



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2025 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Omstilling til bledningsskog fra tosjiktete bestand med gran (*Picea abies*) under en bjørkeskjerm (*Betula ssp.*)

Conversion to CCF from Norway Spruce (*Picea
abies*) Under a Shelter of Birch (*Betula ssp.*)

Åsmund Godal Tunheim

Forord

Denne oppgaven er kronen på verket for min seks år lange studietid på Ås.

Ås – den kjærkomne Agrarmetropolen – som har vært ei fabelaktig leikegrind og boltreplass gjennom mine seks år her på bruket.

I forbindelse med denne oppgaven er det mange som fortjener honnør.

Takk til Per Erik Bjerve, tidligere skogeier Bølstad, for at skogen kunne stilles til disposisjon for denne oppgaven, og til både han og datter Sigrun Bjerve for informasjon om bestandshistorikken. Tilsvarende takk til Svein Henry Skuterud, skogeier på Holstad.

Takk til fela mi, Mjøndalingen, for å ha stått ved min side i tykt og tynt. Mang en tone har nok funnet veien inn mellom linjene i denne oppgaven.

Takk også til Jon Godal, min bestefar, som nok er den som sådde frøene som ble til den sterke skogfaglige interessen som nå bruser i mitt blod.

Takk til min kjære feltassistent og livsledsager Dagny Lein Værnes, for å ha vært en stødig og varm støttespiller og korrekturleser i løpet av arbeidet.

Og ikke minst – takk til Andreas Brunner, min veileder. Du sa ja på flekken da jeg foreslo tema for oppgaven, og har siden ikke vært redd for å bruke svøpen for å piske meg fram i arbeidet. Dette året med deg har vært grenseløst lærerikt, Andreas. Takk.

Når jeg nå etterlater med et slags tomrom, kan jeg ikke unngå å trekke paralleller til skog. Akkurat som i blodningsskogen må selv de raskeste, flotteste trærne til slutt vike, og etterlater et tomrom hvor andre kan spire og vokse. Det er fint å tenke på når jeg nå trer inn som bærende konstruksjonsvirke i det hinsidige arbeidsliv.

Takk til alle som har sørget for både god vekst og sunn konkurranse i løpet av min reise gjennom hogstklassene her i Ås!



Oppsummering

Omstilling til blodningsskog er i dag aktuelt på grunn av den store etterspørselen etter lukkede, selektive hogstformer. I blodningssystemet høstes først og fremst enkelttrær over en gitt måldiameter. Systemet både krever og opprettholder en flersjiktet skogstruktur med mange små trær og suksessivt færre med økende diameter. Dette gjør at konkurransetolerante arter som gran (*Picea abies*) egner seg best.

En omstilling til grandominert blodningsskog må sørge for at grantrærne over tid utvikler en flersjiktet struktur, og at denne opprettholdes og utvikles til mange trær har nådd måldiameter. I denne oppgaven undersøkes det om en lang tids tett bjørkeskjerm kan brukes systematisk for å utvikle den ønskede strukturvariasjonen.

Ved å analysere størrelses- og posisjonsdata for to store prøveflater i Ås, beskrives gransjiktets strukturutvikling gjennom de første 30 årene av en omstillingsfase. Utviklingen ses i sammenheng med behandlingshistorikken og konkurransen fra bjørkeskjermen.

Resultatene viser at bestandene som følge av relativt lik behandling (tynning ved overhøyde 11 m) de første 20 år hadde utviklet ganske lik bestandsstruktur. Gransjiktet hadde nokså tilsvarende fint fallende diameter- og høydefordelinger. Ved 34 års alder har begge bestandene fortsatt en tydelig flersjiktet struktur. Imidlertid har gransjiktet i det ene bestandet, som ble tynnet ved overhøyde 16 m, differensiert seg langt mer i høyde, diameter og tetthet. Den konkurransebaserte reduksjonen i høydetilvekst viser at en strukturdifferensieringsprosess fortsatt pågår i begge bestand, som følge av svært høye, men varierende konkurranseforhold.

Resultatene indikerer at systematisk bruk av en bjørkeskjerm, som gjennom hele omstillingsfasen holdes ved ca. 70-90% av maksimal tetthet for bjørk, vil være optimalt for utvikling av flersjiktet gran, før bjørkeskjermen etter hvert må avvikles.

I oppgavens andre del undersøkes representativiteten ved bruk av enkle transekter for å beskrive gransjiktets struktur i omstillingsfasen. Dette undersøkes ved å simulere tusenvis av transekter med varierende treantall, og måle dem opp mot ulike kriterier for tilstrekkelig representativitet. Analysen viser at transekter på 60 trær vil være et effektivt verktøy for overvåkning av gransjiktets utvikling i omstillingsfasen.

Abstract

Conversion to the selection system is currently relevant due to the growing demand for selective harvesting systems. In the selection system, harvesting primarily targets individual trees above a specified target diameter. The system both requires and maintains a multi-layered forest structure with many small trees and progressively fewer as diameter increases. This favors shade-tolerant species such as Norway spruce (*Picea abies*).

A transition to spruce-dominated selection forest must ensure that the spruce layer gradually develops a multi-layered structure, which is then maintained and further developed until a sufficient number of trees reach the target diameter. This study investigates whether a dense birch (*Betula spp.*) overstory can be used systematically to promote the desired structural variability.

By analyzing tree size and spatial data from two large research plots in Ås, the development of the spruce layer structure is described over the first 30 years of the transition phase. The development is examined in light of treatment history and competition from the birch overstory.

The results show that, due to relatively similar management (thinning at dominant height 11 m) during the first 20 years, both stands developed relatively similar structures. The spruce layers exhibited fairly comparable, smoothly declining diameter and height distributions. At age 34, both stands still exhibit a clearly multi-layered structure. However, the spruce layer in the stand thinned at a dominant height of 16 m has differentiated much more in terms of height, diameter, and density. The competition-induced reduction in height growth indicates that a structural differentiation process is still ongoing in both stands, driven by high but variable levels of competition.

The results suggest that systematically maintaining a birch overstory at 70–90% of its maximum stand density throughout the transition phase is likely optimal for the development of multi-layered spruce, before the birch layer is gradually removed.

In the second part of the study, the representativeness of using simple transects to describe the spruce layer's structure during the transition phase is examined. Thousands of transects with varying tree numbers are simulated and evaluated against different criteria for sufficient representativeness. The analysis shows that transects with 60 trees will be an efficient tool for monitoring the development of the spruce layer during the transition phase.

Innhold

Forord	1
Oppsummering	2
Abstract.....	3
Innhold	4
1. Innledning.....	7
1.1 Tema	7
1.2 Definisjoner og terminologi	8
1.3 Bakgrunn	11
1.3.1 Bledningssystemet	11
1.3.2 Omstilling til bledningssystemet	13
1.3.3 Gran under bjørkeskjerm	14
1.3.4 Utvikle flersjiktet gran under en bjørkeskjerm.....	15
1.3.5 Påvise flersjiktet gran med stikkprøver.....	16
1.3.6 Omstillingens siste fase	18
1.4 Mål for oppgaven	19
1.4.1 Overordnet forskningsspørsmål	19
1.4.2 Målsetninger	19
2 Materiale og metode	22
2.1 Materiale	22
2.1.1 Bestandshistorikk.....	23
2.1.2 Voksestedskarakteristikk.....	23
2.1.3 Prøveflater i 2024.....	24
2.2 Registeringer	25
2.2.1 Registrering av alle trær.....	25
2.2.2 Høydemåling.....	26
2.2.3 Høydetilvekstmåling gran	26
2.3 Databehandling.....	28
2.3.1 Analyseverktøy	28
2.3.2 Beregning av kartesiske koordinater	28

2.3.3	Diameterfordelinger.....	28
2.3.4	Høyde-diameterregresjoner.....	29
2.3.5	Konkurransindekser	34
2.3.6	Høydetilvekstmodeller	36
2.4	Transekter	41
2.4.1	Diameterfordeling med fire klasser	41
2.4.2	Kriterier (K) for samsvar i diameterfordeling	42
	Transekttreantall (N)	43
2.4.3	System for stikkprøveutvalg.....	44
2.4.4	Transektanalyser	46
3	Resultater	47
3.1	Bestandsstruktur.....	47
3.1.1	Bestandsvariabler.....	47
3.1.2	Diameterfordeling i 2009	48
3.1.3	Diameterfordeling i 2024	50
3.1.4	Høydefordeling i 2009	53
3.1.5	Høydefordeling i 2023	55
3.1.6	Horisontal fordeling av treslag og diametere	57
3.1.7	Horisontal variasjon i tetthet og konkurranse	62
3.1.8	Treslagsandel i konkurranse	64
3.2	Høydetilvekst og konkurranse	66
3.2.1	Høydetilvekst som funksjon av utgangshøyde og KI	67
3.3	Transekter	70
3.3.1	Sammenligning av diameterfordeling mellom prøveflate og transekter ..	70
3.3.2	Horisontal variasjon i bestandsstruktur	78
3.3.3	Representativitet ved ulik bestandstetthet og romlig variasjon	84
4	Diskusjon.....	88
4.1	Utvikling av flersjiktet gran under bjørkeskjerm	88
4.1.1	Mål 1a).....	88
4.1.2	Mål 1b).....	92
4.1.3	Mål 1c).....	93

4.2	Påvise strukturvariasjon på gran med transekter	96
4.2.1	<i>Mål 2</i>	96
4.2.2	Transektmetoden i praksis.....	99
4.3	Omstillingens siste fase	101
4.3.1	Konkluderende bemerkninger.....	101
5	Litteratur.....	102

1. Innledning

1.1 Tema

I denne masteroppgaven blir det undersøkt om tosjiktede bestand der gran (*Picea abies*) lenge har vokst under en tett skjerm av bjørk (*Betula spp.*) kan være et godt utgangspunkt for omstilling til grandominert blodningsskog.

Blodningssystemet krever granskog med flersjiktet struktur, og en omstilling må derfor ha som mål å utvikle størst mulig variasjon i høyde, diameter og tetthet på gran (Brunner et al., 2025). Bjørk er et hurtigvoksende pionertreslag som raskt etablerer seg på hogstflater og danner en skjerm over granforyngelsen dersom den ikke ryddes bort i ungskogpleien (Frivold, 1986; Hynynen et al., 2010). Hvis konkurransen fra en slik skjerm hemmer granas høyde- og diametervekst i varierende grad, kan en mulig omstillingsmetode være å la bjørk med passende skjermtetthet bli stående, og gjennom et passende tidsrom skape den ønskede strukturdifferensiering i gransjiktet.

Her undersøkes gransjiktets utvikling under en bjørkeskjerm for to ca. 35 år gamle bestand. Oppgaven beskriver dermed hvordan en bjørkeskjerm i denne fasen kan brukes til å utvikle flersjiktning på gran. Selv om dette vil kunne utgjøre et godt utgangspunkt for omstilling, besvarer ikke oppgaven hvordan bestandene i omstillingens siste fase kan videreutvikles til flersjiktede, grandominerte blodningsbestand.

1.2 Definisjoner og terminologi

For å sikre en felles forståelse mellom forfatter og leser, presenteres og defineres her de viktigste komplekse fagbegrepene som benyttes i oppgaven. Når ikke annet er oppgitt, er definisjonene hentet fra Brunner et al. (2023) eller Granhus et al. (2024).

- 1) **Bestandsskogbruk** er det rådende systemet for skogbehandling i Norge, hvor avgrensede skogareal (bestand) utsettes for gjentatte omløp med lik skogbehandling, gjerne i form av planting, ungskogpleie, tynning og – det viktigste kjennetegnet – sluttavvirkning i form av en åpen hogst. Skjøtselsregimet resulterer ofte i bestand der alle trærne er omtrent like gamle (ensaldret), like høye (ensjiktet) og består av samme treslag (ensartet).
- 2) **Åpne hogstformer** betegner i norsk skogbrukssammenheng skjøtselsystemer der det etter sluttavvirkning står igjen færre enn 150 trær/ha. Både flatehogst og frøtrestillingshogst regnes som åpne hogstformer.
- 3) **Lukkede hogstformer** omfatter i Norge skogbehandlingssystemer hvor det aldri står igjen mindre enn 150 store trær/ha etter hogst. Skjermstillingshogst, gruppehogst og selektive hogster hører hjemme blant de lukkede hogstformene.
- 4) **Selektive hogstformer** omfatter de strengeste lukkede hogstformene, der hogstinngrep skjer på enkelttre nivå og kan minne om tynningsinngrep i bestandsskogbruket. Selektiv hogst egner seg best i skog der trær finnes i alle størrelser (flersjiktet) og aldre (fleraldret), slik at de nest største trærne raskt kan erstatte de som tas ut. Derfor egner de seg best for skyggetålende treslag som gran.
- 5) **Bledning(ssystemet)** er den vanligste og mest foretrukne selektive hogstformen, og omfatter jevnlig, systematisk høsting av enkelttrær over en gitt måldiameter. En slik høsting kalles bledningshogst, og er det eneste nødvendige skjøtselsinngrepet ved bledningssystemet.
- 6) **Bledningshogst** er betegnelsen på bledningssystemets jevnlige høsting av enkelttrær over måldiameter, og eventuelle skadde eller syke trær. Inngrepet gjennomføres gjerne hvert 10. - 30. år, avhengig av bonitet.
- 7) **Måldiameter** definerer når trærne i bledningsskogen er hogstmodne. I Norge er måldiameteren gjerne 40 cm dbh, altså når treets diameter i brysthøyde (1,3 m over midlere marknivå) er over 40 cm.
- 8) **Bledningsskog / bledningsbestand** betegner skogarealer hvor bledningssystemet praktiseres. Disse vil ha et kontinuerlig skogdekke med en relativt høy bestandstetthet, som sikrer god produksjon og samtidig opprettholder foryngelse og lav mortalitet på små trær. Ved ideell skjøtsel vil bledningsskogen ha en flersjiktet struktur, og omtales derfor ofte som **flersjiktet skog**.

- 9) Flersjiktet (bestands)struktur** eller **flersjiktning** beskriver skog der trærne opptrer i alle tenkelige høydelag, eller «sjikt», og står i motsetning til ensjiktete bestand der alle trær er omtrent like høye. I utvidet forstand omfatter begrepet en skog med full strukturvariasjon i både horisontal- og vertikal retning, der trærne har varierende høyder og diametere, og de står med varierende avstand til hverandre. Denne strukturen er nødvendig i blodningssystemet for å sikre jevn rekruttering til alle alders- og størrelsesklasser, slik at stadig nye trær når måldiameter og dermed kan høstes. De jevnlig hogstinnngrepene er på sin side avgjørende for å opprettholde flersjiktningen, ved at konkurransen stadig reduseres nok til å sikre jevn foryngelse og overlevelse på små trær.
- 10) Diameterklasse** er et intervall for inndeling av trær etter diameter i brysthøyde (dbh). For å beskrive bestandsstrukturen sorteres trærne i jevnbrede klasser, for eksempel med 4 cm intervall. Antall trær i hver klasse gir en oversikt over størrelsesfordelingen i bestandet, og utgjør til sammen diameterfordelingen.
- 11) Fallende diameterfordeling** er et typisk kjennetegn ved blodningsskog. Siden dbh er enkelt å registrere i felt, brukes denne fordelingen ofte som en praktisk indikator på flersjiktning. En fallende diameterfordeling ligner en liggende «J», med svært mange små trær og suksessivt færre i større diameterklasser. Denne fordelingen skapes av prosesser som kontinuerlig foryngelse og trær akselererende vekst ettersom de blir større og konkurransen avtar. Kun en svært liten andel av trærne i blodningsskog befinner seg i de største klassene, men disse utgjør til gjengjeld en stor andel av bestandsvolumet og har den raskeste tilveksten.
- 12) q-verdien** beskriver det konstante forholdet mellom forekomsten av trær i nabodiameterklasser i bestand med en jevnt fallende diameterfordeling. q defineres ved treantallet i hver diameterklasse relativt til i den neste, større klassen. En q -verdi på 2 betyr at treantallet halveres for hver diameterklasse. Siden klassebredden påvirker fordelingen, vil en større klassebredde gi en høyere q -verdi for samme bestand.
- 13) Bestandstetthet** (ofte forkortet **tetthet**) uttrykker hvor tett trærne står på et areal, og beskrives gjerne gjennom en kombinasjon av treantall og -størrelse per arealenhet. Et godt tetthetsmål er bestandets grunnflate (G), som tilsvarer summen av alle trestammers tverrsnittareal i brysthøyde, oppgitt i m^2/ha . I ungskog uttrykkes tettheten helst i treantall/ha.
- 14) Romlig** eller **horisontal strukturvariasjon** er et vanlig karaktertrekk ved blodningsskog. Begrepet beskriver lokale avvik i tetthet og struktur innenfor et bestand, der deler av bestandet har en over- eller underrepresentasjon av trær i enkelte diameterklasser sammenlignet med bestandets gjennomsnittlige, jevnt fallende diameterfordeling.

- 15) Tosjiktete bestand** består av trær som opptrer i to tydelige høydelag, eller «sjikt», og består av et oversjikt (eks. av bjørk) og et undersjikt (eks. av gran).
- 16) Omstilling** til bledningsskog / flersjiktet skog innebærer en styrt endring av skjøtselsregime eller hogstform på et skogareal, hvor flersjiktning utvikles fra andre skogstrukturer, for eksempel ensjiktete, unge granbestand.
- 17) Konkurransindeks (KI)** representerer hvor mye konkurranse, i form av begrenset lys- og næringstilgang, et tre (ofte kalt subjekttre) mottar fra sine nabotrær (konkurrenter). KI uttrykkes gjerne på en skala fra 0 til 1, der $KI = 0$ er fravær av konkurranse og $KI = 1$ er maksimal konkurranse. Det finnes mange KI -varianter med ulik kompleksitet, som beskriver trærnes konkurransesituasjon basert på ulike kombinasjoner av variabler. Noen bruker grunnflaten alene (aktuelt i ensjiktet skog), andre subjekttreets egen størrelse relativt til grunnflaten, mens de mest avanserte baserer seg i tillegg på konkurrentenes størrelse, kronehøyde og/eller avstand fra subjekttreet (Solem, 2010).
- 18) Representativitet** uttrykker i denne oppgaven sannsynligheten for at et stikkprøveutvalg gir en tilstrekkelig god gjengivelse av populasjonens struktur. Begrepet brukes konkret om sannsynligheten for at diameterfordelingen i et transekt gjenspeiler diameterfordelingen på hele prøveflata, definert ved forhåndsbestemte kriterier ($K1-K3$). Representativiteten estimeres som andelen simulerte transekter som oppfyller disse kriteriene.
- 19) Transekt** brukes vanligvis om en linje med gitt lengde som går gjennom et område, for eksempel et skogbestand, for å registrere forekomsten av én eller flere arter. I denne oppgaven betegner transekt en registreringslinje der alle trær med brysthøydiameter (dbh) innenfor 2,5 meter på hver side av midtlinjen registreres. Transektene er dermed 5 meter brede, og lengden defineres av et gitt treantall (N).

1.3 Bakgrunn

1.3.1 Bledningssystemet

Omstilling til bledningsskog er i dag aktuelt på grunn av den store etterspørselen etter selektive hogstformer, hvor bledning er den vanligste og mest foretrukne varianten.

Bledning innebærer en systematisk og jevnlig høsting av store enkelttrær, som opprettholder og krever et kontinuerlig skogdekke med en flersjiktet struktur (Brunner et al., 2023, s. 7). Før bledningssystemet kan iverksettes må derfor en del skogarealer først omstilles til flersjiktet skog..

Mål om økt bruk av bledning

Den stadig økende interessen for bledning skyldes særlig et økt fokus på andre skogøkosystemtjenester enn tømmerproduksjon, kombinert med sviktende stabilitet i ensaldret skog (Brunner et al., 2025, s. 32; Vítková & Dhubháin, 2013). Flere studier viser at bledningssystemet i det enkelte skogbestand er et mer økosystem- og flerbruksvennlig alternativ til bestandsskogbruket (Granhus et al., 2024; Pukkala, 2016; Vítková & Dhubháin, 2013). Også volumproduksjonen i grandominert bledningsskog kan ifølge Brunner et al. (2023) på lang sikt tilsvare den i ensaldrete granbestand. I tillegg antyder en rekke nylige studier (sammenfattet av Ahtikoski et al., 2025) at lønnsomheten ved bledningssystemet er konkurransedyktig med bestandsskogbruket, selv med snau skogsmark som utgangspunkt.

Den nyeste revideringen av Norsk PEFC skogstandard krever at lukkede hogstformer skal brukes i all grandominert skog der økonomiske og biologiske forhold ligger til rette for det (PEFC, 2022). Likevel benyttes de åpne hogstformene flatehogst og frøtrestillingshogst på rundt 90% av det årlige hogstarealet, mens bledning nesten ikke brukes (<1% ifølge Granhus, 2021; Brunner et al., 2023).

Krav til bestandsstruktur

Bledning kan ikke gjennomføres hvor som helst, siden hogstformen krever en flersjiktet bestandsstruktur med stor variasjon i trestørrelser og -tetthet. Samtidig opprettholder de jevnlig inngrepene en flersjiktet bestandsstruktur, hvor trær i alle aldre og størrelser står om hverandre på det samme arealet (Brunner et al., 2023, s. 5).

De minste trærne i bledningsskogen utsettes for svært høy konkurranse og har derfor sterkt begrenset vekst. Dette gjør at foryngelsesprosessen tar tid, og ifølge Brunner et al. (2023, s. 16) kan det ta mer enn 50 år for et grantre å vokse til en brysthøydiameter på 2,5 cm. Dødeligheten er svært høy på spirer og småplanter (Lundqvist, 2017), men blant de som når 10 cm høyde er det mange som etter hvert vokser opp i de øvre sjikt og får tilgang på stadig mer lys. Den moderate bestandstettheten og trærnes varierende høyder gjør at trær i oversjiktet vokser uten mye konkurranse fra andre store trær (Brunner et al., 2023, s. 17).

Den kontinuerlige foryngelsen og trærnes akselererende vekst med økende størrelse resulterer i en fallende diameterfordeling, med flest trær i minste diameterklasse og et fallende antall for økende diameter (Lundqvist et al., 2009). Denne diameterfordelingen ligner en liggende «J» (eks. Figur 13), og er oppkalt etter opphavsmannen F. de Liocourt.

Et ideelt skjøttet bledningsbestand vil i henhold til Liocourts diameterfordeling ha et konstant forhold (q) mellom antall trær i tilgrensende diameterklasser, hvor en q -verdi på 2 betyr at hver diameterklasse har halvparten så mange trær som den forrige (Lundqvist et al., 2009, s. 23). Denne jevnt fallende formen beskrives gjerne i form av en negativ eksponentialfunksjon (Leak, 1965; Sterba, 2004), og kurven holdes i likevekt gjennom jevnlig hogstinngrep.

Bledningsskog har ofte en diameterfordeling som faller mer ujevnt enn denne teoretiske, jevne likevektskurven (eks. Moan, 2021), enten fordi selve modellformen ikke passer, eller på grunn av suboptimal behandling. Selv i velkjøttede bledningsbestand vil diameterfordelingen likevel kunne avvike fra Liocourts fordeling, som følge av at avtagende diametertilvekst for store trær medfører en akkumulering i de største diameterklassene. Det finnes derfor alternative modeller, hvor den vanligste, “Schütz’ likevekt”, krever et tilstrekkelig antall i minste diameterklasse og detaljerte modeller for vekst og mortalitet i diameterklassene (Sterba, 2004). Modellen forutsetter imidlertid langt større måldiameterer enn det som er vanlig i Norge, og siden slike diameterer er urealistiske i en første omstillingsfase, er Liocourts fordeling bedre egnet til å beskrive bestandsstrukturen.

En flersjiktet bestandsstruktur defineres ikke bare av trærnes diameterfordeling, men også av deres høyder. Det er høydevariasjonen som skaper «sjiktene» i flersjiktningen. Selv om det er en tett sammenheng mellom diameter og høyde, er høydefordelingen i bledningsskog ikke jevnt fallende, men har som følge av avtagende høydetilvekst på store trær en opphopning av trær i de største høydeklassene (Lundqvist et al., 2009, s. 28).

I tillegg til stor variasjon i diameter og høyde, varierer bestandsstrukturen i bledningsskog også kraftig i horisontalplanet, med åpninger noen steder, tette grupper andre steder og varierende tettheter imellom. Dette horisontale mønsteret varierer over tid (Brunner et al., 2023, s. 7).

Krav til oppfølging

Den flersjiktete strukturen i bledningsskog, med både vertikal og horisontal variasjon i diameter- og høydefordeling, opprettholder ikke seg selv. Dersom det går for lang tid uten et hogstinngrep, vil bestandet lukke seg og utvikle en ensjiktet struktur (Brunner et al., 2023, s. 7). Med jevnlig bledningshogster holdes bestandet åpent nok for kontinuerlig foryngelse, og dermed også jevn rekruttering inn i de minste

diameterklasser. Samtidig holdes bestandstettheten høy nok til å sikre tilfredsstillende produksjon på gjenstående trær (Brunner et al., 2023, s. 15).

Siden et areal med bledningsskog jevnlig må følges opp, krever systemet også aktive skogeiere både på kort og lang sikt (Brunner et al., 2023, s. 22). I tillegg må det etableres faste stikkveinett, og bruk av store maskiner er nødvendig for å håndtere store trær. For å unngå skader på gjenstående trær, kreves maskinførere med mye erfaring (Brunner et al., 2023, s. 35).

Krav til treslag og voksested

For at virkeproduksjonen i bledningssystemet skal være konkurransedyktig med gjennomsnittlig virkeproduksjon fra et bestandsskogbruk med gjentatte omløp med planting og flatehogst, må bestandstettheten holdes på et tilstrekkelig høyt nivå (Brunner et al., 2023, s. 15). Det er nødvendig å holde bestandstettheten på et tilstrekkelig høyt nivå om virkeproduksjonen i bledningssystemet skal være konkurransedyktig. Dette tar utgangspunkt i et bestandsskogbruk med gjentatte omløp med planting og flatehogst (Brunner et al., 2023). Skyggetålende treslag, som foryrer seg og overlever ved relativt høye tettheter, egner seg dermed best (Schütz, 2001). I Norge betyr dette i praksis gran (*Picea abies*). Voksestedet må derfor egne seg for gran på lang sikt, selv under et varmenende klima med økt risiko for tørkeepisoder (Brunner et al., 2023, s. 23).

Mangel på flersjiktet skog

Velskjøttet, produktiv skog i Norge er ofte ensjiktet, som følge av et bestandsskogbruk med skjøtsel som fremmer produksjon av jevnstore og grove trær. I tette, ensjiktete bestand har enkelttrærne lav vindstabilitet. Sammen med manglende flersjiktning bidrar dette til at bare en begrenset andel av skogen i Norge er egnet for bledning. Basert på data fra Landskogstakseringens prøveflater og kriterier for voksested, treslag og bestandsstruktur, estimerer Granhus et al. (2024, s. 21) at kun 11 % av grandominerte bestand i hogstklasse 4 og 5 oppfyller kravene. For å imøtekomme mål om økt bruk av selektiv hogst, er det derfor aktuelt å omstille mer eller mindre ensjiktete granbestand til flersjiktet bledningsskog.

1.3.2 Omstilling til bledningssystemet

Omstilling til bledningsskog krever en viss risikovilje og oppfølgingsevne hos skogeier (Brunner et al., 2023, s. 22). Prosessen tar lang tid, gjerne lenger enn 50 år. I tillegg innebærer den større usikkerhet knyttet til både produksjon og lønnsomhet sammenlignet med videreføring av bestandsskogbruk (Ahtikoski et al., 2025; Fahlvik et al., 2024; Schütz, 2001; Vítková & Dhubháin, 2013). Skogeiers beslutning om omstilling vil imidlertid ofte være motivert av andre hensyn enn økonomisk avkastning, og den økonomiske risikoen vil i så fall være av mindre betydning (Brunner et al., 2023).

Mangel på både teoretisk og praktisk kunnskap er blant de største utfordringene ved omstilling (Brunner et al., 2025; Mason et al., 2021; Vítková & Dhubháin, 2013). Den lange tidshorisonten, kombinert med behov for raske svar, har ført til utstrakt bruk av vekstmodeller i omstillingsstudier. De fleste av disse konkluderer med betydelige produksjonstap sammenlignet med «business as usual». Ettersom simulatorene bygger på en rekke antakelser om vekst, foryngelse og fravær av vindfall, er det stor usikkerhet knyttet til resultatene. Det er derfor stor etterspørsel etter empiriske omstillingsstudier (Brunner et al., 2025; Drössler et al., 2013; Hanewinkel & Pretzsch, 2000).

Praktiske utfordringer og omstilling i praksis

Omstilling fra ensjiktet til flersjiktet skog innebærer en rekke viktige hensyn. Prosessen må igangsettes tidlig i omløpet, på et stadium der grantrærne har lav høyde og dermed god vindstabilitet. De største kan fungere lenge som skjerm for mindre trær innen de når måldiameter (Brunner et al., 2023, 2025; Granhus et al., 2024; Vítková & Dhubháin, 2013). Utvikling av høydevariasjon krever skjøtselsmetoder som sikrer at noen grantrær vokser i hastigheter nært sitt potensial, mens andres høydetilvekst begrenses i varierende grad. Samtidig må det legges til rette for etablering av ny foryngelse.

For å sikre vertikal strukturvariasjon på bestandsnivå, foreslår en del studier å skape dette gjennom horisontalt varierende skogbehandling (Brunner, 2024a; Schütz, 2001; Vítková & Dhubháin, 2013). Et konkret system for dette er 'tynning til varierende tetthet' (VDT), som i dag testes ut i Norge som en lovende omstillingsmetode (Granhus et al., 2024). Metoden omfatter tynning i flere omganger (den første senest ved høyde < 15 m), der det etableres åpninger noen steder, holdes tett andre steder og kronetynnes til varierende tetthet i matriksen imellom (Brunner, 2024a).

En mulig omstillingsmetode som i liten grad er undersøkt (men se Pukkala et al., 2011 i Brunner et al., 2025, s. 26) er å benytte seg av en blanding av gran og et mer hurtigvokst treslag. De innblandede trærne vil raskt vokse fra grana og danne en skjerm som utøver konkurranse for grantrærne og hemmer deres vekst. Dersom konkurransen fra skjermen er variert over lang tid, vil det kunne føre til en naturlig størrelsesdifferensiering på undersjiktet av gran. Slike treslagsblandinger kan dermed fungere som omstillingsmetode.

1.3.3 Gran under bjørkeskjerm

Bjørk (*Betula pendula* og *B. pubescens*) er pionertreslag som i boreale områder raskt koloniserer snau skogsmark etter intense, storskala forstyrrelser som skogbrann eller flatehogst. Den noe tregere og skyggetålende grana vil etter hvert etablere seg i undersjiktet. Etter en tid vokser den inn i de øvre sjikt og utkonkurrerer bjørka. I løpet av noen århundrer utvikles det et grandominert klimakssamfunn preget av

glennedynamikk. Man ser da at enkelte træs død på tilfeldige steder og til ulike tider skaper glenner som tilrettelegger for foryngelse og økt vekst (Caron et al., 2009).

På plantefelt, særlig på fuktig mark, etablerer bjørka seg raskt og vokser gjerne fra grana dersom den ikke aktivt ryddes bort (Frivold, 1986; Hynynen et al., 2010). For å bedre grantræernes vekstvilkår, blir lauvoppslaget vanligvis fjernet gjennom ungskogpleie tidlig i omløpet. Den begrensede konkurransen gjør at de fleste grantrær vokser raskt, og det utvikles ofte en ensjiktet bestandsstruktur med lite størrelsesvariasjon. Denne strukturen opprettholdes og forsterkes av naturlige mekanismer som mortalitet på de minste trærne, og gjennom skogbehandling som avstandsregulering og tynning.

Til tross for tilskuddsordninger blir ungskogpleie ofte glemt, og lauvoppslaget utvikler seg til en relativt homogen skjerm over et undersjikt av gran. Tosjiktete bestand med gran under en skjerm av bjørk er derfor et vanlig innslag i det nordiske skoglandskapet (Drössler, 2010).

Det er godt dokumentert at blandingsbestand med bjørk over gran kan gi høyere samlet volumproduksjon enn rene granbestand, som følge av bjørkas raske ungdomsvekst og granas skyggetoleranse (Bergqvist, 1999; Frivold & Frank, 2002; Johansson, 2014; Tham, 1988, 1989, 1994). I studiene ligger fokuset imidlertid på todelte omløp, der bjørkeskjermen høstes tidlig til biobrensel, mens gransjiktet utvikles videre til et ensjiktet sluttbestand. Dersom bjørkeskjermen i stedet brukes til å utvikle flersjiktet gran, kan den ekstra virkeproduksjonen kanskje bidra til økt lønnsomhet i omstillingsfasen.

1.3.4 Utvikle flersjiktet gran under en bjørkeskjerm

Bruk av bjørkeskjerm i omstillingen krever at den fører til utvikling av høyde- og tetthetsvariasjon i gransjiktet. Flere studier viser at høydetilveksten til gran under glisne bjørkeskjermer er relativt upåvirket (Bergqvist, 1999; Tabell 1 & 2 i Bergqvist et al., 2000; felt 9 i Brunner, 2016; Johansson, 2014; Tham, 1988), men dette gjelder kun under skjermer med lav tetthet. Glisne bjørkeskjermer vil dermed være lite egnet for å skape høydevariasjon i gran. Under skjermer med høyere tettheter reduseres høydetilveksten med økende tetthet (Brunner, 2016; Brække & Granhus, 2004; Solem, 2010), noe som tyder på at bjørkeskjermer med høy (men varierende) tetthet kan ha potensial som en metode for utvikling av høydevariasjon i gran.

Få studier har undersøkt strukturvariasjon i undersjiktet, men upubliserte data fra forsøksserien «BARLØV» (Braathe, 1988) viser at gran som i lang tid (25 til 30 år) står under relativt tette bjørkeskjermer kan utvikle en flersjiktet struktur. Konkurransetrykket fra skjermen er gjerne av varierende styrke (Solem, 2010), som kanskje forklarer hvorfor bjørkeskjermen fører til differensiering i både høyde og tetthet på gransjiktet (Braathe, 1988; Mård, 1996). Under tette skjermer med en viss horisontal tetthetsvariasjon, vil de

mest frittstående grantrærne dermed kunne vokse inn i oversjiktet og etter hvert ta over noe av rollen som konkurranse for mindre trær, slik som i boreal skog med naturlig glennedynamikk.

BARLØV-dataene (Braathe, 1988) viser imidlertid også at dersom bjørkeskjermen holdes tett over for lang tid (opp mot 50 år), vil strukturvariasjonen gå tapt, som følge av høy mortalitet på de minste trærne og stans i foryngelsen (Brunner, 2024b). Dette indikerer at en bjørkeskjerm vil kunne brukes for å skape strukturvariasjon på gransjiktet, dersom den holdes relativt tett over en lang (men ikke for lang) tidsperiode.

Bjork over gran som omstillingsmetode

Mye tyder på at bruk av en langvarig, tett bjørkeskjerm over et undersjikt av gran kan være nyttig ved omstilling til blødningsskog. Siden en tett skjerm oftest etablerer seg over plantet eller naturlig forynget gran, vil omstillingsprosessen kunne settes i gang av seg selv. På de BARLØV-rutene der bjørkeskjermen resulterte i flersjiktet gran var det imidlertid blitt gjort ungskogpleie på bjørk, noe som indikerer at det vil være behov for lett regulering i bjørkeskjermen nokså tidlig (Brunner, 2024b; Braathe, 1988). Det er likevel ukjent hvor lenge en skjerm vil kunne tjene for å utvikle og vedlikeholde flersjiktning på gran. Det samme gjelder hvilke tettheter som er optimale på hvilke tidspunkter. Mulige fallgruver i omstillingen kan være at bjørkeskjermen holdes for glissen, at den avvirkes for tidlig eller at den holdes for tett altfor lenge slik at flersjiktningen går tapt.

Data fra tosjujktede bestand

I denne masteroppgaven beskrives strukturen i to ca. 35 år gamle bestand med et gransjikt som lenge har stått under påvirkning fra en bjørkeskjerm. De samme bestandene ble også ved 20 års alder i 2009 undersøkt av Solem (2010), som innen 250 m² store prøveflater (4 på Holstad, og 2 på Bølstad) registrerte posisjon, diameter og høyde på både gran og bjørk. Resultatene viste at konkurranse fra bjørkeskjermen hemmet høyde- og diameterveksten på naturlig forynget gran, og at granas vekst varierte med konkurransen fra bjørkeskjermen.

15 år senere er disse bestandene fortsatt preget av en tosjujktet struktur med en tett bjørkeskjerm over et gransjikt som gjennom lang tid har differensiert seg i høyde og tetthet, og har utviklet noe som ligner en flersjiktet struktur. Disse bestandene vil være gjenstand for denne masteroppgavens undersøkelser. Til tross for ulikt prøveflatedesign, gjør tilgang på data fra både 2009 og 2024 det mulig å analysere gransjiktets utvikling under lang tids påvirkning fra den tette bjørkeskjermen.

1.3.5 Påvise flersjiktet gran med stikkprøver

Dersom tosjujktede gran- og bjørkebestand skal omstilles til blødningsskog, vil det være behov for enkle metoder for måling av gransjiktets struktur underveis i prosessen. En

enkel stikkprøvemetode som beskriver strukturen, gjør det mulig å sammenligne denne med en ønsket flersjiktning. Stikkprøven vil også kunne avdekke eventuelle behov for tiltak som styrer utviklingen i riktig retning.

Siden diameterfordelingen er en god indikator på bestandsstrukturen, kan det være tilstrekkelig med stikkprøver der diameter i brysthøyde (dbh) registreres på et utvalg av trærne. En slik metode vil også innebære at måleren vil lære seg hvordan bestand med en fallende diameterfordeling ser ut, og på sikt kunne påvise denne med et blikk.

Dersom stikkprøver skal fungere, må utvalget være stort nok til å kunne representere den undersøkte variabelen (her: diameterfordeling) for hele populasjonen (her: alle grantrær). Stikkprøver definert av lengde eller areal vil med varierende bestandstetthet gi et varierende antall dbh-observasjoner. Glissen skog krever derfor et større stikkprøveareal enn tett skog, dersom et likt antall trær for stikkprøvens diameterfordeling er ønsket. Stikkprøvestørrelse definert ved treantall som den minste romlige enhet vil, i motsetning til lengde eller areal, sikre et konsistent observasjonsgrunnlag på tvers av alle bestandstettheter (Brunner et al., 2023, s. 15). Samtidig unngår man arbeidskrevende oppmåling av stikkprøveflater.

For å vurdere diameterfordelingen i bledningsbestand anbefaler den svenske Skogsskötselsserien (Lundqvist et al., 2009, s. 7) en grov inndeling i fire jevnbrede diameterklasser, fordelt over spennet mellom bestandets største og minste tre. Den grove inndelingen sørger for utjevning av variasjonen i smalere diameterklasser. En inndeling i fire klasser gjør det dermed lettere å sammenligne stikkprøvenes diameterfordelinger med ønsket flersjiktning.

For bledningsskog anbefaler Brunner et al. (2023, s. 20) stikkprøver i form av fem meter brede transekter med 60 trær, hvor alle trær innenfor 2,5 m avstand på begge sider av transektlinjen sorteres i fire, 10 cm brede diameterklasser. Dersom antallet i hver diameterklasse er minst dobbelt så stort som i den tilgrensende mindre klassen ($q\text{-verdi} = 2,7$), har bestandet en akseptabel flersjiktet struktur. Lundqvist et al. (2009) stiller mindre krav til en slik jevnt fallende kurve, og krever i stedet at: 1) det største treet har dbh over 25 cm, 2) det er flest trær i minste diameterklasse, 3) det er nest flest i den neste og 4) det finnes trær i de to største diameterklassene.

Brunner et al. (2023) sin transektmetode og Lundqvist et al. (2009) sine kriterier er ikke direkte overførbare fra bledningsbestand til gransjikt under en bjørkeskjerm.

Diameterspredningen på gransjiktet er mindre enn i bledningsskogen. Kriteriene for å vurdere gransjiktet som tilstrekkelig flersjiktet må være andre enn i bledningsskog. Dette med bakgrunn i at de skal være nyttige mål for diameterfordelingen gjennom hele skjermperioden. Metoden vil likevel kunne brukes for å beskrive om diameterfordelingen er fallende, hvor bratt den er og hvilken diameterspredning som finnes i bestandet.

Hvilket treantall som vil være tilstrekkelig for å beskrive diameterfordelingen i gransjiktet under en bjørkeskjerm, avhenger blant annet av gransjiktets romlige strukturvariasjon. Med stor horisontal variasjon, der diameterklassene ikke er jevnt fordelt i bestandet, øker risikoen for at diameterfordelingen i transektene avviker sterkt fra bestandets diameterfordeling. Siden transekter med 60 trær anbefales for bledningsskog, hvor det også forventes mye horisontal variasjon, er det tenkelig at det også kan være tilstrekkelig for gransjiktet under bjørkeskjermen.

Beslutningstakers feiltoleranse

Når en beslutningstaker skal vurdere bestandsstrukturen basert på en stikkprøve, er det avgjørende å kjenne metodens pålitelighet. Transekter med et gitt antall trær vil gjenspeile bestandsstrukturen med en viss representativitet. Et mål på sannsynligheten for at transektet gir en tilstrekkelig god gjenspeiling av bestandsstrukturen. Ved å undersøke og opplyse om representativiteten til transekter ved varierende treantall og krav til samsvar i diameterfordeling, får beslutningstakeren et konkret grunnlag for å velge en stikkprøvestørrelse som gir ønsket presisjon.

1.3.6 Omstillingens siste fase

Dersom et gransjikt som lenge har stått under en bjørkeskjerm har utviklet en flersjiktet struktur, vil et godt utgangspunkt for en videre utvikling mot bledningsskog være lagt. Det vil imidlertid være lenge til de største trærne når måldiameter og gransjiktet er klart for første bledningshogst. I siste fase av omstillingen må det derfor sørges for at de største grantrærne utvikler seg raskt. Samtidig må den fallende diameterfordelingen med flest trær i de minste diameterklassene opprettholdes.

I den siste omstillingsfasen vil det dermed være behov for flere inngrep før et fullt utviklet bledningsbestand er oppnådd. Et naturlig inngrep vil være etableringen av et fast stikkveinett, som uansett må opprettholdes i forbindelse med alle fremtidige inngrep. Dette vil redusere bestandsgrunnflaten med ca. 20% (Brunner, 2024a) og vil sørge for ny lys- og næringstilgang til gransjiktet. Dermed vil det både kunne øke veksten på de største trærne, og samtidig hindre stopp i foryngelsen og mortalitet på de minste trærne. Slik vil flersjiktningen kunne opprettholdes. I neste omgang holder det kanskje med et siste inngrep hvor all bjørk tas ut, før første bledningshogst etter en tid kan gjennomføres.

Formateringen kan gå tapt både dersom skjermen åpnes opp for mye for tidlig, eller holdes for tett over for lang tid. Derfor må den sannsynligvis reguleres til passende tetthet flere ganger gjennom hele omstillingsfasen. Hvilke skjermtettheter som passer til hvilke tider, kan kanskje besvares med undersøkelser fra tosjiktede gran- og bjørkebestand. Da med utgangspunkt i kjent behandlingshistorikk hvor det foreligger data fra flere tidspunkter.

1.4 Mål for oppgaven

Denne masteroppgaven undersøker en første fase i omstilling til bledningsskog, der en tett og langvarig bjørkeskjerm har fremmet en flersjiktet struktur på undersjiktet av gran. Ved å undersøke bestandsstrukturen i to ca. 35 år gamle tosjiktede bestand med gran under bjørk, undersøkes potensialet for å utvikle strukturvariasjon hos gran ved hjelp av en bjørkeskjerm. Tilgang på data fra de samme bestandene 15 år tidligere gjør det mulig å undersøke bestandsstrukturens utvikling, og hvordan denne henger sammen med behandlingshistorikken.

Mens omstilling med gran under bjørkeskjerm foregår, bør det med enkle metoder kunne påvises om undersjiktet utvikler en flersjiktet struktur. I oppgavens andre del undersøkes derfor representativiteten ved bruk av enkle transekter med 60 ± 20 trær.

1.4.1 Overordnet forskningsspørsmål

Er tosjiktede bestand, der gran i lang tid utvikler seg under påvirkning fra en tett bjørkeskjerm, en god metode for omstilling til grandominert bledningsskog?

Utvikling av en flersjiktet struktur på gran som er etablert samtidig, krever lang tids variasjon i høydetilvekst. Det forventes at gransjiktet har utviklet stor høydevariasjon på grunn av langvarig og variert (men før det meste høy) konkurranse fra bjørkeskjerm og etter hvert andre grantrær. Resultatene vil være nyttige fordi de i detalj beskriver de første 30 årene av omstillingsprosessen.

1.4.2 Målsetninger

Mål 1

- Beskrive utvikling i bestandsstruktur for tosjiktede bestand der gran over lang tid har vokst under en tett bjørkeskjerm.
- Finne en sammenheng mellom dagens konkurransesituasjon og de siste års høydetilvekst på gran, og dermed vise at flersjiktningen er skapt og fortsatt skapes av variert konkurranse fra bjørkeskjermen og etter hvert andre grantrær, og:
- Utlede anbefalinger for skogbehandling med sikte på etablering av flersjiktet gran.

Kort om metode

- Gransjiktet og bjørkeskjermen sin utvikling over tid undersøkes for to bestand ved hjelp av flyfoto, telefonsamtaler med skogeiere, data fra 2009 (alder ca. 20; Solem, 2010) og egne målinger (alder ca. 35). Bestandsstrukturen ved begge aldere analyseres ved hjelp av diameter- og høydefordelinger, som krever tilpasning av H/D-regresjoner for høydeestimering. Dagens bestandsstruktur visualiseres med kart. For bjørk blir den horisontale variasjonen indirekte

kvantifisert gjennom horisontal variasjon i konkurranse fra bjørk (Mål 1b), og for gransjiktet analyseres den gjennom horisontalt varierende diameterfordelinger i tusenvis av stikkprøveflater, som et biprodukt av transektanalysene (Mål 2).

- b) Avstand- og størrelsesavhengige konkurranseindekser blir beregnet, og sammenheng mellom høydetilvekst de siste tre år, utgangshøyde og konkurranseindeks for grantrærne blir undersøkt.
- c) Basert på resultatene i a) og b) drøftes sammenhengen mellom behandlingshistorikk og bestandsutvikling, og det blir utledet generelle anbefalinger for en første omstillingsfase der flersjiktet gran etableres under en tett og langvarig bjørkeskjerm.

Forventede resultater

- a) Som følge av lang tids tett, men horisontalt varierende konkurranse fra bjørkeskjerm og andre naboer, har noen grantrær vokst bedre enn andre, og det har utviklet seg en fallende diameterfordeling lik den man finner i grandominerte bledningsbestand. Det er forventet at diameterfordelingen var fallende allerede ved 20 års alder, og at dette på grunn av moderat tetthet (eks. grunnet lett tynning) er blitt opprettholdt og videreutviklet under bjørkeskjermen fram mot 35 års alder. Det forventes også en del horisontal variasjon i tetthet og diameterfordeling innen og mellom prøveflatene.
- a) Høydetilveksten de siste tre årene vil være tett korrelert med utgangshøyde, men veksten blir begrenset i takt med økende konkurranse (*KI*).
- b) Resultatene i a) og b) indikerer at gran som i lang tid vokser under en tett bjørkeskjerm vil utvikle en flersjiktet struktur. Denne vil være skapt som følge av konkurranse fra en langvarig bjørkeskjerm, hvor tetthetsvariasjon i skjermen (og etter hvert andre grankonkurrenter) har resultert i variert høyde- og diameter-tilvekst. I så fall kan det anbefales bruk av en lang tids bjørkeskjerm med passende tetthet for etablering av flersjiktet gran, som et utgangspunkt for omstilling til grandominert bledningsskog.

Mål 2

Undersøke om stikkprøver i form av transekter på 60 ± 20 trær kan gi en god representasjon av gransjiktets diameterfordeling, slik at man lett kan påvise flersjiktet struktur i lignende bestand uten arbeidskrevende målinger.

Kort om metode

Simulere tusenvis av fem meter brede transekter med 60 ± 20 trær gjennom prøveflatene i både X- og Y-retning, og undersøke hvordan representativiteten varierer med treantall, strenghet i krav til diameterfordeling, og med horisontal strukturvariasjon både innen og mellom bestand.

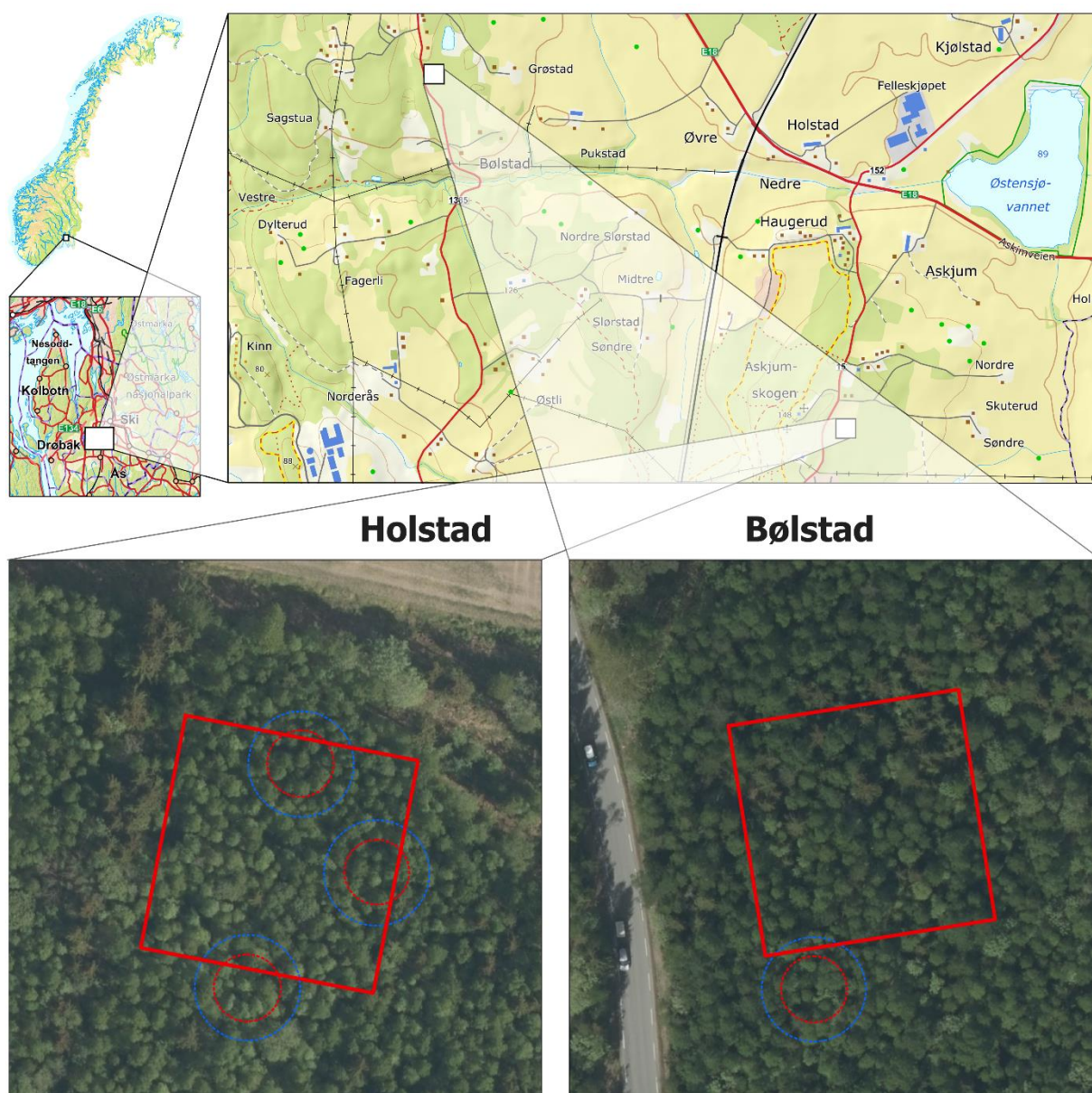
Forventede resultater

Det forventes at transekter på 60 trær vil gi en akseptabel representativitet, og at transektmetoden vil kunne brukes for å påvise diameterfordelingen til et gransjikt under en bjørkeskjerm. Representativiteten vil øke med økende treantall og reduseres med økende kriteriestrenghet og horisontal variasjon. Basert på resultatene og egen feiltoleranse kan beslutningstaker selv velge ønsket treantall og antall transekter.

2 Materiale og metode

2.1 Materiale

For å undersøke om tosjiktede bestand med bjørk over gran kan være et egnet utgangspunkt for omstilling til grandominert blodningsskog, ble det søkt etter slike bestand i nærheten av NMBU. Blant flere mulige ble det valgt ut to privateide bestand med ønsket struktur, lokalisert i Ås kommune ved Holstad og Bølstad (Figur 1). Begge ble også målt av Solem (2010), og domineres i dag av en bjørkeskjerm over et rikt undersjikt av gran med varierende størrelse og tetthet.



Figur 1. 2024-prøveflatenes posisjon (rød, heltrukken linje), sammen med kjente 2009-prøveflaters posisjoner (rød, stiplet linje: 100 m² hvor all gran ble tatt ut, og blå, stiplet linje: 250 m² hvor alle trær ble målt).

2.1.1 Bestandshistorikk

Flyfoto fra 1979 viser at bestandene tidligere var bevokst med eldre granskog. I neste flyfoto, datert 1988, er det avvirket på Bølstad, mens skogen fortsatt står på Holstad (Norkart AS et al., u.å.).

Bestandshistorikk Holstad

På Holstad ble det sluttavvirket etter flyfotograferingen i 1988, sannsynligvis like etter eierskiftet i 1990. Foryngelsen ble overlatt til seg selv, og det etablerte seg et rikt oppslag av bjørk og gran (samtale med Skuterud, 20. mars 2025). Eldste registrerte gran-årring i brysthøyde var fra 1999, og denne alderen ble funnet på mange trær (data fra Solem, 2010). Gitt etableringstiden ved naturlig foryngelse (*Stammespråk*, u.å.), er det ikke usannsynlig at de første grantrærne brukte 8-9 år før de nådde en høyde på 1,3 meter. Alder i 2024 anslås derfor til ca. 33 år.

Rundt 2001-2002 ble det gjort ungskogpleie med sikte på produksjon av bjørk, og i 2009 tok Solem (2010) ut gran på fire prøveflater på 100 m² (totalt 400 m²), hvorav tre delvis overlapper med 2024-prøveflata (Figur 1). Til sammen utgjør det overlappende arealet på Holstad rundt 200 m², eller ca. 13% av 2024-prøveflata.

Bestandshistorikk Bølstad

På Bølstad ble det avvirket rundt 1985, med intensjon om etablering av bærproduksjon. Marka ble ryddet for stubber og steiner som ble samlet i hauger (samtale med Bjerve, 20. mars 2025). Bestandet ble holdt åpent frem til tidligst 1988 (Norkart AS et al., u.å.). Da planene om nydyrking ble skrinlagt, etablerte bjørk og gran seg ved naturlig foryngelse. De eldste registrerte årringene i brysthøyde på gran på Bølstad er fra 1997 (Solem, 2010), og bestandets alder i 2024 anslås dermed til 35 år.

Rundt år 2000 ble det gjort en sen ungskogpleie (v/skogeiers datter) med sikte på produksjon av bjørk i den nordlige tredjedelen av bestandet, hvor minst 2/3 av denne oppgavens prøveflate ligger. Ifølge Sigrun Bjerve, som utførte ungskogpleien, var det stor variasjon i bjørkeoppslagets tetthet både før og etter behandlingen (Bjerve jr., 20. mars 2025). I 2009 ble det tatt ut gran på to prøveflater, totalt 200 m² (Solem, 2010). Kun én av disse ble funnet i 2024, og grenser til denne oppgavens prøveflate i sør (Figur 1). I 2010 ble det tynnet i bjørkeskjermen, med sikte på bjørk til konstruksjonsvirke, men kanskje bare i sørlige 2/3 av bestandet (Bjerve, pers.komm., 2025: «Han tok det datra mi ikke rakk over»). Gransjiktet ble beholdt «for oppkvisting».

2.1.2 Voksestedskarakteristikk

Av Solem (2010) ble Holstad karakterisert som storbregneskog (med tegn til forsumpning enkelte steder), og Bølstad som småbregneskog. Begge bestand ble den gang bonitert til B20, men høydemålinger fra 2024 gir en H40-bonitet på B23 på begge prøveflater (Strand, 1967).

2.1.3 Prøveflater i 2024

I hvert bestand ble det lagt ut én prøveflate på 40 x 40 m (1,6 daa), i en del av bestandet som hadde et granundersjikt med tilsynelatende ønsket struktur. Prøveflatene er dermed ikke nødvendigvis en god representasjon av hele bestandet. For å unngå konkurransemessige kanteffekter, ble flatene plassert minst 20 meter fra bestandets yttergrense. Gamle prøveflater fra Solem (2010) ble samtidig forsøkt unngått så langt det lot seg gjøre. Siden disse på Holstad lå i den delen av bestandet med best struktur, kunne bare én av disse i stor grad unngås, men dette førte til en avstand til bestandskanten i nord på kun 16 meter (Figur 1).

Prøveflatestørrelsen på 40 x 40 meter ble valgt med mål om størst mulig kjerneområde (innenfor 5 m fra flategrensen), samtidig som størrelsen måtte være liten nok til å oppnå både sikt og Vertex-kontakt mellom sentrum og trær nært flatehjørnene (maksimal avstand fra sentrum til hjørne: 28,28 meter).

På bakgrunn av tilgjengelig tid for feltarbeid, tretetthet i de to bestandene i 2009 og anslått tidsbruk per tre i lignende arbeider ble det kun lagt ut to prøveflater, én på Holstad og én på Bølstad (Tabell 1; Figur 1)

Tabell 1. Beskrivelse av prøveflatene (koordinater målt med telefon).

Prøveflate	Beliggenhet (sentrum)	Retning fra sentrum til midt på nordligste flatekant (gon)	Moh. (m)	Helning (%)
<i>Holstad</i>	59°40'37.4"N	12,26	130	3,0
	10°48'39.5"E			
<i>Bølstad</i>	59°41'39.3"N	390,0	116	4,3
	10°46'27.1"E			

Koordinater til prøveflatenes senter ble målt med telefon i Google Maps. Sentrum ble permanent markert med metallbolt. Prøveflatas høyeste og laveste punkt ble målt i kart, og helning i prosent beregnet ved å dividere høydedifferansen på distansen mellom punktene. Voksestedsspesialiteter som myrhull og større stein i dagen ble skjønnsmessig vurdert, og ingen slike ble liggende innenfor prøveflatene.

Tidligere prøveflater på 100 m², der gran i 2009 ble tatt ut til stammeskiveanalyser, ble lokalisert ved hjelp av grove koordinater fra Solem (2010) og funn av gamle fargebånd. Prøveflatene på 100 m² ble i 2024 avgrenset basert på mangel av store grantrær rundt de tidligere markerte trærne. På Holstad ble kun tre av fire prøveflater funnet, der samtlige var lokalisert helt eller delvis innenfor 2024-prøveflata. På Bølstad ble det kun funnet én prøveflate, som grenset til 2024-prøveflata i sør (Figur 1).

2.2 Registreringer

Feltarbeidet ble gjennomført i tre runder, som omfattet 1) registreringer for alle trær, 2) høydemålinger på stikkprøveutvalg fra hele prøveflata, og 3) høydetilvekstmålinger på stikkprøveutvalg av gran i prøveflatas kjerneområde. Mellom hver av disse rundene ble det gjort beregninger for å sikre at prøvetrærne jevnt representerte spredningen i diameter, høyde og konkurranse. Beregningene omfattet utregning av kartesiske koordinater (avsnitt 2.3.2), diameterfordelinger (2.3.3), høyde-diameterregresjoner (2.3.4) og estimering av konkurranseindekser (2.3.5).

2.2.1 Registrering av alle trær

Feltarbeidet ble gjennomført over 60 timer i perioden mai-oktober 2024. Diametere ble registrert i vekstsesong, men innenfor korte tidsavsnitt (Holstad 20.-23. mai og Bølstad 10.-14. juni).

Oppmåling av prøveflate

Prøveflata ble oppmålt med utgangspunkt i flatesentrum, og stikkstenger ble satt ut i hvert av de fire flatehjørnene ved hjelp av kompass og Vertex ultralyd-avstandsmåler. Stikkstenger ble også satt ut på flatekant midt mellom hvert flatehjørne. I tillegg ble en stikkstang plassert ca. 10 meter fra sentrum i retning N, for kalibrering av teodolitt (N = 0 gon). Flatesentrum ble permanent markert med metallbolt.

Treregistreringer

Innen hver av de to prøveflatene ble det for hvert tre registrert trenummer, treslag, diameter i brysthøyde (dbh, i cm), vinkel (gon) og avstand (m) fra teodolitt (flatesentrum). Dbh ble målt med klave (én måling per tre, med klave vendt mot flatesentrum), vinkel med teodolitt og avstand med Vertex ultralyd-avstandsmåler.

For trær der siktlinjen til sentrum var blokkert, ble vinkel (gon) målt til et synlig punkt vinkelrett til venstre (-) eller høyre (+) for treet, og en offset ($\pm$ m) mellom treet og dette punktet ble registrert. Offset ble målt vinkelrett ut fra stammen med en pinne markert for hver femte cm. Siden merkene kunne ses i teodolitten, ble det oppnådd centimetersnøyaktighet også for disse trærne.

Alle trær ble midlertidig markert med fargebånd, og hvert femte fikk sitt trenummer påskrevet. Til dette arbeidet trengtes to personer, hvor én stod i sentrum, målte vinkel og avstand og noterte registreringer, og den andre gikk fra tre til tre og klavet, monterte Vertex-transponderen, målte eventuell offset og markerte trær.

På bakgrunn av vinkel, avstand og offset, ble det for hvert tre regnet ut X- og Y-koordinater (se avsnitt 2.3.2). Koordinatene ble brukt til å lage kart med trenummer, fargelagt med treslag for å kunne lokalisere utvalgte prøvetrær.

2.2.2 Høydemåling

Høydemåling ble gjennomført over to dager i slutten av september 2024. Siden høyde og diameter er tett korrelert, ble trehøyder kun målt på et utvalg av trærne for å spare tid. Høyden ble estimert for de øvrige trærne, basert på regresjonsanalyse (se avsnitt 2.3.4).

Stratifisert prøvetreutvalg

For å sikre observasjoner på tvers av hele diameterspredningen, ble det foretatt et tilfeldig stratifisert utvalg av prøvetrær innenfor definerte diameterklasser (Tabell 2). For hver prøveflate ble det valgt ut 20 prøvetrær for bjørk (5 klasser med 4 trær i hver) og 30 for gran (6 klasser med 5 trær i hver).

Tabell 2. Diameterklasseinndeling for stratifisert utvalg av prøvetrær til høydemålinger på de to prøveflatene. Diameterklassene er oppgitt med deres nedre grenser. Maksimal observert dbh innen populasjonene er oppgitt i siste rad.

Dbh-klasse	Bjørk (n = 20) 5 klasser, 4 trær i hver		Gran (n = 30) 6 klasser, 5 trær i hver	
	Holstad (cm)	Bølstad (cm)	Holstad (cm)	Bølstad (cm)
1	3,0	2,5	2,5	2,5
2	7,0	7,0	4,5	4,5
3	11,0	11,5	6,5	6,5
4	15,0	16,0	8,5	8,5
5	19,0	20,5	10,5	10,5
6	-	-	12,5	14,0
Maks. dbh	22,3	26,3	20,0	28,1

For å ta høyde for eventuelle høydeveksthemmende skader blant prøvetrærne, ble antallet tilfeldige prøvetrær innen hver klasse doblet. Den ekstra halvparten var reservetrær, som kun ble målt dersom førstevalget ved måling viste seg å være skadet. I den største diameterklassen ble samtlige skadefrie trær høydemålt, grunnet få trær og stor diameterspredning i denne klassen (Tabell 2).

Høydemåling

Høyde i 2023 (observert høyde minus årsskudd 2024, H_{23}) ble målt på alle prøvetrær. Blant disse ble også H_{20} (høyden i 2020, tre kvistkranser ned fra H_{23}) målt på alle grantrær innenfor kjerneområdet (minst 5 meter fra flatekant). Høyden ble målt med Vertex høydemåler for trær høyere enn 5 meter, og med høydemålingsstang for lavere trær. H_{23} og H_{20} ble målt i meter, med desimeternøyaktighet.

På Holstad ble H_{23} målt på 32 grantrær, hvorav H_{20} ble målt for de 15 som var innenfor kjerneområdet. På Bølstad ble H_{23} målt for 41 grantrær, hvorav H_{20} ble målt for 20 trær.

2.2.3 Høydetilvekstmåling gran

Tredje runde med feltarbeid ble gjennomført over to dager i slutten av oktober 2024.

Prøvetreutvalg

På bakgrunn av estimerte høyder og konkurranseindekser (KI) for hvert grantre (se avsnitt 2.3.4 og 2.3.5), ble det fra hver prøveflates kjerneområde valgt ut prøvetrær som skulle representere tilnærmet alle høyder og KI -er. Målingen ble planlagt med sikte på tilpassing av én felles høydetilvekstmodell for begge bestand, med flere uavhengige variabler (utgangshøyde og KI). Utfra et minstekrav for en enkel regresjonsanalyse på 20-30 observasjoner, ble det antatt at totalt 120 observasjoner (60 per bestand) ville holde. Dette ville gi 20 trær til å representere KI -spredningen innenfor hver av seks høydeklasser. Til tross for at det allerede var målt høydetilvekst på en del trær (15 på Holstad, og 20 på Bølstad), ble det likevel planlagt for høydetilvekstmåling på 60 nye på hver prøveflate, for å sikre at KI -spredningen innen høydeklassene ble fanget opp.

Før høydetilvekstmåling ble alle grantrær innenfor hver prøveflates kjerneområde delt inn i og sortert etter seks (estimerte) høydeklasser med følgende nedre grenser: 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 15 m (Figur 3). Innenfor hver høydeklasse ble trærne sortert etter KI i stigende rekkefølge. Fra hver høydeklasse ble det valgt ut 10 prøvetrær, jevnt fordelt over variasjonen i KI , på følgende måte: Hvert x -te tre i den KI -sorterte høydeklassen ble valgt ut, der $x = n / 10$, og n = antall trær i høydeklassen. Dersom $n \leq 10$, ble alle trærne i klassen valgt. Dersom noen av de x -te trærne allerede var høydetilvekstmålt, ble det neste, ikke allerede tilvekstmålte treet i lista valgt.

Tilvekstmåling

På alle prøvetrær ble både H_{20} og H_{23} målt. Målingene resulterte i 46 nye høyderegristreringer på Holstad, og 51 nye på Bølstad. Til sammen var det på Holstad dermed registrert H_{23} for 78 trær, og H_{20} for 61 trær. Tilsvarende var det for Bølstad målt 92 (H_{23}) og 71 (H_{20}) trær. Høydetilvekstmodellen kunne dermed tilpasses totalt 132 observasjoner, spredt over alle mulige kombinasjoner av høyde og konkurransesituasjon.

2.3 Databehandling

2.3.1 Analyseverktøy

All databehandling og statistiske og grafiske analyser er gjennomført i RStudio (versjon 2024.12.0+467; RStudio Team, 2024), og språkmodellen ChatGPT (versjon 4; OpenAI, 2025) har jevnlig blitt brukt som støtte ved utforming og tilpasning av R-kode.

2.3.2 Beregning av kartesiske koordinater

Kartesiske koordinater ble beregnet for alle trær på prøveflata. X (m) ble beregnet fra Formel 1 og Y (m) fra Formel 2, der θ_{korr} er vinkel i radianer til hvert tre (sett fra teodolitt), korrigert for eventuell offset (Formel 4). Siden offsetpunkt på venstre side av trær var oppgitt som negative, og på høyre side som positive, justerer Formel 4 vinkelen opp (dreining mot høyre) for negative offsets og ned (dreining mot venstre) for positive. Vinkelen (θ) er omregnet til radianer fra gon, via grader (Formel 3). Til begge koordinater er 20 m lagt til, slik at origo flyttes fra sentrum til nedre venstre hjørne av prøveflata.

$$\text{Formel 1} \quad X = \sin(\theta_{korr}) \times avstand_{korr} + 20$$

$$\text{Formel 2} \quad Y = \cos(\theta_{korr}) \times avstand_{korr} + 20$$

$$\text{Formel 3} \quad \theta = vinkel_{gon} \times \left(\frac{360}{400}\right) \times \left(\frac{\pi}{180}\right)$$

$$\text{Formel 4} \quad \theta_{korr} = \begin{cases} \theta + \arctan\left(\frac{|offset_{korr}|}{avstand_{korr}}\right), & \text{hvis offset} < 0 \\ \theta - \arctan\left(\frac{|offset_{korr}|}{avstand_{korr}}\right), & \text{hvis offset} > 0 \\ \theta, & \text{hvis offset} = 0 \end{cases}$$

For å få koordinater til trærnes sentrum, og ikke til nærmeste punkt på Vertex-transponder utenpå trærne (4 cm utenfor bark), ble hver treavstand økt (Formel 5).

$$\text{Formel 5} \quad avstand_{korr} = \frac{dbh}{200} + 0,04 + avstand$$

For $offset_{korr}$ ble kun treradius ($dbh / 200$) lagt til offset.

2.3.3 Diameterfordelinger

For å vurdere utviklingen i bestandsstruktur, ble data fra Solem (2010) brukt til å beregne diameterfordelinger for Holstad og Bølstad ved bestandsalder ca. 20 år. Det ble brukt 3 cm brede diameterklasser, og alle grantrær med dbh under 2,5 cm ble plassert i en egen,

minste klasse. Det samme ble gjort for bestandene ved alder ca. 35 år, men med en nedre grense på 2,5 cm for minste diameterklasse.

For gransjiktet i 2024 (bestandsalder ≈ 35 år) ble det tilpasset en negativ eksponentialfunksjon til diameterfordelingen (Formel 6), der N er treantall i diameterklassen. DKM er diameterklassemidtpunkt (cm), og a og b er parametere.

Formel 6
$$N = a \times \exp(-b \times DKM)$$

Basert på funksjonen i Formel 6 ble det beregnet en q -verdi for gran på hver av prøveflatene. q indikerer forholdet mellom hvert nabopar av diameterklasser, og ble beregnet etter Formel 7 (Leak, 1965), der b er estimatet for b i Formel 6 og w er bredden på diameterklassene (her 3 cm). Parameterestimer og q -verdier er oppgitt i Tabell 8.

Formel 7
$$q = \exp(-b \times w)$$

2.3.4 Høyde-diameterregresjoner

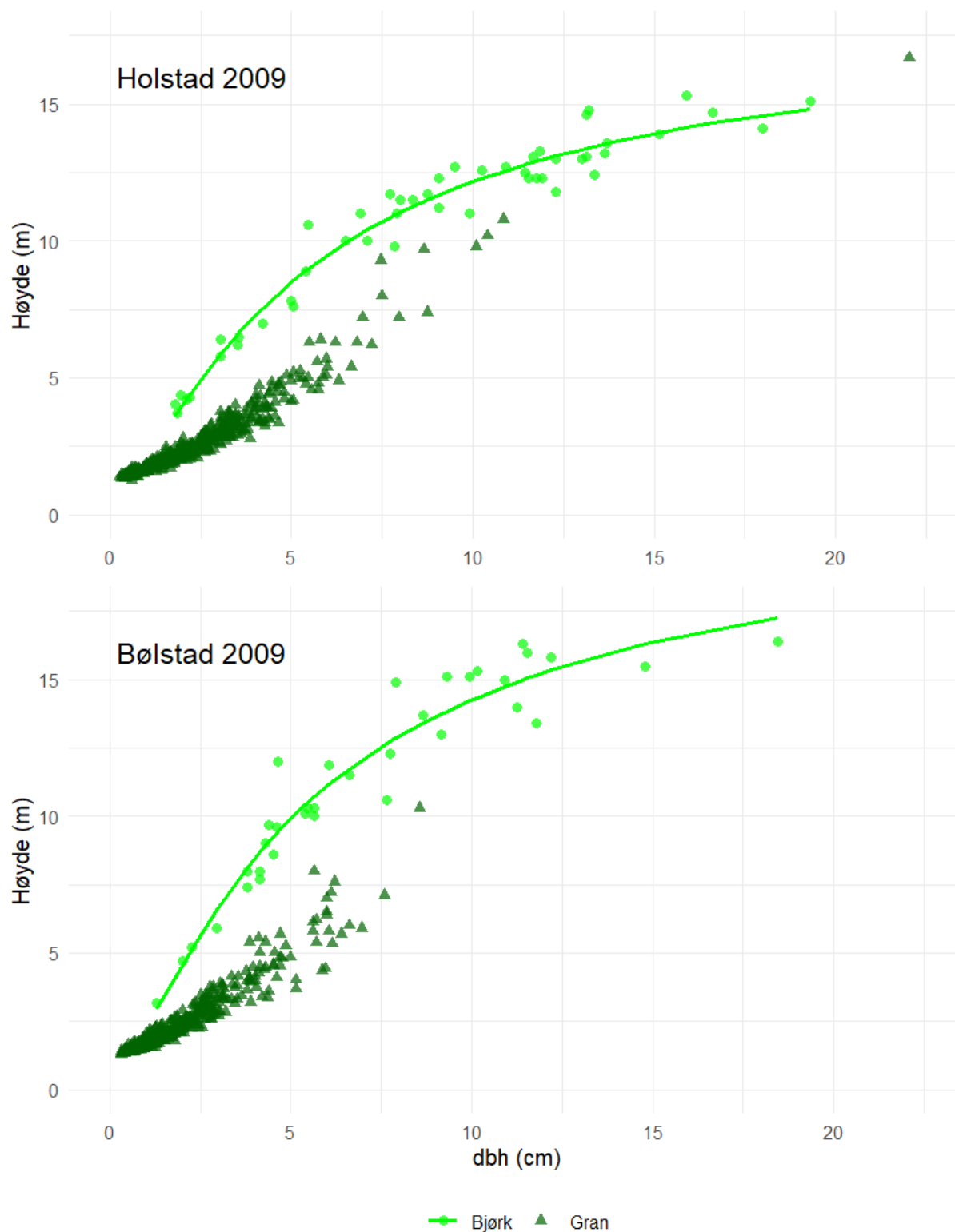
For å kunne beregne høydefordelinger for begge treslag både i 2009 (data fra Solem 2010) og 2023, ble trehøyder for alle ikke-høydemålte trær estimert med høyde-diameterregresjoner. Det ble tilpasset én for hvert treslag i hvert bestand, med unntak av gran i 2009 der alle grantrær var høydemålt. Alle parameterestimer og modellstatistikk oppgis i Tabell 3.

H/D-regresjon for bjørk

For bjørk, andre lauvtrær og furu ble høyder estimert ved hjelp av en modifisert Näslunds høyde-diameterfunksjon (Nilsson et al. (2010) i Gizachew et al., 2012). Funksjonen er oppgitt i Formel 8, der H er trehøyde (m), dbh er diameter i brysthøyde (cm) og a og b er parametere som estimeres fra data.

Formel 8
$$H = 1,3 + \left(\frac{dbh}{a + b \times dbh} \right)^3$$

De tilpassede høydemodellene ble brukt til å estimere trehøyder også for andre lauvtrær og furu, til tross for manglende høyderegistreringer for disse. De tilpassede regresjonslinjene er plottet sammen med observasjoner for begge treslag i Figur 2 for 2009 og Figur 4 for 2023.



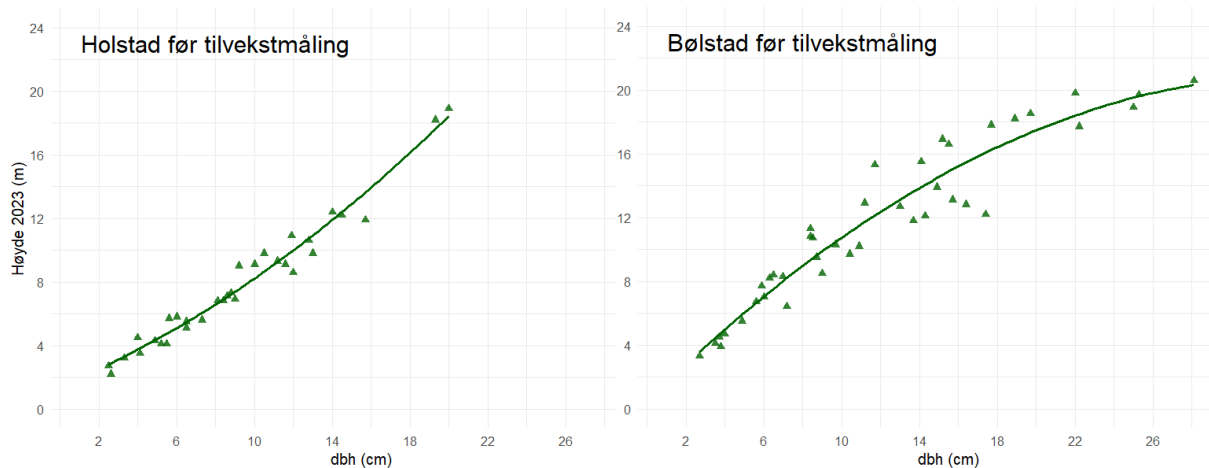
Figur 2. Regresjonslinjer for bjørk plottet med alle observasjoner av gran og bjørk på prøveflatene i 2009 (alder ca. 20). Holstad: 1,0 daa, Bølstad 0,5 daa.

H/D-regresjon for gran

Som det fremgår av Figur 2 og Figur 3, viser gran som vokser i undersjikt under en bjørkeskjerm ikke den typiske formen for H/D-forhold, som kan beskrives med modellen i Formel 8. I forkant av høydetilvekstmålingene ble høyde for alle grantrær i 2023 derfor estimert basert på en andregradsfunksjon (Formel 9), der H er trehøyde i 2023, dbh er diameter i brysthøyde (cm) og a , b og c er parametere som estimeres fra data.

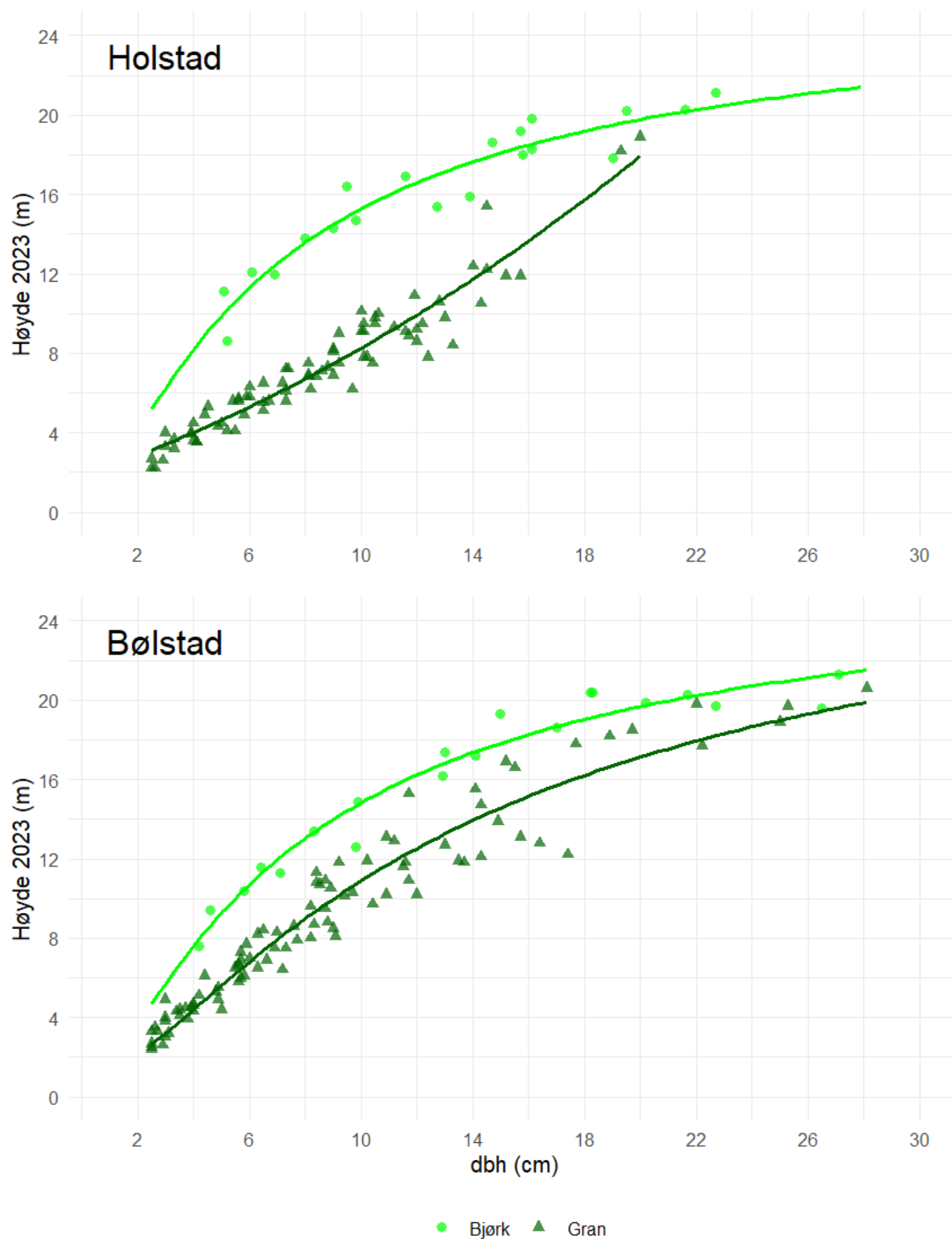
Formel 9
$$H = a + b \times dbh + c \times dbh^2$$

Høydeestimatene ble brukt til det stratifiserte stikkprøveutvalget i avsnitt 2.2.3. Regresjonslinjene er vist sammen med observasjoner i Figur 3.



Figur 3. Tilpassede regresjonslinjer og observasjoner for gran før høydetilvekstmåling.

Etter høydetilvekstmåling ble det for alle ikke-høydemålte grantrær på Holstad estimert nye trehøyder etter Formel 9, basert på et utvidet datamateriale fra tilvekstmålingene. For Bølstad, med langt flere høye trær, kunne Formel 8 benyttes til å beskrive sammenhengen også for gran (Figur 4).



Figur 4. Tilpassede regresjonslinjer og observasjoner for gran og bjørk etter høydetilvekstmåling.

Modellevaluering

Det ble for alle modeller utført grafisk residualanalyse, der residualer for høydeestimatene ble plottet over dbh. Annet enn noe heteroskedastisitet (større variasjon i observert høyde for større trær), avslørte analysen ingen mønstre som tydet på dårlig tilpasning i noen av modellene.

RMSE ble beregnet direkte fra residualene (Formel 10), der n er antall observasjoner, y_i er observerte høyder, og $\hat{y}_i$ er predikerte høyder for samme observerte dbh. *RMSE* uttrykker den gjennomsnittlige størrelsen på avvikene mellom observerte og predikerte verdier, der større avvik vektlegges mest.

Formel 10

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

R^2 og justert R^2 ble beregnet med Formel 11 og Formel 12, der $\bar{y}$ er gjennomsnittlig observert høyde, p er antall variabler og øvrige symboler har samme forklaring som i Formel 10. R^2 angir hvor stor andel av den totale variasjonen i høyde som forklares av modellen. Justert R^2 legger til en straff for unødvendige prediktorer, og gir dermed en mer pålitelig evaluering av komplekse modeller.

Formel 11

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Formel 12

$$R^2_{just.} = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right)$$

Parameterestimaterne er gjengitt i Tabell 3, med tilhørende feil. Alle parameterestimer (a , b og evt. c) var sterkt signifikante ($p < 0,005$) for alle estimer i samtlige modeller. Alle modellene vitner om tett sammenheng mellom høyde og diameter, med en gjennomgående justert R^2 høyere enn 0,91.

Tabell 3. Parameterestimer (med standardavvik i parentes og signifikansnivå angitt med stjerner: '***': $p < 0,001$, '**': $p < 0,01$), og modelltilpasningsstatistikk (R^2 just., *RMSE*) for alle høyde-diameterregresjoner (tvm = tilvekstmåling).

Data	Treslag	Bestand	Formel	Parameterestimer			n	$R^2_{just.}$	<i>RMSE</i> (m)
				a	b	c			
H_{09}	Bjørk	Holstad	Formel 8	0,662591 (0,032) ***	0,385316 (0,003) ***	-	49	0,96	0,65
		Bølsta		0,622720 (0,041) ***	0,363437 (0,005) ***	-	35	0,93	0,96
H_{23}	Bjørk	Holstad		0,73745 (0,063) ***	0,34142 (0,005) ***	-	20	0,91	0,98
		Bølsta		0,81556 (0,052) ***	0,33816 (0,004) ***	-	20	0,95	0,87

<i>H₂₃</i> <i>før</i> <i>tvm.</i>	<i>Gran</i>	<i>Holstad</i>	<i>Formel</i> <i>9</i>	5,8018 (0,1513) ***	46,0020 (2,096) ***	4,6663 (1,487) **	32	0,97	0,71
		<i>Bølstad</i>		7,1705 (0,3328) ***	80,2888 (4,947) ***	-11,525 (3,228) ***	41	0,91	1,43
<i>H₂₃</i> <i>etter</i> <i>tvm.</i>	<i>Gran</i>	<i>Holstad</i>	<i>Formel</i> <i>8</i>	5,9621 (0,119) ***	43,6014 (1,719) ***	4,3704 (1,478) **	78	0,91	0,94
		<i>Bølstad</i>		1,44584 (0,055) ***	0,32602 (0,005) ***	-	92	0,94	1,17

Høydefordelinger og 3D-visualisering

Basert på alle træs trehøyder (observerte for høydemålte og predikerte for ikke-målte), ble det for hver treslagsgruppe beregnet høydefordelinger med 1 m brede høydeklasser, både fra 2009 og 2023. Det ble også produsert 3D-visualiseringer basert på posisjon, dbh, og estimerte høyder for alle trær.

2.3.5 Konkurransindekser

For å kunne undersøke om variasjonen i høydetilvekst henger sammen med konkurranse, ble det beregnet konkurranseindekser (*KI*) som uttrykk for konkurransesituasjonen til hvert enkelt grantre innenfor kjerneområdet. Siden prøveflatene er store (kjerneområde på 30 x 30 meter), og datamaterialet omfatter både posisjon og størrelse for alle trær, ble det brukt en avstands- og størrelsesavhengig *KI*. Hvert tre sin konkurransesituasjon ble beskrevet basert på størrelse og avstand (utregnet fra *X*- og *Y*-koordinater) til alle konkurrenter innenfor en 5 meter radius.

Konkurransbidraget (*KB*) fra alle konkurrenter (*k*) for hvert subjekttré (*s*) ble beregnet med en potensfunksjon som beskriver størrelseseffekten, og en negativ eksponentialfunksjon som beskriver avstandseffekten fra konkurrenten (Formel 13, hentet fra Houtmeyers & Brunner, 2020, basert på CI3 i Sharma & Brunner, 2016). I funksjonen bidrar alle konkurrenter til *KB*-summen, men store trær (høy *dbh_k*) og trær med kort avstand til subjektreet (*avstand_{s,k}*) bidrar mest.

Formel 13

$$KB = \sum_{k=1}^n dbh_k^2 \times \exp(-0,5 \times avstand_{s,k})$$

Ved bruk av Formel 14 ble *KB* for hvert subjekttré skalert til dets egen størrelse (*dbh_s*), slik at små subjekttrær for det samme *KB* fikk høyere *KI*. Ved hjelp av Formel 14 ble *KI* skalert mellom 0 og 1, der 1 representerer trær med maksimal konkurranse, og 0 representerer trær med fullstendig fravær av konkurranse.

Formel 14

$$KI = \frac{KB}{KB + dbh_s^2}$$

Flere tidligere studier har brukt lignende konkurranseindekser (Canham et al., 2004; Canham et al., 2006; Pommerening et al., 2011; Sharma & Brunner, 2016). I denne oppgaven følges eksempelet fra Houtmeyers & Brunner (2020), som basert på flere andre studier har satt parameterne til verdiene vist i Formel 13. Disse estimatene representerer effekten av konkurranse for ulike treslag og responsvariabler.

Størrelseseffekten av konkurrentene blir beskrevet med dbh_k satt i kvadrat (som er nesten identisk med estimatet ($p = 2,07$) for høydetilveksten på gran i Sharma & Brunner (2016; Tabell 3), og avstandseffekten med en negativ eksponentialfunksjon med parameter $q = 0,5$. Estimatet for q ble av Houtmeyers & Brunner (2020) satt som et representativt gjennomsnitt for gran og furu, men der brukt for diametervekst. For høydetilveksten på gran estimerte Sharma & Brunner (2016; Tabell 3) imidlertid en høyere verdi ($p = 0,829$), som betyr at granas høydetilvekst i virkeligheten er mindre sensitiv for konkurranse fra trær lenger unna enn det Formel 13 estimerer.

Formel 14 tar ikke høyde for ulik konkurranseeffekt fra ulike treslag. For å undersøke effekten av gran- og bjørkekonkurrenter separat, ble KB summert for konkurrenter innen hver treslagsgruppe. Andelen av konkurransebidraget fra treslagsgruppene ble beregnet med Formel 15, eksemplifisert med gran.

Formel 15

$$gran_{andel} = \frac{KB_{gran}}{KB_{total}}$$

Valget om kun å inkludere trær innen en radius på 5 meter fra subjektreet ble tatt basert på Figur 3 i Sharma & Brunner (2016), som for et stort omfang av norske data viste at trær lengre unna enn 5 bidrar svært lite til den totale konkurransen for subjekttrær av gran. Fra konkurrenter jevnstore med subjektreet var konkurransen helt fraværende utenfor en radius på 5 m, mens store konkurrenter (relativt til subjektreet) også utenfor radiusen bidro med noe konkurranse. Akkurat som i denne oppgaven ble KI i studien undersøkt i relasjon til høydetilvekst på gran, som begrunner bruk av Formel 14.

Siden det aller meste av konkurransen kommer fra de nærmeste trærne, ble søkeradius satt til 5 meter for alle trær, som også begrunner høydetilvekstmåling på trær helt inntil 5 meter fra prøveflatas ytterkant.

2.3.6 Høydetilvekstmodeller

For å undersøke i hvilken grad variasjonen i høydetilvekst skyldes konkurranse, ble det tilpasset en rekke høydetilvekstmodeller. Målet var innledningsvis å finne en modell som forklarer periodisk årlig høydetilvekst (htv , middel av perioden 2021-2023) ved hjelp av både utgangshøyde (H_{20}) og KI fra hver treslagsgruppe.

Det ble tatt utgangspunkt i en typisk tilvekstmodell hvor tilveksten estimeres basert på en potensialfunksjon, som beskriver veksten uten konkurranse, og en potensialmodifikatorfunksjon, som beskriver hvordan konkurranse reduserer den maksimalt mulige veksten (eks. Sharma & Brunner, 2016). For grunnflatetilvekst har Andersson (2015, formel 16-18) også benyttet denne modelltypen. Den samlede tilvekstfunksjonen for høydetilveksten (htv) kan beskrives med Formel 16,

$$\text{Formel 16} \quad htv = a \times H_{20}^b \times \exp(c \times H_{20}) \times PM$$

der potensialfunksjonen, dvs. potensiell høydetilvekst (htv) gitt utgangshøyde (H_{20}), representeres av de første tre termene med parameterne a , b og c , og PM representerer potensialmodifikasjonen, dvs. den konkurransebaserte reduksjonen i tilvekst.

Potensialfunksjonen beskriver et typisk vekstmønster for et tre, der tilveksten først øker frem mot en periode med maksimal tilvekst, og deretter avtar når treet nærmer seg sin maksimalt oppnåelige høyde. Høydetilveksten kulminerer langt tidligere (Figur 8) enn tilvekst i diameter, grunnflate og volum, hvor perioden med maksimal vekst ligger ved høye dimensjoner. Siden det er høydetilveksten som i denne studien blir undersøkt, dekker dataene derfor området som kan beskrive potensialfunksjonen.

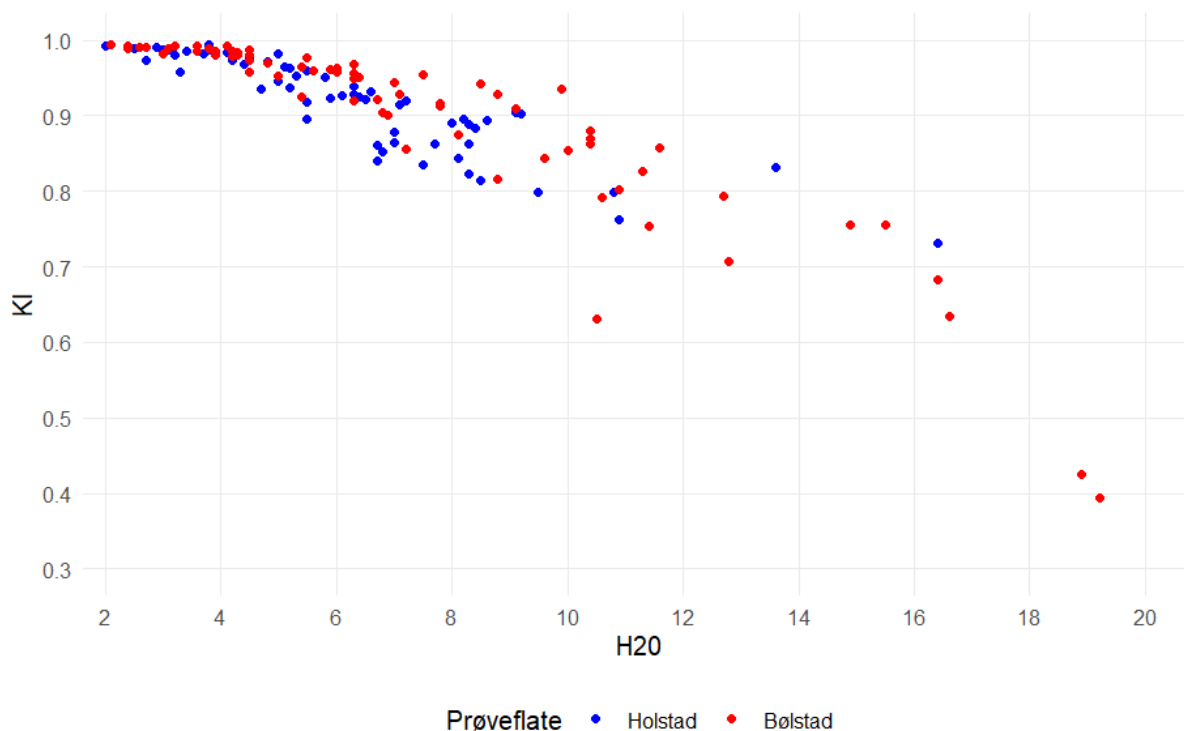
Ulike spesifikasjoner av PM ble forsøkt, både med artsspesifikke og samlede konkurranseindekser, for eksempel de oppgitt i Formel 17 og Formel 18.

$$\text{Formel 17} \quad PM = (1 - KI)^d$$

$$\text{Formel 18} \quad PM = (1 - KI)^d \times gran_{andel}^e$$

Formlene reduserer høydetilveksten ikke-lineært med økende KI , og formen på denne effekten styres av estimatet for d .

Det ble gjort mange forsøk med ulike varianter av modeller som estimerer potensialfunksjonen og PM -funksjonen samtidig. Den sterke multikolariteten mellom forklaringsvariablene førte til at KI overtok forklaringen for en del av variasjonen i vekstpotensialet, eller at H_{20} overtok en del av KI -effekten (Figur 5).



Figur 5. Sammenheng mellom konkurranseindeks (KI) og utgangshøyde (H20).

Den ekstremt tette sammenhengen mellom KI og H_{20} og manglende data fra fritt voksende trær i hele spennet av utgangshøyder, gjorde det umulig å tilpasse modeller som samtidig estimerte både vekstpotensial og konkurranseeffekt. Det ble derfor forsøkt en metode hvor vekstpotensialet i stedet settes av en boniteringsmodell. En høydetilvekstmodell for gran fra Sharma et al. (2011), som beskriver utviklingen av overhøyden (H_{dom}) som funksjon av brysthøydealder (t) og bonitet (H_{40}), ble brukt for å beskrive granas høydetilvekstpotensial (Formel 19).

$$H_{dom} - 1,3 = \frac{b_1 + X_0}{1 + \frac{b_2}{X_0} \times t^{-b_3}}$$

der

Formel 19

$$X_0 = 0,5 \times (c + \sqrt{c^2 + 4 \times b_2 \times (H_{40} - 1,3) \times 40^{-b_3}})$$

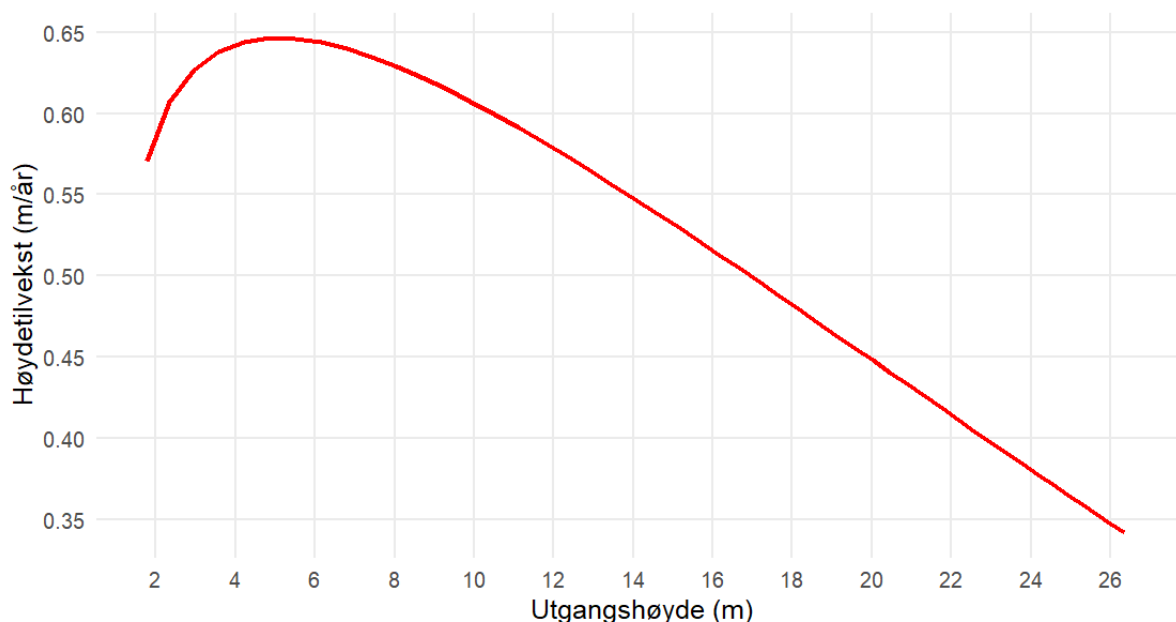
og

$$c = (H_{40} - 1,3) - b_1$$

Sharma et al. (2011) estimerte følgende parameterverdier for gran: $b_1 = 18,9206$, $b_2 = 5175,18$ og $b_3 = 1,1576$. For å kunne bruke formelen, kreves det at granboniteten er kjent. Siden all gran på prøveflatene er mer eller mindre undertrykt, kan ikke boniteten

estimeres, men gitt en bjørkebonitet på B23 er det sannsynlig at også granboniteten er høy. Det ble derfor tatt utgangspunkt i en bonitet (H_{40}) på G23.

Formel 19 kan brukes til å estimere høyde og høydetilvekst til dominerende grantrær uten konkurranse. Dette ble gjort numerisk ved for hver alder t fra 1 til 50 år å beregne høyde og høydedifferanse mellom t og $t+1$ (Figur 6).



Figur 6. Høydetilvekst forklart av utgangshøyde for dominerende grantrær på bonitet G23 (Sharma et al., 2011).

Til disse predikerte sammenhengene mellom høyde og høydetilvekst ble det tilpasset en ikke-lineær tilvekstfunksjon basert på potensialfunksjonen i Formel 16, der PM-termen er utelatt. Parameterestimer og modellstatistikk er oppgitt i Tabell 4.

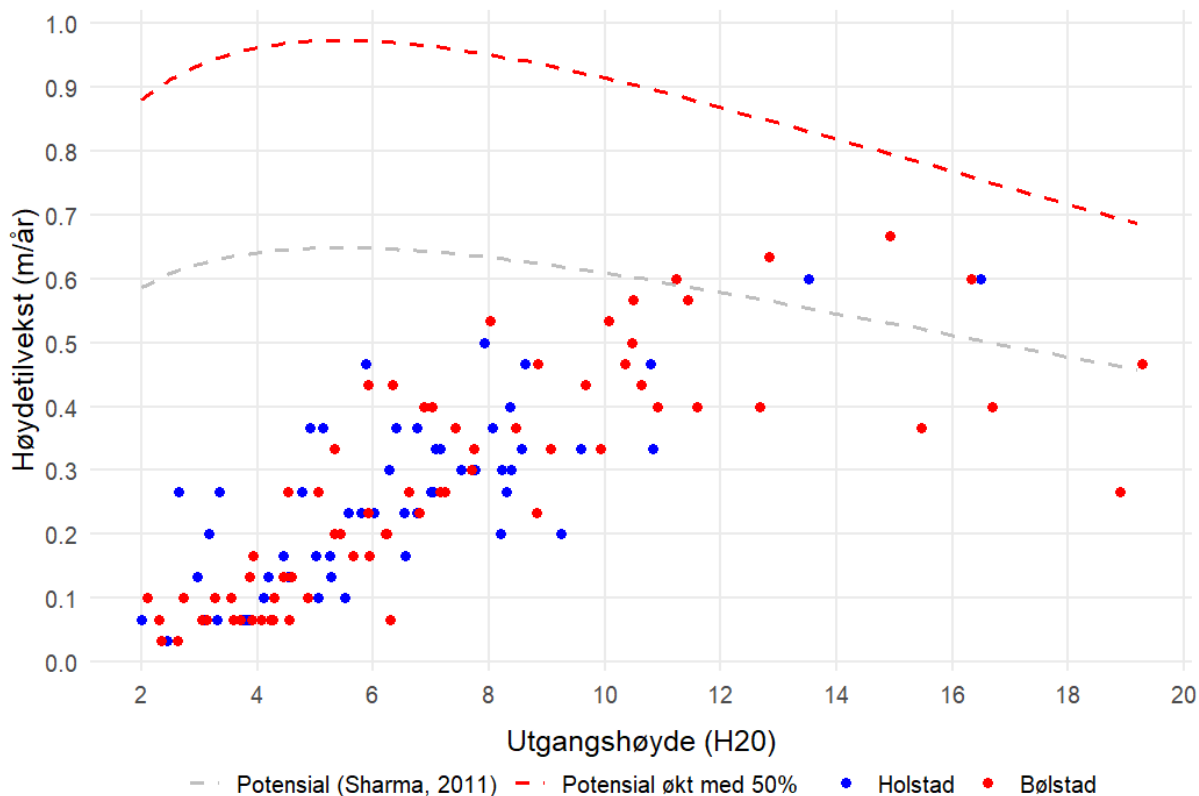
Tabell 4. Parameterestimer (med standardavvik i parentes og signifikansnivå angitt med stjerner: '***': $p < 0,001$, '**': $p < 0,01$), og modellstatistikk ($R^2_{just.}$, RMSE; Formel 10-Formel 12) for potensiell høydetilvekst (Formel 16, uten PM).

Parameterestimer			n	$R^2_{just.}$	RMSE (m/år)
a	b	c			
0,5361776 (0,0027400) ***	0,2741299 (0,0041277) ***	-0,0503743 (0,0004102) ***	50	0,9989	0,003

Modellen beskriver gjennomsnittet for årlig høydetilvekst på de 100 grøvste trærne per hektar, altså de mest dominerende trærne hvor høydetilveksten ikke er hemmet av konkurranse. Siden høydetilveksten for disse trærne varierer uavhengig av konkurranse, beskriver ikke middeltilveksten for disse den maksimalt mulige høydetilveksten. Det er derfor vanlig å øke potensialet i vekstmodellene (eks. Pretzsch et al., 2002).

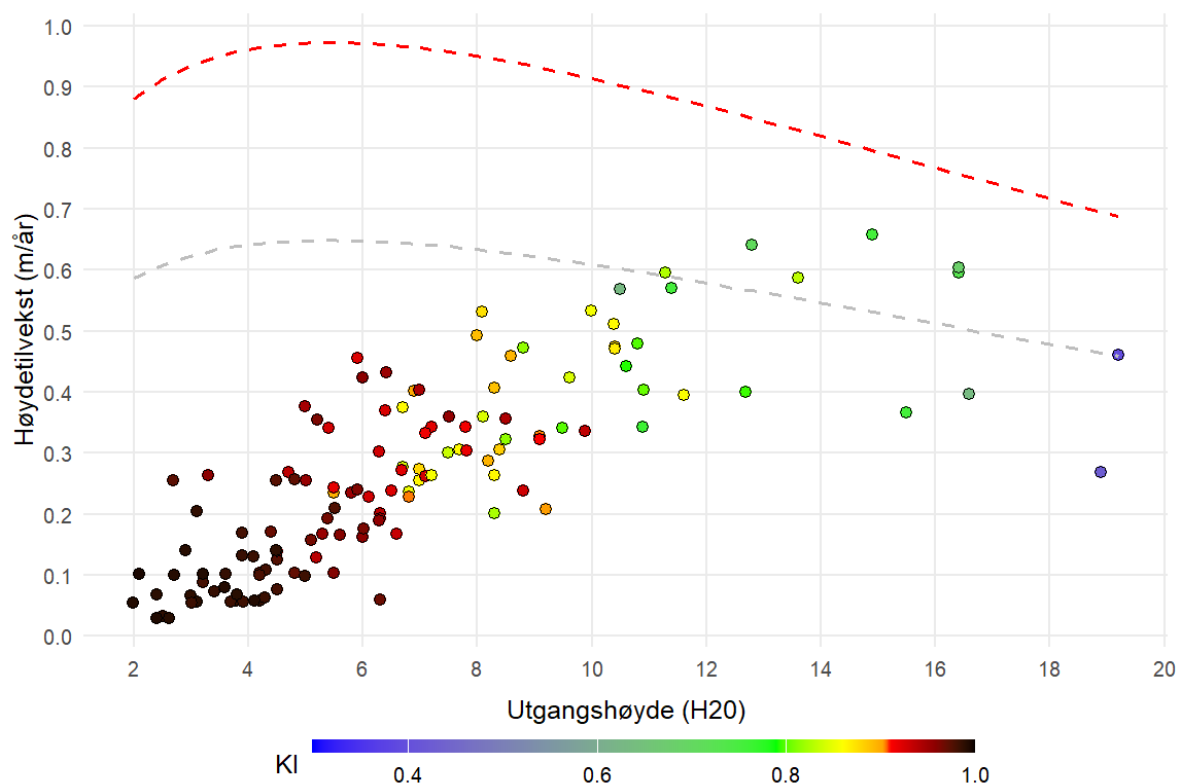
Potensialfunksjonen (Formel 16, uten PM) må derfor økes med en multiplikator, slik at modellen uttrykker det ytterste høydetilvekspotensialet for gran ved bonitet G23. For å

finne riktig multiplikator, plottes høydetilvekstobservasjonene (htv) mot utgangshøyde (H_{20}) sammen med potensialmodellens prediksjoner for de samme høydene (Figur 7).



Figur 7. Observert høydetilvekst for ulike utgangshøyder, plottet sammen med modellen for bonitet G23 (grå linje) (Sharma et al. 2011) og 50% økt høydetilvekst som potensial (rød linje).

At middelhøyden fra Sharma et al. (2011) sin modell underestimerer potencialet, bekreftes av at flere høydetilvekstobservasjoner overstiger den estimerte høydetilveksten. Siden selv trærne med hurtigst høydetilvekst har KI -verdier på rundt 0,8 (Figur 8), bør den potensielle høydetilveksten ligge godt over disse observasjonene. Potensialet multipliseres derfor med 1,5.



Figur 8. Observert høydetilvekst over utgangshøyde (fargelagt med konkurranseindeks), plottet sammen med potensialmodellen med 50% økning (rød linje) fra modellen for bonitet G23 (grå linje) (Sharma et al. 2011).

Potensialmodifikatoren (*PM*) beskriver den realiserte høydetilveksten i forhold til potensialet for en gitt utgangshøyde. Hvor mye av *PM*-effekten som skyldes konkurranse blir vanligvis undersøkt med *PM*-funksjoner, som for høydetilvekst på gran kan forventes å ha en asymptotisk form (Sharma & Brunner, 2016). Dette betyr at høydetilveksten ikke begrenses for *KI* mellom 0 og moderat høye verdier, og at bare svært høye *KI*-verdier gir redusert høydetilvekst (gjennom redusert *PM*). I denne undersøkelsen finnes kun data fra trær med veldig høy konkurranse (*KI* over 0,7, Figur 5) og det er derfor ikke mulig å tilpasse en *PM*-modell med en biologisk realistisk form over hele *KI*-spekteret. Det ble derfor kun beregnet *PM*-modeller som best mulig beskriver dataene innenfor det dekkede *KI*-området. Til denne oppgaven er polynomer godt egnet (Formel 20).

Formel 20
$$PM = a + b \times (1 - KI) + c \times (1 - KI)^2$$

Kurveformen, som defineres av *c*-parameteren, var ikke signifikant for Holstad, og det ble derfor tilpasset en rettlinjet funksjon kun for de to første termene i Formel 20.

For alle observasjoner ble estimer for potensiell høydetilvekst gitt utgangshøyde multiplisert med estimer etter *PM* gitt *KI* (Formel 16; Formel 20). Fra disse prediksjonene ble det regnet ut høydetilvekstresidualer (observert minus predikert høydetilvekst for hver observerte kombinasjon av utgangshøyde og *KI*). Residualene ble

plottet over KI , utgangshøyde og granandel for å undersøke om det finnes mønstre i dataene som den fulle høydetilvekstmodellen ikke beskriver.

2.4 Transekter

For å kunne påvise et granundersjikts diameterfordeling med transekter på 60 ± 20 trær, må stikkprøvemethodens pålitelighet være kjent. I denne oppgaven undersøkes denne ved å sammenligne prøveflatas diameterfordeling med diameterforelingen i tusenvis av simulerte transekter. Resultatene viser hvilke feilnivåer som kan forventes med ulike transekttreantall (N), strenghet i krav til kriterieoppfyllelse (K) og i ulike bestand.

2.4.1 Diameterfordeling med fire klasser

For å kunne vurdere representativiteten, sammenlignes prøveflatenes diameterfordeling (fasit) med transektenes (stikkprøve). Siden transektene inneholder relativt få trær, brukes en inndeling i fire diameterklasser, som sørger for en viss utjevning av tilfeldig variasjon (Brunner et al., 2023; Lundqvist et al., 2009).

Diameterklassebredden ble satt til 3,5 cm på Holstad og 4,0 cm på Bølstad, tilpasset diameterspredningen og rundet til nærmeste 0,5 cm (Tabell 5). Den største diameterklassen (D4) har kun en nedre grense, og inneholder dermed alle de største trærne, inkludert ekstremverdier (Holstad: 17,7, 19,3 og 20,0 cm, og Bølstad: 25, 25,3 og 28,1 cm).

Tabell 5. Diameterklasseinndeling for de to prøveflatene, oppgitt med nedre grenser (D1 slutter der D2 begynner, etc.).

<i>Prøveflate</i>	<i>Diameterklassenes nedre grenser (cm)</i>				<i>maks. dbh (cm)</i>
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>D4</i>	
<i>Holstad</i>	2,5	6,0	9,5	13,0	20,0
<i>Bølstad</i>	2,5	6,5	10,5	14,5	28,1

Med denne klasseinndelingen ble kun tre ekstremverdier på Holstad liggende utenfor en D4 med en tenkt øvre grense på 17,5 cm. På Bølstad var imidlertid diameterspredningen i øvre sjikt større, og hele 11 trær lå over en tenkt øvre D4-grense på 18,5 cm.

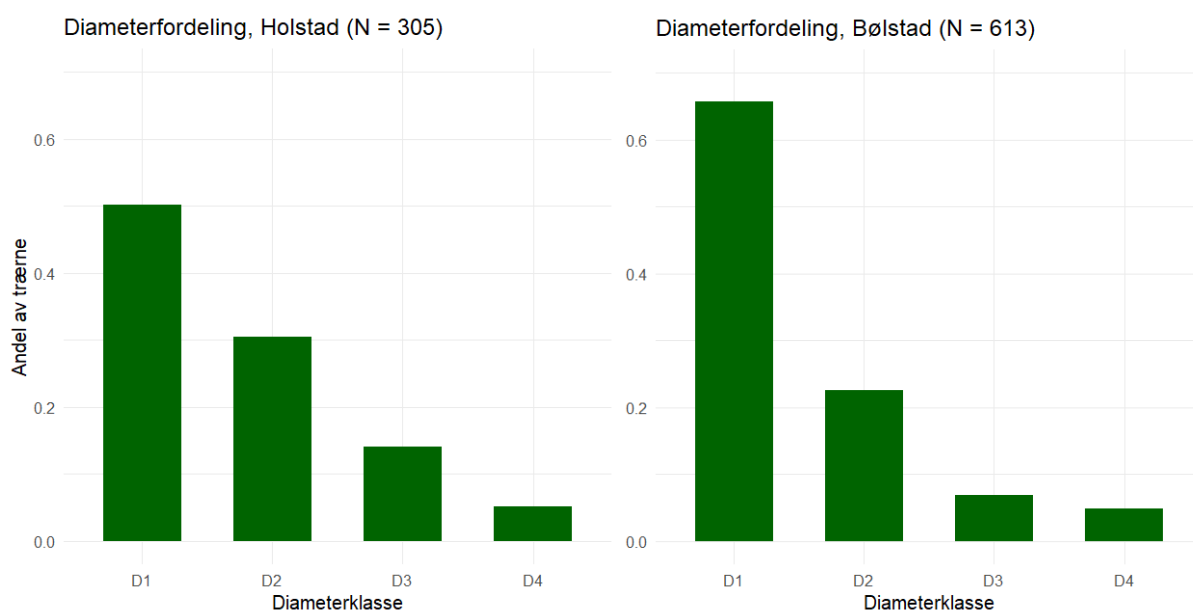
Med fire jevnbrede diameterklasser fordelt mellom minste og største «normale» diameter (22,2 cm), ville klassebredden på Bølstad vært 5 cm. Hele prøveflata ville da inneholdt henholdsvis 32 (5,2%) og 14 (2,3%) trær i D3 og D4. Dette ble vurdert som utilstrekkelig, gitt et mål om å fange opp hele diameterspredningen med transekter på 60 trær. Selv transekter ($N = 60$) med perfekt representasjon av diameterfordelingen ville hatt henholdsvis 3 og 1 trær i de to største klassene. Når store trær i bestandet antas å være ujevnt fordelt, er det en stor risiko for at mange tilfeldig plasserte 60-trærs transekter da ikke vil fange opp noen trær i én eller begge av de største klassene. Dette begrunner valget av en klassebredde for Bølstad på 4,0 cm, som gir flere trær i de to

største klassene, og som dermed øker sannsynligheten for at disse fanges opp. Med en inndeling etter Tabell 5 er Bølstads relative treantall (andeler) i de største diameterklassene nært de tilsvarende andelene på Holstad ($p1-p4$; Tabell 6).

Tabell 6. Antall trær på flata (N), samt antallet ($n1-n4$) og andelen ($p1-p4$) trær i de fire diameterklassene.

Prøveflate	N	n1	n2	n3	n4	p1	p2	p3	p4
Holstad	305	153	93	43	16	0,50	0,30	0,14	0,05
Bølstad	613	403	138	42	30	0,66	0,23	0,07	0,05

For begge prøveflater ble grantrærne i hver diameterklasse summert ($n1-n4$) og omregnet til relative antall, heretter omtalt som «andel» ($p1-p4$, Tabell 6). Diameterfordeling oppgitt i diameterklasseandeler muliggjør direkte sammenligning mellom prøveflata og transekter med varierende treantall. De to prøveflatenes relative diameterfordelinger for gran er framstilt i Figur 9.



Figur 9. Diameterfordeling for gran på prøveflatene, oppgitt i relativt antall (andel) i hver klasse.

2.4.2 Kriterier (K) for samsvar i diameterfordeling

For å vurdere transektenes evne til å representere prøveflatenes diameterfordelinger, ble det definert tre kriterier med økende krav til samsvar mellom prøveflate og transekt (K1-K3). Siden begge prøveflater har en tydelig fallende diameterfordeling (Figur 9), kan kriteriene brukes til å vurdere transektenes evne til å påvise en flersjiktet struktur.

- K1 $p1 > p2 > p3$ og minst ett tre i D4 ($p4 > 0$)
- K2 K1 oppfylt, og minst ett tre i D3 ($p3 > 0$)
- K3 K2 oppfylt, og gjennomsnittlig absoluttavvik $\leq 0,05$

K1 oppfylles dersom diameterfordelingen i et transekt samsvarer med de viktigste karaktertrekkene til en fallende diameterfordeling. Kravet om store trær ($p_4 > 0$) sikrer at hele bestandets spenn av diametere blir representert, og $p_1 > p_2 > p_3$ at den eventuelt fallende fordelingen påvises. Kriteriet tillater imidlertid fravær av mellomstore trær (D3), og vil dermed kunne oppfylles også for bestand med en mer tosiktig struktur.

K2 krever derfor at transektene også må ha trær i den tredje klassen (D3). Dette kriteriet sikrer en jevnt fallende diameterfordeling, der det finnes trær i alle diameterklasser. At kravet om trær i D3 har lavere prioritet her enn i Lundqvist et al. (2009) sine sidestilte krav, begrunnes med at D3-trærne ofte befinner seg i et diameterområde der fordelingen kan være relativt flat (jf. Bølstad i Figur 9). Selv om trær i alle klasser er ønskelig, er det ikke like viktig som at transektene påviser en fallende diameterfordeling for de tre første klasser og finner de største trærne.

K3 krever i tillegg at de allerede akseptable transektene (med K1 og K2 oppfylt) også skal gjenspeile bestandets diameterfordeling med en viss presisjon. Dette vurderes ved hjelp av det gjennomsnittlige absolutte avviket i diameterklassenes andeler (p_1 - p_4) mellom transektene og prøveflata (Tabell 6). Absoluttavviket er valgt fordi det ikke blir kunstig høyt i klasser med små andeler, slik relative avvik kan bli, og det tilsvarer et likt treantall på tvers av diameterklassene.

Tålegrensen for det gjennomsnittlige absoluttavviket ble satt til 0,05. Dette tillater en gjennomsnittlig variasjon i diameterklasseandelene på inntil 5% av N , tilsvarende ± 2 trær for $N = 40$, ± 3 trær for $N = 60$ og ± 4 trær for $N = 80$. I praksis vil likevel D1, som vanligvis inneholder flest trær, bidra mest til det totale avviket. Høy presisjon i form av lavt absoluttavvik (og dermed oppfylt K3) vil derfor sikre at transektets D1-andel er i godt samsvar med bestandets. Dette er hensiktsmessig, siden andelen små trær er av avgjørende betydning for bestandets vekst og utvikling på lang sikt (Sterba, 2004).

Transekttreantall (N)

Målet med transektene er at de uten å være for arbeidskrevende skal gi en god representasjon av prøveflatas diameterfordeling. Korte transekter krever mindre arbeid, men vil gi diameterfordelinger som i stor grad preges av tilfeldig variasjon. Et høyere treantall (N) vil være mer arbeidskrevende, men sørge for at mer av den virkelige størrelsesvariasjonen i hele bestandet fanges opp.

Et gransjikt med fallende diameterfordeling vil ha en lav andel trær i største diameterklasse (D4). Små stikkprøveutvalg vil dermed ofte mangle trær i denne klassen, slik at hele diameterspredningen ikke blir representert. Når D4 inneholder kun 5% av prøveflatenes trær (Figur 9; Tabell 6), vil $N = 40$ i snitt gi to D4-trær, $N = 60$ gi tre og $N = 80$ gi fire. Et gjennomsnitt på tre trær (for $N = 60$) antas å gi tilstrekkelig buffer for tilfeldig

variasjon, slik at de fleste stikkprøvene fanger opp minst ett tre i D4 samtidig som målearbeidet ikke blir for omfattende.

For å undersøke hvordan transektenes representativitet påvirkes av varierende N rundt det antatt tilstrekkelige, ble det derfor simulert transekter for $N = 40, 50, 60, 70$ og 80 . Representativiteten estimeres som andelen simulerte transekter der diameterfordelingen oppfyller de fastsatte kriteriene ($K1-K3$) for samsvar med diameterfordelingen i hele bestandet.

2.4.3 System for stikkprøveutvalg

Transektene ble simulert ved å trekke ut grupper på N trær i en rekkefølge som samsvarer med realistiske transekter. Vanligvis følger transekter en rett linje framover, men på grunn av prøveflatestørrelsen var det ikke alltid mulig å oppnå N trær innen stikkprøveflater (striper) på kun 5×40 meter. For å løse dette ble det laget et buktende system, hvor ufullførte transekter kunne fortsette i motsatt retning i neste stripe. Dette ga potensial for svært mange representative stikkprøveutvalg.

For hver prøveflate ble det lagt ut en fem meter bred «slange» bestående av åtte 40 meter lange, parallelle transektstriper ($a-h$), som til sammen dekket hele prøveflata (Figur 10). Det ble lagt ut totalt fire varianter av slangen på hver flate, én for hver kombinasjon av retning (X/Y) og med eller uten forskyvning på 2,5 m. I de forskjøyne slangene (nederst i figuren) ble siste stripe (h) delt i to på langs, som ble løst ved å legge den utenforliggende halvdelen inntil a -stripa på motsatt side av flata. Systemet ga til sammen fire 5 meter brede og 320 meter lange transektslanger, som definerte rekkefølgen for utvalg av trær i stikkprøvene.



Figur 10. System som definerer ruten for treutvalg innen tilfeldige transekter med et gitt treantall. Øverst: vanlig system. Nederst: forskjøvet system. Venstre: X-retning. Høyre: Y-retning.

Basert på deres koordinater ble alle trær sortert etter økende avstand via slangens midtlinje tilbake til start. Fra hver av de fire slangene ble det i denne rekkefølgen plukket ut grupper på N trær, som systematisk forskjøv seg ett tre om gangen til alle trær langs slangen var starttre for hvert sitt transekt. Når det mot slangens ende (h) gjensto færre enn N trær etter startreet, ble resterende trær hentet fra starten av a -stripa.

Simulasjonen resulterte i et datasett med 2452 transekter for hver N på Bølstad og 1220 transekter for hver N på Holstad. Utvalgsstørrelsen tilsvarer fire ganger flatenes treantall, én gang for hver kombinasjon av retning (X/Y), og forskyving (vanlig / forskjøvet), og hvert transekt representerer en tilfeldig stikkprøve.

2.4.4 Transektanalyser

For hvert transekt – dvs. hver unike kombinasjon av prøveflate, retning, forskyvning, treantall (N) og starttre – ble følgende variabler oppsummert: antall ($n1-n4$) og andel ($p1-p4$) trær i de fire diameterklassene, om transektet har en fallende fordeling ($p1 > p2 > p3$), om det finnes trær i klassene D3 og/eller D4, absoluttavvik (relativt til N) per diameterklasse (jf. $K3$ i avsnitt 2.4.2), gjennomsnittlig absoluttavvik på tvers av klassene, og hvorvidt dette gjennomsnittet var innenfor tålegrensen på 0,05.

Basert på disse variablene ble, for hvert bestand og treantall (N), andelen transekter som oppfylte kriteriene $p1 > p2 > p3$ og $p4 > 0$, samt Kriterium 1, 2 og 3. Disse andelene uttrykker hvordan transektenes representativitet påvirkes av kriteriestrenghet (K), treantall (N) og bestandsstruktur.

Transektlengde

Transektlengde (m) ble for hvert transekt beregnet som avstanden (i transektets lengderetning, langs «slangen», se Figur 10) mellom transektets første og siste tre. For å undersøke om transektenes lengde påvirker graden av kriterieoppfyllelse, ble hver prøveflates transekter (kun for $N = 60$) delt inn i 10 lengdeklasser med et likt antall observasjoner, og kriterieoppfyllelsen innen hver lengdeklasse ble grafisk fremstilt.

Transektenes diameterfordelingsavvik som uttrykk for horisontal variasjon

For å undersøke hvordan transektenes avvik henger sammen med den horisontale strukturvariasjonen på prøveflatene, ble det laget kart basert på hvert transekts middelkoordinater (gjennomsnitt for alle transekttrærnes X - og Y -koordinater), fargelagt med deres gjennomsnittlige absoluttavvik. Dette ble kun gjort for transekter med $N = 60$, siden mønstrene antas å være konsistente på tvers av alle treantall, og 60 antas å være tilstrekkelig for å fange opp ulike deler av prøveflatas diameterfordelinger.

Siden analysen dermed fremstiller hvordan bestandsstrukturen varierer mellom systematisk forskjøvnede tregrupper på 60 trær gjennom hele prøveflata, gir den et nyttig og kvantitativt bilde av gransjiktets strukturvariasjon i både X - og Y -retning.

3 Resultater

3.1 Bestandsstruktur

3.1.1 Bestandsvariabler

Målingene fra 2009 og 2024 viser for både Holstad og Bølstad en vedvarende tosjiaktet struktur med bjørk over gran (Tabell 7).

Begge bestand har også innslag av selje (*Salix caprea*), rogn (*Sorbus aucuparia*) og or (*Alnus spp.*). På Holstad ble det i tillegg funnet ask (*Fraxinus excelsior*) og blåhegg (*Amelanchier spicata*) og på Bølstad noen få furutrær (*Pinus sylvestris*).

I 2009 var det på Holstad mye småvokst rogn, som utgjorde ca. ¼ av lauvtreantallet, men kun ca. 2% av deres samlede grunnflate (G). Det ble ikke funnet rogn på prøveflatene i 2024. På Holstad var or det eneste andre treslaget enn bjørk og gran som i 2024 fantes i betydelig antall, og opptrådte sammen med bjørk i oversjiktet.

På Bølstad var det på begge måletidspunkt betydelige innslag av selje, som utgjorde litt under 20% av både treantall og G i lauvskjermen i begge år. De andre treslagene opptrådte i svært små mengder både i 2009 og 2024.

Gransjiktet utgjør bledningsbestandets fremtidsrær, og er fokuset i denne oppgaven. Derfor regnes selv bjørk i undersjiktet som del av bjørkeskjermen. De fleste andre treslag enn gran og bjørk (hovedsakelig selje og or) opptrer på samme måte som bjørk helst i oversjiktet, og regnes derfor også som del av bjørkeskjermen («Lauv» i Tabell 7).

Tabell 7. Tre- og bestandsdata for de to prøveflatene, både fra 2009 og 2024. Overhøyde er gjennomsnittlig (estimert) høyde på de 100 trær/ha med høyest dbh.

Bestand, år (alder)	Tre-slag	Treantall (/ha)	G (m ² /ha)	Middel-dbh (cm)	Median-dbh (cm)	D _g (cm)	Middel-høyde (m)	Overhøyde (m)
Holstad 2009 (18 år)	Gran	8630	3,6	2,2	1,9	2,3	2,0	9,5
	Lauv	4180	17,9	7,3	7,2	7,4	9,6	14,4
	Totalt	12810	21,5	4,1	2,9	4,8	4,2	14,7
Bølstad 2009 (20 år)	Gran	10200	3,9	1,9	1,4	2,2	2,3	7,0
	Lauv	4680	18,6	6,3	5,4	7,1	10,4	16,5
	Totalt	14880	22,5	3,4	2,5	4,4	4,8	16,5
Holstad 2024 (33 år)	Gran	1906	8,4	6,7	5,9	7,5	6,0	13,1
	Lauv	1919	25,6	12,3	12,2	13,0	16,2	20,2
	Totalt	3825	34,0	9,5	8,9	10,6	11,1	20,0
Bølstad 2024 (35 år)	Gran	3831	16,7	6,4	5,2	7,5	6,9	17,7
	Lauv	1538	20,7	11,7	10,6	13,1	14,9	20,7
	Totalt	5369	37,5	7,9	6,2	9,4	9,2	20,6

I 2009 var bjørkeskjermen klart dominerende i begge bestand. Overhøyden var henholdsvis 14,4 m og 16,5 m på Holstad og Bølstad, og bjørkeskjermens tetthet (G) hhv. 17,9 m²/ha og 18,6 m²/ha (Tabell 7). Til tross for at godt over 2/3 av trærne var gran, utgjorde disse i begge bestand en andel på kun ca. 17% av total G.

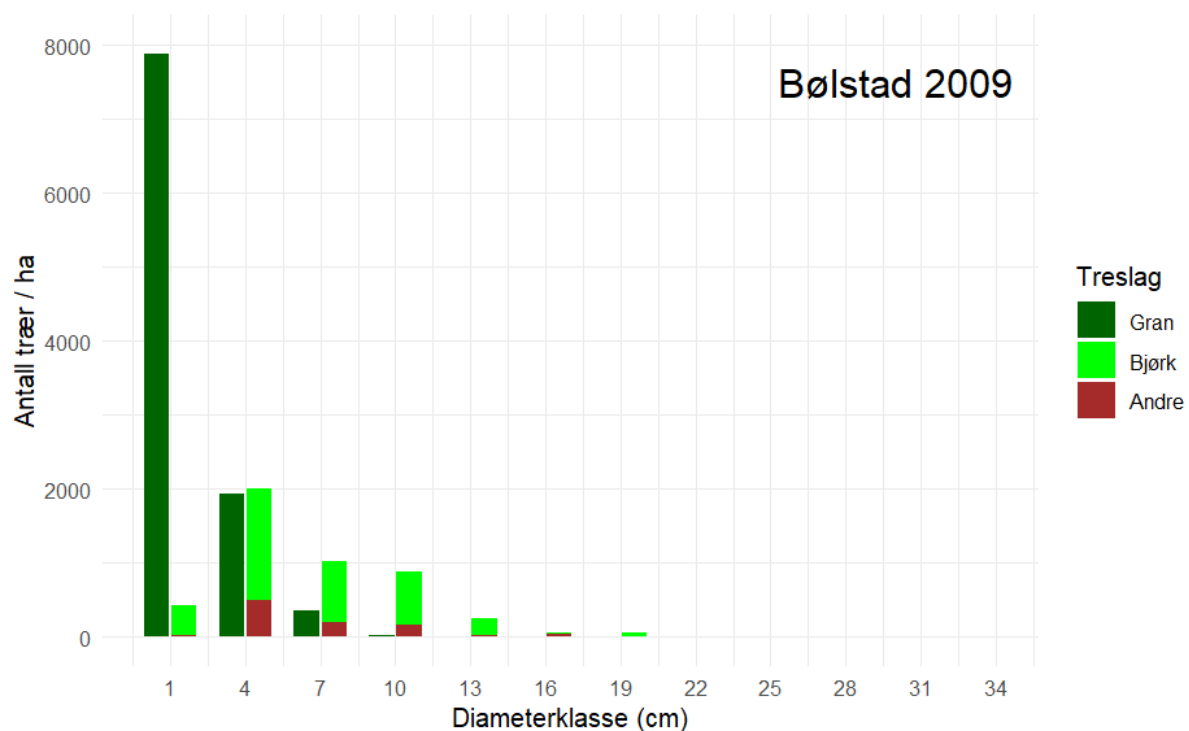
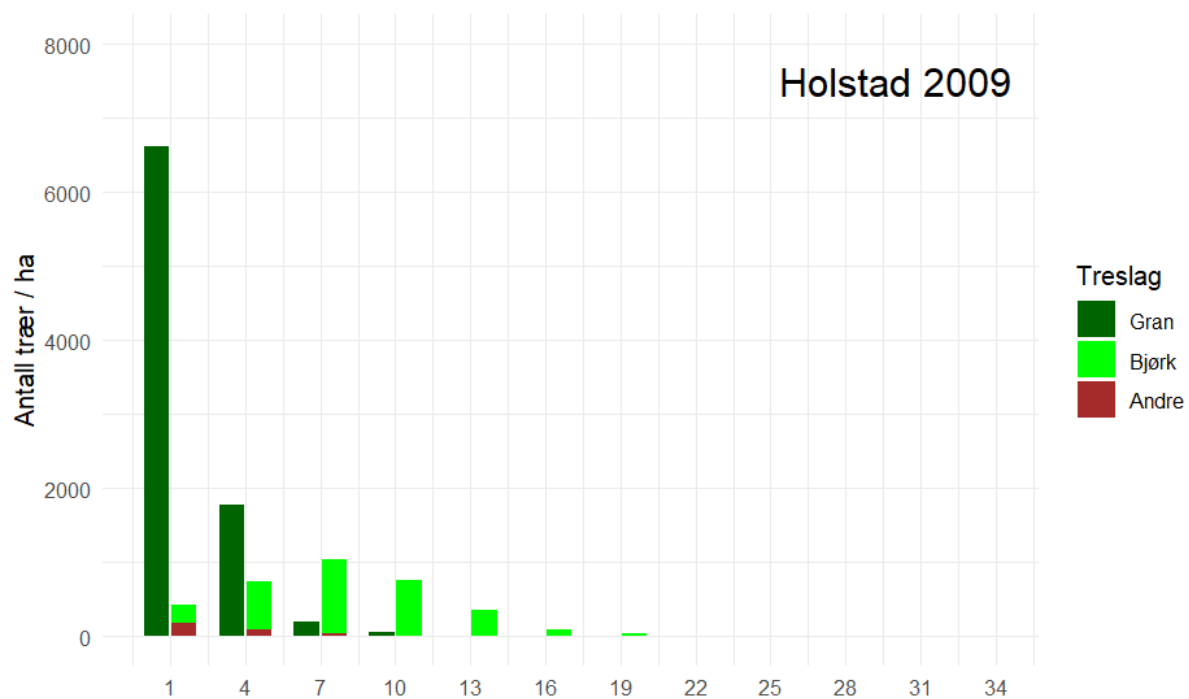
På Holstad er bjørkeskjermen i 2024 tettere enn på Bølstad, mens granundersjiktet er mer glissent (Tabell 7). Med en G på 25,6 m²/ha, nærmer Holstads bjørkeskjerm seg dermed maksimal tetthet for bjørk på 30 m²/ha (beregnet fra selvtynningslinjen for bjørk i Hynynen et al., 2010). På Bølstad er bjørkeskjermen omtrent 5 m²/ha glisnere enn på Holstad, mens Bølstads gransjikt er dobbelt så tett (G = 16,7 m²/ha) som Holstads G = 8,4 m²/ha).

I datamaterialet fra 2009 er det forventet en noe lavere representativitet av bestandsstrukturen på Bølstad enn på Holstad, grunnet mindre prøveflater (totalt 0,5 daa, mot 1 daa på Holstad). På Holstad er det også mer naturlig å sammenligne mellom de to måletidspunktene, grunnet overlapp på ca. 500 m² i på Holstad mot svært liten overlapp på Bølstad (Figur 1).

3.1.2 Diameterfordeling i 2009

I forbindelse med masteroppgaven til Solem (2010) ble det i 2009 målt diameterfordelinger i de samme bestandene som i denne oppgaven, men på 250 m² store prøveflater som kun delvis overlapper med prøveflatene fra 2024 (Figur 1).

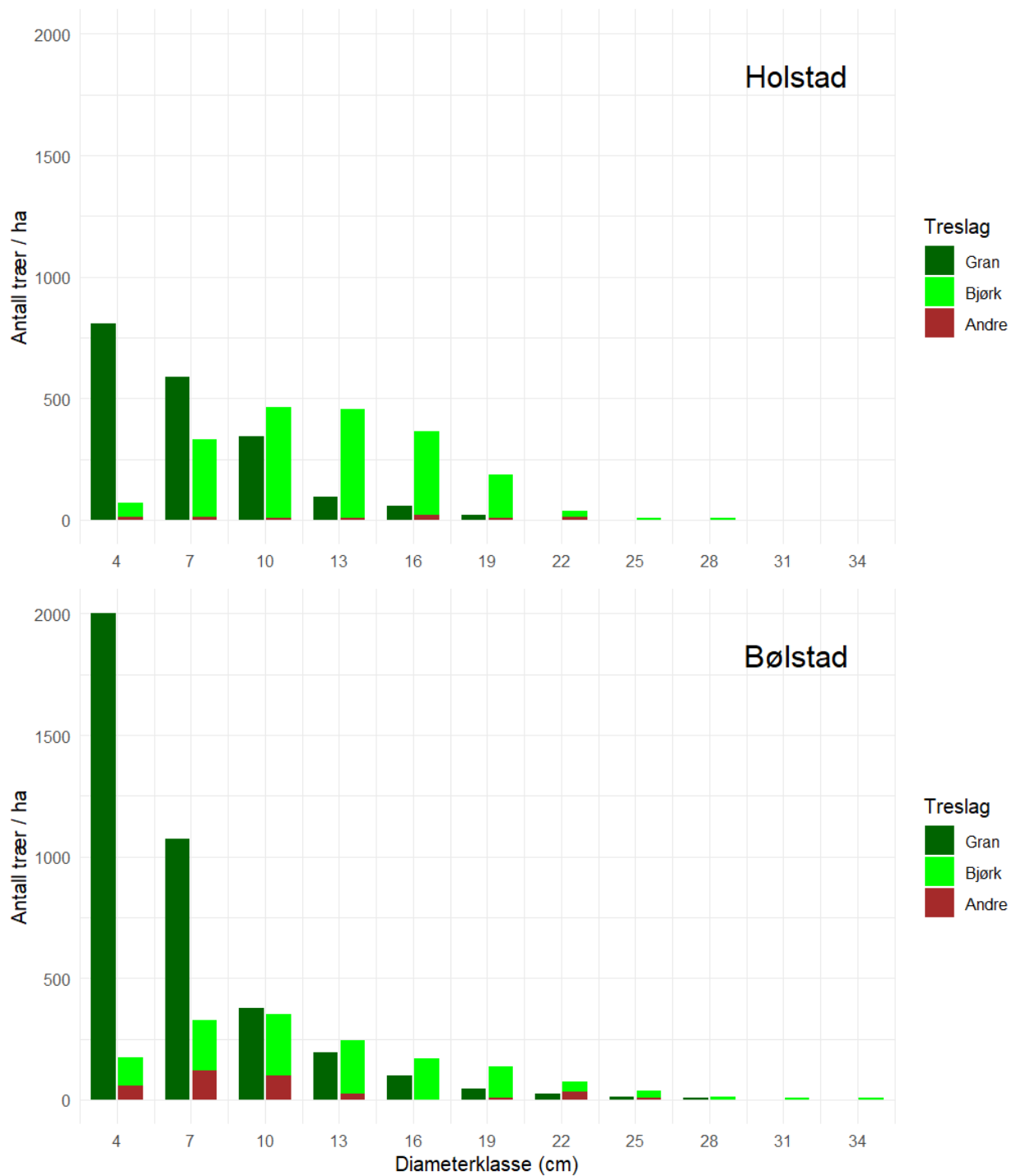
Allerede i 2009 var det betydelig differensiering i diametere mellom bjørk og gran, og gransjiktene hadde i begge bestand en tydelig fallende diameterfordeling (Figur 11). En stor andel av grantrærne var lavere enn brysthøyde (1,3 m), og nesten alle hadde en brysthøydiameter (dbh) < 10 cm, med et stort flertall under 3 cm. Bestandene hadde i 2009 nokså like diameterfordelinger, med unntak av en noe høyere frekvens av bjørk og gran i de to minste dbh-klassene på Bølstad.



Figur 11. Diameterfordeling for de to treslagsgruppene på Holstad og Bølstad i 2009 (Solem, 2010). Alle trær under 2,5 cm dbh (inkludert trær lavere enn 1,3 m) er samlet i minste diameterklasse.

3.1.3 Diameterfordeling i 2024

I 2024 har bjørkeskjermen fortsatt klar dominans, og en fallende diameterfordeling i gransjiktet er opprettholdt i begge bestand (Figur 12).



Figur 12. Diameterfordeling på de to prøveflatene fra 2024, for alle trær med dbh > 2,5 cm.

Bjørkeskjerm i 2024

Bjørkeskjermens diameterfordeling er tydelig forskjellig for de to prøveflatene (Figur 12). På Holstad er bjørkeskjermens diametere symmetrisk fordelt (middel-dbh = median-dbh = 12,3 cm). Diameterspredningen på Bølstad er større og fordelingen skjevere, med et tyngdepunkt (median: 11,7 cm) ved lavere dbh enn den gjennomsnittlige dbh (12,4 cm), men samtidig forekomst av større trær enn på Holstad.

Gransjiktet i 2024

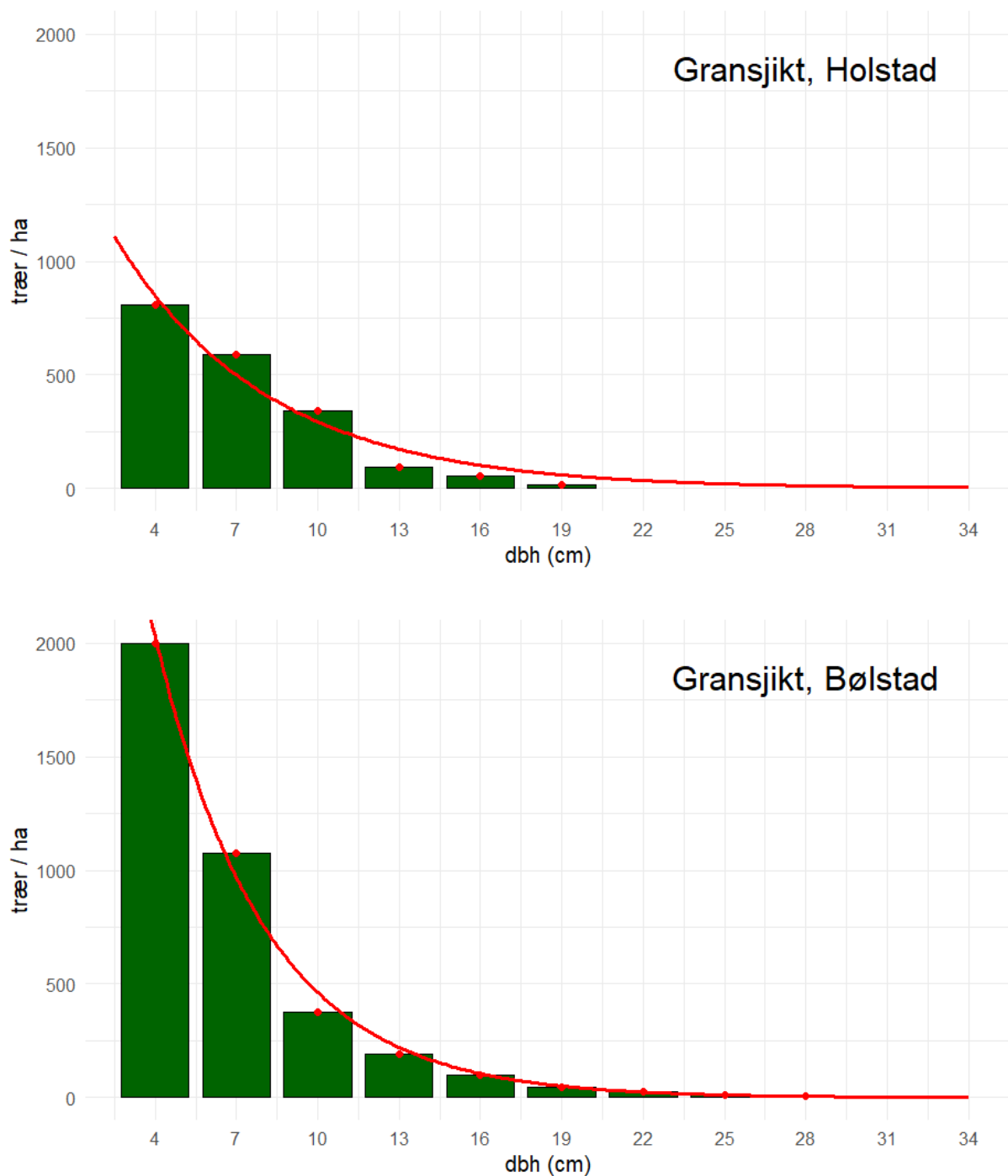
Gransjiktet i 2024 har fallende diameterfordelinger med en q -verdi på 1,7 for Holstad og 2,1 for Bølstad (Formel 7; Tabell 8).

Tabell 8. Parameterestimer (med standardfeil i parentes og signifikansnivå angitt med stjerner: '***': $p < 0,001$, '**': $p < 0,01$), for negativ eksponentialfunksjon tilpasset 3cm dbh-klasser (Formel 6), med tilhørende q -verdier (Formel 7).

Prøveflate	Parameterestimer		n	q
	a	b		
Holstad	1722,6 (287,9) **	0,177 (0,027) **	6	1,7
Bølstad	5428,7 (359,3) ***	0,246 (0,013) ***	9	2,1

Det ble også regnet ut observerte q -verdier i form av forholdstall mellom alle tilgrensende diameterklasser. Dette forholdstallet varierte mer på Holstad ($1,4 < q < 3,7$) enn på Bølstad ($1,9 < q < 2,3$), som illustreres i Figur 13 i form av differansen mellom den tilpassede modellkurven og det observerte treantallet (rød prikk) for hver diameterklasse.

Dette betyr at Holstads diameterfordeling er mer uregelmessig enn en negativ eksponentialfunksjon (Formel 6). På Bølstad er det bedre samsvar mellom observerte og predikerte treantall i diameterklassene, og eksponentialfunksjonen beskriver diameterfordelingen bedre (Figur 13).



Figur 13. Gransjiktets diameterfordeling, med tilpasset negativ eksponentialligning på Holstad ($q = 1,7$) og Bølstad ($q = 2,1$).

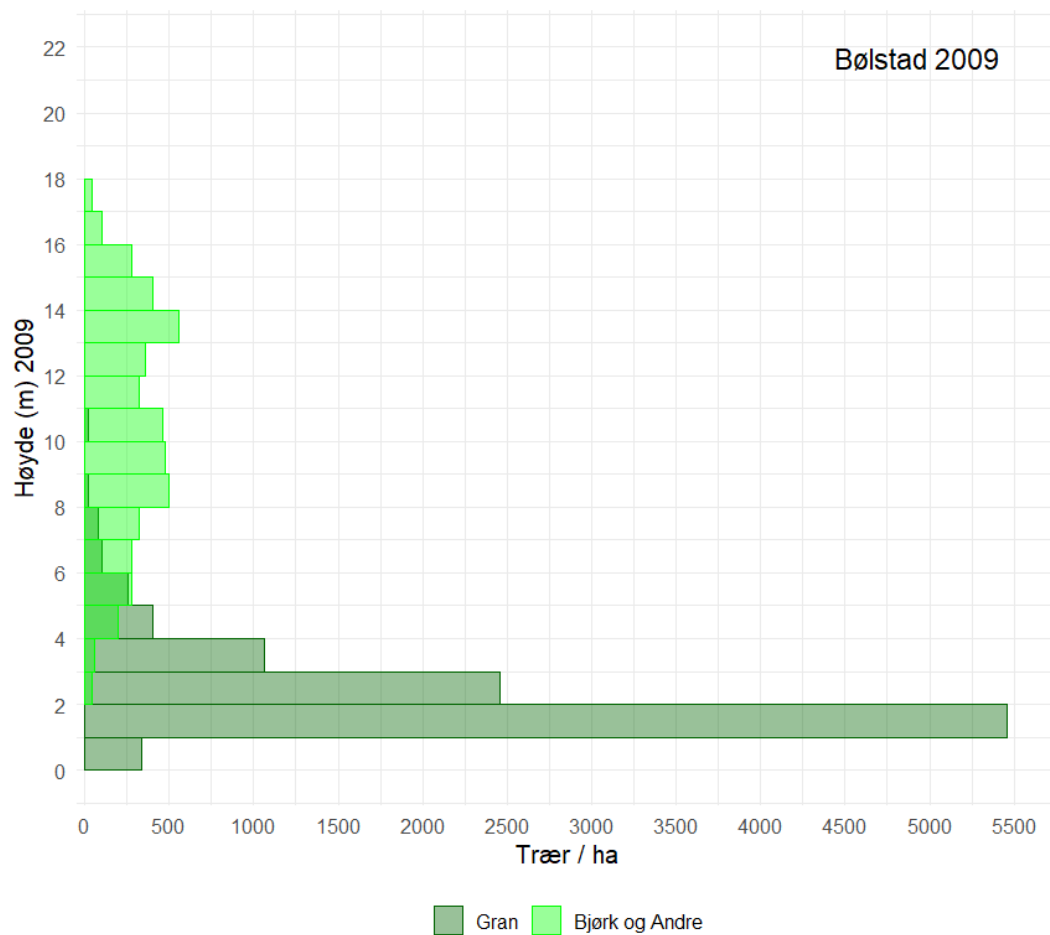
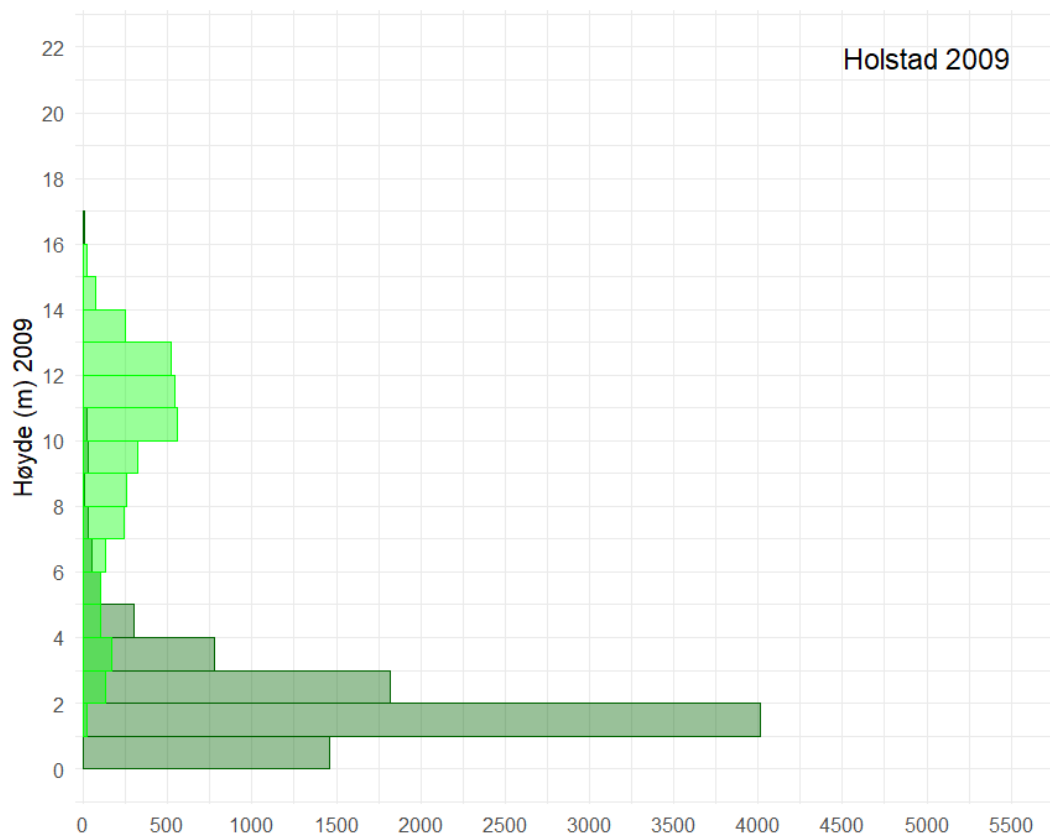
Diameterfordelingen i gransjiktet på Holstad er tydelig fallende, men ikke veldig bratt. På Bølstad er det langt flere grantrær, og disse har en diameterfordeling som både er brattere og mer jevnt fallende enn på Holstad. På Bølstad er det rikelig med trær i de minste klassene, og antallet faller jevnt med økende diameter. De største trærne er også større enn på Holstad, med forekomst av flere trær over 25 cm dbh (største gran: dbh = 28,1 cm).

Diameterfordeling over tid

Selv om bestandene har utviklet seg mye siden 2009, har bjørkeskjermen fortsatt klar dominans, og den fallende diameterfordelingen i gransjiktet er opprettholdt. Forskjellen i gransjiktets diameterfordeling mellom prøveflatene er imidlertid langt større enn 15 år tidligere. På Holstad har bjørkeskjermen i lang tid vært tettere enn på Bølstad, og på Bølstad har diameterspredningen blitt større, samtidig som svært mange trær med små diametere er beholdt.

3.1.4 Høydefordeling i 2009

I 2009 hadde begge bestand en tydelig tosjiktet struktur, der bjørk dominerte i oversjiktet (høyde stort sett 7 – 17 m) og det nesten ikke fantes gran høyere enn 8 m (Figur 14). Høydefordelingen for de to bestandene var nokså like, men på Bølstad var overhøyde i bjørkeskjermen ca. 2 m høyere enn på Holstad (Tabell 7).

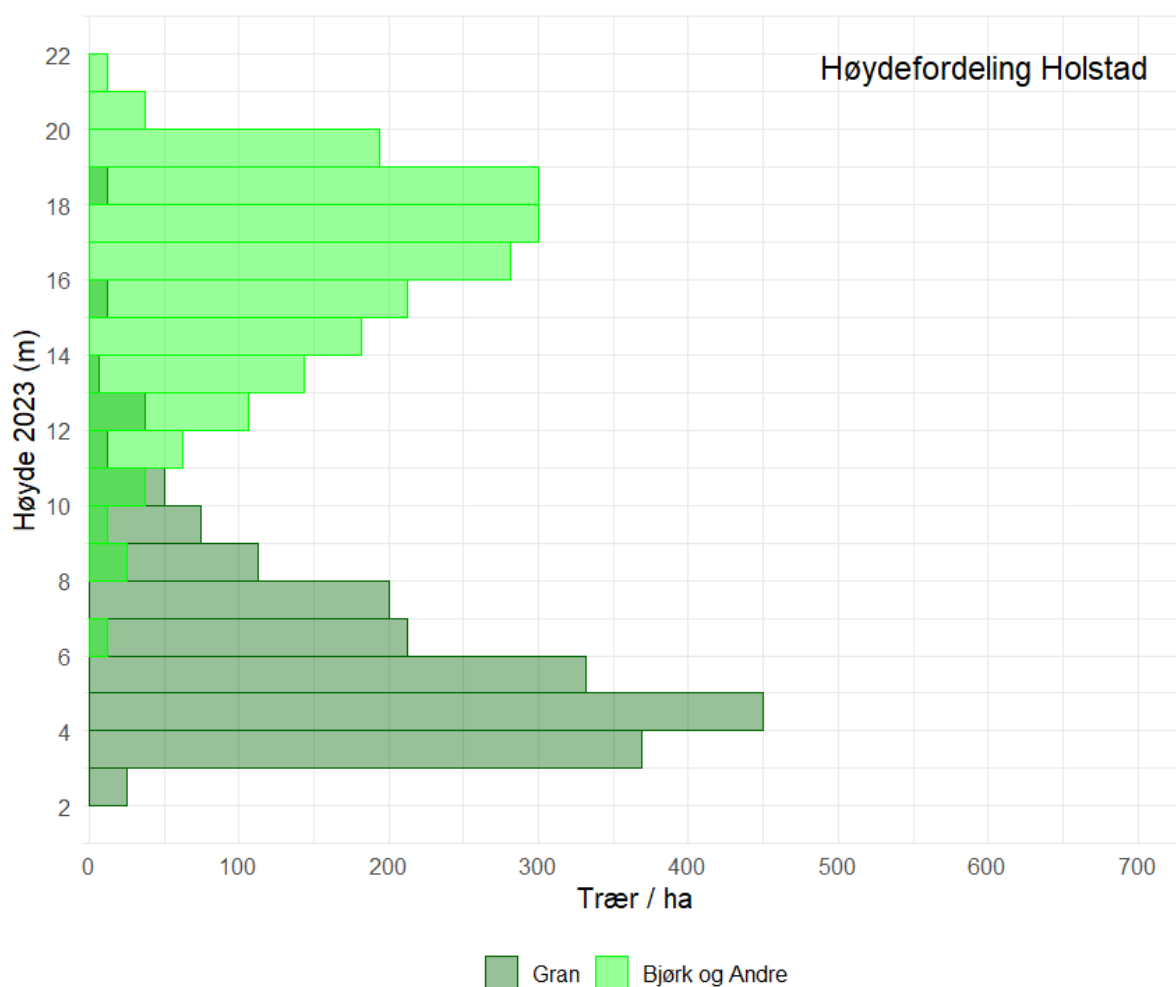


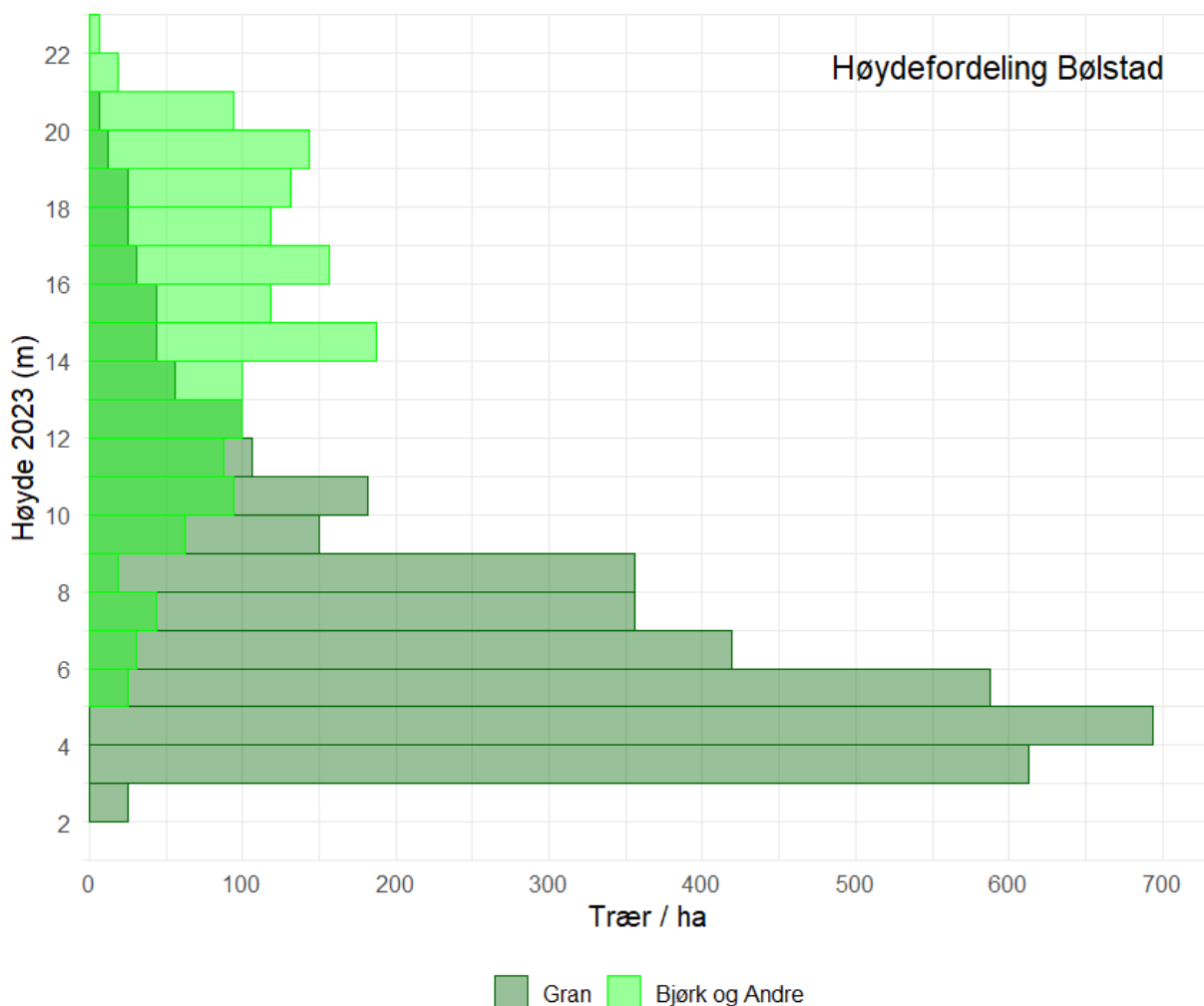
Figur 14. Høydefordelinger for de to bestandene i 2009.

I begge bestand var de fleste trærne i det svært tette gransjiktet rundt 2 m høye, og høydefordelingen var tydelig fallende for granhøyder over 2 m (trær under knehøyde ble ikke målt, som forklarer den tilsynelatende mangelen på trær lavere enn 1 m).

3.1.5 Høydefordeling i 2023

I 2023 er høydefordelingen fortsatt tosjiktet, men bestandene er mer ulike hverandre enn 15 år tidligere (Figur 15). På Bølstad er overlappen mellom gran- og bjørkesjiktet langt større enn på Holstad.





Figur 15. Høydefordelinger for de to bestandene i 2023.

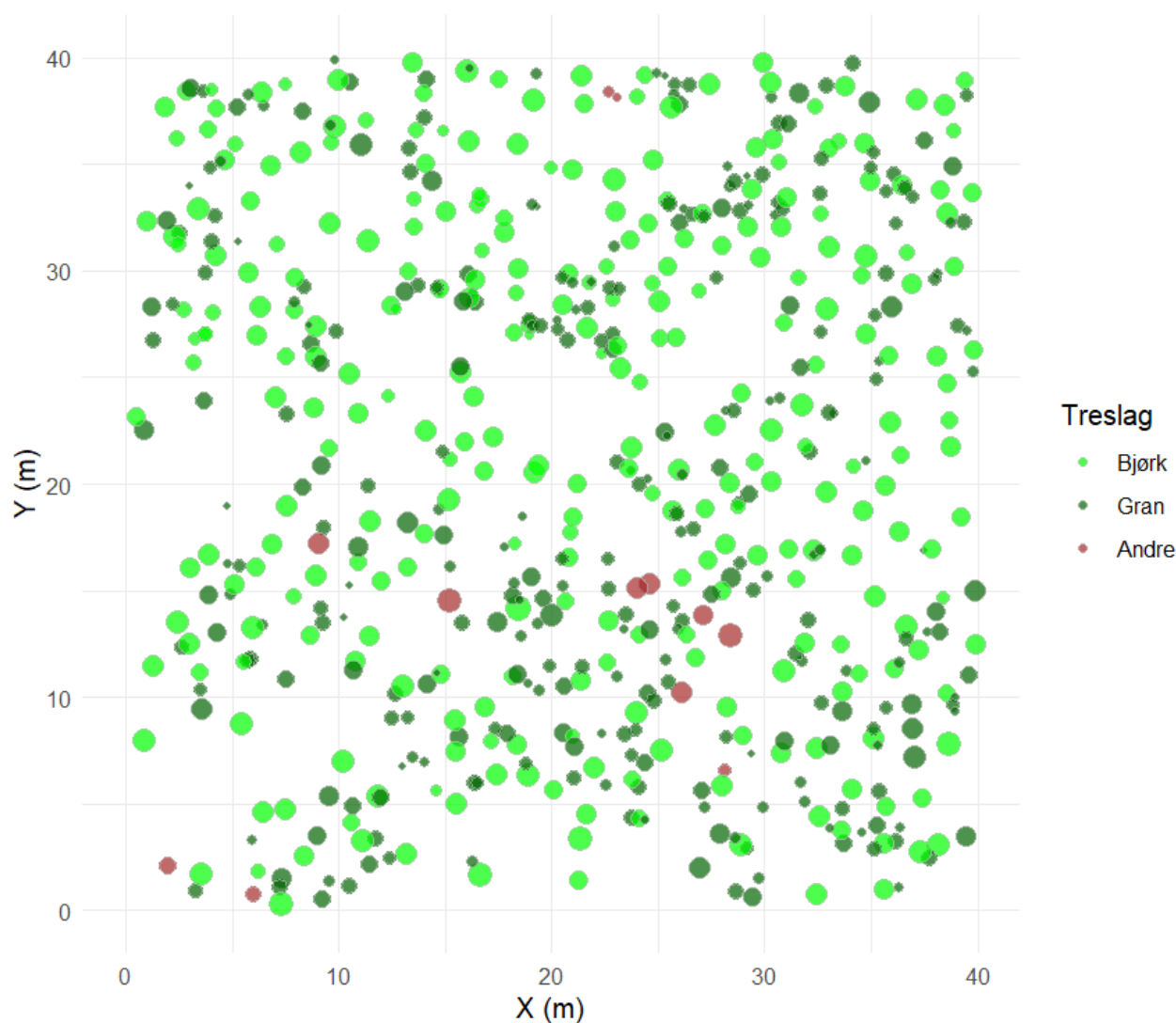
De dominerende bjørketrærne har vokst omtrent like raskt i begge bestand, men på Holstad er bjørkeskjermen mer homogen (høyder stort sett 10 – 21 m) enn på Bølstad (høyder stort sett 6 – 22 m). På Bølstad er bjørketetten (i grunnflate) nå 20% lavere enn på Holstad, i motsetning til i 2009, da grunnflaten var størst (+14%) på Bølstad. På Bølstad har også mange grantrær vokst opp i øvre sjikt, med mange graner opp mot 20 m høyde, i motsetning til Holstad, der de fleste fortsatt er under 14 meter. I begge bestand hadde gransjiktet en tydelig fallende høydefordeling, men på Bølstad var denne mer utviklet, med langt flere grantrær på tvers av hele høydespekteret og et større innslag av høye grantrær (Overhøyde gran: 17,7 m) enn på Holstad (Overhøyde gran: 13,1 m).

3.1.6 Horizontal fordeling av treslag og diametere

Verken på Holstad eller Bølstad er treslag eller diametere i 2024 jevnt fordelt på prøveflata. I begge bestand forekommer det flere steder grupper med lokalt høye tettheter av enten bjørk eller gran, og innen gransjiktet varierer diameterfordelingen mellom ulike deler av prøveflata.

Prøveflatekart Holstad

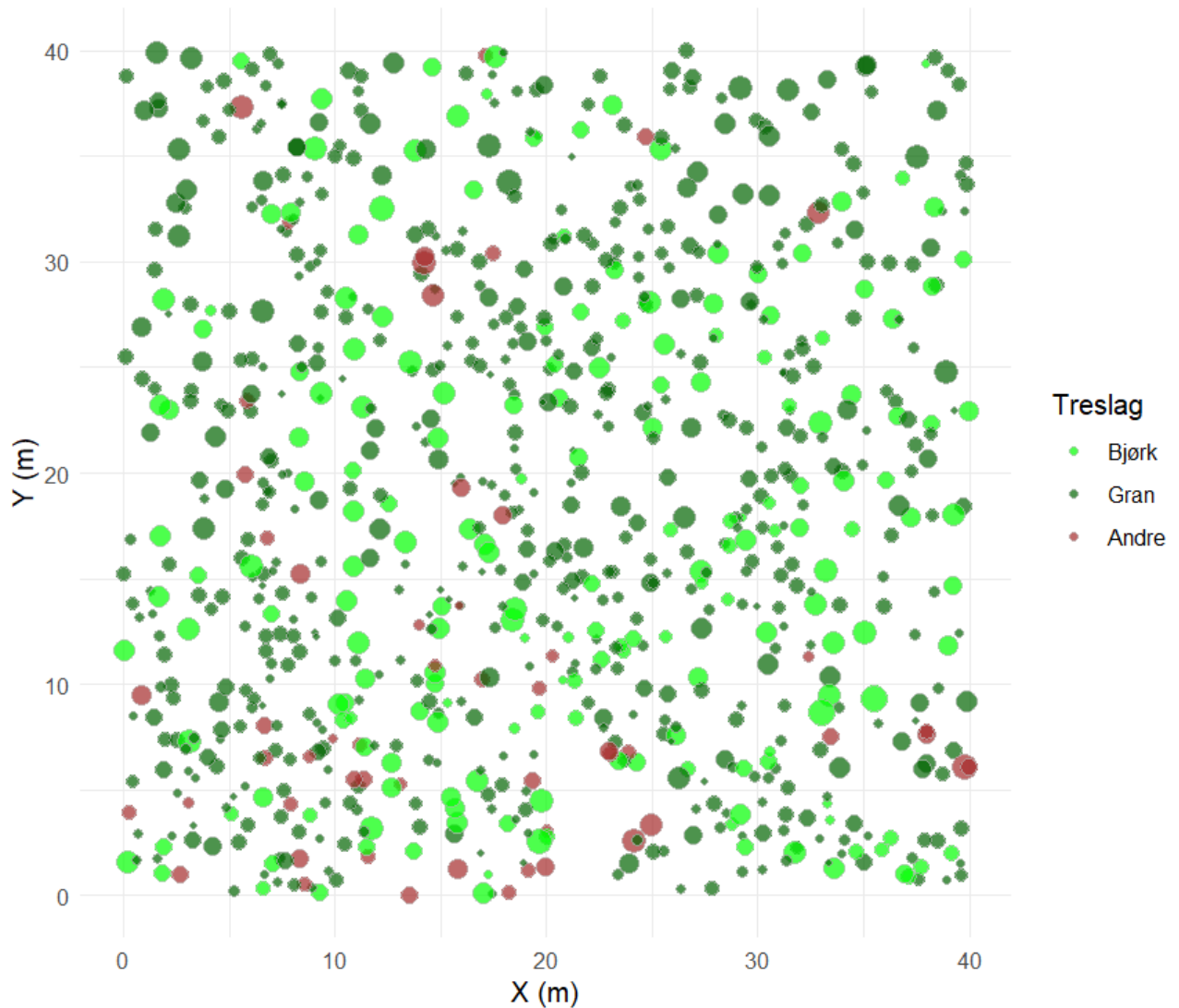
På Holstad er det flere større felter helt uten trestammer (Figur 16), som kan skyldes at vannet stedvis står høyt. I gamle prøveflater fra Solem (2010) er det fortsatt tydelig mangel på større gran, som følge av uttak av all gran over 1,3 m i 2009 (Figur 1). Gransjiktet står i grupper rundt om på prøveflata, mens bjørkeskjermen er tilsynelatende jevnere fordelt.



Figur 16. Holstad, kart over prøveflata. Sirkelstørrelsen er relativ til dbh.

Prøveflatekart Bølstad

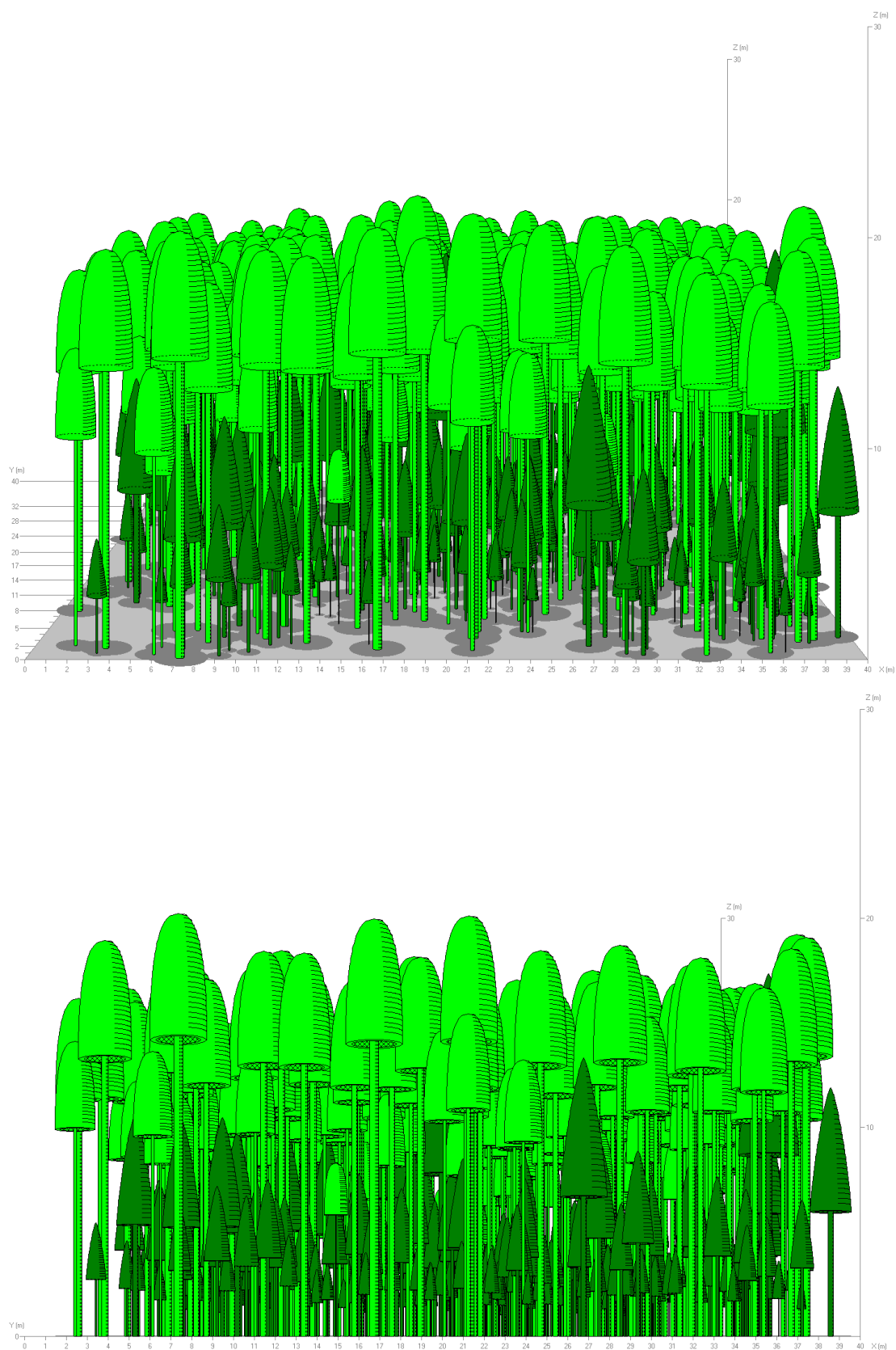
På Bølstad er det også horisontal variasjon i fordeling av treslag og trestørrelser (Figur 17). Det er tilsynelatende mer gran der bjørkeskjermen er glissen eller mangler, eksempelvis i flatas nordøstre hjørne (X og $Y > 30$ m), et mønster som ikke kan ses på Holstad (Figur 16).

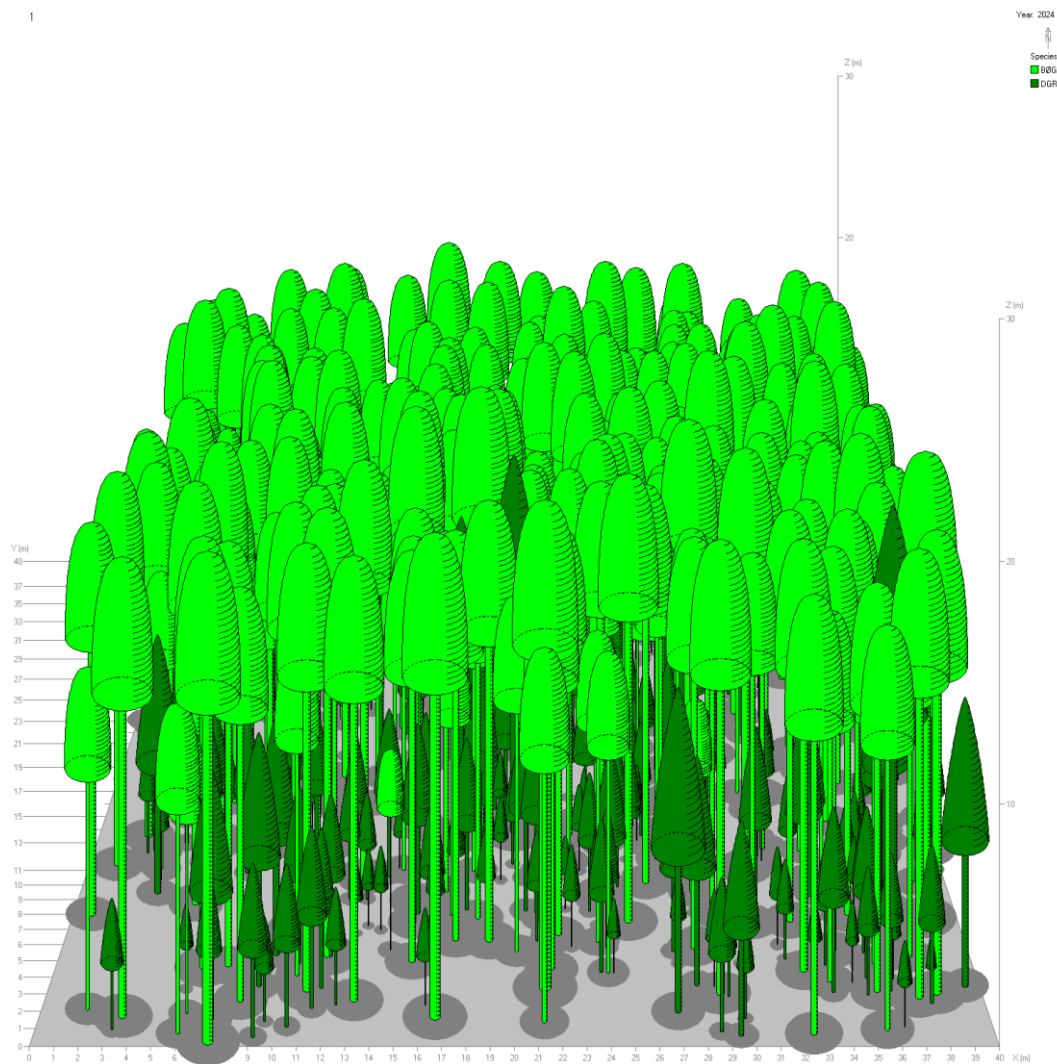


Figur 17. Bølstad, kart over prøveflata. Sirkelstørrelsen er relativ til dbh.

3D-visualisering, Holstad

I Figur 18 er bestandsstrukturen på Holstad visualisert i 3D fra flere vinkler. Prøveflata er klart tosجتet, med tydelig størrelsesvariasjon i gransjiktet.

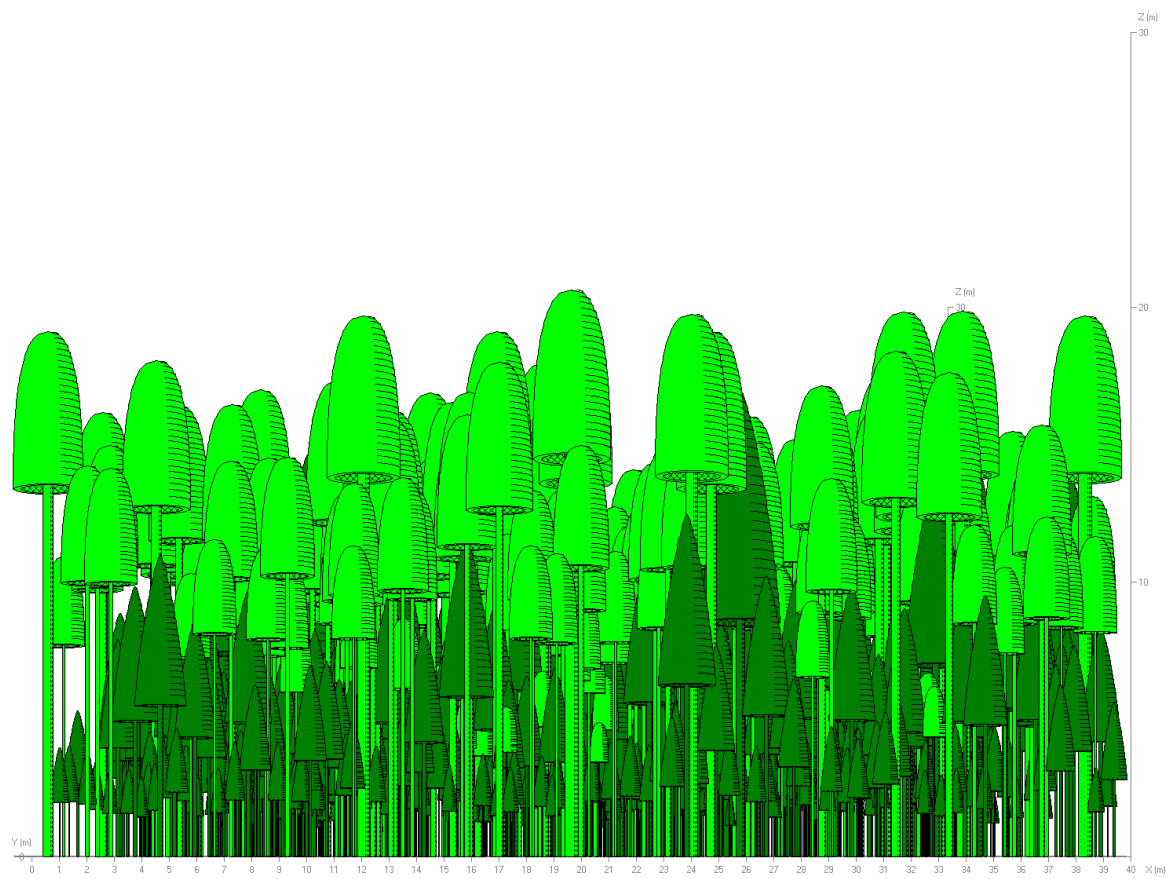
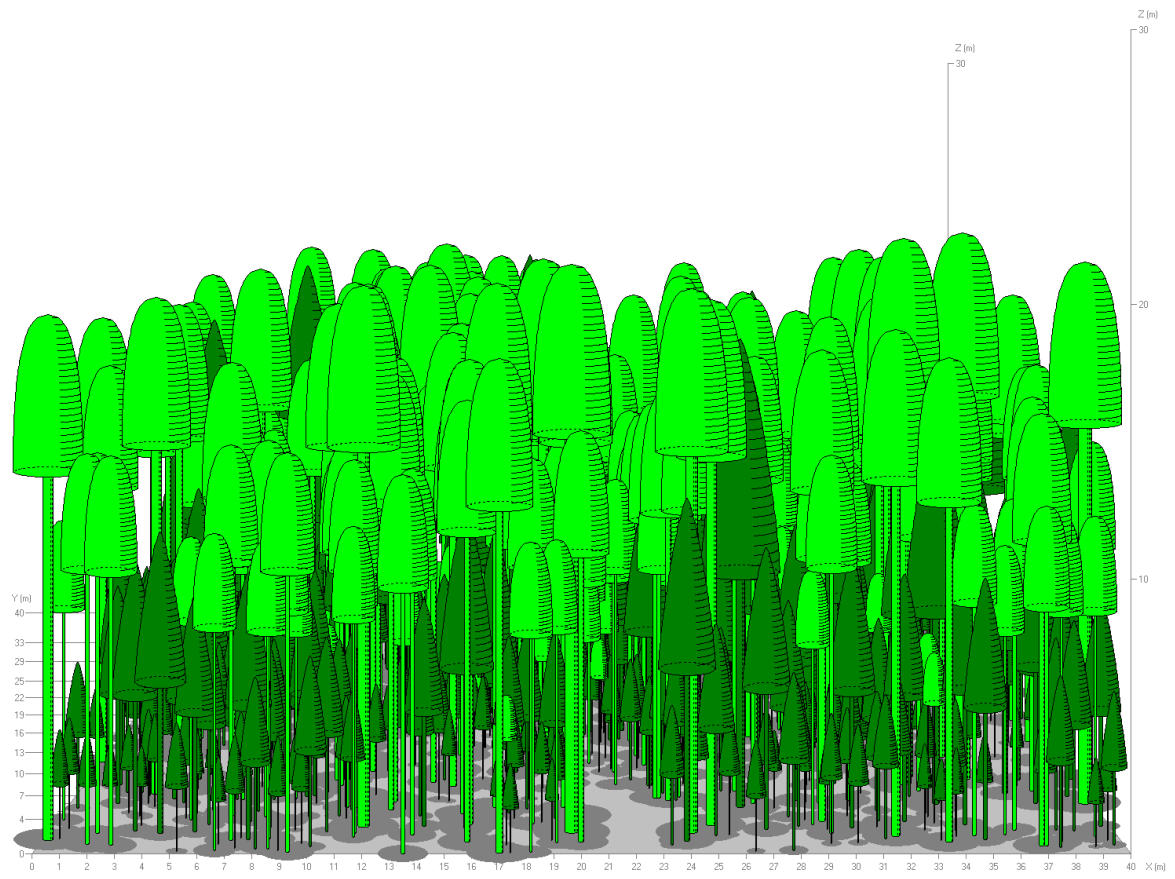


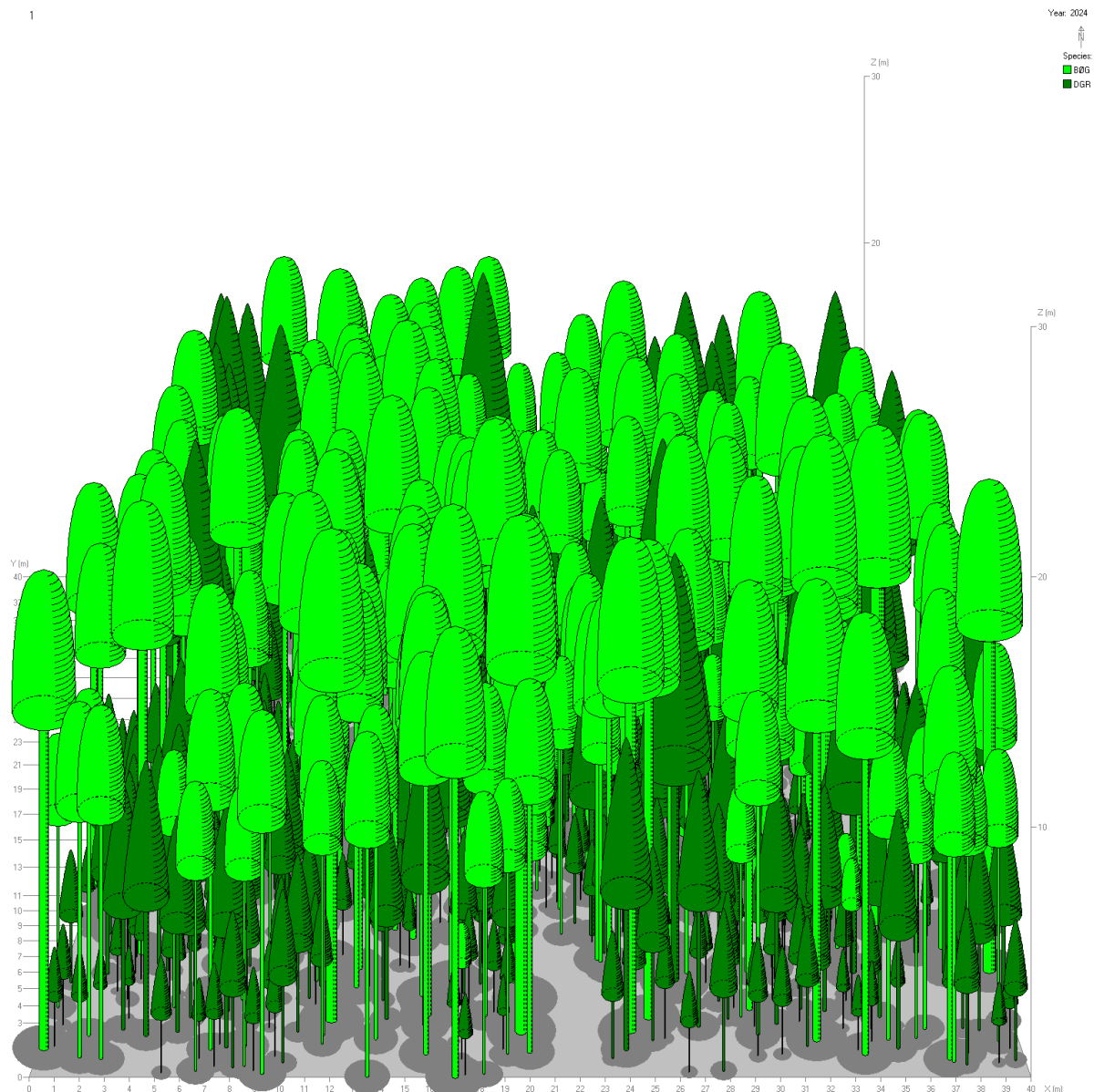


Figur 18. Holstad: Tredimensjonale kart av prøveflata, basert på dbh og estimerte høyder. Gran i mørkegrønt, bjørk og andre i lysegrønt.

3D-visualisering Bølstad

I Figur 19 er bestandsstrukturen på Bølstad visualisert i 3D fra flere vinkler. Her er det noe mer størrelsesvariasjon både på gran- og bjørkesjikt, sammenlignet med Holstad. Grana har flere steder vokst inn i oversjiktet, samtidig som det er rikelig med små grantrær.





Figur 19. Bølstad: Tredimensjonale kart av prøveflata, basert på dbh og estimerte høyder. Gran i mørkegrønt, bjørk og andre i lysegrønt.

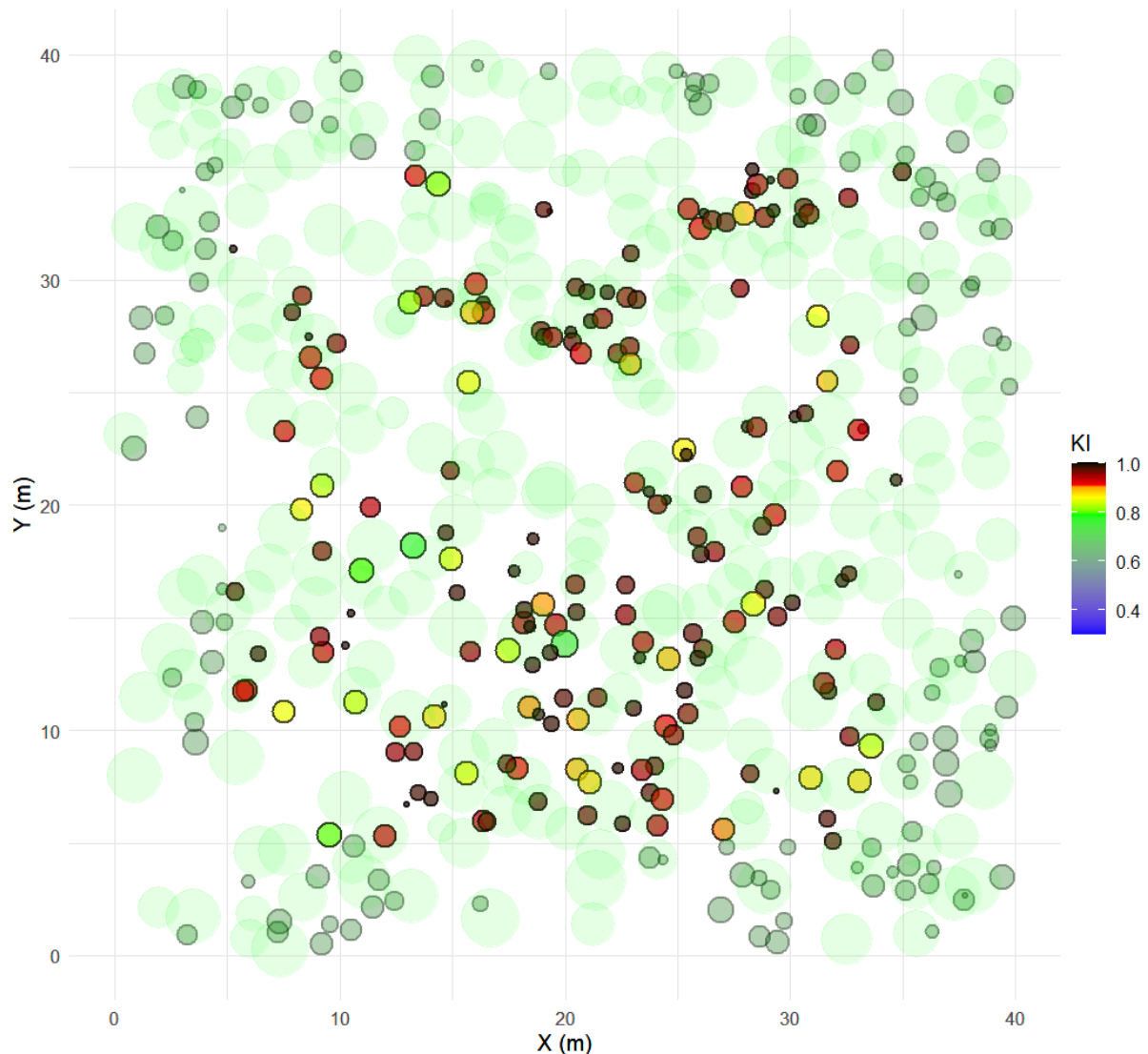
3.1.7 Horisontal variasjon i tetthet og konkurranse

I Figur 20 og Figur 21 etterligner prikkene for grantrærne størrelsen på deres trestammer, hvorav de i kjerneområdet (minst 5 m fra kant) er fargelagt med konkurranseindeksklasser (KI). Bjørk og andre treslag er fremstilt med lysegrønne, større sirkler, også relativt til dbh, men med en større faktor for å etterligne deres trekroner.

På Holstad er det mindre spredning i konkurranseindeks ($0,73 < KI < 0,99$, median 0,93) enn på Bølstad ($0,39 < KI < 0,99$, median 0,95). Til tross for større spredning i konkurranse, er KI på Bølstad mer skjevfordelt, med et tyngdepunkt ved høyere KI -verdier enn på Holstad.

KI-kart Holstad

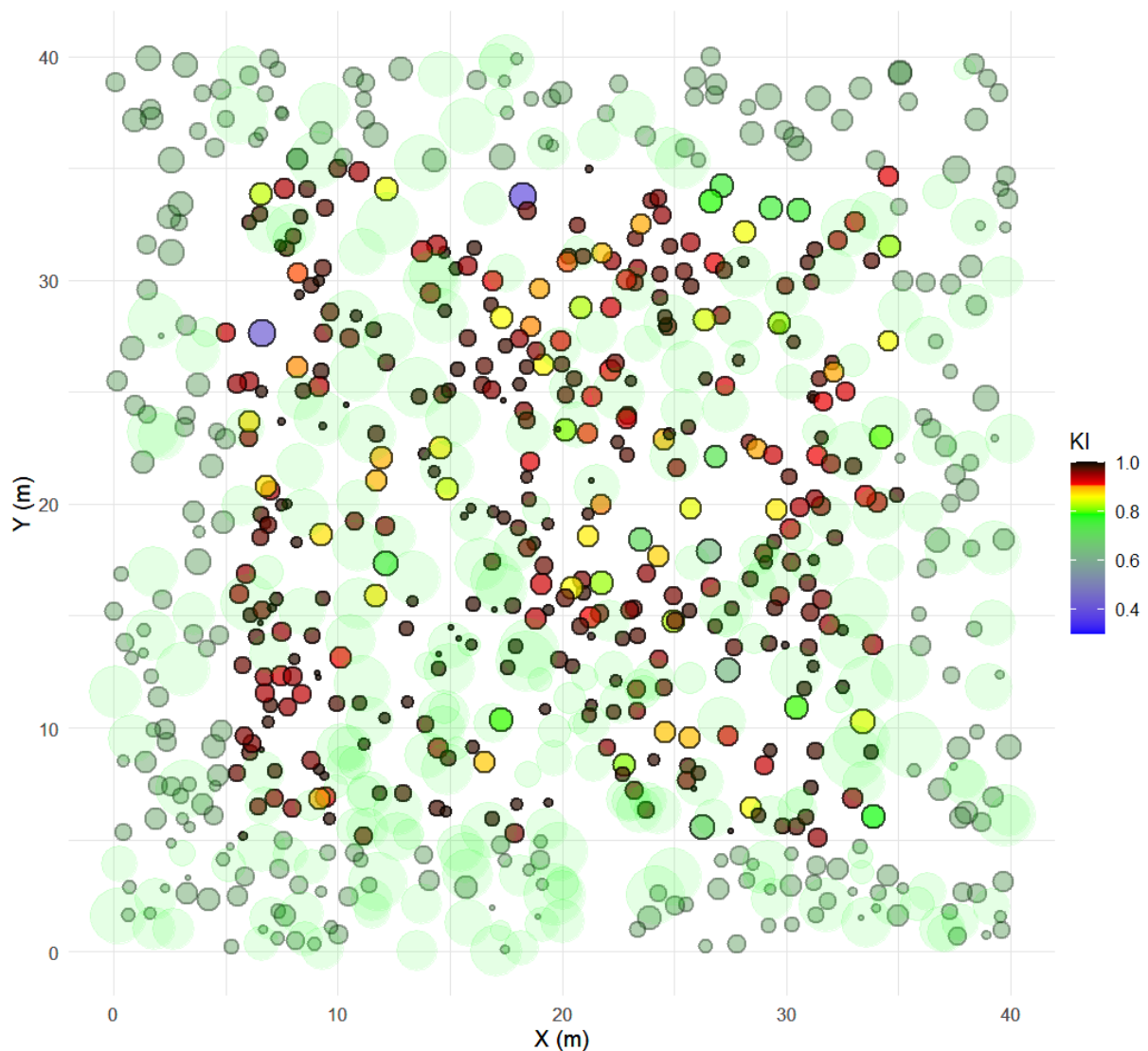
Til tross for at grantrærnes KI tydelig henger sammen med deres egen størrelse, forekommer det på Holstad også spredning i KI -verdier innen størrelsesklasser (Figur 20). Dette skyldes at trærne omgis av et variert antall konkurrenter som varierer i både treslag, størrelse og avstand. Denne varierende tettheten påvises i figuren gjennom fargevariasjon for sirkler med lik størrelse. At KI for grantrær av lik størrelse varierer, betyr at det forekommer horisontal variasjon i bestandstetthet og diameterfordeling.



Figur 20. Holstad, Alle grantrær i kjerneområdet fargelagt med konkurranseindeks-klasser (KI), plottet sammen med grantrær i buffersonen (grå sirkler) og bjørk (lysegrønne sirkler som simulerer trekroner). Alle sirkler er fremstilt relativt til dbh, med forskjellige forholdstall for gran og bjørk.

KI-kart Bølstad

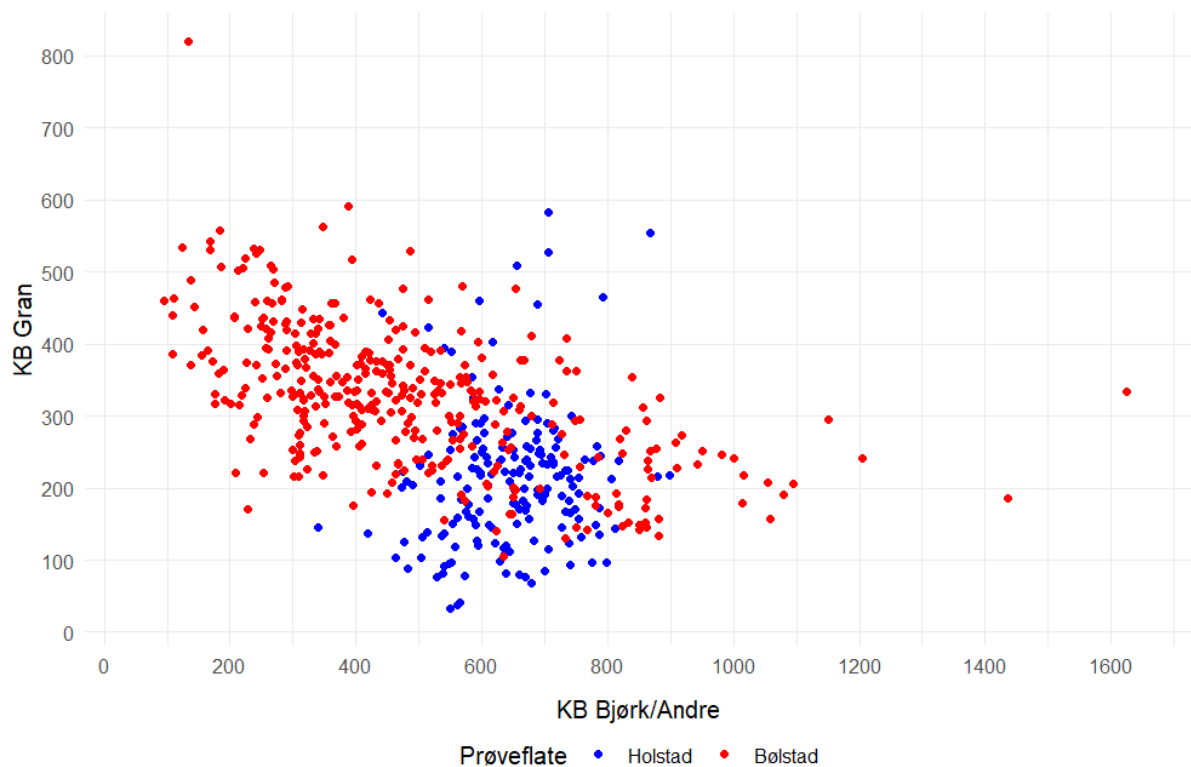
På Bølstad er KI -variasjonen enda større enn på Holstad. Bjørkeskjermens horisontalt varierende tetthet ser ut til å ha stor innvirkning på grantrærnes KI , som for samme trestørrelser er lavere der bjørkeskjermen mangler eller er glissen. Den horisontale variasjonen i treslag og -størrelser er dermed større enn på Holstad.



Figur 21. Bølstad: Alle grantrær i kjerneområdet fargelagt med konkurranseindeks-klasser (KI), plottet sammen med grantrær i buffersonen (grå sirkler) og bjørk (lysegrønne sirkler som simulerer trekroner). Alle sirkler er fremstilt relativt til dbh, med forskjellige forholdstall for gran og bjørk.

3.1.8 Treslagsandel i konkurranse

Konkurransebidraget (KB) uttrykker avstand og størrelse til alle konkurrenter innen en 5 m radius rundt subjektreet, uten justering for subjektreetets egen størrelse. Siden KB er beregnet for alle grantrær i kjerneområdet (30 x 30 m), representerer det dermed konkurransen fra trær på hele prøveflata. Treslagsfordelingen i KB er dermed også et uttrykk for hvordan tettheten av gran og bjørk varierer innad i prøveflatene (Figur 22).



Figur 22. Konkurransbidrag (KB) fra treslagsgruppene, for alle grantrær i kjerneområdet (minst 5 m fra prøveflatekant).

Alle grantrær på Holstad mottar nokså jevnt høy konkurranse fra bjørkeskjermen, mens $KB_{bjørk}$ på Bølstad i mange tilfeller er svært lav eller svært høy (Figur 22). På Bølstad varierer $KB_{bjørk}$ mellom 100 og godt over 1100, mens det på Holstad ligger stort sett mellom 400 og 800. Bjørkeskjermen er dermed langt mer homogen på Holstad enn på Bølstad.

Kun på Bølstad, hvor bjørkeskjermens tetthet varierer mye, er det en tydelig sammenheng mellom KB fra gran og KB fra bjørk (Figur 22). Høye KB-verdier for bjørk opptrer sammen med lave KB-verdier for gran, og omvendt. Dette indikerer at bestand med stor tetthetsvariasjon i bjørkeskjermen vil påvirke den horisontale fordelingen av tettheten i gransjiktet, gjennom at gransjiktet i områder med lite bjørk opprettholder høyere tetthet og utvikler større dimensjoner (som kan ses i Figur 17).

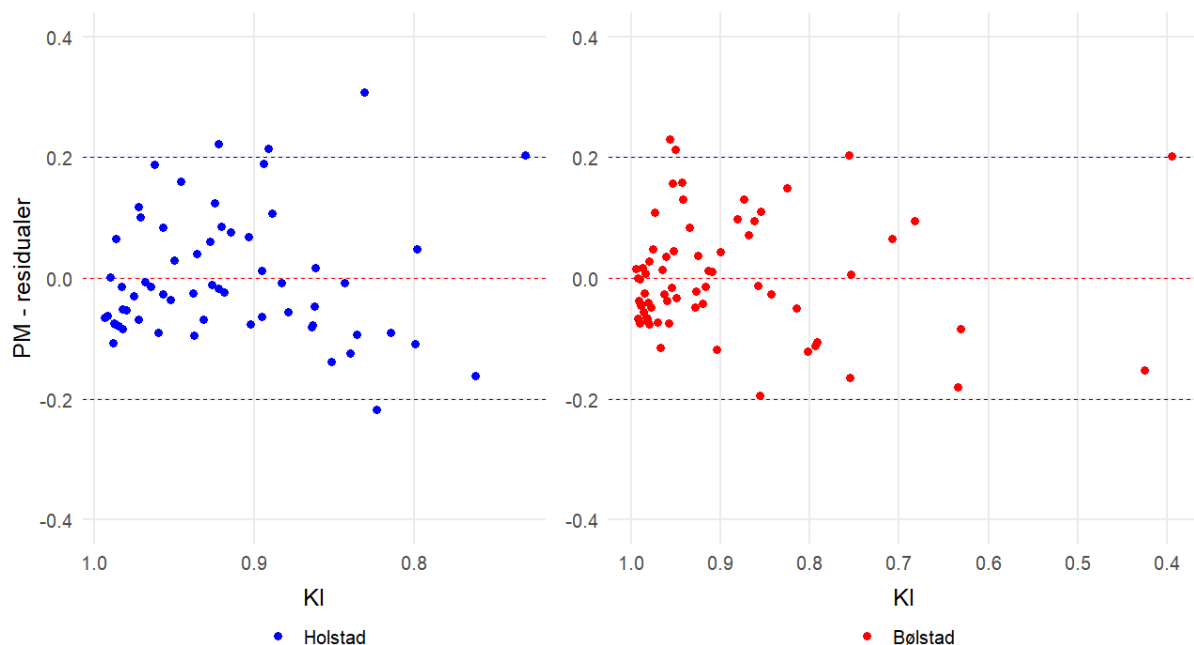
3.2 Høydetilvekst og konkurranse

Potensialmodifikasjonen (PM) beskriver konkurransebasert reduksjon i høydetilvekst (Formel 20) i forhold til potensialet (Formel 16 uten PM-termen). De tilpassede PM-modellene presterte ulikt mellom prøveflatene (Tabell 9). På Holstad forklarte modellen kun halvparten av variasjonen i PM ($R^2_{just.} = 0,50$), mens den på Bølstad forklarte langt mer ($R^2_{just.} = 0,79$). På Holstad var ikke c-parameteren signifikant, og en rettlinjett modell beskriver sammenhengen bedre.

Tabell 9. Parameterestimer (med standardfeil i parentes og signifikansnivå angitt med stjerner: '****': $p < 0,001$, '***': $p < 0,01$), og modellstatistikk ($R^2_{just.}$, RMSE; Formel 10-Formel 12) for PM-modeller (Formel 20).

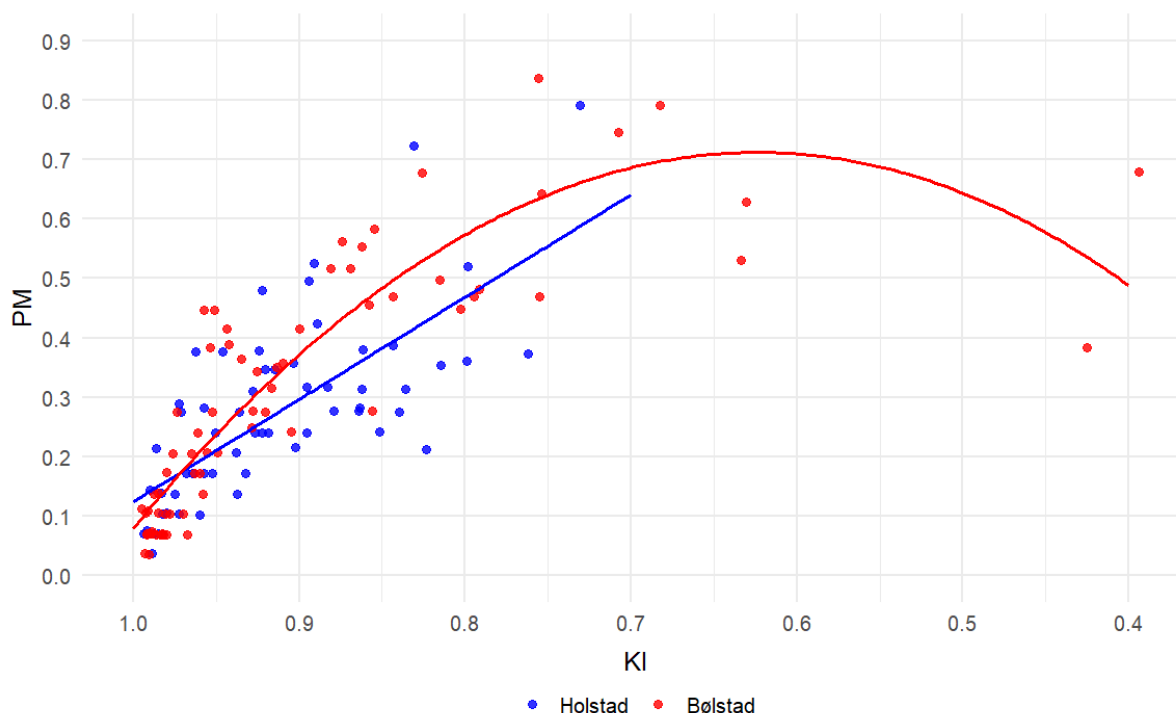
Modell	Parameterestimer			n	$R^2_{just.}$	RMSE (PM)
	a	b	c			
Holstad	0,12412 (0,02265) ***	1,72147 (0,21600) ***	-	61	0,50	0,104
Bølstad	0,08003 (0,01867) ***	3,35929 (0,24866) ***	-4,46433 (0,48698) ***	70	0,79	0,095

Residualene for PM-modellen viste ingen tydelige mønstre som antydte feil modellform (Figur 23).



Figur 23. Avvik mellom observert og predikert PM (residualer) mot konkurranseindeks (KI).

Ved høye konkurransenivåer ($KI > 0,7$) er det på begge prøveflater tydelig at høydetilveksten reduseres kraftig (50-60% av potensialet for KI -økning fra 0,7 til 1) med økende konkurranse (Figur 24).

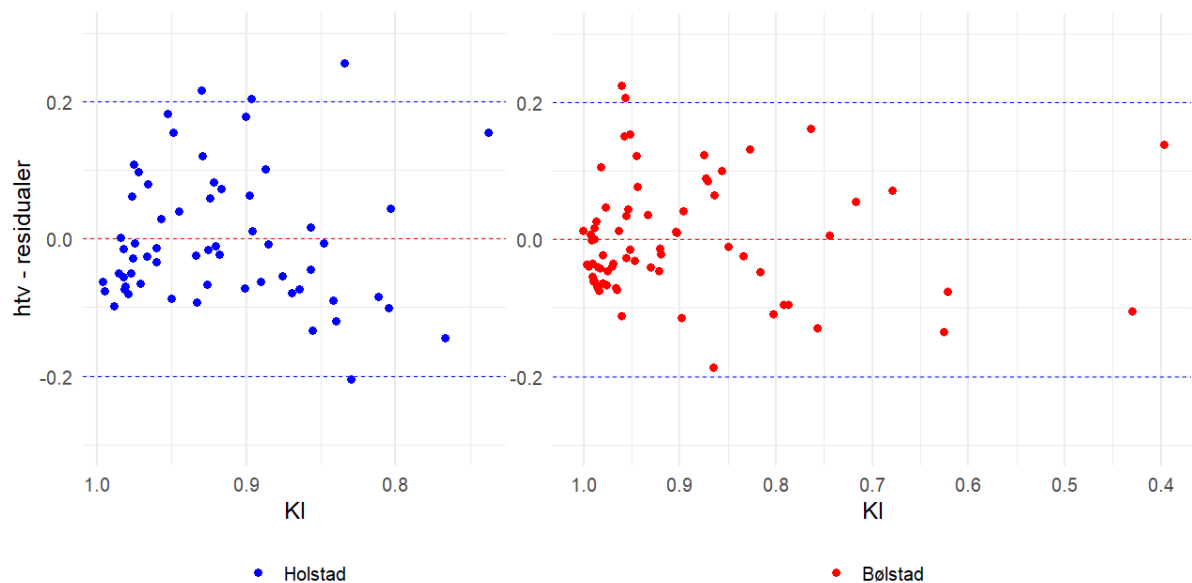


Figur 24. Observert PM på prøveflatene for det observerte konkurransespekteret (KI), sammen med modelltilpasninger etter Formel 20.

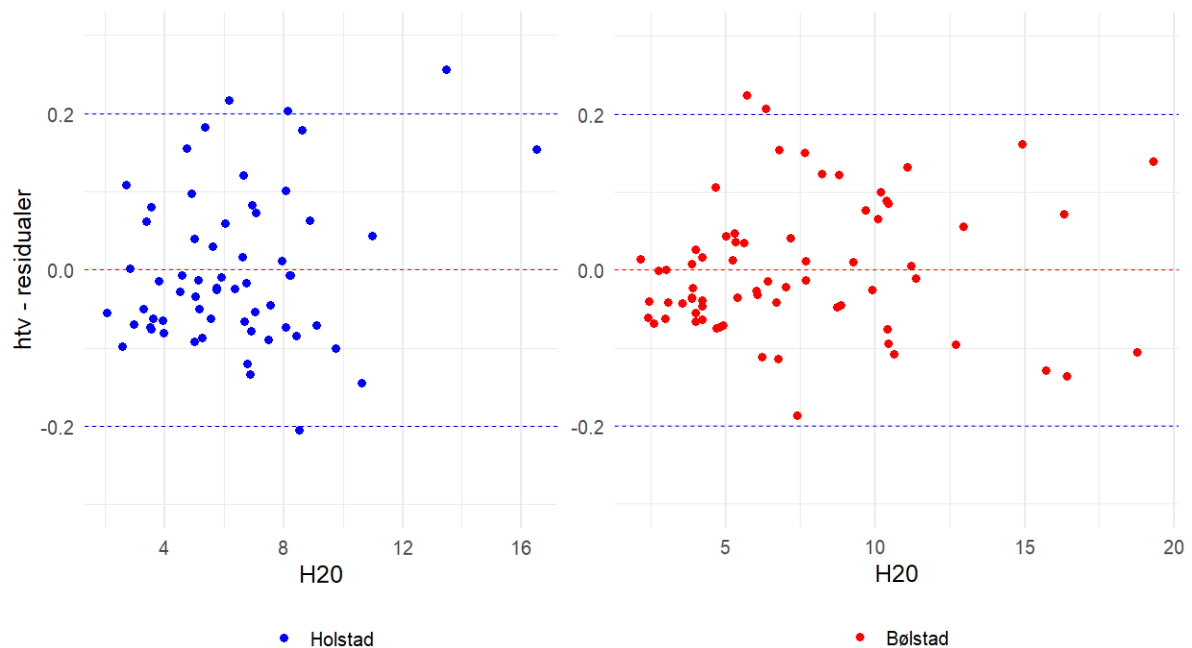
For Bølstad predikerte modellen et toppunkt for PM ved $KI \approx 0,6$, og reduksjon for lavere KI -verdier. Det gir ikke biologisk mening at høydetilveksten reduseres jo lavere konkurransen er. Det var kun fem observasjoner av trær med $KI < 0,7$, som har stor innvirkning på modellens kurveform ved lave KI -nivåer. Siden det er knyttet en del usikkerhet til få observasjoner, kan modellen ikke brukes for $KI < 0,7$.

3.2.1 Høydetilvekst som funksjon av utgangshøyde og KI

Residualer for høydetilvekstprediksjoner fra den fulle modellen (potensiell høydetilvekst multiplisert med PM -estimer; Formel 16) ble plottet mot KI (Figur 25) og utgangshøyde (Figur 26). Dette er ikke residualer fra en klassisk statistisk modell med full parameterestimering, men fra en modell der deler (her: den potensielle høydetilveksten) er definert eksternt. Likevel kan residualene avdekke systematiske avvik og indikere eventuell uforklart variasjon i modellen.



Figur 25. Avvik mellom observert og predikert høydetilvekst mot konkurranseindeks.

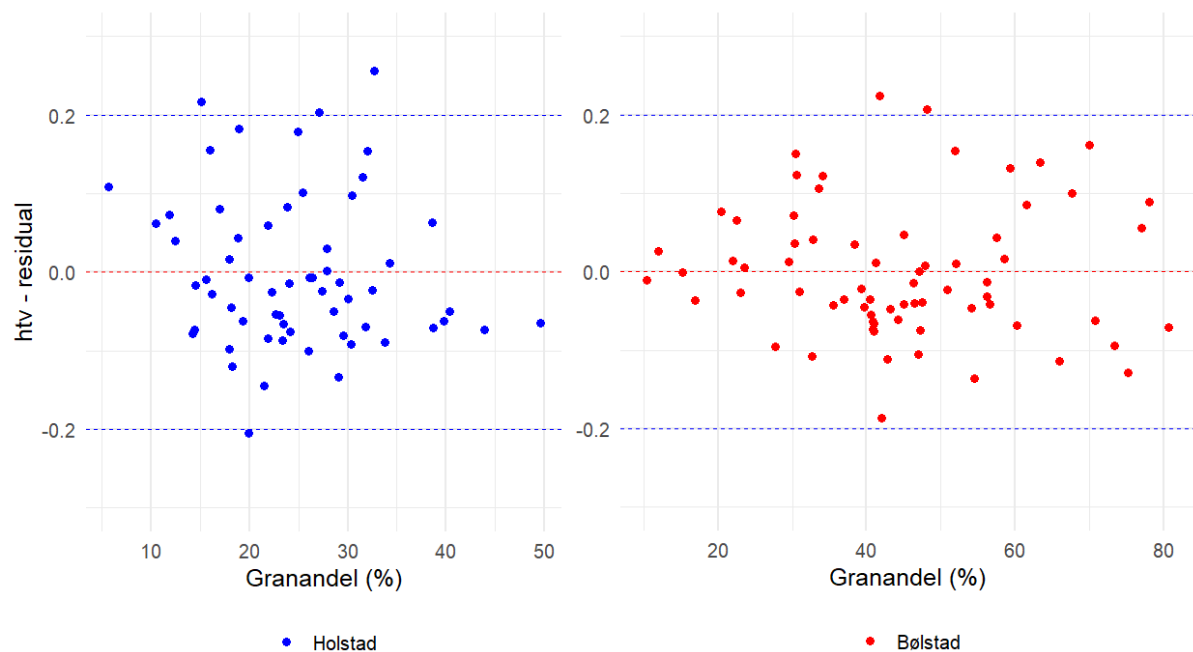


Figur 26. Avvik mellom observert og predikert høydetilvekst mot utgangshøyde (H20).

Ingen av residualplottene i Figur 25 og Figur 26 viste uforklarte mønstre, og høydetilvekstmodellen beskriver derfor effektene i dataene på en bra måte.

Betydning av konkurrenters treslag for høydetilveksten

For å undersøke om treslaget på konkurrentene påvirker høydetilveksten, ble residualene for den fulle modellen også plottet mot granandelen i konkurransebidraget (Figur 27). Heller ikke her avslørte residualene mønstre.



Figur 27. Avvik mellom observert og predikert høydetilvekst mot granandel i konkurransebidrag (Formel 15).

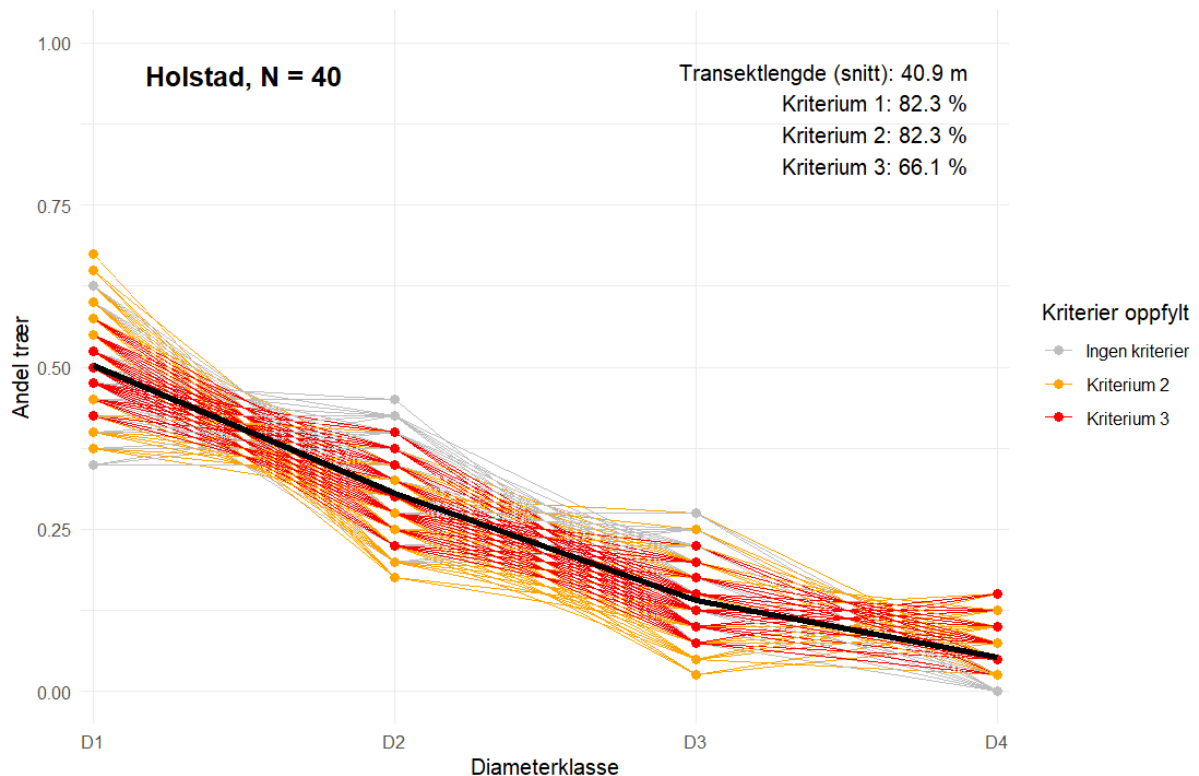
Figur 27 viser at det på begge prøveflater er likegyldig for grantrærnes høydetilvekst om konkurransen kommer fra gran eller bjørk. Dette bekrefter at lik vekting av konkurranse fra gran og bjørk i Formel 13 er en korrekt beskrivelse for disse data, og at treslagsandel i konkurransebidrag (Formel 15) ikke mangler som forklaringsvariabel i høydetilvekstmodellen (Formel 16 og Formel 20).

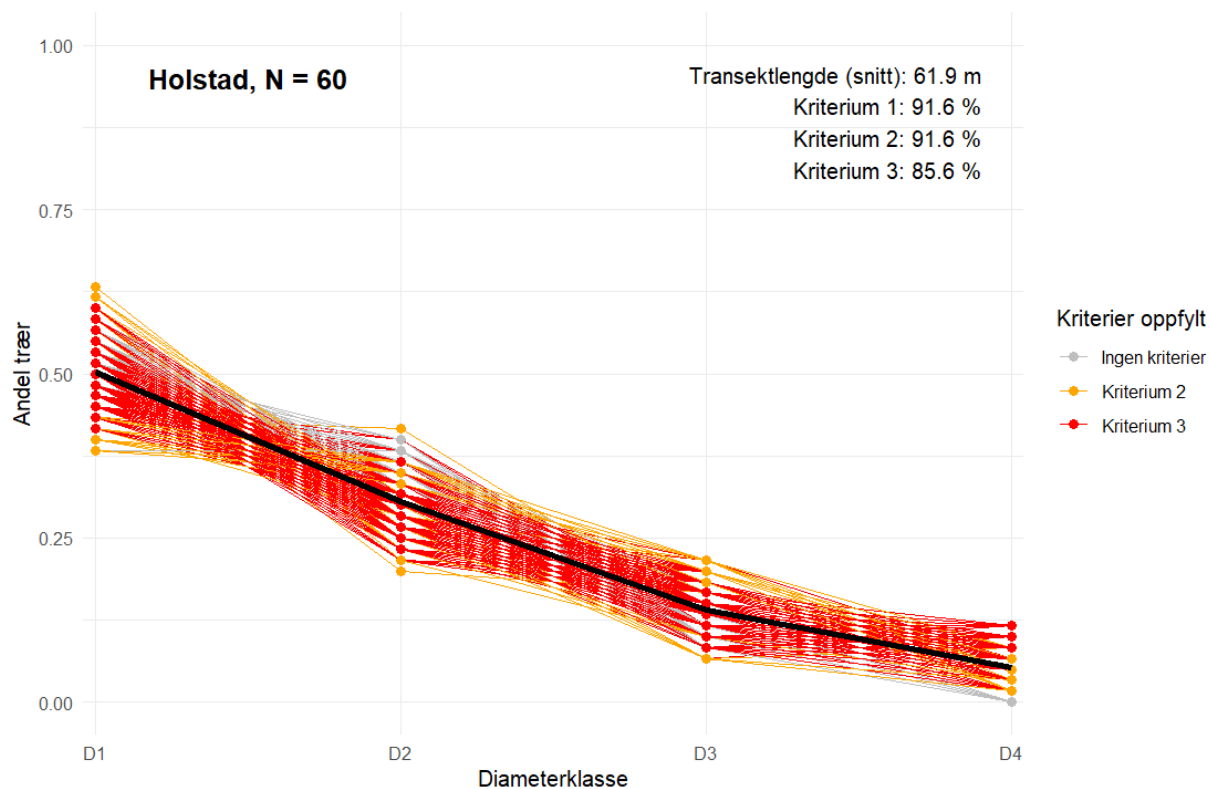
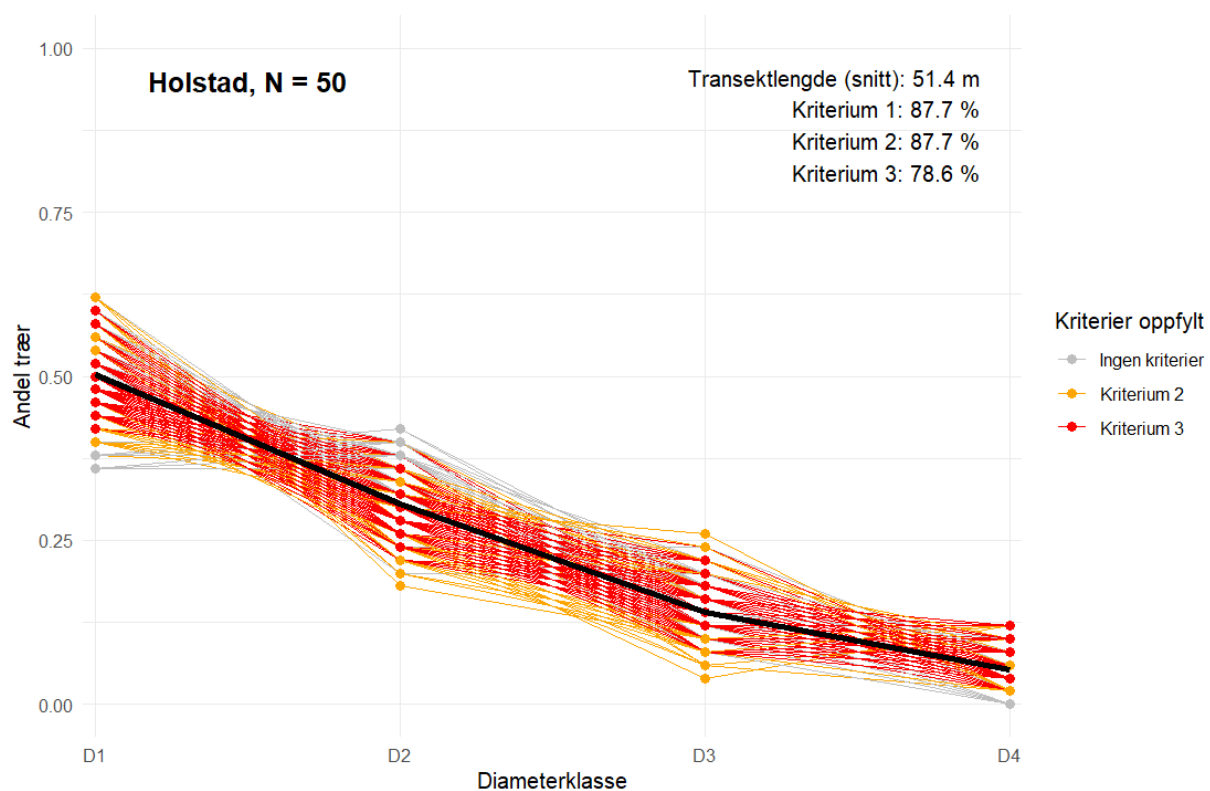
3.3 Transekker

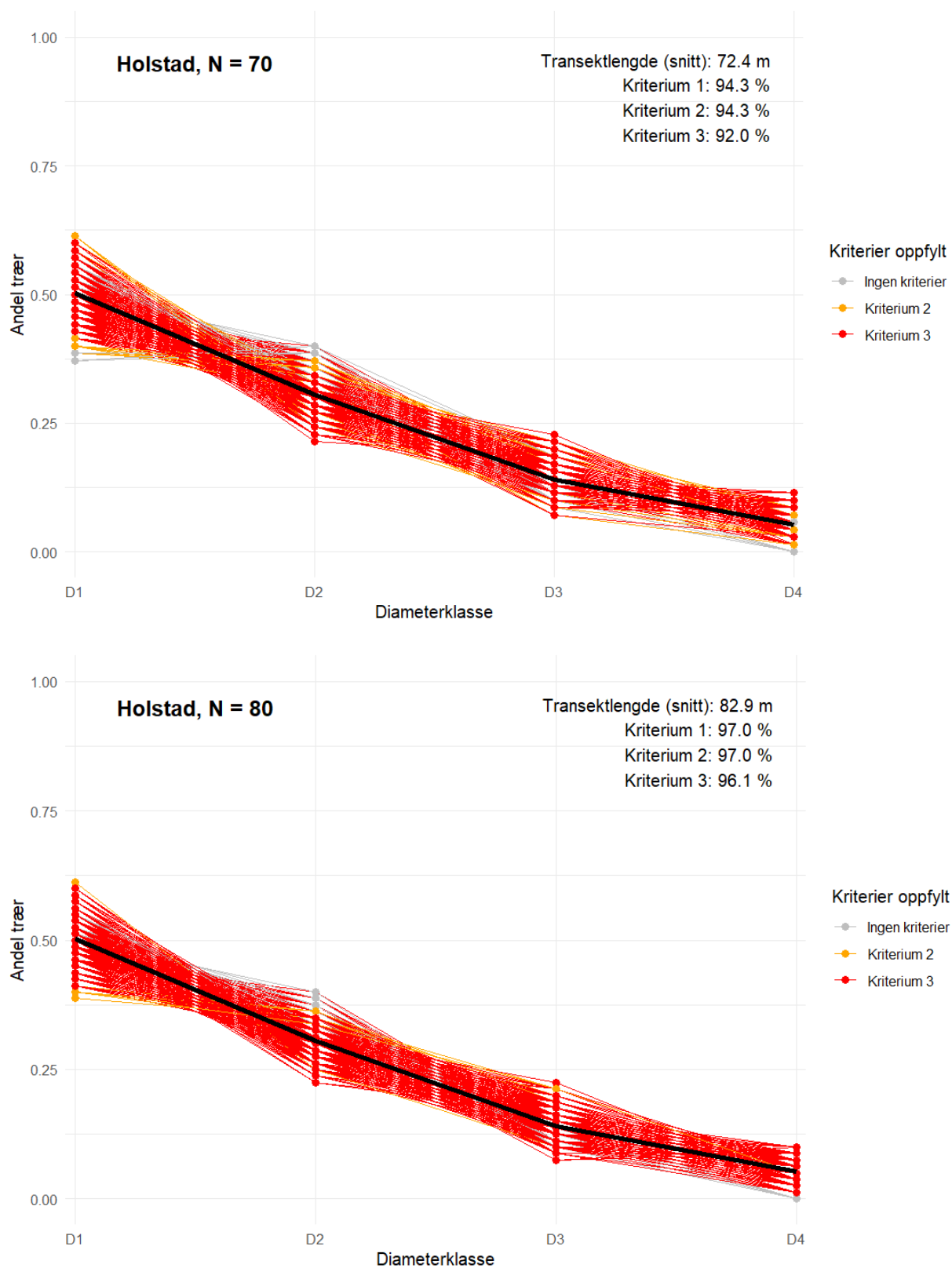
I begge bestand er diameterfordelingen i gransjiktet under bjørkeskjermen fallende, og representativiteten uttrykker transektenes evne til å fange opp denne strukturen. Ved å vise andelen simulerte transekker som oppfyller kriteriene *K1-K3* (jf. avsnitt 2.4.2) for ulike treantall (*N*) og bestand, får beslutningstaker et grunnlag for å velge *N* og antall transekker i tråd med ønsket feiltoleranse.

3.3.1 Sammenligning av diameterfordeling mellom prøveflate og transekker

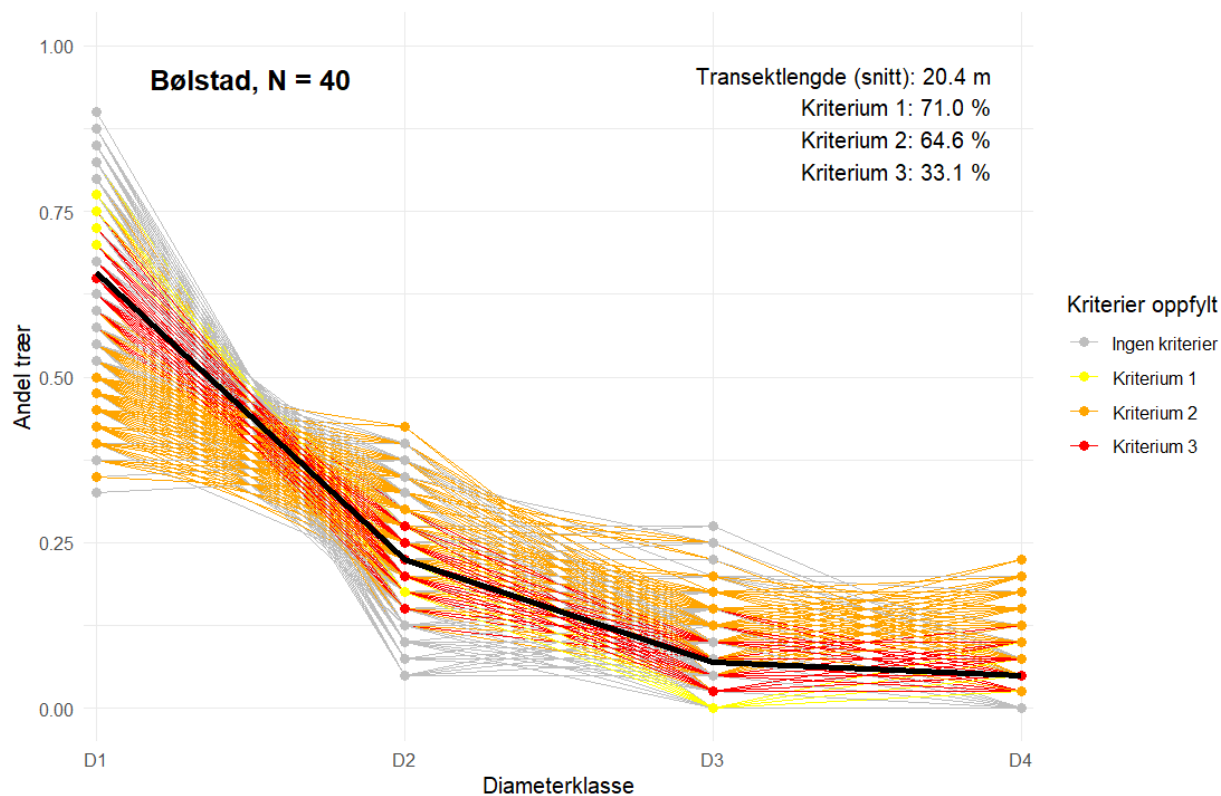
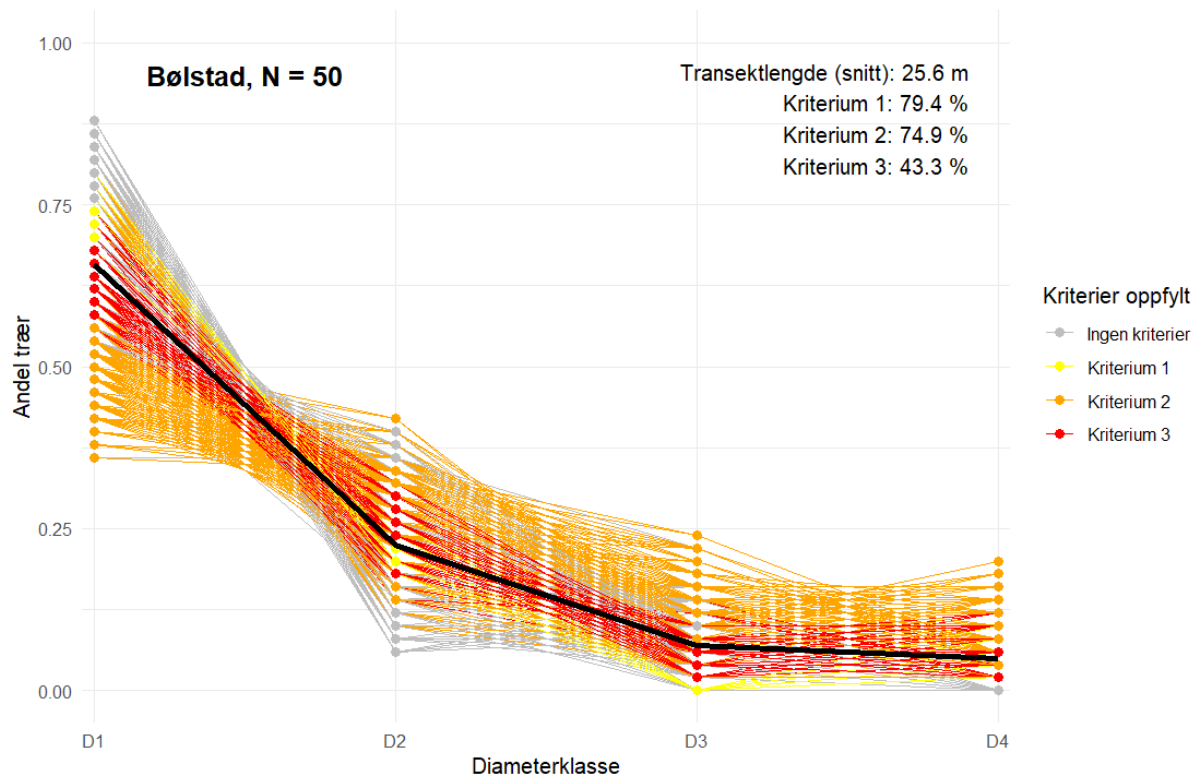
Representativiteten varierer både mellom bestandene og mellom ulike treantall (*N*) i hvert transekt. For begge bestand øker andelen transekker som oppfyller Kriterium 1, 2 og 3 med økende *N* (Figur 28, Figur 29).

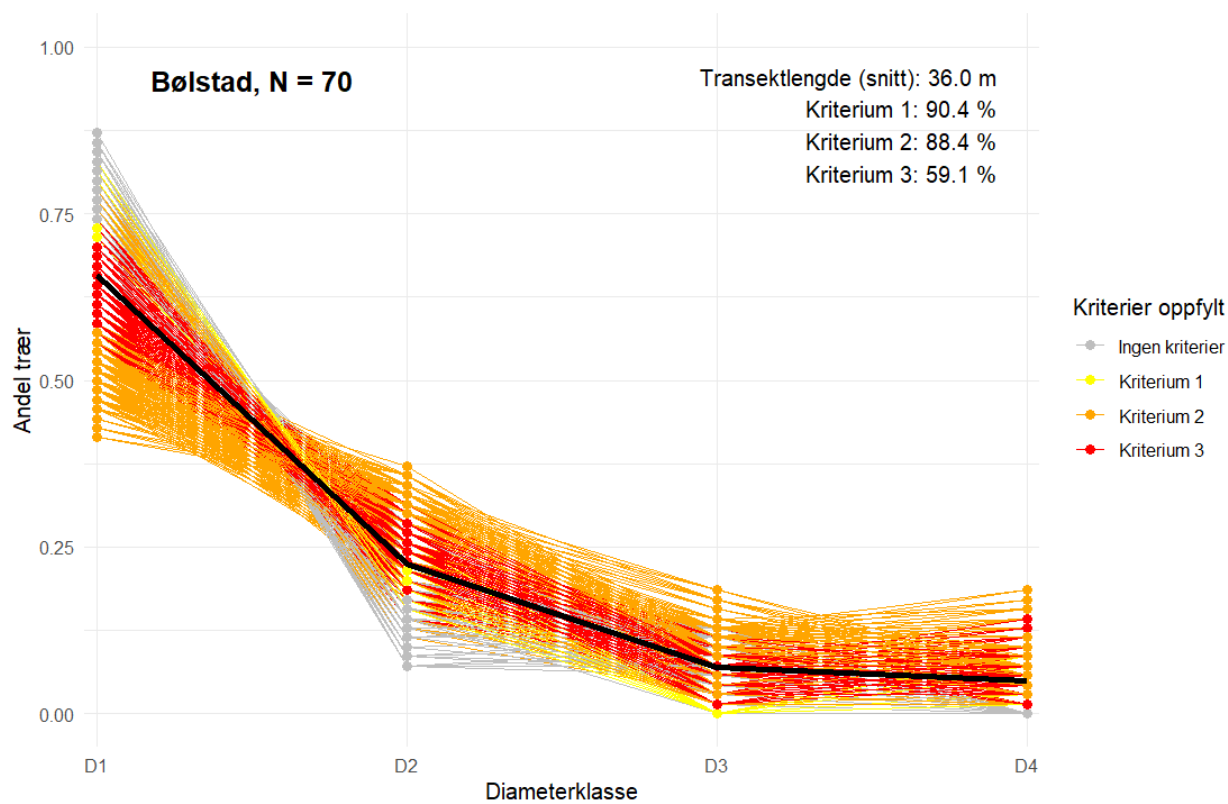
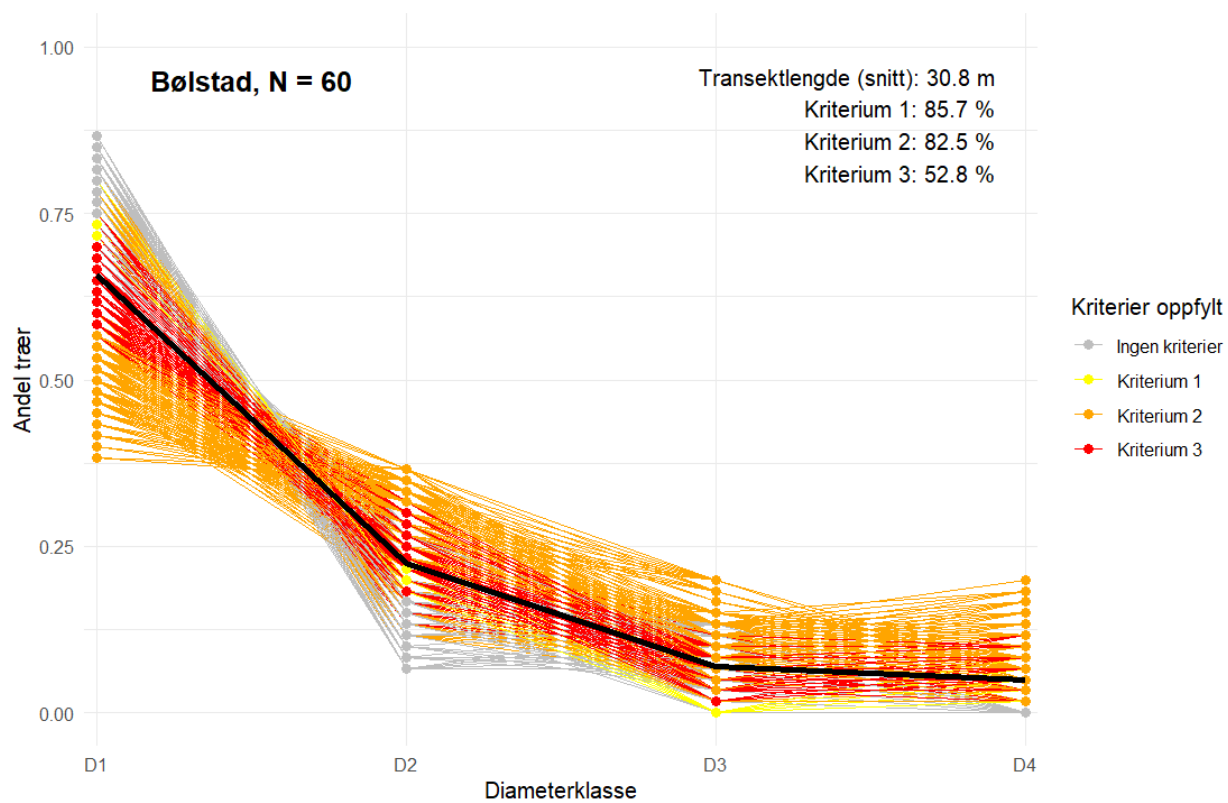


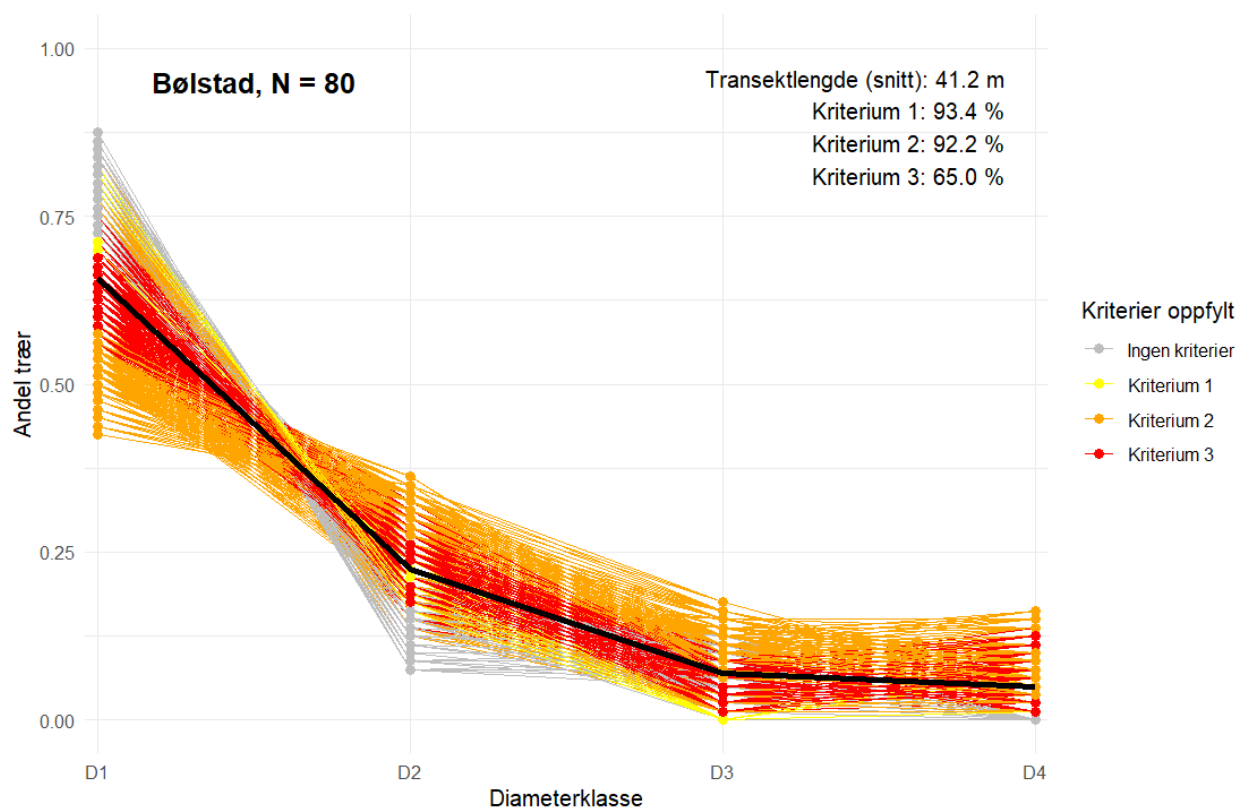




Figur 28. Diameterfordelingen i Holstads 1220 transekter ved alle undersøkte transekttreantall (N), plottet rundt diameterfordelingen på hele prøveflata (sort, tykk linje i midten). Siden alle transekter som oppfyller K1 også oppfyller K2, vises ikke K1 i grafen.







Figur 29. Diameterfordelingen i Bølstads 2454 transekter ved alle undersøkte transekttreantall (N), plottet rundt diameterfordelingen på hele prøveflata (sort, tykk linje i midten).

Større transekttreantall (N) gir økt oppfyllelse av alle kriterier (K1-K3), men det er stor forskjell mellom prøveflatene. For alle N er det på Bølstad langt færre transekter som oppfyller kriteriene enn på Holstad (Figur 28 og Figur 29; Tabell 10).

Tabell 10. Transektenes representativitet (uttrykt som andelen av transektene som oppfyller ulike kriterier), for alle undersøkte transekttreantall (N). For forklaring av kriteriene ($p1 > p2 > p3$, $p4 > 0$ og K1-K3), se avsnitt Kriterier (K) for samsvar i diameterfordeling 2.4.2.

Bestand	N	$p1 > p2 > p3$ (%)	$p4 > 0$ (%)	K1 (%)	K2 (%)	K3 (%)	Snittlengde (m)	Makslengde (m)
Holstad	40	95,6	86,4	82,3	82,3	66,1	41	65
	50	98,1	89,6	87,7	87,7	78,6	51	76
	60	99,6	92,0	91,6	91,6	85,6	62	87
	70	99,8	94,5	94,3	94,3	92,0	72	102
	80	100	97,0	97,0	97,0	96,1	83	113
Bølstad	40	94,9	73,8	71,0	64,6	33,0	20	31
	50	97,5	80,1	79,4	74,9	43,3	26	38
	60	98,6	85,7	85,7	82,5	52,8	31	45
	70	99,1	90,4	90,4	88,4	60,5	36	53
	80	99,5	93,4	93,4	92,2	65,3	41	61

K1: For alle N har over 95% av transektene i begge bestand en fallende diameterfordeling i de tre minste klassene ($p_1 > p_2 > p_3$). Her er det liten forskjell mellom bestandene (Tabell 10), som vises i Figur 28 og Figur 29 ved at de fleste linjer er fallende. Delvis lav oppfyllelse av $K1$ (for $N = 40$: 82% på Holstad og 71% på Bølstad) skyldes først og fremst mangel på trær i største diameterklasse (D4). På Bølstad er andelen transekter uten trær i D4 større enn på Holstad, som forklarer den jevnt lavere $K1$ -oppfyllelsen der. Forskjellen i $K1$ -oppfyllelse mellom bestandene avtar imidlertid med økende N , og fra $N = 40$ til $N = 80$ faller differansen fra ca. 11,5% til 3,5%.

K2: På Holstad er det ingen transekter som mangler trær i D3, og alle transekter som oppfyller $K1$ oppfyller også $K2$ (Figur 28; Tabell 10). På Bølstad mangler en del transekter trær i D3 (Figur 29), som gir lavere oppfyllelse av $K2$ enn $K1$. Med økende N avtar imidlertid differansen i representativitet mellom $K1$ og $K2$ ($K2$ -oppfyllelsen er 6% lavere for $N = 40$ og 1% lavere for $N = 80$), og mellom bestand (Bølstad har 18% lavere oppfyllelse enn Holstad for $N = 40$ og 5% lavere for $N = 80$).

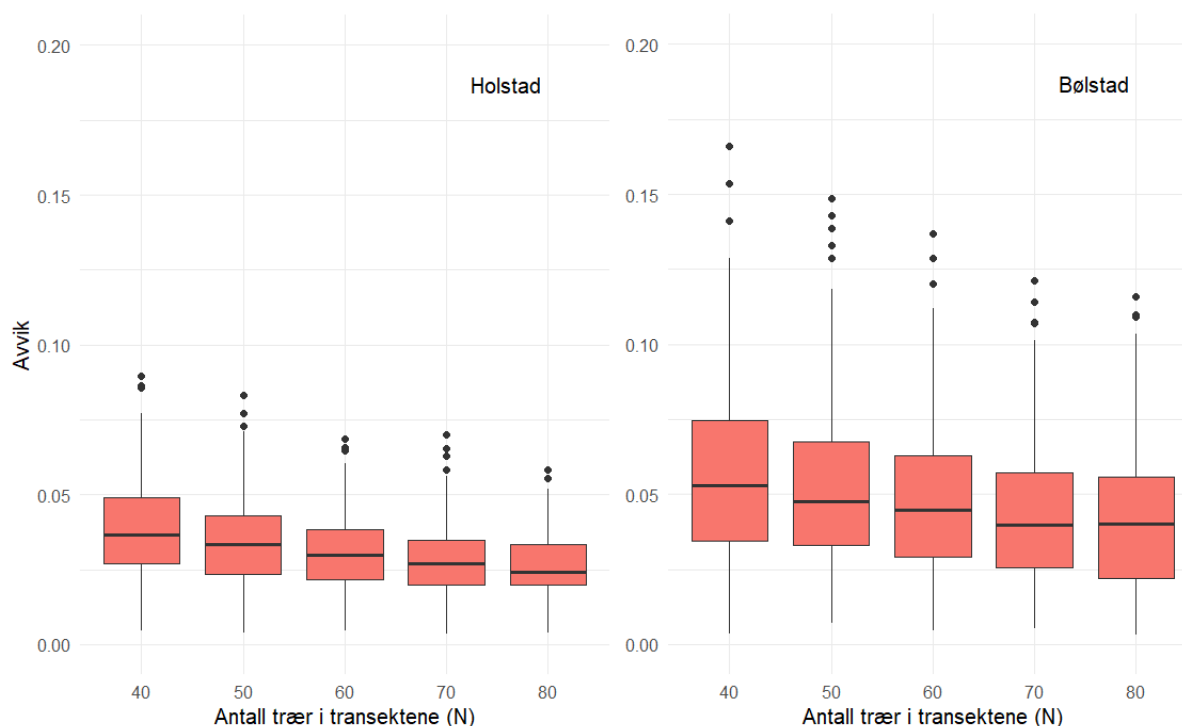
K3: For $K3$, som krever en mer presis gjengivelse av bestandets diameterfordeling, øker forskjellen mellom de to flatene markant (Tabell 10). Selv ved høyeste undersøkte treantall ($N = 80$) oppfyller kun 65% av Bølstads transekter alle kriteriene, grunnet høye absoluttavvik mellom transektene og bestandenes diameterklasseandeler. Blant Holstad-transektene oppfyller over 66% $K3$ allerede ved $N = 40$, mens hele 96% oppfyller $K3$ for $N = 80$. Her er forskjellen mellom flatene nokså konstant for alle N .

Representativiteten er konsekvent høyere for Holstad-transektene, men forskjellen mellom bestandene øker markant med økende krav til presist samsvar mellom transektenes og prøveflatas diameterfordeling ($K1$ - $K3$). For at 90% av transektene skal oppfylle $K1$ og $K2$, holder det på Holstad med $N = 60$, mens det på Bølstad kreves $N = 70$ for $K1$, og $N = 80$ for $K2$. For $K3$ kreves dobbelt så mange trær i transektene på Bølstad for å oppnå den samme representativiteten, hvor kun 53% av Bølstad-transektene oppfyller $K3$ med treantall $N = 60$, mens tilsvarende oppfyllelse for Holstad er 86%.

Den lave $K3$ -oppfyllelsen indikerer også at Bølstads gransjikt har langt større variasjon i diameterfordeling mellom tregrupper på N trær. Dette ses ved at treantallet i diameterklassene (og dermed diameterfordelingen) for samme N varierer langt mer på Bølstad enn på Holstad, noe som vitner om et gransjikt med langt større horisontal strukturvariasjon på Bølstad. Dette indikerer også at transektenes representativitet for bestandets diameterfordeling vil være høyere i bestand med mindre horisontal strukturvariasjon.

Avvik mellom transekter og prøveflater

Med økende N reduseres transektenes gjennomsnittlige absoluttavvik (heretter omtalt som «avvik») fra bestandets diameterfordeling. Den lave K3-oppfyllelsen på Bølstad skyldes at avviket der er gjennomgående langt høyere enn på Holstad (Figur 30).



Figur 30. Spredning i gjennomsnittlig absoluttavvik (Avvik) mellom transektenes og bestandets diameterfordeling for ulike treantall (N) og bestand. Boksplottet viser median (midten av boksen), kvartiler (kantene av boksen) og spredning for den øvrige halvparten av transektene; de vertikale linjene ender ved siste verdi innenfor en avstand på 1,5 ganger interkvartilbredden (målt fra nærmeste kvartil), og prikker markerer avvik som ligger utenfor dette området.

For $N = 60$ er medianavviket 0,03 på Holstad og 0,045 på Bølstad, og nær halvparten av Bølstad-transektene har dermed avvik for dette treantallet som er over tålegrensen på 0,05 (Tabell 11; Figur 30). Blant Holstad-transektene har hele 90% Holstad-transektene avvik under denne grensen. De mest representative 90% av Bølstad-transektene, derimot, har avvik helt opp til 0,09 (Tabell 11).

Tabell 11. Fordeling av diameterfordelingens absoluttavvik per prøveflate og transekttreantall (N), oppgitt som transektenes middelvare, medianavvik og 90- og 95-persentiler.

<i>Prøveflate</i>	<i>N</i>	<i>Middel</i>	<i>Median</i>	<i>90%</i>	<i>95%</i>
<i>Holstad</i>	40	0,039	0,037	0,060	0,065
	50	0,034	0,033	0,051	0,057
	60	0,030	0,030	0,047	0,055
	70	0,028	0,027	0,041	0,047
	80	0,026	0,024	0,040	0,043
<i>Bølstad</i>	40	0,057	0,053	0,096	0,109
	50	0,052	0,047	0,091	0,101
	60	0,048	0,045	0,087	0,096
	70	0,044	0,040	0,079	0,093
	80	0,041	0,040	0,073	0,085

Transekter (med $N = 60$) som helt eller delvis oppfyller de kvalitative kriteriene om fallende fordeling og tilstedeværelse av trær i de største klassene (K2) har lavere absoluttavvik enn transekter som ikke oppfyller noen kriterier (Tabell 12). For $N = 60$ er Holstad-transektenes middelvare 0,041 for de som ikke oppfyller noen kriterier, og 0,029 for de som oppfyller hvilke som helst kriterier. På Bølstad er tilsvarende tall 0,063 (ingen kriterier) og 0,045 (alle kriterier). Transekter med høye avvik har dermed ikke bare lavere oppfyllelse av K3, men også av K1 og K2.

Tabell 12. Middelsabsoluttavvik for transekter med ulik grad av kriterieoppfyllelse ($N = 60$).

<i>Oppfylt kriterium</i>	<i>Holstad</i>		<i>Bølstad</i>	
	<i>Andel transekter</i>	<i>Middelvare</i>	<i>Andel transekter</i>	<i>Middelvare</i>
<i>Ingen</i>	8,4 %	0,041	14,3 %	0,063
<i>K2</i>	91,6 %	0,029	82,5 %	0,045

3.3.2 Horisontal variasjon i bestandsstruktur

Resultatene indikerer at gransjiktet på Bølstad har langt større romlig variasjon i diameterfordeling enn på Holstad. Dette fremgår både av den lave oppfyllelsen av Kriterium 3 på Bølstad (Tabell 11) og av den langt større spredningen i transektenes diameterfordelinger sammenlignet med prøveflatas, uavhengig av treantall (Figur 29). Dette tyder på større strukturell variasjon innenfor små tregrupper på Bølstad enn på Holstad.

Den lave K3-oppfyllelsen på Bølstad viser at transektenes representativitet svekkes når det er stor horisontal strukturvariasjon innenfor bestanden. Ved å analysere hvilke deler av prøveflata som gir størst avvik i diameterfordeling, og hvordan dette henger sammen

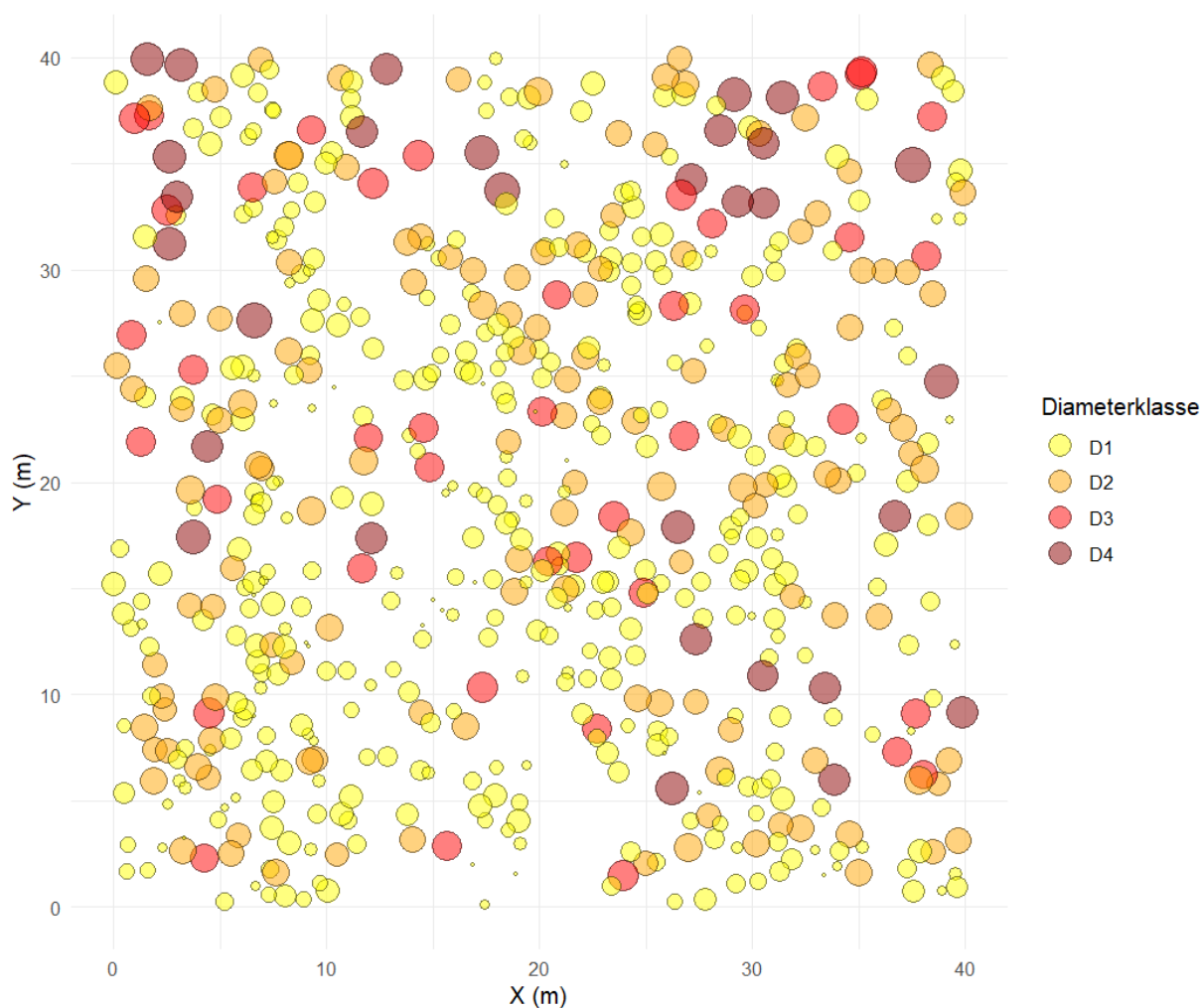
med transektenes utforming og lengde i meter, kan det identifiseres hvilke forhold som gir lav kriterieoppfyllelse. Ikke minst vil resultatene også være nyttige når strukturvariasjon skal sees i sammenheng med gransjiktets vekst og utvikling.

Horisontal variasjon i diameterfordeling på prøveflatene

For å undersøke hvordan diameterfordelingen varierer mellom spesifikke deler av prøveflatene, blir trærne i diameterklassene fremstilt i kart (Figur 31 og Figur 32). Kartene viser hvor trærne i de ulike diameterklassene opptrer på de to prøveflatene.



Figur 31. Holstad: Kart over grantrær med størrelse etter diameter og farge etter diameterklassetilhørighet.



Figur 32. Bølstad, kart over grantrær med størrelse etter diameter og farge etter diameterklassetilhørighet.

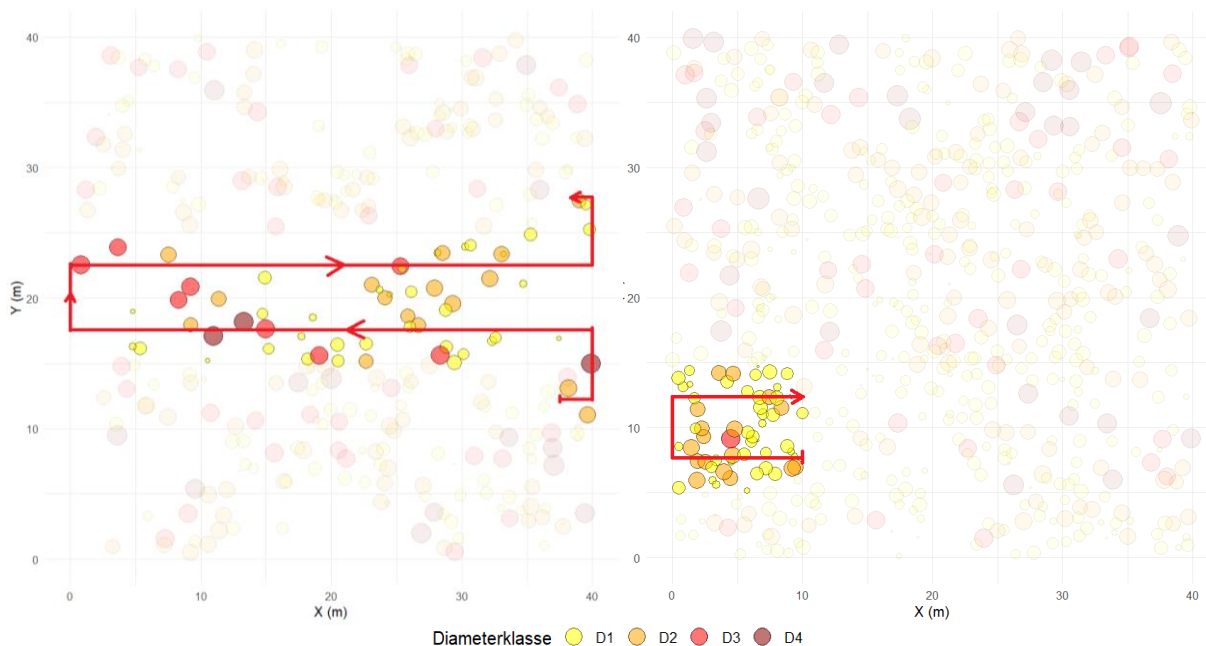
Av figurene går det tydelig frem at trærne i de ulike diameterklassene ikke er jevnt fordelt på prøveflatene. På Holstad er bestandstettheten langt større i sørlige halvdel av prøveflata, hvor hele 10 av de totalt 13 store D4-trærne står (Figur 31). I det glisnere nordlige partiet er det i et stort område nord for midten nesten fullstendig fravær av store trær, men her også de minste trærne underrepresentert. D1-klassens tetthet er også sterkt underrepresentert i sørvest, men overrepresentert i sørøst.

På Bølstad er det betydelig tettere, særlig blant D1-trærne (Figur 32). Store trær (D4) opptrer i høy tetthet i de nordligste ti meterne av prøveflata. I timetersbeltet rett nord for midten av flata er det imidlertid få store trær, og i de nordøstlige delene er det relativt få små trær. Både i nordøstre og nordvestre hjørne opptrer store trær i høy tetthet, mens de små er underrepresentert. Sørlige halvdel av prøveflata har generelt sterk overrepresentasjon av små trær, og de store trærne er helt fraværende i sørvest.

Denne tilfeldige horisontale spredningen er årsaken bak mange av transektenes høye avvik i diameterfordelinger (Figur 34). Transekter som går gjennom deler av prøveflata der enkelte klasser er overrepresentert, får dermed dårlig kriterieoppfyllelse.

Romlig konsentrerte transekt

Metoden med utvelgelse av transekttrær langs en «slange» som bukker seg frem og tilbake over prøveflata (Figur 10) resulterer i at mange simulerte transektter ikke følger en rett linje, men er «foldet» og fordelt på to eller flere nabostriper. Disse transektene blir mer romlig konsentrert (Figur 33) enn transektter som følger en retning hele veien, selv om det har samme areal. Kun en liten andel av transektene får de mest romlig konsentrerte U-formene, men mange er likevel mer konsentrerte enn helt rettlinjede transektter.

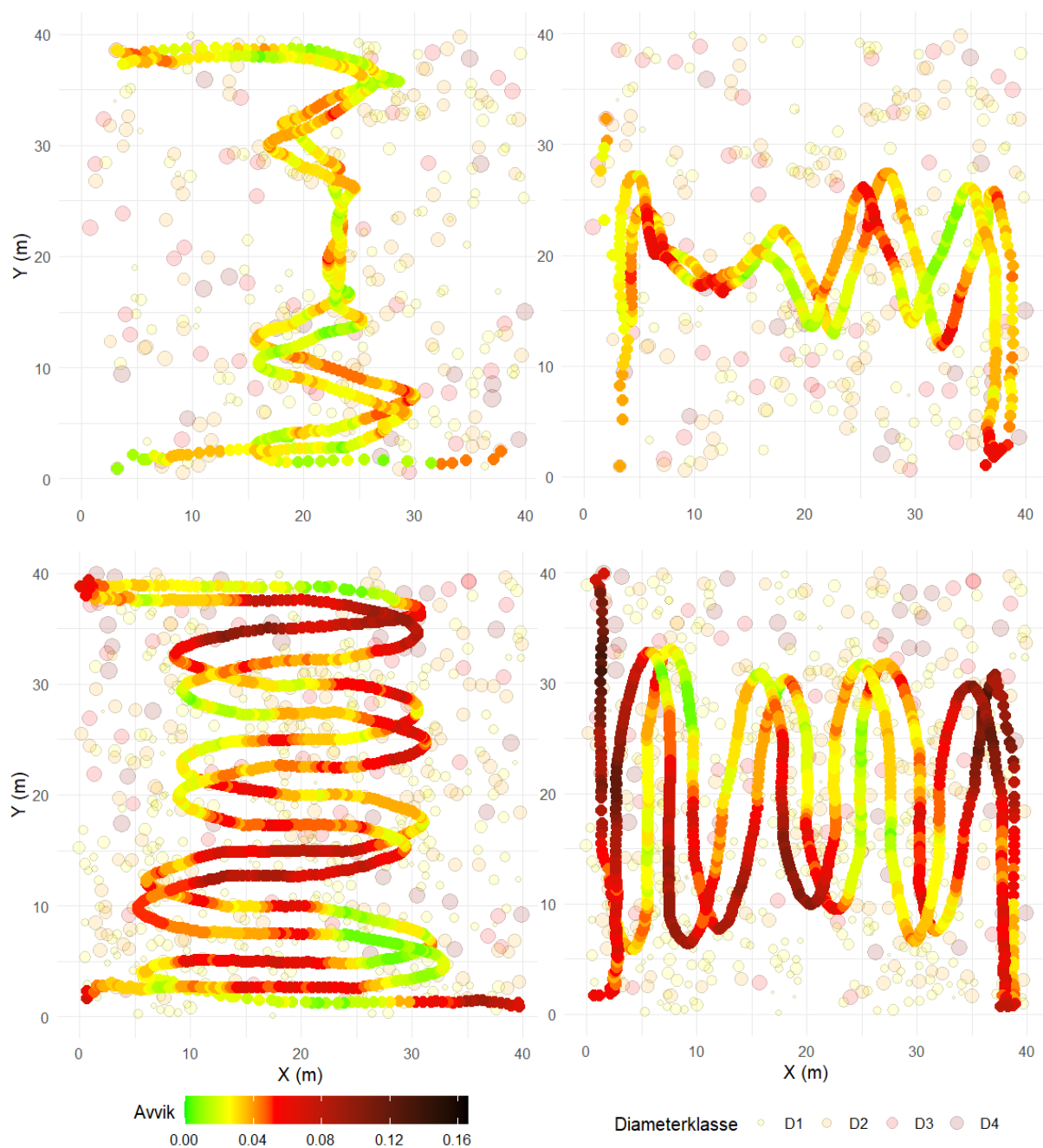


Figur 33. Datamaterialets minst (venstre; Holstad) og mest (høyre; Bølstad) romlig konsentrerte transekt ($N = 60$).

Dette utgjør kun et problem dersom transektter som svinger rundt kanten har høyere avvik enn de rettlinjede. At denne analysens delvis foldete transektter kan ha bidratt til større absoluttavvik enn det reelle, krever imidlertid at det er større horisontal variasjon mellom striper enn innen striper. Siden stripene går i både X- og Y-retning, betyr «mellom striper» i én retning «innen striper» i den andre retningen. Det er dermed lite trolig at formen på transektene (for samme areal) påvirker kriterieoppfyllelsen, men det blir likevel undersøkt nærmere som konsekvens av analysen i neste avsnitt.

Transektavvik vs. strukturvariasjon

Transektenes avvik viser i hvilken grad deres diameterfordelinger samsvarer med gjennomsnittet for hele prøveflata. Avviket gir dermed en kvantitativ beskrivelse av den horisontale strukturvariasjonen, i motsetning til de kvalitative kriteriene ($K1$ - $K3$). For å undersøke den horisontale strukturvariasjonen, ble derfor middelkoordinater for trærne i hvert transekt fremstilt i kart og fargelagt med det aktuelle transektets avvik (Figur 34). Analysen ble begrenset til transektter med $N = 60$, ettersom tilsvarende mønstre forventes også for andre treantall.



Figur 34. Middelkoordinater for transektenes ($N = 60$) trær på Holstad (oppe) og Bølstad (nede) i X- (venstre) og Y-retning (høyre) fargelagt med transektenes gjennomsnittlige absoluttavvik i diameterklasseandeler (Avvik). De to slangene i hvert plott er middelkoordinater for forskjøvet og ikke-forskjøvet utvalgssystem (Figur 10). Boblene i bakgrunnen er prøveflatens trær, fremstilt i fire diameterklasser (D1-D4).

Transekter med (dypere) rød farge avviker mer fra prøveflatas diameterfordeling enn transekter med gul eller grønn farge. Der middelkoordinatene svinger ut mot kanten, har transektet overvekt av trær kun på den ene siden av flata, og de nevnte U-transektene (Figur 33) er representert ved prikkene ytterst i denne svingen. Siden avviket (prikkenes farge) ser ut til å opptre uavhengig av nærhet til kant, bekreftes hypotesen om at transektenes utforming i seg selv ikke har en klar effekt på avviket i diameterfordeling.

I begge ender av prøveflata svinger middelkoordinatene ut mot hjørnene. Dette skyldes at de kantnære transektene inneholder trær på hver side av prøveflata, og at middelkoordinater er beregnet separat for deler av transektet på hver side. Dermed representeres hvert av disse transektene med to punkter, begge fargelagt med hele transektets avvik. For transekter med trær i begge ender av flata er forholdet mellom prikkens farge og omgivende bestandsstruktur dermed vanskeligere å tolke, og i den følgende analysen fokuseres det derfor mer på sentrale transekter.

Holstad romlige strukturvariasjon

På Holstad representerer hver prikk middelkoordinatene for trærne innen gjennomsnittlig 60 meter lange transekter med 60, som tilsvarer 1 tre per transektmeter (Tabell 10). Siden prøveflata er 40 meter lang, inneholder nesten alle transektene inneholder trær på tvers av hele prøveflata (Figur 35), og middelkoordinatene opptrer relativt sentralt. Dette gjelder særlig transekter som går gjennom glisne områder (eks. sentralt i flata i X-retning) og derfor er rundt 80 meter lange.

Avviket skyldes først og fremst lokale skjevheter i diameterfordelingen, og særlig variasjon i andelen små trær (D1), som beskrevet under Figur 31. Høyt avvik (Figur 34; rød farge) forekommer enten der det er få trær i D1 og de mellomstore og/eller store trærne dominerer (eks. sentralt og nord i flata), eller der D1 er overrepresentert på bekostning av D2 og D3 (eks. sørøstre hjørne). I Y-retning er det større spredning i avvik (mer fargevariasjon i Figur 34), som betyr at diameterfordelingen varierer mer i denne retningen.

Ved undersøkelse av diameterfordelingen til de mest avvikende enkelttransektene på Holstad, ble det funnet at de største avvikene først og fremst skyldes store absoluttavvik i D1-klassen, både direkte, og indirekte gjennom at disse trærne må kompenseres med færre eller flere trær i de andre klassene.

Bølstads romlige strukturvariasjon

På Bølstad er 60-trærstransektene i snitt 30 meter lange, tilsvarende 2 trær per transektmeter (Tabell 10). Middelkoordinatene svinger derfor mye mer fram og tilbake enn på Holstad, og flere av Bølstad-transektene har middelkoordinater nært kanten (Figur 34), som for eksempel det mest romlig konsentrerte transektet (vist i Figur 33). Diameterfordelingen varierer langt mer mellom transektene enn på Holstad, og mange transekter har svært høye avvik (vist med rød til dyprød farge i Figur 34).

De høye avvikene på Bølstad skyldes store lokale skjevheter i diameterfordeling, særlig drevet av andelen små trær (D1), som forklart under Figur 32. I X-retning forklares de høyeste avvikene nordlig og sentralt i prøveflata med mangel på trær i D1 (der det er store konkurrenter av gran), og de store avvikene i sørvestre hjørne skyldes overflod av

små trær (og at store grantrær mangler). I Y-retning skyldes de største avvikene ekstrem dominans av D1 (opptil 52 av 60 trær), ofte med fravær av trær i D3 og D4, særlig langs kanten i sørlige og vestlige deler av flata. I nordøstre hjørne er det derimot få små trær og mange store som driver avviket opp.

De mest ekstreme tilfellene er sjeldne, men illustrerer hvordan Bølstad har en langt større spredningene i avvik enn Holstad. Det store avviket skyldes diameterklassenes romlige fordeling. Dette påviser at det på Bølstad er større strukturvariasjon mellom tregrupper på 60 trær enn Holstad.

Konklusjon for begge flater

Siden det på begge prøveflater finnes flest små trær, og trærne i de ulike klassene er horisontalt ujevnt fordelt, blir avviket fort stort i den minste klassen (D1). Særlig i områder med tette grupper av små trær fanger transektene lett opp flere enn tre trær over snittet (absoluttavvik i $p4 > 0,05$ for $N = 60$), og det motsatte skjer i områder med få D1-trær.

Transektenes varierende absoluttavvik er et uttrykk for de to prøveflatenes horisontale strukturvariasjon. Analysen viser at det på Bølstad er langt større variasjon i diameterfordeling mellom tregrupper på N trær enn på Holstad, og påviser dermed en større strukturvariasjon i gransjiktet.

Jo større den horisontale variasjonen per treantall er, jo større blir risikoen for at et tilfeldig transekt avviker mye fra bestandets gjennomsnitt. Siden høye absoluttavvik er forbundet med lav kriterieoppfyllelse (Tabell 12), bekrefter dette hypotesen om at transektenes representativitet reduseres med økende horisontal strukturvariasjon.

3.3.3 Representativitet ved ulik bestandstetthet og romlig variasjon

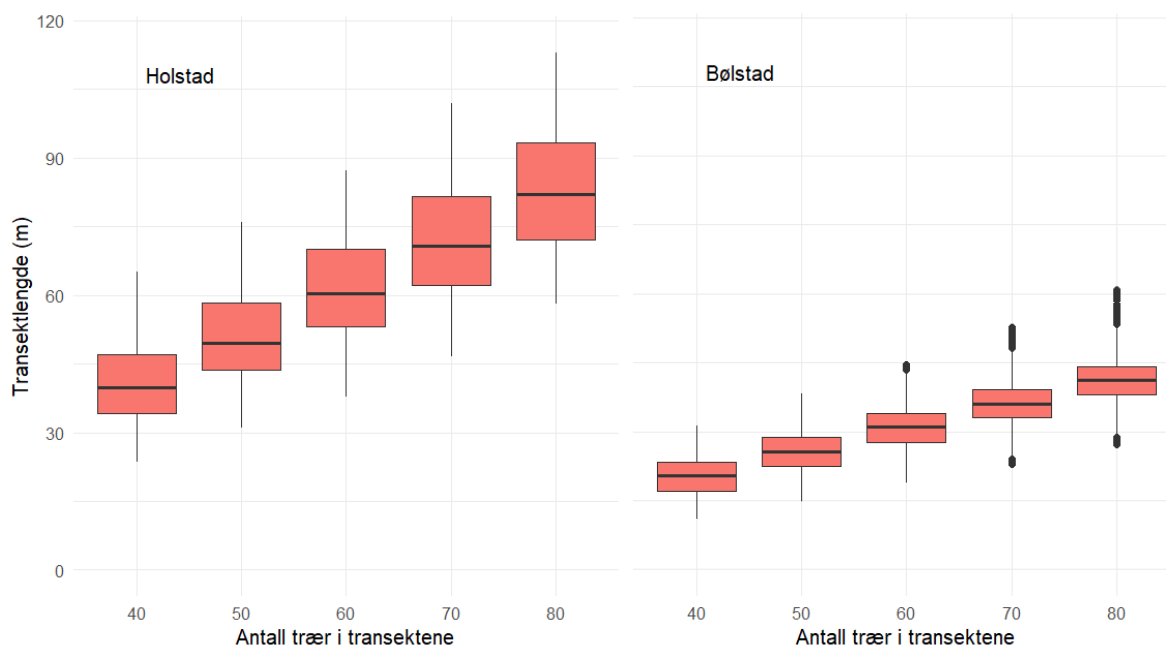
Det er imidlertid interessant å undersøke om den lavere kriterieoppfyllelsen for Bølstad-transektene også delvis kan forklares med bestandstetthet. Høyere bestandstetthet gir transekter som er kortere og dermed mindre (Tabell 10). Dette øker risikoen for å fange opp lokale variasjoner på mindre arealenheter i stedet for strukturen i hele prøveflata, som større arealenheter har en høyere sannsynlighet for å representere bra.

For samme N og bestandsstørrelse vil transektenes representativitet dermed reduseres med økende bestandstetthet, særlig når diameterfordelingen varierer mye horisontalt. På Bølstad, hvor både tettheten og den romlige variasjonen er størst (Figur 34; Figur 30), er det dermed mer sannsynlig at hele transekter havner innenfor én lokal, relativt homogen gruppe, noe som kan forklare den lavere kriterieoppfyllelsen der.

Siden det er dobbelt så mange grantrær på Bølstad (613) som på Holstad (305), og prøveflatene er like store, vil et Bølstad-transekt med N trær i snitt få halvparten så stort areal som på Holstad.

Det bør derfor undersøkes hvordan variasjon i areal for transekter med samme N påvirker deres representativitet for bestandenes strukturvariasjon. Siden arealet til et transekt er proporsjonalt med lengden, blir dette undersøkt ved å analysere transektenes lengde (i meter) sin påvirkning på kriterieoppfyllelsen.

På grunn av bestandstettheten er Holstads transekter (for samme N) i gjennomsnitt dobbelt så lange som Bølstads (Tabell 10). Romlig varierende bestandstetthet fører likevel til variasjon i transektenes lengder innen begge bestand, selv for samme N (Figur 35).

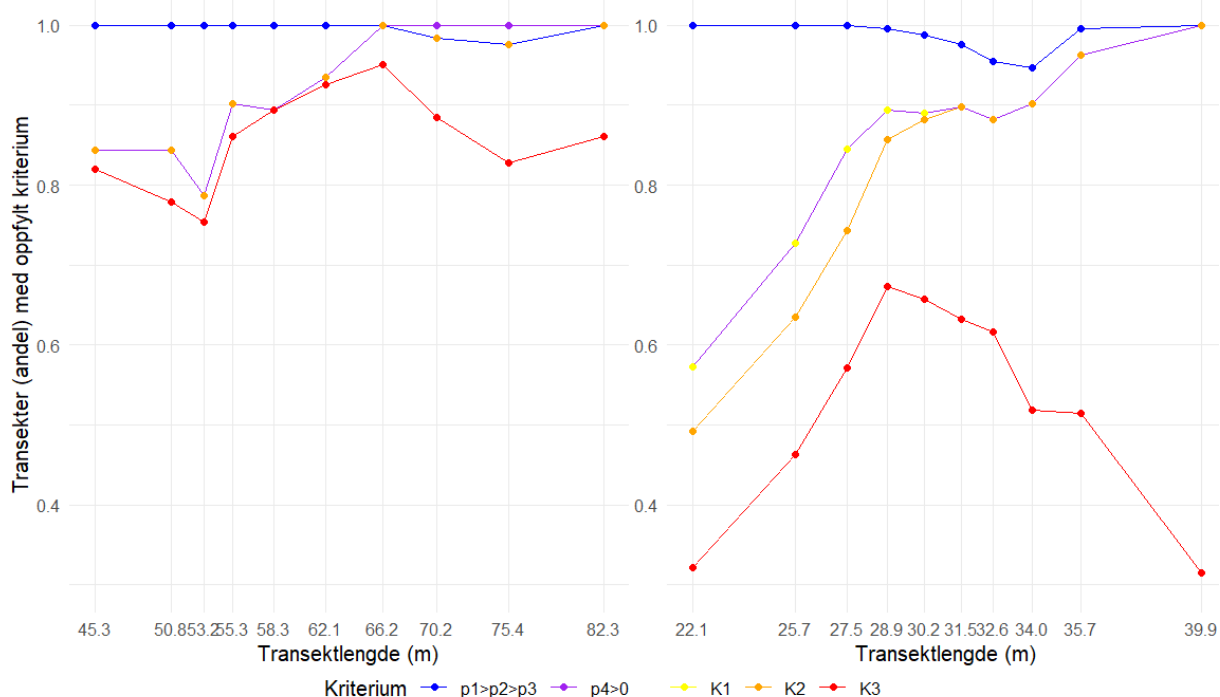


Figur 35. Spredning i transektlengde (m) for ulike transekttreantall og bestand. Boksplottet viser median (midten av boksen), kvartiler (kantene av boksen) og variasjonen i lengde for den øvrige halvparten av transektene; de vertikale linjene ender ved siste verdi innenfor en avstand på 1,5 ganger interkvartilbredden (målt fra nærmeste kvartil), og prikker markerer ekstremverdiene utenfor dette området.

Det lengste 60-trærs transektet på Holstad er 87 m og det korteste er 38 m (spredning: 50 m). På Bølstad er lengste 60-trærs transekt 45 m, og det korteste 19 m (spredning: 26 m). På Holstad er differansen mellom lengste og korteste transekt dermed dobbelt så stor som på Bølstad. Relativt til den generelle bestandstettheten er imidlertid den horisontale variasjonen i tretetthet omtrent lik i de to bestandene.

Transekter blir lange når de går gjennom glisnere områder, hvor andelen store trær er høyere. Tilsvarende blir transekter korte når de går gjennom tette partier, hvor det gjerne er rikelig med små trær (Figur 31 og Figur 32).

Siden alle transekter er 5 meter brede, medfører en dobling i lengde også en dobling i areal. Analyse av sammenhengen mellom transektlengde og kriterieoppfyllelse kan dermed avsløre om lengden eller arealet dekket av et transekt er avgjørende for representativiteten. For enkelhets skyld analyseres dette kun for $N = 60$ (Figur 36).



Figur 36. Oppfyllelse av kriterier ved ulike transektlengder for $N=60$ på Holstad (venstre) og Bølstad (høyre). Overlappende linjer er fremstilt slik at prikker vises for den ene, og linjen for den andre. På Holstad er K2-linjen og -prikkene (gul) ikke synlig, siden K1-oppfyllelsen er identisk med K2-oppfyllelsen (oransje). Det samme gjelder for Bølstad for transektene med lengde over de midlere.

Transektenes kriterieoppfyllelse påvirkes av deres lengder (for $N = 60$), men sammenhengene er langt tydeligere på Bølstad enn på Holstad (Figur 36). K1 og K2 oppfylles i større grad for lengre transekter (som går gjennom glisnere partier) enn kortere transekter (som går gjennom tettere partier). K3-oppfyllelsen er høyest blant transekter med midlere lengder (som finnes i partier med gjennomsnittlig tetthet).

Disse mønstrene kan forklares med hvilke trestørrelser, og dermed diameterfordelinger, som opptrer ved ulike tettheter. I de tetteste partiene blir transektene korte, og der er det også en stor andel små trær. Korte transekter har derfor gjerne en overrepresentasjon av små trær ($p1 > p2 > p3$ sannsynlig), og en bratt fallende diameterfordeling. Dermed har de også en underrepresentasjon av store trær, som medfører en høy risiko for brudd på $p4 > 0$ og $p3 > 0$. Dette forklarer hvorfor korte transekter oftere bryter K1 og K2.

I den andre enden av lengdespekteret er det motsatt. De lengste transektene går gjennom glisne partier, hvor de minste trærne er underrepresentert, og de store forekommer oftere. Dette gir høy oppfyllelse av $p4 > 0$ og $p3 > 0$. At oppfyllelsen av K1 og K2 er høy også for de lengste transektene, skyldes at underrepresentasjonen i de minste

klassene ikke er stor nok til at kravet om $p_1 > p_2 > p_3$ brytes. Dermed oppfyller de lange transektene oftere K_1 og K_2 .

Dette forklares ved at gjennomsnittlig differanse mellom de tre minste diameterklassene (p_1 - p_3) er langt større enn differansen mellom p_4 og 0 (Tabell 6; Figur 8), og at dette bufrer for store relative endringer i p_4 -andelen. Absoluttavviket kan altså være langt over 5% for de minste klasser uten at K_2 s kriterium om fallende fordeling brytes. Dette vil imidlertid føre på brudd til K_3 s strengere krav til likhet i diameterfordelingens kurveform.

At K_3 -oppfyllelsen er høyest for transekter med midlere lengder, skyldes at disse har lavere avvik i diameterfordeling. Drøftingen ovenfor viser at de korteste transektene har en brattere diameterfordeling enn gjennomsnittet og at de lengste har en slakere. Dermed har transekter med midlere lengder en diameterfordeling som i større grad gjenspeiler den gjennomsnittlige i bestandet. Kravet gjennomsnittlig absoluttavvik under 5% imøtekommes derfor oftest av disse, som forklarer hvorfor de midlere transektlengdene har den høyeste oppfyllelsen av K_3 .

I alt viser analysen av transektlengde at det er en tett sammenheng mellom horisontal variasjon i bestandstetthet og transektenes kriterieoppfyllelse.

Analysen viser også at dette har langt større betydning i bestand med brattere diameterfordeling og høy bestandstetthet (jf. Bølstad i Figur 36), som til sammen resulterer i lokale grupper med svært mange små trær. Bølstads har langt brattere diameterfordeling og høy bestandstetthet. Dette i kombinasjon med større horisontal variasjon i diameterfordeling (Figur 29; Figur 34) forklarer transektenes generelt lave representativitet for K_3 , særlig for de største og minste transektene (Figur 36).

4 Diskusjon

Denne masteroppgaven har undersøkt hvordan gran under en tett og langvarig bjørkeskjerm kan utvikle en flersjiktet struktur. Oppgaven viser dermed om slike tosjiktede bestand kan være et godt utgangspunkt for videre omstilling til blodningsskog. I oppgavens andre del vurderes påliteligheten ved bruk av transekter for enkelt å kunne påvise diameterfordelingen i flersjiktet gran under bjørk.

4.1 Utvikling av flersjiktet gran under bjørkeskjerm

4.1.1 Mål 1a)

«Beskrive utvikling i bestandsstruktur for tosjiktede bestand der gran over lang tid har vokst under en tett bjørkeskjerm»

På begge prøveflater har flersjiktningen i gran, som var påbegynt allerede ved bestandsalder 18-20 år, blitt opprettholdt og videreutviklet de siste 15 årene. Ved ca. 35 års alder har begge gransjikt en tydelig fallende diameterfordeling, med flest trær i den minste diameterklassen, og suksessivt færre med økende diameter (Figur 13). Høydene henger tett sammen med diametere, og viser en tilsvarende fordeling (Figur 15). Den tydelig fallende diameter- og høydefordelingen på gransjiktet i begge bestand støtter dermed hypotesen: En langvarig, tett bjørkeskjerm kan føre til at gransjiktet utvikler en flersjiktet struktur.

De to gransjiktene har likevel utviklet seg forskjellig de siste 15 årene, til tross for svært lik bestandsstruktur ved 18-20 års alder (Figur 11; Figur 14). Bølstads gransjikt er nå dobbelt så tett ($G \approx 17 \text{ m}^2/\text{ha}$) som Holstads ($G \approx 8,5 \text{ m}^2/\text{ha}$), og langt flere trær har vokst inn i oversjiktet (Figur 15). Bølstad har flere grantrær i alle diameterklasser, og svært mange i den minste ($\approx 2000/\text{ha}$). Antallet faller jevnt og bratt ($q = 2,1$) med økende diametere helt opp til dbh 28 cm (Figur 13). Selv om Holstads gransjikt også har en fint fallende diameterfordeling, er formen er slakere ($q = 1,7$) og mindre jevn. Holstad har langt færre trær ($\approx 800/\text{ha}$) i minste diameterklasse, og gransjiktets største tre har dbh 20 cm. På Holstad opptrer gran langt sjeldnere i oversjiktet (Figur 15).

Sammenlignet med data fra norske blodningsbestand (Moan, 2021) har selv Holstad rikelig med trær i den minste klassen ($> 550/\text{ha}$). Dette sikrer potensialet for god innvekst og rekruttering i mange år for begge bestand, gitt at bestandstettheten ikke blir for høy og småtrærne går ut i selvtynning. Observasjoner av mange titalls døde småtrær på Bølstad kan indikere at antallet små trær er for høyt, sammenlignet med målet i en blodningsskog. Her bidrar også den høye totale bestandstettheten ($G = 37,5$).

I 2009 (alder 18-20 år) var det ingen tydelige tegn til strukturell ulikhet mellom bestandene. At Bølstads gransjikt de siste 15 årene har utviklet langt større tetthets- og

størrelsesvariasjon enn Holstads, må dermed skyldes ulik påvirkning i perioden. Den forskjellige utviklingen må derfor ses i sammenheng med bestandshistorikken.

Årsak til forskjellig utvikling

Bestandenes utvikling henger sammen med deres behandlingshistorie. Begge de undersøkte bestandene ble utelukkende naturlig forynget, men inneholdt likevel rikelig med gran i undersjiktet ved i 2009 (18-20 års alder) (Tabell 7). På gode boniteter i nærheten av andre granbestand eller frøtrær, kan det dermed forventes en tett foryngelse av både bjørk og gran.

Dette viser seg blant annet ved den nokså like bestandsstrukturen i 2009 (overhøyde 14,7 og 16,5 m). I begge bestand var forholdet mellom gran- og lauvsjiktets tetthet omtrent likt (Tabell 7). Både høyde- og diameterfordelingen viste ingen vesentlige forskjeller mellom bestandene (Figur 14; Figur 11). Dette kan ses i sammenheng med at det i begge bestand ble foretatt ungsogpleie på bjørk ca. 8-9 år tidligere (overhøyde ≈ 11 m; Strand, 1967).

At skjermtettheten i de to bestandene i 2009 (overhøyde ≈ 15 m) var omtrent lik ($G \approx 18$ m²/ha), beskriver at kombinasjonen av utgangstetthet og ungsogpleie ga samme resultat. Begge bestand utviklet i løpet av de første 20 årene en lik bestandsstruktur, med kun små variasjoner i treantall i de ulike klassene i både gran og bjørk. At gransjiktens bratt fallende diameter- og høydefordelinger (Figur 14; Figur 11) observeres i bestand hvor bjørkeskjermens tetthet er blitt noe regulert, indikerer at skjermtettheten fra et tidlig stadium bør holdes på et nivå som ikke er for åpent eller for tett, dersom en slik struktur skal etableres.

I 2024 (overhøyde ≈ 20 m) er det betydelige strukturelle forskjeller mellom bestandene, trolig som følge av ulik behandling de 15 årene. Antallet gran ble i perioden 2009-2024 redusert til 22% av opprinnelig nivå på Holstad, og til 38% på Bølstad. På Holstad kan noe av den større reduksjonen skyldes granuttaket i 2009 (Solem, 2010), da alle grantrær over brysthøyde ble fjernet på 13% av arealet til 2024-flata (Figur 1).

Den høye dødeligheten hos gran tyder imidlertid på at mesteparten av trærne som ble fjernet, uansett ville gått ut i selvtynning. Dersom uttaket i 2009 var hele forklaringen på de 16 prosentpoengene forskjellig reduksjon, ville Holstad uten inngrep også hatt et treantall i 2024 tilsvarende Bølstads 38%. Fjerning av 13% av trærne i 2009 ville redusert treantallet til 87% i starten av perioden, og antallsreduksjon i perioden til 38% av dette ville gitt et treantall i 2024 på 33% av antallet før uttak. Dermed forklarer uttaket alene bare 5 av de 16 prosentpoengene i forskjell mellom prøveflatenes antallsreduksjon.

Uttaket i 2009 kan derfor ikke alene forklare Holstad-sjiktets lavere tetthet i 2024. Det forklarer heller ikke den langt høyere veksten hos enkelte grantrær på Bølstad, som indikerer at konkurransepresset på Bølstad har vært svakere (Figur 13; Figur 15). Selv om uttaket har bidratt noe til Holstads lavere tetthet, må hovedforklaringen ligge i ulik konkurransesituasjon i de to bestandene.

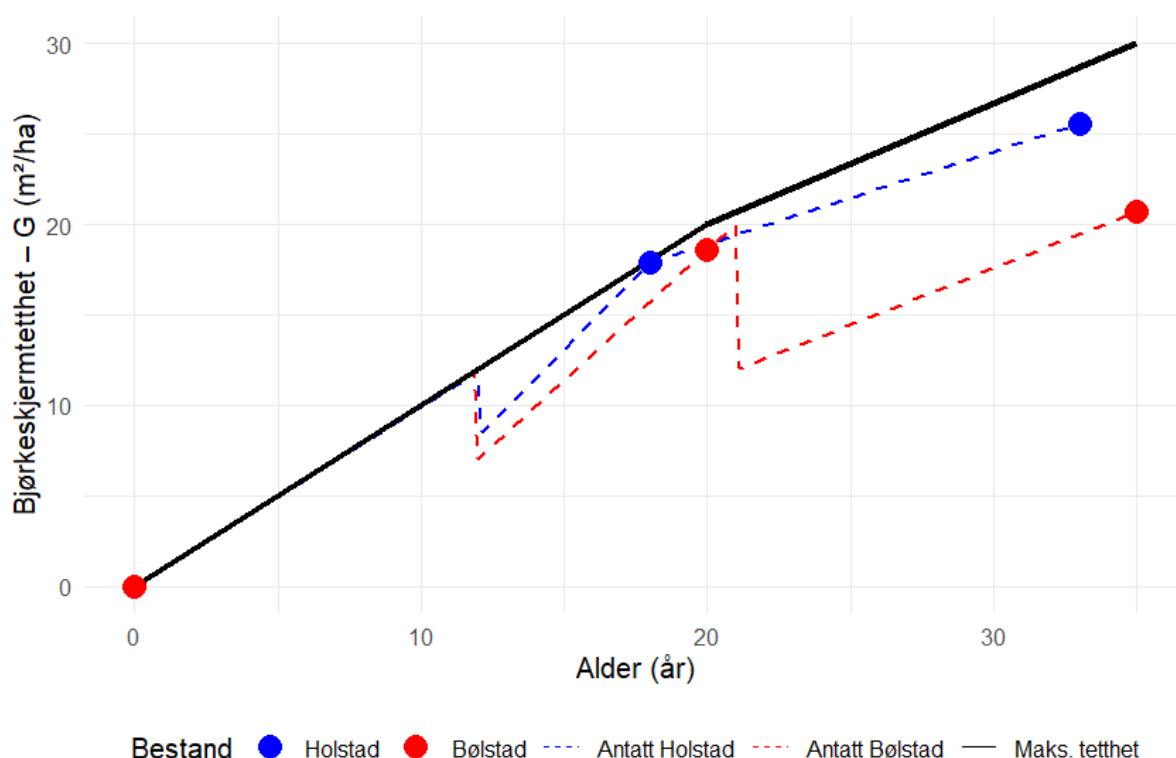
Kun på Bølstad ble det tynnet i bjørkeskjermen etter registreringene i 2009. Selv om bjørkeskjermen de siste 15 årene i begge bestand har vært tett, har den på Bølstad som følge av tynningen vært betydelig glisnere enn på Holstad. I 2024 er bjørkeskjermens tetthet 20% lavere på Holstad ($G = 25,6 \text{ m}^2/\text{ha}$) enn på Bølstad ($G = 20,7 \text{ m}^2/\text{ha}$).

Forskjellen rett etter tynning var sannsynligvis større, men har avtatt grunnet fristillingseffekter på bjørkas diametertilvekst.

Analysen av treslagsbidraget i konkurranse (Figur 22) viser at bjørkeskjermens tetthet varierer mer mellom ulike deler av prøveflata på Bølstad enn på Holstad. Variasjonen i skjermtetthet kan ha vært viktig for utviklingen av høyde- og diametervariasjonen i gransjiktet, der grana på Bølstad over en lang periode har blitt utsatt for i gjennomsnitt mindre, men også mer varierende konkurranse fra bjørkeskjermen enn på Holstad.

Analysene av horisontal variasjon i gransjiktets diameterfordeling (Figur 34) viser at gransjiktets struktur varierer langt mer mellom tregrupper på 60 trær på Bølstad enn på Holstad. Selv om direkte sammenhenger mellom lokale variasjoner i bjørkeskjermens tetthet og gransjiktets struktur ikke er kvantifisert, kan det antas at den romlige variasjonen i gransjiktet er en respons på bjørkeskjermens horisontale tetthetsvariasjon. Dette støttes opp av Figur 17, hvor det tydelig framgår at grana opptre i både større tetthet og dimensjoner i åpninger i bjørkeskjermen. Dette mønsteret er, som følge av en mer homogen bjørkeskjerm, mindre tydelig på Holstad (Figur 22; Figur 16). I begge bestand har grantrær under partier med glissen skjerm vokst raskere enn under tette partier, og undersjiktet har derfor differensiert seg mer i både høyde, diameter og tetthet på Bølstad enn på Holstad.

I alt samsvarer utviklingen for begge bestand med forventningen om at et gransjikt under en tett og langvarig bjørkeskjerm vil utvikle en flersjiktet struktur. Resultatene indikerer at lette tynninger som holder bjørkeskjermen moderat tett (sammenlignet med maksimal tetthet for bjørk; Figur 37) vil kunne fremme strukturutviklingen. Gransjiktet vil videre fremmes av tynninger av skjermen til horisontalt varierende tetthet.



Figur 37. Utvikling av bjørkeskjermens tetthet for de to bestandene ved ulike aldre. Prikker er observasjoner av bjørkeskjermens tetthet (G) ved gitte aldre. Stiplede linjer er antatt tetthetsutvikling, gitt kjent behandlingshistorikk (tynningsintensitet gjettet ut fra registreringstid og antatte fristillingseffekter). Sort linje illustrerer maksimal tetthet for bjørk (Hynynen et al., 2010).

Optimal tetthet i omstillingsfasen

Litteraturen viser at flersjiktningen vil gå tapt dersom bjørkeskjermen er for glissen (Bergqvist, 1999; Tabell 1 & 2 i Bergqvist et al., 2000; felt 9 i Brunner, 2016; Johansson, 2014; Tham, 1988), eller holdes for tett over for lang tid (BARLØV-serien; Brunner, 2024b; Braathe, 1988). Mellom disse ytterpunktene finnes det et gunstig intervall for skjermtetthet, der gransjiktet utvikler en flersjiktet struktur. I begge bestand har skjermtettheten ligget innenfor dette intervallet.

Den svært høye tettheten av små grantrær på Bølstad, sammen med de mange observerte døde trærne, tyder på at bjørkeskjermen kanskje var i glisneste laget etter tynningen i 2010 (se antatt tynningslinje i Figur 37). En enda sterkere tynning ville kunne gitt undersjiktet altfor gode vekstvilkår, slik at de kom opp som ett sjikt. Da ville konkurransen blitt for stor for små trær og flersjiktningen gått tapt. Siden Bølstad de siste 15 årene har hatt et undersjikt med svært gode vekstforhold, representerer Bølstad sannsynligvis den nedre grensen for gunstig bjørkeskjermtetthet i omstillingsfasen.

Holstad har på den annen side hatt en bjørkeskjerm som lenge har vært ved tettheter nært det maksimale (Figur 37). Dette har ført til en saktere høyde- og diameterdifferensieringsprosess i gransjiktet, og at flere små trær har gått tapt.

Sannsynligvis vil en mellomting mellom disse to eksemplene være optimalt for etablering av flersjiktet gran. Bjørkeskjermen bør dermed holdes et sted mellom moderat og høy tetthet, sammenlignet med maksimal tetthet for bjørk (Hynynen et al., 2010). Linjene i Figur 37 illustrerer at bjørkeskjermer som fra ungskogsstadiet holdes ved gjennomsnittlig 80% (65% – 95%) maksimal tetthet for bjørk, vil utvikle gransjikt med en fint fallende diameterfordeling.

Resultatene viser at flersjiktning i gran kan utvikles også dersom skjermen holdes nært maksimal tetthet i lang tid (Holstad). Der er det tynnet bare én gang tidlig i omstillingen, og struktur differensieringen har grunnet langvarig høy skjerm tetthet gått saktere enn på Bølstad. I bestandet med to tynninger (Bølstad), har differensieringen gått raskere. Dette indikerer at flere inngrep og lavere skjerm tetthet over lang tid vil føre til raskere struktur differensiering. Flere, lette tynninger i skjermen, hvor G holdes mellom 70-90% av maksimal tetthet for bjørk, vil dermed være gunstig.

4.1.2 Mål 1b)

«Finne en sammenheng mellom dagens konkurransesituasjon og de siste års høydetilvekst på gran, og dermed vise at flersjiktningen er skapt og fortsatt skapes av variert konkurranse fra bjørkeskjermen»

I begge bestand blir høydetilveksten på gran fremdeles kraftig hemmet med økende konkurranse (KI). En KI -økning fra 0,7 til 1 gir en 50-60% reduksjon av den potensielle høydetilveksten (Figur 7, Figur 8 og Figur 23). Siden trær med høy KI er lave, og trær med lav KI er høye (Figur 5), vokser de lave trærne saktere og de høye forttere.

At grantrærnes høydetilvekst fortsatt styres av konkurranse, viser at en høydedifferensieringsprosess fortsatt pågår: Små trær nært mange store konkurrenter (av begge treslag) vokser sakte, og store, mer frittstående trær vokser raskt. At høydetilveksten styres av konkurranse er i tråd med forventningen om at de største grantrærne er store fordi de lenge har stått i åpninger i bjørkeskjermen, der konkurransen er lavere enn under tette skjerm partier. Dermed støttes hypotesen om at større tetthetsvariasjon i bjørkeskjermen fører til større strukturvariasjon i gransjiktet.

Datagrunnlaget omfatter trær med svært høye KI -nivåer ($KI > 0,7$), hvor sterk konkurransebasert høydetilvekstreduksjon kun er påvist for nivåer innen dette spekteret (Figur 7, Figur 8 og Figur 23). Den kraftigste høydetilvekstreduksjonen krever svært høy konkurranse ($KI \approx 1$). For verdier KI -verdier lavere enn 0,7 avtar imidlertid den konkurransebaserte effekten på høydetilveksten. Dette viser at høydedifferensieringsprosessen er helt avhengig av stedvis svært sterk konkurranse, så høydeveksten til de minste grantrærne bremses i størst mulig grad.

I de undersøkte bestandene opptrer i *KI*-variasjonen innenfor et spekter med høye *KI*-verdier. Dette tyder på at en moderat til stedvis svært tett bjørkeskjerm vil være nødvendig, når målet er å utvikle størst mulig høydevariasjon i gransjiktet.

Diametertilveksten er mer sensitiv for høye *KI*-nivåer enn høydetilveksten (Brunner, 2016). At trær med relativt høy konkurranse vokser i høyde (H), men lite diameter (D), kan gi spinkle trær med høyt H/D-forhold. Fristilling av slike vil være problematisk, grunnet lavere stabilitet og motstandsdyktighet mot vindfall og snøbrekk (Brunner et al., 2023; Hantula et al., 2025). Et skjevt forhold mellom høyde- og diametertilvekst vil imidlertid gjøre at trær som vokser i høyde forblir i lave diameterklasser. Data fra denne undersøkelsen vitner imidlertid ikke om at dette har skjedd, siden høyde- og diameterfordelingene har store likhetstrekk (Figur 12; Figur 15).

Resultatene støtter hypotesen om at variert og sterk konkurranse fra bjørkeskjermen styrer gransjiktets høydetilvekst. Bjørkeskjermens tetthet er dermed årsak til den observerte strukturvariasjonen på gran. I tillegg indikerer resultatene at grantrær som etter hvert vokser inn i oversjiktet vil kunne erstatte bjørkeskjermens funksjon for opprettholdelse og utvikling av flersjiktningen. Dette er vist ved at det ikke ble påvist noen effekt av treslag i konkurransebidraget (Figur 22).

4.1.3 Mål 1c)

«Utlede anbefalinger for skogbehandling med sikte på etablering av flersjiktet gran»

Resultatene viser at et undersjikt av gran som over lang tid blir påvirket av en tett bjørkeskjerm vil utvikle en flersjiktet struktur. Varierende tetthet i skjermen vil bidra ytterligere til økt struktur differensiering på grana. Systematisk bruk av bjørkeskjerm vil dermed kunne utgjøre en god metode for omstilling til grandominert blandingsskog.

Det er grunn til å tro at skogbehandling tilsvarende den i oppgavens undersøkte bestand vil være gunstig for å fremme den ønskede utviklingen i gransjiktet. Flere lette tynninger på bjørk, der tettheten fra et tidlig stadium holdes på mellom 70-90% av maksimal tetthet, vil sannsynligvis være optimalt.

Siden dette kun er undersøkt for to bestand, er det likevel stor usikkerhet knyttet til hvilke skjermtettheter som vil være optimale ved hvilke tidspunkter. Andres funn av flersjiktet gran under bjørkeskjerm (Brunner, 2024b; Braathe, 1988), der hensikten, akkurat som i denne oppgavens bestand, aldri var å utvikle flersjiktet gran, viser imidlertid at resultatene ikke er en ekstrem situasjon som krever veldig spesifikk skogbehandling. Derfor er det grunn til å tro at man ved å følge et sett med overordnede retningslinjer for skogbehandling, fundamentert i denne oppgavens resultater, vil kunne oppnå lignende resultater.

Anbefalt skjøtsel for omstilling med gran under bjørk

Tosjiktete bestand med gran under en skjerm av bjørk er vanlige innslag i det nordiske skoglandskapet (Drössler, 2010). Funnene i denne oppgaven gir belegg for antagelsen om at mange av disse, uten mål om det, har utviklet flersjiktet gran. Dette var også tilfellet i denne oppgavens undersøkte bestand.

Egnethet

Før en omstilling til blodningsskog vurderes, må skogarealet oppfylle en rekke viktige kriterier. Skogeier må være villig til å risikere tapt produksjon og eventuelt feilslått omstilling (Brunner et al., 2023). Omstilling og fremtidig blodning vil være skjøtselsintensivt, og skogeier bør derfor ha interesse og kapasitet til å følge opp utviklingen. I tillegg må marka egne seg for gran på lang sikt, og egne seg for hyppige inngrep i form av f.eks. nærhet til vei (Brunner et al., 2023).

Implementering av metoden

Dersom en skogeier ønsker økt bruk av blodning på sin eiendom, vil det være naturlig å først vurdere omstilling fra eksisterende bestand med gran under tette oppslag av bjørk. Dersom gransjiktet viser seg å ha en flersjiktet struktur (se avsnitt 4.2.2), vil et godt utgangspunkt for omstillingen være lagt. Aktiv bruk av denne utgangssituasjonen vil kunne innledes på ulike utviklingsstadier, men senest innen flersjiktningen går tapt som følge av for langvarig høy tetthet, der foryngelsen opphører og mortalitet på de minste trærne inntreffer.

1 Foryngelsesstadiet

Dersom metoden skal implementeres fra et utgangspunkt med snau skogsmark, må det sørges for tilstrekkelig foryngelse av både gran og bjørk. I de undersøkte bestand er det rikelig naturlig foryngelse av begge treslag, hvor både gran og bjørk har frødd seg fra omkringliggende bestand. Dersom tilfredsstillende naturlig foryngelse ikke inntreffer, kan det enten suppleringsplantes med gran og eventuelt sås til med bjørk.

2 Ungskogpleiestadiet (overhøyde bjørk < 5 - 8 m)

I plantede granforyngelser vil det svært ofte etablere seg et naturlig forynget oppslag av bjørk (Frivold, 1986; Hynynen et al., 2010). Dersom en beslutning om omstilling treffes før lauvrydding, vil det i første omgang være nok å hoppe over denne. I denne oppgavens undersøkte bestand ble det gjennomført en sen ungsogpleie / tidlig tynning ved ca. 11 m overhøyde på bjørk (estimert fra Strand, 1967). Hvorvidt dette var optimalt, og bør gjøres på samme måte i fremtidige bestand, er usikkert. Det er imidlertid sikkert at dersom det åpnes opp for mye for tidlig, kan grana vokse opp til ett sjikt (Bergqvist et al., 2000; Brunner, 2016; Johansson, 2014). Det første inngrepet bør kanskje derfor utsettes til tidlig i tynningsfasen, som i denne undersøkelsen har ført til fin høyde- og diameterdifferensiering under bjørk frem til overhøyde ca. 15 m (Solem, 2010).

3 Tynningsstadiet (overhøyde bjørk < 10 - 18 m)

Systematisk bruk av en bjørkeskjerm til omstilling av skog i tynningsstadiet, krever at bjørkeoppslaget er bevart, og at grana finnes i et tydelig undersjikt under en bjørkeskjerm. Begge de undersøkte bestandene ble utsatt for tidlig tynning (overhøyde $\approx$ 11 m). Tettheten ble sannsynligvis regulert til moderate nivåer (se anslag i Figur 37). Gransjiktets fine flersjiktning ved overhøyde 15 m (Figur 11; Figur 14) indikerer at strukturdifferensieringen ikke hemmes av en slik tidlig tynning. Antakelig begunstiges utviklingen, men her er datagrunnlaget for begrenset til å kunne konkludere.

Datagrunnlaget indikerer imidlertid en tydelig effekt av tynning til varierende (men ikke for lav) tetthet i bjørkeskjermen ved rundt 15 m overhøyde bjørk. På Bølstad har dette gjennom de siste 15 årene ført til en langt større høyde-, diameter- og tetthetsvariasjon i gransjiktet enn på Holstad, der en slik tynning ikke ble utført. Dette indikerer at flere tynninger vil kunne fremme strukturdifferensiering i gransjiktet, dersom det ikke tynnes for mye (Figur 37). For best mulig resultat bør skjermen også tynnes til varierende tetthet.

I tynningsfasen kan transektmetoden (se avsnitt 4.2.2) med fordel brukes for å påvise en eventuell påbegynt flersjiktning i på gran. Sammen med relaskopmåling på oversjiktet, der skjermtettheten sammenlignes med Figur 37, kan en slik måling indikere behovet for å styre gransjiktets utvikling med tetthetsregulering av bjørkeskjermen.

4 Senere stadier (overhøyde bjørk > 20 m)

Dagens situasjon i de to bestandene representerer inngangen til det siste stadiet i en omstilling til blodningsskog. Dersom det er lenge siden tynning, og bestandstettheten derfor er høy, kan det være fare for at strukturvariasjonen vil gå tapt. For å forhindre at bestandet lukker seg, og at selvtynning og foryngelsesstopp inntreffer, må det etter hvert gjennomføres en styrt avvikling av bjørkeskjermen. Utfordringen blir å gjøre dette på en måte som gir best mulig vekst på de største grantrærne, samtidig som et stort flertall holdes i de mindre diameterklassene. Dette krever ikke bare at veksten på små trær hemmes, men også at foryngelsen kommer i gang (Brunner et al., 2023, s. 14).

Hvordan en styrt avvikling av bjørkeskjermen skal utføres i omstillingens siste fase blir ikke undersøkt i detalj i denne masteroppgaven, men se avsnitt 4.2.

4.2 Påvise strukturvariasjon på gran med transekt

4.2.1 Mål 2

«Undersøke om stikkprøver i form av transekt på 60 ± 20 trær kan gi en god representasjon av gransjiktets diameterfordeling, slik at man lett kan påvise flersjiktet struktur i lignende bestand uten arbeidskrevende målinger»

I denne oppgaven benyttes transekter som stikkprøvemetode. Hensikten med stikkprøvene er kjapt innhente et grunnlag for å vurdere strukturen på gran under en bjørkeskjerm. En transektmåling krever kun et startpunkt og en retning for å gjennomføres, særlig ved bruk av et gitt treantall (N) som den romlig avgrensende enheten. Slik unngås de mer arbeids- og utstyrskrevene stikkprøvemethodene, der prøveflater med en viss form eller størrelse krever nøyaktig oppmåling.

En sterk fordel ved bruk av N som romlig avgrensning av transektets lengde, er at man slipper lengdeoppmåling. At lengden ikke er definert i meter, gjør imidlertid metoden følsom for strukturvariasjon: I tette bestand vil transektet dekke et mindre areal, og i glisne bestand vil det dekke et større areal.

Her undersøkes stikkprøvenes representativitet for 1,6 dekar store prøveflater. Transektenes representativitet for hele Holstad- og Bølstad-bestandene er imidlertid ikke kjent. Prøveflatene på 1,6 dekar ble bevisst lagt til en del av bestandet som tilsynelatende hadde den fineste flersjiktningen. Det medfører sannsynligvis at hvert transekt i mindre grad gir en god representasjon av hele bestandet enn av prøveflata som er undersøkt. De oppgitte representativitetene for ulike treantall, kriterier og bestand må derfor ses i lys av dette. I praksis vil dette likevel kunne løses ved å gå flere transekter på ulike steder i bestandet.

Transektenes representativitet for strukturvariasjonen

Bruk av transekter for å påvise flersjiktning i gran under en bjørkeskjerm krever at metodens pålitelighet er kjent. Påliteligheten ble undersøkt ved å simulere tusenvis av transekter med N trær, som forskyver seg systematisk gjennom prøveflata (Figur 10). Transektenes trær ble sortert inn i fire diameterklasser (Tabell 5), og hvert transekt sin diameterfordeling ble sammenlignet med bestandets (vist i Figur 9). Samsvaret ble vurdert etter definerte kriterier ($K1$ - $K3$; avsnitt 2.4.2): Forenklet krever $K1$ og $K2$ at transektene har en fallende diameterfordeling, mens $K3$ i tillegg krever at denne likner nok på diameterfordelingen til hele bestandet.

Figur 28 og Figur 29 viser hvordan transektene for økende treantall (N) samler seg rundt bestandets gjennomsnittlige diameterfordeling. Dette illustrerer tydelig hvordan man med høyere N vil være mer sikker på at transektet gir en troverdig representasjon av bestandsstrukturen.

Transekter med flere trær har følgelig også større sannsynlighet for å oppfylle flere kriterier (Tabell 10). Et påfallende unntak fra regelen er del-kriteriet om fallende diameterfordeling for de tre minste klassene ($p1 > p2 > p3$). I begge bestand og for alle N oppfyller minst 95% av transektene dette kriteriet. Dersom man går et transekt som oppfyller $p1 > p2 > p3$ vil man dermed være svært sikker på at bestandet også har denne fordelingen.

Det er imidlertid også et mål å påvise de store trærne i diameterfordelingen. De store trærne er viktig for å beskrive bestandets størrelsesvariasjon, som i løpet av omstillingen skal bli størst mulig. Derfor krever selv det mildeste kriteriet ($K1$) også at den største diameterklassen ($D4$) er representert med minst ett tre ($p4 > 0$). Siden det er relativt få store trær i en fallende diameterfordeling, er sannsynligheten relativt lav for å finne minst ett av disse med en stikkprøve. Med økende N øker imidlertid denne sannsynligheten, som forklarer hvorfor langt flere transekter oppfyller $K1$ når N øker. Tabell 10 viser at kun 8% av Holstads og 14% av Bølstads transekter med $N = 60$ ikke lykkes i å finne de store trærne. Når et transekt med $N = 60$ går, kan det derfor forventes minst 85% sannsynlighet for å finne en fallende fordeling og minst ett stort tre, dersom gransjiktet i virkeligheten har en flersjiktet struktur. Med $N = 70$ kan 90% sannsynlighet forventes, og med $N = 80$ kan 94% forventes.

Transekter med oppfylt $K1$ påviser dermed med stor sikkerhet at bestandet faktisk har en fallende fordeling i de tre første klasser og tilstedeværelse av store trær. Siden $p1 > p2 > p3$ ikke krever $p3 > 0$, kan dette imidlertid også bety en tosjiktet struktur, hvor det ikke finnes trær i mellomsjiktet. $K3$ krever derfor at transektet også finner mellomsjiktets trær ($D3$). På Holstad fanger alle transektene opp minst ett $D3$ -tre, og dette ekstrakriteriet utgjør derfor ingen forskjell (Tabell 10). På grunn av Bølstads langt større avvik i diameterklassene (Figur 30) kombinert med lavere $p3$ (Figur 9), er det der en del transekter som både mangler trær i $D4$ og $D3$. Disse transektene gir et svært feilaktig bilde av Bølstads diameterfordeling, og fremstiller det som at det bare finnes trær i $D1$ og $D2$. For $N = 60$ gjelder imidlertid bare for rundt 3% av transektene ($K2\% - K1\%$ i Tabell 10). Mangel på både $D3$ og $D4$ -trær samtidig er dermed svært lite sannsynlig, dersom gransjiktet som måles i virkeligheten har en flersjiktet struktur.

$K3$ -kriteriet er et uttrykk for avviket til de allerede akseptable transektene som allerede oppfyller $K1$ og $K2$. Avviket (og dermed $K3$) viser hvorvidt transektet gjenspeiler formen til bestandets diameterfordelingskurve. For å oppfylle $K3$, kreves et gjennomsnittlig absolutt avvik i diameterklassene lavere enn 5%. Oppfyllelsen øker sterkt med N i begge bestand, som tydelig kan ses som et økende antall røde linjer i Figur 28 og Figur 29. På Bølstad er det imidlertid langt færre transekter som innfrir dette kravet enn på Holstad. Det betyr at selv transekter med en fallende fordeling og trær i alle diameterklasser har

diameterfordelinger som ligger langt (over 5% av N) unna snittlinjen (Figur 29). For $N = 60$ gjelder dette nesten 50% av transektene (Tabell 10).

At $K2$ -oppfyllelsen er høy ($> 82\%$) for alle $N > 60$ viser at metoden vil fungere godt for å påvise om et bestand har en fallende diameterfordeling og relativt mange trær i (mellom)store diameterklasser. At langt færre transekter oppfyller $K3$, viser at metoden ikke nødvendigvis påviser hvor fallende denne fordelingen er.

I praksis vil det ofte være nok å vurdere transektets oppfyllelse av $K2$ -kravene for å få en pekepinn på gransjiktets strukturutvikling under bjørkeskjermen. Da vil det sannsynligvis være nok å gå et 60-trærs transekt. Dersom beslutningstakeren likevel ønsker å påvise diameterfordelingen med et høyt presisjonsnivå, viser analysen at transektene bør inneholde minst 80 trær. Et godt alternativ til flere trær er å gå flere transekter i bestandet. Slik sørges det for at mer av den totale strukturvariasjonen fanges opp.

At avviket i diameterfordeling er langt høyere og mer variert på Bølstad enn på Holstad (Figur 30; Tabell 11), påviser den langt større strukturvariasjonen per gruppe på N trær. Dette forklares nærmere ved mønstrene i Figur 34, som viser hvordan avviket varierer ettersom det beveger seg gjennom områder med over- eller underrepresentasjon av enkelte diameterklasser.

Bestandenenes forskjell i avvik kan også forklares av transektene stikkprøveareal. Alle Holstad-transektene er lengre enn alle Bølstad-transektene (Figur 35), og dekker i snitt en dobbelt så stor andel av prøveflata. På Holstad er også variasjonen i transektlengde og -areal klart størst (Figur 35). Avviket varierer derimot langt mindre mellom transektenes prøveflater på Holstad enn på Bølstad (Figur 30). På Bølstad er variasjonen i transektareal mindre, men avvikene langt større (Figur 35; Figur 30). Dette indikerer at stor variasjon i bestandstetthet ikke nødvendigvis er årsaken bak store avvik.

På Bølstad er det imidlertid dobbelt så mange trær per hektar som på Holstad (Tabell 7). Den høye tretettheten kan i seg selv være noe av årsaken til de høye avvikene. Analysen av transektlengde mot kriterieoppfyllelse, indikerer imidlertid noe annet (Figur 36). Av figuren går det fram at avviket for de lengste transektene ($N = 60$), som dekker det største arealet, er mindre enn for de gjennomsnittlig lange transektene med mindre areal. Dette vises på sitt mest ekstreme ved 100% kriterieoppfyllelse av $K2$ for de største transektlengder (og dermed -areal), og korresponderende $\approx 30\%$ oppfyllelse av $K3$. Dette indikerer at avviket vil være lavest der bestandstettheten er nærmest bestandets gjennomsnitt, og ikke der transektarealet er størst.

Bølstads høyere avvik per gruppe på N trær forklares dermed lite trolig av den høyere bestandstettheten. Mer trolig er det den større horisontale strukturvariasjonen i

gransjiktet som skaper transektenes høye og langt mer varierte avvik i diameterfordeling (Figur 30).

En annen mulig årsak er diameterfordelingens bratthet. Bølstads diameterfordeling er langt brattere ($q = 2,1$) enn Holstads ($q = 1,7$) (Figur 13). I transektanalysen er det imidlertid brukt en annen inndeling, med kun fire diameterklasser (Figur 9). Siden Bølstad har en langt større andel av trærne i minste diameterklasse (Tabell 6), fører relative avvik i denne klassen til et større absoluttavvik enn for tilsvarende klasse på Holstad. På den annen side er andelen i de andre Bølstad-klassene lavere enn på Holstad, som vil gi mindre absoluttavvik for likt relative avvik i klassen. Høyt absoluttavvik i én klasse vil dermed i snitt kompenseres av lave i de andre, uavhengig av diameterfordelingen. Dermed er det lite sannsynlig at q -verdi har noen betydning for transektmetodens gyldighet.

Bølstads lave kriterieoppfyllelse og sterkt avvikende diameterfordeling mellom grupper på N trær må derfor først og fremst skyldes en større romlig strukturvariasjon i gransjiktet. Dette bekrefter samtlige av de foreløpige indikasjonene på at det i Bølstads gransjikt er høyere strukturvariasjon enn på Holstad. Lavere oppfyllelse av $K1$, $K2$ og $K3$ skyldes dermed først og fremst at et bestand har større horisontal strukturvariasjon.

4.2.2 Transektmetoden i praksis

Når transektmetoden skal brukes for å beskrive strukturen i et gransjikt under en bjørkeskjerm, kan et ønsket treantall (N) settes med forankring i denne oppgavens resultater.

Resultatene for $N = 60$ viser at transekter i gransjikt med fin flersjiktning og stor strukturvariasjon (Bølstad; Tabell 10) kan forventes å påvise den fallende diameterfordelingen ($p_1 > p_2 > p_3$) med ca 99% sannsynlighet. Tilsvarende sannsynlighet for å påvise minst ett av de 5% største trærne, og dermed hele diametererspredningen, er 86%. Å påvise begge disse karaktertrekkene samtidig ($K1$) er tilsvarende sannsynlig (86%). Dersom man i tillegg krever påvisning av trær i alle diameterklasser ($K2$) er sannsynligheten 82,5%. Med en forventning om at transektets diameterfordeling også i gjennomsnitt skal ligge nærmere bestandets fordeling enn 5% av N ($K3$), reduserer sannsynligheten til 53%.

Med mindre romlig strukturvariasjon i bestandet og/eller høyere N i transektet øker sannsynligheten for at det gjenspeiler bestandets sanne diameterfordeling. At 60-trærstransekter uansett strukturvariasjon med stor sannsynlighet ($> 82\%$) fanger opp og påviser de kvalitative trekkene i en fallende diameterfordeling indikerer at 60 trær er et godt utgangspunkt.

Dersom beslutningstaker har lavere feiltoleranse, og ønsker større sikkerhet i påvisningen av K2-trekkene og/eller krever at transektenes diameterfordelingskurve skal ligge tett inntil bestandets, kan N økes til et nivå som i henhold til Tabell 10 gir ønsket presisjon. For å sikre representasjon av hele bestandets strukturvariasjon bør det også gås flere transekter i ulike deler av bestandet.

Anbefalt transekttakst

Ved bruk av transektmetoden i praksis, kan følgende anvisning brukes. Dersom beslutningstaker ønsker større presisjon (se avsnitt over), kan 60 erstattes med et høyere treantall (N).

- 1) Finn det eller de største grantrær i bestandet.
- 2) Avgrens 4 jevnbrede dbh-klasser (D1-D4) basert på (omtrentlig) største dbh.
- 3) Velg et tilfeldig startpunkt og retning, og gå 60 trær.
 - a. Registrer dbh på alle trær med innenfor 2,5 m på hver side av linja.
 - b. Dersom det etter 60 trær mangler trær i noen klasser, gå opptil 20 trær til.
- 4) Gå flere transekter jevnt fordelt i bestandet.
- 5) Måle bjørkeskjermens tetthet (G) med relaskop flere steder i bestandet.

Dersom transektet oppfyller K1/K2

Hvis et transekt oppfyller de kvalitative kriteriene om fallende diameterfordeling og trær i alle klasser ($K2$), vil det være temmelig stor sannsynlighet for at bestandet også har denne strukturen. Sannsynligheten øker dersom alle eller de fleste av transektene i bestandet viser det samme resultatet.

Dersom transektet ikke oppfyller K1/K2

Dersom transektet ikke finner noen trær i D4 ($p_4 = 0$), vil sannsynligheten være lav for at bestandet har over 5% av trærne i denne klassen (som i begge denne oppgavens bestand). Dette gjelder særlig hvis du har utvidet transektet med 20 trær, hvor sannsynligheten for å finne minst ett D4-tre er svært stor ($>93\%$) dersom D4 inneholder over 5% av bestandets trær (Tabell 10).

Dersom transektet ikke påviser $p_1 > p_2 > p_3$ vil sannsynligheten være svært lav ($\approx 1\%$) for at bestandet faktisk har denne strukturen i virkeligheten.

Dersom diameterfordelingen ikke oppfyller ett eller flere av kriteriene, men viser en fordeling som likevel ligner, vil det indikere behov for behandling som styrer utviklingen i riktig retning. Dette gjelder særlig dersom bjørkeskjermens tetthet ligger ved tettheter nært sitt maksimale.

Disse kvalitative kriteriene gjør det mulig å påvise om gransjiktet har en flersjiktet struktur. I alt viser resultatene transekter med 60 trær vil kunne påvise en flersjiktet struktur på gran en tilfredsstillende representativitet. Man bør imidlertid gå lengre

og/eller flere transekter 1) jo sikrere man vil være, 2) jo større horisontal variasjon og 3) jo større bestandet er.

4.3 Omstillingens siste fase

Dersom et gransjikt under en bjørkeskjerm viser seg å ha en velutviklet flersjiktning, må denne opprettholdes og videreutvikles fram til gransjiktet har en høy bestandstetthet (eks. $G > 25 \text{ m}^2/\text{ha}$) med en flersjiktet struktur og mange trær over måldiameter (Brunner et al., 2023). Først da kan omstillingen regnes som fullført.

Begge bestand har i 2024 veldig høy total bestandstetthet ($G = 34,0 \text{ m}^2/\text{ha}$ på Holstad og $G = 37,5 \text{ m}^2/\text{ha}$ på Bølstad). Figur 37 indikerer at bjørkeskjermtettheten i den undersøkte perioden bør ligge på rundt 80% av maksimal tetthet for bjørk. Etter hvert som noen grantrær vokser inn i oversjiktet må imidlertid disse også regnes inn i skjermtettheten som sammenlignes med maksimal tetthet. Medregnet gran er oversjiktets tetthet svært høy. Dette støttes av de svært høye *KI*-verdiene for majoriteten av trærne (Figur 24). Dersom skjermen holdes urørt mye lenger, vil flersjiktningen i begge bestand kunne gå tapt som følge av dødelighet på små trær.

Hvordan bjørkeskjermen optimalt bør avvikles i denne siste fasen er ikke undersøkt. Hvis bjørkeskjermen uansett må reguleres, vil et naturlig første inngrep være etablering av et fast stikkveinett. Denne må opprettholdes ved alle framtidige inngrep i bledningsskogen. Dette inngrepet, hvor ca. 20% av bestandsarealet tas ut (Brunner, 2024a), vil gi ny lystilgang til foryngelse og småtrær, og kunne sørge for at flersjiktningen opprettholdes og videreutvikles uten at det åpnes opp for mye.

Når det etter en periode igjen blir behov for å regulere tettheten til ca. 80% av maksimal grunnflate, er kanskje gransjiktet så velutviklet og tett at hele den resterende bjørkeskjermen kan avvirket. Etter dette vil det kanskje ikke være lenge før mange trær vokser over måldiameter. I så fall vil det neste inngrepet være en måldiameterhogst, og gransjiktet har blitt en bledningsskog.

4.3.1 Konkluderende bemerkninger

«Er tosjiktede bestand, der gran i lang tid utvikler seg under påvirkning fra en tett bjørkeskjerm, en god metode for omstilling til grandominert bledningsskog?»

Denne masteroppgaven viser at en langvarig og moderat til svært tett bjørkeskjerm fører til utvikling av flersjiktet struktur på undersjiktet av gran. Kjent behandlingshistorikk og data fra flere tidspunkter indikerer at bjørkeskjermen bør holdes til tettheter på rundt 70-90% av det maksimale for bjørk (Figur 37). Horisontal variasjon i skjermtettheten vil bidra ytterligere til den ønskede strukturdifferensieringen. Resultatene beskriver i detalj de første 30 årene av omstillingsprosessen, der en bjørkeskjerm systematisk brukes for å styre gransjiktets utvikling et godt stykke på vei mot en ferdig utviklet bledningsskog.

5 Litteratur

- Ahtikoski, A., Gong, P., Rørstad, P. K., Viitala, E.-J., & Repola, J. (2025). Financial Performance. I P. Rautio, J. Routa, S. Huuskonen, E. Holmström, J. Cedergren, & C. Kuehne (Red.), *Continuous Cover Forestry in Boreal Nordic Countries* (Bd. 45, s. 135–148). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70484-0_8
- Andersson, S. (2015). *Tilvekst på bestands- og enkelttrenivå ti år etter selektiv hogst etter KONTUS- prinsippet* [Master thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås]. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/295033>
- Bergqvist, G. (1999). Wood volume yield and stand structure in Norway spruce understorey depending on birch shelterwood density. *Forest Ecology and Management*, 122(3), 221–229.
- Bergqvist, G., Bergsten, U., & Ahlqvist, B. (2000). Fibre properties of Norway spruce of different growth rates grown under birch shelterwoods of two densities. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(3), 487–494.
- Brunner, A. (2016). *Growth of Norway spruce under a shelter of birch* [Utkast]. <https://mc06.manuscriptcentral.com/cjfr-pubs>
- Brunner, A. (2024a). Variable-density thinning designs for harvester-based operations in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 39(5), 248–256. <https://doi.org/10.1080/02827581.2024.2388054>
- Brunner, A. (2024b, oktober 18). *Utferd SKOG303: Bjørk over gran*.
- Brunner, A., Hanssen, K. H., & Granhus, A. (2023). *Selektive hogster – en kunnskapssammenstilling* (F. for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA), Overs.; No. 88). Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). https://static02.nmbu.no/mina/publikasjoner/mina_fagrapport/mif.php
- Brunner, A., Valkonen, S., Goude, M., Hanssen, K. H., & Erefur, C. (2025). Definitions and Terminology: What Is Continuous Cover Forestry in Fennoscandia? I P. Rautio, J. Routa, S. Huuskonen, E. Holmström, J. Cedergren, & C. Kuehne (Red.), *Continuous Cover Forestry in Boreal Nordic Countries* (Bd. 45, s. 11–43). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70484-0_2
- Brække, F. H., & Granhus, A. (2004). Ungskogpleie i naturlig forynget gran på middels og høy bonitet. I 22. Skogforsk. <https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/handle/11250/2558460>
- Braathe, P. (1988). *Utviklingen av gjenvekst med ulike blandingsforhold mellom bartrær og løvtrær-II* (No. 8/88; Rapport fra Norsk institutt for skogforskning). Norsk institutt for skogforskning (NISK). <https://hdl.handle.net/11250/2686505>

- Canham, C. D., LePage, P. T., & Coates, K. D. (2004). A neighborhood analysis of canopy tree competition: Effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(4), 778–787.
- Canham, C. D., Papaik, M. J., Uriarte, M., McWilliams, W. H., Jenkins, J. C., & Twery, M. J. (2006). Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in New England forests. *Ecological applications*, 16(2), 540–554.
- Caron, M.-N., Kneeshaw, D. D., Grandpré, L. D., Kauhanen, H., & Kuuluvainen, T. (2009). Canopy Gap Characteristics and Disturbance Dynamics in Old-Growth *Picea abies* Stands in Northern Fennoscandia: Is the Forest in Quasi-Equilibrium? *Annales Botanici Fennici*, 46(4), 251–262. <https://doi.org/10.5735/085.046.0402>
- Drössler, L. (2010). Tree species mixtures—a common feature of southern Swedish forests. *Forestry*, 83(4), 433–441.
- Drössler, L., Nilsson, U., & Lundqvist, L. (2013). Simulated transformation of even-aged Norway spruce stands to multi-layered forests: An experiment to explore the potential of tree size differentiation. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 87(2), 239–248. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt037>
- Fahlvik, N., Trubins, R., Holmström, E., Sonesson, J., Lundmark, T., & Nilsson, U. (2024). Abandoning conversion from even-aged to uneven-aged forest stands – the effects on production and economic returns. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 39(2), 77–88. <https://doi.org/10.1080/02827581.2024.2303401>
- Frivold, L. H. (1986). *Frøforyngelse av bjørk og gran på hogstflater i lavlandet østafjells, i relasjon til vegetasjonstype og fuktighet*. Norsk institutt for skogforskning.
- Frivold, L. H., & Frank, J. (2002). Growth of mixed birch-coniferous stands in relation to pure coniferous stands at similar sites in south-eastern Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(2), 139–149.
- Gizachew, B., Brunner, A., & Øyen, B.-H. (2012). Stand responses to initial spacing in Norway spruce plantations in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(7), 637–648.
- Granhus, A. (2021). *Miljøhensyn ved hogst og skogkultur*. Bærekraftig skogbruk i Norge; NIBIO. <https://www.skogbruk.nibio.no/miljohensyn-ved-hogst-og-skogkultur>
- Granhus, A., Antón Fernández, C., de Wit, H., Hanssen, K., Jacobsen, R., Jansson, U., Korpunen, H., Mohr, C., Nordén, J., Rolstad, J., Sevillano, I., Solberg, S., Storaunet, K. O., & Vergarechea, M. (2024). *Effekter på karbondynamikk, miljø og næring ved økt bruk av lukkede hogstformer* (No. 10(48); NIBIO Rapport, s. 1–98). NIBIO. <https://hdl.handle.net/11250/3125340>
- Hanewinkel, M., & Pretzsch, H. (2000). Modelling the conversion from even-aged to uneven-aged stands of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) with a distance-dependent growth simulator. *Forest Ecology and Management*, 134(1–3), 55–70.

- Hantula, J., Elfstrand, M., Hekkala, A.-M., Hietala, A. M., Honkaniemi, J., Klapwijk, M., Koivula, M., Matala, J., Rönnerberg, J., Siitonen, J., & Widemo, F. (2025). Forest Damage. I P. Rautio, J. Routa, S. Huuskonen, E. Holmström, J. Cedergren, & C. Kuehne (Red.), *Continuous Cover Forestry in Boreal Nordic Countries* (Bd. 45, s. 221–241). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70484-0_12
- Houtmeyers, S., & Brunner, A. (2020). Thinning responses of individual trees in mixed stands of Norway spruce and Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 35(7), 351–366. <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1810307>
- Hynynen, J., Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Brunner, A., Hein, S., & Velling, P. (2010). Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 83(1), 103–119. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp035>
- Johansson, T. (2014). Growth and yield in shelter stands of silver birch and Norway spruce. *Rapport (Institutionen För Energi Och Teknik, SLU)*, 068. <https://res.slu.se/id/publ/52392>
- Leak, W. B. (1965). The J-shaped probability distribution. *Forest Science*, 11(4), 405–409.
- Lundqvist, L. (2017). Tamm review: Selection system reduces long-term volume growth in Fennoscandic uneven-aged Norway spruce forests. *Forest ecology and management*, 391, 362–375.
- Lundqvist, L., Cedergren, J., Eliasson, L., Redaktör, S., Johansson, L., & i Söderköping, M. (2009). *Skogsskötselserien: Blädningsbruk*. Skogsstyrelsen.
- Mason, W. L., Diaci, J., Carvalho, J., & Valkonen, S. (2021). Continuous cover forestry in Europe: Usage and the knowledge gaps and challenges to wider adoption. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 95(1), 1–12. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab038>
- Moan, M. Å. (2021). *Effects of stand structure and stand density on volume growth and ingrowth in selectively cut stands in Norway*. Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Mård, H. (1996). The influence of a birch shelter (*Betula* spp) on the growth of young stands of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 11(1–4), 343–350. <https://doi.org/10.1080/02827589609382945>
- Norkart AS et al. (u.å.). *Historiske ortofoto: Frogn – Nesodden – Oppegård – Vestby – Ås, 1988; Lørenskog – Rælingen – Enebakk – Ski, 1987; Vestby – Ås – Frogn – Nesodden, 1979* [Kart]. Finn.no.
- OpenAI. (2025). *ChatGPT [Stor språkmodell]* (Versjon 4.0) [Programvare]. <https://chat.openai.com/>

- PEFC. (2022). *Norsk PEFC Skogstandard* (s. 45).
<https://cdn.pefc.org/pefc.no/media/2023-04/191010dd-81a3-41ec-9aeb76a67effda24/b877f9c0-47fa-5a50-b9ab-b82536994907.pdf>
- Pommerening, A., LeMay, V., & Stoyan, D. (2011). Model-based analysis of the influence of ecological processes on forest point pattern formation—A case study. *Ecological Modelling*, 222(3), 666–678.
- Pretzsch, H., Biber, P., & Ďurský, J. (2002). The single tree-based stand simulator SILVA: Construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 162(1), 3–21. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00047-6)
- Pukkala, T. (2016). Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s40663-016-0068-5>
- RStudio Team. (2024). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (Versjon 2024.12.0+467) [Programvare]. RStudio, PBC. <http://www.rstudio.com/>
- Schütz, J. P. (2001). *Der Plenterwald: Und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder*. Ulmer, Eugen, GmbH & Company.
- Sharma, R. P., & Brunner, A. (2016). Modeling individual tree height growth of Norway spruce and Scots pine from national forest inventory data in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32(6), 501–514.
<https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1269944>
- Sharma, R. P., Brunner, A., Eid, T., & Øyen, B.-H. (2011). Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *Forest Ecology and Management*, 262(12), 2162–2175.
- Solem, T. W. (2010). *Test av konkurranseindekser i ung blandingskog* [Master thesis, Norwegian University of Life Sciences, Ås]. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/186674>
- Stammespråk*. (u.å.). AT Skog SA. Hentet 29. april 2025, fra <https://www.atskog.no/stammesprak/>
- Sterba, H. (2004). Equilibrium curves and growth models to deal with forests in transition to uneven-aged structure-application in two sample stands. *Silva Fennica*, 38(4), 413–423.
- Strand, L. (1967). Høydekurver for bjørk. P: 291–296 in Braastad, H.(Ed.). Yield tables for birch. Norwegian Forest Research Institute, Ås, Norway. *Reports of the Norwegian Forest Research Institute*, 22, 265–365.
- Tham, Å. (1988). *Yield prediction after heavy thinning of birch mixed stands of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) and birch (Betula pendula Roth & Betula pubescens Ehrh.)* (No. 23; s. 36). Department of Forest Yield Research, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU).

- Tham, Å. (1989). Analysis of competition between trees in mixed stands of Norway spruce and Birch at different times through the rotation period—a method study. *Artificial intelligence and growth models for forest management decisions. Coll. For. and Wildlife Resources. Virg. Tech. Inst., Blacksburg, Va. Publication FWS-1-89*, 74–84.
- Tham, Å. (1994). *Crop plans and yield predictions for Norway spruce* (No. 195; Studia Forestalia Suecica, s. 21). Swedish University of Agricultural Sciences (SLU). <https://pub.epsilon.slu.se/3663/1/SFS195.pdf>
- Vítková, L., & Dhubháin, Á. N. (2013). Transformation to continuous cover forestry—A review. *Irish Forestry*, 119–140.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway