

Sluttrapport for prosjektet: «Verifisering av metode for aldersuavhengig bonitering ved bruk av høydemåling med flybåren laser»

Harald Kvaalen og Svein Solberg

Innledning

Prosjektet «Verifisering av metode for aldersuavhengig bonitering ved bruk av høydemåling med flybåren laser» er avsluttet. Hovedmålet var å etterprøve om aldersuavhengig bonitering med lasermålte høyder er en tilstrekkelig pålitelig metode for å bonitere skog at den kan brukes i ordinære takster. Delmål var: A) Etterprøve at boniteten har økt. B) Undersøke utviklingen i høydevekst/bonitet innen samme bestand. C) Fremskaffe et finmasket nett av bonitetsverdier for hele skogen ved å dele hvert bestand opp i ca 250 kvadrat store ruter. D) Bruke resultat fra punkt C til å undersøke hvordan endringene i høydevekst varierer med terrengforholdene.

I pilotprosjektet «Aldersuavhengig bonitering med laserskanning av enkelttrær» utviklet vi en enkel metode for å bonitere skog når høyden er målt ved to tidspunkt med et vilkårlig antall år i mellom. Med denne metoden og høyder målt med flybåren laser fant vi at både yngre og eldre granbestand i perioden 2009-2014 hadde vokst betydelig bedre enn fra bestandene ble etablert og fram til 2009. Økingen tilsvarte 3-4 meter i H40 bonitet. Ideen med å bonitere på grunnlag av høyde og høydevekst i en periode med kjent lengde er gammel, men en generell matematisk formulering har manglet. Vår metode representerer et høyere generaliseringsnivå av den moderne tilnærmingen til å lage høyde/bonitetsmodeller, det såkalte Generalized Algebraic Difference Approach (GADA). I Kvaalen m.fl. (2015) viste vi prinsippet for hvordan en funksjon der høyden er en funksjon av tiden og boniteten kan omformes matematisk til en funksjon der boniteten finnes uten å kjenne alderen, her kalt $GADA_{ai}$, hvor «ai» står for «age independent». Bjørn Tveite sine høyde/bonitetsmodeller for gran og furu benyttet en grunnfunksjon som ble formulert av Strand (1964). Sharma m. fl. (2011) omarbeidet denne funksjonen (nr 15 i deres arbeide) og flere andre til GADA funksjoner, der høyden er en funksjon av overhøydeetrærnes brysthøydealder og den ukjente boniteten på stedet. Vi har valgt å omarbeide deres funksjon 15 til $GADA_{ai}$ fordi den har en enkel analytisk løsning for å finne bonitetsverdien og dermed gir det matematiske bevis for at metoden er gyldig.

Aldersuavhengig bonitering åpner for å bonitere på grunnlag av høyder målt med fotogrammetri i flyfoto, flybåren laser, radarmålte høyder fra satellitt, eller andre metoder, såfremt høydene er målt på to eller flere tidspunkt. Høydeveksten i periode fra ett til flere år kan standardiseres til en bonitetsverdi. Dette er nyttig for å studere endringer over tid og for å undersøke årsaker til variasjon i høydeveksten i skog av ulik alder.

For å etterprøve metoden og undersøke om det har vært en bonitetsheving (delmål A og B), ble 31 trær i seks bestand hos Fritzøe Skoger i Lardal kommune i Vestfold felt og margkløyvd. Høydeveksten hvert år ble målt nedover fra toppen og regnet om til en bonitetsverdi ($H40_{ai}$). Dette gav data til å undersøke endringer i $H40_{ai}$, og om variasjonen fra år til år og en eventuell trend, kan forklares med ulike klimavariabler og økningen i deltrykket av karbondioksid i atmosfære (pCO_2). Det gav også muligheter for å undersøke effekten av frøår og toppbrekk.

De samme data er også brukt til å kontrollere om det er samsvar mellom $H40_{ai}$ målt på de felte trærne og $H40_{ai}$ beregnet på grunnlag av høyder målt med flybåren laser i takstene i 2009 og 2014. Takstene i 2009 og 2014 var basert på høyoppløselig laserskanning fra fly som gir høyder, treslag og nøyaktig posisjon for alle trær i hvert bestand. For oppgaven i delmål C ble hvert bestand delt inn heksagonformede 100 kvadratmeter store småflater. På hver småflate ble det valgt ut ett eller flere overhøyde-trær og det ble beregnet $H40_{ai}$ ($H40_{ail}$) verdier på grunnlag av høyden i 2009 og 2014. Deretter ble differansen mellom skogbruksplanens bonitetsverdi i 2009 ($H40_{09}$) for hele bestandet og $H40_{ail}$ i hvert heksagon i bestandet regnet ut. For hvert heksagon ble det hentet ut data for høyde over havet, helling, aspekt, avstand til grunnvannsspeil, jordtype og berggrunn slik at en kunne studere hvordan differansen $H40_{09}$ og $H40_{ail}$ ble påvirket av disse egenskapene (delmål D). Her presenterer vi resultatene for delmål A og B for seg og C og D for seg. Til slutt i diskusjonen har vi tatt med noen betraktninger om mulige problemer med bonitering i plukkhogd skog, samt noen beregninger som synliggjør hva bonitetsendringene som er målt kan ha å si for hogstmodenhetsalder og skogens verdi.

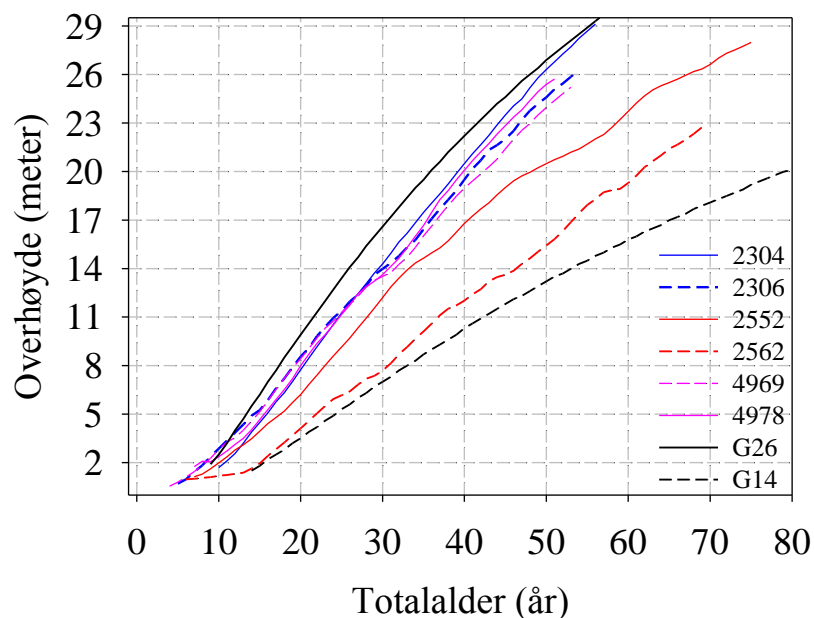
Delmål A og B endring i bonitet over tid.

De seks bestandene ble valgt ut for å representere skog på svært god mark i lavlandet, middels bonitet høyere oppe og lavere bonitet på grunnlendt mark. Trærne ble felt og kappet i ca en meter lange kubber som ble margkløyvd. Hvert enkelt årsskudd ble identifisert og målt i marginen i stokken, på grunnlag av en liten luftlomme som blir sittende igjen under hver toppknopp (Bilde 1). Alderen langs marginen ble kontrollert ved å telle årringer i brysthøyde og rotavskjær eller på andre steder langs stammen der det var tvil. Det ble også registrert om årsskuddet var fra normalt toppskudd eller fra gankvist.

Dette gav oss data som er brukt i to manuskripter som er innsendt til internasjonalt tidsskrift med fagfellevurdering. I den første har vi undersøkt hvorvidt boniteten hadde endret seg over tid i hvert bestand og om endringen, som er påvist før, kan forklares ut fra endring i klimatiske forhold og økningen i karbondioksid, CO_2 i atmosfæren. Skogfrøverket skaffet oss data for konglesanking og frøsalg slik at vi kunne identifisere og kvantifisere effekten av sterk blomstring og kongleproduksjon i forbindelse med frøår. Analysene av data er beskrevet i artiklene og tas ikke med her.

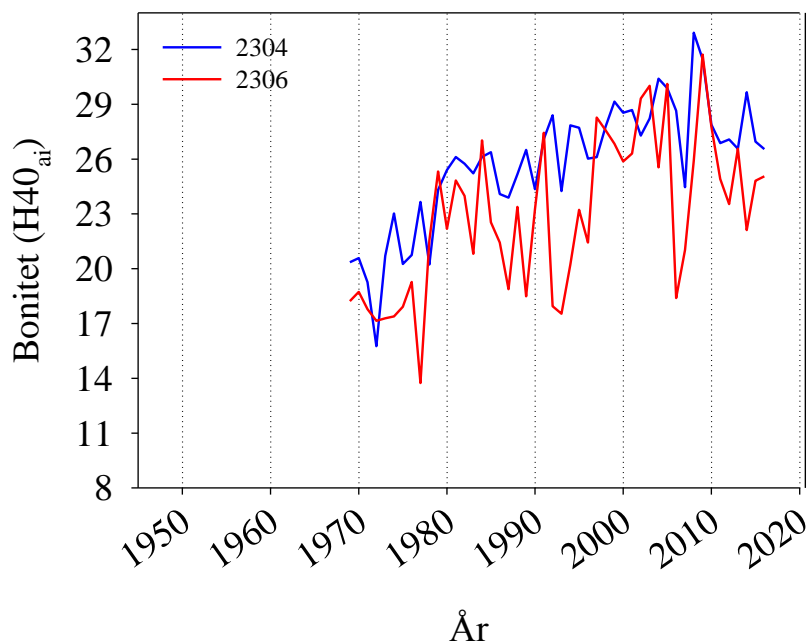
Margkløyvingen gjør at hele marginen blir synlig og knappene posisjon vises godt. I trær i god vekst var det derfor enkelt å finne grensene mellom årsskuddene. Fra toppen og nedover mot brysthøyde skulle kronologien være svært sikker. Kronologien ble også kontrollert ved å telle årringer i stubbeavskjær, brysthøyde eller andre høyere opp ved behov. Stubbeavskjæret varierte noe i høyde slik at alder der ikke representerer sann totalalder. Dette kan gi litt feil i forholdet mellom totalalder og overhøyde, men påvirker ikke den aldersuavhengige boniteten såfremt kronologien regnet fra toppen er riktig. Figur 1 viser det aritmetiske middelet av høyden i hvert bestand i forhold til anslått totalalder fra alder i stubbehøyde og høyde på stubben. År hvor det mangler data fra et eller flere trær på grunn av variasjon i stubbehøyde er ikke tatt med. De svarte linjene er overhøyde for G26 og G14 regnet med Sharma m.fl. (2011) modell 1. De fire bestandene 2304, 2306, 4969 og 4978 har vokst dårligere enn modellen for G26 i starten, men i motsetning til modellen viser disse bestandene ingen reduksjon i

