



NIBIO

NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Anvendelse av aldersfri bonitet for skog i Norge

NIBIO RAPPORT | VOL. 8 | NR. 123 | 2022



Svein Solberg, Marius Hauglin og Paul McLean
Divisjon for skog og utmark

TITTEL/TITLE

Anvendelse av aldersfri bonitet for skog i Norge

FORFATTER(E)/AUTHOR(S)

Svein Solberg, Marius Hauglin, Paul McLean

DATO:	RAPPORT NR.:	TILGJENGELIGHET:	PROSJEKT NR.:	SAKSNR:
28.09.2022	8/123/2022	Åpen	Prosjektnr 51414	Arkivnr 19/01374
ISBN:	ISSN:	ANTALL SIDER:	ANTALL VEDLEGG:	
978-82-17-03144-4	2464-1162	34		

OPPDRAUGSGIVER:

Flere oppdragsgivere, se forord

KONTAKTPERSON:

Svein Solberg

STIKKORD:

skog, bonitet

FAGOMRÅDE:

skogproduksjon

SAMMENDRAG:

Aldersfri bonitering er en metode for estimering av bonitet uten bruk av alder på skogen. Metoden er utviklet ved NIBIO i seinere år, og omtalt i tidligere publikasjoner. Vi går her videre i arbeidet med å kvalitetssikre metoden, og vurderer hvilken potensiell anvendelse den kan ha i skogbruket. Samlet sett viser resultatene at aldersfri bonitet har et potensial for å brukes i skogbruk i Norge. Det kan brukes for det første som et alternativ til konvensjonell bonitering i skogbruksplanlegging og på det landsdekkende skogressurskartet SR16, og for det andre som et supplement til konvensjonell bonitet på Landsskogtakseringens felt for å overvåke endringer forårsaket av klimaendringer. I det første tilfellet er fordelene at metoden ikke krever alder som input. En generell fordel er at metoden kan fange opp endringer i bonitet som skyldes endringer i vekstvilkår grunnet for eksempel klimaendringer, og dermed i større grad enn konvensjonell bonitet representere dagens bonitet. Metoden har også den fordel at den er velegnet for bruk med fjernmåling, og resultatene viser at både enkelttre- og areal-baserte metoder fungerer, og at både laserskanning og stereo flybilder kan brukes.

LAND:

Norge

GODKJENT

Aksel Granhus

NAVN/NAME

PROSJEKTLEDER

Svein Solberg

NAVN/NAME

**NIBIO**NORSK INSTITUTT FOR
BIOØKONOMI

Forord

Denne rapporten gir resultatene for et prosjekt om aldersfri bonitet. Prosjektet har vært gjennomført som et tett samarbeid mellom Fritzøe Skoger, Statsforvalteren i Vestfold og Telemark og NIBIO, når det gjelder bakgrunn og relevans, data og finansiering. Når det gjelder Fritzøe skoger så har arbeidet her gått parallellt med utvikling av deres nye skogbruksplan basert på enkelttredata fra høyoppløselig laserskanning og flybilder.

Finansieringen for NIBIO sitt arbeid har kommet fra Utviklingsfondet for Skogbruket, Skogbrukets verdiskapingsfond og nasjonale rentemidler via Landbruksdirektoratet. Hos Fritzøe skoger har arbeidet og deres nye skogbruksplan, som har inngått som datakilde i prosjektet, vært finansiert av de samme fondene, Landbrukets utviklingsfond, utviklingsmidler og tilskudd til skogbruksplanlegging fra Statsforvalteren i Vestfold og Telemark, samt egeninnsats. Bidragsytere og samarbeidspartnere takkes.

Ås, 28.09.22

Svein Solberg

Innhold

1	Innledning.....	5
2	Materiale og metoder	7
2.1	Aldersfri bonitet og produksjonsevne	7
2.1.1	Predikert og faktisk volumtilvekst.....	9
2.1.2	Samvariasjon mellom bonitet og tilvekst.....	9
2.1.3	Størrelsesorden på variasjon i bonitet og tilvekst.....	9
2.2	Utvikling av bonitet over tid	10
2.3	Fjernmåling av aldersfri bonitet	11
2.3.1	Flybåren laserskanning.....	11
2.3.2	Flybilder.....	12
2.3.3	Bestandsdata.....	12
2.4	Feilkilder	12
2.4.1	Sammenlikning av resultater med ulike høydemodeller	12
2.4.2	Lengden av måleperioden.....	13
2.4.3	Effekten av underestimering av høyde	14
3	Resultater	15
3.1	Aldersfri bonitet og produksjonsevne	15
3.1.1	Predikert og faktisk volumtilvekst.....	15
3.1.2	Samvariasjon mellom bonitet og tilvekst.....	15
3.1.3	Størrelsesorden på variasjon i bonitet og tilvekst.....	18
3.2	Utvikling av bonitet over tid	18
3.3	Fjernmåling av aldersfri bonitet	21
3.3.1	Sammenligning av arealbasert og enkelttrebasert aldersfri bonitet	22
3.4	Kvalitetssikring og feilkilder	22
3.4.1	Betydningen av ulike høydemodeller.....	22
3.4.2	Lengden av måleperioden.....	24
3.4.3	Betydningen av underestimering av trehøyde ved laserskanning	25
4	Diskusjon.....	27
5	Konklusjoner.....	30

1 Innledning

Produksjonsevne er en sentral egenskap for skog. Det er nå to nye aspekter rundt dette. Endringer i klima og andre miljøforhold kan gjøre at den endrer seg over tid. Ny teknologi og nye metoder er tilgjengelige for å forenkle og forbedre bonitetsberegningen. Begge disse forhold danner bakgrunnen for denne studien, hvor vi ser nærmere på den nye metoden «aldersfri bonitering» som er utviklet ved NIBIO i seinere år (Kvaalen m. fl. 2015, Solberg m. fl. 2019).

Noen begrepsavklaringer hører hjemme her. Bonitet angir skogens produksjonsevne, ofte i klasser. Produksjonsevnen angir den maksimale volumtilveksten vi kan oppnå i gjennomsnitt gjennom ett omløp og for et treslag som passer på stedet, og gitt at skogbehandlingen er god. Boniteten avhenger av klimatiske og edafiske forhold, og vil derfor variere både i tid og rom. Ved å angi det for en lang periode som et helt omløp og for et stort område som et bestand kan man imidlertid redusere slike variasjoner og oppnå en stabil egenskap som kan benyttes i skogbruksplanlegging. Bonitet er vanskelig å bestemme i praksis, og det er vanlig å i stedet bestemme høydebonitet. Høydebonitet angir trærnes høydevekst over alder, dersom trærnes høydevekst ikke er hemmet av nabotrær. Høydebonitet benyttes fordi den er enklere å bestemme enn bonitet, og fordi det er en sterk sammenheng mellom høydebonitet og bonitet.

Aldersfri bonitering angir høydebonitet, og er basert på de samme høydekurvene som brukes ved vanlig høydebonitering. Forskjellen ligger i at man med denne metoden bestemmer høydebonitet uten å kjenne, eller benytte, trærnes alder. Vi vil i denne rapporten bruke begrepene konvensjonell bonitet for høydebonitet bestemt med alder og høyde, og aldersfri bonitet for høydebonitet bestemt med høyde og høydetilvekst.

Aldersfri bonitet er altså kun en annen beregningsmåte, og den gir noen nye muligheter og fordeler, men har samtidig noen begrensninger. Teknisk sett, og matematisk sett, kan aldersfri bonitet beregnes for korte tidsperioder, - helt ned til ett år. Det at man bruker høyde og høydevekst i stedet for høyde og alder er også en tilpasning til dagens situasjon hvor høydedata er lett tilgjengelig fra fjernmåling, mens det ikke gjelder aldersdata.

Bakgrunnen og behovet for aldersfri bonitering er tredelt. For det første er alder i skog ofte beheftet med feil og usikkerhet. For eksempel, ved bonitering skal man korrigere alder for undertrykking, og dette er til en viss grad påvirket av en skjønnsmessig vurdering. I et bestand kan trærne ha ulik alder. Boring for å bestemme alder er tidkrevende. I en skogbruksplan-sammenheng blir alder ofte bestemt indirekte ut fra bonitet og overhøyde, og hvis boniteten er feil, så blir også alder feil og hogstmodenhetstidspunktet blir feil. For det andre så har utvikling innen fjernmåling gjort det mulig å måle trehøyder og skoghøyder enkelt og effektivt for store områder.

For det tredje, så må vi regne med at produksjonsevne og bonitet er i endring nå på grunn av klimaendringer, og at disse endringene er større og mer langvarige enn vanlige, årlige fluktuasjoner. Vi tenker da på gradvise endringer, eller trender, over tid. Produksjonsevne påvirkes av flere klimaforhold som temperatur, vekstsesongens lengde og nedbørmengde, og blir også påvirket av økt CO₂ og nitrogentilførsel fra nedbør og luft. Det er vanskelig å beregne slike trender for framtida, og usikkerheten handler dels om hvorvidt en gitt region får økt eller redusert produksjonsevne, og dels om hvor store endringene blir. En mulig anvendelse av aldersfri bonitet er å overvåke dette gjennom å følge trærns høydeutvikling over tid. Man kan se dette som at vi bruker fritt voksende trær som sensorer for å fange opp slike trender.

Særlig viktig kan dette være for granskog i lavlandet på Østlandet. Skogen her utgjør en hovedtyngde av tømmerressursene i Norge. I denne delen av landet er imidlertid trærnes tilvekst begrenset av tilgangen på vann. Årringanalyser for denne landsdelen har vist at tilveksten gjennomgående er høyere i somre som er kjøligere og fuktigere enn normalt, mens den er lavere i somre som er tørrere og varmere enn normalt (Andreassen m.fl. 2008). Det store spørsmålet er om nedbørmengden vil utvikle

seg i takt med temperaturøkningen i denne landsdelen, i den forstand at vi får en balansert utvikling mellom varme og vanntilgang. Hvis dette skjer kan vi få en økning i produksjonsevne, mens i motsatt fall kan vi få en nedgang.

I det tidligere arbeidet har vi utviklet en matematisk løsning for beregning av aldersfri bonitet, og vi har demonstrert at metoden er gjennomførbar basert på gjentatte høydemålinger med flybåren laserskanning på enkelttrær. I denne rapporten går vi videre, og ser nærmere på hvordan metoden eventuelt kan operasjonaliseres, både med tanke på andre fjernmålingsmetoder enn enkelttre-laser, og for anvendelse i skogbruksplaner, Landsskogtakseringen og skogressurskartet SR16. I tillegg ser vi nærmere på sammenhengen mellom aldersfri bonitet og tilvekst.

Formålet med denne rapporten er å

- belyse sammenhengen mellom aldersfri bonitet og produksjonsevne,
- sammenlikne ulike fjernmålingsbaserte metoder for bestemmelse av aldersfri bonitet,
- beskrive tidstrender av bonitet over tid, og
- kvalitetssikre og belyse feilkilder ved aldersfri bonitering.

2 Materiale og metoder

Vi har brukt data fra ulike kilder her, det vil si fra Landsskogtakseringen, fra utvalgte prøvetrær i felt med tilhørende detaljerte undersøkelser, samt fra Fritzøe skogers data for fjernmålte enkelttrær og andre skogdata. Når det gjelder metodene så har vi dels sammenstilt bonitetsdata med tilvekstdata for å belyse sammenhengen mellom dem, og dels beregnet bonitet på en rekke ulike måter for å belyse feilkilder. Vi har her arbeidet kun med gran, fordi vi først og fremst skulle belyse ulike metodiske momenter og det var da tilstrekkelig med ett treslag. Imidlertid ligger alt til rette for å bruke samme metode for furu og andre treslag, og videre analyser for flere treslag er særlig aktuelt for å klarlegge bonitetsvariasjoner over tid for ulike regioner.

2.1 Aldersfri bonitet og produksjonsevne

Vi har her brukt data fra Landsskogtakseringen. Vi har beregnet aldersfri bonitet for alle trær som har gjentatte høydemålinger, det vil si måling både ved starten og slutten av en periode. Periodene her er tida mellom to besøk, som i de fleste tilfeller er fem år. Vi har så sammenholdt dette med ulike uttrykk for tilvekst i samme periode.

I Fig. 1 ser vi høydevekst for perioder på omkring fem år i Landsskogtakseringen, og høydeutviklingskurver for noen bonitetsklasser basert på modell 15 i Sharma m.fl. (2011). Hvert linjestykke er ett tre, og er angitt med start- og slutthøyde og start- og sluttalder. Med aldersfri bonitering bruker vi imidlertid ikke alder, men kun høydene. Vi kan illustrere metoden som at vi forskyver disse linjestykkene horisontalt, enten mot venstre eller mot høyre inntil vi finner en høydekurve som har samme helling. Vi beregner da boniteten som et desimaltall, og ikke bare som klasser. Vi benytter da en matematisk modell som beskriver høydeutvikling som funksjon av alder og bonitet, og så endrer vi dette til en modell som beskriver bonitet som funksjon av høyde og høydevekst. En slik matematisk konvertering lar seg kun gjøre for spesielle typer modeller, og en av dem er «Sharma-modellen» (modell 15 i Sharma m.fl. 2011).

