

Faglig sluttrapport for prosjekt

Bonitering av skog i andre omdrev av skogbruksplantakster basert på laser eller flybilder



Ole Martin Bollandsås, Lennart Noordermeer, Svein Dypsund, Terje Gobakken, Erik Næsset

November 2019



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet



Innhold

Generell informasjon	3
Prosjektnummer	3
Prosjektleder	3
Prosjektittel	3
Finansieringsperiode	3
Sammendrag	3
Hovedpublikasjoner	3
Innledning	4
Aldersbonitering	4
Høydedifferensiell bonitering	4
Muligheter for forbedret bonitering gjennom fremtidens skogplantakster	5
Prosjektets mål	5
Studieområder og datagrunnlag	6
Feltdata	6
Laserdata	7
Metoder for bonitetsbestemmelse på beregningscellenivå	8
Resultater	10
Konklusjoner og anbefalinger	13
Referanser	15

Generell informasjon

Prosjektnummer

I Skogtiltaksfondet B2017-09, internt i Viken Skog M-413.

Prosjektleder

Viken Skog SA

Prosjekttittel

Bonitering av skog i andre omdrev av skogbruksplantakster basert på laser eller flybilder

Finansieringsperiode

01.04.2017 – 01.07.2019

Sammendrag

Denne rapporten presenterer resultater og en diskusjon av disse for prosjektet «*Bonitering av skog i andre omdrev av skogbruksplantakster basert på laser eller flybilder*», finansiert av Skogtiltaksfondet. Prosjektet er et bransjeprosjekt som samler alle planinstitusjoner i næreringen som parter, og har stor betydning for implementering av nye metoder for bonitering i operative takster. Prosjektets hovedmål var å utvikle en operativ metode for å beregne bonitet på beregningscellene i arealbaserte lasertakster basert på data som allerede er tilgjengelige, og tilpasse metoden til data fra repeterte lasertakster. Praktiske anbefalinger om bonitering i repeterte lasertakster basert på arealmetoden er formidlet til brukere i privat sektor. Forskningsarbeidet har fått betydelig oppmerksomhet som banebrytende, og resultatene har blitt presentert både i internasjonale forskningskonferanser og i møter med det norske utøvende skogbruket. Resultatene er også publisert i fagfelleverderte artikler i internasjonale tidsskrifter. En masteravhandling er allerede skrevet basert på analyser av data fra prosjektet, og ytterligere en annen student er i oppstartsfasen. Forskningstemaet er viktig for NMBU, og universitetet har derfor støttet arbeidet med egeninnsats for en PhD student (planlagt ferdig mai 2020). Man har dermed oppnådd store synergieffekter.

Hovedpublikasjoner

1. Analyse av nøyaktigheten til den direkte og den indirekte metoden. Fagfellevurdert artikkel i journalen *Forest Ecology and Management* (Noordermeer et al., 2018a).
2. Klassifisering av beregningsceller etter egnethet for bonitering. Fagfellevurdert artikkel i journalen *Remote Sensing* (Noordermeer et al., 2019b).
3. Operativ bonitering ved hjelp av den direkte metoden. Fagfellevurdert artikkel sendt til vurdering i journalen *Forest Ecology and Management* (Noordermeer et al., 2019a)
4. Masteroppgave ved NMBU: «Aldersuavhengig bonitering med arealbasert laserdata fra to tidspunkt» (Berlin, 2017).

Innledning

Bonitet er en av de mest fundamentale ressursvariablene ved all planlegging og forvaltning av skogarealet med tanke på kommersiell utnyttelse av virkeressursene fordi den er et summarisk uttrykk for potensialet for virkeproduksjon på et gitt areal. Boniteten bestemmer hva som er optimal skogbehandling med hensyn på f.eks. tidspunkt for sluttavvirkning, valg av hogstform, valg av treslag ved foryngelse osv. Korrekt fastsettelse av bonitet er derfor avgjørende for å kunne foreta rasjonelle beslutninger om skogbehandling og således oppnå en så god økonomisk avkastning for et gitt areal som mulig. Boniteten har avgjørende betydning ved verdsetting av skogarealet og for vurdering av de langsiktige produksjons- og avkastningsmulighetene (balansekvantum med mer). Boniteten er også en viktig inngangsvariabel i tilvekstfunksjoner og produksjonstabeller/modeller. Blant alle de variablene som bestemmes i en skogbruksplantakst, er bonitet den enkeltvariabelen som er bestemt med størst feil og samtidig har størst negative økonomiske konsekvenser for skogeier når den er beheftet med feil (Eid, 2000). Feil i fastsatt bonitet kan blant annet føre til feil behandlingstiltak og feil tidspunkt for slutthogst med påfølgende økonomiske tap for eier.

I operative skogplantakster bestemmes ofte boniteten ved manuell tolking av flybilder, der operatøren på subjektivt grunnlag støtter seg på erfaring og kjennskap til skogforholdene i det aktuelle området, treslag, alder, vitalitet osv. I tillegg kan man støtte seg på bonitering fra tidligere takster og boniteten tilgjengelig i digitale markslagskart (Økonomisk kartverk). En rekke studier fra 1980-tallet og framover har dokumentert at man kan forvente opptil 20 % feil på bonitetsverdien på bestandsnivå i operativ bonitering (Eid, 1992) eller at bonitetsklassen er satt feil på over 50 % av arealet (Gisnås, 1982, Næsset, 1994). I den senere tid, har takstselskapene benyttet høydemålinger fra flybåren laserskanning sammen med bestandsalder som beslutningsstøtte ved bestemmelse av bonitet under fototolkning. I likhet med bonitet er også alder en variabel det knyttes stor usikkerhet til (Eid, 2000).

Selv om det har vært kjent at bonitet er en av de mest kritiske variablene med til dels betydelige feil, er det lite man har kunnet gjøre for å forbedre boniteringsgrunnlaget fordi man har ansett at en omfattende bonitering i felt har vært den eneste metoden for å forbedre dagens boniteringsgrunnlag. Kostandene knyttet til omfattende feltbonitering har vært ansett som urealistiske å finansiere.

