22	3	21	3	88	0,76
II	6	0	36	2	100	0,83
III	1	5	45	0	17	0,26
IV	28	4	25	4	88	0,74
Totalt	57	12	127	9	83	0,77

^a TP = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov.

^b FN = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^c TN = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^d FP = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og med predikert tynningsbehov.

3.2.2 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-IV med stratifisering og metode 1

Anvendelse av metode 1 på valideringsdata 2 predikerte 48 prøveflater med tynningsbehov. Et reelt tynningsbehov var identifisert på 52 prøveflater i valideringsdata 2 (Tabell 9). Den totale TP-raten for metode 1 var 79 % og kappa-indeksen var på 0,76 (Tabell 16). I stratum I, II og III var TP-raten (Tabell 16) lik som ved bruk av metoden på valideringsdata 1 (Tabell 15). I stratum IV var TP-raten noe lavere (81 %). Kappa-indeksen for de ulike strataene var generelt sett noe høyere eller lik (Tabell 16) ved bruk av metoden på valideringsdata 2 i forhold til valideringsdata 1 (Tabell 15). Kappa-indeksen var høyest i stratum II (0,90) og lavest i stratum III (0,26) (Tabell 16).

Tabell 16: Validering av metode 1 på valideringsdata 2 (tynningsbehov i hogstklasse III-IV). Fordeling av prøveflater i forhold til samsvar mellom reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov fordelt på strata. Andelen av korrekt predikert tynningsbehov (TP-rate) og Cohens kappa-indeks.

Stratum	TP ^a	FN ^b	TN ^c	FP ^d	TP-rate	kappa-indeks
I	22	3	21	3	88	0,76
II	5	0	38	1	100	0,90
III	1	5	45	0	17	0,26
IV	13	3	42	3	81	0,75
Totalt	41	11	146	7	79	0,76

^a TP = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov.

^b FN = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^c TN = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^d FP = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og med predikert tynningsbehov.

3.3 Prediksjon av tynningsbehov ved logistisk regresjon (metode 2)

3.3.1 Tilpassede logistiske regresjonsmodeller

Det var ikke mulig å tilpasse stratumspesifikke logistiske regresjonsmodeller (Logit modell 1-4) i alle strata på modelleringsdata 1. For modellen i stratum II var ingen av forklaringsvariable signifikante, og Logit modell 2 bestod kun av et konstantledd (β_0). For de

resterende strata (Logit modell 1,3 og 4) var det mulig å tilpasse modeller ved bruk av forklaringsvariable som vises i Tabell 17. Kun Logit modell 1 hadde *treslag* og *bonitet* som signifikante forklaringsvariable. Hosmer-Lemeshow testen av Logit modell 3 viste at det var 99 % sannsynlighet for sammenheng mellom observert og estimert sannsynlighet for tynningsbehov (Tabell 17). Logit modell 1 og 4 hadde begge lave sannsynligheter for sammenheng.

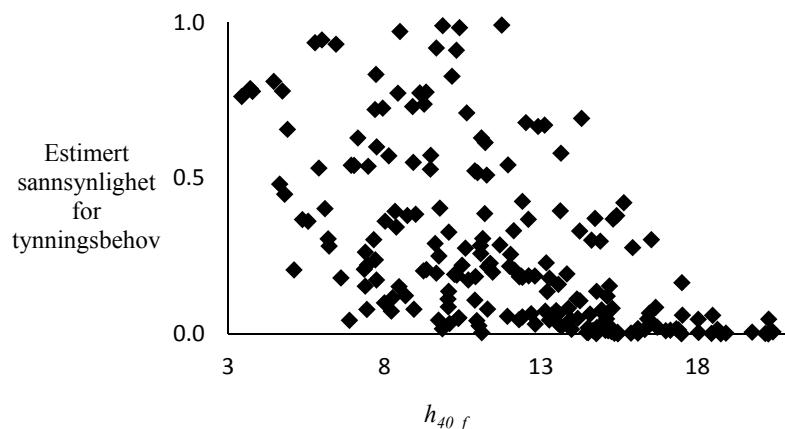
De to ustratifiserte logistiske modellene, Logit modell 5 og Logit modell 6, hadde begge *treslag* og *bonitet* som signifikante forklaringsvariable (Tabell 17). Hosmer-Lemeshow testen indikerte at Logit modell 6 hadde 96 % sannsynlighet for sammenheng mellom observert og estimert sannsynlighet for tynningsbehov, mens Logit modell 5 hadde mye lavere sannsynlighet for sammenheng (Tabell 17).

Tabell 17: Signifikante forklaringsvariable i tilpassede logistiske regresjonsmodeller. Hosmer-Lemeshow test (Pr > Chi sq) for alle modellene.

Logit modell	Forklaringsvariable ^a	Pr > Chi sq
1	<i>bonitet, treslag, h_{90_f}, d_{4_f}</i>	0,35
2	-	-
3	<i>h_{30_l}</i>	0,99
4	<i>h_{30_l}, h_{90_f}, d_{0_f}</i>	0,08
5	<i>bonitet, treslag, h_{10_f}, h_{sd_f}, d_{5_f}</i>	0,45
6	<i>bonitet, treslag, h_{40_f}, d_{6_f}</i>	0,96

^a laservariabler definert i Tabell 3

For Logit modell 6 ble det observert en negativ korrelasjon mellom estimert sannsynlighet for tynningsbehov og forklaringsvariabelen h_{40_f} (Figur 6). Det ble observert lignende sammenheng for Logit modell 5 mellom sannsynligheten for tynningsbehov og forklaringsvariabelen h_{sd_f} .



Figur 6: Plott av sammenhengen mellom estimert sannsynlighet for tynningsbehov og h_{40_f} for Logit modell 6.

3.3.2 Prediksjon av tynningsbehov med stratifisering og metode 2

Validering av metode 2 på valideringsdata 1 viste at det kun var mulig å predikere tynningsbehov i stratum I (Logit modell 1) og stratum IV (Logit modell 4). TP-raten i disse strataene var på henholdsvis 72 % og 81 %, og kappa-indeksen var på henholdsvis 0,35 og 0,57 (Tabell 18). Logit modell 2 og Logit modell 3 hadde ingen evne til å predikere tynningsbehov, og stratum II og III fikk derfor ingen prøveflater med korrekt estimert tynningsbehov (*true positive*) (Tabell 18).

Totalt sett ble det predikert 61 prøveflater med tynningsbehov ved validering av Logit modell 1-4. Det reelle tynningsbehovet i valideringsdata 1 var 69 prøveflater (Tabell 8). Den totale TP-raten for metode 2 ble 64 %, og kappa-indeksen ble 0,53 (Tabell 18).

Tabell 18: Validering av metode 2 ved bruk av Logit modell 1-4 på stratifisert valideringsdata 1 (tynningsbehov i hogstklasse III-V). Fordeling av prøveflater i forhold til samsvar mellom reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov fordelt på strata. Andelen av korrekt predikert tynningsbehov (TP-rate) og Cohens kappa-indeks.

Stratum	TP ^a	FN ^b	TN ^c	FP ^d	TP-rate	kappa-indeks
I	18	7	15	9	72	0,35
II	0	6	38	0	0	0
III	0	6	44	1	0	-0,03
IV	26	6	22	7	81	0,57
Totalt	44	25	119	17	64	0,53

^a TP = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov.

^b FN = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^c TN = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^d FP = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og med predikert tynningsbehov.

3.3.3 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-V og metode 2

Validering av Logit modell 5 gav en TP-rate på 67 % og kappa-indeks på 0,51 (Tabell 19).