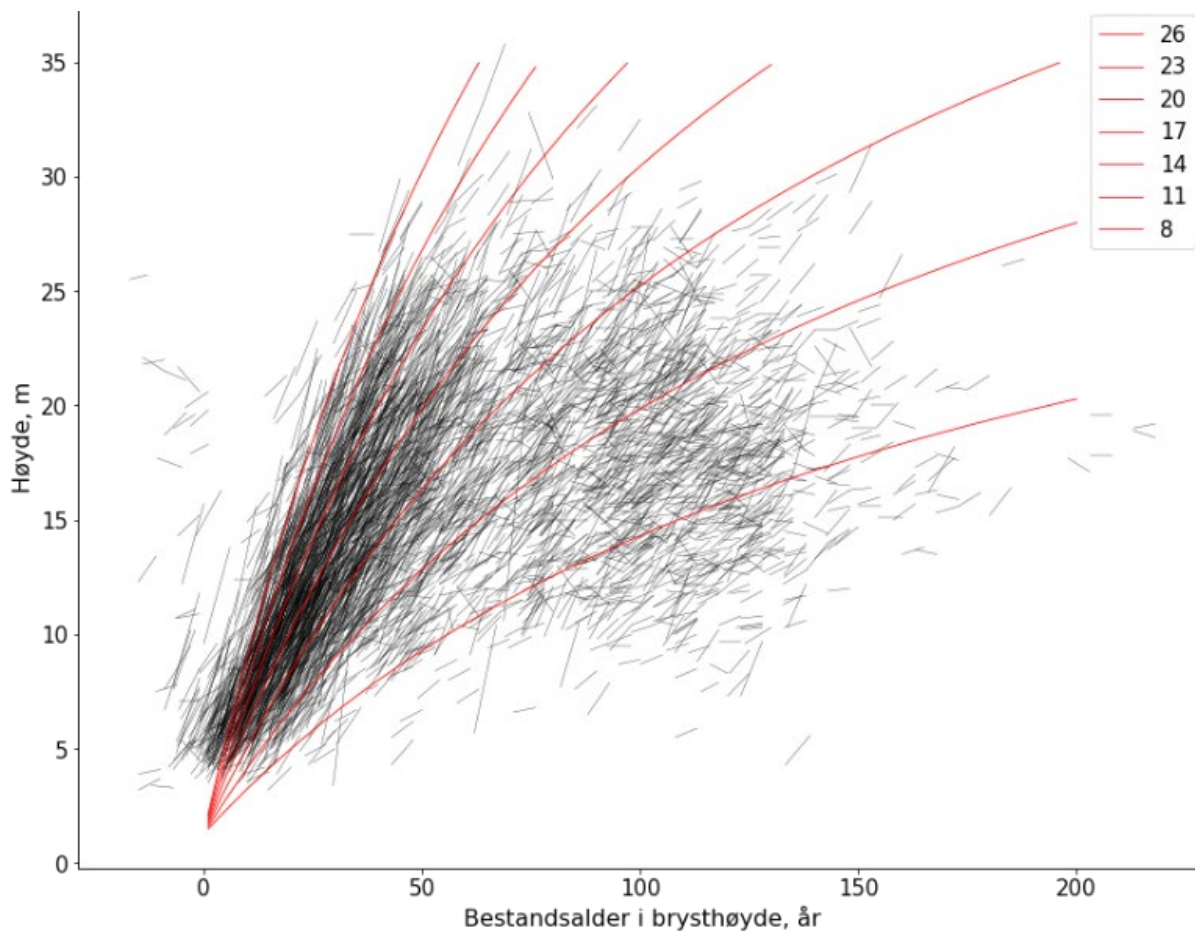


Fig. 1. Et tilfeldig utvalg av grantrær og høydevekstperioder fra Landsskogtakseringen. Hvert linjestykke viser høyde- og aldersutviklingen for et tre som har gjentatte høydemålinger, i de fleste tilfellene for en femårs-periode. De røde linjene er høydekurver for bonitetsklasser basert på modell 15 i Sharma m. fl. 2011, og de er basert på data fra Landsskogtakseringen og fra langsiktige feltforsøk som var tilgjengelige da den studien ble gjort. I figuren har vi noen trær med negativ alder og høyder opptil 25 m, og det er overstandere i hogstklasse I og II hvor ungskogen ikke har nådd brysthøyde ennå og har en negativ brysthøydealder.

Vi har gjort beregninger på data fra alle Landsskogtakseringens grandominerte felt i produktiv skog. Det er data fra de permanente feltene hvor vi har brukt data for høyde, diameter og sosial klasse for enkeltrær, beregnede data for volum og volumtilvekst for felt eller deler av felt (delflater), og supplert dette med årringanalyser fra borprøver tatt på et tre i nærheten av hvert felt. Bonitetsverdier for felt er beregnet som medianverdier av bonitetsverdier for enkeltrær, og da har vi kun benyttet herskende og medherskende trær og kun de trærne som hadde høydemåling både ved start og slutt av perioden.

For å få tidsserier med årlige verdier for bonitet og tilvekst basert på periodiske høydemålinger, oftest hvert 5. år, har vi gjort en spesiell beregning. For hvert felt har vi brukt bonitets- og tilvekst-verdier beregnet for hele perioden og tilordnet de verdiene for hvert enkelt år i perioden, og så beregnet årlige median- og gjennomsnittsverdier for alle felt. Dette har vi dels gjort for hele landet, og dels for regioner. På denne måten fikk vi tidsserier med årlige verdier sjøl om feltene har periodevis målinger. Denne beregningen innebærer en viss grad av interpolering over år, men i og med at feltene besøkes i ulike år så har vi oppnådd unike, årlige verdier for hvert år. For å beregne årlige verdier og antall år i hver periode, definerte vi tilvekstperiodens start og slutt. Vi gjorde dette ulikt for høyde-, diameter- og volum-tilvekst, det vil si med ulike datoer. For høyde satte vi start og slutt til 1. og 30 juni. For diameter satte vi start og slutt til henholdsvis 20. mai og 29. august (100 dager), og for volum har vi midlet mellom datoene for høyde- og diameter-tilvekst. Vi har regnet tilveksten som lineær gjennom disse periodene.

2.1.1 Predikert og faktisk volumtilvekst

Vi har sammenliknet faktisk volumtilvekst med predikert volumtilvekst basert på alder, stående volum og bonitet. For bonitet har vi både brukt den konvensjonelle boniteten på Landsskogtakseringens felt basert på boring og høydemåling på et nærstående tre til hvert felt, og aldersfri bonitet basert på høyde og høydevekst i perioden. Når det gjelder konvensjonell bonitet, så får feltene av og til nye bonitetsverdier og vi har for hvert felt alltid brukt nyeste verdi. For å predikere volumtilvekst (i_v) brukte vi en modell fra Blingsmo (1988). Dette er en multiplikativ modell som er transformert til en additiv modell med logaritmiske verdier:

$$\ln(i_v) = 1,41 - 0,829\ln(\text{alder}) + 0,643 \ln(V) + 0,229\ln(\text{bon})$$

hvor *alder* er brysthøydealder, *V* er stående volum med bark og *bon* er bonitet H40. Vi kalibrerte modellen med alle Landsskogtakseringens produktive granfelt ved å korrigere konstantleddet 1,41 slik at faktisk og predikert volumtilvekst var det samme. Konvensjonell bonitet hadde en gjennomsnittlig tilvekst på 83,0% av forventet etter Blingsmo, mens aldersfri hadde 84,5%. Vi korrigerte predikert (forventet) tilvekst med en felles korreksjonsfaktor på 0,838, altså gjennomsnittet av 0,830 og 0,845. En slik korreksjon bør alltid gjøres for logaritmiske modeller, for å korrigere for såkalt logaritmisk bias når modellen transformeres til ikke-log form. Denne korreksjonen benyttet vi både for konvensjonell og aldersfri bonitet. Basert på denne modellen predikerte vi volumtilvekst for alle feltene, og vi hadde da et datasett med predikert volumtilvekst med konvensjonell bonitet, predikert volumtilvekst basert på aldersfri bonitet for den aktuelle periode og faktisk volumtilvekst basert på standard beregninger fra Landsskogtakseringen.

2.1.2 Samvariasjon mellom bonitet og tilvekst

For å se nærmere på sammenhengen mellom aldersfri bonitet og tilvekst, har vi sammenliknet tidsserier. Vi har da generert datasett for tre typer tilvekst, det vil si volumtilvekst per felt, grunnflatetilvekst for de overhøydetrærne som er brukt til aldersfri bonitet og grunnflatetilvekst basert på årringbredder fra et tre i nærheten av hvert felt. Den første tilvekstvariabelen, volumtilvekst, tok vi fra Landsskogtakseringens standard beregningsprogram for tilvekst, som estimerer volumtilvekst for det siste året i perioden. Vi har imidlertid tilordnet samme tilvekst til alle årene i perioden. Den andre tilvekstvariabelen, grunnflatetilvekst for overhøydetrærne, beregnet vi basert på diameter ved start og slutt av perioden. Denne variabelens sammenheng med aldersfri bonitet bør si noe om sammenhengen mellom et tres høyde- og diameter- og tilvekst, og dermed noe om hvor sterkt høydebonitet er knyttet til volumtilvekst. Den tredje tilvekstvariabelen, grunnflatetilvekst på et nærstående tre, beregnet vi ut fra årringbredder i dette treet. Fordelen med denne tilvekst-variabelen, er at den har årlige verdier slik at det ikke var nødvendig å tilordne en periodetilvekst til hvert enkelt år.

2.1.3 Størrelsesorden på variasjon i bonitet og tilvekst

Sjøl om det er en samvariasjon over tid mellom bonitet og tilvekst, med perioder hvor både bonitet og tilvekst øker eller avtar, så kan det likevel være en uoverenstemmelse i størrelsesorden. For å kunne sammenlikne størrelsesorden på bonitets- og tilvekstvariasjoner regnet vi alle bonitetstall om til produksjonsevne. For å ha produksjonsevne for ulike bonitetsverdier angitt som desimaltall og for et vidt spenn av bonitetsverdier, har vi inter- og ekstrapolert produksjonsevneverdier angitt for de vanlige bonitetsklassene. For produksjonsevne med bark har vi for bonitet 6 brukt verdien 1,2 m³/ha/år og så økende opp til bonitet 23 med verdien 12 m³/ha/år. Vi har dividert disse verdiene med 1,15 for å representere produksjonsevne uten bark. Disse verdiene er angitt i Fig. 2 som grønne punkter. Vi har så brukt lineær interpolering mellom punktene og lineær ekstrapolering for verdier over bonitet 23.

Vi aggregerte så produksjonsevne og tilvekst til årlige verdier basert på medianer for alle felt. Vi brukte her medianer, for at metoden skulle være robust mot enkelte ekstremverdier. Vi beregnet så gjennomsnittsverdier av disse årlige medianene for perioden 1994-2019 og regnet alle årlige tall om til relative tall. Verdien 100% angir da gjennomsnittet av de årlige medianene. Basert på dette kunne vi avklare om utslagene fra år til år var like store for de relative verdiene.

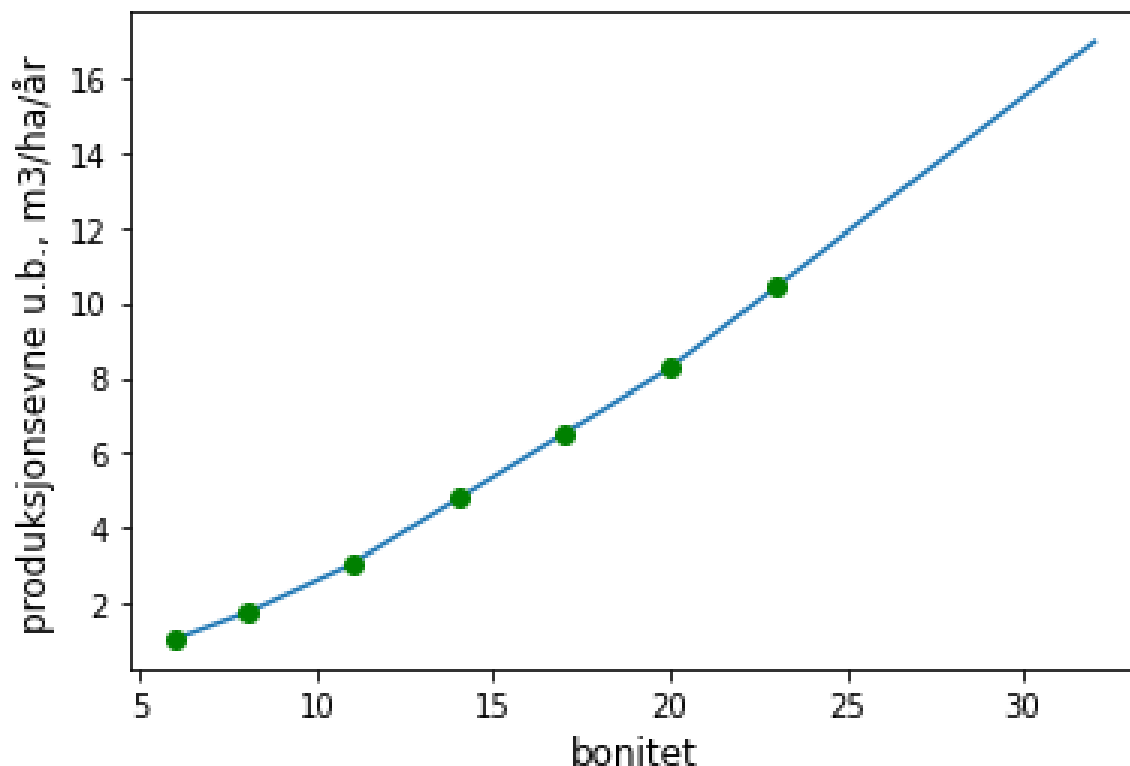


Fig. 2. Produksjonsevne uten bark interpolert for bonitetsintervallet 6 til 30. de grønne punktene er vanlig brukte produksjonsevneverdier for de vanlige bonitetsklassene. Produksjonsevne for bonitet høyere enn 24 er usikre, og den rettlinjede ekstrapoleringen er en forsiktig, eller konservativ estimeringsmetode.

2.2 Utvikling av bonitet over tid

Vi har her sett nærmere på utvikling over tid for aldersfri bonitet på Landsskogtakseringens felt. En mulig anvendelse av aldersfri bonitet kan være en overvåking av produksjonsevne, ut fra en fortløpende beregning av aldersfri bonitet basert på at nye høydemålinger stadig gjøres. Vi har sett nærmere på slike tidstrender i aldersfri bonitet, delvis basert på prøvetrær, og delvis basert på Landsskogtakseringens data.