Aldersbonitering

I boniteringssystemet «H40» som benyttes i Norge (Tveite, 1977, Tveite and Braastad, 1981), brukes overhøyde og brysthøydealder som inngangsverdier i statistiske modeller som beregner bonitetsverdien uttrykt som overhøyde ved 40 års brysthøydealder. Slike modeller beskriver en typisk utvikling i overhøyden over alder. I det videre bruker vi begrepet «boniteringsfunksjoner» om disse modellene. Med denne måten å bonitere på, der man registrerer alder og høyde på ett tidspunkt og beregner boniteten med en boniteringsfunksjon, relaterer man all akkumulert høydevekst fra det året trærne nådde brysthøyde og fram til i dag, til dagens brysthøydealder. For enkelte år vil imidlertid høydeveksten kunne avvike fra den typiske høydeutviklingen som boniteringsfunksjonen viser for en gitt bonitet. Effekten av enkelte år med atypisk høydetilvekst, for eksempel på grunn av gunstige eller ugunstige værforhold, vil være fordelt over hele observasjonsperioden (brysthøydealderen). Slike effekter vil således være større når trærne som observeres er unge, sammenlignet med når trærne er gamle.

Høydedifferensiell bonitering

Ved å observere økningen i overhøyde for et areal over en bestemt tidsperiode, er det mulig å bestemme boniteten ved å bruke boniteringsfunksjonene til å finne den verdien av H40-boniteten der høydeveksten over observasjonsperioden stemmer overens med den høydeveksten man faktisk har observert. En stor fordel med denne måten å bonitere på, såkalt høydedifferensiell bonitering, er at

man ikke er avhengig av å registrere alder, som vil kreve borprøver av trærne i felt. Ulemper er at man observerer høydeveksten over en kortere tidsperiode enn ved tradisjonell bonitering, og at man ikke kan bonitere på arealer der overhøydeutviklingen er påvirket av inngrep eller calamiteter i observasjonsperioden. Dersom man f.eks. utnytter høydeveksten i overhøyde for de 10 siste år, vil den resulterende bonitetsverdien åpenbart bli sterkt påvirket av vær- og vekstforhold de siste 10 år, mens aldersbonitering som nevnt vil gi en gjennomsnittlig bonitet for perioden fra treet nådde brysthøyde og fram til i dag. Ulempen med korte perioder er åpenbar: det er betydelig risiko for at boniteten ikke vil reflektere de gjennomsnittlige forholdene for en lengre tidsperiode. På den annen side kan observasjon av vekstperiode som er tett knyttet til dagens tilstand, fange opp permanente endringer i vekstforholdene, slik som f.eks. endret klima (høyere temperatur og mer nedbør) og gjødslingseffekter av nitrogennedfall som skyldes luftforurensing.

Muligheter for forbedret bonitering gjennom fremtidens skogplantakster

Skogplantakster utføres i dag i de aller fleste tilfeller som såkalt arealbasert lasertakst. Data fra flybåren laserskanning beskriver med stor detaljrikdom og nøyaktighet høyden av skogen på lokalt nivå, typisk for ruter/celler (beregningceller) med et areal ned mot 0.25 dekar. Med bakgrunn i en slik høydebeskrivelse, beregnes en rekke viktige ressursvariabler som behøves i videre planlegging og for prognoser, slik som volum, middelhøyde, overhøyde, middeldiameter, treantall osv. Disse verdiene summeres så opp til bestandsnivå, som danner grunnlag for skogbruksplanene.

I beregningene i arealbaserte lasertakster inngår bruk av utvalgte prøveflater målt i felt i det enkelte takstprosjekt, slik at enhver takst er kalibrert mot lokale skogforhold på en objektiv måte. Faktisk er overhøyden som behøves for bonitering, en av de seks grunnvariablene som har blitt beregnet allerede fra den første operative lasertaksten i global sammenheng (Nordre Land kommune) ble påbegynt i 2002 (Næsset, 2004a). Denne takst- og beregningsmetodikken kan også overføres til framtidige takstopplegg som måtte basere seg på høydemålinger fra flybilder (såkalt bildematching) i stedet for fra laser.

Bruk av arealbasert lasertakst på to tidspunkt åpner for bl.a. høydedifferensiell bonitering slik det er beskrevet ovenfor, ved hjelp av predikerte overhøyder på beregningceller fra to tidspunkter. Også gjennomsnittbonitering over trærnes livsløp er imidlertid mulig. I det siste tilfellet trenger man faktiske observasjoner av bonitet fra felt, og man kan deretter tilpasse en statistisk modell mellom observert livsløpsbonitet og variabler som er ekstrahert fra bi-temporale laserdata. Dette er akkurat den samme metodikken som benyttes for de «vanlige» ressursvariablene (volum, overhøyde etc.) med variable ekstrahert fra laserdata fra ett tidspunkt. Boniteten blir således en «ny» variabel som kan inngå i en allerede innarbeidet beregningsrutine, som følge av at bi-temporale laserdata nå blir tilgjengelig over stadig større områder.

Prosjektets mål

Hovedmålsettingen for dette prosjektet har vært å utvikle en operativ metode for å beregne bonitet på beregningcellene i arealbaserte lasertakster basert på de data som allerede er tilgjengelige, og tilpasse metoden til data fra repeterte lasertakster (minst to omdrev). Prosjektet har sett på to ulike metoder for å beregne bonitet på beregningcellenivå; 1) høydedifferensiell bonitering etter H40-systemet basert på overhøydeutviklingen for det aktuelle taksintervallet (typisk 10-15 år) og 2) gjennomsnittsbonitering etter H40-systemet basert på hele livsløpet til boniteringstrærne. Begge metodene har blitt testet på valideringsdata på bestandsnivå. De ulike delmålene har vært:

1. Utvikle en praktisk metode for å beregne detaljert bonitet (0,25 dekar nivå) basert på de data som allerede samles inn i operative arealbaserte laser- og fototakster brukt i skogbruksplanleggingen.
2. Tilpasse metoden til data fra repeterte laser/foto-takster (minst to omdrev).

3. Vurdere to alternative metoder for slik bonitering:
 - Metode 1: Høydedifferensiell bonitering basert på overhøydeutviklingen for det aktuelle taksintervallet (typisk 10-15 år).
 - Metode 2: Gjennomsnittsbonitering basert på hele livsløpet til boniteringstrærne.
4. Teste de to metodene mot valideringsdata på bestandsnivå. Gi anbefalinger for praktiske boniteringsrutiner i andre omdrev av laser/fototakster.