høydeveksten ved større alder og høyde. Også de plantede trærne i bestand 2562 viser en mer rettlinjert vekst enn modellene for G14 og G26. Men i bestand 2552 der veksten ble dårligere da bestandet var vel 30 år gammelt noe etter 1970, har høyden fulgt en utvikling som samsvarer bedre med modellene.



Figur 1. Aritmetisk middel av høydene for prøvetrærne mot beregnet totalalder for ulike bestand. Sorte linje er forventet overhøyde (G26, heltrukket og G14 stippet) beregnet med modell 1 i Sharma m.fl. (2011).

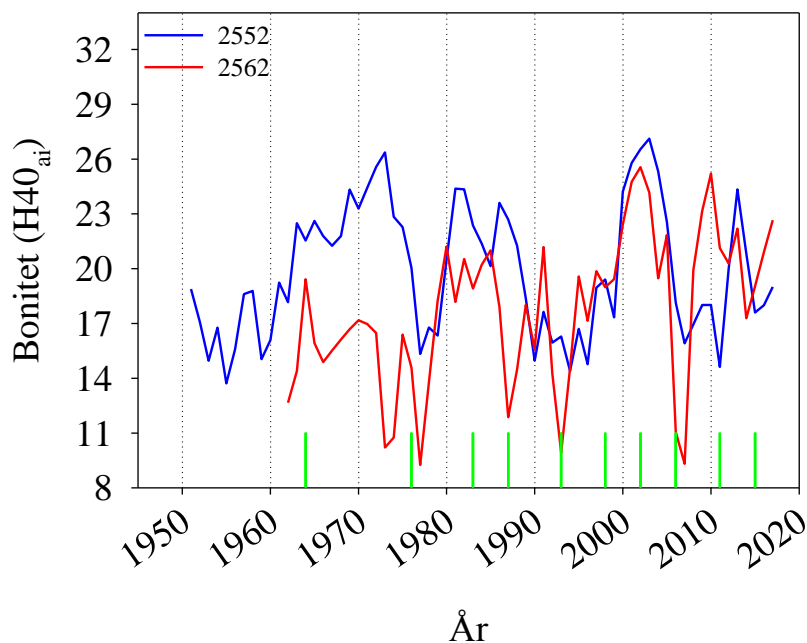
Vi har regnet om høydeveksten i hvert år til en bonitetsverdi med bruk av en matematisk omarbeiding av funksjon 15 i Sharma m. fl. (2011). Denne ble valgt fordi den har en enkel analytisk løsning for aldersuavhengig bonitet og fordi grunnfunksjonen den bygger på er Strand (1964) som Tveite (1977) også brukte.



Figur 2. Høydeveksten i hvert år regnet om til aldersuavhengig bonitet ($H40_{ai}$) i bestand 2304 (middel av seks trær) og 2306 (middel av fire trær). Grønne søyler markerer gode frøår.

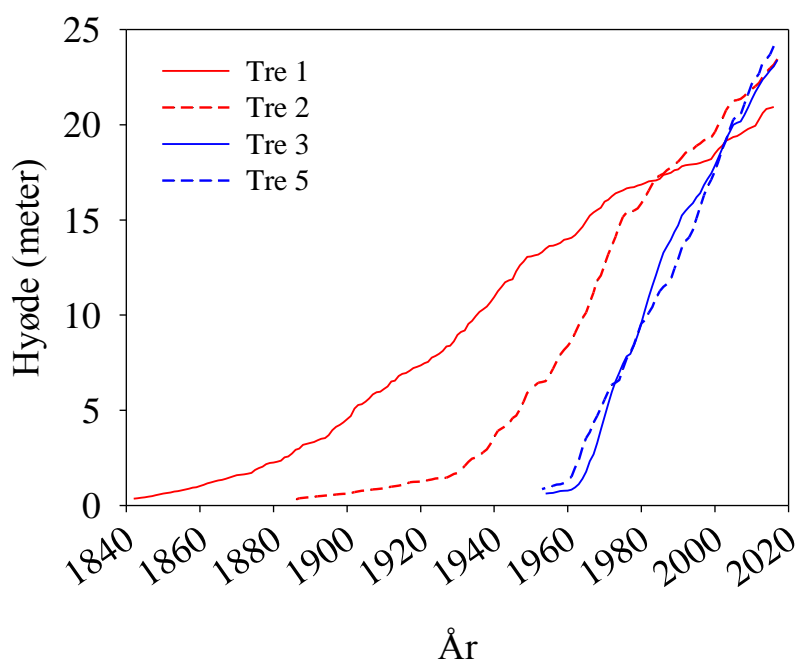
Bestand 2304 og 2306 lå på samme elveslette ca 100 meter over havet. I begge bestand viste $H40_{ai}$ en signifikant lineær trend oppover, med henholdsvis 16,5 og 19,0 cm per år. Avstand ned til grunnvannsspeilet var liten og lite variabel i bestand 2304, og jorda var mer finkornet enn i 2306. Dette er sannsynligvis forklaringen på at tørkeår, som 1975-76 og 1992 har gitt mindre nedgang i $H40_{ai}$ i bestand 2304 enn i 2306. Begge bestand hadde tilsig av næring fra omkringliggende jorder. I en regresjonsanalyse var det bare pCO_2 som gav signifikant utslag. Økningen i pCO_2 ble beregnet til å heve $H40_{ai}$ med 6,7 meter fra 1973 til 2015.

Klimavariabler som månedlig nedbørsum, middeltemperatur, eller temperatur- og nedbørsum frem til første august forklarte ingenting av variasjonen mellom år, eller trenden over tid, i disse to bestandene i lavlandet med god tilgang på næring og vann.



Figur 3. Høydeveksten i hvert år regnet om til aldersuavhengig bonitet ($H40_{ai}$) i bestand 2552 (middel av seks trær) og 2562 (middel av tre trær). Grønne søyler markerer gode frøår.

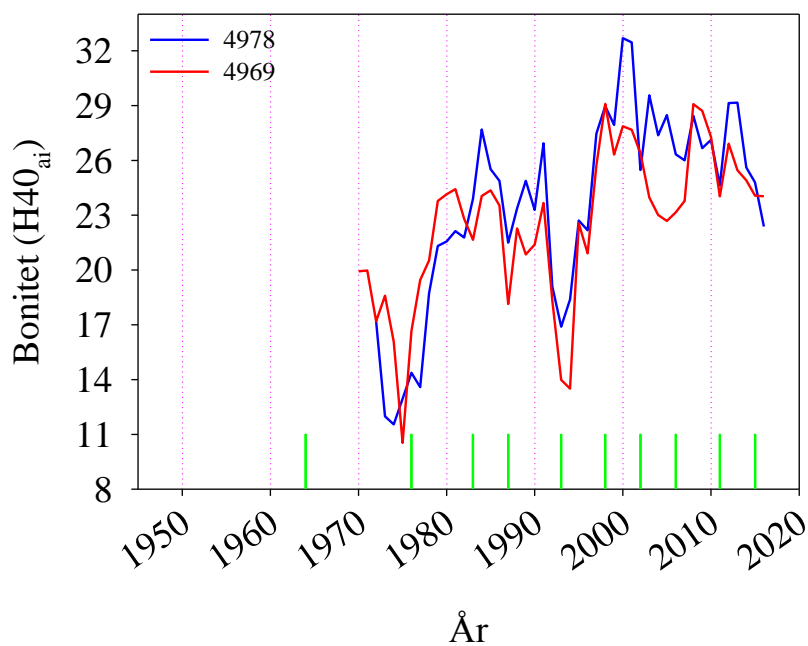
Bestand 2552 og 2562 lå på en annen bergrunn, rombeporfyr/latitt som var sterkt oppsprukket. Den blir regnet som tørkeutsatt. Den har også en annen kjemisk sammensetning enn granitten i nedbørsfeltet til bestand 2304 og 2306. Variasjonen i jorddyb og avstand til grunnvannspeilet var mye større i 2552 og 2562 enn i bestand 2304. I bestand 2562 var det ingen økning i $H40_{ai}$ over tid. Selv i tre nummer 4 som stod i nærheten av et lite tjern, slik at det må ha hatt ganske jevn vanntilgang selv i tørkeår, var der ingen øking i $H40_{ai}$. I regresjonsanalysene gav lite nedbør i april signifikant negativt utslag i bestand 2552, mens kombinasjonen av mye nedbør og høy temperatur i mai gav positivt utslag. Men disse variablene forklarte bare 6 prosent av årsvariasjonen i $H40_{ai}$. Atmosfærens CO_2 -konsentrasjon, pCO_2 gav ikke signifikante utslag, hverken i seg selv eller i kombinasjon med klimavariabler. De store svingningene fra år til år som en ser i Figur 3 ble derfor i liten grad forklart med forklaringsvariablene i analysen. I bestand 2562 derimot, viste $H40_{ai}$ en svakt signifikant økning, beregnet til 2,5 meter $H40_{ai}$, fra 1965 til 2015. Der gav kombinasjonen av mye nedbør og varme i mai positivt utslag. pCO_2 hadde også en positiv effekt som var størst der avstanden til grunnvannspeilet var stor. Den beregnede økningen i $H40_{ai}$ som følge av endringen i nedbør, temperatur og pCO_2 fra 1965 til 2015, var 2,1 meter, slik at det meste av tidstrenden ble forklart med signifikant mer nedbør og økt temperatur i mai og økt pCO_2 . To av trærne i bestandet viste seg å være fra mye eldre naturfor yngelse, sannsynligvis etter plukk- eller gjennomhogster. Det ene var 175 år i stubbeavskjæret, det andre var 131 år. Figur 4 viser høydeutviklingen i disse to sammen med to plantede trær i samme bestand. Tre 1 og 2 brukte 23 og 36 år på å vokse fra stubbehøyde (30 cm) til 1,3 meter. Høydeutviklingen i disse to naturforyngede trærne samsvarer bra med målt høyde og høydetilvekst i Landsskogtakseringens første takst i Vestfold i 1922. Da brukte trærne i gjennomsnitt 22 år på å vokse fra stubbeavskjær til brysthøyde, og ca 70 år for bli seks meter høye.