Prøvetrærne ble valgt ut og målt opp som beskrevet under. I Fritzøe skogers eiendom i gamle Lardal kommune la vi ut et grid på 1km x 1km, og i hvert grid-punkt som ble liggende i granbestand med hogstklasse 3-5 tok vi ut et prøvetre. Prøvetrærne ble valgt blant herskende eller medherskende trær i nærheten av gridpunktet, det vil si maksimum 10m unna. Dette gav oss et datasett på 33 trær. I tillegg tok vi et fåtall prøvetrær fra subjektivt utvalgte, høy-bonitets bestand i Siljan kommune. Prøvetrærne ble felt, kappet opp i seksjoner på omkring en meters lengde, og splittet etter margen. Vi identifiserte toppen av alle tidligere års toppskuddlengder ut fra posisjonen av den overvintrende toppknoppen. Dette punktet er synlig i margen og er tidligere gitt betegnelsen «nodalt diafragma» (Venn 1965). Vi målte så opp lengden av toppskuddene bakover i tid. Ut fra dette fikk vi en tidsserie med årlige trehøyder og høydetilvekster, og vi regnet dette om til årlige bonitetsverdier ut fra Sharma-modellen.

Et sett med data fra Landsskogtakseringen ble valgt ut og prosessert til aldersfri bonitet etter Sharma-modellen, og dette ble så aggregert opp for fem regioner i Norge. For hver region fikk vi da tidstrender med årlige median-verdier for aldersfri bonitet, som beskrevet over.

2.3 Fjernmåling av aldersfri bonitet

Vi har her brukt data fra ulike fjernmålingsmetoder for et område hos Fritzøe skoger i Lardal, Vestfold.

Fritzøe skoger har hatt enkelttre lasertakst på tre tidspunkter, - våren 2009, høsten 2014 og sommeren 2020. Videre vil vi heretter henføre dataene og taksten fra våren 2009 til året 2008, slik at det blir tydelig at vi har å gjøre med to perioder på seks vekstsesonger. Den første taksten dekket kun gamle Lardal kommune, mens de to følgende takstene ble gjort heldekkende for Fritzøe skoger. Alle takstene har tilhørende laserskanning og flybilder, men dessverre er flybildene fra 2014 gått tapt på grunn av en konkur i et fjernmålingsselskap. Vi valgte ut et område i Lardal for detaljerte analyser, fordi vi her hadde data både for laser og flybilder, og da med flybilder fra 2008 og 2020.

Vi har her beregnet aldersfri bonitet basert på ulike fjernmålingsmetoder, og sammenliknet resultatene for tre kategorier av alternativer. Vi har i prosesseringen først beregnet bonitet for piksler på 10m x 10m, og deretter aggregert dette opp til gjennomsnitt på bestandsnivå. Når det gjelder alternative metoder, så har vi sammenliknet enkelttre-basert og arealbasert metode. For enkelttre basert metode har vi valgt ut et tre per piksel, og med 'tre' mener vi her et laserfunnet tre. For hvert piksel valgte vi ut det treet som var det høyeste i 2020 blant de trær som var klassifisert som grantrær i 2020. Vi har så koblet laser-høyden på disse trærne sammen med laser-høyden for det samme treet i 2008, og ut fra de to høydene beregnet aldersfri bonitet. Denne enkelttre-baserte, aldersfrie bonitetsverdien har vi brukt som referanse for de arealbaserte metodene.

For arealbasert metode så har vi sammenliknet arealbasert laser og bildematching. Med begge metoder genererte vi en overflatemodell med en romlig oppløsning på 1m, og trakk ifra terrenghøydene basert på nasjonal høydemodell, slik at vi endte med tre- eller skoghøyder over terrenget. Laserdataene i Fritzøe skoger har en høyere punkttetthet enn det som har vært vanlig andre steder, blant annet i laseropptak knyttet til ny nasjonal høydemodell (NDH). For å kunne evaluere metoden med bruk av laserdata som ligner på data som er tilgjengelig i store deler av landet (foreløpig kun ett opptak de fleste steder), ble punkttettheten redusert til 2 punkter per m² før generering av overflatemodell beskrevet over. Dette ble gjort med filteret *thin_with_grid* i verktøyet LAsTools.

For de arealbaserte metodene har vi brukt overflatemodeller fra to tidspunkter, i form av rastere med oppløsning på 1m x 1m. Verdien for hvert enkelt piksel er høyde over bakken, og differansen mellom de to tidspunktene representerer trærnes høydevekst i perioden. Vi har sammenliknet alternativer for hvor mange subpiksler (1 m x 1 m) vi skulle bruke ved aggregering, og variert dette fra 1, 5 og til 10 subpiksler, samt gjennomsnitt og medianverdi for alle subpikslene innen hver 10 m piksel. 1m piksler med negativ høydevekst ble ikke brukt.

2.3.1 Flybåren laserskanning

Laserskanningene er gjort med omkring 10 pulser per m², altså en del høyere enn det som er vanlig, for å kunne identifisere enkelttrær. I laserdataene er det gjort en automatisk deteksjon av enkelttrær, som del av takstopplegget i Fritzøe skoger. Hvert identifiserte tre er lagt i en database, og har posisjon samt estimert høyde og treslagstype (gran, furu, løv, samt døde trær). Vi koblet våre prøvetrær til det tilsvarende laser-treet på hvert taksttidspunkt. For hvert prøvetre hadde vi da tre lasermålte høyder i 2008, 2014 og 2020, og feltmålte høyder for de samme årene etter at trærne var felt, kvistet og splittet etter marginen. Vi beregnet aldersfri bonitet for de to seksårs-periodene, både basert på laser- og feltmålinger.

Ved bruk av den arealbaserte metoden ble laserdataene behandlet som beskrevet i avsnittene over.

2.3.2 Flybilder

I det utvalgte området i Lardal fikk vi utført automatisk fotogrammetri, «bildematching», og videre generert overflatemodeller med en oppløsning på 1 m x 1 m. Tabell 1 angir noen detaljer rundt flybilder og bildematchingen som er brukt i prosjektet.

Tabell 1. Informasjon om flybilder og parameterverdier for bildematchingen.

Egenskaper for flybildeopptak	2008a	2020
Oppløsning	10 cm	25 cm
Overlapp, side:	20 %	60 %
Overlapp, lengderetning:	60 %	80 %
Opptaksdato:	03.04.2009	24.08.2020
Kamera:	UltraCam Xp	UltraCam Eagle M3
Fotofirma:	Blom Geomatics AS	Terratec AS
Programvare matching:	Match-T DSM ver. 11.0.5 (Trimble/Inpho)	
Parameterverdier for matchingsalgoritme		
DHM type	DOM (DSM)	
Terrengtype	"Extreme"	
Søketetthet	1 piksel	
Glatting	"Lav"	
x-parallakse grenseverdi	25 piksler	
Grov feilsøk	På	

^a opptak før vekstsesongen i 2009.

2.3.3 Bestandsdata

Fra den nye taksten i 2020 hadde vi tilgang til Fritzøes bestandsdata, det vil si polygoner og tilhørende bestandsdata. Hvert bestand hadde en bonitetsverdi basert på konvensjonell bonitering. Dette er bonitetsverdier som er videreført fra tidligere takster, og i hovedsak er basert på omfattende målinger av alder og overhøyde omkring 1974 med de gamle A-D klassene, og en revisjon av dette basert på subjektiv tolkning av flybilder, erfaringer og nye feltregistreringer, samt overføring til H40-systemet. Hos Fritzøe Skoger hadde vi heldekkende, fjernmålingsbasert bonitet kun for to alternativer, fjernmålingsbasert aldersfri bonitet for 6-årsperioden 2014-2020 og konvensjonell bonitet for hvert bestand. For perioden 2008-2020 hadde vi aldersfri bonitet kun for den delen av eiendommen som ligger i gamle Lardal kommune. For å ha en bonitetsverdi for hvert bestand til videre analyser og operasjonell bruk hadde vi da tre alternativer, - (i) bruke aldersfri bonitet for 2014-2020, (ii) bruke konvensjonell bonitet, og (iii) bruke en kombinasjon av disse to, i form av et gjennomsnitt.

2.4 Feilkilder

Vi har sett nærmere på effekten av tre ulike feilkilder. Det er valg av høydemodeller, underestimering av trehøyde ved laserskanning, og lengden av tilvekstperioden (antall år).

2.4.1 Sammenlikning av resultater med ulike høydemodeller

Vi har sammenliknet aldersfri bonitet ved bruk av ulike høydeutviklingskurver. Med aldersfri bonitering bruker vi ofte en høydevekstperiode på noen år, altså en kortere periode med høydevekst enn ved konvensjonell bonitering. På grunn av dette blir metoden ekstra følsom for hvilke høydeutviklingskurver man bruker (Fig. 3). Som nevnt over er Sharma-modellen velegnet for aldersfri bonitering, fordi den matematiske modellen har en form som muliggjør dette. Sharma-modellen er

derfor den vi har brukt gjennom alt arbeidet. Den samsvarer ganske bra med de opprinnelige høydekurvene for H40-systemet, men avviker noe. En ny høydemodell er publisert av Allen m.fl. (2021), men den har kun gyldighetsområde til opp til alder 80 år. Den egner seg derfor mindre bra på landsskogdatasettet, hvor mange felt er eldre enn det. En annen og nyere høydemodell er nylig publisert av Maleki m.fl. (2022), og vi har valgt ut denne for en sammenlikning med Sharma-modellen og kvantifisere hvor store forskjeller vi kan få i aldersfri bonitet ved to ulike høydemodeller. Denne har gyldighetsområde utover 80 år. Maleki-modellen har imidlertid to egenskaper som gjør at den ikke kan benyttes for direkte sammenlikning med Sharma-modellen. For det første har Maleki-modellen ikke en matematisk form som gjør at den kan omformes til å beskrive bonitet som funksjon av høyde og høydetilvekst, og for det andre er bonitet angitt for 40 års totalalder i stedet for 40 års alder i brysthøyde. For å komme rundt disse begrensningene har vi laget en oppslagstabell for Maleki-modellen. Oppslagstabellen består av et høyt antall datapar med høyde og høydetilvekst, og tilhørende bonitet. Vi genererte dataene ved å variere H40-bonitet fra 2 til 30 med 0,1 m steg (290 verdier), og variere totalalder fra null til 200 år (201 verdier). Dette resulterte i 58 290 datapar for bonitet og totalalder med tilhørende høyde. For hvert datapar beregnet vi høydevekst som halve høydedifferansen mellom året etter og året før. Videre, for hver bonitetsverdi fant vi når trehøyde passerte brysthøyde, og genererte ut fra dette to nye variabler; dvs. alder i brysthøyde og bonitet angitt for 40 års alder i brysthøyde. Den endelige oppslagstabellen hadde da de tre variablene høyde, høydevekst og bonitet angitt for 40 års alder i brysthøyde.

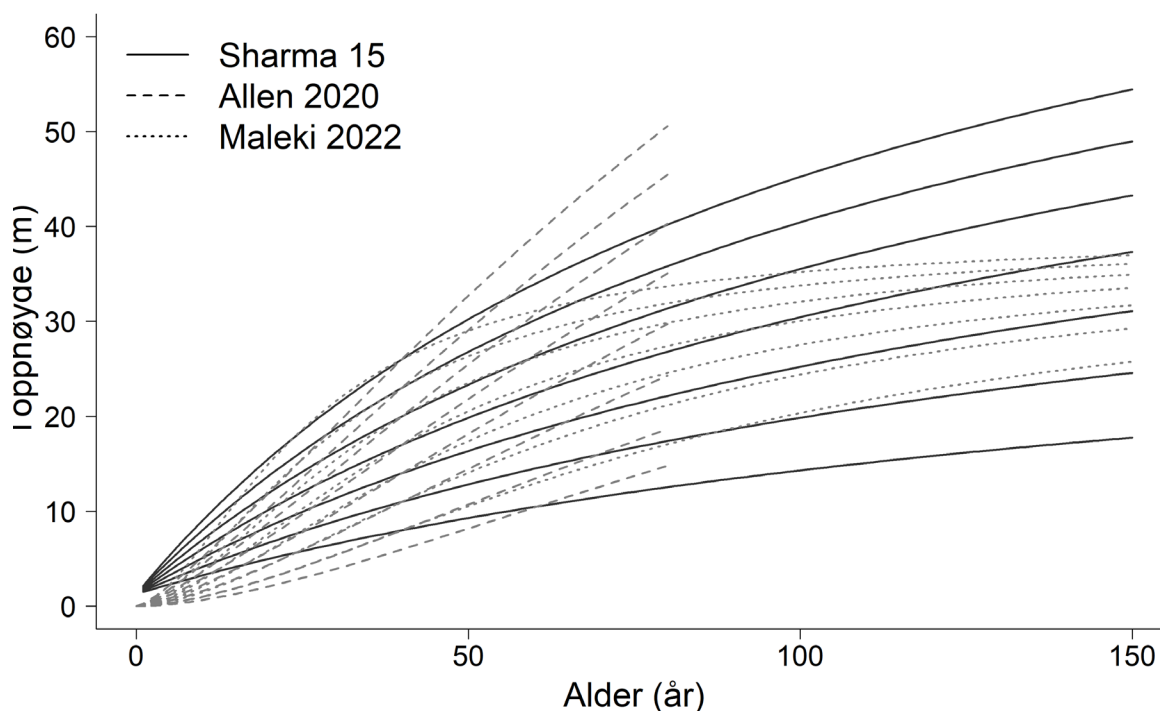


Fig. 3. Eksempel på tre ulike modeller for høydeutvikling hos gran i Norge. Vi ser at det er store forskjeller mellom dem, særlig ved høy alder.

2.4.2 Lengden av måleperioden

Teknisk sett kan aldersfri bonitet beregnes for korte perioder ned til ett år. Metoden blir imidlertid da mer sårbar for feil og støy. Målefeil ved høydemåling vil få større betydning desto kortere periode man ser på. Årlige variasjoner i værforhold kan ansees som støy her, dersom de ikke inngår i en klimatisk trend over tid. Vi har sett nærmere på effekten av slike feil og støy for aldersfri bonitet, med tanke på

at man bør ha generelle retningslinjer dersom det skal operasjonaliseres. Vi har brukt tidsseriene med årlige verdier for aldersfri bonitet og beregnet nøyaktighet på gjennomsnittsverdier for perioder med ulik lengde fra 3 til 10 år.