Studieområder og datagrunnlag

Feltdata

Studieområdene ble valgt ut blant de områdene der operative arealbaserte lasertakster i sin tid ble prøvd ut først, og som i 2016/2017 ble taksert på nytt ved hjelp av samme metode. Disse områdene var Nordre Land, Hole, Tyristrand og Krødsherad (Fig. 1). I alle områder hadde vi feltobservasjoner av enkelttrær (diameter, høyde, treslag) på prøveflater fra to tidspunkt (T1 og T2, se Tabell 1). I operative takster blir det for slike prøveflater beregnet volum, middeldiameter, middelhøyde etc. og de blir videre brukt som kalibreringsobservasjoner for modeller mellom felt- og fjernmålingsinformasjon. I

dette spesifikke prosjektet var det overhøyde og bonitet som var de interessante variablene.

Feltregistrering av bonitet på prøveflatene er ikke vanlig praksis i operative takster, men i dette prosjektet ble boniteten registrert ved siste måletidspunkt (2016/2017). For alle områder unntatt

Tyristrand, var det også gjort målinger på såkalte kontrollflater. Dette var arealer som var noe større enn prøveflatene (intensjonen var å etterligne hele bestand) og der bonitet ble predikert og sammenlignet med den feltobserverte boniteten. En oversikt over datamaterialet finnes i Tabell 1. Tabellen viser antall prøve- og kontrollflater og størrelsen på disse for de ulike studieområdene fordelt på gran- og furudominert skog. For den samme grupperingen av datamaterialet, viser tabellen også gjennomsnittlige bonitets- og overhøydeverdier og den korresponderende variasjonsbredden.

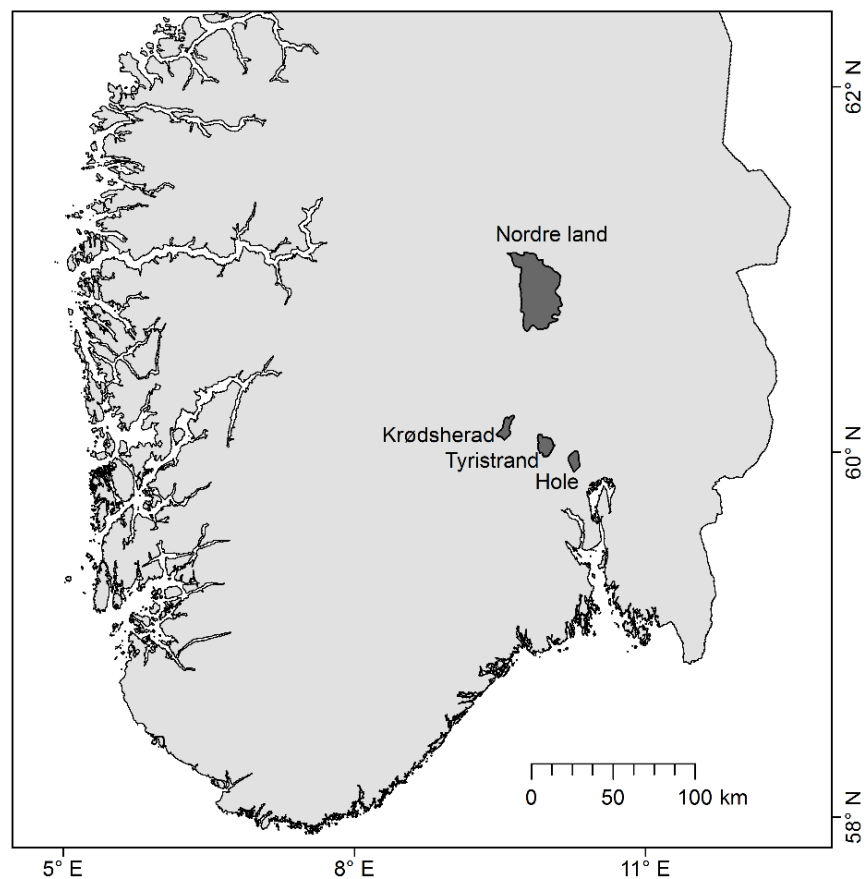


Fig. 1. Studieområdene.

Tabell 1. Sammendrag av datamateriale (H40-bonitet og overhøyde) fordelt på studieområder og treslagsdominans

Variabel	Prøveflater			Kontrollflater		
	n (areal)	variasjonsbredde	snitt	n (areal)	variasjonsbredde	snitt
<i>Nordre Land, grandominert</i>	145 (250 m ²)			9 (1 000 m ²)		
H40 (m)		4.8-23.4	12.4		8.8-20.6	13.7
Overhøyde T ₁ (m)		8.8-30.1	18.3		15.8-27.6	23.7
Overhøyde T ₂ (m)		9.5-30.5	20.7		16.9-30.0	24.0
<i>Nordre Land, furudominert</i>	34 (250 m ²)			12 (1 000 m ²)		
H40 (m)		5.9-20.7	13.1		7.4-20.8	13.6
Overhøyde T ₁ (m)		13.4-24.8	19.2		13.9-27.0	21.1
Overhøyde T ₂ (m)		14.4-29.9	21.2		16.6-25.1	22.4
<i>Hole, grandominert</i>	82 (250 m ²)			29 (1 000 m ²)		
H40 (m)		4.2-24.2	13.8		4.5-24.0	12.5
Overhøyde T ₁ (m)		10.3-27.2	17.7		10.9-24.7	19.5
Overhøyde T ₂ (m)		12.3-28.7	20.3		12.4-27.4	20.9
<i>Tyristrand, grandominert</i>	15 (250 m ²)					
H40 (m)		7.1-25.1	16.5			
Overhøyde T ₁ (m)		10.9-23.7	19.4			
Overhøyde T ₂ (m)		16.2-28.0	21.4			
<i>Tyristrand, furudominert</i>	91 (250 m ²)					
H40 (m)		5.0-24.0	13.7			
Overhøyde T ₁ (m)		9.4-23.8	18.0			
Overhøyde T ₂ (m)		9.1-25.6	20.0			
<i>Krødsherad, grandominert</i>	36 (233 m ²)			21 (3 700 m ²)		
H40 (m)		8.2 - 25.6	17.4		9.9 - 24.3	16.6
Overhøyde T ₁ (m)		10.3 - 25.7	19.0		14.9 - 24.5	19.9
Overhøyde T ₂ (m)		16.5 - 30.3	22.1		12.8 - 29.8	22.6
<i>Krødsherad, furudominert</i>	44 (233 m ²)			21 (3 700 m ²)		
H40 (m)		4.5 - 20.3	13.1		6.5 - 20.1	13.5
Overhøyde T ₁ (m)		10.4 - 25.4	18.3		13.2 - 25.2	18.3
Overhøyde T ₂ (m)		12.3 - 28.7	20.3		10.4 - 28.2	20.2