Det ble predikert 68 prøveflater med tynningsbehov, mens det reelle tynningsbehovet i valideringsdata 1 var 69 prøveflater (Tabell 8).

Når det predikerte tynningsbehovet fra Logit modell 5 ble fordelt på stratum viste resultatene at modellen hadde evne til å predikere tynningsbehov i alle strataene. Modellen gav størst TP-rate i stratum I, III og IV, med henholdsvis 76 %, 67 % og 69 % (Tabell 19). I stratum II ble mange av prøveflatene kategorisert som *false negative* (FN), og TP-raten ble derfor på kun 17 %. Høyeste kappa-indeks ble oppnådd i stratum III (0,62), mens stratum II fikk den lavest kappa-indeksen (0,2) (Tabell 19).

Tabell 19: Validering av metode 2 ved bruk Logit modell 5 på valideringsdata 1 (tynningsbehov i hogstklasse III-V). Fordeling av prøveflater i forhold til samsvar mellom reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov fordelt på strata. Andelen av korrekt predikert tynningsbehov (TP-rate) og Cohens kappa-indeks.

	TP^a	FN^b	TN^c	FP^d	TP-rate	kappa-indeks
Logit modell 5	46	23	114	22	67	0,51
Fordelt på strata						
I	19	6	13	11	76	0,30
II	1	5	37	1	17	0,20
III	4	2	43	2	67	0,62
IV	22	10	21	8	69	0,41

^a TP = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov.

^b FN = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^c TN = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^d FP = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og med predikert tynningsbehov.

3.3.4 Prediksjon av tynningsbehov i hogstklasse III-IV og metode 2

Validering av Logit modell 6 gav en TP-rate på 65 %, og kappa-indeks på 0,6 (Tabell 20). Det ble predikert 46 prøveflater med tynningsbehov, mens det reelle tynningsbehovet for valideringsdata 2 var 52 prøveflater (Tabell 9).

Fordelt på strata viste resultatene at modellen var godt egnet til å predikere tynningsbehov i alle strataene. Høyest TP-rate fikk stratum I med 76 %, og lavest TP-rate fikk stratum II med 40 % (Tabell 20). Kappa-indeksen var høyest for stratum III (0,56) og lavest for stratum II (0,45) (Tabell 20).

Tabell 20: Validering av metode 2 ved bruk Logit modell 6 på valideringsdata 2 (tynningsbehov i hogstklasse III-IV). Fordeling av prøveflater i forhold til samsvar mellom reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov fordelt på strata. Andelen av korrekt predikert tynningsbehov (TP-rate) og Cohens kappa-indeks.

	TP^a	FN^b	TN^c	FP^d	TP-rate	kappa-indeks
Logit modell 6	34	18	141	12	65	0,6
Fordelt på strata						
I	19	6	19	5	76	0,55
II	2	3	38	1	40	0,45
III	3	3	44	1	50	0,56
IV	10	6	40	5	63	0,52

^a TP = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og predikert tynningsbehov.

^b FN = prøveflate med identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^c TN = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og uten predikert tynningsbehov.

^d FP = prøveflate uten identifisert reelt tynningsbehov og med predikert tynningsbehov.

4. Diskusjon

Hovedproblemstillingen i denne oppgaven var å analysere to metoder for utarbeidelse av tynningsanbefalinger ved hjelp av data fra FLS. Dette vil innledningsvis bli diskutert hvordan tynningsbehovet ble registrert. Før de to metodene blir evaluert opp mot hverandre diskuteres nøyaktigheten til metodene hver for seg. For metode 1 vil først kvaliteten til modellene for estimering av de skoglige parametrene diskuteres, deretter diskuteres metodens nøyaktighet. Etter evalueringen diskuteres enkelte elementer vedrørende materialet og metode, og til slutt diskuteres den praktiske bruken av metodene.

4.1 Registrering av tynningsbehov

En grunnleggende faktor i denne oppgaven var å registrere et tynningsbehov på de aktuelle prøveflatene. Det var tilgjengelig flere tynningsmaler eller tynningsdiagrammer til dette formålet. Det ble valgt et tynningsdiagram som var grunnflatebasert. Grunnflatesummen er i forbindelse med tynning et bedre mål for tettheten enn treantallet, og gir et bedre grunnlag for å vurdere tynningsresultatet. Treantall etter tynning kan stemme i forhold til tynningsmalen selv om volumet har blitt redusert ut over det som er anbefalt. Det valgte tynningsdiagrammet hadde i tillegg overhøyde og bonitet som inngangsverdier. Ved å kombinere disse med grunnflaten får man en god beskrivelse av tettheten.

Av de to grunnflatebaserte tynningsdiagrammene som var tilgjengelig i Norge ble det valgt å benytte tynningsdiagrammene som er i bruk hos Glommen Skog BA (Figur 4). Disse hadde en utforming som gjorde det mulig å få en detaljert beskrivelse av forholdet mellom grunnflate, overhøyde og tynningsbehov. Det andre grunnflatebaserte tynningsdiagrammet (Figur 1) hadde en mye mindre detaljert beskrivelse av overhøyden. Noe som gjorde det vanskeligere å få en god beskrivelse av forholdet mellom grunnflate, overhøyde og tynningsbehov.

De originale funksjonene som ligger til grunn for den kritiske grunnflaten i tynningsdiagrammene var ikke tilgjengelig. Det ble derfor tilpasset funksjoner for den kritiske grunnflaten ut fra manuelt avlesete datapunkter langs denne linjen for hvert tynningsdiagram. Ved bruk av tredjegradspolynom var forklaringsgraden til disse modellene 1. Det vurderes derfor at modellene som ble tilpasset gir tilnærmet identiske resultater som de originale funksjonene.

For å registrere tynningsbehovet ble det satt en øvre grense for overhøyden på prøveflaten. Selv om grensen ble basert på gjeldende praksis skal slike grenser ikke tas for bokstavelig. Forskning har vist at risikoen for vind og snøskader etter inngrep starter allerede ved en overhøyde på 10 meter, og øker deretter med økende overhøyde (Agestam, 2009). Det er med andre ord risiko for vind og snøskader i hele den aktuelle perioden for tynning. Dette viser at det er vel så viktig å vurdere stabiliteten, som overhøyden, i forbindelse med tynning. Stabilitet er et forhold som kunne ha vært vurdert dersom man hadde gjennomført feltkontroll av det reelle tynningsbehovet. Da feltkontroll ikke ble gjennomført ble det valgt å sette en øvre grense for overhøyden for å ta hensyn til risikoen for vind og snøskader.

Det er viktig å presisere at det reelle tynningsbehovet slik det ble identifisert i denne oppgaven kun var et forenklet bilde av det faktiske tynningsbehovet. Det faktiske tynningsbehovet avhenger av skogbrukerens vurderinger, samt driftstekniske og økonomiske forhold. Ved identifisering av det reelle tynningsbehovet i felt kunne slike forhold blitt vurdert. Årsaken til at det ikke ble gjennomført feltkontroll var en kombinasjon av flere faktorer. Laserskanningen var gjennomført tre år før feltkontrollen kunne vært utført. Dette hadde ført til dårlig samsvar mellom felt- og laserregistreringene. I tillegg ville identifisering av tynningsbehov i felt blitt basert på tynningsdiagrammet, da forfatteren har begrenset erfaring i å registrere tynningsbehov. Etter en samlet vurdering ble det avgjort at feltkontroll ikke skulle gjennomføres.