I tillegg har vi sett nærmere på to alternative periodelengder for aldersfri bonitet, det vil si seks og 12 år. Vi valgte disse to periodelengdene fordi de ligger nært en eller to omdrev i ulike datasett. For det første hadde vi data for seks og 12 års perioder hos Fritzøe skoger, for det andre er dette nært én og to periodelengder i Landsskogtakseringen som er på fem år, og for det tredje fordi hyppigheten på omløpsfotografering som kan være en datakilde ofte er omkring sju år. Vi brukte da aldersfri bonitetsverdi for en 25 års periode som referanseverdi, eller som måltall. Vi valgte her 25 år som lengde på perioden etter en avveiing mellom to forhold. Dette er såpass lang tid at årlige fluktuasjoner har liten innflytelse. Samtidig er dette en såpass kort periode at eventuelle langtidstrender pga klimaendringer burde kunne fanges opp. Vi har beregnet resultater for dette både for Fritzøe skoger og for Landsskogtakseringen.

2.4.3 Effekten av underestimering av høyde

En laserskanner vil normalt ikke gi oss trærnes totale høyde, fordi laserpulsene ikke treffer toppskuddene og fordi toppskuddene er for tynne til å generere et ekko. Vi kan tenke oss at vi får første ekko fra en laserpuls når den treffer første eller andre greinkrans. Dette vil gi en feil på aldersfri bonitet, sjøl om en slik underestimering av trehøyde, eller skoghøyde er like stor på begge tidspunkter. Vi har beregnet hvor stor denne effekten er for ulike bonitetsverdier, for ulike trehøyder og for ulik grad av underestimering.

3 Resultater

3.1 Aldersfri bonitet og produksjonsevne

3.1.1 Predikert og faktisk volumtilvekst

Volumtilvekst på Landsskogtakseringens felt lot seg predikere tilfredsstillende nøyaktig ved hjelp av bonitet, alder og stående volum med Blingsmos modell. Både aldersfri bonitet og konvensjonell bonitet gav samme nøyaktighet i form av samme korrelasjonskoeffisient ($r=0,87$) mellom faktisk og predikert (forventet) volumtilvekst (Fig. 4). Som nevnt over, i materiale og metoder, hadde prediksjonene med disse to bonitetsalternativene også samme gjennomsnittsverdi. Dette var volumtilvekst gitt for siste året i en periode, som oftest på fem år, og aldersfri bonitet var beregnet ut fra overhøydeetrær med høydemåling både ved starten og slutten av perioden.

Man kunne tenke seg at aldersfri bonitet ville fungere dårligere i saktevoksende skog, fordi høydeveksten i en kort periode på noen år ville være liten sammenliknet med størrelsen på feilen ved høydemåling. Resultatene tyder imidlertid ikke på det. Tvert imot gav aldersfri bonitet her bedre prediksjoner for volumtilvekst enn konvensjonell bonitet. For flater med bonitet under 9 eller bestandsalder over 120 år var korrelasjonskoeffisientene mellom faktisk og predikert volumtilvekst hhv. 0,72 og 0,78, for konvensjonell og aldersfri bonitet.

Også for et annet utvalg av Landsskogtakseringens felt ble prediksjonene med Blingsmos modell bedre med aldersfri bonitet enn med konvensjonell bonitet. Dette gjaldt lavlandet på Østlandet, hvor korrelasjonskoeffisienten, r , nå bare var 0,72 for konvensjonell bonitet, mens aldersfri bonitet hadde 0,80.

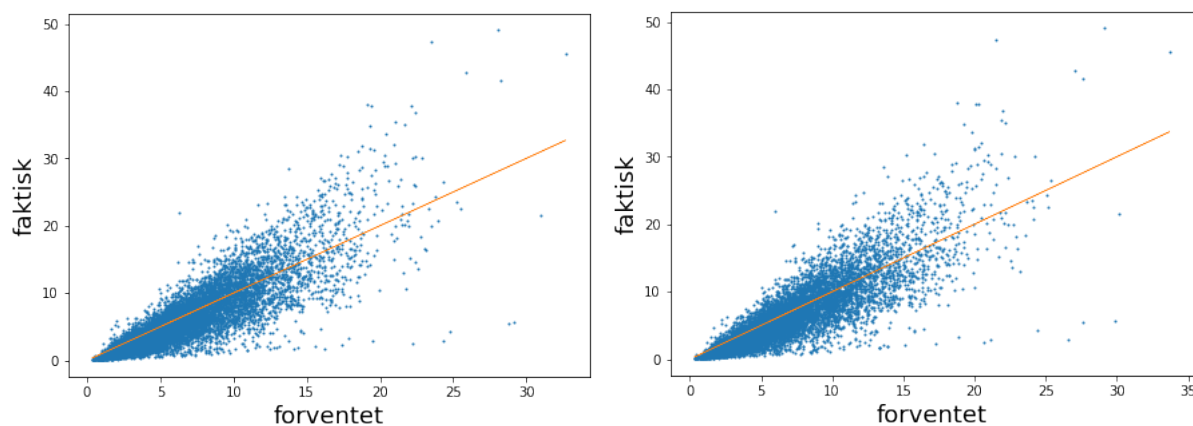


Fig. 4. Faktisk volumtilvekst plottet mot forventet (predikert) tilvekst etter Blingsmo's modell på Landsskog-takseringens granfelt på produktiv mark. Figuren til venstre er basert på konvensjonell bonitet, mens figuren til høyre er basert på aldersfri bonitet for inneværende periode.

3.1.2 Samvariasjon mellom bonitet og tilvekst

Sammenhengen mellom aldersfri bonitet og tilvekst er også demonstrert ved en samvariasjon over tid på Landsskogtakseringens felt for perioden 1994-2018. Denne samvariasjonen var tydelig for volumtilvekst (Fig. 5). Samlet sett for hele landet økte aldersfri bonitet i perioden 1994-2002, men har siden avtatt. Økningen var på omkring 2 m i H40-systemet, altså noe under en bonitetsklasse. Omtrent samtidig, det vil si i perioden 1994-2000 økte volumtilveksten uten bark fra 3,3 til 3,6

m³/ha/år, altså en økning på omkring 10%. Dette var basert på medianverdiene, men gjennomsnittstall gav omtrent samme resultat. Etter denne perioden med økning i både bonitet og volumtilvekst avtok begge fram til 2019, men med årlige variasjoner.

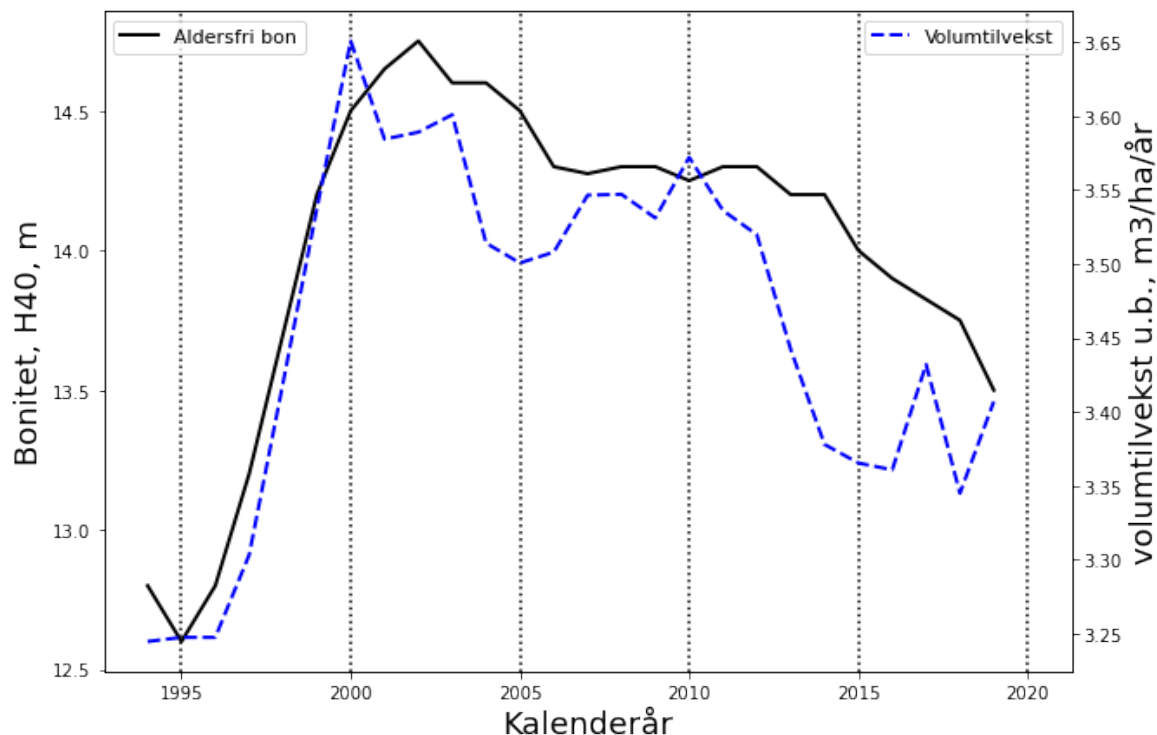


Fig. 5. Samvariasjon over tid for aldersfri bonitet (venstre y-akse) og volumtilvekst uten bark (høyre y-akse) basert på årlige medianer.

Vi undersøkte dette samsvaret nærmere for to andre tilvekstuttrykk. For det første så vi på grunnflatetilveksten på de samme overhøyde-trærne som ble brukt til aldersfri bonitering (Fig. 6). Denne grunnflatetilveksten hadde også et samsvar i tid med aldersfri bonitet, men samsvaret var svakere enn for volumtilvekst som vist over. Grunnflatetilveksten økte i gjennomsnitt fra 7,8 til 10,3 cm²/år i perioden 1996-2003, altså en økning på 32%. Seinere fram til 2019 avtok den igjen helt ned til samme nivå som i 1996. Grunnflatetilvekstens forløp var altså omkring ett år forsinket i forhold til aldersfri bonitet og hadde en sterkere nedgang etter 2003. Men dette viser at trærnes høyde- og diameter-tilvekst samvarierte til en viss grad over tid, og det underbygger bruken av høydebonitet for å bestemme produksjonsevne.

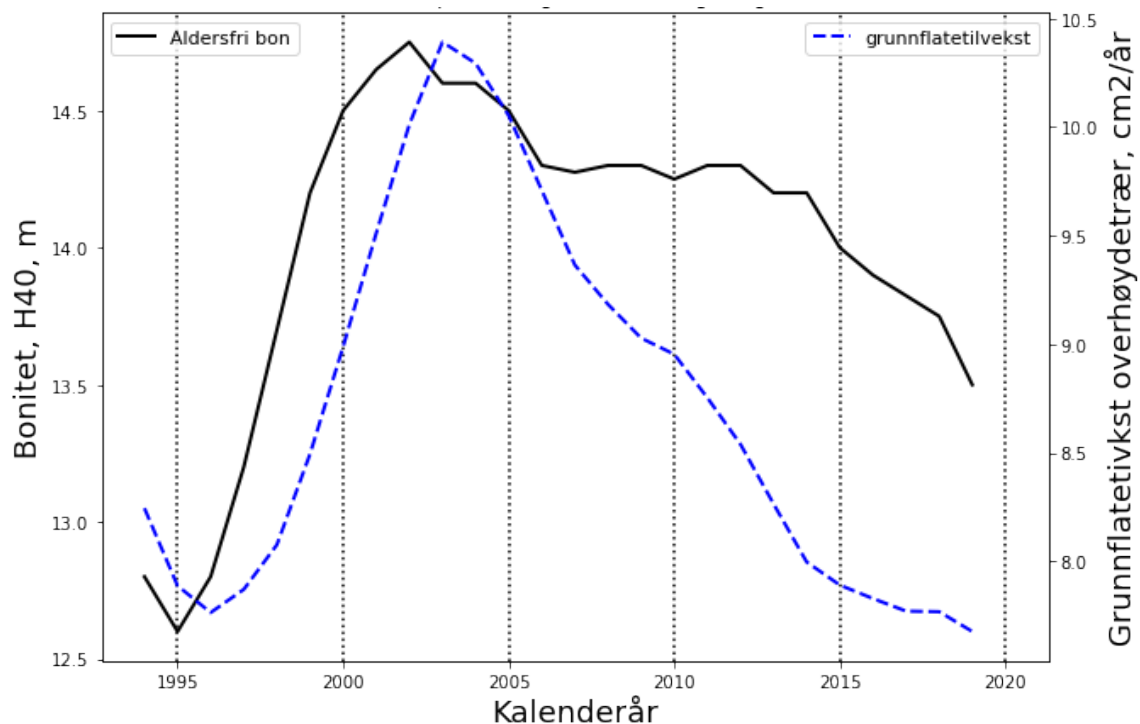


Fig. 6. Samvariasjon over tid for aldersfri bonitet (venstre y-akse) og grunnflatetilvekst på de overhøydetrærne som ble brukt til aldersfri bonitering (høyre y-akse) basert på årlige medianer.

Det var også en viss sammenheng mellom tidsforløpet for aldersfri bonitet og grunnflatetilvekst beregnet ut fra årringbredder på et tre i nærheten av hvert av Landsskogtakseringens felt. Denne sammenhengen var imidlertid svak (Fig. 7). Denne grunnflatetilveksten økte gjennomgående noe seinere, fra 1998 til 2008, og avtok siden.

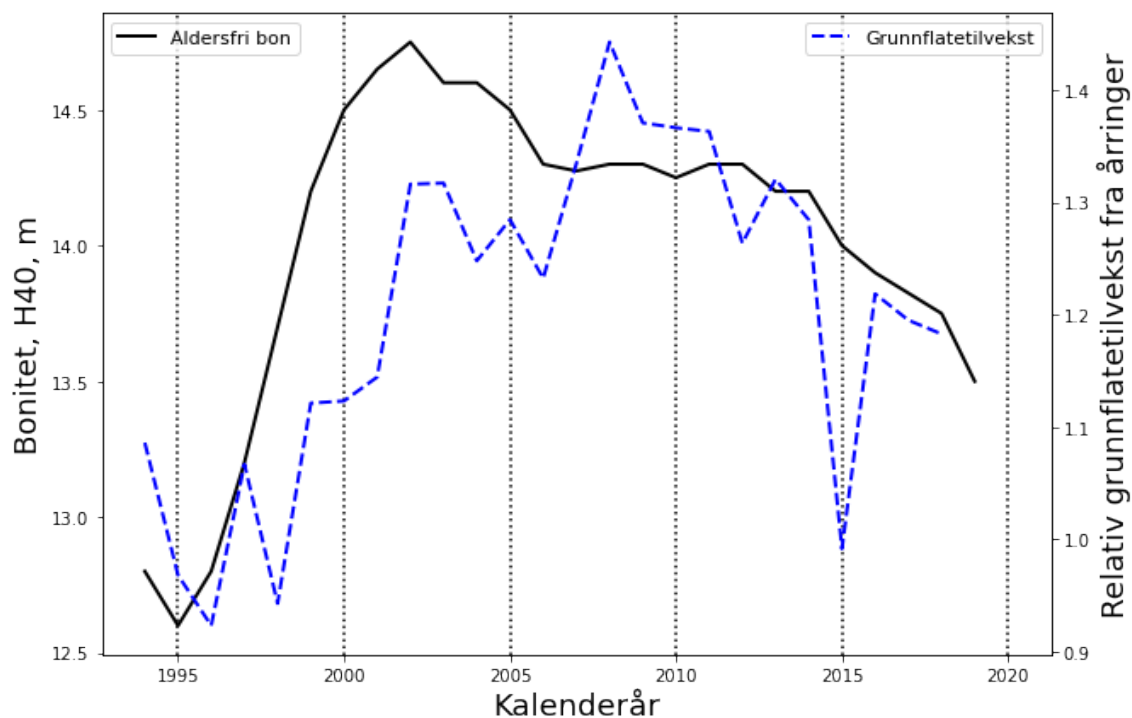


Fig. 7. Samvariasjon over tid for aldersfri bonitet (venstre y-akse) og relativ grunnflatetilvekst basert på borprøver (høyre y-akse) basert på årlige medianer.

3.1.3 Størrelsesorden på variasjon i bonitet og tilvekst

Variasjonen i aldersfri bonitet fra år til år så ut til å overdrive variasjonen i volumtilvekst (Fig. 8). Etter å ha regnet om aldersfri bonitet til produksjonsevne og så regnet både dette og volumtilvekst om til relative verdier, var det tydelig at utslagene på aldersfri bonitet var større enn utslagene på volumtilvekst. Volumtilveksten hadde mindre utslag enn aldersfri bonitet tilsa. For eksempel økte produksjonsevne basert på aldersfri bonitet fra 83% i 1994 til 108% i 2002, altså en relativ økning på 25%. Tilsvarende var økningen for volumtilvekst fra 94% til 106%, altså en relativ økning på 12%. Dette kan tyde på at aldersfri bonitet ikke kan regnes direkte om til produksjonsevne, på samme måte som konvensjonell bonitet. Forøvrig hadde konvensjonell og aldersfri bonitet samme gjennomsnittsverdi for hele perioden, angitt i figuren som horisontale linjer omkring 100%.

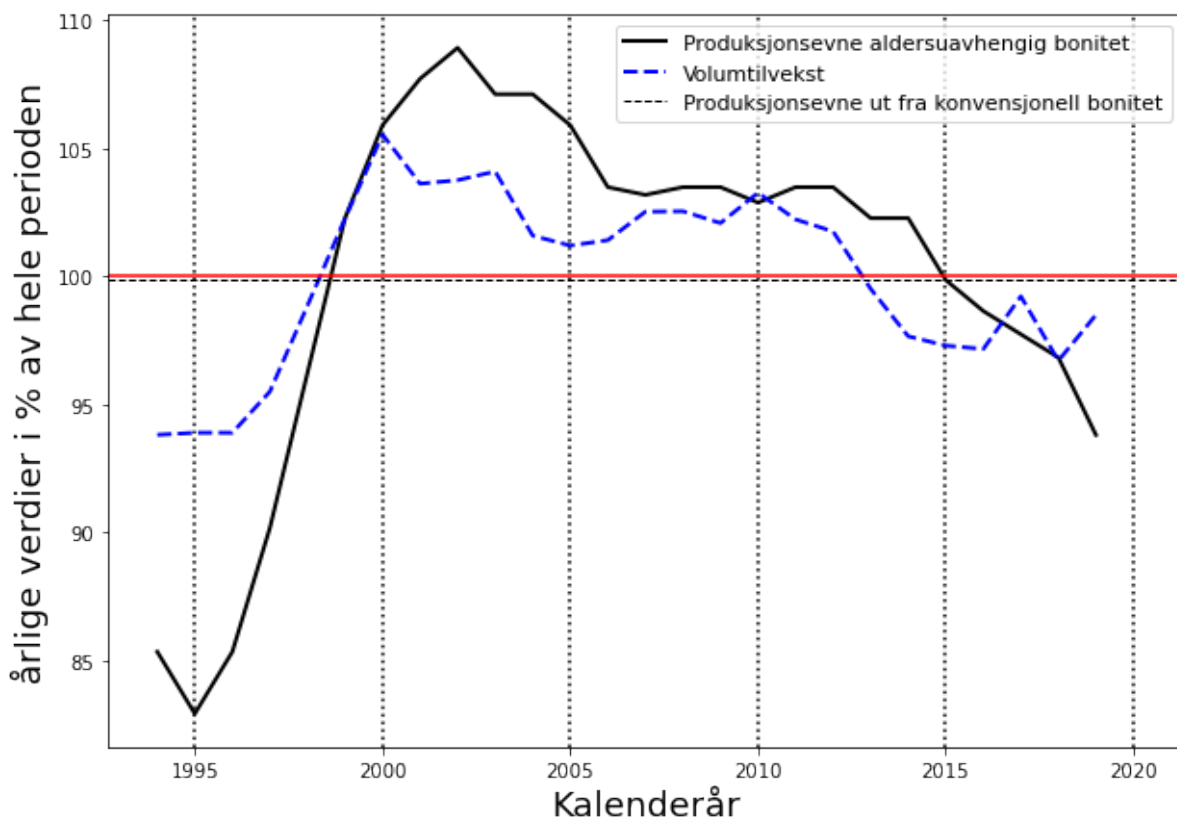


Fig. 8. Produksjonsevne ut fra aldersfri bonitet og volumtilvekst for alle produktive granfelt i Landsskogtakseringen, hvor alle verdier er regnet om til relative tall i forhold til gjennomsnittet for hele perioden 1994-2019 basert på årlige medianer.

3.2 Utvikling av bonitet over tid

En mulig anvendelse av aldersfri bonitet i Landsskogtakseringen er overvåking av produksjonsevne og bonitet, særlig med tanke på klimaendringenes betydning. Vi har sett nærmere på tidstrender for ulike regioner, for å avklare om de har tydelige trender over tid, og om de er pålitelige utover det som er vist over. Det var ingen klare trender for ulike regioner i Norge de siste 30 år, men utslagene har til dels vært store (Fig. 9). Særlig i lavlandet på Østlandet har utslagene vært store, og her økte aldersfri bonitet med to bonitetsklasser for perioden 1987 til 2002. Også på Vestlandet har utslagene vært store, med en betydelig nedgang, nesten to bonitetsklasser for perioden 2005-2020. Samlet sett var disse regionale utviklingene preget av 10-20 års trender som dominerte over variasjoner fra år til år.

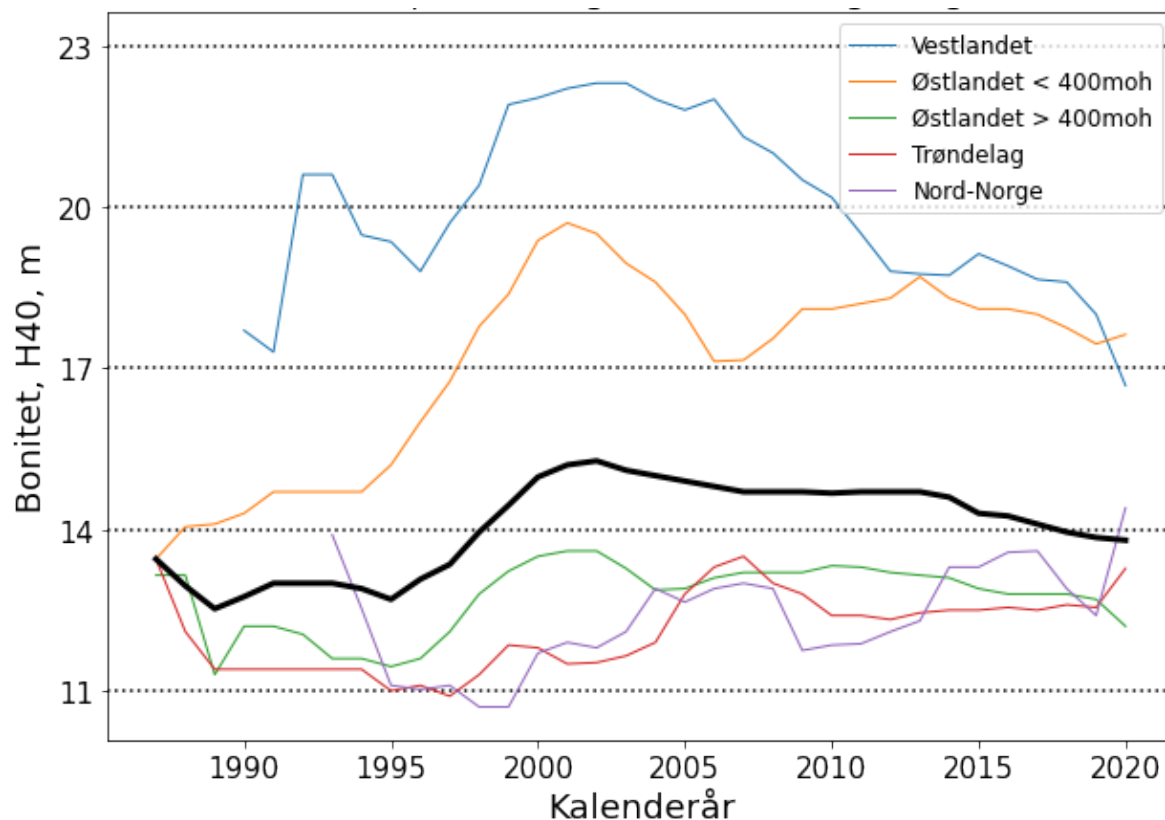


Fig. 9. Tidsserier med årlige verdier av aldersfri bonitet for regioner i Norge basert på landsskogtakseringen basert på årlige medianer. Den tjukke, svarte linja gjelder for hele landet.

Tidsserier med aldersfri bonitet fra prøvetrær fra Vestfold som ble splittet etter margin viste heller ingen klare trender (Fig. 10). Dette var særlig tydelig for prøvetrærne fra Lardal, hvor vi kunne hente ut tidsserier tilbake til 1970. Det var imidlertid en periode med økning fra 1990-tallet til omkring år 2000, og så en nedgang de siste fem år fram til 2020. Det er altså store utslag, innenfor visse perioder, på to eller flere bonitetsklasser både opp og ned. Det var en spesielt stor nedgang på prøvetrærne i Siljan de siste årene, men dette datasettet er basert på få trær og kan ikke tillegges stor vekt.

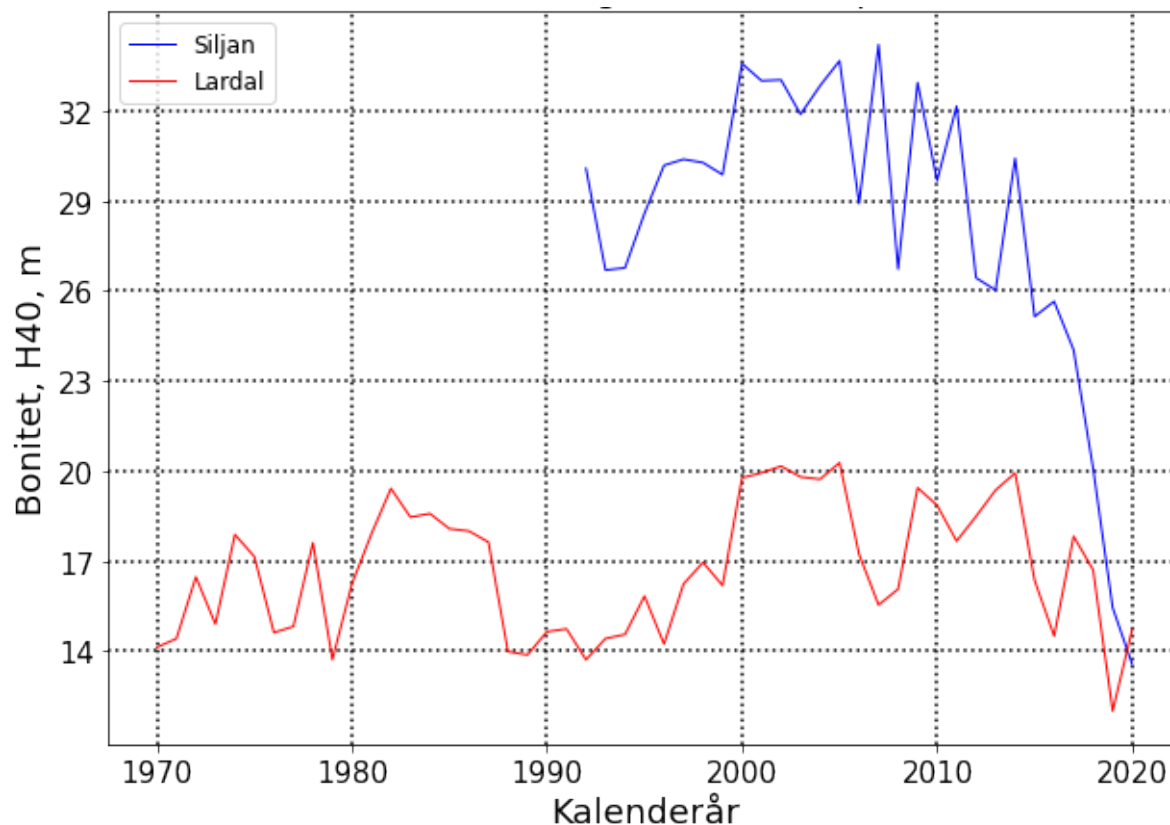


Fig. 10. Utvikling av aldersfri bonitet på to sett av prøvetrær som ble splittet etter margin og målt i 2020. Disse resultatene er basert på et utvalg av prøvetrærne, det vil si kun de trærne som hadde høydemålinger for hele perioden. De årlige verdiene i tidsseriene er altså basert på de samme trærne hvert år.