* H40 = bonitet etter H40-systemet, Overhøyde T₁ og Overhøyde T₂ = overhøyde (m) på henholdsvis første måletidspunkt (T1) og andre måletidspunkt (T2). T1 og T2 for de ulike områdene; Nordre Land: 2003/2004 og 2017, Hole: 2005 og 2017, Tyristrand: 2006 og 2017, Krødsherad: 2001 og 2016/2017

Laserdata

For alle studieområder var laserdata tilgjengelig for begge måletidspunkter. Det ble brukt ulike laserinstrumenter og oppsettparametere for de ulike flygningene. Tabell 2 viser spesifikasjonene for

alle flygningene. Som det går fram av tabellen, har de nyeste instrumentene større kapasitet når det gjelder pulsrepetisjonsrate og skannefrekvens sammenlignet med de eldre, som gjør at punkttetthet ble større.

Tabell 2. Oppsettparametere for de ulike flygningene for det ulike studieområdene for begge måletidspunkt.

Område	Instrument	År	Tidsrom	Pulsrepetisjonsrate (kHz)	Skannefrekvens (Hz)	Flyhøyde (m)	Punkttetthet (m ⁻²)
<i>Første måletidspunkt</i>							
Nordre Land	Optech ALTM 1233	2003	10 juli–26 aug.	33	40	800	1
Hole	Optech ALTM 1233	2004	16 sept.	50	21	1200	1
Tyristrand	Optech ALTM 3100	2005	14 okt.	50	32	1600	1
Krødsherad	Optech ALTM 1210	2001	23 juni–1 aug	10	30	650	1
<i>Andre måletidspunkt</i>							
Nordre Land	Riegl LMS Q-1560	2016	5-13 sept.	400	100	2900	4
Hole	Riegl LMS Q-1560	2016	7 juni–31 juli	534	115	1300	10
Tyristrand	Riegl LMS Q-1560	2016	7 juni–31 juli	534	115	1300	8
Krødsherad	Riegl LMS Q-1560	2016	7 juni–31 juli	534	115	1300	12

Metoder for bonitetsbestemmelse på beregningscellenivå

Som tidligere nevnt, har dette prosjektet analysert to ulike metoder for å bestemme bonitet ved hjelp av bi-temporale laserdata, nemlig den indirekte- og den direkte metoden (Fig. 2). Den indirekte metoden er identisk med det som i innledningen er beskrevet som høydedifferensiell bonitering, og med den direkte metoden tilpasses en modell for feltobservert bonitet over trærnes livsløp. Dette avsnittet beskriver disse to metodene i nærmere detalj.

Både den indirekte- og den direkte metoden anvendes på beregningscellenivå. Felles for begge metodene er at overhøydeutviklingen på beregningscellene der boniteten skal bestemmes, må være upåvirket mellom måletidspunkter. Har det for eksempel blitt utført skjøtselstiltak som har gjort at overhøyden på andre måletidspunkt er lavere enn den ville ha vært uten tiltaket, vil de beregningscellene dette gjelder være uegnet for bonitering med bi-temporale laserdata. Det samme gjelder hvis det har vært kalamiteter som har påvirket overhøydeutviklingen. Siden de norske boniteringsfunksjonene ikke gjelder for skog yngre enn 15 år i brysthøyde, er heller ikke beregningsceller i hogstklasse II (ungskog) egnet. For begge metoder må også hovedtreslag være kjent, slik at riktige boniteringsfunksjoner anvendes i den indirekte metoden, og de riktige modellene for livsløpsbonitet anvendes ved den direkte metoden. For at beregningscellene skal ha all nødvendig informasjon knyttet til seg, må de klassifiseres. Når det gjelder hovedtreslag og hogstklasse, har vi i dette arbeidet forutsatt at disse blir tolket i flybilder på bestandsnivå, men også her kan det være mye informasjon å hente fra fjernanalyse, og man kan se for seg at treslaget i framtiden blir bestemt på

beregningscellenivå, for eksempel med såkalte hyperspektrale data. I dette prosjektet har imidlertid hver celle innen et bestandspolygon vært klassifisert med samme treslag og hogstklasse. Når det gjelder klassifiseringen av om overhøydeutviklingen er påvirket eller ikke, benyttes informasjon fra bi-temporale laserdata i en klassifiseringsmodell. En slik modell kan tilpasses ved at man har observasjoner av beregningsceller fra felt som omfatter både egnede og uegnede celler. Deretter kan modellen anvendes på alle beregningscellene i takstområdet, og man vil ha informasjon om hvilke celler som kan boniteres. I et enkelt takstomdrev vil man altså ikke få bonitert hele takstområdet. De resterende beregningscellene vil måtte «vente» til de oppfyller kriteriene som er beskrevet over eller boniteres på andre måter.

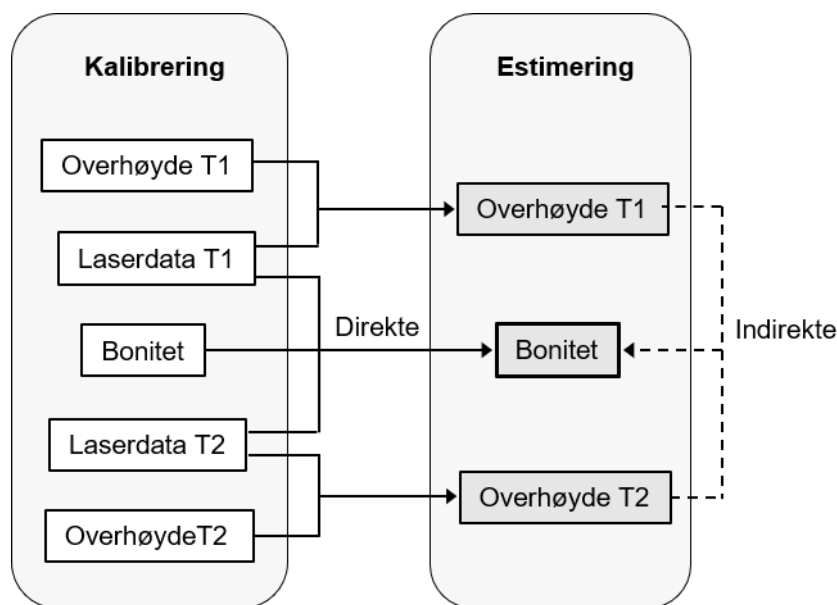


Fig. 2. Direkte og indirekte metode for bonitering ved hjelp av data fra to tidspunkt (T1 og T2). Ved den direkte metoden blir en modell for bonitet kalibrert ved hjelp av laserdata fra begge måletidspunkt (T1 og T2). Deretter anvendes modellen for prediksjon, og prediksjonene kan brukes til å estimere boniteten på bestandsnivå. Ved den indirekte metoden blir det kalibrert en modell for overhøyde på T1 og en på T2. Modellene blir anvendt på beregningscellene, og deretter blir de to overhøydeprediksjonene på hver beregningscelle, sammen med tiden mellom T1 og T2, brukt til å finne boniteten ved hjelp av boniteringsfunksjoner.

Den indirekte metoden (høydedifferensiell bonitering) har som utgangspunkt at det foreligger prediksjoner av overhøyde på hver egnet beregningscelle i takstområdet på to tidspunkter. Tidsintervallet mellom måletidspunkter må være kjent. Når man har disse opplysningene om hver beregningscelle, kan man ved hjelp av overhøydeprediksjonen ved første måletidspunkt (H1), differansen mellom overhøydeprediksjonene på andre og første måletidspunkt (DIFF), og tidsintervallet mellom målinger (TID), bruke boniteringsfunksjonene til å finne den bonitetsverdien som kombinasjonen av H1, DIFF, TID gir. Ved hjelp av denne metoden trenger man altså ikke alderen på skogen. Alderen kan faktisk også beregnes for hver celle gjennom den indirekte boniteringsmetoden på samme måte som bonitet, siden den i boniteringsfunksjonen er en funksjon av H1 og boniteten.

Den direkte metoden for å bestemme bonitet ligner på den tradisjonelle måten for prediksjon av skoglige variabler ved hjelp av arealbasert lasertast. Ved denne metoden trenger man et sett med parvise observasjoner av feltmålt bonitet og variabler fra bi-temporale laserdata. Deretter kan

statistiske modeller tilpasses, og disse modellene kan anvendes på de egnede beregningscellene i taksområdet. Som for hvilken som helst annen skoglig variabel som blir predikert i en arealbasert lasertakst, er det en fordel at modellene stratifiseres. Som et minimum bør man stratifisere på treslag, men det er trolig hensiktsmessig å inkludere hogstklasse i stratifiseringen. Man kan til og med tenke seg at fototolket bonitet fra forrige takst kan inkluderes i stratifiseringsgrunnet.

Begge metodene gir altså bonitetsprediksjoner på beregningscellenivå. Prediksjonene innenfor hvert bestand kan dermed kombineres for å estimere boniteten i bestandet som helhet. Dette gjøres på samme måte som for andre skoglige variabler som estimeres på bestandsnivå ved hjelp av den arealbaserte metoden, altså ved å beregne et gjennomsnitt av beregningscellenes verdier.

Resultater

Gjennom arbeidet i prosjektet har det blitt utviklet en operativ metode for å estimere bonitet på bestandsnivå. Metoden følger i hovedsak de samme beregningsprosedyrene som de i den allerede etablerte arealbaserte skogbruksplantaksten, som forklart under «*Metoder for bonitetsbestemmelse på beregningscellenivå*».

Den direkte og den indirekte metoden ble sammenlignet av Noordermeer et al. (2018a). I denne studien ble felt- og laserdata fra Krødsherad benyttet. Modeller avhengige av høydeinformasjon fra laserdata for direkte prediksjon av bonitet ble kalibrert på 80 prøveflater der bonitet var observert i felt, og modellene ble testet på 42 kontrollflater med et areal på omkring 3.7 dekar. Bonitetsestimatene på kontrollflatene ble beregnet ved at vi først delte flatene i 16 beregningsceller med areal identisk med arealet på prøveflatene som modellene ble kalibrert på. Modellene ble deretter anvendt på hver av beregningscellene, og gjennomsnittlig bonitetsprediksjon for de 16 cellene ble brukt som estimat for kontrollflaten. Alle beregningsceller i hver kontrollflate ble også bonitert i felt, og vi kunne dermed beregne differensen mellom feltobservert bonitet og bonitet estimert fra laserprediksjonene. Den feltobserverte boniteten ble ansett som «fasit».

Indirekte bonitering ved hjelp av endring i laserpredikert overhøyde ble også testet på de samme flatene. Modeller for overhøyde ble tilpasset for hvert måletidspunkt ved hjelp av de 80 prøveflatene og modellene ble deretter anvendt på beregningscellene i hver kontrollflate. Boniteten på hver beregningscelle ble deretter predikert med boniteringsfunksjonene med H1, DIFF og TID som inngangsinformasjon, og estimatet på kontrollflatenivå ble beregnet som gjennomsnittet av prediksjonene. Differanser mellom feltobserverte og estimerte verdier ble beregnet på samme måte som for den direkte metoden.