Figur 3. Høyder for tre 1,2,3,4 i bestand 2562. Tre 1 og 2 er fra gammel naturforyngelse, tre 3 og 5 er fra planting.

Disse to trærne ble ikke brukt i analysene av tidstrendene for dette bestandet. Dette fordi vi ikke kan utelukke at langvarig undertrykking i ungdomsfasen har hatt en negativ virkning på høydeveksten senere i treets liv.

Bestand 4969 og 4978 lå i ca 300 meters over havet på morenejord.



Figur 4. Høydeveksten i hvert år regnet om til aldersuavhengig bonitet ($H40_{aj}$) i bestand 4978 (middel av fem trær) og 4969 (middel av fem trær). Grønne søyler markerer gode frøår.

I bestand 4669 var tidstrenden i $H40_{ai}$ 19,5 cm per år for perioden 1973-2015, det vil si en økning på 8,2 meter. I regresjonsanalysen gav pCO_2 signifikant positiv effekt. Høy temperatur i april hadde signifikant negativ effekt, mens nedbørrik og varm mai hadde signifikant positiv effekt. Det var også positive effekter av nedbørsum i juni og juli, og for sistnevnte var effekt størst der avstanden til grunnvannet var størst. Klimavariablene og pCO_2 forklarte 39 prosent av årsvariasjonen i $H40_{ai}$ dette bestandet. Både pCO_2 og nedbøren i juni og juli har økt signifikant i denne perioden, mens temperaturen i april har økt signifikant. Den beregnede effekten av endringen i disse forklaringsvariablene tilsvarte 19,7 cm $H40_{ai}$ per år, eller 8,3 meter for hele perioden. Det betyr at endring i de klimatiske vekstfaktorene og pCO_2 forklarte hele endringen i høydevekst i dette bestandet. Men like fullt er der mye uforklart variasjon fra år til år, med svært store fall i veksten i de kjente tørke- og frøårene på 1970 og 1990 tallet.

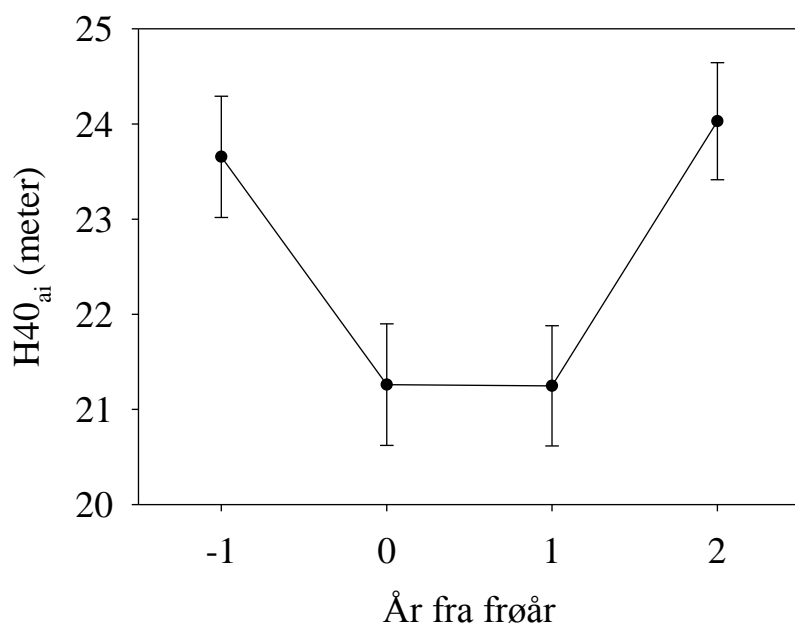
I bestand 4978 vart tidstrenden i $H40_{ai}$ 30 cm per år i perioden 1974 til 2015. I datamaterialet er det inkludert et tre som var fra naturlig forhåndsgjenvækst etablert kring 1950 – da dette ikke viste tegn til langvarig veksthemming i starten. Den lineære tidstrenden i perioden 1974 til 2015 var 30 cm per år. Det gir en økning i $H40_{ai}$ på 12,2 meter i perioden.

Regresjonsanalysen viste også her en sterk effekt av pCO_2 , men der var også et samspill med vekstsesongens lengde, slik at effekten av pCO_2 var størst i år med lang vekstsesong. På samme måte som i bestand 4969, var det en negativ effekt av høy temperatur i april, og denne effekten var størst der avstanden til grunnvannet var stor. Det var også negative effekter av temperaturen i juli året før og av temperatursummen i samme år. Totalt forklarte klimavariablene og pCO_2 44 prosent av årsvariasjonen i $H40_{ai}$ i dette bestandet. Den beregnede effekten av endringene i disse forklaringsvariablene fra 1974 til 2015 var 11,9 meter. Det vil si at nesten hele den beregnede lineære tidstrenden i $H40_{ai}$ kan forklares med endringer i nedbør, temperatur og pCO_2 .

For å undersøke om historisk svovel- og nitrogendeposisjon kunne forklare noe av variasjonen i $H40_{ai}$ beregnet vi residualverdier fra regresjonsanalysene korrelert med årlige data for svovel- og nitrat-konsentrasjon i Grønlandsisen (Geng m.fl. 2014). Denne nylig publiserte tidsserien går tilbake til 1776, men ikke lenger frem enn til 2006.

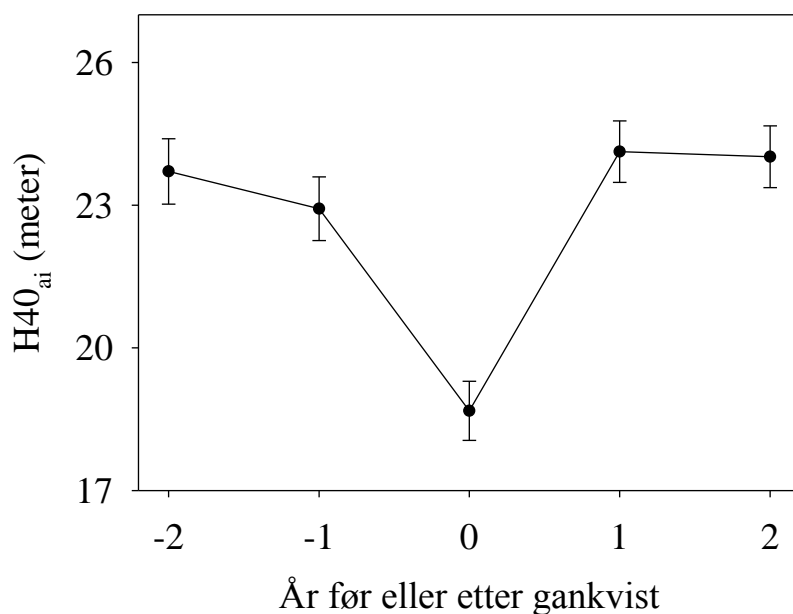
Svovolkonsentrasjonen (SO_4) i Grønlandsisen var korrelert med konsentrasjonen i nedbøren på et IPC-Forest overvåkingfelt i Lardal, men NO_3 var ikke like godt korrelert. Derfor har vi ikke forsøkt å beregne historisk deposisjon i Lardal med data fra Grønlandsisen, men bare brukt sistnevnte i en enkel korrelasjonsanalyse mot residualverdiene for $H40_{ai}$ for hvert bestand. Disse korrelasjonsanalysene viste at SO_4 konsentrasjonen i Grønlandsisen i samme år eller året før, var svakt, men signifikant negativt korrelert med residualene for $H40_{ai}$ i bestand 2304, 2306 og 4978. NO_3 konsentrasjonen i isen i samme år eller året før, var svakt, men signifikant positivt korrelert med residualene i bestand 2552 og negativt i bestand 4969 og 4978.

Frøår reduserer høydeveksten. Middelerverdier av $H40_{ai}$ året før frøåret, i selve frøåret og to år etter, ble beregnet fortrær eldre enn tretti år som må antas å kunne ha betydelig konglesetting. Middelerverdier for $H40_{ai}$ for disse årene er vist i Figur 6.



Figur 5. Virkning av frøår på standardisert høydevekst ($H40_{ai}$) i gran. Data fra 31 trær fra seks bestand i Lardal når trærne var minst tretti år gamle.

Frøår førte til at $H40_{ai}$ gikk ned med ca 3,5 meter fra året før frøret, og i holdt seg der i ett år for så å ta seg opp igjen til samme nivå som før frøåret.



Figur 6. Virkning av toppskader/gankvist på beregnet $H40_{ai}$ bonitet. År 0 er året som har gankvist. Middeltall for 31 trær.

Når toppen blir skadet vil vanligvis en av de øverste greinene overta som topp. Fordi sideskuddene er kortere enn toppskuddet får år med slike skader noe lavere $H40_{ai}$ verdier enn år som er fra normale toppskudd. Av de 28 trærne som var plantet hadde 21 hatt fra en til syv toppskader som hadde gitt opphav til gankvist. Dette tyder på at noen trær er mye mer utsatte for å få toppskader/brekk enn andre. I de plantede trærne målte vi lengden av 1558 årsskuddene, av disse hadde 64 gankvist. For årsskudd uten skade var $H40_{ai}$ i gjennomsnitt 22,1 meter, mens i år med skade var den 16,9 meter. Differansen er 5,1 meters som multiplisert med skadefrekvensen gir en total nedgang i $H40_{ai}$ på grunn av toppskader på 0,21 meter eller 0,9 prosent.

Her har vi benyttet funksjon 15 i Sharma m.fl. (2011) mens skogbruksplanen har brukt Tveite (1977), slik vi også gjorde i Kvaalen m.fl. (2015). Tabell 5 viser verdier bonitet etter skogbruksplan, bonitet etter høyde og brysthøydealder i 2007, og aldersuavhengig bonitet for perioden 2008-2014 beregnet som i Kvaalen m.fl. (2015) og med vår omarbeiding av Sharma m. fl. (2011).

Tabell 1. Bonitet for hvert bestand beregnet med ulike metoder. H40-plan er bonitet fra skogbruksplanen. T13_2007 er prøvetrærnes brysthøydealder i 2007, Ho_2007 er den tilhørende aritmetiske middelhøyden. H40t13_07 er bonitet etter Tveite (1977) på grunnlag av brysthøydealder og høyde i 2007, H40ait_08_14 er aldersuavhengig bonitet interpolert fra Tveites modell, ny gammel er differansen mellom disse to. H40f15 er bonitet etter høyde og brysthøydealder etter funksjon 15, H40aif15 er aldersuavhengig bonitet etter funksjon 15 for perioden 2008-2014.

Bestandsnr.	H40-plan	T13_2007	Ho_2007	H40t13_07	H40ait_08_14	Ny-gammel	H40f15	H40aif15
2304	23	47	24.5	22.2	29.9	7.6	21.9	28.9
2306	23	48	22.0	19.7	26.3	6.7	19.4	26.1
2552	17	67	25.5	19.0	20.9	1.9	18.0	19.0
2562	14	55	18.9	15.4	21.6	6.2	15.2	21.3
4969	17	46	20.8	19.0	26.6	7.6	18.8	26.6
4978	20	45	21.7	20.3	27.6	7.3	20.1	27.3
Gjennomsnitt	19	51	22.2	19.3	25.5	6.2	18.9	24.9

Vi ser at i gjennomsnitt er boniteten målt på prøvetrærne i 2007 og regnet med de to funksjonene nesten identisk med skogbruksplanens bonitet. De to funksjonene gir også ganske like verdier for bonitet for perioden 2008-2014. Unntaket er i bestand 2552 der H40ait_08_14 viser en betydelig større endring fra «gammel bonitet» enn H40aif15.

Diskusjon delmål A og B

I de fire bestandene der det var en sikker økning i $H40_{ai}$ i løpet av de siste 50 år var der en signifikant effekt av pCO_2 . Den beregnede effekt av denne gassen, forklarte en stor del av bonitetsevingen i perioden. CO_2 konsentrasjonen påvirker både trærnes anatomi og biokjemi/fysiologi på flere vis. Fluksen av CO_2 inn gjennom spalteåpningene drives av diffusjon som er proporsjonal med differansen i konsentrasjon i lufta ute og inne i bladet/nåla; dess større differanse, dess større fluks. Spalteåpningene åpner for å ta inn CO_2 om morgenen og lukker seg mot kvelden. De kan stenges hvis det er mye CO_2 i lukkecellene som regulerer åpningen, eller hvis lukkecellen har lavt vannpotensial. Når CO_2 -konsentrasjonen i lufta øker vil derfor spalteåpningene være noe mindre, slik at mindre vann slippes ut samtidig som mer CO_2 diffunderer inn. Det er og velkjent at i nåler som er dannet i en atmosfære med høyt pCO_2 utvikler færre spalteåpninger (Kouwenberg m.fl 2003). Til sammen gjør dette at plantene får bedre vannhusholdning når pCO_2 øker. At dette faktisk skjer er påvist i svært mange arter, også i norsk gran (Giammarch m.fl. 2018). Økt pCO_2 i atmosfæren gjør også at CO_2 konsentrasjonen inne i cellene kan øke, noe som i prinsippet kan gjøre fikseringen av CO_2 i fotosyntesen mer effektiv (Zhu m.fl. 2008), spesielt ved høy temperatur. Det er derfor lite sannsynlig at økningen i pCO_2 fra 220 ppm før den industrielle revolusjon til 406 ppm i 2017 vil være uten virkning på veksten i skogstrær og andre planter. Men selv om flere fysiologiske forhold tilsier bedre vekst som følge av høyre pCO_2 er det ikke sikkert at dette i seg selv er årsaken til bedre høydevekst i våre materialer. Dette fordi endringene i pCO_2 over tid er sammenfallende med endringer i andre godt kjente vekstfaktorer, for eksempel nitrogendeposisjon. Men det at $H40_{ai}$ økte mye og viste liten årsvariasjon i bestand 2304 som

både hadde jevn tilgang på vann og sannsynligvis også svært god og balansert næringstilgang, taler for at det vi har observert er en reell effekt av $p\text{CO}_2$. Mathias & Thomas (2018) har påvist en kraftig økning i diameterveksten i rødgran (*Picea rubens*) i det østlige USA etter at det ble mindre sur nedbør i området som følge av «Clean Air Act», og finner statistisk belegg for at dette skyldes en kombinasjon av at nitrogendeposisjon og økt $p\text{CO}_2$ har positiv effekt på veksten, men disse effektene har først slått inn etter at den negative effekten av høye svovelutslipp har avtatt. Sigurdsson m.fl. (2013) tilførte CO_2 eksperimentelt til grantrær i tre år. Volumtilveksten økte med over 20 prosent, men ikke der det var for lite mineralnæring, noe forfatteren hovedsakelig tilskriver nitrogenmangel. Betydelig deposisjon av nitrogen gjennom flere tiår over sør Norge gjør det lite sannsynlig at det er nitrogenmangel som har gjort at trærne i bestand 2552 ikke har reagert på økt $p\text{CO}_2$. Dersom den manglende responsen skyldes næringsmangel er det mer sannsynlig at andre elementer enn nitrogen er sub-optimale i bestand 2552 og 2562. I et stort gjødslingsforsøk på 28 steder i Trøndelag er det nylig vist at tilleggs-gjødsling med fosfor, kalium, magnesium og mangan gav nesten dobbelt så stor tilvekstøkning som gjødsling med bare nitrogen (Holt Hansen & Kvaalen 2018). Nitrogen er derfor ikke alltid og alene det vekstbegrensende element i norsk skogsjord.

At klimavariablene som indikerer tørke vår og sommer, lite nedbør og/eller høy temperatur, gir lavere H40_{ai} verdier er som ventet fra flere tidligere studier (Mäkinen m.fl. 2002, Andreassen m.fl. 2003, Solberg m.fl. 2009). Men i to bestand var det også positiv effekt av kombinasjonen av høy temperatur og mye nedbør i mai. Dette er heller ikke uventet, fordi det gjør at skuddstrekningen kommer tidlig i gang. Dessuten har nok grana et betydelig høyere temperaturoptimum for vekst enn mange er klar over: Med svært nøyaktige målinger av høydeveksten gjennom sommeren fant Mork (1960) at veksten økte med temperaturen opp til minst 25 °C (målt de seks varmeste timene om dagen) der trærne hadde nok vann, men avtok allerede ved 15-16 °C der det var knapt med vann. Bergan (1994) brukte samme nøyaktige måleapparat og fant at optimumstemperaturen for strekningsvekst hos granplanter av Rana proveniens som vokste i drivhus i Troms var utrolige 33 °C. Begge resultater viser at det nok er sjelden at temperaturen under norske forhold er over optimum for granas vekst, når vanntilgangen er god. Når nedbørsummen frem til august har økt signifikant fra 1970 tallet til nå er det merkelig at H40_{ai} ikke har økt i bestand 2552 som ligger på oppsprukket rombeporfyr/latitt, en tørkeutsatt bergart. Dette kan tyde på at det er noe spesielt med næringstilgangen, eller de fysiske forholdene i jorda, der som gjør at H40_{ai} er uendret, selv om tilførsel av nitrogen har vært betydelig, svoveldeposisjonen har gått ned og $p\text{CO}_2$ opp.