En sammenlikning av tidsserier fra Landsskogtakseringens felt i lavlandet på Østlandet og splittede trær fra Lardal viste en god overenstemmelse (Fig. 11). Her er altså dataene for Landsskogtakseringens felt regnet om til årlige verdier, og det samsvarer med de årlige bonitetsverdiene for splittede trær. Det har vært en betydelig økning i aldersfri bonitet fra omkring 1990 til 2002, og så en del fluktuasjoner med nedgang i slutten av perioden. De splittede prøvetrærne hadde en større nedgang etter tørkesommeren 2018 enn vi ser på Landsskogtakseringens felt.

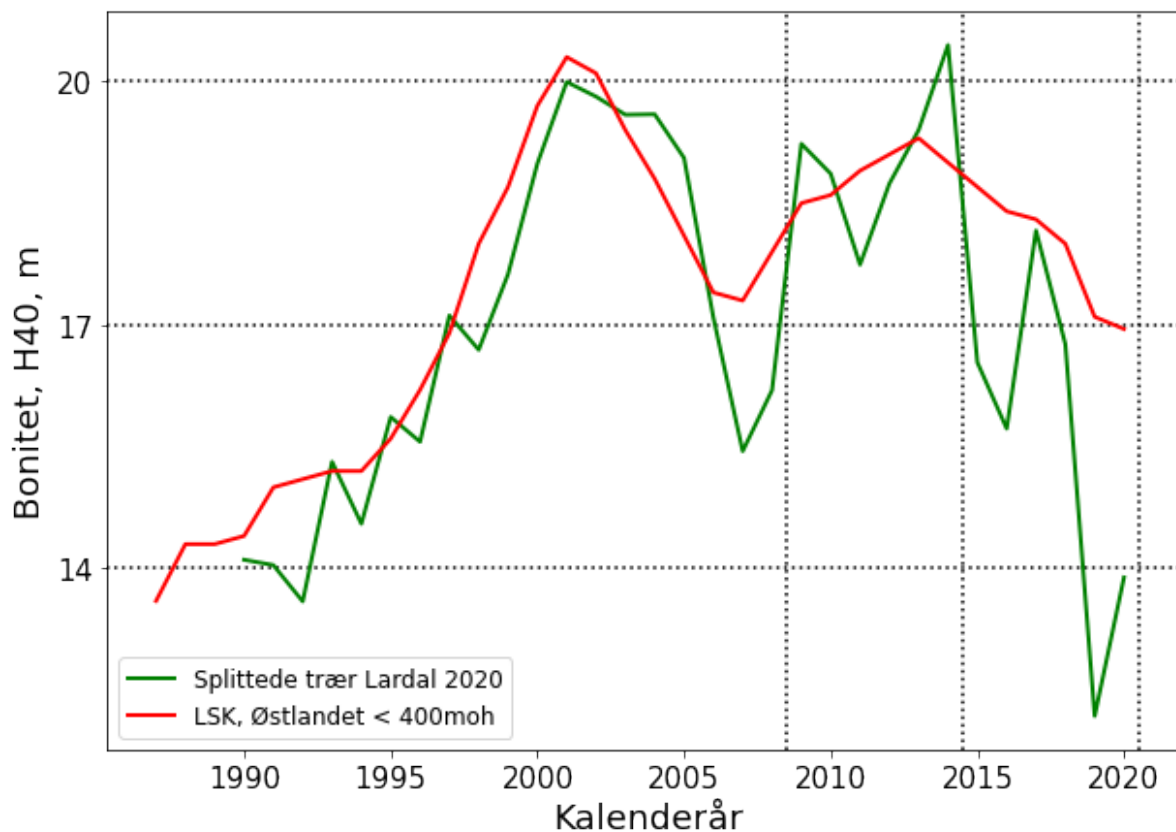


Fig. 11. Det er et bra samsvar mellom utvikling av aldersfri bonitet for gran basert på et utvalg splittede overhøydetrær i Lardal og Landsskogtakseringens flater for lavlandet på Østlandet.

3.3 Fjernmåling av aldersfri bonitet

Alle fjernmålingsmetodene fungerte relativt bra, med det var systematiske avvik. Samlet sett kan flybilder med bildematching langt på vei erstatte enkelttre-laser. Den beste løsningen med bildematching var å bruke de 10 høyeste 1m x 1m pikslene, beregne høydeendring fra forrige tidspunkt, regne dette om til aldersfri bonitet, og så bruke gjennomsnittet av disse ti småpikslene som verdi for hele 10m x 10m pikselet (Fig. 12). Vi aggregerte pikselverdiene opp til gjennomsnittsverdier på bestandsnivå. Det ble da et bra samsvar mellom enkelttre-basert metode og arealbasert metode. I gjennomsnitt hadde den enkelttre-baserte metoden 1m høyere bonitetsverdier, og korrelasjonskoeffisienten mellom dem var på 0,77. Den enkelttre-baserte metoden hadde noe større variasjon fra pixel til pixel, mens den arealbaserte metoden hadde en jevnere og mer gradvis variasjon fra pixel til pixel.

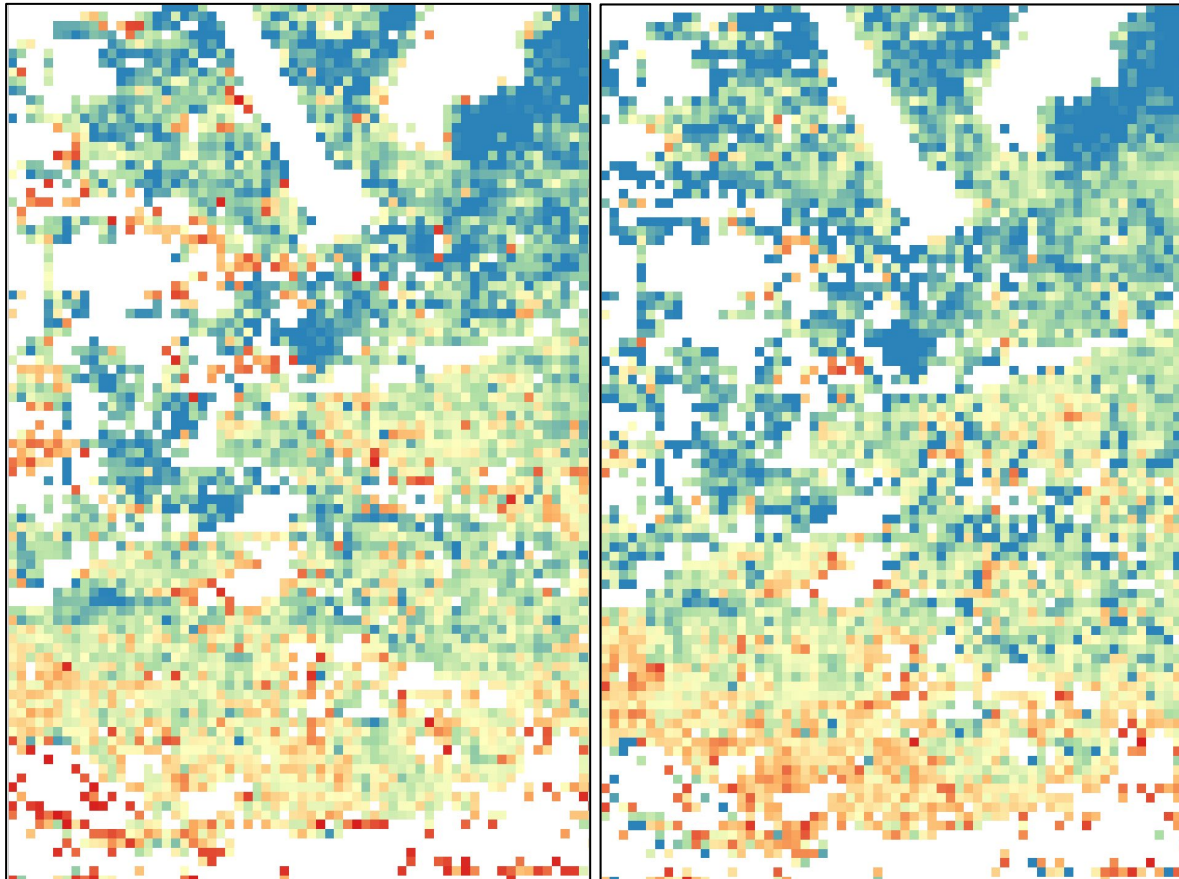


Fig. 12. Sammenlikning av aldersfri bonitet beregnet med to fjernmålingsteknikker for et område på 640m x 940m i Lardal for perioden 2008-2020. Pixelene er på 10m x 10m. Til venstre: basert på gjentatte lasermålinger av høyder på enkelttrær. Til høyre: basert på bildematching med gjentatte flybilder og høydeøkning på de 10 høyeste 1mx1m rutene i hver pixel.

3.3.1 Sammenlikning av arealbasert og enkelttrebasert aldersfri bonitet

Vi har sammenlignet aldersfri bonitet beregnet fra enkelttreetakst med aldersfri bonitet beregnet fra henholdsvis laserdata og bildematchingsdata (beskrevet over). På 10 m x 10 m pikselnivå, og ved bruk av ti 1m x 1m subpiksler, fant vi en korrelasjon mellom enkelttrebasert og arealbasert aldersfri bonitet på 0,6 ved bruk av laserdata, og 0,51 ved bruk av bildematchingsdata. Den gjennomsnittlige differansen mellom enkelttrebasert og arealbasert aldersfri bonitet var på -18% og -1% for henholdsvis laserdata og bildematching. Aggregert til bestandsnivå var korrelasjonen mellom enkelttrebasert bonitet og arealbasert aldersfri bonitet på 0,70 og 0,77 for henholdsvis laser og bildematching. Gjennomsnittlig differanse mellom enkelttrebasert og arealbasert aldersfri bonitet på bestandsnivå var på -15% og -5% for laserdata og bildematching. Differansene er her uttrykt i prosent av gjennomsnittlig enkelttrebasert bonitet beregnet fra 26 707 piksler og 278 bestand som var inkludert i undersøkelsen.

3.4 Kvalitetssikring og feilkilder

3.4.1 Betydningen av ulike høydemodeller

Det var en systematisk forskjell i bonitetsverdi mellom de to høydemodellene Sharma m.fl. (2011) og Maleki m.fl. (2022), men de var sterkt korrelerte og gav sammenfallende tidstrender for Landsskogflater (Fig. 13). Dette resultatet er basert på alle grantrær med gjentatte høydemålinger på produktive

granflater i Landskogtakseringen. Korrelasjonskoeffisienten mellom de to var 0,97. I gjennomsnitt var bonitetsverdien 15,5 for Sharma og 13,8 for Maleki, altså en systematisk forskjell på 1,7. Et annet mål på dette er kvadratfeilen (RMSE) for en lineær regresjon for Sharma-bonitet med Maleki-bonitet, som var på 1,76.

