

Utvikling av prognoseverktøy for åpne og lukkede hogstformer - prosjektskisser

av

Tron Eid, Andreas Brunner, Terje Gobakken
Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning
Norges miljø- og biovitenskapelige universitetet

Forord

Denne rapporten er et resultat av prosjektet «Forprosjekt - Prognoseverktøy for selektiv hogst» finansiert av Utviklingsfondet for skogbruket og Skogtiltaksfondet. Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) har stått for prosjektledelse og det meste av arbeidet knyttet til rapporten. Fra NMBU har Tron Eid, Andreas Brunner og Terje Gobakken deltatt. Videre har en referansegruppe for prosjektet med representanter fra alle partnere bidratt i prosjektet. Denne har bestått av Even Bergseng fra NORSKOG, Kjell Anders Vikan fra Statskog, Svein Dypsund fra Viken Skog SA og Sverre Holm fra Glommen Mjøsen Skog SA. Erik Ødegård og Vegard Lien fra Glommen Mjøsen Skog SA har også kommet med innspill i prosjektet.

Ås, NMBU
30.01.2025

Innhold

1. Innledning	3
1.1. Hogstformer	3
1.2. Prognoseverktøy	4
1.3. Omforente premisser og målsettinger i forprosjektet	6
2. Prosjektskisse 1: Prognoseverktøy på kort sikt (2-årsperspektiv)	8
2.1. Bakgrunn	8
2.2. GeoSkog i dag	8
2.3. Mulige tilpasninger	9
2.3.1. Beregningsenhet	9
2.3.2. Bestandsutviklingsmodeller	10
2.3.3. Lukkede hogstformer	13
2.3.4. Tømmerverdi og driftskostnader	19
2.4. Organisering	22
3. Prosjektskisse 2: Prognoseverktøy på lang sikt (8-10-årsperspektiv)	23
3.1. Egenskaper til et framtidig prognoseverktøy	23
3.2. Eksisterende prognoseverktøy	23
3.3. Utviklingsbehov for et framtidig prognoseverktøy	24
3.3.1. Tilpasninger for lukkede hogstformer	24
3.3.2. Bestandsutviklingsmodeller, bestandsgenerator og økonomiske analyser	26
3.4. Utviklingen av et framtidig prognoseverktøy	29
3.4.1. Mulige utgangspunkt for utviklingen	29
3.4.2. Tidshorisont	29
3.4.3. Ressursbehov	29
3.5. Forslag til prosjektdesign	30
4. Prosjektskisse 3: Egnethet for lukkede hogstformer (3 år)	31
4.1. Bakgrunn	31
4.2. Metoder og organisering	31
4.2.1. Bruk av fjernmålte data	31
4.2.2. Samlet egnethetsvurdering i felt	31
5. Litteratur	34

1. Innledning

1.1. Hogstformer

I prosjektbeskrivelsen til forprosjektet var hovedmålsettingen å «Utrede et mulig hovedprosjekt for etablering av et prognoseverktøy for selektiv hogst i Norge». Begrepet «selektiv hogst» er imidlertid for upresist og begrenset som utgangspunkt for arbeidet som er gjort i prosjektet. Innledningsvis er det derfor nødvendig å definere hogstformer på en mer presis måte.

En hogstform beskriver ikke bare hogstene, men et helt system av tiltak som gjennomføres over tid. Dette kan inkludere foryngelse/rekruttering, ungsogpleie og ulike hogster. Det skilles for det første mellom åpne hogstformer (flatehogst, frøtrestillingshogst) og lukkede hogstformer (skjermstillingshogst, gruppehogst og bledningshogst). Skillet mellom åpne og lukkede hogstformer defineres gjennom hvor mange trær som settes igjen etter frøtrestillingshogster og skjermstillingshogster, med henholdsvis 30-150 frøtrær/ha etter en frøtrestillingshogst og 150-400 skjermtrær/ha etter skjermstillingshogst. For de åpne hogstformene vil arealet preges av liten dimensjonsspredning og en ensjiktet struktur, mens det ved en skjermstillingshogst, i hvert fall over en periode, vil være en tosjiktet struktur. Gruppehogst er en hogstform der trær tas ut i små grupper eller på småflater fra noen hundre kvadratmeter og opp til 0,2 ha. Arealet forynges naturlig fra kanten av gjenstående skog eller gjennom planting. Etter gruppehogst kan resultatet bli en relativt homogen skog, likevel med større variasjon i trestørrelse og struktur enn etter åpne hogstformer.

Begrepet «selektiv hogst» omfatter flere hogstformer. Felles for disse er at trær tas ut enkeltvis og at det alltid står trær igjen. Dette har som konsekvens at det blir stor dimensjonsspredning og at arealet blir flersjiktet. Bledning er den mest vanlige selektive hogstformen, og forutsetter et systematisk, men enkeltvis uttak av trær med jevne mellomrom for å opprettholde en flersjiktet struktur og en konstant foryngelse som gir en optimal bestandstetthet og høyest mulig vekst over tid (Brunner et al. 2023). Begreper som «fjellskoghogst», «plukkhogst», «dimensjonshogst» og «naturkultur» brukes om andre typer selektive hogster enn bledning, men disse er som regel mangelfullt definert og beskrevet.

Ifølge Landsskogtakseringen karakteriseres rundt 35% av det produktive skogarealet i hogstklasse III-V i Norge som flersjiktet (Svensson et al. 2021). Det vil være her sannsynligheten er størst for å finne arealer som allerede i dag er egnet for å gjennomføre bledningshogster. Det vil imidlertid også være aktuelt å gjennomføre tiltak som på sikt omstiller arealer med en ensjiktet struktur mot en flersjiktet struktur som egner seg for bledningshogster. En slik omstilling er fremfor alt aktuelt for yngre ensjiktet skog der det kan gjennomføres ulike typer omstillingshogster (se Brunner 2024).

Det foreliggende forprosjektet er motivert av en betydelig økt interesse for lukkede hogstformer de senere årene. Det er flere grunner til dette, blant annet forslag til nye EU-direktiver for skogbehandling, nye norske sertifiseringsstandarder for skog og som en mulig tilpasning til klimaendringer. Det er også mye fokus på lukkede hogstformer fra miljøvernorganisasjoner. Mange private og offentlige enkelt-skogeiere viser også interesse for lukkede hogstformer.

Mangel på forskningsbasert biologisk og økonomisk kunnskap om lukkede hogstformer er en stor utfordring. Dette gjelder både for hvor og hvordan slike hogstformer skal gjennomføres. Det er heller ikke bare innen forskning vi mangler kunnskap, men også blant skogfunksjonærer og -eiere i privat og offentlig virksomhet. En må tilbake mer enn 15-20 år i tid og prosjektet KONTUS for å finne en litt mer

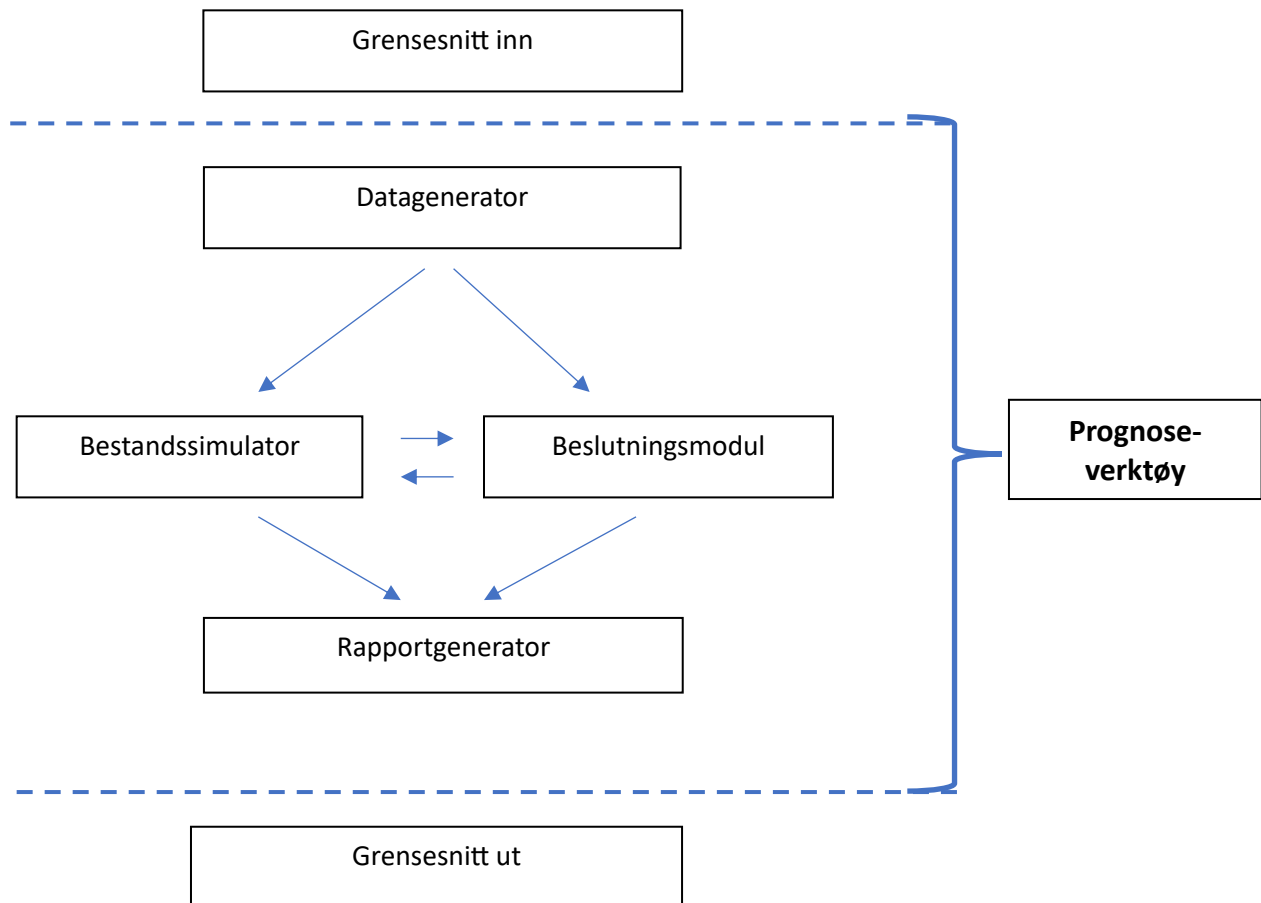
omfattende forskningsaktivitet knyttet til dette temaet (bl.a. to doktorgrader, Bollandsås 2007, Lexerød 2007). De senere årene har det vært noen spredte initiativer relatert til det biologiske grunnlaget med registrering av forsøksfelt og analyser av forsøksdata fra blodningsforsøk (Andersson 2015, Moan 2021). Nylig har Brunner et al. (2023) sammenfattet det eksisterende kunnskapsgrunnlaget for blodningshogster. Dette omfatter produksjon, foryngelse, konkurranseregulering og bestandsstruktur i blodningsskogen. Omstilling til blodning har i senere tid blitt utprøvd i praktiske drifter og langsiktete forsøk, men det er fremdeles for lite dokumentert kunnskap om dette (Brunner 2024). Kunnskapsgrunnlaget er enda mer begrenset for skjermstilling (Skoklefald 1989) og nesten fraværende for systematiske gruppehogster. Skjermstilling har vært praktisert i et svært begrenset omfang de siste årtier og kunnskap foreligger derfor bare som praktiske erfaringer (Bjørn Toverud, Per Rudi). Kunnskap om alle lukkede hogstformer fra Norge, Sverige og Finland blir publisert som bok i år (Rautio et al. 2025). Denne sammenstillingen viser at det finnes en god del informasjon om slike hogstformer i nabolandene, noe som kan være nyttig for norske forhold. Også når det gjelder økonomiske konsekvenser av lukkede hogstformer er det behov for mer innsikt og empiri knyttet til effekter på tømmerverdier og driftskostnader.

Det er også stor faglig usikkerhet og kunnskapsmangel omkring hvilke arealer som egner seg for de ulike lukkede hogstformene. Dette gjelder i første omgang det forskningsbaserte kunnskapsgrunnlaget, men ikke minst er dette en stor og presserende utfordring for næringa. Med flere aktuelle hogstformer å velge mellom blir egnethetsvurderinger viktigere, men samtidig mer kompliserte. I forbindelse KONTUS-prosjektet ble det utviklet en enkel indeks med noen få kriterier basert på variabler som beskriver skogstruktur for å rangere i hvilken grad arealer egner seg for selektive hogster (blodning) (Lexerød & Eid 2004, 2006) og senere ble det testet ut takstmetodikk (felttakster, fototolking og kombinasjoner av dette) for bruk i praktisk skogbruksplanlegging (Lexerød & Eid 2005, Hauglin et al. 2009). Brunner et al. (2023) diskuterer også kriterier som beskriver egnethet for blodningshogster. Det tas utgangspunkt i en rekke kriterier knyttet til treslag, foryngelse, bestandsstruktur, tetthet, stabilitet, skader og driftsteknikk. I tillegg anbefales det at et endelig valg av egnethet også bør vurderes opp mot skogeierens forvaltningsmål og risikovilje. Rapporten konkluderer med at det finnes veldig lite empirisk forskning om de ulike kriteriene for blodningssystemet. For de andre lukkede hogstformene (skjermstilling og gruppehogst) gjelder andre kriterier for å vurdere egnetheten. Nylig ble en veldig enkelt metode brukt for å vurdere egnethet for lukkede hogstformer på nasjonalt nivå (Granhus et al. 2024).

1.2 Prognoseverktøy

Utvikling av prognoseverktøy har lange tradisjoner i Norge (Hoen & Eid 1990, Hoen & Gobakken 1997, Eid & Hobbelstad 2000). Slike verktøy er brukt i forskning og undervisning, i praktisk skogbruksplanlegging på eiendomsnivå, og i regionale og landsdekkende analyser. Verktøyene har nesten utelukkende vært utviklet for bruk i analyser av åpne hogstformer. Interessen for lukkede hogstformer gjør imidlertid at det er et stort behov for prognoseverktøy som også kan brukes i analyser for en slik skogbehandling (se f.eks. Granhus et al. 2024). Dette gjelder både for analyser for større arealer med fokus på overordnede aspekter knyttet til langsiktige utvikling for produksjon og hogstkvantum, og for analyser av skogbehandling i enkeltbestand med et ønske om mer detaljert biologisk og økonomisk informasjon. Det er også aktuelt med analyser for arealer der det fram til nå har vært gjennomført åpne hogster hvor det er ønskelig med omstilling mot en flersjiktet struktur gjennom lukkede hogster.

Et prognoseverktøy kan være mer eller mindre avansert i sin oppbygning og kan inneholde ulike elementer avhengig av hvilke resultater en ønsker å få ut av det. Figur 1 viser en generell skisse for elementene som et prognoseverktøy kan (må) bestå av.



Figur 1. Generell skisse av oppbygningen av et prognoseverktøy med tilhørende grensesnitt.

«Kjernen» i et prognoseverktøy består av en «Bestandssimulator» og en «Beslutningsmodul». Bestandssimulatoren beregner alternative behandlingsprogrammer som beskriver utvikling og tiltak over tid for alle beregningsenheter med tilhørende økonomiske beregninger. Beregningsenheten i en bestandssimulator kan være en prøveflate eller et bestand. For beregningsenheten må tilstanden i dag beskrives med voksestedsvariabler (f.eks. bonitet), bestandsvariabler (f.eks. treantall/ha, grunnflate-middeldiameter, overhøyde) og eventuelt enkelttredata (f.eks. diameter, høyde). De grunnleggende elementene i bestandssimulatoren er biologiske modeller som beskriver utviklingen i skogen over tid (vekst, naturlig avgang og foryngelse/rekruttering/innvekst). Slike modeller kan være arealbaserte eller enkelttrebaserte, det vil si modeller som framskriver tilstanden og utviklingen for gjennomsnittsverdiene til en beregningsenhet eller verdiene til det enkelte tre. En annen viktig del av bestands-simulatoren gjør økonomiske beregninger knyttet til tømmerverdier og driftskostnader ved avvirkning og kostnader ved skogkulturtiltak. Dette gir grunnlag for å beregne en nåverdi for alle behandlingsprogrammer og dermed gjøre analyser av lønnsomhet.