Måten det reelle tynningsbehovet ble identifisert på kan ha påvirket metodenes nøyaktighet. For metode 1 ble det reelle og det predikerte tynningsbehovet registrert på samme måte. Nøyaktigheten til metoden var derfor kun avhengig av nøyaktigheten til grunnflate- og overhøydemodellene. Noe som kan forklare at metoden fikk høy nøyaktighet. Nøyaktigheten til metode 2 var avhengig av hvor godt den logistiske modellen beskrev det reelle tynningsbehovet ut fra laserdataene. Siden det reelle tynningsbehovet ble identifisert på bakgrunn av blant annet G og H_0 , som er sterkt korrelert med laserdata med punktetthet på 1 punkt/m², var det også for denne metoden mulig å oppnå en tilfredsstillende nøyaktighet.

Blir det reelle tynningsbehovet identifisert på annen måte ville dette påvirke metodenes nøyaktighet. Identifisering av tynningsbehovet ut fra andre kriterier enn G og H_0 kan føre til at nøyaktigheten til metode 1 senkes. Nøyaktigheten til metode 2 kan også endres, avhengig av hvordan det reelle tynningsbehovet blir identifisert. Sjødin (2010) viste i sin elevoppgave ved SLU at det var mulig å benytte volumtetthet estimert fra laserdata for å predikere

tynningsbehov. Ved å identifiserer tynningsbehovet på bakgrunn av volumtetthet eller andre parametre basert på volum kan man få et bedre grunnlag for å utvikle logistiske regresjonsmodeller basert på laserdata. Volum kan med høy grad av presisjon estimeres ved bruk av laserdata med punktetthet rundt 1 punkt/m². Metode 2 kan på bakgrunn av dette oppnå høyere nøyaktighet.

4.2 Estimering av grunnflate og overhøyde (metode 1)

Modeller for grunnflate og overhøyde har blitt utviklet i mange tidligere studier. I denne oppgaven ble det fokusert på å utvikle modeller for grunnflate og overhøyde på samme måte som takstinstitusjonene gjør det i dag. Selve metoden for utarbeidelse av modellene vil ikke bli diskutert i oppgaven, da de baserer seg på resultater fra tidligere studier.

Modellene for $\ln G$ og $\ln H_O$ hadde i alle strataene en forklaringsgrad som var på nivå med tidligere studier. Modellen for $\ln G$ hadde noe høyere forklaringsgrad i stratum I (90 %) enn i de andre strata (80 %, 88 %, 79 %). Den samme tendensen ble vist i Næsset (2004a), der modellen for $\ln G$ hadde forklaringsgrad på 94 % i ung skog. De tilsvarende tallene i eldre skog var 74 % og 77 %. Ved modellering av grunnflaten i eldre skog vil responsen variere noe mer enn i yngre skog, da eldre skog er mer påvirket av konkurranse og har større variasjon i grunnflaten. Det kan føre til at det blir vanskeligere å forklare all variasjonen ut fra laservariablene, og vi får en lavere forklaringsgrad.

Forklaringsgrad til modellene for $\ln H_O$ varierte mellom 87 % og 92 %. For alle strataene var denne forklaringsgraden høyere enn forklaringsgraden til modellene for $\ln G$. Disse resultatene er også i samsvar med resultater fra tidligere studier. Næsset (2007) viste at modellen for $\ln G$ i eldre skog på god bonitet hadde forklaringsgrad på 72 %, mens tilsvarende modell for $\ln H_O$ hadde forklaringsgrad på 88 %. Høyere forklaringsgrad for overhøydemodeller i forhold til grunnflatemodeller er som forventet. Laservariablene beskriver høydefordelingen til retursignalene, og dermed blir det en sterk sammenheng mellom laservariablene og overhøyden. Høydefordelingen til retursignalene forklarer ikke grunnflaten like direkte som overhøyden, og sammenhengen blir derfor ikke like sterk.

Valideringen av de stratumspesifikke modellene viste at differansen mellom feltmålte og estimerte parametere ikke var signifikant forskjellig fra null. Den gjennomsnittlige differansen og standardavviket for G og H_O var i alle strataene noe høyere enn tidligere studier har vist (Næsset 2002, 2004a, 2004b, 2007). Dette kan trolig forklares ut fra at datasettene ikke var stratifisert på nøyaktig lik måte, og at det er benyttet ulik størrelse på prøveflatene.

Resultatene viste at nøyaktigheten til modellene for estimering av grunnflate og overhøyde var i samsvar med hva tidligere studier har vist. Det vurderes derfor at nøyaktigheten til metode 1 vil være sammenlignbare med hva som kan forventes ved bruk av metode 1 i en vanlig lasertakst.

4.3 Prediksjon av tynningsbehov ut fra estimerte parameter (metode 1)

Metode 1 fikk en kappa-indeks på 0,77 og 0,76 ved anvendelse på henholdsvis valideringsdata 1 (hogstklasse III-V) og valideringsdata 2 (hogstklasse III-IV). Et slikt nivå på kappa-indeksen tilsier at metoden hadde betydelig evne til å predikere et korrekt tynningsbehov. Den høye nøyaktigheten samsvarer med hva som var forventet på bakgrunn av nøyaktigheten til de stratumspesifikke grunnflate- og overhøydmodellene, og hvordan det reelle tynningsbehovet ble identifisert.

Kappa-indeksen viste også at nøyaktigheten til metoden ble noe redusert ved å fjerne muligheten for å registrere tynningsbehov i hogstklasse V, men reduksjonen var meget liten. Dette tilsier at nøyaktigheten til metoden ble lite påvirket av hvilket datasett som ble benyttet. Noe som er forventet da det var de samme stratumspesifikke modellene som ble benyttet for å predikere tynningsbehov i begge datasettene. Det ville ikke være hensiktsmessig å tilpasse egne modeller ved bruk av laserdata fra hogstklasse III-IV, da hensikten med metode 1 var å benytte tilsvarende modeller som benyttes av takstinstusjonene. Det ble derfor kun benyttet stratumspesifikke modellene tilpasset data fra hogstklasse III-V (modelleringsdata 1).

Antall prøveflater med G eller H_O som ligger nær grensen for når tynningsbehov ikke lenger kan registreres er viktig for nøyaktigheten til metode 1. Slike grensetilfeller kan få feilaktig predikert tynningsbehov selv ved en liten feil i \hat{G} eller \hat{H}_O . Prøveflater med G eller H_O som er klart over eller under denne grensen vil få predikert korrekt tynningsbehov selv med en feil i \hat{G} eller \hat{H}_O . Dette momentet kan belyse hvorfor kappa-indeksen i stratum II og IV ble noe høyere i valideringsdata 2 i forhold til valideringsdata 1. Mange av prøveflatene i disse strataene hadde en H_O (Tabell 4) som var nær grensen for når tynningsbehov ikke lenger kunne registreres. Ved å fjerne muligheten for å predikere tynningsbehov i hogstklasse V fikk man færre grensetilfeller og flere prøveflater med korrekt predikert tynningsbehov.

Dette momentet kan også belyse hvorfor stratum III hadde lavest TP-rate (17 %) og kappa-indeks (0,26), uavhengig av hvilket datasett metode 1 ble anvendt på. Det var identifisert seks prøveflater med reelt tynningsbehov i stratum III (Tabell 8 og Tabell 9), og kun en av disse fikk predikert korrekt tynningsbehov (Tabell 15 og Tabell 16). Etter nærmere undersøkelse

viste det seg at de fem prøveflatene som ikke fikk predikert korrekt tynningsbehov var grensetilfeller. De hadde en H_0 like under 18 meter, og alle prøveflatene fikk overestimert \hat{H}_0 . Nøyaktigheten i stratum III ble således påvirket av et stort antall grensetilfeller. Det vurderes ut fra dette at metode 1 var like godt egnet for prediksjon av tynningsbehov i stratum III som i de andre strataene. For eventuelt videre undersøkelser av metode 1 kan det med fordel benyttes datasett med flere observasjoner av reelt tynningsbehov i alle strataene. På denne måten sikrer man seg et større utvalg, og man kan unngå at grensetilfeller får for stor innvirkning på nøyaktighetsvurderingene.