Resultatene tyder på at begge metoder gir forventningsrette estimater. Det vil si, for de 42 kontrollflatene sett under ett, var det ingen statistisk signifikant forskjell mellom den feltobserverte boniteten og den som ble estimert ved hjelp av laserdata. Undersøkelser gjort på 90-tallet av avvik mellom bonitet registrert i kontrolltakster og bonitet registrert for skogbruksplaner med bruk av datidens metoder, påviste systematiske feil mellom 2 og 17 % (Eid, 2000). Når det gjelder presisjonen til de to metodene vi har analysert i dette prosjektet, viste resultatene at den direkte metoden var mer presis enn den indirekte. Denne konklusjonen ble basert på den såkalte «root mean square error» (RMSE) som er samlet uttrykk for størrelsen på de tilfeldige og systematiske avvikene mellom den sanne og den estimerte verdien. En enkel tolking av RMSE er at 2/3 av estimater som har framkommet ved hjelp av den aktuelle metoden, vil ligge innenfor et intervall lik RMSE-verdien til hver side av den sanne bonitetsverdien. Resultatene viste at RMSE for grandominert skog var 1.78 m ved bruk av den direkte metoden, og 1.82 m ved bruk av den indirekte. For furudominert skog var de korresponderende verdiene 1.08 m og 1.82 m. Den direkte metoden så altså ut til å fungere bedre i

furudominert skog enn i grandominert skog, mens den indirekte fungerte like godt uavhengig av treslagsdominans. Oversatt til relative tall, tilsvarer disse RMSE-verdiene en tilfeldig feil på under 10 % av observert bonitet. Med tradisjonelle metoder der bonitet tolkes basert på flybilder, er de tilfeldige feilene gjerne dobbelt så store (Eid, 2000).

Som tidligere nevnt, er det en forutsetning at hver beregningscelle er klassifisert med tanke på om den er egnet for bonitering eller ikke. Innenfor rammen til dette prosjektet og flere andre prosjekter ved NMBU, har det blitt utviklet metoder for slik klassifisering ved hjelp av bi-temporale laserdata. Noordermeer et al. (2019b) brukte data fra de fire studieområdene beskrevet i denne rapporten for å tilpasse en klassifikasjonsmodell. Resultatene fra denne studien viste at man kan klassifisere beregningsceller i klassene egnet og uegnet for bonitering, med omkring 90-95 % nøyaktighet.

For å teste metoden operativt, er det også gjort en studie der data fra studieområdene i Nordre Land, Hole og Tyrstrand ble bonitert ved hjelp av den direkte metoden (Noordermeer et al., 2019a). Det ble først utført en klassifisering av alle beregningsceller i bestand der hogstklassen var III, IV eller V i de tre områdene. Samlet areal som ble klassifisert var 337 km² i Nordre Land, 24 km² i Hole, og 70 km² i Tyrstrand. Deretter ble det kalibrert modeller for feltobservert livsløpsbonitet på prøveflatene i hvert studieområde fordelt på gran- og furudominert skog, og modellene ble deretter anvendt på alle beregningsceller som ble klassifisert som egnet. Resultatet var bonitetskart for de aktuelle takstområdene, med en oppløsning som er mye høyere enn det som er vanlig i områdetakster (Fig. 3). Figuren viser deler av takstområdene og den nær kontinuerlige boniteringen over områdene. Fig. 4 viser et mer detaljert utsnitt av bonitetskartet for Nordre Land. Som det går fram av figuren, vil man innenfor hvert bestand få mange bonitetsprediksjoner, og dermed få objektiv informasjon om bonitetsvariasjonene for hvert bestand. Den detaljerte figuren viser også at det vil være enkelte celler og hele bestand som ikke vil kunne boniteres fordi de er klassifisert som uegnet. Nøyaktigheten ble testet på de kontrollflatene som var målt i Nordre Land og Hole. Kontrollflatene i de aktuelle studieområdene var mindre (1.0 dekar) sammenlignet med de som var tilgjengelig i Krødsherad-studien (3.7 dekar) (Noordermeer et al., 2018a), og resultatene viste derfor noe lavere presisjon (1.35 – 2.22 m). Tabell 3 gir en samlet oversikt over resultatene for validering av metodene som er gjort i de ulike studieområdene.

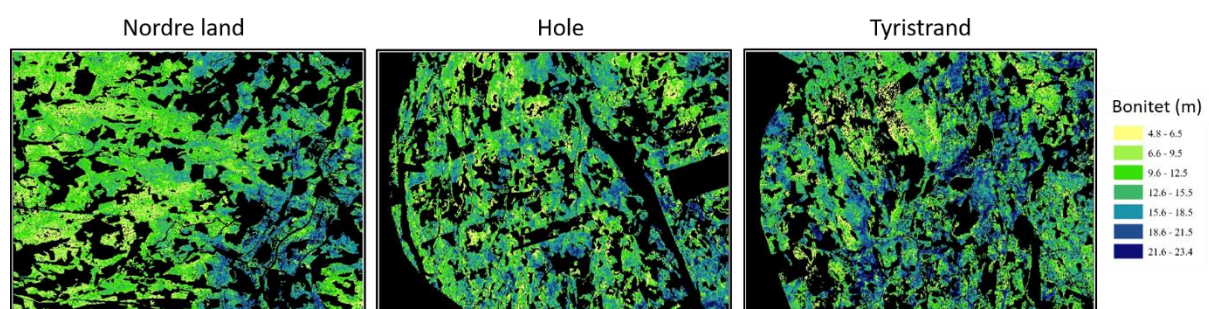


Fig. 3. Kartutsnitt fra bonitetskart generert for prosjektområdene (Noordermeer et al., 2019a).

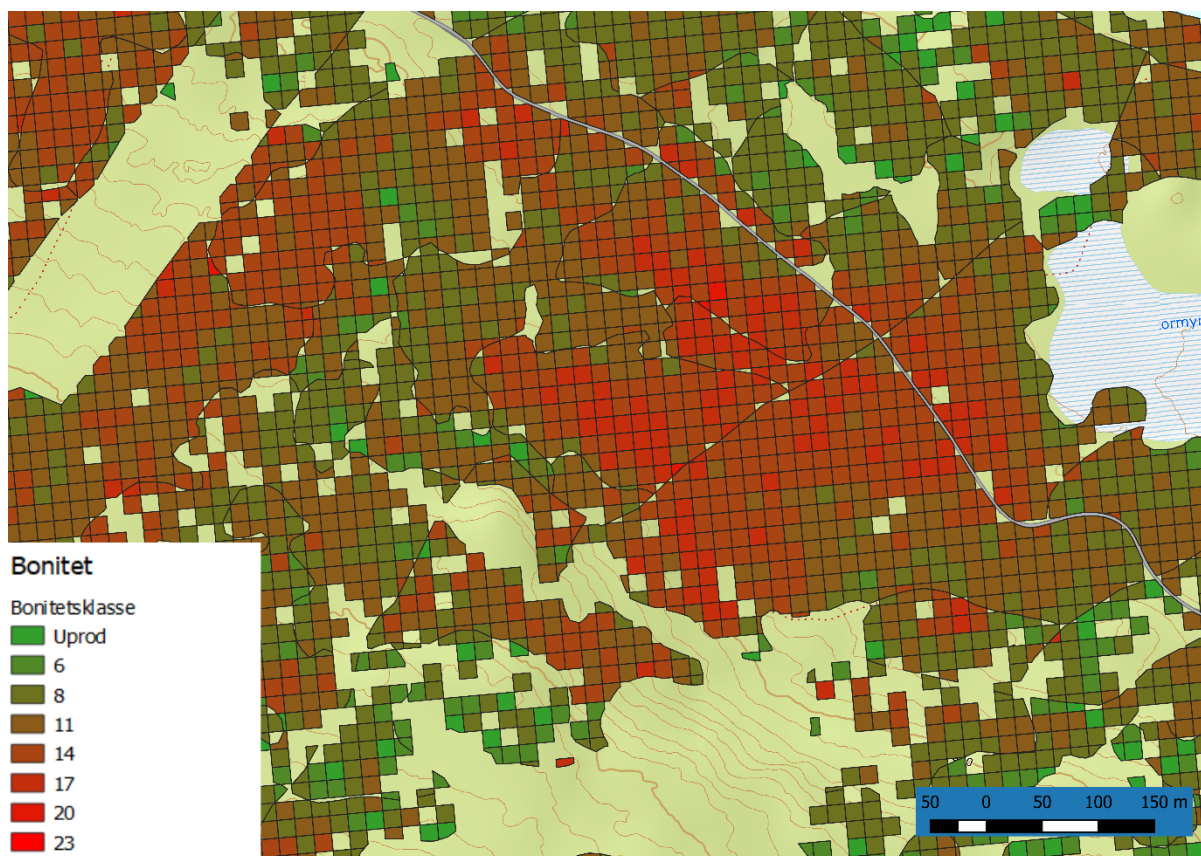


Fig. 4. Detaljert kartutsnitt med beregningsceller som er bonitert med bi-temporale laserdata. De ulike fargene representerer ulike bonitetsklasser. Man kan også se bestand og enkeltceller som ble klassifisert som uegnet for bonitering der underlagskartet vises. Hver celle er 0,25 dekar (ca 16 x 16 m).

Tabell 3. Oversikt over valideringsresultater for bonitering med den direkte og indirekte metoden

Område (areal*)	Treslag	Metode	RMSE (m)	Referanse
Krødsherad (3.7 dekar)	Gran	Direkte	1.78	Noordermeer et al. (2018a)
	Gran	Indirekte	1.82	
	Furu	Direkte	1.08	
	Furu	Indirekte	1.82	
Nordre Land (1.0 dekar)	Gran	Direkte	2.22	Noordermeer et al. (2019a)
	Furu	Direkte	1.35	
Hole (1.0 dekar)	Gran	Direkte	1.93	

* Areal på kontrollflate

Andre prosjekter ved NMBU har også studert bonitering ved hjelp av andre typer fjernmålte data enn flybåren laserskanning. Bollandsås et al. (2019) brukte kvantitativ informasjon fra optiske sensorer som registrerer detaljerte fargerefleksjoner som ligger utenfor hva vi kan oppfatte med vårt menneskelige øye, til å modellere bonitet. Slike sensorer kalles hyperspektrale kamera. Hypotesen var at det er fargenyanser på trærne som følge av vekstforholdene. Resultatene var lovende, og det ser ut til at hyperspektrale data kan brukes som et alternativ til bi-temporale laserdata.

Prosjektet har vært sentralt i arbeidet fram mot doktorgrad for Lennart Noordermeer, som etter planen skal levere sin avhandling i mars 2020. Videre har resultater fra prosjektet blitt presentert på flere konferanser, både nasjonalt (Bollandsås et al., 2018a, Bollandsås et al., 2018b) og internasjonalt (Gobakken et al., 2018, Noordermeer et al., 2018b). I tillegg har arbeidet i prosjektet vært omtalt i en artikkel i Norsk Skogbruk (Kløvstad, 2019). Prosjektet har resultert i en masteroppgave ved NMBU

(Berlin, 2017), og ytterligere en masteroppgave skal baseres på data fra dette prosjektet i 2020. Implementeringen av metoden har allerede startet ute i næringen. I kommunene Hurum, Røyken og Lier gjennomfører Viken bonitering ved hjelp av laserdata som en del av skogbruksplantaksten. Skogbruksplanene skal leveres andre halvår 2020, og alle prøveflatene ble registrert for å kunne gjøre bonitetsberegninger etter begge metodene som tidligere beskrevet.

Konklusjoner og anbefalinger

Studiene som er gjennomført i dette prosjektet, viser at bonitering ved hjelp av bi-temporale laserdata er en effektiv og nøyaktig metode for å bestemme bonitet. Både den direkte og den indirekte metoden gir gode resultater, og ved bruk av begge metoder i gran- og furudominerte bestand er den tilfeldige feilen under 2 meter på bestandsnivå (under 10%). Med tradisjonelle metoder der bonitet tolkes basert på flybilder, er de tilfeldige feilene gjerne dobbelt så store. I dette prosjektet fant vi heller ikke noen systematiske avvik mellom feltmålt bonitet og den vi estimerte fra lasermålinger. Undersøkelser gjort på 90-tallet av avvik mellom bonitet registrert i skogbruksplaner og kontrolltakster, påviste systematiske feil mellom 2 og 17 %.

Resultatene som er oppnådd i prosjektet, danner grunnlag for noen viktige, praktiske anbefalinger knyttet til bonitering ved hjelp av bi-temporale laserdata. Den direkte metoden er den enkleste metoden for praktisk implementering, og i studien der de to metodene ble sammenlignet (Noordermeer et al., 2018a), var den også den mest nøyaktige. Metoden krever at man under feltarbeidet gjør en bonitering på prøveflatene som skal tjene som referanseverdi for modellkalibreringen. Den indirekte metoden har imidlertid den fordelen at den ikke er avhengig av at boniteten er registrert på prøveflater i felt. Metoden er faktisk ikke avhengig av andre målinger enn de som allerede blir gjort i dagens takster. Det er også viktig å understreke at den bonitetsverdien man beregner med denne metoden, ikke er relatert til samme tidsperiode som den man beregner ved den direkte metoden, men kun perioden mellom takstene. Dette betyr at om det har vært andre vekstforhold i perioden mellom takster, sammenlignet med i livsløpet til trærne i bestandet, for eksempel på grunn av endret vær eller klima, vil de to boniteringsmetodene gi forskjellige resultat.