Beslutningsmodulen i et prognoseverktøy kan bestå av ulike elementer avhengig av hvilke resultater en ønsker å få ut av det. Formålet med beslutningsmodulen er imidlertid at brukeren av prognoseverktøyet skal kunne sette egne målsettinger og forutsetninger for analysene. For det første må det settes forutsetninger for skogbehandlingen i den enkelte behandlingsenhet. Dette skjer gjennom å presisere en rekke biologiske parametere som styrer beregningene (f.eks. valg av hogstform og foryngelsesmetode, tynningsmetode og omløpstider). Dette er informasjon som sendes til bestands-simulatoren for å beregne alternative behandlingsprogrammer for den enkelte behandlings-enhet. I beslutningsmodulen settes også målsettinger på skognivå. Dette kan være målsettinger for årlig hogstkvantum, stående volum på ulike tidspunkt eller målsettingselementer knyttet til lønnsomhet. Utvelgelsen av behandlingsenheter for å oppfylle målsettingene på skognivå er basert på resultatene fra behandlingsalternativene som er beregnet med bestandssimulatoren. Denne utvelgelsen kan skje ved optimering eller ved hjelp av følsomhetsanalyser.

I tillegg vil prognoseverktøyet bestå av en «Datagenerator» som «klargjør» informasjonen som beskriver tilstanden til beregningsenheten i dag (voksested-, bestands- og enkelttredata), og en «Rapportgenerator» som «klargjør» resultatene fra prognosen for videre bruk (dette kan inkludere resultater på skognivå og for den enkelte beregningsenhet). «Grensesnitt inn» og «Grensesnitt ut» er ikke en del av selve prognoseverktøyet, men vil være filer med spesifiserte formater eller tabelldata for henholdsvis inputdata og resultatdata som er tilpasset den enkelte aktør (bruker).

Selv om eksisterende prognoseverktøy nesten utelukkende har vært brukt i analyser for åpne hogstformer, har det vært gjort enkelte forsøk på tilpasninger for også å kunne håndtere lukkede hogstformer. I forbindelse med utviklingen av Avvirk-2000, og senere GeoSkog, ble det gjort noen enkle tilpasninger av algoritmene som brukes i dette verktøyet (Eid & Hobbestad 1999, 2000, 2005, Hobbestad & Verdú 2014). Målsettingen med algoritmene var å kunne gjøre framskrivninger for «selektive hogster» basert på eksisterende arealbaserte vekst- og avgangsmodeller. Det første prognoseverktøyet med vekstmodeller for enkelttrær ble utviklet av Bollandås et al. (2008) basert på data fra Landsskogtakseringens prøveflater. Verktøyet kan beskrive utviklingen for arealer med flere treslag og med trær av ulik størrelse, men var ikke spesifikt tilpasset blødning. Et annet verktøy er T (Gobakken et al. 2008). Dette verktøyet brukte de samme vekstmodellene som Bollandås et al. (2008), men hadde en ganske omfattende funksjonalitet med et brukergrensesnitt for å sette forutsetninger for skogbehandling ved «selektive hogster», og et opplegg for å gjøre økonomiske beregninger. Andre aktuelle og mer nylig utviklede verktøy er SiTree og PixSim fra NIBIO (Antón-Fernández & Astrup 2022, Cattaneo et al. 2024) og TreeSim fra Høgskolen i Innlandet (Nabhani & Sjølie 2022). Alle disse kan betraktes som gode «rammeverk», og kan dermed danne et utgangspunkt i en framtidig utvikling av prognoseverktøy som kan fremskrive skogbehandling for alle de ulike hogstformene.

1.3. Omforente premisser og målsettinger i forprosjektet

Basert på en gjennomgang av aktuell litteratur, en kartlegging av næringens bruk av og behov for resultater fra prognoseverktøy, diskusjoner og læringsprosesser i prosjektperioden, og en helhetsvurdering av hvilke problemstillinger skognæringa i Norge står overfor, har vi valgt å endre «premissene» fra den opprinnelige prosjektbeskrivelsen noe.

a) Lukkede hogstformer

I prosjektbeskrivelsen ble det bare fokusert på «selektive hogster» (bledningshogster). Bledning er imidlertid bare en av flere lukkede hogstformer som er aktuelle i praktisk skogforvaltning. Framtidige prognoseverktøy må derfor inkludere alle de lukkede hogstformene, det vil si skjermstillingshogst, gruppehogst og bledning, i tillegg også omstilling til bledning.

b) Lukkede **og** åpne hogstformer

Selv om lukkede hogstformer ganske sikkert kommer til å øke i omfang i årene framover vil det fremdeles bli gjennomført åpne hogster (flatehogst, frøtrestillingshogst) på store arealer. Framtidige prognoseverktøy må derfor kunne håndtere alle hogstformer, ikke bare lukkede hogstformer.

c) Kort og lang sikt

Skogbruksnæringa står midt i utfordringene med innføring av lukkede hogstformer, og at de trenger løsninger raskt. Vi har derfor konkludert med at vi skal skissere mulige løsninger for utvikling av prognoseverktøy både på kort (2 år) og lang sikt (8-10 år).

d) Aktørspesifikke vs felles prognoseverktøy

Eksisterende prognoseverktøy som brukes i dag er GeoSkog (Statskog, Viken Skog, Jordskifteverket, Trysil kommuneskoger), egenutviklede verktøy (ALLMA-gruppen; Glommen Mjøsen Skog, AT Skog, Allskog) og Gaya-Sgis (Norskog). Den klart største andelen av prognoser som blir utført i dag blir gjort med GeoSkog. Geodata AS eier kildekode/løsningen til dette verktøyet, og forvalter/videreutvikler det på vegne av «eierne» som per tid er Statskog, Viken Skog, Jordskifteverket, Trysil kommuneskoger. Eierne betaler en årlig lisens ut fra nasjonal, regional eller lokal lisens. I et prosjekt på kort sikt vil dette verktøyet være det mest aktuelle å videreutvikle med hensyn på lukkede hogstformer. Det må da forutsettes at selve prognoseverktøyet GeoSkog fortsatt skal finnes i en versjon, og at de ulike næringsaktørene som deltar i en slik utvikling inngår i det eksisterende forvaltningsregime av GeoSkog. I et prosjekt på lang sikt bør det utvikles et helt nytt og felles prognoseverktøy som implementeres i de ulike forvaltnings-plattformene i hele næringa.

e) Egnethet for lukkede hogstformer

Det er stor faglig usikkerhet og kunnskapsmangel omkring hvilke arealer som egner seg for de lukkede hogstformene. Dette gjelder også det forskningsbaserte kunnskapsgrunnlaget, men ikke minst blir dette betraktet som en stor og presserende utfordring for næringa. Selv om dette ikke er en del av selve prognoseverktøyet, har vi valgt å skissere en separat projektskisse for prosedyrer og kriterier som kan brukes ved vurderinger om konkrete arealer kan egne seg for lukkede hogstformer.

Basert på punktene over (a-e) og hovedformålet med prosjektet, som var å utrede mulige hovedprosjekter for etablering av prognoseverktøy i Norge, har vi valgt å utvikle tre ulike projektskisser:

- Projektskisse 1: Prognoseverktøy på kort sikt (2-årsperspektiv)
- Projektskisse 2: Prognoseverktøy på lang sikt (8-10-årsperspektiv)
- Projektskisse 3: Egnethet for lukkede hogstformer (3-årsperspektiv)

2. Prosjektskisse 1: Prognoseverktøy på kort sikt (2-årsperspektiv)

2.1. Bakgrunn

Siden skogbruksnæringa står midt i utfordringene med innføring av lukkede hogstformer og derfor trenger resultater innen kort tid vil vi skissere mulige løsninger for utvikling av et prognoseverktøy som forholdsvis raskt (2 år) kan tas i bruk. Noen av forslagene i prosjektskisse 1 vil være en implementering av nye forskningsresultater som vil gjøre eksisterende prognoseverktøy vesentlig mer fremtidsrettet. Andre forslag må betraktes mer som en «quick fix», og selv om en tar i bruk den beste informasjonen som er tilgjengelig, vil det være knyttet usikkerhet til dette. Flere og forbedrede forskningsbaserte løsninger vil ta mer tid (jmf. prosjektskisse 2).

I forbindelse med forprosjektet ble det gjennomført en enkel kartlegging av bruk og behov for prognoseverktøy i skognæringa. Vi fant at den største delen av prognosene som utføres i dag blir gjort av Statskog, Viken Skog og Jordskifteverket ved hjelp av verktøyet GeoSkog. Disse aktørene ønsker en videreutvikling av GeoSkog, mens de andre aktørene vil fortsette med eksisterende løsninger for prognoser. Vi har derfor valgt å beskrive prosjektskisse 1 med utgangspunkt i GeoSkog, og definere utviklingsmuligheter for dette verktøyet slik at lukkede hogstformer bedre kan håndteres, i tillegg til de åpne hogstformene som allerede er på plass.

Det kom også fram i kartleggingen at en i et slikt prosjekt bør vurdere en overgang fra å bruke bestand som beregningsenhet i prognoser til mindre enheter (celler, 250 m²). Dette for å kunne utnytte eksisterende data fra skogtakster på en bedre måte og for å kunne ta mer hensyn til de faktiske variasjonene som finnes i skogen. Diskusjonene i forprosjektet tolkes dit hen at dette er en ønsket utvikling hos alle aktørene. I gruppen som nå aktivt bruker GeoSkog (Statskog, Viken Skog, Jordskifteverket) pågår også allerede et arbeid for bruk av celler i stedet for bestand. Bruk av celler som beregningsenhet er også en viktig forutsetning for de tilpasningene som foreslås i prosjektskissen for tilpasning av vekstmodellene til lukkede hogstformer. Videre var det enighet om å vurdere å ta i bruk nye arealbaserte vekst- og avgangsmodeller som er utviklet de senere årene, og i tillegg gjøre enkelte oppdateringer knyttet til de økonomiske beregningene i prognoseverktøyet.

2.2. GeoSkog i dag

GeoSkog bygger stort sett direkte på metodikken og modellgrunnlaget i Avvirk-2000 som er dokumentert av Eid & Hobbelstad (1999, 2000, 2005), men den opprinnelige koden i Fortran er konvertert til programmeringsspråket Python av Hobbelstad & Verdú (2014).

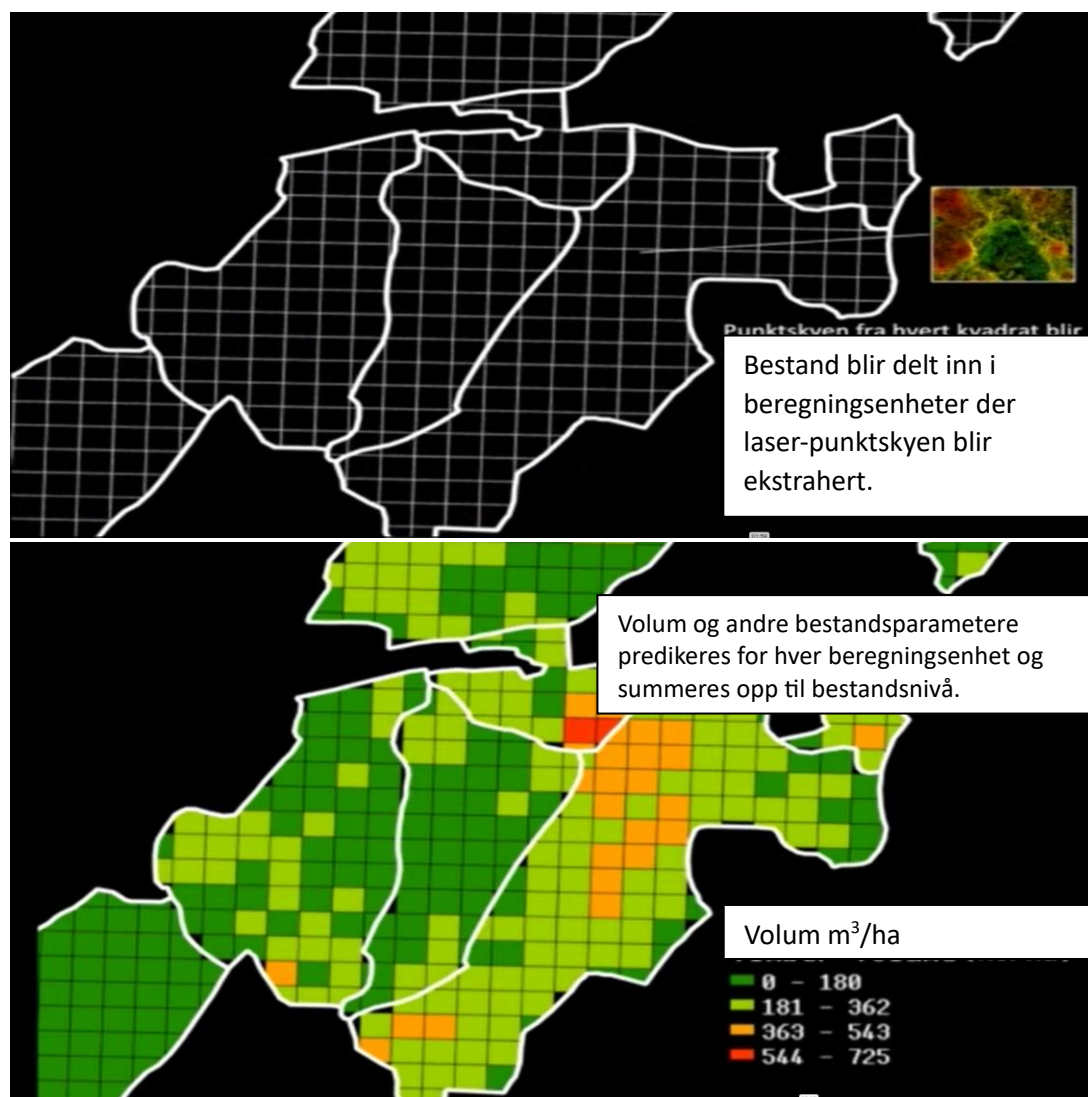
GeoSkog beregner først «utviklingsbaner» (skogtilstand, avvirkning og skogkulturtiltak) over en tidsperiode på 100 år for det enkelte bestand basert på takstdata og brukerdefinerte forutsetninger for skogbehandling. Utviklingsbanene for alle bestand, sammen med den brukerdefinerte overordnede strategien for avvirkning (balansekvantum, avvirkning ved hogstmodenhet, osv.), vil bestemme utfallet av prognosen på skognivå. Sentrale resultater fra en slik prognose er avvirkningskvantum med tilhørende kontantstrøm og utvikling av stående volum for en periode på 100 år. Dersom ønskelig er det også mulig å få ut detaljerte resultater knyttet til avvirkning (hogstform, sortiment, tømmerverdi, driftskostnader), stående volum (fordelt på treslag, bonitet, hogstklasse) og skogskjøtselstiltak (arealer, kulturkostnader) for 20 5-årsperioder både for enkeltbestand og på skognivå.

Framskrivningene av skogtilstanden i GeoSkog er basert på arealbaserte vekst- og avgangsmodeller gjennom «middeltreet» (det vil si grunnflatemiddeldiameter og grunnflateveid middelhøyde), og treantallet. Dette betyr i utgangspunktet at verktøyet bare kan brukes for åpne hogstformer i ensjiktete bestand. I forbindelse med en oppdatering av verktøyet for nesten 20 år siden (Eid & Hobbestad 2005) ble det imidlertid gjort noen enkle tilpasninger av algoritmene som brukes i dette verktøyet der målsettingen var å kunne gjøre framskrivninger for skjermstilling og «selektive hogster» (bledning). Løsningene som ble valgt tok utgangspunkt i de eksisterende arealbaserte vekst- og avgangsmodellene, men er ellers basert på svært lite forskningsbasert empiri.

2.3. Mulige tilpasninger

2.3.1. Beregningsenhet

Ved utarbeidelse av en arealbasert skogtakst med data fra flybåren laserscanning eller bildematching predikeres skoglige egenskaper for beregningsenheter på 250 m². Slike beregningsenheter omtales også som celler (grid cells), pixler og lignende. De predikerte verdiene for beregningsenhetene aggregeres vanligvis til bestandsmiddelverdier (se Figur 2).



Figur 2. Produksjonsløype ved arealbasert takst og prediksjon for beregningsenhet (Puliti 2015).

Ved å benytte data fra beregningsenheter (celler) som input i simuleringer i stedet for aggregerte bestandsverdier vil man ivareta mer informasjon om variasjoner i skogen og kunne ta mer hensyn til dette i prognosene. Maleki et al. (2024) har studert prognoser for langsiktig utvikling i skog ved å benytte beregningsenheter (250 m²) i stedet for bestandsmiddelverdier og har dokumentert betydelige avvik mellom disse to metodene. Variasjoner innenfor bestand fører til at framskrivning av bestandsmiddelverdier med ikke-lineære modeller gir store systematiske feil. Det er derfor en fordel å bruke den eksisterende informasjonen om variasjon mellom beregningsenhetene i bestandet til å forbedre vekstprognosene. NIBIO er for tiden i gang med å utvikle et prognoseverktøy (PixSim) som fremskriver slike beregningsenheter (Cattaneo et al. 2024).

I praksis er det selvsagt ikke hensiktsmessig å gjennomføre avvirkning for isolerte områder på 250 m², og det vil derfor være nødvendig å gjøre en dynamisk aggregering til behandlingsenheter basert på simuleringsresultatene underveis, og i etterkant av prognosen. Økonomiske beregninger bør heller ikke gjøres før en slik aggregering er utført (jmf. Pukkala et al. 2014).

Bestandsinndelingen forutsetter en viss form for homogenitet i bestandet med hensyn på alder, treslag og bonitet. Dagens skogforvaltning har i stor grad beveget seg bort fra bestand som behandlingsenhet og behandler nå flere bestand samtidig i et driftsområde på mer eller mindre samme måte. Dette gjelder slutthogst, men også regulære tynninger og omstillingstynninger. Samtidig vil lukkede hogstformer, som for eksempel gruppehogster, også føre til at homogeniteten i bestandene brytes ned. Dette betyr at bestandet ikke lenger er å regne som en behandlingsenhet og som derfor må erstattes av mindre enheter, slik som beregningsenhetene i en skogtakst, som dynamisk slås sammen til større enheter, avhengig av de konkrete formålene med prognosen.

Selv om beregningsenhetene beskriver variasjonen innenfor bestandsarealet bedre enn bestandsmiddelverdier er det fortsatt en arealbasert metode som gir middelverdier for denne enheten. Beregningsenhetene følger også et skjematisk rutemønster og ikke den reelle variasjonen i bestandsoppbygningen (se f.eks. Maleki et al. 2024). Dette betyr at det er middelverdier for beregningsenheten som fremskrives i en prognose, og ikke enkelttrær. I flersjiktete bestand vil variasjonen innenfor beregningsenheten trolig fortsatt være så stor at middelverdier ikke beskriver tilstanden på en tilstrekkelig god måte.

2.3.2. Bestandsutviklingsmodeller

Framskrivningene i GeoSkog er i dag basert på arealbaserte vekst- og avgangsmodeller ved å bruke «middeltreet» (det vil si grunnflatemiddeldiameter (D_g) og grunnflateveid middelhøyde (H_L)) og treantallet. De viktigste elementene i framskrivningene er diametertilvekstfunksjoner (Blingsmo 1984), høydeutviklingsmodeller (Tveite 1967, 1976, 1977, Braastad 1977 og Strand 1967) og en modell for naturlig avgang (Braastad 1982).

De siste fem årene er det blitt utviklet nye arealbaserte vekst- og avgangsmodeller basert på forskjellige data og med forskjellige målsettinger. Modeller for treslagsrene og homogene gran- (Allen et al. 2020) og furubestand (Kühne et al. 2022) er basert på de langsiktete forsøkene til NIBIO (LTE = long-term experiments) og er sammenfattende beskrevet av Kühne et al. (2023). Modellene omtales her som LTE-modeller. Modeller for treslagsblandede bestand med henholdsvis gran, furu eller lauvtrær som

dominerende treslag (Maleki et al. 2022) er basert på data fra Landsskogtakseringens prøveflater (NFI = national forest inventory). Modellene omtales her som NFI-modeller.

Sammenlignet med de mer enn 50 år gamle bestandsutviklingsmodellene som er i bruk i GeoSkog, kan det forventes at de nye modellene (LTE og NFI) avspeiler mer aktuelle vekstforhold. Dette er viktig fordi skogens vekst og mortalitet for tiden endrer seg raskt på grunn av klimaendringene. LTE-modellene er i tillegg basert på data fra moderne tynningsforsøk og kan derfor tenkes å representere tynningseffekter på en bedre måte enn de gamle. Alle de nye modellene bruker også nyere statistiske metoder, noe som reduserer feilene i modellprediksjonene. Samlet er det derfor god grunn til å bytte til de nye bestandsutviklingsmodellene nå.

Hvilken av de to gruppene nye bestandsutviklingsmodeller (LTE eller NFI) som anbefales for prognoseverktøyene i fremtiden må fortsatt vurderes nærmere av forskerne før en endelig beslutning tas. En rekke kriterier som har relevans for denne beslutningen er blitt diskutert i prosjektet og de viktigste av disse er omtalt i det følgende.

Det er sannsynlig at arealbaserte modeller i fremtiden vil anvendes for beregningsenheter med en størrelse på 250 m² (eller 16 × 16 m). Denne flatestørrelsen er liten, og spesielt for så små flater vil bruk av modeller basert på data fra større flater føre til systematiske feil, fordi variasjonen i bestandstetthet blir redusert med økende flatestørrelse. NFI-modellene er basert på data med en flatestørrelse på 250 m² og passer derfor godt til beregningsenhetene. Data brukt i LTE-modellene kommer fra større flater og vil derfor kunne gi systematiske feil dersom de anvendes på beregningsenhetene.

I motsetning til LTE-modellene, som beskriver utvikling av treslagsrene bestand, fremskriver NFI-modellene blandingsbestand med henholdsvis gran, furu eller lauvtrær som dominerende treslag. Treslagssammensetningen blir ikke fremskrevet, og bare treslaget som dominerer i volum bestemmer hvilken av de tre modellene som brukes. Modellene inneholder heller ikke faktorer som beskriver de ulike treslagenes gjensidige påvirkning på hverandre. I praksis vil beregningscellene i prognoseverktøyet GeoSkog, som NFI-modellene er tenkt til å gjøre framskrivninger for, i stor grad være preget av treslagsblanding. Basert på dataene de er utviklet fra er derfor NFI-modellene nærmere den reelle situasjonen i skogen som skal fremskrives enn LTE modellene.

Maleki et al. (2022) viste at LTE-modellene predikerer med systematiske feil når de brukes på små prøveflater tilsvarende størrelsen på NFI-flatene eller beregningscellene (250 m²). Dataene som er brukt for utviklingen av LTE-modellene kommer fra treslagsrene forsøksflater, som også er ensaldrede med en homogen bestandsstruktur. NFI-dataene derimot har mer variasjon i alder, bestandsstruktur og treslagssammensetning og ligner derfor mer den faktiske bestandssammensetningen for skogen som forvaltes i Norge.

Begge modelltypene (både LTE og NFI) er konstruert på samme måte med ligningssystemer som bruker de samme bestandsvariablene som fremskrives. Uansett hvilken modelltype som endelig velges vil derfor tilpasningene til lukkede hogstformer, slik de beskrives i denne prosjektskissen, fungere på samme måte.

NFI-modellene har også en alternativ versjon som inneholder en innvekstfunksjon som beskriver antall trær som vokser forbi en viss minstediameter (5 cm) over en 5-årsperiode. NFI-dataene inneholder bare i liten grad bledningsbestand eller naturlig foryngelse etter skjermstilling og gruppehogst. I tillegg er innvekstfunksjonene som beskrives i artikkelen (se Maleki et al. 2022, side 9) fremfor alt gjeldende for unge bestand hvor mange trær fortsatt vokser forbi minstediameteren på 5 cm. Disse funksjonene vil derfor sannsynligvis ikke være særlig godt egnet til å beskrive innvekst for lukkede hogstformer.

Maleki et al. (2022) anbefaler å bruke LTE-modellene framfor NFI-modellene for høyproduktive voksesteder og velpleiede bestand. LTE-modellene tar også hensyn til tynningsreaksjoner, noe som mangler i NFI-modellene. Høyproduktive voksesteder og velpleiede bestand utgjør imidlertid bare en liten del av skogen i Norge og er derfor heller ikke godt representert i NFI-dataene. NFI-dataene inneholder likevel noe data fra slike bestandstyper og Maleki et al. (2022) viser ikke til konkrete tilfeller hvor modellene gir systematiske feil for slike bestand. Det er i artikkelen til Maleki antydning at begge modelltypene kan anbefales for samtidig bruk. Dette er imidlertid ikke mulig i et prognoseverktøy som skal brukes til å analysere effekter og sammenligne forskjellige skogbehandlingsprogrammer. Det vil også være vanskelig å identifisere disse bestandstypene basert på takstdataene.

Vekstreaksjoner etter tynninger er en viktig effekt for alle lukkede hogstformer. Dette gjelder også tynninger i unge bestand som forberedelse til senere skjermstilling og gruppehogst, eller tynninger for å omstille til bledningssystemet (gjerne med kronetynning og tynning til varierende tetthet, se Brunner 2024). Også vekstreaksjoner ved sene tynninger i eldre bestand og i skjermer er viktig for lukkede hogstformer. I LTE-modellene er det kun vanlige lavtynninger som er representert i datamaterialet, mens mange av tynningsformene beskrevet over for lukkede hogster ikke er representert. LTE-modellene vil derfor kun i begrenset grad kunne representere veksten i tynnede bestand. Både i LTE- og NFI-modellene vil likevel tetthetseffektene av tynninger til en viss grad kunne gjenspeiles, selv om datamaterialet er fra prøveflater som er utynnet eller er tynnet på andre måter. Spesielt for kraftigere kronetynninger eller fristillinger av skjermtrær vil imidlertid tynningsreaksjonene være sterkere på enkelttre nivå, eller bestandstettheten være så sterkt redusert, at bestandstilveksten synker mer enn i vanlige lavtynninger. For slike tilfeller må mer spesifikke tynningsreaksjoner vurderes.

Også den regionale dekningen varierer betydelig mellom LTE- og NFI-modellene. For LTE-modellene representerer dataene ikke vekstforholdene i Vest-Norge (se Kuehne et al. 2022, side 3). Det er godt dokumentert gjennom egne vekstmodeller for Vest-Norge at veksten her avviker betydelig fra veksten i andre regioner. Dette er illustrert ved at volumproduksjonen er høyere ved samme høydebonitet, det vil si at det er forskjeller i **produksjonsnivå**. Data fra Vest-Norge er inkludert i NFI-modellene, men de inneholder ikke noen variabler som beskriver produksjonsnivåforskjellene. Gitt at det aller meste av dataene i NFI-modellene kommer fra andre regioner enn Vest-Norge, er det derfor sannsynlig at disse modellene først og fremst gjenspeiler produksjonsnivået for resten av landet, og ikke for Vest-Norge. LTE-modellene representerer heller ikke dårlige boniteter eller eldre bestand godt nok. Her har NFI-modellene fordeler ved å representere ulike boniteter og bestandsaldre langt bedre.

Basert på kriteriene diskutert over er det mest sannsynlig at NFI-modellene er best egnet til å framskrive beregningsenhetene i en ny versjon av GeoSkog. Den endelige beslutningen om valg av modeller må imidlertid treffes i forkant av at en prosjektsøknad utarbeides. Dette må gjøres sammen med produksjonsforskerne på NIBIO, et samarbeid som allerede er begynt nå i slutfasen av forprosjektet.

2.3.3. Lukkede hogstformer

Som tidligere nevnt har GeoSkog i dag funksjonalitet som er knyttet til «selektive hogster». Disse er basert på enkle tilpasninger av de eksisterende algoritmene i Avvirk-2000 (Eid & Hobbelstad (2005)). Løsningene som ble valgt var i svært liten grad basert på forskningsbasert empiri og er heller ikke blitt testet mot uavhengige data fra slike hogster. I tillegg til at de er basert på de gamle arealbaserte vekst- og avgangsmodellene, er det åpenbart også flere andre svakheter ved disse løsningene. Det er blant annet knyttet usikkerhet til effekter på veksten av bestandstetthet, styrke og intervall mellom hogstene, og på nivået både for den naturlige avgangen og innveksten av nye trær. Alt dette gjør det svært sannsynlig at prognoser med dagens opplegg i GeoSkog vil gi systematiske feil.

En sentral oppgave i prosjektet vil derfor være å tilpasse de arealbaserte vekst- og avgangsmodellene som velges slik at de i tillegg til flatehogst og frøtrestilling også bedre kan håndtere bledning, skjermstilling og gruppehogst. I tillegg er det ønskelig å utvikle et opplegg for omstilling av arealer med en ensjiktet struktur mot en flersjiktet struktur som egner seg for bledningshogster. Tilpasningene som foreslås i prosjektskissen er bare ment som foreløpige løsninger basert på arealbaserte modeller slik at prognosene for lukkede hogster nærmer seg mer realistiske forhold enn tilfellet er i dag. Det er viktig å være klar over at det ikke finnes noen muligheter for å verifisere disse tilpasningene fordi det ikke foreligger lengre serier med forsøksdata fra «perfekt forvaltede bestand» for disse hogstformene.

Følgende tilpasninger vil være sentrale og nødvendige:

- Utvikle behandlingsmodeller som beskriver skogbehandling for de lukkede hogstformene.
- Sjekke effekter av bestandstetthet på veksten, og eventuelt modifisere de ved behov.
- Modifisere naturlig avgang (mortalitet) for lukkede hogstformer.
- Definere (enkle) forutsetninger for innvekst for lukkede hogstformer.

Tilpasningene planlegges ved å utvikle spesifikke og idealiserte **behandlingsmodeller** for de fire lukkede hogst-formene (bledning, skjermstilling, gruppehogst og omstilling til bledning). En behandlingsmodell beskriver en rekkefølge av nødvendige skjøtselsinngrep i løpet av en omløpstid, eller en tilsvarende periode. I praksis vil det forekomme avvik fra disse behandlingsmodellene. Det vil også forekomme kombinasjoner av de ulike hogstformene. Slike enda mer komplekse behandlinger kan det ikke tas hensyn til i tilpasningene av prognoseverktøyet. En reduksjon av behandlingsalternativer vil gjøre det betydelig enklere å fremskrive vekst, innvekst og mortalitet. Det vil også gjøre det enklere å beskrive bestandsbehandlingen over den lange tidsperioden som disse hogstformene bruker i foryngelsesfasen. I prognoseverktøyet vil dette selvfølgelig begrense muligheten for alternative behandlinger, og bare tillate enkle sammenligninger mellom idealiserte hogstformer.

Figur 3 – 5 beskriver eksempler på behandlingsmodeller for henholdsvis bledning, skjermstilling og gruppehogst. Behandlingsmodellene er blitt designet for å optimere både vekst og innvekst. En grunnleggende føring for alle behandlingsmodellene er målet om å produsere trær med en maksimal diameter i brysthøyde (dbh) på 40 cm. Dette fører til at skjermstilling og gruppehogst må begynne langt tidligere enn det som er vanlig i sentraleuropeiske eksempler hvor man raskere kan produsere større dimensjoner. Behandlingsmodellene som implementeres i prognoseverktøyet må være realistiske, både med tanke på hva som vil bli utført og hvilke varianter som har en sjanse for å lykkes.

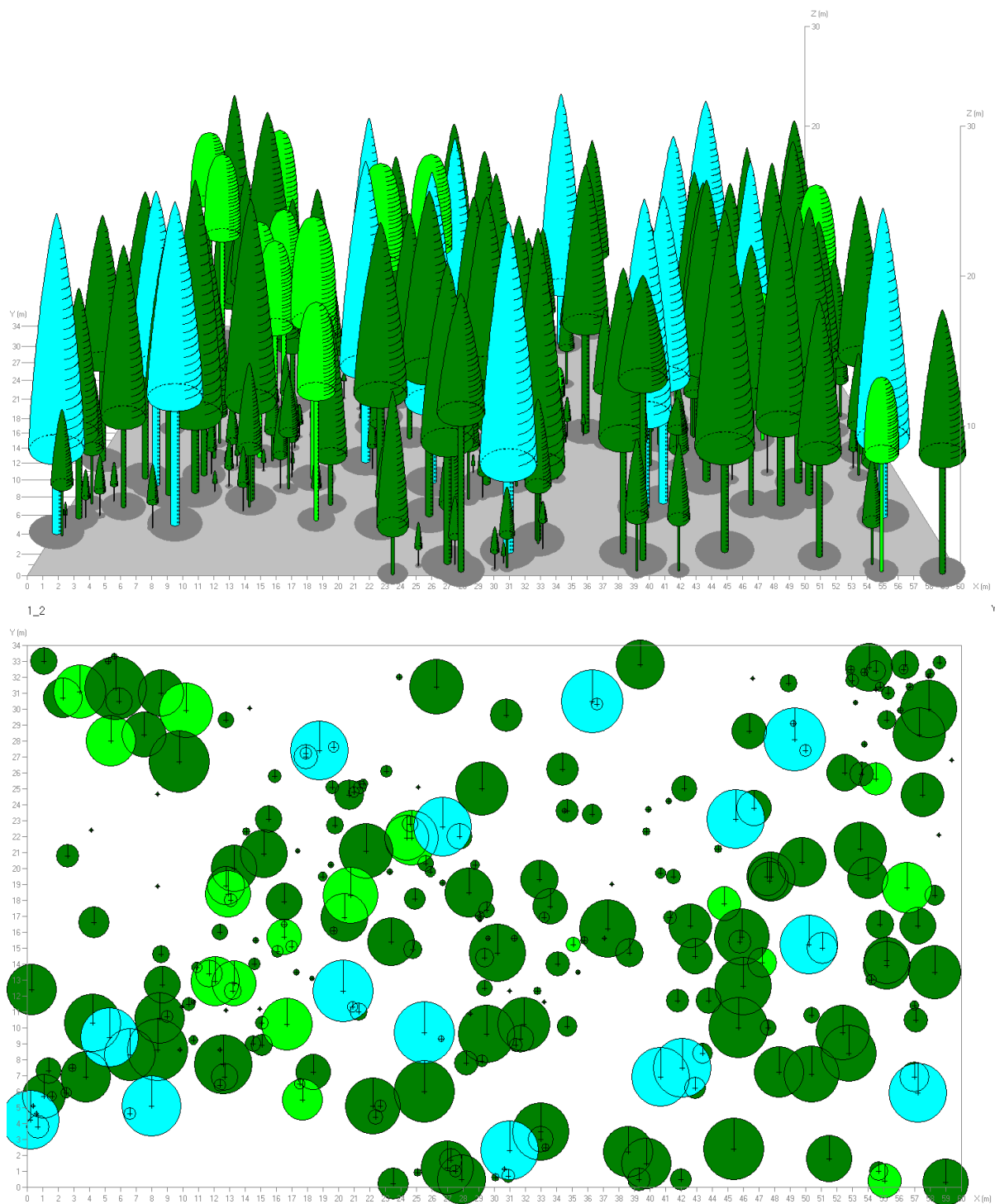
Det vil derfor være nødvendig med grundige undersøkelser før endelige og detaljerte beslutninger om utformingen av disse behandlingsmodellene blir tatt.

Behandlingsmodellen for bledning (Figur 3) går ut på å avvirke de største grantrærne når bestandsvolumet har økt med 100 m³/ha. Normalt har de største trærne i bledningsbestand et volum på omtrent 1 m³/tre, dvs. at rundt 100 trær/ha fjernes. Selv om det fjernes enkelte mindre trær med skader eller dårlig stammeform, er mesteparten av hogsten begrenset til de største trærne. Denne hogstformen har kraftige effekter på middeldimensjonen i bestandsmodellene. Effektene vil være noe annerledes i den første bledningshogsten fordi stikkveiene etableres og trær i alle dimensjoner fjernes på rundt 20% av arealet, i tillegg til at de største trærne også fjernes.

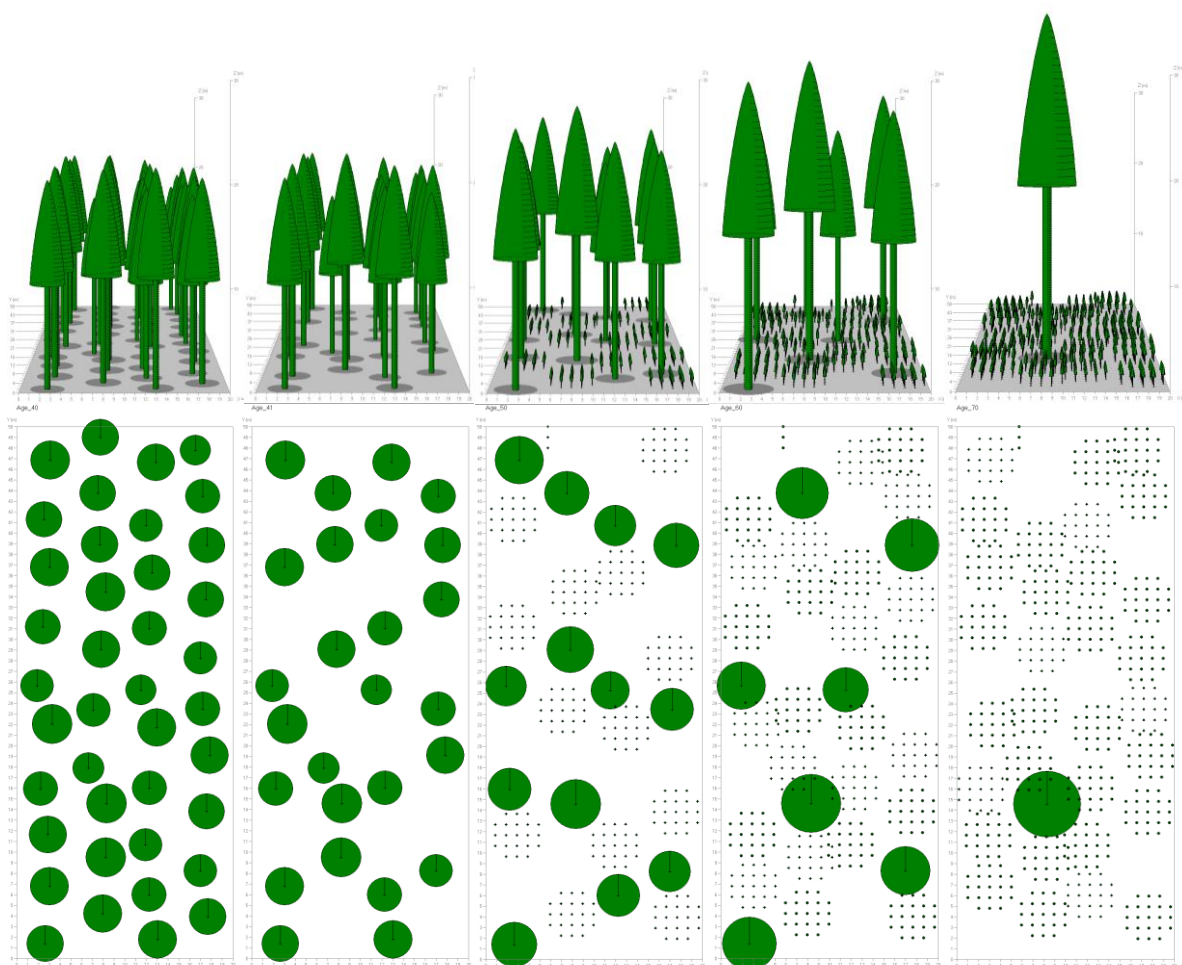
Behandlingsmodellen for skjermstilling i gran er beskrevet i Figur 4. Forberedelseshogsten er en sen lavtynning som systematisk fristiller de kommende skjermtrærne. Vekstreksjonene avviker derfor sannsynligvis ikke fra vanlige lavtynninger. Skjermstilling vil i fremtiden også brukes i furu. For furu anvendes samme antall og form av inngrep, men den samlede foryngelsesperioden vil sannsynligvis være kortere, både fordi furu oftere produserer frø og fordi etablert foryngelse må fristilles fortere på grunn av mindre skygetoleranse i foryngelsen.

Behandlingsmodellen for gruppehogsten er beskrevet i Figur 5. Her er foryngelsesperioden 30 år og hogstene må begynne ved 20 m overhøyde. Kortere foryngelsesperioder er ikke mulig dersom hele arealet skal forynges bare med grupper og gruppestørrelsen ikke skal overstige visse grenser (maks. 2 dekar i PEFC-standardene og i Figur 5).

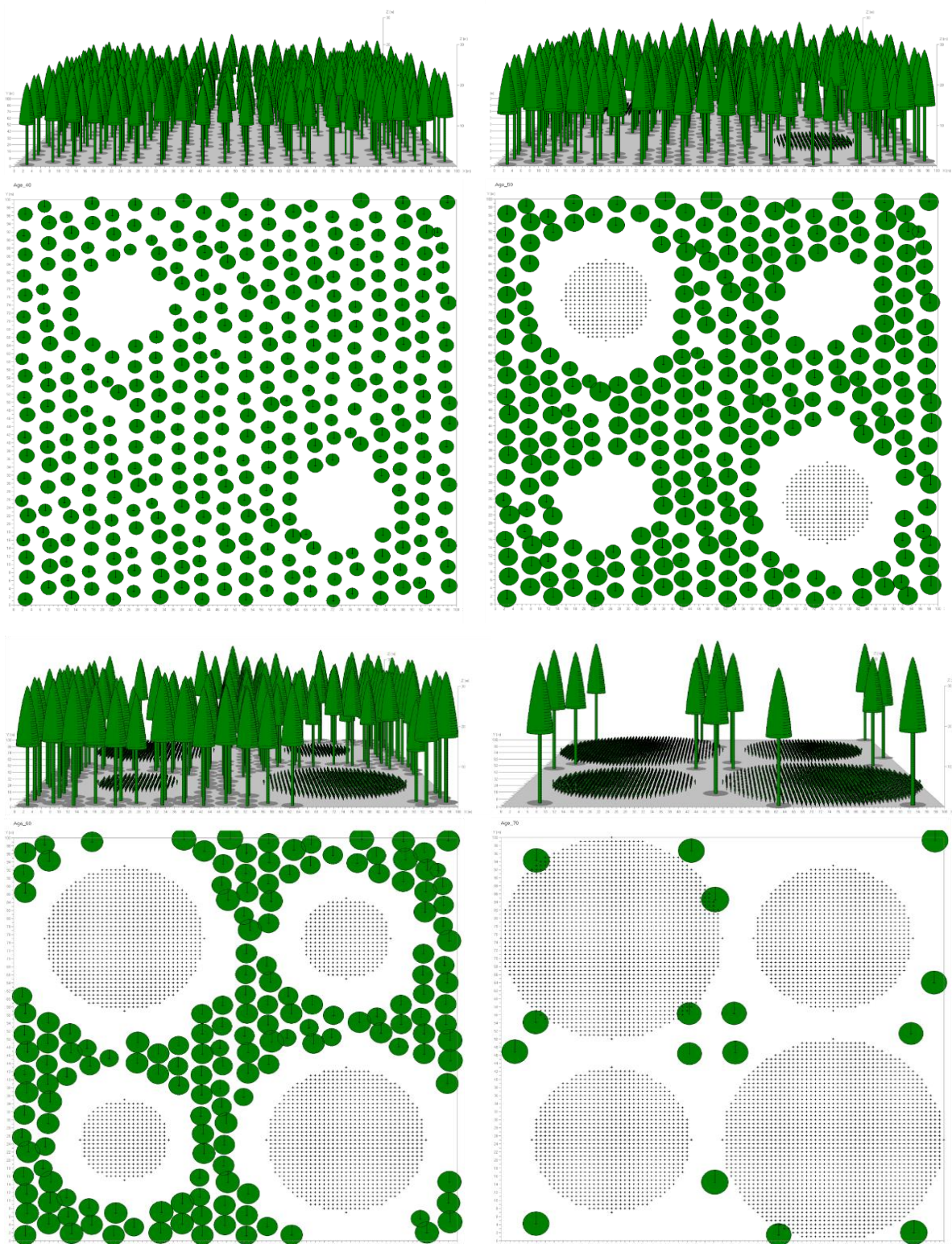
Mens bledning og skjermstilling kan gjennomføres uansett bestandets størrelse eller utforming, krever gruppehogst spesielle tilpasninger av gruppenes størrelse, utforming, utvidelse og tidsrekkefølge i hvert enkelt bestand. Gruppehogst utfordrer derfor planleggingsverktøyet på en helt ny måte. Her kan ikke bestandet lenger behandles som en homogen behandlingsenhet. Detaljerte beskrivelser av den romlige fordelingen for bestandssituasjonen er nødvendig, i ekstremene fra tett lukket skog til en helt åpen snauflate innenfor samme bestand. Beregningsenheter på 250 m² gir til en viss grad muligheter til å beskrive romlig variasjon i bestandstetthet, men legger på grunn av størrelsen også tydelige begrensninger på dette. Grupper kan ved hjelp av beregningsenheter bare ha størrelser og former som tilsvarer flere sammensatte beregningsenheter, og ikke vanlige former og størrelser som brukes i gruppehogster (Figur 5). Det ville føre til store systematiske feil i vekstprediksjonene å bruke middeltettheten i beregningsenheter som ligger i bestandskanten dersom realistiske gruppeformer brukes sammen med rutemønsteret til beregningsenheter. Den fulltette skogen rundt gruppeåpningene og fraværet av trær i gruppen er ekstremene i den ikke-lineære effekten som bestandstettheten har på veksten. Problemet beskrevet over kan sannsynligvis enkelt løses når hele foryngelsesperioden i gruppehogsten gjennomføres i prognoseperioden. Da vil man kunne høste en passende andel av beregningsenheter i bestandet trinnvis over de årtier som foryngelsesperioden strekker seg. Selv om dette ikke er romlig eksplisitt, vil andelen av bestandet i forskjellige åpenhetseksstremer gjenspeiles. Utfordringen er større for bestand der gruppehogsten er påbegynt og hvor takstdata gjenspeiler variasjonen i bestandstetthet. Gjenstående bestand kan fortsatt høstes trinnvis ved å fjerne passende andeler trinnvis, men videre behandling av beregningsceller med ukjente andeler innenfor/utenfor gruppene må det lages passende regler for.



Figur 3. Bestandsstruktur i en forsøksflate med bledningshogst i gran i Nord-Odal. Mørkegrønn = gran, lyseblå = grantrær som fjernes i neste bledningshogst (dette er de største grantrærne på flaten), lysegrønn = bjørk. Den planlagte bledningshogsten vil fjerne omtrent 100 m³/ha av et stående volum på 255 m³/ha.



Figur 4. Tidsserie av foryngelsesfasen i en skjermstilling. Utgangspunktet er et bestand som er systematisk tynnet tidligere (bilde 1). Forberedelseshogsten gjennomføres i en alder av 41 år med en overhøyde på 20 m (bilde 2). Dette skal føre til enda mer enkelttrestabilitet. To skjermstillinger i en alder av 50 og 60 år reduserer grunnflaten til omtrent 12 m²/ha og setter foryngelsen i gang (bilde 3 og 4). Skjermen blir fjernet i en alder av 70 år når gjenveksten er blitt minst 0,5 m høy (bilde 5). På dette tidspunktet er skjermtrærne over 30 m høye og har en dbh på 40 cm. Gjenveksten som har etablert seg direkte etter den første skjermstillingen 20-30 år tidligere er blitt omtrent 2 m høy når skjermen fjernes helt.



Figur 5. Tidsserie for foryngelsesfasen i en gruppehogst. De to første gruppene (åpningene) med en diameter på 20 m blir etablert ved alder 40 år når overhøyden er omtrent 20 m (bilde 1). Gruppene utvides til 35 m i diameter ved alder 50 år, samtidig som nye to nye grupper blir åpnet (bilde 2). Alle gruppene blir utvidet ved alder 60 år (bilde 3). Det resterende bestandet blir hogd i en alder av 70 år (bilde 4) når de resterende trærne har en høyde på omtrent 30 m og en dbh på cirka 40 cm. På dette tidspunkt har gjenveksten en minstehøyde på omtrent 0,5 m, mens gjenveksten etter de første gruppehogstene er blitt omtrent 2 m høy.

Også i bledningsskogen i gran varierer bestandstetthet betydelig (Figur 3) der åpningene kan være opp til 250 m² store. Sammenlignet med gruppehogsten er variasjonen i bestandstettheten likevel begrenset, og bruk av arealbaserte modeller i beregningsenheter vil derfor bare skape mindre systematiske feil.

Omstilling til bledning kan skje med tynning til varierende tetthet og må startes når skogen har en dominerende høyde på bare 10 m. Konseptet er beskrevet i detalj av Brunner (2024). Den sterkt varierende tettheten med 100 m²-åpninger utfordrer bruken av bestandsmodeller på samme måte som gruppehogsten. Gitt at det likevel bare er små åpninger på en liten del av arealet og at resten av bestandet tynnes på en måte som svarer til vanlige tynninger, kan det argumenteres for at eksisterende bestandsmodeller kan simulere vekst i slike situasjoner med relativt små feil.

Stikkveier brukes i tynninger i ensaldrede bestand, og i omstillingstynninger og bledningshogster. Stikkveiene skaper romlig variasjon i tetthet som har konsekvenser for veksten. LTE-modellene er ikke basert på tynninger med stikkveier og avspeiler derfor ikke denne effekten. Også i NFI-modellene er datagrunnlaget sannsynligvis begrenset, fordi det bare i liten grad har blitt tynnet de siste årtier i Norge. Effekten av tetthetsvariasjonen på grunn av stikkveiene vil være liten over tid fordi kanttrærne tar i bruk vekstrommet effektivt allerede etter noen få år. Ved første tynning eller i første bledningshogst, når stikkveien etableres, kan effektene av uttaket i stikkveien likevel ha stor betydning for en korreksjon av middeldimensjoner i arealbaserte modeller eller vekstprognoser. Det kan derfor være nødvendig å ta hensyn til stikkveien når tynningsuttak beskrives i behandlingsmodellene.

Bestandstettheten er det viktigste for veksten både i lukkede og åpne hogstformer. I lukkede hogstformer reduseres bestandstettheten betydelig i noen faser (skjermstilling, gruppehogst) eller permanent (bledning, omstilling til bledning), enten homogent (skjermstilling) eller med stor romlig variasjon (gruppehogst). Det er derfor avgjørende å velge bestandsutviklingsmodeller som har realistiske tetthetseffekter også for gamle bestand og bestand med kraftig redusert bestandstetthet. Her kan NFI-modellene være bedre egnet enn LTE-modellene. Datamaterialet til NFI-modellene inneholder mange prøveflater med glissen skog, noe som for eksempel kan representere situasjonen under åpen skjerm. Modellenes tetthetsfunksjoner må testes, for eksempel mot data fra bledningsforsøkene. Ved behov må tetthetsfunksjonene modifiseres for lukkede hogstformer.

En felles utfordring for skjermstilling og gruppehogst er at **mortaliteten** varierer mye på grunn av vindfall og kantskader, og at det ikke finnes noen gode modeller for dette. En tilnærming kan være å bruke et nivå på mortalitet som gjenspeiler den perfekte anvendelse av metoden, for eksempel skjermstilling i veltynnede bestand på passende voksested. Her kan man fortsatt forvente cirka 20% avgang i skjermen på grunn av vindfall. For denne metoden må det anmerkes tydelig i resultatene at avgangen kan være betydelig høyere, for eksempel helt opp til 80% som har vist seg å være tilfelle i enkelte svenske forsøk.

I bledningsskogen kan mortalitet være betydelig lavere enn i ensjiktet skog. Bestandstettheten er generelt lavere, og enkelte trær vokser opp under skjerm uten mye konkurranse fra siden. Når trærne kommer opp i det dominerende sjiktet, danner de gjerne lange kroner og blir derfor vitale og mindre utsatt for vind- eller barkbilleskader. Mortalitet i bledningsforsøkene i Norge er rapportert av Moan (2021).

En felles utfordring for alle lukkede hogstformer er prediksjonene av **innvekst** gjennom naturlig foryngelse. Selv om planting kan brukes i sammenheng med skjermstilling og gruppehogst, vil naturlig foryngelse sannsynligvis være den dominerende foryngelsesformen i disse hogstformene. Naturlig foryngelse er en langvarig prosess med mange faktorer som påvirker, og med mye variasjon. Det er ikke mulig å prognostisere innvekst gjennom naturlig foryngelse med modeller. Tilpasningene kan også her bare etterligne den optimale situasjonen hvor hogstformen har ført til en vellykket naturlig foryngelse og hvor plantene i tilstrekkelig antall utvikler seg til rekrutter for neste generasjon.

For innvekst i bledningsskogen forutsettes det 1 tre/da/år som vokser inn i den minste diameterklasse (Brunner et al. 2023). En slik gjennomsnittsrate kan brukes i prognoseverktøyene. Innenfor normale rammer for bestandstetthet i gran vil det vanligvis ikke være noe problem å etablere en tilfredsstillende foryngelse over en lengre foryngelsesperiode (> 50 år til 2,5 cm dbh). For furu har vi for lite erfaring til å kunne prognostisere om innveksten lykkes basert på bestandstettheten. Interessen for bledning i furu er imidlertid stor for tiden, spesielt i skog som hovedsakelig benyttes til rekreasjon eller turområder. Derfor vil det være nødvendig å finne løsninger for å kunne simulere bledning også i furu. Veksten for bledningsskogen i furu vil også reagere sterkere, og på en annen måte enn i gran, på variasjoner i bestandstetthet.

For skjermstilling tar foryngelsesprosessen 30 år for gran og noe kortere for furu. Etter denne perioden vil foryngelsen være tett nok og ha varierende høyde. Det kan fortsatt antas en middelhøyde på 2 m og et treantall på 500 trær/da i slutten av foryngelsesperioden for begge treslag. For gruppehogst vil foryngelsen være mer variert romlig enn for de andre hogstformene. Fra midten av åpningen, hvor man finner de høyeste trærne, vil trehøyden i foryngelsen synke mot bestandskanten og mot den tett lukkede skogen mellom åpningene (se Fig. 5). På samme måte som beskrevet over for vekstmodellering, kan denne romlige variasjonen ikke håndteres på en enkel måte i bestandsmodellene, enten de brukes for hele bestandet eller for beregningsenheter. Det vil derfor være nødvendig å finne helt nye løsninger for dette problemet. En enkel tilnærming med en gjennomsnittshøyde og tetthet som beskrevet over for skjermstillingen kan testes ut, men konsekvensene for videre prognoser må utredes.

2.3.4. Tømmerverdi og driftskostnader

Med dagens versjon av GeoSkog kan tømmerverdi og driftskostnader ved avvirkning enten **oppgis** av bruker eller **beregnes** med modeller. Tømmerverdi (kr/m³) oppgis som en veid verdi basert på aktuell treslagsfordeling og sortimentsfordeling i uttaket, mens driftskostnader (kr/m³) oppgis basert hogstform og andre parametere knyttet til aktuelle driftsforhold. Tømmerverdi beregnes ut fra oppgitte aktuelle tømmerpriser (kr/m³) for sagtømmer og massevirke for gran, furu og bjørk, og et opplegg utviklet av Blingsmo og Veidahl (1992). Dette opplegget ble utviklet i en tid med sentrale tømmerprisforhandlinger og en annen prisstruktur enn i dag. Driftskostnader (kr/m³) beregnes med utgangspunkt i produksjonsfunksjoner for hogstmaskiner og lassbærer (Dale et al. 1993, Dale & Stam 1994, Eid 1998) som finner produksjonen (m³/virketime), og forutsetter at maskinkostnader (kr/virketime) oppgis av bruker. Beregningene av produksjonen ved avvirkning er lagt opp slik at de dekker flatehogst, tynning og etablering og avvikling av skjerm- og frøtrestilling, der volumet for middeltreet, treantall/ha før uttaket og uttaksprosenten for treantall/ha er sentrale parametere for å beregne produksjonen for hogst, mens produksjonen for transport er basert på uttak i m³/ha og driftsveilengde.

I en ny versjon av GeoSkog vil den enkleste «løsningen» for å kvantifisere tømmerverdier og driftskostnader i prognosene være å overlate til brukeren å oppgi disse verdiene. En slik løsning vil bare være aktuell dersom brukeren har et godt tallgrunnlag, eller dersom forholdene i skogen avviker mye fra «normalsituasjonen» som forutsettes når disse størrelsene beregnes (se under). Det må da gis muligheter for å kunne variere verdiene både «globalt» (eiendom, driftsområde) og «lokalt» (bestand, beregningsenhet). Det må tillegg være mulig å variere verdiene med hogstform (både åpne og lukkede) og skogforhold (eksempelvis treslag og terrengforhold).

Får å beregne tømmerverdi og driftskostnader i en ny versjon av GeoSkog som dekker både åpne og lukkede hogstformer kreves det en del tilpasninger, særlig for tømmerverdi. Her vil en basere seg på et opplegg som er utviklet og implementert i Gaya 2.0 (Strimbu et al. 2023). En sentral del av dette opplegget er nylig utviklede funksjoner for volum, avsmalning og barktykkelse for gran, furu og bjørk (Hansen et al. 2023). Disse funksjonene er utviklet fra et stort nasjonalt datasett som dekker de fleste skogforhold i Norge, og som er fleksible i bruk fordi de kan estimere stamme- og stokkvolum både med og uten bark, i tillegg også diameteren ved hvilken som helst høyde oppover stammen. Dette betyr at de egner seg godt for å bestemme fordelingen av sagtømmer og massevirke for et tre. Ut fra informasjon om diameter og høyde kan en skille ut seksjoner oppover stammen etter gjeldene krav til minimum diameter for sagtømmer og massevirke (eksempelvis 12 cm for sagtømmer og 5 cm for massevirke), og på denne måten estimere sortimentsfordelingen for treet. Beregningene for å få fram de ulike parameterne i funksjonene er implementert som en pakke med åpen programkode i data-verktøyet R (<https://github.com/SmartForest-no/taperNOR>). Denne koden kan forholdsvis enkelt flyttes til programmeringsspråket Python som brukes i GeoSkog.

Fordelingen mellom sagtømmer og massevirke som framkommer gjennom opplegget beskrevet ovenfor forutsetter «feilfrie» stammer. Dersom en har informasjon om feil (råte, kvist, krok) kan fordelingen mellom sagtømmer og massevirke justeres for dette. For å beregne tømmerverdien ved avvirkning må en, på samme måte som med dagens opplegg i GeoSkog, oppgi aktuelle tømmerpriser (kr/m³) for sagtømmer og massevirke for gran, furu og bjørk.

Grunnlaget for beregning av tømmerverdi er tilgjengelig informasjon om diameter og høyde for trærne som avvirknes for alle de aktuelle hogstformene. For åpne hogster (flatehogst, frøtrestilling) og tynning i ensjiktet skog må en ta utgangspunkt i grunnflatemiddeldiameter (D_g) og grunnflateveid middelhøyde (H_L) slik de framkommer i framskrivningene.

For de lukkede hogstformene (bledningshogst, skjermstillingshogst og gruppehogst) vil en måtte bruke informasjon fra de perfekte (idealisererte) behandlingsmodellene som er beskrevet i avsnitt 2.3.3. For bledning betyr det at alle trær som tas ut er 40 cm i diameter (se Figur 3), mens høyden vil variere med bonitet. For skjermstillingshogst, som inkluderer en forberedelseshogst og to skjermstillinger (se Figur 4), vil nesten alle trær som tas ut være i samme sjikt på de ulike avvirkningstidspunktene. Dette betyr at en her kan bruke D_g og H_L direkte i den siste skjermstillingen for å beregne tømmerverdi, mens en ved forberedelseshogsten og den første skjermstillingen justerer D_g og H_L ut fra innretningen på disse inngrepene, som ligner en lavtynning. For gruppehogst vil det nesten ikke være noen forskjell fra ensaldrede bestand fordi alle trær i en gruppe avvirknes (se Figur 5). Selv om vekstreaksjoner hos kanttrær vil gi noe avvik i diametervekst (større vekst) i forhold til resten av trærne vil en likevel kunne bruke D_g og H_L for å beregne tømmerverdi.

Ved omstilling til blødning er forholdene noe mer kompliserte og her må en antagelig vurdere nærmere hvilke løsninger som skal brukes for å beregne tømmerverdi for de ulike inngrepene. I en slik omstilling vil en i første inngrep fjerne alle trær på 20% av arealet i stikkveier og alle trær på 13% av arealet i «glenner» (100 m²). For disse delene hogges alle trær. Tynningen i resten av bestandet er kronetynning som fjerner noen av de største trærne. Senere tynninger åpner noen få nye «glenner» og fortsetter med kronetynning. Ved omstilling til blødning vil en også ta utgangspunkt i Dg og H_L, men bruke informasjon om innretningen i de ulike inngrepene for å justere disse. Detaljene i et slikt opplegg må vurderes nærmere.

I en ny versjon av GeoSkog vil driftskostnadene (kr/m³), på samme måte som i dagens versjon, bli beregnet med utgangspunkt i produksjonsfunksjonene for hogstmaskiner og lassbærer (Dale et al. 1993, Dale & Stam 1994, Eid 1998), som finner produksjonen (m³/virketime), og maskinkostnader (kr/virketime), som oppgis av bruker. For å beregne produksjonen for hogst er volum til middeltreet, treantall/ha før uttak og uttaksprosenten for treantall/ha nødvendig input, mens produksjonen for transport er basert på uttak i m³/ha og driftsveilengde. På samme måte som ved beregning av tømmerverdi, vil en måtte bruke informasjon om Dg og H_L fra behandlingsmodellene for de ulike hogstformene for å skaffe nødvendig input til beregning av produksjon for hogst og transport.

I forbindelse med arbeidet med å tilpasse beregninger av driftskostnader i en ny versjon av GeoSkog bør en også undersøke om det finnes nyere produksjonsdata for hogst og transport som kan tas i bruk enn det som brukes nå (Dale et al. 1993, Dale & Stam 1994). Jonsson (2015) er en mulig kandidat for blødningshogster for å erstatte gamle funksjoner.

I tillegg bør en nøye gå gjennom selve opplegget for beregningene (Eid 1998) med tanke på mulige endringer og forbedringer. Dette gjelder blant annet en utfordring knyttet til det faktum at produksjonsfunksjonen for hogst (Dale et al. 1993) er utviklet for enkelttrær, mens en i GeoSkog bruker størrelser som beskriver middeltreet i bestand. Fordi det er ikke-lineære sammenhenger mellom produksjon og volum for enkelttrær i produksjonsfunksjonene vil det oppstå systematiske feil når en bruker volumet til middeltreet som inngang (Eid 1998). I dagens versjon av GeoSkog er dette justert for med en regresjonsfunksjon basert på data fra 217 bestand som dekker forholdsvis store variasjoner. Det bør vurderes om en skal samle mer bestandsdata og kalibrere disse regresjonsfunksjonene på nytt. En lignende situasjon som for hogstkostnader vil også oppstå ved beregning av tømmerverdi. Volumfunksjonene som brukes for å estimere fordelingen på sagtømmer og massevirke (Hansen et al. 2023) er utviklet for enkelttrær, mens opplegget bruker bestandsmiddelverdier (Dg og H_L). Dette betyr at det også her kan oppstå systematiske feil. En bør derfor undersøke dette nærmere, og eventuelt gjøre justeringer slik som en tidligere har gjort når driftskostnadene beregnes.

2.4. Organisering

I prosjektskisse 1 forutsetter vi at det tas utgangspunkt i dagens versjon av prognoseverktøyet GeoSkog og en videreutvikling av dette. Det forutsettes også at nåværende eiere/brukere av GeoSkog (Statskog, Viken Skog, Jordskifteverket, Trysil kommuneskoger) og eventuelt andre næringsaktører som ønsker å inngå i forvaltningsregimet bidrar i utviklingen av verktøyet, og at en videreutviklet versjon av GeoSkog blir en «felles plattform» som bare finnes i en versjon. De ulike aktørene må selv gjøre tilpasninger for nødvendig dataflyt til egne applikasjoner og databaser. Den nye versjonen av GEOSKOG skal dekke både åpne (flatehogst, frøtrestillingshogst) og lukkede hogstformer (skjermstillingshogst, gruppehogst, bledning og omstilling til bledning).

Tidsrammen for gjennomføringen av prosjektet er 2 år, og det forutsettes at både NMBU, NIBIO og næringsaktørene bidrar i form av personalressurser. Prosjektet finansieres i hovedsak av næringen, men i tillegg vurderes også andre muligheter inkludert finansiering fra Norges Forskningsråd og egenfinansiering fra NMBU og NIBIO. Det må regnes med at prosjektet må dekke lønn tilsvarende 2-3 årsverk til utvikling, programmering og testing. Alle aktive næringsaktører som betaler lisens for GeoSkog får tilgang til bruk av verktøyet. Det er også ønskelig at NMBU og NIBIO får tilgang til bruk av verktøyet i forskning og undervisning.

En ser for seg at følgende faser og oppgaver må gjennomføres i prosjektet:

- Fase 1. Planlegging og beslutninger for ulike oppgaver
- Fase 2. Utvikling av verktøyet
 - Oppgave 1. Opplegg for bruk av celler som beregningsenhet
 - Oppgave 2. Opplegg for implementering av nye bestandsutviklingsmodeller
 - Oppgave 3. Opplegg for implementering av lukkede hogstformer
 - Oppgave 4. Opplegg for beregning av tømmerverdi og driftskostnader
 - Oppgave 5. Programmering
- Fase 3. Praktisk kvalitetssikring, testing og evaluering av verktøyet

Personale med ulik bakgrunn og med kompetanse innen ulike felt er nødvendig for gjennomføringen av prosjektet. Fra næringa trenger vi for det første en gruppe bestående av flere personer med lang og bred praktisk erfaring fra skogbruksplanlegging som kan følge opp ulike utfordringer og avgjørelser som måtte komme opp i prosjektet. I tillegg trenger prosjektet en representant fra næringa med ekspertise i utvikling og bruk av prognoseverktøy som løpende og aktivt kan være med i de ulike fasene av prosjektet, særlig den siste fasen som omfatter kvalitetssikring, testing og evaluering av verktøyet. Fra forskningen trenger vi flere personer med ekspertise i utvikling av prognoseverktøy og/eller skog-inventering, skogproduksjon, skogøkonomi og skogplanlegging. I tillegg må en person fra forskningen med ekspertise i programmering og databasehåndtering, som også har god kunnskap om skog og skogplanlegging, knyttes til prosjektet.

I forbindelse med utviklingen av prosjektsøknaden er det særs viktig at arbeidet koordineres mellom aktørene, og at det blir gjort nøye vurderinger rundt kapasitet (tid), kompetanse og motivasjon for de personalressursene som skal arbeide i prosjektet både fra næringa og forskningen. Relevante og motiverte personer må i størst mulig grad involveres i utviklingen av søknaden.

3. Prosjektskisse 2: Prognoseverktøy på lang sikt (8-10-årsperspektiv)

3.1 Egenskaper til et framtidig prognoseverktøy

Grunnleggende definisjoner av arkitekturen i dagens prognoseverktøy er beskrevet i avsnitt 1.2 og Figur 1. Et framtidig prognoseverktøy for skogbruket i Norge kan ikke direkte bygge på elementene i eksisterende prognoseverktøy slik som beskrevet i prosjektskisse 1. Nye prognoseverktøy som skal utvikles på lang sikt for å kunne bukes i analyser med alle hogstformer trenger fremfor alt nye modeller og algoritmer i «beregningsskjernen». Denne består av enkelttrebaserte bestandsutviklingsmodeller (vekst, mortalitet og innvekst), økonomiske beregninger og mer avanserte optimeringsrutiner.

Et framtidig prognoseverktøy må også kunne benyttes på flere forskjellige romlige/geografiske nivåer. Den grunnleggende enheten for de aller fleste prognoser vil være bestandet også i framtiden. Det vil også være aktuelt å slå sammen flere eksisterende bestand, eller deler av bestand, til et driftsområde. Bestandet eller driftsområdet vil uansett omfatte en rekke beregningsenheter (250 m²) (se avsnitt 2.3.1).

Prognoser og analyser for enkeltbestand er av interesse for planleggere i felt, også i kommunikasjon med skogeierne. Selv om vi anbefaler å bruke enkelttrebaserte vekstmodeller i prognoseverktøyet, så vil disse fremskrive data for bestand.

Ved bruk av prognoseverktøyet for analyser av enkeltbestand kan det også være av interesse å simulere skogbehandlingsalternativer der en velger ulike kombinasjoner av enkelttrær i uttaket, spesielt for lukkede hogstformer og tynning. Slike detaljerte analyser er fremfor alt aktuelt hvis prognoseverktøyet brukes i forskningen.

I prognoser for større områder, dvs. eiendommer eller regioner, brukes prognoseverktøyet fortsatt med bestandet som den grunnleggende enhet. På dette romlige nivået vil det ikke være aktuelt å optimere skogbehandlingen på enkelttrenivå. Behandlingsprogrammene, som sammenlignes i optimeringsrutinen for målsettinger for eiendommer eller regioner, vil være basert på bestandsnivå. Det svenske prognoseverktøyet Heureka er bygd opp på en måte som gjenspeiler forskjeller i romlige nivåer og tilsvarende forskjeller for beregningsrutiner. StandWise, PlanWise og RegWise er forskjellige varianter, men de deler mye av den grunnleggende funksjonaliteten (SLU, 2024a,b)

3.2 Eksisterende prognoseverktøy

Det er ingen eksisterende norske prognoseverktøy som i dag direkte kan brukes til å håndtere alle de behov som er skissert over for framtidige verktøy. Noen systemer er imidlertid likevel interessante eksempler som utgangspunkt for en framtidig systemutvikling.

Prognoseverktøyet T (Gobakken et al. 2008) ble for 20 år siden utviklet for å kunne håndtere ulike typer av inputdata (enkeltrær, diameterfordelinger og bestandsmiddelinformasjon) og med simuleringer av mange alternative behandlingsprogram som kan evalueres. Verktøyet ble testet ut med tanke på beregninger på bestandsnivå for både åpne og lukkede hogster, men er ikke evaluert i tilstrekkelig grad. T er nå utdatert, og hele programkoden må gjennomgå og oppdateres før programmet eventuelt kan benyttes.

I Sverige har man i mer enn 20 år utviklet prognoseverktøyet Heureka (SLU 2024b). Hovedsakelig brukes arealbaserte vekst- og mortalitetsmodeller, men et nytt aktuelt prosjekt er i gang med å modifisere Heureka slik at det skal kunne håndtere også lukkede hogstformer (SLU 2024c). Det kan derfor være interessant å undersøke om en slik versjon av Heureka også kan brukes i Norge. Tidligere forsøk i den retning har vist at vekstmodellene i Heureka ikke kan brukes direkte uten modifikasjoner i Norge (Hoen & Bergseng 2017). Heureka fremskriver i sin nåværende form bestandsutviklingen med standard arealbaserte modeller. Det finnes samtidig enkelttrevekstmodeller (Fahlvik et al. 2014, Fahlvik et al. 2024) som kan brukes som et alternativ, men først og fremst blir disse brukt i kombinasjon med arealbaserte modeller for å simulere utvikling av detaljerte diameterfordelinger, og får å opprettholde en høy presisjon i prognosene på bestandsnivå.

3.3. Utviklingsbehov for et framtidig prognoseverktøy

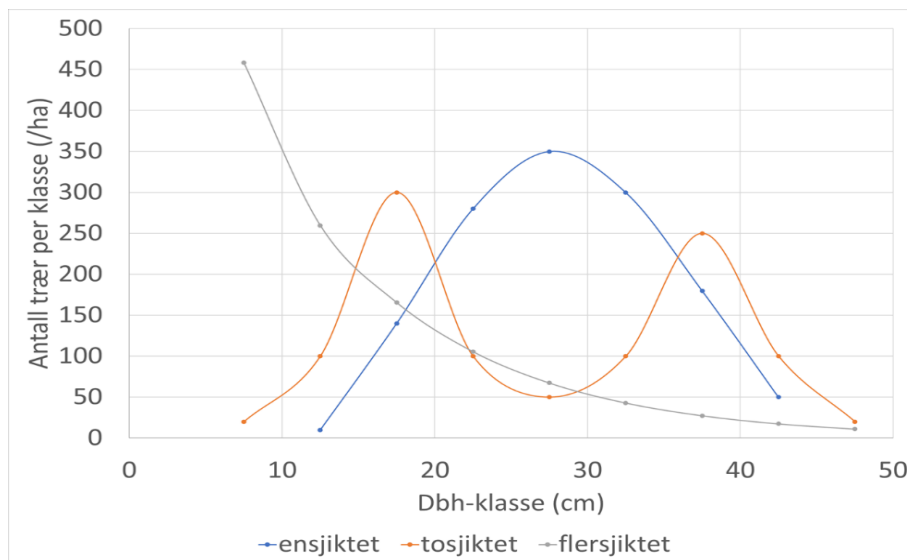
3.3.1. Tilpasninger for lukkede hogstformer

For å kunne håndtere lukkede hogstformer i tillegg til åpne hogstformer i et framtidig prognoseverktøy, må bestandsutviklingsmodellene være basert på enkelttrær. Dette er fremfor alt en konsekvens av det manglende datagrunnlaget for lukkede hogstformer, men det er også viktig fordi det er store variasjoner i konkurransesituasjonen til enkelttrær innenfor et bestand for disse hogstformene. Økt bruk av blandingsbestand i sammenheng med voksestedstilpasning og klimatilpasning i fremtiden krever også bruk av enkelttremodeller. Enkelttremodeller beskriver utviklingen til enkelttrær i stedet for middelverdier for hele bestandet. Som datagrunnlag for utvikling av enkelttremodeller er det mulig å bruke data for trær som er vokst i lignende konkurransesituasjoner som har vært tilfelle i bestand med lukkede hogstformer, selv om skogbehandlingen eller bestandsstrukturen ikke samsvarer med dette. Spesielt i dataene fra Landsskogtakseringen finnes mange trær i gammelskogen som har konkurransesituasjoner som ligner bledning eller andre lukkede hogstformer (Sharma & Brunner 2011, Sharma et al. 2017). Ekstrapoleringer vil i slike tilfeller ofte bare være litt utenfor datagrunnlaget og den grunnleggende ikke-lineære reaksjon på konkurransesituasjoner kan med slike data beskrives på en pålitelig måte. Enkelttrebaserte bestandsutviklingsmodeller har i mange årtier vært i bruk verden rundt for å prognostisere mer komplekse bestandssituasjoner (f.eks. Pretzsch et al. 2003).

Enkelttrebaserte bestandsutviklingsmodeller kan være posisjonsavhengige eller -uavhengige. Posisjonsavhengige enkelttremodeller er best egnet, og i noen bestandsstrukturer det eneste som er egnet, for å beskrive komplekse konkurransesituasjoner på en presis måte. Grunnlagsdataene setter ofte begrensninger for modellutviklingen fordi informasjon om treposisjoner er nødvendig for å utvikle posisjonsavhengige modeller. I Norge har vi fordelen av å ha et omfattende datagrunnlag i Landskogtakseringen som inkluderer informasjon om treposisjoner. Også i prognoser med data-grunnlag fra skogbruksplantakster er det en fordel å ha treposisjoner som inputdata, men denne utfordringen kan delvis omgås ved å simulere treposisjoner.

Posisjonsuavhengige modeller kan fungere bra for noen bestandsstrukturer dersom dataene kommer fra små prøveflater og modellene bare blir brukt for slike små flater. I slike modeller beskrives konkurransesituasjonen ved hjelp av den relative størrelsen på det enkelte tre i forhold til alle trær på flaten (for eksempel i diameterfordelingen, se Figur 6). Dette kan fungere i noen situasjoner, men svikter hvis bestandsstrukturen varierer mye horisontalt, for eksempel i kanten mot åpninger i gruppehogsten. Uten å kjenne trærnes posisjoner er diameterfordelingen den eneste informasjon om bestandsstrukturen.

Posisjonsavhengige modeller er å foretrekke fordi de gir mer fleksibilitet med hensyn på å ekstrapolere til mange ulike konkurransesituasjoner. Konkurransindekser basert på størrelse, treslag og avstand til nabotrærne (Houtmeyers & Brunner 2020, 2022) brukes i slike modeller til å modifisere veksten til enkelttrær fra maksimal mulig vekst til det reelt mulige i en gitt konkurransesituasjon. Lignende konsepter kan brukes for mortalitet og innvekst.



Figur 6. Eksempler på diameterfordelingen i forskjellige bestandsstrukturer.

Bruk av enkelttremodeller muliggjør også mer detaljerte økonomiske beregninger. Selv om det brukes enkelttremodeller for å fremskrive skogbehandlingen og utviklingen i skogen, vil beregningsenheten for økonomiske beregninger fortsatt være bestandet (eller en tilsvarende romlig enhet slik som et driftsområde). Fordelen med enkelttremodeller for de økonomiske beregningene er at enkelttredata kan brukes direkte for å analysere tømmerverdi og driftskostnader, uten først å måtte estimere de aktuelle variablene basert på bestandsmiddelverdier, slik som det blir gjort i dagens prognoseverktøy.

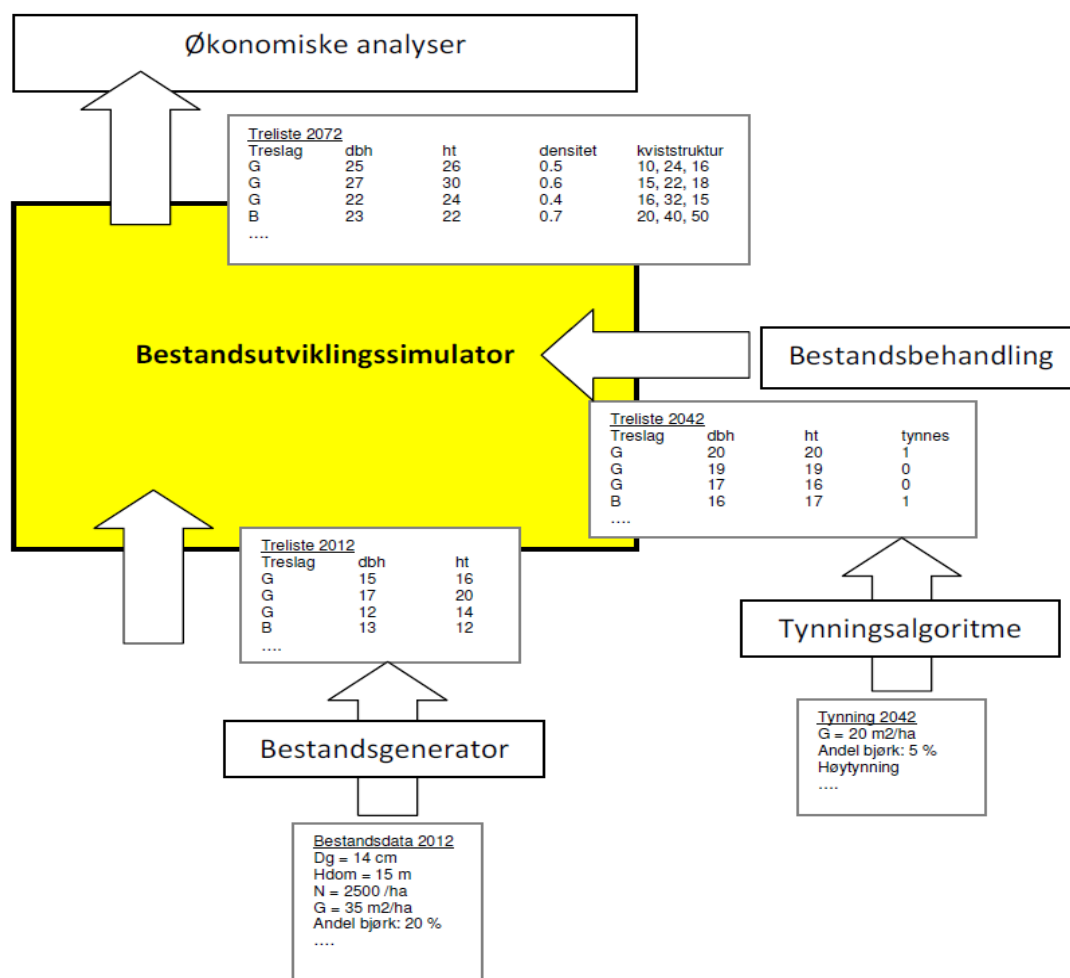
I en prognose vil framskrivninger av skogbehandling og utvikling for enkeltbestand utgjøre grunnlaget for beregninger på eiendoms- eller regionnivå der det settes målsettinger eksempelvis for avvirkningsnivå eller inntektsnivå. I GeoSkog finnes det ingen optimeringsrutiner selv om det er utviklet algoritmer for å oppnå et jevnt kvantum eller en jevn inntekt for eiendommen eller regionen for kommende avvirkningsperioder. I dagens versjon av Gaya brukes optimering (lineær programmering) for å oppnå ulike målsettinger på eiendoms- eller regionnivå. En lignende løsning må også brukes i et framtidig prognoseverktøy. Dette vil være viktig fordi en skogskjøtsel i framtiden, med større variasjoner i metoder, vil føre til at en får mange flere alternative skogbehandlinger å evaluere.

Det kan også være aktuelt å utvikle optimeringsrutiner som setter sammen beregningsceller til behandlingsenheter over tid på en dynamisk måte (se f.eks. Wilhelmsson et al. 2021). Videre kan det for analyser og prognoser i enkeltbestand være aktuelt å utvikle rutiner for optimering av skogbehandlingen på enkelttrenivå i analyser av uttaket som styrer innretningen av tynninger og lukkede hogster. Begge disse eksemplene på optimeringsrutiner er kanskje mest interessante for forskningen, men dersom de utvikles kan det være aktuelt å vurdere om slike rutiner på sikt skal knyttes til et framtidig prognoseverktøy også for næringen.

3.3.2. Bestandsutviklingsmodeller, bestandsgenerator og økonomiske analyser

Den viktigste oppgaven i et framtidig prosjekt vil være å utvikle nye bestandsutviklingsmodeller. Dette inkluderer modeller for enkelttrevekst i diameter og høyde, mortalitet og innvekst. Beslutninger om datagrunnlaget og modelltype (posisjonsavhengighet) må tas når prosjektforslaget utarbeides. Dette må være basert på arkitekturen i prognoseverktøyet og kriterier som for eksempel datagrunnlaget som kreves for modellutviklingen og for modellbruken (prognosene).

I tillegg vil det være nødvendig å utvikle andre delmodeller som for eksempel simulerer treposisjoner eller diameterfordelinger basert på inputdata dersom slik informasjon ikke er tilgjengelig (bestandsgenerator), eller som velger ut enkelttrær i tynninger eller lukkede hogstformer basert på en beskrivelse av inngrepet på bestandsnivå (tynningsalgoritme) (Figur 7).



Figur 7. Bestandsgenerator og tynningsalgoritmen er delmodeller som supplerer bestandsutviklings-simulatoren basert på enkelttremodeller i et prognoseverktøy (Brunner 2012).

Noen av disse delmodellene eller metodene illustrert i Figur 7 har tidligere blitt utviklet i Norge basert på Landsskogtakseringsdata (Eid & Tuhus 2001, Bollandsås & Næsset 2009, Sharma & Brunner 2011, Sharma et al. 2017, Siipilehto et al. 2020, Condes et al. 2024) eller andre datakilder (Solem 2010, Fredriksson 2010, Andersson 2015, Vermundsdammen 2015, Slot 2019, Houtmeyers & Brunner 2020, 2022). Dette har imidlertid aldri blitt utviklet til en samlet bestandsutviklingsmodell.

Fremtidens bestandsutviklingsmodeller må også kunne håndtere en lang rekke utfordringer utover variasjoner i hogstformene. Disse utfordringene vil kreve endrede metoder i utviklingen av enkelt-tremodeller i forhold til de som er brukt i forskningen fram til nå, noe som vil resultere i mer komplekse bestandsutviklingsmodeller.

- Blandingsbestand er allerede i dag mer normalen enn unntaket, og treslagsblanding vil øke i sammenheng med voksestedstilpasning og klimatilpasning.
- Et klima i endring og observasjoner om økt vekst betyr at effekter av vær og klima på vekst og mortalitet må inkluderes i prognoseverktøy (se også avsnitt 2.3.2). Spesielt økt mortalitet knyttet til klimaendringene vil stille store utfordringer ved utvikling av modeller fordi mye kunnskap og empiri mangler om dette.
- Nye treslag vil bli tatt i bruk som klimatilpasningstiltak og i andre sammenhenger.
- Innvekst og naturlig foryngelse i lukkede hogstformer vil være vanskelig å predikere fordi dette er komplekse og langvarige prosesser, men fremfor alt fordi det mangler data.
- Høydebonitering kan ikke brukes i fleraldrede og flersjiktete bestand og nye konsepter må utvikles for å estimere produksjonspotensialet på voksestedet. I denne sammenheng må også småskalavariasjonen i voksestedsbetingelene tas bedre høyde for enn i dagens prognoseverktøy, for eksempel med bonitetsestimater for beregningsenhetene.
- Tynningsmetodene har endret seg de siste årtier (f.eks. stikkveiuttak, som ikke er representert i forsøksdata) og vil endre seg videre (f.eks. mot kronetynning i tillegg til lavtynning).

Bestandsmodeller for ensaldrede og treslagsrene bestand vil ikke være i stand til å prognostisere utviklingen for de komplekse bestandsstrukturer som vi allerede i dag finner på store deler av skogarealet i Norge, og som vil bli langt mer komplekst i fremtiden.

Datagrunnlaget for utvikling av enkelttremodeller i Norge vil fremfor alt måtte baseres på Landsskogtakseringen. Det finnes noe forsøksdata for bledning (Moan 2021), men ingen for skjermstilling og gruppehogst. Eksisterende forsøksdata kan imidlertid med fordel brukes til å teste bestandsutviklingsmodellene. Også modeller for ensaldrede og treslagsrene bestand må testes mot empiriske data på bestandsnivå, og her vil forsøksdata fra NIBIO være uunnværlig. For å øke tilfanget på data kan Landsskogtakseringens prøveflater kombineres med tilsvarende data fra Sverige og Finland (f.eks. Siipilehto et al. 2020) eller suppleres med forsøksdata fra disse landene (Goude et al. 2022). Mangel på data om naturlig foryngelse og innvekst i alle datakilder vil generelt være en stor utfordring.

Bruken av enkelttremodeller i prognoseverktøy krever inputdata for enkelttrær. Slike data er ikke tilgjengelig fra dagens skogbruksplantakster, men vil antagelig i økende grad bli mer tilgjengelig i fremtiden basert på mer detaljerte analyser av fjernmålingsdata som genererer enkelttredata eller informasjon om bestandsstrukturen (eksempelvis diameterfordeling).

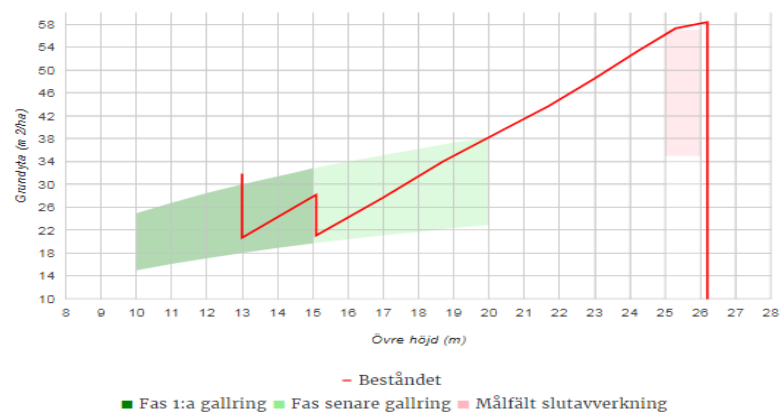
Enkelttremodeller gir også muligheter til å visualisere bestandsstrukturen og bestandsutviklingen (Figur 3 - 5) (Brunner 2005). Dette kan for eksempel brukes når planleggere kommuniserer med skogeiere i felt om ulike behandlingsalternativer. Her kan en variant av prognoseverktøyet i en app på nettbrett brukes som beslutningsstøtte ved å visualisere utviklingen og samtidig vise de økonomiske konsekvensene av ulike alternativer. Lignende verktøy har tidligere blitt brukt i Sverige med INGVAR og Gallringsplan (Figur 8), som dessverre fra i år på grunn av softwaresikkerhetsproblemer ikke lenger er tilgjengelig (Skogforsk 2024).

Gallringsplan



Gallringsplan är ett beslutstöd för avverkningsplanering som hjälper dig att analysera effekterna av röjning och gallring, på kort och lång sikt.

Resultat - G30



Uttag	Gallring 1	Gallring 2	Slutavverkning	Summa
Totalålder (år)	29	34	74	
Volym (m³sk/ha)	75	56	691	822
Volym (m³fub/ha)	58	42	600	700
Medelstam (m³fub/stam)	0,068	0,123	0,869	
Diameter, dgk (cm)	13,6	16,6	33,7	
Andel uttag i mellanzon (%)	67,6	99,6	100,0	
Stamantal (st/ha)	856	346	690	1892
Kvarstående efter	Gallring 1	Gallring 2	Slutavverkning	
Övre höjd (m)	13,0	15,1	-	
Grundfylla (m³/ha)	20,7	21,1	-	
Virkesförråd (m³sk/ha)	146	163	-	
Virkesförråd (m³fub/ha)	116	140	-	
Stamantal (st/ha)	1197	781	-	
Medelstam (m³fub/stam)	0,097	0,179	-	
Diameter, dgk (cm)	18,7	22,1	-	
Löpande tillväxt (m³sk/ha, år)	14,9	14,9	-	

Spara resultat för jämförelse

Tillbaka

Ny beräkning

Figur 8. Screenshot fra produksjonsresultater i det svenske programmet Gallringsplan (Skogforsk 2024).

For de økonomiske analysene i prognoseverktøyet kreves nye data som beskriver tømmerverdi og kostnader for lukkede hogstformer (f.eks. Jonsson 2015). Gitt det fortsatt begrensede omfanget og korte erfaringen med disse hogstformene, vil tilgang på data være en sterk begrensning. Det kan derfor være nødvendig å utvikle modeller som estimerer kostnader basert på et begrenset datagrunnlag. De økonomiske beregningsmetodene vil ikke være forskjellige fra tidligere prognoseverktøy for ensaldrede og treslagsrene bestand.

3.4. Utviklingen av et framtidig prognoseverktøy

3.4.1. Mulige utgangspunkt for utviklingen

Som «rammeverk» for å simulere bestandsutvikling med enkelttremodeller er det i Norge laget to ulike verktøy, SiTree fra NIBIO (Antón-Fernández & Astrup 2022) og TreeSim fra Høgskolen i Innlandet (Nabhani & Sjølie 2022), som begge kombinerer alle delmodeller som er nødvendige for å gjøre slike simuleringer. De nødvendige delmodellene i disse simulatorene er basert på gamle modeller eller bare antakelser, men de kan likevel være et utgangspunkt for utvikling av et framtidig prognoseverktøy. Begge simulatorene er begrenset til bestandsutviklingen, og inkluderer ikke økonomiske beregninger eller optimeringsrutiner.

Simone Bianchi fra LUKE i Finland har i 2023 begynt å samle Landsskogtakseringsdata fra Norge, Sverige og Finland for å utvikle nye vekstmodeller. Samtidig har han samlet data fra blodningsforsøk i alle tre land, som skal brukes til å analysere effekter av bestandstetthet på vekst og innvekst. Et samarbeid rundt dette vil være høyst aktuelt ved utvikling av et framtidig prognoseverktøy i Norge.

I Sverige er et aktuelt prosjekt i gang med å modifisere Heureka slik at det kan håndtere lukkede hogstformer (SLU 2024c). Prosjektet inkluderer utvikling av nye vekstmodeller for enkelttrær og implementering av disse i Heureka. Det skal også utvikles en fritt tilgjengelig og brukervennlig web-applikasjon av Heureka hvor de nye modellene er implementert. Det vil her bli tatt hensyn til krav og innspill, som identifiseres som en del av prosjektet, fra skogeiere og skogforvaltere om bruk av planleggingsverktøy for lukkede hogstformer. Det kan derfor være interessant å undersøke om en i et framtidig prosjekt kan bruke en slik versjon av Heureka, med en del tilpasninger, også i Norge. Det kan også være interessant å samarbeide med dette miljøet om delproblemstillinger knyttet til for eksempel utvikling av bestandsutviklingsmodeller og brukerfunksjonalitet for prognoseverktøyet.

3.4.2. Tidshorisont

Utviklingen av Heureka i Sverige de siste 30 år viser at utvikling og implementering av prognoseverktøy er et svært omfattende arbeid som tar lang tid og krever store ressurser (Dahlin et al. 1997). Vi har derfor satt tidshorisonten for utviklingsprosjektet så lang som til 8-10 år fordi vi har indentifisert en lang rekke forskningsoppgaver som må løses (avsnitt 3.3). Arbeidet vil kreve flere PhD-prosjekter og/eller mange forskerårsverk. Arbeidet vil bestå i å utvikle alle delmodeller og teste de samlet i en bestandsutviklingssimulator. Etter det gjenstår arbeidet med å utvikle og programmere algoritmer for økonomiske analyser, optimeringsrutiner, visualisering og datahåndtering. Prognoseverktøyet vil antagelig også måtte utvikles med flere versjoner som kan løse de ulike oppgaver som bestands-simuleringer i appen til planleggerne, via analyser for skogeiendommer til regionale analyser med detaljerte behandlingsalternativer. I et alternativt scenario, hvor deler eller hele prognoseverktøyet baseres på Heureka, må også bestandsutviklingsmodellene testes mot norske data og beregnings-rutinene tilpasses norske forhold.

3.4.3. Ressursbehov

Omfanget av oppgavene (avsnitt 3.3) og tidshorisonten (avsnitt 3.4.2) antyder at prosjektet krever store ressurser i form av personale og finansiering. Personale med kompetanse innen mange forskjellige felt er nødvendig for utviklingen. Dette omfatter vekstmodellering, økonomiske analyser, optimering, programmering og databasehåndtering. En utvikling over så lang tid er sårbar for at personale med nøkkelkompetanse av ulike årsaker forsvinner. Rekrutteringsproblemer generelt i

skogforskningen, og spesielt i vekstmodellering, gjør at personale med kompetanse kan bli en utfordring for prosjektet.

Finansiering av et prosjekt med et slikt omfang og med så lang tidshorisont kan ikke alene gjennomføres med kortvarig finansiering gjennom Forskningsrådet eller andre kilder. En målrettet utvikling av et prognoseverktøy for skognæringen må også finansieres av skognæringen selv. Dette vil kreve vesentlige forpliktelser av større summer over lang tid. Det bør også diskuteres om et slikt utviklingsprosjekt for skognæringen krever en offentlig støtte i form av rammebevilgninger fra LMD.

3.5. Forslag til prosjektdesign

Vi har tidligere antydnet to forskjellige alternativer til å utvikle et prognoseverktøy for Norge. Alternativ 1 vil være å utvikle et prognoseverktøy helt fra bunnen i Norge. Alternativ 2 er å samarbeide med svenske kolleger for å videreutvikle Heureka i en retning slik at det også kan brukes i Norge og oppfyller krav fra norsk skognæring. Begge alternativene må utredes nærmere og spesifiseres i detalj når prosjektforslaget utarbeides.

Samarbeid mellom forskjellige forskningsinstitusjoner er nødvendig for å gjennomføre oppgaven. Kompetanse innenfor vekstmodellering, økonomiske analyser og optimering er i dag fordelt mellom NMBU og NIBIO. NIBIO vil ha en avgjørende rolle når det gjelder grunnlagsdataene for utviklingen av bestandsutviklingsmodeller. NIBIO har i dag også et omfattende miljø innen vekstmodellering som må bidra til utviklingen. NMBU har over lang tid utviklet prognoseverktøy med fokus på økonomiske analyser og optimering, og har også i dag kompetente forskere innen disse feltene, i tillegg til vekstmodellering. Det kan også tenkes at andre forskningsfelt eller -institusjoner må involveres i utviklingen. Samarbeid mellom mange forskjellige forskere plassert på forskjellige institusjoner betyr også en økt sårbarhet for prosjektet og må derfor planlegges nøye.

Et fremtidig prognoseverktøy for skogbruket i Norge kan ikke bygges direkte på eksisterende prognoseverktøy slik som beskrevet i projektskisse 1. Verktøyet må planlegges å være enhetlig for hele landet og alle aktører, særlig på grunn av det omfattende finansieringsbehovet som en slik utvikling forutsetter.

4. Prosjektskisse 3. Egnethet for lukkede hogstformer (3-årsperspektiv)

4.1. Bakgrunn

I avsnitt 1.1 er tidligere tilnærminger til egnethetsvurderinger for lukkede hogstformer i Norge oppsummert. Diskusjonene i forprosjektet har vist at det også i dag finnes et stort behov for metoder til å vurdere egnethet for lukkede hogstformer. Dagens situasjon bærer preg av at planleggerne stadig oftere får bestillinger om lukkede hogstformer, men at de mangler en passende kompetanse i gjennomføringen av slike oppdrag. Det haster derfor med å videreutvikle en metode for egnethetsvurderinger. Skogkurs er også i gang med å utvikle et kurs om egnethetsvurderinger.

4.2. Metoder og organisering

4.2.1 Bruk av fjernmålte data

Som et resultat av diskusjonene i det foreliggende prosjektet har prosjektpartnerne definert en ny arbeidsoppgave i prosjektet SmartForest, hvor de også samarbeider. Arbeidet går ut på å bruke fjernmålte data til å predikere skoglige variabler som indikerer egnethet for lukkede hogstformer. I perioden 2024 – 2027 skal det derfor utvikles metoder til å kvantifisere noen av kriteriene for egnethet basert på eksisterende data fra lasertakster eller kartdata. En slik kartlegging av egnethet basert på billige fjernmålte data vil kunne bli et nyttig hjelpemiddel for å bestemme hvor det skal gjennomføres mer samlende og detaljerte feltbaserte vurderinger av egnethet.

4.2.2 Samlet egnethetsvurdering i felt

Andreas Brunner beskrev i februar 2024 en metode for egnethetsvurderinger for lukkede hogstformer i et notat på 31 sider, samt en liste med 54 kriterier på 8 sider. I tillegg til en beskrivelse av trærne i bestandet eller driftsområdet som går ut over det som er tilgjengelig i takstdata, kreves det en detaljert kartlegging av forholdene på voksestedet og av forvaltningsmålene og kompetansen til skogeieren. Kriteriene varierer for de fire grunnleggende lukkede hogstformene. Ofte må hogstformene modifiseres for å tilpasse dem til situasjonen. Egnethetsvurderingen er en kompleks planleggingsprosess som krever høy fagkompetanse av planleggeren og som ikke kan gjennomføres uten feltbefaring.

Metoden drøftet av Brunner er bare et første utkast og må videreutvikles for å kunne brukes i praksis. Utviklingen krever innspill fra planleggerne i skognæringen, gjerne fra personer som samtidig har omfattende kunnskap om lukkede hogstformer. Metoden bør resultere i en app som planleggerne kan bruke. Appen må inneholde kriterielisten, som hjelper planleggeren å huske alle kriteriene, og en mulighet til å registrere svarene. I tillegg bør det være mulig å overføre eksisterende data fra takster og andre eksisterende kartdata for driftsområdet til i appen. Appen kan også delvis kunne kompensere for manglende kompetanse om lukkede hogstformer hos planleggerne ved å gi forklaringer om kriteriene og de lukkede hogstformene. Utviklingen av selve appen og koblingen til eksisterende data er en oppgave som næringspartnerne må gjennomføre.

5. Litteratur

- Allen M.G., Antón-Fernández, A. & Astrup, R. (2020). A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned managed Norway spruce forests in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 35:5-6, 238-251, DOI: 10.1080/02827581.2020.1773525.
- Andersson, S. (2015). Tilvekst på bestands- og enkelttre nivå ti år etter selektiv hogst etter KONTUS-prinsippet. Masteroppgave NMBU.
- Antón-Fernández, C. & Astrup, R. (2022). SiTree: A framework to implement single-tree simulators. *SoftwareX*, Volume 18, June 2022, 100925. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100925>
- Blingsmo, K. (1984). Diametertilvekstfunksjoner for bjørk-, furu- og granbestand. *Rapp. Nor. inst.skogforsk.* 7/84:1-22.
- Blingsmo, K. & Veidahl, A. (1992). Funksjoner for bruttopris av gran- og furutrær på rot. *Rapp.Skogforsk.* 8/92:1-23.
- Bollandsås, O.M. (2007). Uneven-aged forestry in Norway: Inventory and management models. PhD-Thesis: 2007:30. Department of Ecology and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Bollandsås, O.M., Buongiorno, J. & Gobakken, T. (2008). Predicting the growth of stands of trees of mixed species and size: A matrix model for Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2008; 23: 167-178. <https://doi.org/10.1080/02827580801995315>
- Bollandsås, O.M. & Næsset, E. (2009). Weibull models for single-tree increment of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway. *Scand. J. For. Res.*, 24(1): 54-66.
- Braastad, H. (1977). Tilvekstmodellprogram for bjørk. *Rapp.Nor.inst.skogforsk.* 1/77:1-17.
- Braastad, H. (1982). Naturlig avgang i granbestand. *Rapp.Nor.inst.skogforsk.* 12/82:1-46.
- Brunner, A. (2005). SILVAdk: Manual. Skov & Landskab, Hørsholm: 20 s.
- Brunner, A. (2024). Variable-density thinning designs for harvester-based operations in Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/02827581.2024.2388054>
- Brunner, A., Hanssen, K.H. & Granhus, A. (2023). Selektive hogster - en kunnskapssammenstilling. MINA fagrapport 88. 53 s.
- Cattaneo, N., Astrup, R., & Anton-Fernandez, C. (2024). PiXSim: Enhancing high-resolution large-scale forest simulations. *Software Impacts* 21 (2024) 100695.
- Condes, S., Bielak, K., Brazaitis, G., Brunner, A., Löf, M., Pach, M. & del Rio, M. (2024). Influence of species interactions and climate on tree mortality in mixed stands of *Pinus sylvestris*, *Betula* spp., and *Picea abies*. *European Journal of Forest Research*. Submitted manuscript.
- Dahlin, B., Ekö, P.-M., Holmgren, P., Lämås, T. & Thureson, T. (1997). Heureka, - a model for forest resource management. A research strategy presented at the Faculty of Forestry, Swedish University of Agricultural Sciences. (I. S. w. E. summary.), Trans.). Faculty for Forestry, Swedish Univ. of Agric. Sciences.
- Dale, Ø. & Stamm, J. (1994). Grunnlagsdata for kostnadsanalyse av alternative hogstformer. *Rapp.Skogforsk* 7/94:1-37.
- Dale, Ø., Kjøstelsen, L. & Aamodt, H.E. (1993). Mekaniserte lukkede hogster. Side 3-23 i: Aamodt, H.E. (ed.). Flerbruksrettet driftsteknikk. *Rapp.Skogforsk* 20/93:1-40.
- Eid, T. (1998). Langsiktige prognoser og bruk av prestasjonsfunksjoner for å estimere kostnader ved mekanisert drift. Rapport fra skogforskningen 7/98: 1-31.
- Eid, T. & Hobbestad, K. (1999). Avvirk-2000 – et Edb-program for langsiktige investerings-, avvirknings- og inntektsanalyser i skog. Rapport Supplement fra Skogforskningen, 8/99: 1-63.

- Eid, T. & Hobbestad, K. (2000). AVVIRK-2000 - a large scale forestry scenario model for long-term investment, income and harvest analyses. *Scand. J. For. Res.* 15:472-482.
- Eid, T. & Hobbestad, K. (2005). Langsiktige investerings-, avvirknings- og inntektsanalyser for skog med Avvirk-2000. *Aktuelt fra skogforskningen.* 2/05: 1-29.
- Eid, T. & Tuhus, E. (2001). Models for individual tree mortality in Norway. *For. Ecol. Manage.*, 154 (1-2): 69-84.
- Fahlvik, N., Elfving, B. & Wikström P. (2014). Evaluation of growth functions used in the Swedish forest planning system Heureka. *Silva Fenn.* 48 (2):1013. doi:10.14214/sf.1013.
- 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*, DOI:10.1080/02827581.2024.2303401
- Fredriksson, C. (2010). Modellering av skördarförarens trädval vid gallring, Universitet for miljø- og biovitenskap, Ås, 72 pp.
- Gobakken, T., Lexerød, N. & Eid, T. (2008). T – A forest simulator for bioeconomic analyses based on models for individual trees. *Scand. J. For. Res.* 23:250-265.
- Goude, M., Erefur, C., Johansson, U. & Nilsson, U. (2022). Hyggesfria skogliga fältforsök i Sverige. En sammenstilling av tilgjengelige langtidsforsök. (Clearcut-free forest experiments in Sweden. A summary of available long-term experiments.). SLU, Enheten for skoglig fältforskning, Rapport, 22.
- Granhus et al. (2024). Effekter på karbondynamikk, miljø og næring ved økt bruk av lukkede hogstformer. NIBIO rapport 10 (48).
- Hansen, E., Rahlf, J., Astrup, R. & Gobakken, T. (2023). Taper, volume, and bark thickness models for spruce, pine, and birch in Norway, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 38:6, 413-428, DOI: 10.1080/02827581.2023.2243821
- Hauglin, M., Lexerød, N.L & Eid, T. (2009). Bruk av digitale flybilder til tolking av egnethet for selektive hogster. *Forskning fra Skog og landskap* 4/09: 1-12.
- Hobbestad, K. & Verdú, F. (2014). Geoskog – dokumentasjon. Versjon 1.2.2. 146 s.
- Hoen, H.F. & Eid, T. (1990). En modell for analyse av behandlingsstrategier for en skog ved bestandssimulering og lineær programmering. *Rapp.Nor.inst. skogforsk.* 9/90:1-35.
- Hoen H. & Gobakken, T. (1997). Brukermanual for bestandssimulatoren GAYA V1.20. Institutt for Skogfag, Norges Landbrukshøgskole. Intern Rapport. 59 s.
- Hoen, H.F. & Bergseng, E. (2017). Norske funksjoner i Heureka og evaluering av Heureka for norske skogforhold. Upublisert rapport fra prosjektet "Sustainable Utilization of Forest Resources in Norway (SUFRN) fra Bionær-programmet i Norges Forskningsråd (Bionær 225329). 43 s.
- Houtmeyers, S. & Brunner, A. (2020). Thinning responses of individual trees in mixed stands of Norway spruce and Scots pine. *Scand. J. For. Res.*, 35(7): 351-366.
- Houtmeyers, S. & Brunner, A. (2022). Individual tree growth responses to coinciding thinning and drought events in mixed stands of Norway spruce and Scots pine. *For. Ecol. Manage.*, 522: 120447.
- Jonsson, R. (2015). Prestasjon och kostnader i blädning med skördare och skotare. Arbetsrapport från Skogforsk (863).
- Kühne, C., McLean, J.P., Maleki, K., Antón-Fernández, C. & Astrup, R. (2022). A stand-level growth and yield model for thinned and unthinned even-aged Scots pine forests in Norway. *Silva Fennica* vol. 56 no. 1 article id 10627. 21 p. <https://doi.org/10.14214/sf.10627>
- Kühne, C., McLean, J.P. & Hanssen, KH. (2023). Oppdaterte produksjonstabeller og bonitetskurver for gran og furu i Norge. NIBIO rapport 9 (109).

- Lexerød, N. (2007). Planning, management and economy of selective cutting in Norway. PhD Thesis: 2007:36. Department of Ecology and Natural Resource Management, Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Lexerød, N. & Eid, T. (2004). Potensielt areal for selektive hogster i barskog - en kvantifisering basert på Landsskogtakseringens prøveflater. Rapport fra skogforskningen 7/04. 35 s.
- Lexerød, N. & Eid, T. (2005). Sammenligning av metoder for registrering av egnethet for selektive hogster ved praktisk skogbruksplanlegging. Rapport fra skogforskningen 5/05. 26 s.
- Lexerød, N. & Eid, T. (2006). Assessing suitability for selective cutting using a stand level index. *Forest Ecology and Management* 237:503-512.
- Maleki, K., Astrup, R., Kuehne, C., McLean, J.P. & Antón-Fernández, C. (2022). Stand-level growth models for long-term projections of the main species groups in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 37:2, 130-143, DOI:10.1080/02827581.2022.2056632.
- Maleki, K., Astrup, R., Cattaneo, N., Henao, W.L. & Antón-Fernández, C. (2024). The effects of data aggregation on long-term projections of forest stands development. *Forest Ecosystems* 11 (2024) 100199. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100199>
- Moan, M. (2021). Effects of stand structure and stand density on volume growth and ingrowth in selectively cut stands in Norway. Masteroppgave Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning, NMBU.
- Nabhani, N. & Sjølie, H.K. (2022). TreeSim: An object-oriented individual tree simulator and 3D visualization tool in Python. *SoftwareX* 20 (2022) 101221. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101221>
- Puliti, S. (2015). Droner i Skogbruket - Taksering av skog. <https://vimeo.com/128856284>.
- Pretzsch, H., Biber, P. & Dursky, J. (2002). The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *For. Ecol. Manage.*, 162(1): 3-21.
- Pukkala, T., Packalen, P., & Heinonen, T. (2014). Dynamic Treatment Units in Forest Management Planning. In (pp. 373-392). https://doi.org/10.1007/978-94-017-8899-1_12.
- Rautio, P. et al. (eds.) (2025). Continuous Cover Forestry in Boreal Nordic Countries. *Managing Forest Ecosystems* 45, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70484-0_5.
- Sharma, R.P. & Brunner, A. (2017). Modeling individual tree height growth of Norway spruce and Scots pine from national forest inventory data in Norway. *Scand. J. For. Res.*, 32(6): 501-5014.
- 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. *For. Ecol. Manage.*, 262(12): 2162-2175.
- Siipilehto J., Mäkinen H., Andreassen K. & Peltoniemi M. (2021). Models for integrating and identifying the effect of senescence on individual tree survival probability for Norway spruce. *Silva Fennica* vol. 55 no. 2, article id 10496. <https://doi.org/10.14214/sf.10496>.
- Skogforsk (2024). INGVAR – beslutsstöd för gallring och röjning. (<https://www.skogforsk.se/rad-stod/beslutsstod-verktyg/ingvar/>) Sett 11.11.2024.
- Skoklefald, S. (1989). Planting og naturlig foryngelse av gran under skjerm og på snauflete. Norsk institutt for skogforskning. Rapport nr. 8, 1989.
- Slot, M. (2019). Effekt av tetthet i furu på veksten til gran i eldre tosjiktede blandingsbestand, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 42 pp.
- SLU (2024a). About Heureka. (https://www.heurekaslu.se/wiki/About_Heureka#Projections). Sett 11.11.2024.
- SLU (2024b). Heureka systemet. (<https://www.slu.se/heureka>). Sett 11.11.2024.

- SLU (2024c). Nytt onlineverktøy for hyggesfritt tas fram i nytt prosjekt. (<https://www.slu.se/ew-nyheter/2022/12/nytt-online-verktog-for-hyggesfritt-tas-fram-i-nytt-projekt/>) Sett 11.11.2024.
- Solem, T. (2010). Test av konkurranseindekser i ung blandingsskog [A test of competition indices in young mixedwoods], Norwegian University of Life Sciences, 29 pp.
- Strand, L. (1967). Høydekurver for bjørk. Side 291-296 i Braastad, H. Produksjonstabeller for bjørk Meddr.norske SkogforsVes. 22:265-365.
- Strimbu, V.F, Eid, T. & Gobakken, T. (2023). A stand level scenario model for the Norwegian forestry – a case study on forest management under climate change. *Silva Fennica*, Vol. 57 (2), article id 23019.
- Svensson, A., Eriksen, R., Hysten, G. & Granhus, A. (2021). Skogen i Norge. Statistikk over skogforhold og skogressurser i Norge for perioden 2015-2019. NIBIO Rapport, 142(7): 1-53.
- Tveite, B. (1967). Sambandet mellom grunnflateveid middelhøyde (H_L) og noen andre bestandshøyder i gran- og furuskog. Meddr. norske SkogforsVes. 22:483-538.
- Tveite, B. (1976). Bonitetskurver for furu. Intern rapport. [Upublisert].
- Tveite, B. (1977). Bonitetskurver for gran. Medd.Nor.inst.skogforsk. 33:1-84.
- Vermundsdammen, S. (2015). Testing av tynningsalgoritmen ThinningSelector opp mot reelle tynninger i grandominert (*Picea abies* (L.) Karst) skog. NMBU, Ås.
- Wilhelmsson, P., Sjödin, E., Wästlund, A., Wallerman, J., Lämås, T & Öhman, K. (2021). Dynamic treatment units in forest planning using cell proximity. *Canadian Journal of Forest Research*. 51(7): 1065-1071. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0210>