4.4 Prediksjon av tynningsbehov ved logistisk regresjon (metode 2)

I dette avsnittet vil de seks alternative logistiske modellene bli diskutert, før nøyaktigheten til metoden diskuteres.

4.4.1 Tilpassede logistiske regresjonsmodeller

Det var ikke mulig å tilpasse noen stratumspesifikk modell for stratum II (Logit modell 2).

Dette kan forklares ved at stratum II hadde få prøveflater med reelt tynningsbehov, og at det derfor var vanskelig å finne sammenheng mellom tynningsbehovet og laserdataene.

Tilpassing av Logit modell 1 og 4 ble gjort på bakgrunn av henholdsvis 40 og 41 prøveflater med reelt tynningsbehov (Tabell 6). Selv om Hosmer-Lemeshow testen indikerte at kvaliteten til modellene var varierende, viste resultatene at det var mulig å tilpasse stratifiserte logistiske modeller for prediksjon av tynningsbehov. For videre bruk av stratifiserte logistiske modeller anbefales det at man benytter et datasett som er bedre tilpasset, slik at man får mange nok observasjoner av reelt tynningsbehov i hvert stratum.

Logit modell 5 ble tilpasset for å predikere tynningsbehov i hogstklasse III-V. Hosmer-Lemeshow testen viste at man med en sannsynlighet for å ha rett på 45 %, kunne påstå at det var sammenheng mellom observert og estimert sannsynlighet for tynningsbehov. Ved bruk av Logit modell 6, som ble tilpasset for å predikere tynningsbehov i hogstklasse III-IV, var sannsynligheten for å ha rett hele 96 %. Den store forbedringen som ble observert for Logit modell 6 skyldes at det ikke var mulig å registrere reelt tynningsbehov i hogstklasse V i modelleringsdata 2. Prøveflatene med reelt tynningsbehov i modelleringsdata 2 fikk dermed en mer homogen struktur enn prøveflatene med tynningsbehov i modelleringsdata 1. Det ble derfor lettere å finne en god sammenheng mellom laserdataene og det reelle tynningsbehovet.

Tilpassingen av Logit modell 5 og 6 kan ha blitt påvirket av at det var flest prøveflater uten reelt tynningsbehov i modelleringsdata 1 og 2. En skjev fordeling av responsen kan føre til at

modellen ikke blir optimalt tilpasset. Bruk av data med jevn fordeling av prøveflater med og uten reelt tynningsbehov vil mest sannsynlig øke presisjonen til begge modellen.

Logit modell 1, 5 og 6 hadde *treslag* og *bonitet* som signifikante forklaringsvariable. Da det reelle tynningsbehovet ble definert ut fra bonitets- og treslagsspesifikke tynningsdiagrammer er dette som forventet. Vastaranta et al. (2011) prøvde også *treslag* og *bonitet* som forklaringsvariable i sin logistiske modell for tynningsbehov, men i denne studien var disse ikke signifikante. Årsaken til dette kan skyldes ulikheter i datamaterialet, både med tanke på bonitet, hogstklassefordeling og skogbilde.

Laservariablene h_{sd} , h_{40} , d_5 og d_6 var alle signifikante forklaringsvariable i Logit modell 5 eller 6. Disse laservariablene var også signifikante forklaringsvariable i modellene for $\ln G$ og $\ln H_O$. Dette tilsier at sannsynligheten for tynningsbehov best ble forklart ut fra laservariable som beskriver G og H_O , noe som er som logisk med tanke på hvordan det reelle tynningsbehovet ble identifisert i oppgaven.

For Logit modell 6 ble det observert en negativ sammenheng mellom sannsynlighet for tynningsbehov og h_{40_f} (Figur 6). Vastaranta et al. (2011) fant i sin studie en negativ sammenheng mellom sannsynlighet for tynningsbehov i løpet av de neste 10 år og variablene d_2 og d_4 . Dette viser at både høydevariable og tetthetsvariable som utarbeides fra laserdata har evnen til å beskrive sannsynlighet for tynningsbehov. Hvilke laservariable som bidrar til å forklare sannsynligheten vil avhenge av datasettet som legges til grunn og hvordan det reelle tynningsbehovet blir definert.

4.4.2 Prediksjon av tynningsbehov ved bruk av metode 2

Resultatene fra valideringen av Logit modell 1 – 4 viste at det ikke var mulig å predikere tynningsbehov i hverken stratum II eller III. For stratum II var dette som forventet da det ikke var mulig å tilpasse en logistisk modell. I stratum III predikerte Logit modell 3 kun en prøveflate med tynningsbehov, og dette var en prøveflate uten reelt tynningsbehov (*false positive*) (Tabell 18). Årsaken til dette var mest sannsynlig at både modelleringsdata 1 og valideringsdata 1 hadde få observasjoner av reelt tynningsbehov i stratum III. Noe som har påvirket både modelltilpassingen og valideringen i stratumet. Resultatene fra stratum I og stratum IV viste at det var mulig å predikere tynningsbehov ved bruk av stratifiserte logistiske modeller. Etter det forfatteren kjenner til har det ikke tidligere vært tilpasset stratumspesifikke logistiske modeller for prediksjon av tynningsbehov. Før det kan gis en generell konklusjon,

vedrørende nøyaktigheten til metode 2 ved bruk av stratifiserte logistiske modeller, bør det gjennomføres flere forsøk der man har gode tilpassede modeller i alle strata.

Validering av Logit modell 5 og 6 viste at metode 2 var godt egnet til å predikere tynningsbehov ut fra ustratifiserte data. Bruk av Logit modell 5 gav en kappa-indeks på 0,51, noe som vil si at modellen hadde en moderat evne til å predikere korrekt tynningsbehov i hogstklasse III-V. Anvendelse av Logit modell 6 gav en noe høyere kappa-indeks (0,6). Det vil si at modellen hadde en moderat, men helt på grensen til betydelig, evne til å predikere korrekt tynningsbehov i hogstklasse III-IV. TP-raten som ble oppnådd ved bruk av Logit modell 5 (67 %) var imidlertid noe høyere enn ved bruk av Logit modell 6 (65 %). Ut fra disse resultatene var det vanskelig å vurdere hvem av modellene som gav metode 2 høyest nøyaktighet. I vurderingen ble det derfor vektlagt hvordan modellens nøyaktighet var fordelt på strata. Resultatene viste at Logit modell 5 ikke var like godt egnet i alle strataene, da kappa-indeksen varierte mellom 0,2 og 0,62. Logit modell 6 var derimot jevnt godt tilpasset alle strataene. Ut fra dette vurderes det at metode 2 fikk en forbedret nøyaktighet ved bruk av Logit modell 6 i forhold til Logit modell 5.

Nøyaktigheten til metode 2 var på nivå med resultater fra lignende studier. Vastaranta et al. (2011) oppnådde en kappa-indeks på 0,4, og predikerte korrekt tynningsbehov i 83 % av tilfellene. I den finske studien og i denne oppgaven var det reelle tynningsbehovet identifisert på forskjellige måter, og laserdataene hadde forskjellig punktetthet. Det er tidligere påpekt at måten det reelle tynningsbehovet ble identifisert på i denne oppgaven førte til at det var mulig å finne en god sammenheng mellom tynningsbehov og de aktuelle laserdataene. I den finske studien ble tynningsbehovet identifisert ved feltbefaring, dette kan ha ført til at tynningsbehovet variert ut fra blant annet biomassettheten. Det ble benyttet laserdata med punktetthet på 10 punkt/m², som gir en god beskrivelse av biomassettheten. Dermed ble også dette tynningsbehovet godt beskrevet ut fra laserdata. Dette viser at det ved bruk av logistisk regresjon er mulig å predikere tynningsbehov ut fra ulike kombinasjoner av laserdata og registrert tynningsbehov, så fremt disse er godt tilpasset hverandre.