Vi testet også effekten av kjente frøår, og disse reduserte H40_{ai} betydelig i selve frøåret og året etter. Skogfrøverkets data for frøinnsamling og salg tyder på at der har vært åtte meget gode frøår fra og med 1961 til og med 2006. Det vil si at det har gått i underkant av seks år mellom hvert godt frøår. Gran- og andre bartrefrø har høyt og svært spesifikt innhold av makro- og mikronæringsemner (Kvaalen m.fl. 2005). Produksjon av store mengder frø tapper derfor trærnes lager av mineralnæring. På mark som er generelt eller spesifikt næringsfattig, vil det ta kan lengre tid før trærne har bygd opp igjen næringsstatus etter gode frøår. Dette er kanskje en medvirkende årsak til at der ikke har vært en oppgang i H40_{ai} i bestand 2552 og bare svak oppgang i 2562 som begge ligger på næringsfattig berggrunn og stedvis svært tynt

jordsmonn. Den lavere veksten i og etter frøår medfører at en ved aldersuavhengig bonitering må ha en tilstrekkelig lang tilvekstperiode for å bonitere riktig, slik at effekten av frøår blir utjevnet til det normale på lengre sikt. Som nevnt går det vanligvis fem til ti år mellom gode frøår. Det skulle innebære at tilvekstperioden mellom to høydemålinger for aldersuavhengig bonitering i eldre skog også bør være fra fem til ti år.

Toppskader og gankvist vil også påvirke den beregnede $H40_{ai}$ -verdien og all annen bonitering. Reduksjonen i $H40_{ai}$ som vi beregnet ovenfor, 24 prosent i skadeåret, samsvarer svært godt med resultatene fra en undersøkelse i kvitgran (*Picea glauca*) i Kanada der vekstreduksjonen var 28 prosent (Nigh 2017). De fleste trær får en eller flere skader på toppskuddet i løpet av livet, men den totale underestimeringen av boniteten på grunn av toppskader vil i de fleste tilfeller være relativt liten. I år etter omfattende snøbrekk vil boniteten målt med vår metode kunne påvirkes betydelig med mindre en sørger for å velge boniteringstrær som er uten skader i måleperioden.

Avslutningsvis må det nevnes at vi har beregnet $H40_{ai}$ verdier med bruk av Funksjon 1 i Sharma m. fl. (2011) og med Tveite (1977). Disse vist gir de ganske like bonitetsverdier og vi har som før nevnt valgt å vise metoden med bruk av funksjon 15 i Sharma m.fl. (2011) som kan løses analytisk for $H40_{ai}$, selv om denne gir noe avvik fra funksjon 1 i Sharma m.fl. (2011) og Tveite (1977). Det er imidlertid en felles svakhet både med eldre modeller og alle de nye modellene som er utviklet i Norge, Sverige og Danmark de siste tiårene: De har lite data for trær under fem meters høyde. Da anslått bonitet er sterkt styrende for skogbehandlingen, for plantetetthet og anbefalt tretall etter ungskogpleie, bør det lages nye modeller som har betydelig større og bedre datagrunnlag i ung skog. Slike data finnes allerede fra skogstreforedlingen i de nordiske land, så oppgaven skulle la seg løse uten kostbar datainnsamling.

Delmål C og D

All skog i Lardal kommune, 277 km² ble laserskannet med høy oppløsning våren 2009. Hele Fritzøe Skoger (~500 km²) ble skannet med høy oppløsning høsten 2014, av dette arealet ligger 114 km² i Lardal. Dette gav gode høydedata på to tidspunkt med seks vekstsesonger i mellom hver måling. Begge disse takstene var såkalt «enkelttre-laser», hvor alle trær som ble detektert med laseren er lagt i en database med posisjon og estimert høyde og treslag (G, F, L).

Fritzøe Skoger i Lardal omfatter areal fra 50 til 600 moh og der er stor variasjon i topografi, jordsmonn, berggrunn og vanntilgang. Gran, furu og lauv er dominerende på henholdsvis 76, 19 og 5 prosent av arealet.

Fritzøe Skoger fremskaffet data fra sine skogbruksplaner til dette prosjektet. Bestandsgrenser var satt i planen i 1994 på grunnlag av flyfototolkning. Hvert bestand hadde bonitet fastsatt i 1994 på grunnlag av høydemåling og brysthøydealder da, eller på grunnlag av målinger av høyde og alder i en grundig prøveflatetakst i 250x500 meter rutenett fra 1974.

Fra arealet på de 114 km² valgte vi ut bestand der gran utgjorde minst femti prosent av volumet, og vi utelot ungskog i hogstklasse II som var for lav til å bli identifisert med laserskanningen. Hele skogarealet ble delt inn i 100 kvadratmeter store heksagon. Innen hvert heksagon ble det høyeste treet i fra laser-taksten 2014 trukket ut og knyttet til det samme treet i laser-taksten fra 2009. Det nest høyeste treet ble også funnet på tilsvarende vis. Etter definisjonen skal overhøydetrær være de hundre grøvste per hektar, dette for å få trærne mer spredd innen bestandet enn om man velger de høyeste som gjerne vil være klumpet sammen der vekstforholdene er best (Tveite 1977). Her ble de hundre høyeste per hektar brukt som kriterium fordi diameteren i lasertaksten er avledet av høyden og kronevidden og har dermed større tilfeldig variasjon. Oppdeling av hvert bestand i 100 kvadratmeter store heksagon sikret uansett god spredning av overhøydetrærne innen hvert bestand.

H40_{ail} ble regnet ut for hvert heksagon på grunnlag av høyden i 2008 og 2014 og ved å inkludere ett eller to overhøydetrær per heksagon. Det ble også foretatt en test av hvordan H40_{ail} ble påvirket av: (i) om overhøydetrærne hadde blitt klassifisert som gran i begge takstene, (ii) klassifisert som gran en gang, (iii) var de(t) høyeste uten hensyn til hvilket treslag de(t) var klassifisert som. Konsekvensen av å stille strenge krav, som (i) var at færre heksagon oppfyller kravene. Motsatt så vil lite strenge krav (iii) føre til inkludering av lauvskog og kanskje også heksagon med større målefeil slik at feilen på H40_{ail} øker. Vi kom til at utvalgs-kriterium (ii) ga rimelig balanse mellom disse to motstridene hensyn og ble følgelig brukt for å kalkulere middelverdien av H40_{ail} for hvert bestand.

I dette arbeidet, som i det ovenfor, har vi omarbeidet funksjon 15 i Sharma m. fl. (2011) for aldersuavhengig bonitering, fordi denne kan løses analytisk og gir dermed et matematisk bevis for selve konseptet, samtidig som den gjør utregningen mye raskere enn med den metoden vi brukte i Kvaalen m.fl (2015) som bygde på Tveite (1977) sin boniteringsfunksjon. Fordi de to funksjonene gir litt ulikt resultat har vi for hvert av de seks prøvebestandene brukte begge metoder for å regne ut bonitet på to måter; 1) på grunnlag av aritmetisk middel av brysthøydealder og høyde i 2007, og 2) med aldersuavhengig bonitering på grunnlag høydene i 2008 og 2014. I disse beregningene er de tre trærne fra naturlig foryngelse utelatt.

Delmål D, var å undersøke hvordan endringene i høydevekst, i forhold til skogbruksplanens bonitet, varierer med terrengforholdene. I tillegg til hogstklasse og bonitet fra skogbruksplanen ble det valgt ut topografi relaterte variabler fra 10x10 meter laser-basert terrengmodell og GIS data for edafiske faktorer:

1. Høyde over havet ble i 100 meters klasser.
2. Terrenghelling fra DTM ble reklassifisert til fem klasser, med like mange observasjoner i hver.
3. Aspekt, terrenget ble delt inn i åtte retninger, samt flatt terreng og hvert bestand ble tildelt den verdien som tilsvarte den hyppigst forekommende klassen.

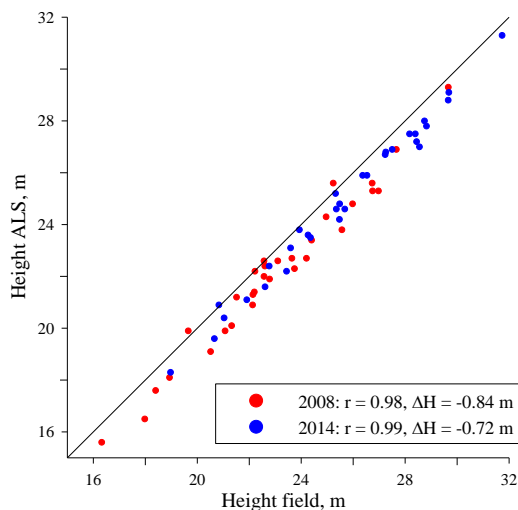
4. Dybde fra jordoverflaten til grunnvannsspeilet (DTW) ble modellert med data fra DTM etter metoder fra Murphy m.fl. (2007) og Ågren m.fl. (2014). DTW ble konvertert til en klassevariabel slik at der var like mange bestand innen hver klasse. Jordtype ble hentet fra NGU sine kvartærgeologiske kart og reklassifisert i fem klasser. 1) bart fjell samt grunt og usammenhengende jorddekke, 2) dyp morene, 3) dyp sand eller grus (elve- eller breavsetninger), 4) dyp marine sediment, 5) dyp myr/torv.
5. Berggrunnsdata ble hentet fra NGU sitt digitale kart. Innen studieområdet er der fire typer intrusive bergarter: Granitt/granodioritt, dioritt/monzodioritt, syenitt/kvartssyenitt og en vulkansk bergart; rombeporfyr. Rombeporfyr er oppsprukket og veldrenert slik at skogen der blir tørkeutsatt. Derfor ble berggrunnen også delt i to klasser «fuktig» (intrusive bergarter) og «tørr» (rombeporfyr).

For å kontrollere de lasermålte $H40_{ai}$ -verdiene ble disse sammenlignet med $H40_{ai}$ målt på de 31 prøvetrærne for vekstperioden 2008-2014. For å undersøke om seksårsperioden fra og med vekstsesongen 2008 til og med 2014 var uvanlig i beregnet vi middelverdiene for seksårsperioder i de 31 prøvetrærne bakover fra og med 2007.

Resultater delmål C og D

Kobling av overhøydetrærne ved to tidspunkt

Den parvise koblingen av overhøydetrærne i 2014 med 2009 var generelt vellykket (Figur 1). I de fleste tilfeller var avviket mellom posisjonene mindre enn ett par desimeter og denne distansen var liten sammenlignet med distansen mellom par. Høydene på trærne på de to tidspunktene var også sterkt korrelert, men som ventet var høyden i 2014 større. De 31 prøvetrærne ble også med stor sikkerhet, korrekt gjenfunnet i takstene fra 2009 og 2014. De felte trærne var koordinatbestemt med differensiell GPS og deres posisjon kunne sammenholdes med posisjonene fra takstene direkte i kartet. Ingen av prøvetrærne kunne være koblet til feil tre i taksten. De tilbakemålte høydene på de felte trærne for 2008 (taksten i 2009) var godt korrelert ($r=0.98$) og tilsvarende for 2014 var enda bedre ($r=0.99$) (Figur 2). Men høydene fra lasermålingen var systematisk 84 cm lavere i for høyden i 2008 og 72 cm lavere i 2014. Dette på grunn av at grantoppen dekker for lite areal til å gi et laserekko.

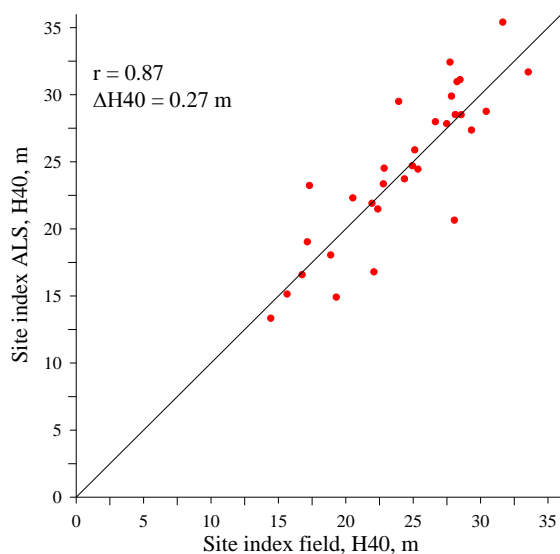


Figur 7. Lasermålte høyder på y-aksen (røde er 2008, blå er 2014) mot feltmålte høyder på de samme trærne etter at disse ble felt i 2016 og 2017 og tilbakemålt til 2008 og 2014.

Kontroll av lasermålte høyder og bonitet mot feltmålinger

De lasermålte bonitetsverdiene $H40_{ail}$ var også meget godt korrelerte med de feltmålte verdiene for perioden 2008-2014 (Figur 3). Men det var et lite systematisk avvik, - $H40_{ai}$ var 24,25 meter, mens lasermålte $H40_{ail}$ var 24,52 meter. Avviket skyldes at høydemålingene i 2009 som nevnt gav litt større underestimering av høydene enn i 2014 slik at det ble en falsk høydevekst på 13 cm som gav opphav til en 22 cm høyere verdi for $H40_{ail}$ enn for $H40_{ai}$.

I de 31 prøvetrærne hadde seksårsperioden 2008-2014 høyere $H40_{ai}$ verdier enn seksårsårsperiodene fra 1967 til og med 1996, men den skilte seg ikke fra periodene 1996-2001, og 2002-2007.



Figur 8. Bonitet målt med flybåren laser (site index ALS H40, i teksten kal $H40_{ail}$) og bonitet målt på de samme trærne (site index field, kalt $H40_{ai}$ i teksten).

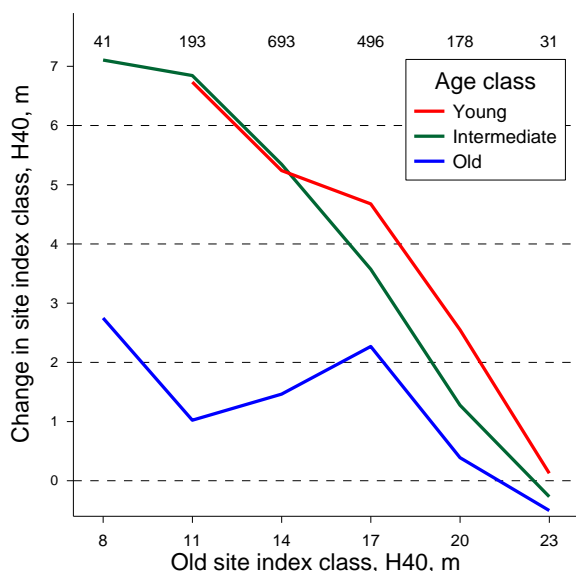
Virking av kriterier for utvalg av overhøydetrær

For å beregne $H40_{ail}$ i hvert bestand ble det brukt det høyeste treet innen hvert heksagon, gitt at dette var klassifisert som gran på ett tidspunkt. Der dette kravet var innfridd var $H40_{ail}$ 19,4 meter og 99 prosent av bestandene kom med. Der det ble ignorert, slik at det høyeste treet ble valgt uten hensyn til treslag, var $H40_{ail}$ betydelig lavere, 18,6-19,1 meter (Tabell 2), men da kom hundre prosent av bestandene med. Når kravet var enda strengere, overhøydetreet skulle være klassifisert som gran på begge tidspunkt «økte» $H40_{ail}$ til 20,1 meter, men 22 prosent av bestandene falt ut. Strengere krav til datakvalitet gav høyre bonitetsverdier, men samtidig ble større areal utelatt. $H40_{ail}$ verdien som ble kalkulert på grunnlag av de ulike utvalgskriteriene for overhøydetrærne var sterkt korrelerte med hverandre ($r=0,94-0,97$) (Tabell 2). Men de var bare moderat korrelert med $H40_p$ satt i skogbruksplanen ($r=0,48$). Imidlertid ser en fra

Tabell 2. Virkning av å bruke ett eller to overhøydetrær innen hvert heksagon og krav til at disse skulle være gran på ingen, ett eller begge tidspunkt. Resultatene gjelder bestand som hadde (i) granvolum > 50% av totalvolum, (ii) gammel bonitet, $H40_p > 6$ meter, og (iii) hogstklasse III-V. Bonitetsverdiene er vektet med bestandsareal. I den første kolonnen betyr 1-2 to trær hvis der var to og ett hvis ikke. Tabellen gir verdiene for ny ($H40_{ail}$) og gammel bonitet ($H40_p$), arealet som ble dekket ved hvert utvalgskriterium og korrelasjonen mellom ny og gammel bonitet, samt middel korrelasjonen mellom $H40_{ail}$ regnet med de 8 ulike kriteriene. Det utvalgskriteriet som ble valgt er indikert med uthevet skrift.

Oh trær per heksagon	Krav til treslag	Ny bonitet ($H40_{ail}$)	Gammel bonitet ($H40_p$)	Diff $H40_{ail}$ - $H40_p$	Areal dekning %	Bestand inkludert %	Korrelasjon med $H40_p$	Korrelasjon med andre $H40_{ail}$
1	Ingen	19.1	14.8	4.3	100	100	0.57	0.96
1	Gran I begge	20.1	15.2	4.9	81	78	0.57	0.95
1	Minst 1 gran	19.4	14.8	4.5	100	99	0.55	0.97
1-2	Ingen	18.6	14.8	3.8	100	100	0.57	0.96
1-2	Begge gran	20.2	15.6	4.7	57	55	0.56	0.95
1-2	Minst 1 gran	18.8	14.8	4	100	99	0.56	0.97
2	Bare gran	20.5	15.6	4.9	50	47	0.57	0.94
2	Minst 1 gran	19	14.9	4.1	99	97	0.57	0.97

Figur 9 viser at differansen mellom $H40_{ail}$ og $H40_p$ var størst i bestand som i planen var satt til G17 og nedover og mindre for bestand på G20 og høyere. For de 1632 bestand som oppfylte kriteriet til utvelgelse av overhøydetrærne var gjennomsnittlige arealvektet differansen mellom $H40_p$ og $H40_{ai}$ 4,6 meter. Det tilsvarende tall for produksjonsevne skulle etter skogbruksplanen være 5,94 kubikkmeter per hektar og år, mot 9,41, regnet etter $H40_{ail}$.



Figur 9. Arealvektet gjennomsnittlig differanse mellom ny og gammel bonitet i forhold til gammel bonitet i skogbruksplanen. Rød linje gjelder hogstklasse III, grønn er IV, og blå er hogstklasse V.

Avviket mellom skogbruksplanens bonitet og $H40_{ai}$ varierer med edafiske faktorer

Tabell 3 viser styrken (den empiriske korrelasjonskoeffisienten, R^2) i forholdet mellom de ulike edafiske forklaringsvariablene og $H40_p$, $H40_{ai}$, samt ${}_dH40$, som er differansen mellom $H40_p$ og $H40_{ai}$. Alder alene forklarte 14 prosent av variasjonen i ${}_dH40$ og differansen mellom gammel og ny bonitet var størst i ung og middelaldret skog. Høyden over havet forklarte bare 3,3 prosent av variasjonen i ${}_dH40$ og differansen var størst i midlere høydelag. Terrenghelling forklarte 13 prosent av variasjonen ${}_dH40$, med størst differanse i bratt terreng. Hellingsretning forklarte 3 prosent av variasjonen i ${}_dH40$. Økningen var størst i bestand vendt mot øst, sørøst, sør og sørvest. DTW, avstand til grunnvannspeilet, forklarte 7,3 prosent av variasjonen i den gamle boniteten $H40_p$, mot 1,8 prosent for den nye $H40_{ai}$. DTW forklarte 13 prosent av differansen ${}_dH40$. Jordklasse forklarte 8,9 prosent av variasjonen i ${}_dH40$, med størst differanse på grunn jord, liten til moderat på sedimenter, dype morener og torv. Klassifiseringen av berggrunnen i tørkutsatt og ikke tørkutsatt, forklarte 6,3 prosent av variasjonen i ${}_dH40$, med størst endring på den tørkutsatte rombeporfyren, som også er næringsfattig.

Tabell 3. Styrken i de ulike forklaringsvariablenes relasjon til gammel bonitet ($H40_p$) ny bonitet ($H40_{ai}$) og differansen mellom disse to $dH40$. Styrken er angitt med den empiriske korrelasjonskoeffisienten R^2 for en enveis variansanalyse-modell for hver forklaringsvariabel. Utvalget av bestand er det samme som i Figur 9.

Forklaringsvariabel	$H40_p$	$H40_{ai}$	$dH40$	Tolkning
Gammel bonitet ($H40_p$)	-	0.36	0.14	Størst økning i bestand av middels og lav bonitet
Hogstklasse	0.075	0.21	0.14	Størst økning i hogstklasse III og IV
Høyde over havet	0.36	0.21	0.033	Størst økning i midlere høydelag 300-400 m.o.h
Hellingsklasse	0.006	0.0079	0.13	Størst økning i bratt terreng
Hellingsretning	0.016	0.088	0.030	Størst økning i bestand vendt mot øst-sør-vest, minst i fl.
Avstand til grunnvannsspeil (DTW)	0.073	0.018	0.13	Størst økning ved stor avstand til grunnvannsspeil
Jordklasse	0.19	0.034	0.089	Størst økning for grunn jord, mindre for dype sedimentære jordarter og torv
Tørkeutsatt berggrunn	0.001	0.037	0.063	Størst økning på tørkeutsatt og næringsfattig berggrunn

Har seksårsperioden 2009-2014 vært uvanlig?

Veksten vil alltid variere fra år til år og i perioder. Det kunne tenkes at de seks årene fra og med sommeren 2009 til og med sommeren 2014 representerte en uvanlig god tilvekstperiode. Dette er kontrollert ved å regne ut middelboniteten for seksårsperioder fra og med 2007 og bakover med $H40_{ai}$ i prøvetrærne.

Table 4. Middelerverdi av $H40_{ai}$ for 6-års perioder. Tallene er fra de 31 felte prøvetrærne, men vi utelukket tre av dem fordi de var fra gammel naturlig foryngelse med sannsynlig effekt av undertrykking på høydeveksten.

6-års periode	1967-72	1973-78	1979-84	1985-90	1991-96	1997-02	2003-08	2009-14
$H40_{ai}$	18	17	22	21	20	25	24	25

$H40_{ai}$ har økt. Det er de tre siste seksårsperiodene på 2000 tallet som skiller seg ut ved at boniteten er høyere enn på 1970, 80 og 90 tallet. Men som vi har sett ovenfor gjaldt ikke dette i bestand 2552.

Diskusjon delmål C og D

Laserskanningen med høy romlig oppløsning ga data som gjorde det mulig å måle høydeveksten på hvert enkelt tre. Koblingen av data fra taksten våren 2009 og høsten 2014 virket å være generelt korrekt og var helt sikkert korrekt for de 31 felte prøvetrærne. Korrelasjonen mellom bonitet fastsatt med lasermålte og bakkemålte høyder var svært god. Det lille avviket på 22 cm i $H40_{\text{aill}}$, som tilsvarer ca 1 prosent, skyldes at laserne har hatt litt ulike penetrering i kronetaket i de to takstene som gir opphav til «falsk høydevekst». Dette skal kunne korrigeres. Både $H40_{\text{aill}}$ og $H40_{\text{ai}}$ representerer bonitering på grunnlag av tilbakemålt høydevekst, som ikke er helt det samme som overhøydevekst, fordi hvilke trær som danner overhøydetrærne kan endre seg noe fra en måling til den neste. Tveite (1977) undersøkte forsøk i kulturskog og naturskog. I førstnevnte var forskjellen svært liten. I naturskog var forskjellen betydelig større. Å bonitere på grunnlag av tilbakemålte høyder krever selvsagt at det enkelte tre kan identifiseres, slik som her. Da kan en også kontrollere om boniteringstrærne har avvik som indikerer skader i toppen og derved gjør dem uegnet.

Avviket mellom skogbruksplanens bonitet og $H40_{\text{aill}}$ var ca 5 meter, og 4,6 meter når differansen ble vektet for bestandsareal. I ung og middelaldret skog var avviket noe større, vel 5 meter. Det stemmer ganske godt overens med resultatet i pilotprosjektet (Kvaalen m.fl. 2015), selv om avviket er ca 1 meter mindre enn i de atten bestand som da ble undersøkt. Som det framgår av Tabell 2 ville avviket mellom skogbruksplanen og $H40_{\text{aill}}$ økt fra 4,5 til 4,9 meter hvis kravet til overhøydetrærne var at de skulle være identifisert som gran på begge tidspunkt. At vi har funnet et noe mindre avvik mellom skogbruksplanen og kan delvis skyldes at bestandene som ble undersøkt i Kvaalen m.fl. (2015) var renere granbestand. En annen grunn kan være at vi har brukt Sharma m.fl. (2011) funksjon 15 til boniteringen. Denne bygger på materiale både fra Landsskogtakseringen og fra NIBIO sine faste produksjonsflater og har også med data fra 2000-tallet da høydeveksten påviselig har økt. Både funksjon 15 og de andre som ble beregnet av Sharma m. fl. (2011) gir noe mer utholdende høydevekst enn Tveite sin funksjon. Dette medfører at en gitt høydevekst i høy skog vil gi litt lavere bonitetsverdier med funksjon 15 enn når en bruker Tveite sin funksjon slik vi gjorde i Kvaalen m.fl. (2015). Avvikene mellom skogbruksplanen og ny bonitet ville derfor blitt noe større dersom vi her hadde brukt samme metode som i Kvaalen m.fl. (2015), men resultatene ville ikke blitt mye endret.

Selv om de edafiske faktorene hver for seg forklarte relativt lite av den geografiske variasjonen i differansen mellom bonitet i skogbruksplanen og ny bonitet, så var der klare utslag av flere faktorer som er relatert til hvor tørkeutsatt skogen er; med størst økning på grunn jord, og der avstanden til grunnvannsspeilet var stor. Analysene av de årlige data fra de 31 prøvetrærne viste også effekter av tørr og varm vår, og lite nedbør om sommeren gav redusert vekst. Mer nedbør gir derfor jevnere og bedre vekst. Begge studiene underbygger således at tørke er en årsak til redusert vekst i dette skogområdet. Men som før nevnt fant vi den jevneste oppgangen i $H40_{\text{ai}}$ i bestand 2304 som hadde svært god og jevn tilgang både på vann og næring. I det mindre næringsrike og mer tørkeutsatte bestand 2552 fant vi derimot ingen økning i boniteten og nedbør og temperaturforhold forklarte lite av variasjonen fra år til år. Hvis nitrogennedfall og mer nedbør var hovedårsaken til at boniteten har økt så skulle

resultatet vært motsatt, konsistent trend oppover i bestand 2552 og ingen trend i 2304 som hele tiden har hatt nok av både vann og næring. Der er således en viss motsetning i resultatene fra analysen av årlig variasjon i seks bestand og hvordan differansen mellom gammel og ny bonitet varierer med edafiske faktorer innen hele området. Skal en få mer presise svar på hvilke årsaksfaktorer som har betydd mest, krever det lengre tidsserier fra bestand på ulikt jordsmonn og ulik berggrunn, samt undersøkelser av årsvariasjonen i stabile isotoper i veden som kan indikere endringer i vannhusholdning og næringstilgang (Kennedy m.fl. 2002, Thomas m.fl 2013).

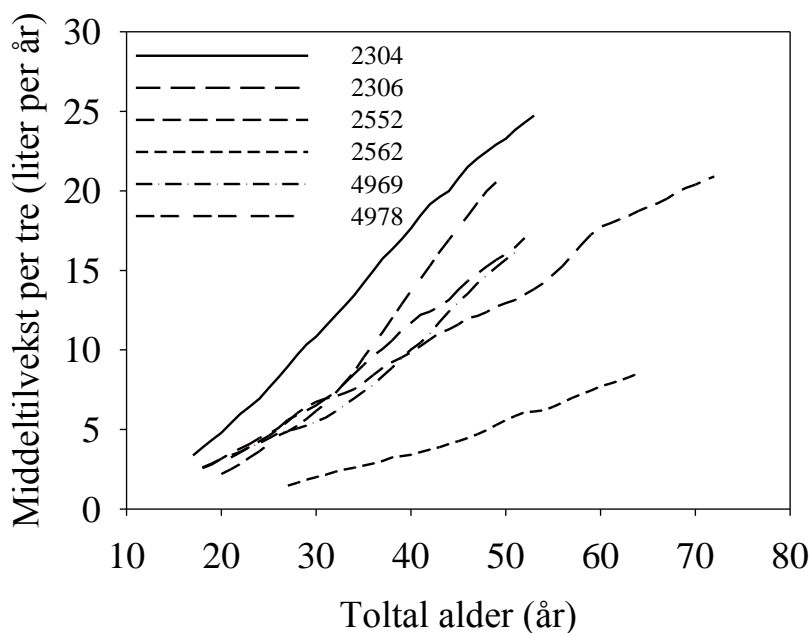
Noen avsluttende kommentarer

Bonitering i skog som har vært plukkhogd

Det herværende materialet omfatter også flere eldre bestand og enkeltrær som trolig kommet opp etter tidligere tiders gjennomhogster slik at trærne kan ha stått undertrykt i flere år. Effekten av dette er uviss. Brantseg (1959) undersøkte høydeveksten i naturlig gjenvekst og plantinger og fant at førstnevnte vokste langsommere i starten, men når veksten først kom i gang var det bare små forskjeller. Hvor lenge disse naturforyngelsene Brantseg studerte hadde stått undertrykt er ikke oppgitt slik at vi ikke vet om alderen i seg selv har betydning for høydeveksten og for den potensielle høyden et tre kan nå. Hvis det er slik at alderen i seg selv skaper endringer i treet som bidrar til å begrense høydeveksten så vil undertrykking i ungdommen føre til redusert høydevekst ved en gitt høyde senere i trets liv. Aldersuavhengig bonitering vil da gi for lave bonitetsverdier, selv om alderen i seg selv ikke inngår i selve formelen. Dette er et spørsmål som bør undersøkes bedre.

Hva har bonitetsendringene å si for skogbruksplanleggingen?

Hvis vi legger til grunn at den økte høydeveksten (bonitetsendringen) som er målt her blir varig vil det ha svært mye å si for hvordan skogen må verdsettes og hvordan den bør skjøttes. Fordi årringbredden også ble målt kan prøvetrærnes volum beregnes for hvert år. Dette er data som ikke tatt med i artiklene, men de kan eventuelt publiseres senere. Først kan vi se på prøvetrærnes middeltilvekst som er vist i Figur 5.



Figur 5. Gjennomsnittlig middeltilvekst for prøvetrærne i hvert bestand i forhold til totalalder. Trær fra naturlig foryngelse er holdt utenfor.

I gjennomsnitt for alle trærne i hvert bestand ser vi at middeltilveksten fremdeles er sterkt økende. Det er umulig å si når disse kurvene vil flate ut. Prøvetrærne var blant de dominerende trærne i bestandet som ikke er representativt for middeltræet, men NIBIO har mange eldre feltforsøk der både middeltilvekst og løpende tilvekst er på vei oppover selv om førstnevnte ifølge produksjonsmodellene skulle ha kulminert for flere år siden. Dette at tilveksten, i mange tilfeller, synes å være betydelig mer utholdende enn hva tidligere modeller (Braastad 1975) har angitt, reiser spørsmålet om hva som er optimal hogstmodenhetsalder.

Bonitetsøkningen som har gitt mer utholdende tilvekst gir ikke nødvendigvis høyere økonomisk hogstmodenhetsalder, dette fordi det vil ta kortere tid å bygge opp igjen samme eller (mye) større volum etter hogst. Dette fremgår av Tabell 5. som viser tiden det tar for skogen å vokse fra brysthøyde til 30 meters overhøyde, med H40 verdier fra skogbruksplanen og verdiene for perioden 2008-2014. For å få totalalderen har vi lagt til 9 år. Med dagens plantematerialer er det trolig 2-3 år mye. Vi har også satt inn diskonteringsfaktor etter fire prosent rente, med omløpstid for ulike boniteter jfr. Skoghandboka (1999 s.78, og TT_08_14.)

Tabell 5. Bonitet etter skogbruksplan (H40_plan og etter perioden 2008-2014 (H40_08_14), P_tt den tid det vil ta for overhøyden å nå 30 meter med H40_plan, Tt_08_14 er tilsvarende tid for bonitet H40_08_14. Hogstmoden er hogstmodenhetsalder etter Skoghandboka og

Disk_f_skog diskonteringsfaktor med denne. Disk_f_08_14 er med bonitet etter H40_08_14. Rel_verdi_økning er sistnevnte dividert på førstnevnte.

Bestnr	H40_plan	H40_08_14	P_tt	Hogstmoden	Tt_08_14	Disk_f_skog	Disk_f_08_14	Rel_verdi_økning
2304	23.0	28.9	68	70	51	0.0642	0.135	2.11
2309	23.0	26.1	68	70	58	0.0642	0.103	1.61
2552	17.0	19.0	106	90	89	0.0293	0.030	1.04
2562	14.0	21.3	147	100	76	0.0198	0.051	2.59
4969	17.0	26.6	106	90	56	0.0293	0.109	3.72
4978	20.0	27.3	83	80	55	0.0434	0.117	2.70
Gjennomsnitt	19.0	24.9	96		64			2.3

Bestand 2304 som er satt til G23 i planen skulle etter dette bruke 68 år på å nå 30 meters overhøyde. Med boniteten for perioden 2008-2014 går tida ned til 51 år. Tilsvarende ser vi for andre bestand. Spesielt interessant er bestand 2562 som er satt til G14 i planen, og ville ta 147 år før skogen var tretti meter, mot 76 år med ny bonitetsverdi. I Skoghåndboka er G14 hogstmoden etter 100 år. Effekten av dette på diskonteringsfaktoren, ved 4 prosent rente, er selvsagt stor, den mer enn dobles, det vil si at nåverdi og grunnverdi vil settes høyere. I bestand 2552 der avviket mellom ny og gammel bonitet er lite er der selvsagt nesten ingen endring. Dersom skogen vokser like godt i neste omløp som den har gjort de siste to tiårene, så vil det utvilsom ha mye å si for verdsetting, og det vil være mulig å bygge opp mye større volum enn hva som nå ble avvirket, på betydelig kortere tid.

Data fra 31 trær kan selvsagt ikke gi svar på hva som er rett hogstmodenhetstidspunkt. Men det er antagelig dekning for å hevde at eldre kulturbestand forrenter den stående kapitalen bedre enn før. Slik skog kan derfor stå lengre, men som før må det tas hensyn til råte og andre risikofaktorer som øker med alderen. Samtidig har vi fått bedre plantematerialer enn før, slik at trærne når en gitt høyde enda tidligere enn angitt utfra ny bonitet i eldre skog. I prinsippet skulle dette tale for å rette hogsten inn mot gammel skog med små volum og lav tilvekst, og heller overholde kulturskog med større volum og høyere tilvekst noe lengre. Riktig prioritering vil selvsagt kreve riktig bonitering, det vil si nøyaktige takster.

Etterord:

Utviklingsfondet for skogbruk, fylkesmannen i Vestfold og NIBIO har finansiert prosjektarbeidet og rapportering. Fritzøe Skoger har bidratt med prøvetrær, takstdata og kompetanse. Takstselskapene Foran, AT-Skog og Mjøsen Skog har støttet prosjektet. Erik Sørensen og Stefano Puliti har koordinert prøvetrær. Tor Erik Vatne Alstad har preparert stammeskiver. Dr. Jan Bjerketvedt har beregnet dybde til grunnvannsspeil. Dr. Jan Svetlik har gjort et uvanlig godt arbeid med innsamling av data fra prøvetrær. Vi takker alle for bidraget til dette arbeidet.

Referanser

- Andreassen, K., Solberg, S., Tveito, O.E., & Lystad, S.L. (2006). Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management*, 222, 211-221.
- Bergan, J. 1994. Temperaturenens betydning for veksttid, vekstrytmen, streknings- og åringvekst hos norsk grand (*Picea abies*) utplantet i Troms. In: Bergan J. (ed.) Faglige emner innen primærproduksjonen i skogbruket i Nord-Norge. In Norwegian. 112 pp.
- Braastad, H. 1975. Yield tables and growth models for *Picea abies*. *Meddr norske SkogforsVes.*31(9): 356-537.
- Branstseg, A. (1959). Produksjon i plantet og naturlig oppkommet granskog. *Norsk Skogbruk* 5:137-139.
- Holt Hansen, K., & Kvaalen, H. 2018. Effects of repeated fertilization in young Norway spruce forests. *Scand. J. For. Res.* 633-640. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1468477>
- Kennedy, M.J., Hedin, L.O., & Derry L.A. 2002. Decoupling of unpolluted temperate forests from rock nutrient sources revealed by natural (87)Sr/(86)Sr and (84)Sr tracer addition. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 99(15):9639-44.
- Kouwenberg, L.L.R., McElwain, J.C., Kürchner, W.M., Wagner, F., Beerling, D.J., Mayle, F.E., Visscher, H. 2003. Stomatal frequency adjustment of four conifer species to historical changes in atmospheric CO₂. *American Journal of Botany* 90(4): 610–619.
- Kvaalen H, Solberg S, May J. 2015. Aldersuavhengig bonitering med laserskanning av enkelttrær. NIBIO Rapport. (1) 67: 1-26.
- Kvaalen, H., & Solberg S. 2018. A novel, age-independent site index estimation method reveals considerable height growth increase over time in *Picea abies*. Submitted to: *Scand. J. For. Res.*

- Mathias, J.M., & Thomas, R.B. 2018. Disentangling the effects of acidic air pollution, atmospheric CO₂, and climate change on recent growth of red spruce trees in the Central Appalachian Mountains. *Global Change Biology*. Doi: 10.1111/gcb.14273.
- Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H.-P., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., Röhle, H., & Spiecker, H., 2002. Radial growth variation of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in central and northern Europe. *For. Ecol. Manage.* 171, 243–259.
- Stap, L.-B., Boer, B., Ziegler, M., Bintanja, R., Lourens, L.J., & van de Wal R.S.W. 2016. CO₂ over the past 5 million years: Continuous simulation and new $\delta^{11}\text{B}$ -based proxy data. *Earth Planet. Sci. Lett.*
- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G.J., Lange, H., Andreassen, K., Garcia Fernandez, P., Hildingsson, A., & deVries, W. 2009. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management*, 258: 1735–1750.
- Solberg, S., Kvaalen, H., & Puliti, S. 2018. Age-independent site index mapping with repeated single-tree airborne laser scanning. Submitted to: *Scand. J. For. Res.*
- Strand, L., 1964. Numerical construction of site curves. *For. Sci.* 10, 410–414.
- Thomas, R.B., Spal S.E., Smith, K.R., & Nippert, J.B. 2013. Evidence of recovery of *Juniperus virginiana* trees from sulfur pollution after the Clean Air Act. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 110: 15319-15324
- Zhu XG, Long SP, & Ort DR. 2008. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology.* 19:153–159.