For begge metoder er det viktig at perioden mellom lasermålinger ikke er for kort. Prediksjon av gjennomsnittlige høyder på en beregningscelle, enten det er overhøyde eller middelhøyde, har en viss tilfeldig feil knyttet til seg. For eksempel Næsset (2004b) fant at standardavviket til differenser mellom laserpredikerte og feltobserverte overhøyder var omkring 6 % av den feltobserverte overhøyden i eldre skog. Derfor, hvis det er liten endring i trehøydene mellom takster på grunn av at det enten har gått kort tid mellom takster, eller at det er lave boniteter eller veldig gammel skog, kan den tilfeldige høydefeilen helt eller delvis «sluke» den faktiske høydeveksten. I studiene som er omfattet av dette prosjektet, har tidsintervallet mellom takster vært fra 11 til 15 år, og datamaterialet har omfattet hele bonitetsspekteret. Disse tidsintervallene ser ut til å være tilstrekkelige.

Klassifisering av beregningsceller er nødvendig og til dette trenger man som nevnt en klassifiseringsmodell. I studiene som er gjennomført i dette prosjektet, har vi ikke hatt opplysninger om det faktisk har skjedd inngrep på de prøveflatene som er brukt til kalibrering av disse klassifiseringsmodellene som senere er brukt for å avgjøre om beregningsceller er egnet eller uegnet for bonitering. Vi har i stedet brukt de feltobserverte høydene og utviklingen i biomasse og treantall for å avgjøre dette og dermed sette en «fasit», og deretter kalibrert klassifiseringsmodellene på en tolket verdi. Dette er helt objektiv metode som ser ut til å fungere bra, men den krever at det er de samme prøveflatene som er målt på begge taksttidspunkt. Dette vil imidlertid ikke alltid være tilfelle. Mest sannsynlig vil man i et nytt takstprosjekt være fri til å legge ut et helt nytt sett med prøveflater i henhold til en oppdatert stratifisering av skogen i takstområdet. Hvis man skal kunne kalibrere en

klassifiseringsmodell basert på prøveflatene må derfor alle prøveflatene klassifiseres ved en vurdering i felt samtidig med at trærne blir klavet og høydemålt. De som registrerer flatene bør derfor gi en vurdering av om flaten er egnet eller uegnet for bonitering ved å vurdere om det har skjedd inngrep eller kalamiteter på flatene siden siste takst.

Referanser

- BERLIN, A. J. 2017. *Aldersuavhengig bonitering med arealbasert laserdata fra to tidspunkt*. Master, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- BOLLANDSÅS, O. M., NOORDERMEER, L. & NÆSSET, E. Bonitering ved bi-temporale laserdata. *Skog & Tre, Gardermoen Norway* 01.06.2018., 2018a.
- BOLLANDSÅS, O. M., NOORDERMEER, L. & NÆSSET, E. Site index estimation using bi-temporal ALS. Startup project meeting, ForestPotential, Gardermoen Norway 22-23.03.2018., 2018b.
- BOLLANDSÅS, O. M., ØRKA, H. O., DALPONTE, M., GOBAKKEN, T. & NÆSSET, E. 2019. Modelling Site Index in Forest Stands Using Airborne Hyperspectral Imagery and Bi-Temporal Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 11, 1020.
- EID, T. 1992. Standwise control of forest management planning data in cutting class III–V. *Communications of Skogforsk*, 45, 1-78.
- EID, T. 2000. Use of uncertain inventory data in forestry scenario models and consequential incorrect harvest decisions. *Silva Fennica*, 34.
- GISNÅS, A. 1982. Skogkartlegging ved fototyding i kartkonstruksjonsinstrument. *Rapport fra Norsk Institutt for Skogforskning*, 14, 1-40.
- GOBAKKEN, T., BOLLANDSÅS, O. M., NOORDERMEER, L. & NÆSSET, E. Area-based estimation of site index using bitemporal airborne laser scanner data. SNS meeting, Frederiksberg, Denmark, 22-24.08.2018, 2018.
- KLØVSTAD, A. 2019. Banebrytende skogtakstarbeid. *Norsk Skogbruk*, 3, 36-37.
- NOORDERMEER, L., BOLLANDSÅS, O. M., GOBAKKEN, T. & NÆSSET, E. 2018a. Direct and indirect site index determination for Norway spruce and Scots pine using bitemporal airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, 428, 104-114.
- NOORDERMEER, L., BOLLANDSÅS, O. M., GOBAKKEN, T. & NÆSSET, E. Direct and indirect site index determination for Norway spruce and Scots pine using bitemporal airborne laser scanner data. ForestSat conference, Maryland, USA, 01-05.10.2018., 2018b.
- NOORDERMEER, L., GOBAKKEN, T., NÆSSET, E. & BOLLANDSÅS, O. M. 2019a. Mapping site index in operational forest inventories using bitemporal airborne laser scanner data. *Forest Ecology and Management*, Submitted.
- NOORDERMEER, L., ØKSETER, R., ØRKA, H. O., GOBAKKEN, T., NÆSSET, E. & BOLLANDSÅS, O. M. 2019b. Classifications of Forest Change by Using Bitemporal Airborne Laser Scanner Data. *Remote Sensing*, 11, 2145.
- NÆSSET, E. 1994. Sammenlikning av ulike boniteringer av et skogområde. *Rapport fra Norsk Institutt for Skogforskning*, 11, 1-21.
- NÆSSET, E. 2004a. Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 554-557.
- NÆSSET, E. 2004b. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 164-179.
- TVEITE, B. 1977. Bonitetskurver for gran. *Meddelelser fra Norsk institutt for skogforskning*. Ås: Norsk institutt for skogforskning.
- TVEITE, B. & BRAASTAD, H. 1981. Bonitering for gran, furu og bjørk *Norsk Skogbruk*, 4, 17-22.