For å skille prøveflater med og uten tynningsbehov var det nødvendig å sette en grense for den estimerte sannsynligheten. Nøyaktigheten til metode 2 påvirkes av nivået på denne grensen. Det ble derfor valgt å sette den på samme nivå som Vastaranta et al. (2011) slik at resultatene kunne sammenlignes. Det ble forsøkt å høyne grensen fra 0,5 til 0,7. Dette førte til at mange prøveflater med reelt tynningsbehov ikke fikk predikert tynningsbehov (*false*

negative), og metodens nøyaktighet ble redusert. En grense for sannsynlighetsverdien på 0,5 bør derfor benyttes for å sikre at tynningsanbefalingene ikke viser for få områder med tynningsbehov. Dette kan føre til at mange potensielle tynningsområder bli oversett. De områdene som ikke er registrert med tynningsbehov vil mest sannsynlig ikke bli oppsøkt i felt for å kontrollere tynningsbehovet.

Nøyaktigheten til metode 2 avhenger av antall prøveflater med estimert sannsynlighet for reelt tynningsbehov nær 1 eller 0. Resultatene for Logit modell 6 viste at prøveflater med sannsynlighetsverdi i intervallet 0 til 0,1 eller 0,9 til 1 hadde, i forhold til prøveflater med sannsynlighetsverdi mellom 0,1 og 0,9, høyest andel korrekt predikert tynningsbehov. Lignende resultater ble også observert i studien til Vastaranta et al. (2011). Dette er som forventet da prøveflater med sannsynlighetsverdi nær 1 og 0 er områder som klart skiller seg ut med tynningsbehov eller ikke tynningsbehov. Prøveflater med sannsynlighetsverdi rundt 0,5 er områder der tynningsbehovet er mer usikkert, og det vil ikke være mulig å predikere tynningsbehovet like korrekt for alle flatene. Et datasett med overvekten av prøveflatene med sannsynlighetsverdi nær 1 og 0 vil føre til at metoden får en høy nøyaktighet. Vurdering av resultatene for Logit modell 6 viste at det var nokså jevn fordeling av prøveflater med sannsynlighetsverdi nær 1 eller 0 og flater med sannsynlighetsverdi mellom 0,1 og 0,9. Nøyaktigheten til Logit modell 6 ble derfor mest sannsynlig ikke påvirket av dette.

4.5 Evaluering

Resultatene har vist at begge metodene som ble analysert kan brukes til å predikere tynningsbehov ut fra FLS-data.

Tynningsbehovet lot seg predikere med størst nøyaktighet ved bruk av estimerte parametre (metode 1), uansett hvilket datasett som ble lagt til grunn. Endret stratifisering eller bruk av andre kriterier for å identifisere det reelle tynningsbehovet kan føre til at rangeringen mellom metodene endres. Før man kan trekke konklusjoner om hvilken metode som er best egnet ved bruk av stratifiserte data er det behov for å gjennomføre flere studier med stratumspesifikke logistiske regresjonsmodeller.

Noe av årsaken til at metode 1 ble bedre enn metode 2 kan forklares ved at metode 1 baserte seg på prediksjon av de samme variablene som ble benyttet til å identifisere det reelle tynningsbehovet. Mens i metode 2 ble det reelle og det predikerte tynningsbehovet registrert ved bruk av to ulike metoder. I tillegg var nøyaktigheten til metode 1 lite avhengig av en jevn

fordeling av prøveflater med og uten tynningsbehov i modelleringsdataene, noe som kan ha innvirket på nøyaktigheten til metode 2.

4.6 Materiale og metode

I dette avsnittet diskuteres ulike momenter fra materiale og metode kapittelet som er viktig for evalueringen av de aktuelle metodene.

4.6.1 Studieområde

Studieområdet bestod av 65 % furu og 35 % gran, og egnet seg derfor godt til å vurdere alternative metoder for utarbeidelse av tynningsanbefalinger i barskog. Størrelsen til studieområdet (40 500 hektar) tilsvarer størrelsen for en normal områdetakst gjennomført med FLS. Dette kan tilsi at man ved bruk av de aktuelle metodene i en normal områdetakst kan forvente omtrent samme nøyaktighet for tynningsanbefalingene som resultatene i denne oppgaven viste. Det er imidlertid viktig å huske på at de tilpassede modellene kun er representative for det aktuelle skogområdet de ble utarbeidet for, og bruk av metodene på andre skogsområder kreves at det tilpasses nye modeller. Vurderingene som blir gjort rundt de aktuelle metodene er trolig representative for de fleste barskogområder i Norge.

4.6.2 Laserdata

Laserskanningen som var utgangspunktet for laserdataene hadde en gjennomsnittlig punktetthet på 0,7 punkt/m². Denne punktettheten var godt egnet for å tilpasse modeller for grunnflaten og overhøyden som del av metode 1. Tidligere studier (Gobakken & Næsset, 2008) har vist at nøyaktigheten til modeller for grunnflaten først reduseres ved en punktetthet under 0,25 punkt /m². Punktetthet rundt 1 punkt /m² er også vanlig ved bruk av FLS til skogtaksering. Ut fra hvordan det reelle tynningsbehovet ble identifisert var gjeldende punktetthet også egnet for tilpassing av logistiske modeller som del av metode 2. Det er mulig at nøyaktigheten til metode 2 kan påvirkes av punktettheten. For å kunne si dette med sikkerhet må man gjennomføre studier der metode 2 benyttes på datasett med ulik punktetthet og lik identifisering av det reelle tynningsbehovet.

Ved bruk av metode 2 kan det være en fordel å benytte laserdata med høyere punktetthet, hvis det reelle tynningsbehovet blir definert på en annen måte enn i oppgaven. Spesielt kan dette være en fordel dersom tynningsbehovet identifiseres på bakgrunn av biomassettheten.

Biomassettheten beskrives gjennom tetthetsvariablene, og nøyaktigheten til tetthetsvariablene avtar med avtagende punktetthet (Gobakken & Næsset, 2008).

Laserskanning ved bruk av kontinuerligbølgesystem vil kunne gi en bedre beskrivelse av

biomassefordelingen i forhold til bruk av diskretpulssystem. Dette kan gi en mer nøyaktig prediksjon av tynningsbehovet dersom det beskrives ut fra biomassetettheten. Da slike systemer er lite brukt i kommersiell skogregistreringer i Norge vil det være lite aktuelt å gjennomføre studier der tynningsbehov predikeres ved bruk av slike systemer.

4.6.3 Valideringsdata

Valideringsdataene og modelleringsdataene var hentet fra samme studieområde, men utvelgelsen av prøveflatene var forskjellige. Prøveflatene i valideringsdataene var valg ut i fra variasjonsbredden til laserdataene. Dette førte til at valideringsdataene var bedre egnet til å utvikle modeller som beskrev stående volum i forhold til modelleringsdataene (Gobakken & Næsset, 2010). I denne oppgaven ble valideringsdataene kun benyttet som et uavhengig datasett for å vurdere nøyaktigheten til de allerede tilpassede modellene. De overnevnte forskjellene mellom de to datasettene ble vurdert til å ha liten betydning. Den gjennomsnittlige G og H_O , og variasjonen til G og H_O , var tilnærmet lik i modelleringsdataene (Tabell 2) og valideringsdataene (Tabell 4). Det vurderes derfor at valideringsdataene var egnet til validering av de aktuelle metodene.

4.6.4 Klargjøring av datamaterialet

Da hovedfokuset i denne oppgaven var tynningsanbefalinger i barskog ble det valgt å fjerne prøveflater med andel løvtrær over 30 %. Dette førte til at det ble definert en kunstig barskog populasjon som utgangspunkt for modelltilpassingen. Årsaken til at dette ble gjort var for å utarbeide så presise modeller som mulig, og for å være i stand til å vurdere de aktuelle metodene på best mulig grunnlag. I praktisk skogtaksering kan man ikke definere populasjonen man skal jobbe med. Selv om man til en viss grad kan utelukke områder med mye løv ved bruk av flyfototolkning. Det er viktig å være klar over at bruk av metodene i områder der andelen løvtrær er over 30 % vil redusere nøyaktigheten til tynningsanbefalingene. Det presiseres derfor at nøyaktigheten til metodene kun er representative for barskogs populasjoner.

Rangeringen mellom metodene vil mest sannsynlig ikke endres selv om takseringsområdet består av bestand med mer enn 30 % løvtrær. Laserskanningen vil representere både løvtrærne og bartrærne. Da disse har ulik biomassefordeling vil det bli vanskelig å finne gode sammenhenger mellom laserdataene og feltobservasjonene som er gjort på bartrær. Begge metodene var basert på feltobservasjoner gjort på bartrær, og metodene vil derfor bli likt påvirket av økende andelen løvtrær i takseringsområdet.

4.7 Praktisk bruk av metodene

Evalueringen viste at den mest nøyaktige metoden var bruk av estimerte skoglige parametre i kombinasjon med skjøtselsregler (metode 1). Dette vil også være den metoden som er enklest å gjennomføre i praksis da den er basert på skoglige parametre som er vanlig å utarbeide i forbindelse med ressursbeskrivelser. Bruk av logistisk regresjonsmodeller (metode 2) er en mer omfattende metode som krever god kunnskap om logistisk regresjon. Dette fører til at metoden kun bør benyttes av takstinstitusjoner som besitter denne kunnskapen.

For takstinstitusjonene er det viktig å benytte en så nøyaktig metode som mulig, slik at man unngår store og graverende feil som svekke tilliten til produktet. Bruk av modeller til å registrere områder med tynningsbehov vil alltid være beheftet med feil, da en modell aldri vil kunne beskrive virkeligheten fult ut. Det er også viktig at takstinstitusjonene kommuniserer overfor brukeren at produktet er beheftet med feil. Dette vil trolig ikke svekke tilliten til produktet, men heller øke den da man oppnår en felles forståelse av hvordan produktet er utarbeidet og skal brukes.

Når man skal utarbeide tynningsanbefalinger ved bruk av FLS må man vurdere om det skal gjennomføres feltregistreringer ut over hva som er vanlig for en lasertakst. Slike tilleggsregistreringer kan føre til at tynningsanbefalingene blir mer presise, men man må alltid vurdere kostnaden opp mot nytten av tiltaket. Denne oppgaven viser imidlertid at det var mulig å utarbeide tynningsanbefalinger med relativ god nøyaktighet uten bruk av ekstra feltregistreringer. Vurderingen om det skal gjennomføres tilleggsregistreringer avhegner da av hvor mye nøyaktigheten til tynningsanbefalingene økes, og om skogeierne er villige til å betale for den økte nøyaktigheten.

Gjennom feltkontroll bør områder med registrert tynningsbehov vurderes ut fra et biologisk, økonomisk og driftsteknisk perspektiv før tynning iverksettes. De biologiske vurderingene bør omfatte registrering av den faktiske grunnflaten og overhøyden, samt vurderinger av kvalitet, kroneforhold og stabilitet. Det er dette som danner grunnlaget for biologisk og økonomisk vekst etter tynning. De økonomiske perspektivene som bør vurderes er tømmerpriser, driftspriser og avstand til vei. I tillegg er skogbrukerens målsetning for drift av skogen viktig for om det skal gjennomføres tynning eller ikke.

De fleste tynningsanbefalingene som utarbeides fra FLS i dag omfatter kun områder med umiddelbart tynningsbehov. Dette vil si at produktet kun er gyldig noen få år etter at det er utarbeidet. For å stimulere til tynningsaktivitet over en lenger periode bør

tynningsanbefalingen ha en lenger gyldighetstid. Vastaranta et al. (2011) viste at det var mulig å predikere tynningsbehov for de neste 10 år ved bruk av logistiske modeller. Etter det forfatteren kjenner til er det ikke gjennomført noen studier der estimerte parametre (metode 1) er benyttet til å predikere fremtidig tynningsbehov. Det bør imidlertid også være mulig å benytte denne metoden til å predikere fremtidig tynningsbehov. Både grunnflate og overhøyde lar seg fremskrive ved bruk av henholdsvis diametertilvekstfunksjoner og bonitetskurver. Dette viser at begge metodene kan være utgangspunkt for utvikling av tynningsanbefalinger med utvidet gyldighetstid.

5. Konklusjon

Oppgaven har vist at det var mulig å utarbeide tynningsanbefalinger ved bruk av data fra flybåren laserskanning. Resultatene indikerte at prediksjon av tynningsbehov ved bruk av estimert grunnflate og overhøyde (metode 1) gav høyest nøyaktighet. Dette gjaldt ved prediksjon av tynningsbehov i både hogstklasse III-V og III-IV. Metode 1 er ut fra praktiske hensyn best egnet, da den er enkel og baserer seg på skoglige parametre som er vanlig å utarbeide i forbindelse med en lasertakst.

Utarbeidelse av tynningsanbefalinger ved bruk av logistisk regresjon (metode 2) er en omfattende metode som krever god kunnskap om logistisk regresjon og et godt tilpasset datagrunnlag. Det bør gjennomføres flere studier for å undersøke om nøyaktigheten til metoden kan økes.

Litteraturliste

- Agestam, E. (2009). *Skogsskøtselserien nr 7: Gallring*. Sverige, Skogsstyrelsen, s. 42 og 57.
- Agresti, A. (2007). *An introduction to categorical data analysis*. Second Edition. USA, John Wiley & son, Inc., s. 1-16, 99-121, 144-151.
- Anon. (2008). *SAS 9.2*. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc. Tilgjengelig fra: <http://support.sas.com/software/92/index.html> (nedlastet 27. februar 2012).
- Axelsson, P. (2000). *DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33 (B4): 110-117.
- Björn, J. (2008). *Analys av data från flyglaserscanning*. Sveriges lantbruksuniversitet. Eksamensarbeite 2008 / 18, s. 1-17.
- Bollandsås, O.M., Hanssen, K.H., Marthiniussen, S. & Næsset, E. (2008). *Measures of spatial forest structure derived from airborne laser data are associated with natural regeneration patterns in an uneven-aged spruce forest*. Forest Ecology and Management, 225 (3-4): 958-961.
- Braastad, H. (1980). *Vekst modell data program for Pinus sylvestris*. Rapport fra Norsk Institutt for skogforskning, 35: 272-359.
- Cohen, J. (1960). *A coefficient of agreement for nominal scales*. Educational and Psychological Measurement, s. 20 og 37.
- Eid, T., Gobakken, T. & Næsset, E. (2004). *Comparing stand inventories for large areas based on photo interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses*. Scandinavian Journal of Forest Research, 19 (6): 512-523.
- Glommen Skog. (2005). *Tynningsdiagrammer i Glommen Skog*. Glommen Skog BA, s. 1-11. Upublisert. Se vedlegg.
- Glommen Skog. (2008). *Tynning utført av Glommen*. Tilgjengelig fra: http://www.glommen.no/Customers/glommen/documents/Skog%20og%20toemmer/Tynningsstandard_lores.pdf (nedlastet 8. februar 2012).

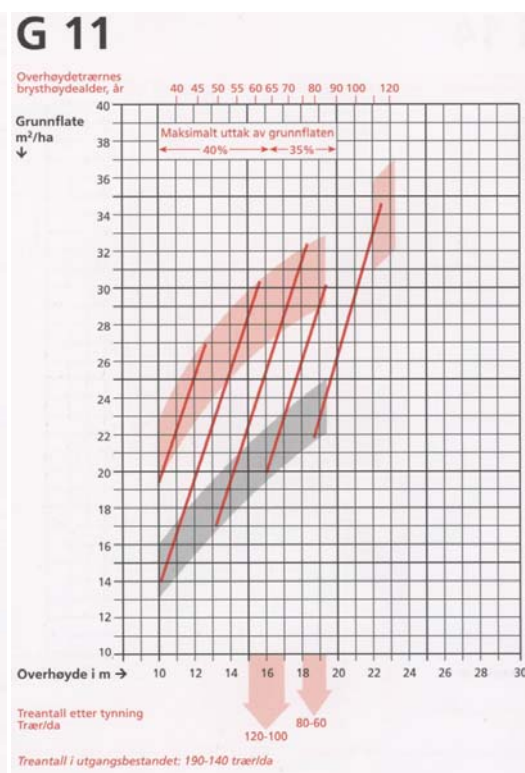
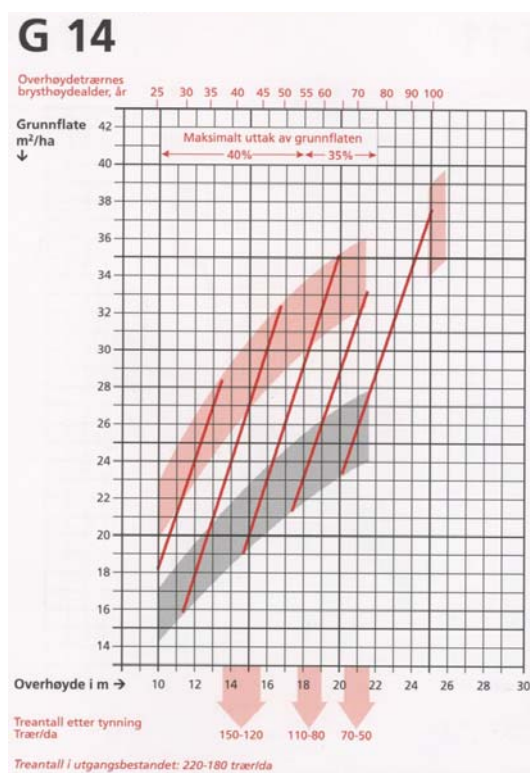
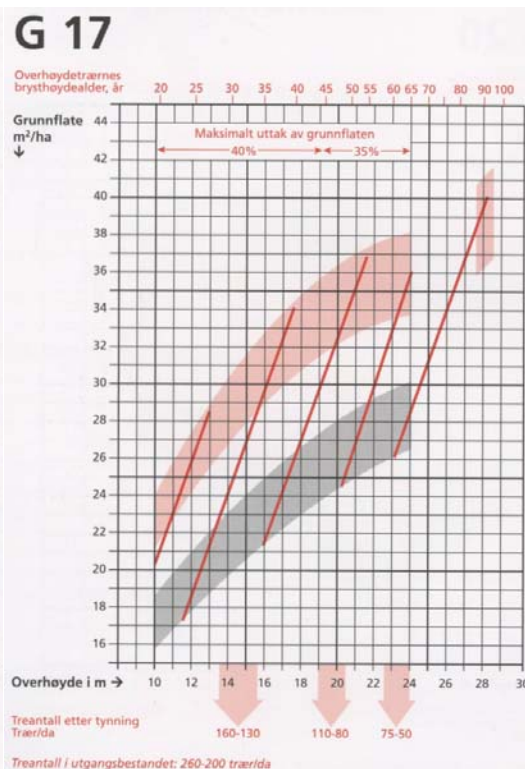
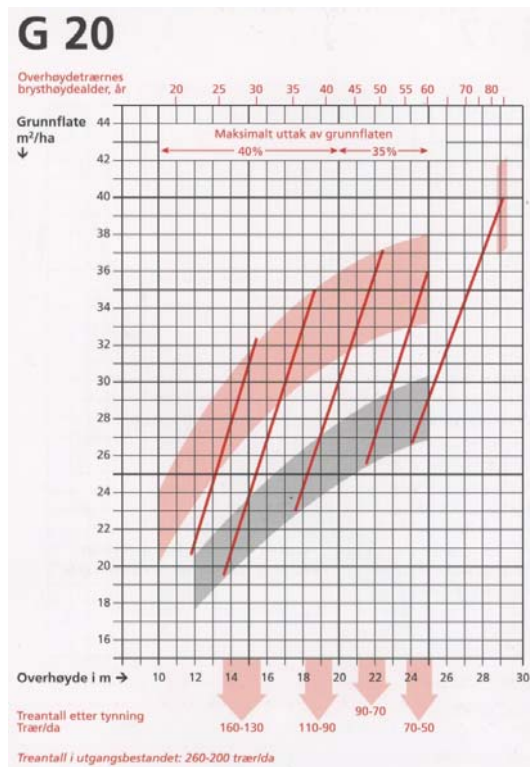
- Gobakken, T. & Næsset, E. (2004). *Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data*. Scandinavian Journal of Forest Research, 19 (6): 529-542.
- Gobakken, T. & Næsset, E. (2008). *Assessing effects of laser point density, ground sampling intensity, and field sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data*. Canadian Journal of Forest Research, 38 (5): 1095-1109.
- Gobakken, T. & Næsset, E. (2010). *Effektivisering av prøveflatetakst ved laserbasert skogtaksering etter areal metoden*. Prosjektrapport, Institutt for Naturforvaltning, Universitetet for miljø og biovitenskap, s. 1-33.
- Goldberger, A.S. (1968). *The interpretation and estimation of Cobb-Douglas functions*. Econometrica, 36 (3-4): 464-472.
- Landis, J.R. & Koch, G.G. (1977). *The measurement of observer agreement for categorical data*. Biometrics, 33 (1): 159-174.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Acker, S.A., Parker, G.G., Spies, T.A. & Harding, D. (1999). *Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests*. Remote Sensing of Environment, 70 (3): 339-361.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. & Flood, M. (2003). *LiDAR remote sensing of forest structure*. Progress in physical geography, 27 (1): 88-106.
- Mäkinen, H & Isomäki, A. (2004a). *Thinning intensity and growth of Norway spruce stands in Finland*. Forestry, 77 (4): 349-364.
- Mäkinen, H & Isomäki, A. (2004b). *Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of Norway spruce trees*. Forest ecology and management, 201 (2-3): 295-309.
- Mäkinen, H & Isomäki, A. (2004c). *Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland*. Forest ecology and management, 201 (2-3): 311-325.
- Mäkinen, H & Isomäki, A. (2004d). *Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of Scots pine trees*. Forest ecology and management, 203 (1-3): 21-34.

- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L. & Hendric, J. (2000). *Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66 (11): 1367-1371.
- Mendenhall, W. & Sincich, T. (2003). *A second course in statistics: Regression analysis*. Sixth edition. USA, Pearson Education, Inc., s. 80-425, 449-456.
- Nelson, R., Oderwald, R. & Gregoire, T. G. (1997). *Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume and biomass*. Remote sensing environment, 60 (3): 311-326.
- Nilsson, M. (1996). *Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system*. Remote Sensing of Environment, 56 (1): 1-7.
- Næsset, E. (1997a). *Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data*. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 52 (1): 49-56.
- Næsset, E. (1997b). *Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data*. Remote sensing environment, 61 (2): 246-253.
- Næsset, E. (2002). *Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data*. Remote Sensing of Environment, 80 (1): 88-99.
- Næsset, E. (2004a). *Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser*. Scandinavian Journal of Forest Research, 19 (2): 164 – 179.
- Næsset, E. (2004b). *Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: Evaluating the first Nordic full-scale operational project*. Scandinavian Journal of Forest Research, 19 (6): 554-447.
- Næsset, E. (2007). *Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia*. Scandinavian Journal of Forest Research, 22 (5): 433-442.
- Næsset, E. & Bjerknes, K.O. (2001). *Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data*. Remote Sensing of Environment, 78 (3): 328-340.

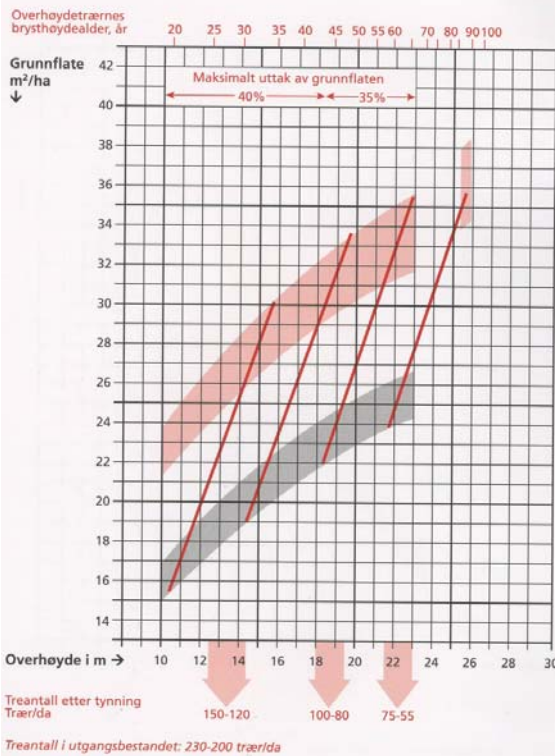
- Næsset, E. & Gobakken, T. (2005). *Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data*. *Remote Sensing of Environment*, 96 (3-4): 453-465.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. (2004). *Laser scanning of forest resources: The Nordic experience*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19 (6): 482 – 499.
- Persson, Å., Holmgren, J. & Söderman, U. (2002). *Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68 (9): 925-932.
- Schreuder, H.T., Gregoire, T. G. & Wood, G. B. (1993). *Sampling methods for multiresource forest inventory*. USA, John Wiley & Sons, Inc., s. 50-51.
- Sjödin, M. (2010). *Skattningar i gallringsskog med hjelp av flyburen laserskanning – betraktningar med massaslutenhet*. Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetsrapport 304 2010. ISRN SLU-SRG-AR-304-SE, s. 1-27.
- SKI. (2006). *Tynning i gran og furuskog*. Skogbrukets Kursinstitutt / Aktivt Skogbruk. ISBN 978-82-7333-149-6, s. 1-32.
- SKI. (2010). *Tynning*. Skogbrukets Kursinstitutt Resymé nr 6. Tilgjengelig fra: <http://www.skogkurs.no/Resyme/Tynning.pdf> (nedlastet 8. februar 2012).
- Skogbrukslova. (2005). Lov om skogbruk av 27. mai 2005 nr 31.
- SSB. (2004). Tabell 3: *Avvirkning for sal, etter hogstmetode, 2003*. Landbruksundersøkinga 2004, skogbruk. Tilgjengelig fra: http://www.ssb.no/emner/10/04/20/nos_d341/tab/tab-3.html (nedlastet 29. februar 2012).
- Tveite, B. (1977). *Bonitetskurver for gran*. Meddelelse fra Norsk Institutt for skogforskning, 33: 1-84.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyyppä, J., Hyyppä, H. & Viitala, R. (2011). *Predicting stand-thinning maturity from airborne laser scanning data*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26 (2): 187-196.

Ørka, H.O., Næsset, E. & Bollandsås, O.M. (2010). *Effects of different sensors and leaf-on and leaf-off canopy conditions on echo distributions and individual tree properties derived from airborne laser scanning*. Remote Sensing of Environment, 114 (7): 1445-1461.

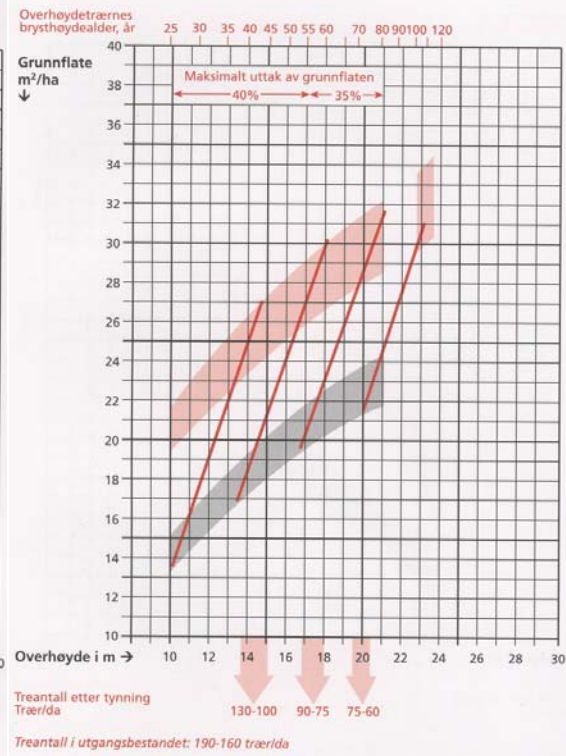
Vedlegg: Tynningsdiagrammer i Glommen Skog



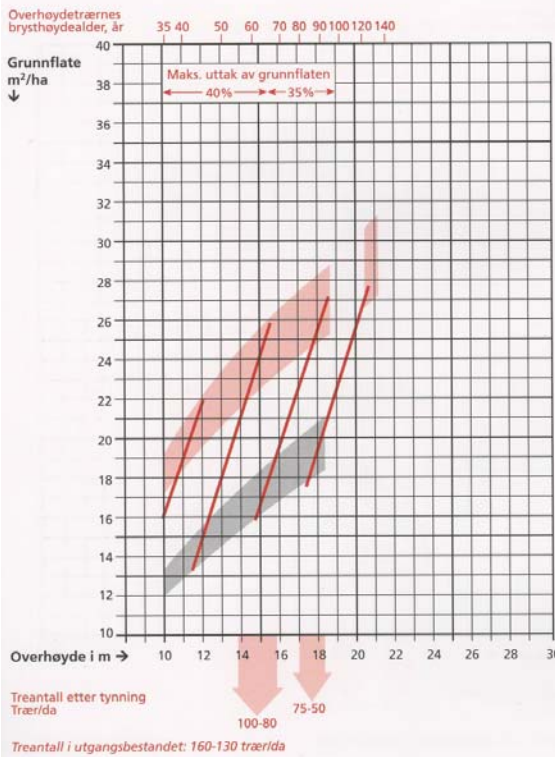
F 17



F 14



F 11



F 8