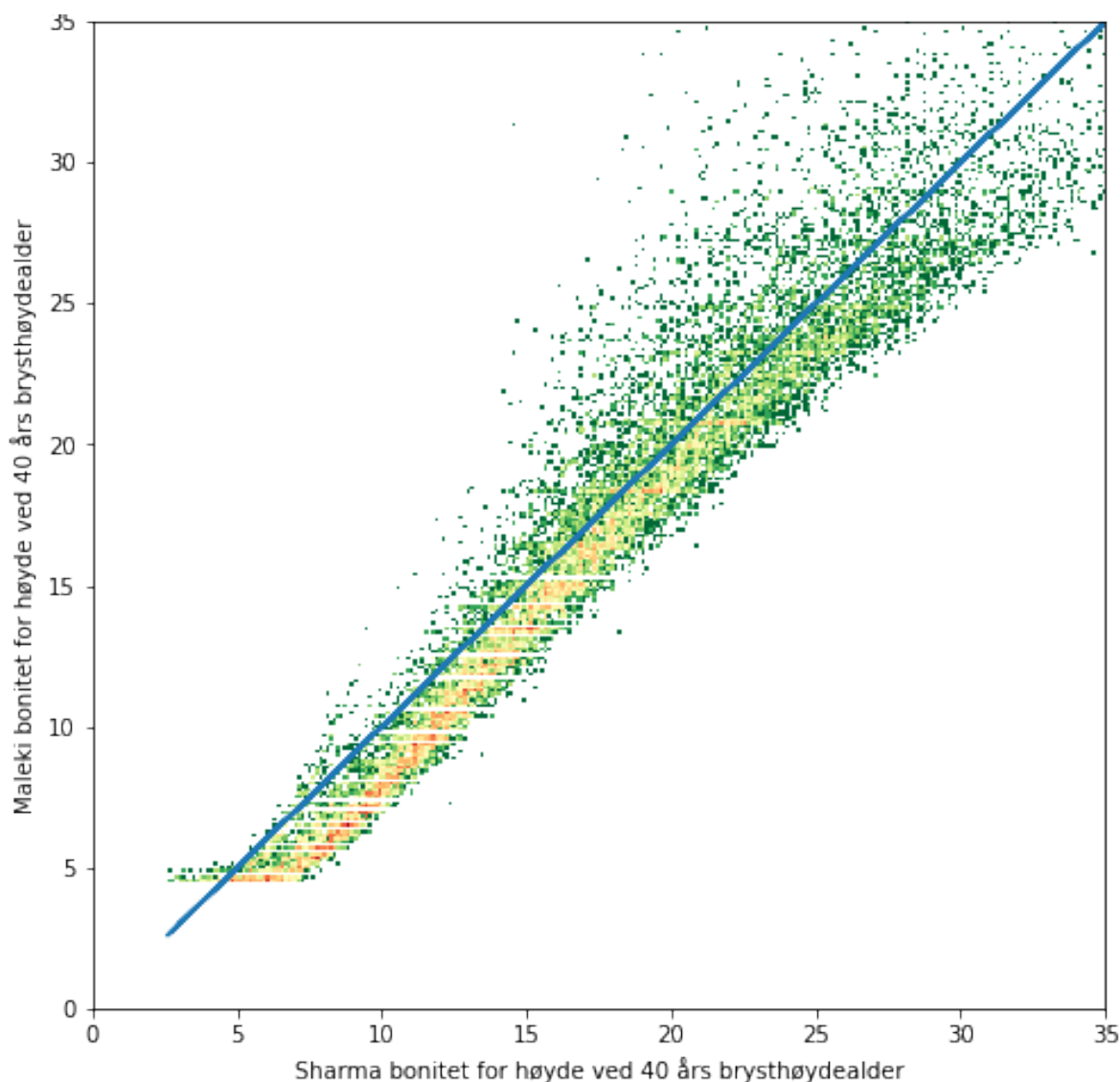


Fig. 13. Aldersfri bonitet beregnet med modellene til Sharma og med Maleki, hvor vi har regnet om bonitet etter Maleki til bonitetsverdier for 40 års alder i brysthøyde. Dataene er fra Landsskogtakseringen, og hvert punkt er et overhøydetre og en tilvekstperiode. Korrelasjonskoeffisienten var på 0,97 og kvadratfeilen for en lineær regresjon var 1,76.

En tidsserie med aldersfri bonitet viste også bra samsvar mellom Sharma og Maleki, selv om det var en systematisk forskjell (Fig. 14). Dette var en tidsserie basert på årlige gjennomsnitt for produktive granfelt i lavlandet på Østlandet, som ble valgt ut som et eksempel her fordi denne landsdelen har hatt et karakteristisk forløp. Kurvene er nesten identiske bortsett fra den systematiske forskjellen. Forskjellen her betyr bare en forskjell i bonitetsverdi, og ikke i produksjonsevne, fordi bonitetsverdiene hos Sharma og Maleki ikke tilsvarende samme produksjonsevne.

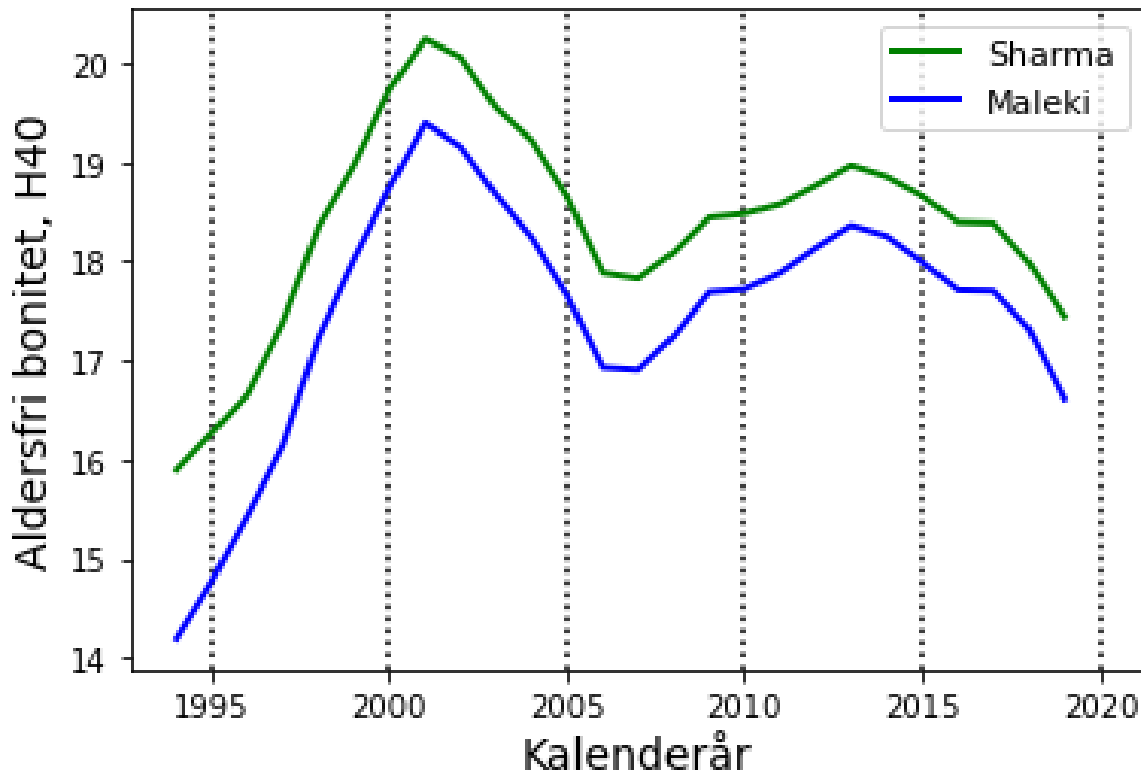


Fig. 14. Tidsserie av aldersfri bonitet basert på to høydemodeller, dvs Sharma m.fl. (2011) og Maleki m. fl. (2022) omregnet til verdier for 40 års alder i brysthøyde.

3.4.2 Lengden av måleperioden

Jo kortere tidsperiode desto større feil får vi med aldersfri bonitet. Denne effekten var moderat med våre data. Ved å bruke tidsserier med årlige bonitetsverdier for splittede prøvetrær så har vi beregnet den tilfeldige feilen i meter til $\pm 3,1$ for en 5-års periode, $\pm 2,5$ for 10-års periode og $\pm 1,9$ for 15 års-periode. For tidsperioder lengre enn 15 år var den tilfeldige feilen bare noe lavere.

Når vi brukte 25-års aldersfri bonitetsverdi som referanse, eller måltall, så fant vi naturlig nok at 12-års periodelengde kom best ut, mens dersom vi har så kort måleperiode som seks år så burde den kombineres med konvensjonell bonitet for å redusere tilfeldige feil. For Landsskogtakseringens felt var det samlet sett små forskjeller, bortsett fra at konvensjonell bonitet gav en klart lavere bonitetsverdi og hadde den svakeste korrelasjonen med 25-års verdien for aldersfri bonitet (Tabell 2). Det var gjennomgående en ganske sterk sammenheng mellom ulike bonitetsalternativer og ulike lengder på måleperioden, men konvensjonell bonitet hadde gjennomgående lavere verdier. På Landsskogtakseringens granfelt brukte vi aldersfri bonitet for 25-års perioden 1994-2018 som referanse. Alle alternativene, unntatt konvensjonell bonitet, gav brukbare resultater.

Korrelasjonskoeffisientene var høye og gjennomsnittsverdiene var like. Det beste alternativet for å predikere siste 25 års bonitet var å bruke siste 12 års bonitet, som oppnådde en korrelasjonskoeffisient på 0,96 or et gjennomsnittstall på 14,8 sammenliknet med gjennomsnittet for måltallet på 14,9. Men selv en så kort periode som 6 år gav resultater som avvek lite fra 25-års verdien.

Tabell 2. Gjennomsnittlig bonitet på Landsskogsflater for ulike alternativer og korrelasjonskoeffisient mot referanseverdien aldersfri bonitet 1993-18.

Alternativ	Gjennomsnitt	Korrelasjon
Konvensjonell bonitet	13,7	0,77
Referanse: Aldersfri bonitet siste 25 år (1994-18)	14,9	1,00
Aldersfri bonitet siste 12 år (2007-18)	14,8	0,96
Aldersfri bonitet siste 6 år (2013-18)	14,7	0,92
Kombinasjon siste 12 år og konvensjonell	14,2	0,94
Kombinasjon siste 6 år og konvensjonell	14,1	0,92
Kombinasjon siste 6 og siste 12 år	14,7	0,95

Resultatene basert på splittede trær hos Fritzøe gav noenlunde tilsvarende resultater. Her gav imidlertid en 6-års periode med aldersfri bonitet mer ustabile resultater, med svak korrelasjon til 25-årsverdien og gjennomsnittlig 2,4 m lavere bonitetsverdier (Tabell 3). En kombinasjon, det vil si gjennomsnitt av 6-års aldersfri bonitet og konvensjonell bonitet gav bedre resultat. Dette viser at ved korte måleperioder på under 10 år så kan feilen på aldersfri bonitet bli betydelig, og ved en operasjonell anvendelse kan dette motvirkes ved å kombinere konvensjonell og aldersfri bonitet.

Tabell 3. Gjennomsnittlig bonitet basert på splittede trær hos Fritzøe skoger for ulike alternativer og korrelasjonskoeffisient mot referanseverdien aldersfri bonitet 1995-20.

Alternativ	Gjennomsnitt	Korrelasjon
Referanse: Aldersfri bonitet siste 25 år (1995-20)	20,6	1,00
Aldersfri bonitet siste 12 år (2008-20)	20,0	0,94
Aldersfri bonitet siste 6 år (2014-20)	18,2	0,76
Konvensjonell bonitet fra plan	16,1	0,80
Kombinasjon siste 12 år og konvensjonell	18,0	0,93
Kombinasjon siste 6 år og konvensjonell	17,2	0,88
Kombinasjon siste 6 og siste 12 år	19,1	0,87

3.4.3 Betydningen av underestimering av trehøyde ved laserskanning

En laserskanner vil underestimere trehøydene, og dette vil føre til en systematisk underestimering av aldersfri bonitet selv om underestimeringen er like stor på alle tidspunkter. Men denne effekten var liten. Penetreringseffekten er beregnet for alle prøvetrærne som ble felt og splittet etter marginen i 2020, og hvor vi avleste trærnes høyder for de årene da det ble gjort laserskanning, dvs i 2008, 2014 og 2020. Vi har så koblet dette til høydene på de korresponderende enkelttre-objektene i de tre lasertakstene. En simulering av effekten av 75 cm underestimering viser at boniteten blir underestimert med bare 0,3 m (Fig. 15). Dersom underestimeringen er forskjellig på de ulike tidspunktene vil vi få en noe større feil. Den var i gjennomsnitt 99, 78 og 75 cm, henholdsvis, for årene 2009, 2014 og 2020. Men det var ikke en statistisk sikker forskjell mellom årene, så dette kan skyldes tilfeldige feil, det vil si tilfeldige variasjoner fra tre til tre.

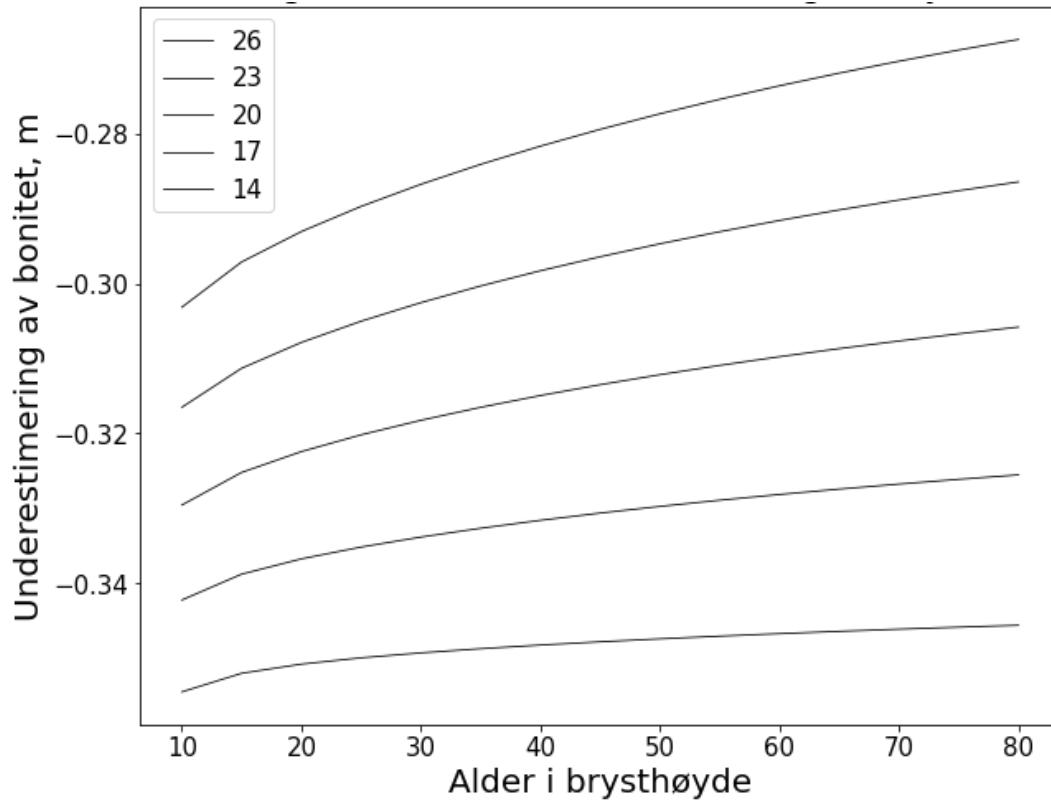


Fig. 15. Underestimering av trehøyde med 75cm pga penetrering gir en underestimering av aldersfri bonitet på omkring 0,3 m i H40-systemet.

4 Diskusjon

Samlet sett viser resultatene at aldersfri bonitet har et potensial for å brukes, dels ved at det kan effektivisere eller forenkle boniteringen i skogressurskartlegging, og dels ved at det kan brukes til å følge med på klimaendringenes påvirkning på skogens produksjonsevne.

Vi har vist sammenheng mellom aldersfri bonitet og tilvekst på ulike måter. Samlet sett viser dette at man kan bruke aldersfri bonitet operasjonelt for kartlegging av produksjonsevne og for prediksjon av tilvekst, på samme måte som konvensjonell bonitet. Videre viser dette at aldersfri bonitet har den fordelten at den samvarierer over tid med faktisk tilvekst, og derfor kan egne seg for overvåking og klarlegging av hvordan klimaforholdene påvirker skogens vekst. For Landsskogtakseringens felt og perioder hovedsakelig på fem år, så var aldersfri bonitet like godt egnet til prediksjon av tilvekst som konvensjonell bonitet. Vi tolker dette som at aldersfri og konvensjonell bonitet har hver sine styrker og svakheter, og at disse stort sett utligner hverandre. Aldersfri bonitet har den fordelten at det er basert på faktisk høydevekst på noen av trærne på feltet og for den aktuelle perioden, og dette utgjør en del av tilveksten, mens konvensjonell bonitet ikke har dette. Konvensjonell bonitet har den fordelten at det er basert på en lengre måleperiode, det vil si fra bonitetstreet var i brysthøyde og fram til boring og høydemåling, men med den ulempen at det er basert på et tre utenfor flata, og en annen tidsperiode enn den aktuelle. Samlet sett så har begge metoder styrker og svakheter, og vi må regne med at disse til en viss grad utligner hverandre.

Aldersfri bonitet varierte også til en viss grad i takt med tilvekst. Dette var tydelig for hele landet samlet sett, men også for flere regioner. Resultatene viser at det er variasjoner fra år til år både i aldersfri bonitet og tilvekst på landsdekkende tall, og vi må regne med at dette i hovedsak skyldes årlige variasjoner i klimatiske forhold på regional eller nasjonal skala. Særlig bra samsvar var det mellom aldersfri bonitet og volumtilvekst, og dette er et viktig resultat for metoden. Det indikerer at aldersfri bonitet fanger opp reelle variasjoner i skogens tilvekst og produksjon. Det kan forklares dels ved at aldersfri bonitet reflekterer høydedimensjonen ved volumtilveksten, men at den også samvarierer med grunnflate-tilveksten. Variasjonen fra år til år i grunnflatetilvekst synes imidlertid å være noe forsinket i forhold til variasjon fra år til år i høydetilvekst og aldersfri bonitet.

Resultatene tyder imidlertid på at variasjonen i aldersfri bonitet overdriver variasjonen i tilvekst. Det var større, relative variasjoner i aldersfri bonitet enn det var i volumtilvekst. Aldersfri bonitet er basert på at trærne i en kortere periode følger en høydeutviklingskurve. Vi kan si at trærne i en kort periode vokser i høyde som om det var en gitt bonitet på stedet. Trærne kan imidlertid ha en annen forhistorie hvor de har fulgt andre høydekurver, og kan da ha et annet volum, eller en annen stammeform, enn det som ville vært tilfellet dersom de hadde fulgt samme høydekurve hele tida. Dette kan være årsaken til at variasjoner i aldersfri bonitet har større utslag enn variasjoner i volumtilvekst. Dette kan være en ulempe, men kanskje kan det også være en fordel for en overvåking av produksjonsevne hvis vi ser det slik at metoden er følsom.

Tidsserier av aldersfri bonitet kan sammenliknes med årringserier for bruk i analyser av klimatiske effekter på skogens vekst. Årringbredder blir gjerne omregnet til årringindekser når man bruker dem til å belyse effekten av klimatiske forhold, og på samme måte kan vi tenke oss at datasett med trehøyder kan omregnes til aldersfri bonitet for bruk i samme typer studier. Her vil tidsseriene med aldersfri bonitet ha den fordelten at det angir en fysisk størrelse, nemlig bonitet, mens årringindekser kun angir relative verdier uten noen enhet. Vi har demonstrert to metoder som gir oss tidsserier med årlige bonitetsverdier, og det er detaljerte undersøkelser på prøvetrær, og en regional aggregering og midling av Landsskogfelt.

Resultatene i prosjektet viser at aldersfri bonitet kan beregnes med en arealbasert metode. På bestandsnivå samsvarer den arealbaserte boniteten tilfredsstillende med aldersfri bonitet beregnet fra enkelttredata. På 10m x 10m pikselnivå er det en større spredning i bonitetesverdier fra

enkelttrebasert og arealbasert metode. Bruk av laser- eller bildematchingsdata ser generelt ut til å gi relativt like resultater, men vi fant i denne undersøkelsen at bonitetsverdiene ved bruk av laserdata har et større systematisk avvik enn ved bruk av bildematching. Årsaken til dette er uklar, og er noe som kan undersøkes nærmere.

Aldersfri bonitet er som metode lite følsom for valg av høydekurver. Det var to systematiske forskjeller i bonitetsverdi mellom de to høydemodellene Sharma m.fl. (2011) og Maleki m.fl. (2022), men de var sterkt korrelerte og gav sammenfallende tidstrender for Landsskog-flater. De to høydemodellene var tydelig forskjellige. Når det likevel er bra overenstemmelse mellom dem for aldersfri bonitering, så skyldes det at det er stor forskjell mellom dem for mindre vanlige kombinasjoner av høyde og høydeutvikling. Visuelt sett så har høydemodellene stor forskjell, men det store flertallet av datapunkter vi har ligger i områder hvor kurvene sammenfaller bra. Forskjellen mellom høydemodellene får derfor liten betydning for bruk i aldersfri bonitering, for operasjonell anvendelse med store datasett. For enkeltmålinger på enkelttrær kan det imidlertid bli store forskjeller. I tillegg kommer en systematisk forskjell i bonitetsverdi. Dette er imidlertid bare en systematisk forskjell i bonitetsklasse, mens det ikke betyr en systematisk forskjell i produksjonsevne. Det er foreløpig ikke beregnet produksjonsevne for de nye Maleki-bonitetene.

En ny boniteringsmetode skal dekke flere ulike behov, både på kort og lang sikt. Ved bruk av aldersfri bonitet må vi avveie to kriterier mot hverandre. Det er på den ene side ønsket om å ha en oppdatert verdi for bonitet, som gjelder dagens klimatiske forhold. Dette taler for å benytte korte perioder mellom gjentatte høydemålinger. På den andre side har vi ønsket om å ha så lite støy som mulig i bonitetsverdiene, og det taler for å benytte lange perioder. Det finnes ikke noen grense for hva som er minimum periodelengde, fordi det avhenger av størrelsen på målefeilen, skogens faktiske høydevekst, og formålet med boniteringen. For operasjonell bonitering i skogbruksplanlegging og SR16 synes 10 år å være tilfredsstillende, mens ved kortere perioder kan man kombinere aldersfri og konvensjonell bonitetsverdi. Tilfeldige feil kan reduseres ved romlig interpolering over ruter eller pixler. Dette er særlig aktuelt for skogbruksplanlegging med fjernmåling hvor aldersfri bonitet for enkeltpixler på 10 eller 16 m størrelse kan aggregeres til bestandsnivå. For en fortløpende overvåking av bonitet under klimaendringer på Landsskogtakseringens felt kan man bruke fem års perioder, og redusere feil ved aggregering til regionale verdier.

Bruk av aldersfri bonitering har noen begrensninger, men stort sett gjelder de samme begrensningene for konvensjonell bonitering. For det første skal all bonitering gjøres med trær som ikke er presset negativt fra nabotrær, - det vil si at vi må bruke trær fra øvre kronesjikt. Det vanlige er å bruke overhøydetrær. Vi har også sett at trær som har vært undertrykket i lang tid, og så blitt fristilt og nå er i øvre kronesjikt, ikke har en høydevekst på linje med det en skulle forvente. Langvarig undertrykking kan kanskje føre til varige svekkelser i vekstkraft, eller kanskje er det slik at trær med liten vekstkraft kan på et tidspunkt inngå i det øvre kronesjikt. Høydebonitering som metode ble utviklet på 1800-tallet, og var beregnet på estimering av produksjonsevne og tilvekst i ensaldrede monokulturer. I fleraldret skog og blandingsskog har vi dels problemet med at det kan være vanskeligere å finne trær som har fri høydevekst, og dels problemet med at volumtilveksten er vanskelig å estimere ved hjelp av bonitet. I slik skog blir usikkerheten på bonitetsverdiene stor og nytten av bonitet for planleggingen liten.

En annen svakhet ved høydebonitering er at referansealderen i Norge er bare 40 år, og det betyr at i skog som er langt eldre enn 40 år så er vi avhengig av at høydekurvene er gode. Mange land bruker en høyere referansealder, og da vil bonitering av gammel skog være mindre avhengig av at høydekurvene passer for stedet. Disse begrensningene, eller problemene, gjelder imidlertid både aldersfri og konvensjonell bonitet.

Vi må regne med at klimaendringene vil påvirke skogene vekst og helsetilstand, det vil si endringer i produksjonsevne og skadeomfang. Særlig synes granskogen i lavlandet på Østlandet å ha en økt risiko for negative virkninger. Vi ser i dag i denne delen av landet stort omfang av mekaniske skader av snø

og vind, tørkestress særlig etter sommeren 2018, og økt press fra barkbiller. Det er tidligere vist at skogens vekst her er vannbegrenset, noe som vil si at årringbreddene går opp i kjølige og våte somre, mens den går ned i varme og tørre somre (Andreassen m. fl. 2008). I resten av landet er det omvendt. Denne landsdelen er viktig, fordi en stor del av skogressursene i Norge finnes her. Det store spørsmålet er derfor om nedbørmengden om sommeren her vil holde tritt med temperaturøkningen under klimaendringene. Dersom nedbørmengden ikke gjør det, kan vi vente en nedgang i bonitet på grunn av mer tørkestress. Denne studien viser også store utslag på aldersfri bonitet for denne delen av landet de siste 20 år. Vi tolker dette som at klimaendringene på den ene siden har et potensiale til å øke boniteten mye, men dersom det blir mer tørkestress kan boniteten også gå ned. Det kan tenkes at granskogen i denne delen av landet vil være på retrett, og inngå i en såkalt 'trailing edge' for gran i Europa (Honkaniemi m. fl. 2020). Klimaendringene kan også føre til en generell vridning av skogene fra gamle, store trær til mer unge og små trær (McDowell m. fl. 2020), og dette kan i Norge bety en nedgang i gran til fordel for mer ung løvskog.

5 Konklusjoner

Samlet sett viser resultatene at aldersfri bonitet har et potensial for å brukes i skogbruk i Norge. En hovedfordel med metoden er at den er velegnet for bruk med fjernmåling, og resultatene viser at både enkelttre- og areal-baserte metoder fungerer, og at både laserskanning og stereo flybilder kan brukes. Andre fordeler med metoden er at den ikke krever alder som input, og at den er bedre egnet enn konvensjonell bonitet til å fange opp endringer og trender i bonitet som skyldes klimaendringer. Aldersfri bonitering kan for det første brukes som et alternativ til konvensjonell bonitering i skogbruksplanlegging og på det landsdekkende skogressurskartet SR16, og for det andre som et supplement til konvensjonell bonitet på Landsskogtakseringens felt for å overvåke endringer forårsaket av klimaendringer.

Metodens hovedbegrensning er den usikkerheten, eller feilen, som oppstår når man har få år i tilvekstperioden man beregner for. Dette kommer både av målefeil og av tilfeldigheter i værforholdene i perioden. Betydningen av dette avhenger av i hvilken grad beregningsresultater aggregeres, - både i tid med flere perioder og i rom med flere trær eller felt. For den operasjonelle anvendelsen til skogbruksplanlegging og skogressurskartleggingen under SR16 så anbefaler vi å bruke perioder på 10 år eller mer. Situasjonen er at fjernmålingsdata som kan brukes til aldersfri bonitet innsamles hvert 5.-10. år, med laserskanning eller omløpsfotografering. Ved en slik anvendelse er det snakk om lite aggregering, fordi man skal beregne bonitet på bestandsnivå eller 16m pixelnivå. Resultatene fra våre beregninger viste ganske brukbare estimater sjøl for så korte perioder som fem år. Vi må imidlertid regne med at for andre femårs-perioder med mer spesielle værforhold og dersom man bruker ulike fjernmålings-sensorer og -metoder på to tidspunkter, så kan feil og usikkerhet på så korte perioder bli for stor. Vi anbefaler for korte perioder å sammenligne med, og eventuelt kombinere med, konvensjonelle bonitetsdata. For overvåking av bonitet på regionalt nivå med Landsskogtakseringen er imidlertid femårs-perioder tilstrekkelig lange fordi man kan aggregere resultater over mange felt.

Litteraturreferanse

- Andreassen, K., Solberg, S., Tveito, O.E. og Lystad, S.L. 2006. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management*, 222(1-3), pp.211-221.
- Blingsmo, K.R. 1988. Volumtilvekst. Gran – Furu – Bjørk. Norsk institutt for skogforskning (intern rapport). Ås. 6pp.
- Honkaniemi, J., Rammer, W. og Seidl, R. 2020. Norway spruce at the trailing edge: the effect of landscape configuration and composition on climate resilience. *Landscape Ecology*, 35(3), pp.591-606.
- Kvaalen H, Solberg S og May J. 2015. Aldersuavhengig bonitering med laserskanning av enkelttrær. NIBIO rapport, 1.
- McDowell, N.G., Allen, C.D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B.H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J.S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A. og Hurtt, G.C. 2020. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, 368(6494), p.eaaz9463.
- Solberg, S., Kvaalen, H. og Puliti, S., 2019. Age-independent site index mapping with repeated single-tree airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34(8), pp.763-770.
- Sharma, R.P., Brunner, A., Eid, T. og Øyen B.-H. 2011. Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *For Ecol Manag.* 262:2162–2175
- Venn, K. 1965. Nodal diaphragms in *Picea abies* (L.) Karst. and other conifers. *Medd. Norske Skogforsoksv.* 20:93–114.

Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter.