



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2025 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

**Prediksjon av ungskogpleiebehov på
bestandsnivå ved hjelp av fjernmåling:
dronebasert bildematching og fotonlaser**

Predicting the Needs of Tending in Young Forest
Stands Using Remote Sensing: Drone-Based Image
Matching and Photon Lidar

Mathias Nordhagen
Skogfag

Forord

Det at jeg skulle studere skogfag, var noe jeg aldri hadde sett for meg at jeg skulle gjøre, før jeg plutselig skulle søke høyere utdanning. Slik at jeg kom til Ås som ung student og skulle der studere. Gjennom min utdanning har jeg dyrket en stor interesse for skogfaget, og spesielt skogkultur og skogplanlegging. Interessen innen skogkultur kan jeg takke skogkulturleder Anders Sandbæk i Glommen Mjøsen Skog SA for, etter å ha vikariert for han flere somre under studietiden. På bakgrunn av dette tok jeg tok kontakt med Glommen Mjøsen Skog SA sin planavdeling og skogavdeling for å høre om de var interessert i en masteroppgave som kombinerer skogplanlegging og skogkultur. Her kom det frem at å undersøke om drone kan brukes mer effektivt i kontrahering av ungsogpleie burde bli undersøkt nærmere. Etter å ha arbeidet med kontrahering av ungsogpleie gjennom flere somrer, ble jeg interessert i en slik oppgave for å undersøke hvordan dette arbeidet kan effektiviseres, men med like god nøyaktighet.

Jeg ønsker å takke min hovedveileder, Dr. Hans Ole Ørka for god veiledning og gode råd underveis. Jeg vil også takke mine medveiledere Dr. Ole Martin Bollandsås og professor Terje Gobakken for konstruktive råd underveis. Jeg ønsker også å takke Torjus Birkeland og Gerhard Berger Sørensen-Fuglem for gode faglige diskusjoner underveis i masterløpet. En stor takk rettes til Glommen Mjøsen Skog sin planavdeling SA for lån av drone under feltarbeidet.

Kapittelet er også snart ved veis ende, slik at det også er på tide å takke familie og gode venner for gjennomlesing, faglige innspill og motivasjon under masterløpet. Jeg vil også benytte anledningen til å takke HKL V 2024-2025 for gode samtaler og mye latter over en kaffekopp på lesesalen. Ikke minst vil jeg takke Den X-Clusive Stiftelse PB, Samfunnsstyret 2024, Skogbrukerforeningen og så klart Tømmerdalens nåværende og tidligere beboere for alle de sosiale og faglige årene på Ås.

Tack psamt Pskaal!!

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 12. mai 2025

Mathias Nordhagen

Sammendrag

Det er viktig med god planlegging og gode takster for å kunne gjennomføre både tidsriktig og riktige tiltak i skogen. Dette er spesielt viktig i ungskogen, som er den fasen i omløpet man avgjør hvordan fremtidsskogen skal bli. Dersom skogeier skal kunne planlegge godt er man avhengig av verdifulle skogtakster og nok informasjon om hver arealenhet. I dag brukes som regel flybåren laserskanning til dette, men droneaktiviteten i skogbruket øker for å få oversikt i sanntid. Hovedmålet med denne masteroppgaven var å predikere behovet for ungskogpleie på bestandsnivå ved bruk av dronebasert bildematching og single photon lidar. Prediksjonene ble videre brukt for å predikere behovet for ungskogpleie hvert enkelt år mellom to skogtakster, slik at skogeier til enhver tid kan vite når det er behov for ungskogpleie.

Det ble kalibrert totalt fire regresjonsmodeller, henholdsvis to for FLS-data og to for dronedata, til prediksjoner av middelhøyde og antall ryddestammer. Datasettet bestod av 26 bestand med 8-12 prøveflater á 40 m² og totalt 68 tilfeldig utlagte cluster. Ungskogen måtte ha en høyde mellom 0,5-8 m, og det skulle ikke nylig være utført ungskogpleie. For prøveflatene ble det beregnet både høyde- og tetthetsvariabler som beskriver den romlige strukturen til punktskyen. Prediksjonsevnen av modellen ble evaluert, og den gjennomsnittlige prediksjonsfeilen (RMSE) for drone er 1,21-1,28 m for middelhøyden og 157-170 for antall ryddestammer. Det ble lavere RMSE for middelhøyden ved bruk av logaritmisk transformasjon. Samtlige modeller var signifikante i sin helhet, men ikke alle forklaringsvariablene var statistisk signifikante.

Prediksjonene ble fremstilt i en krysstabell, som for drone ga 45% nøyaktighet i det første året og 88% nøyaktighet. Flybåren laserskanning ga en nøyaktighet på 76% i det første året og 87% i år 15.

Denne masteroppgaven presenterer en metodikk for å si noe om hvor stort behovet for ungskogpleie er på bestandsnivå. Det ble videre anbefalt å 1) ha større datasett som hadde større variasjoner, 2) videreutvikle modellene og 3) fly drone med påmontert RTK i stabilt bra flyvær og da flere runder med flyving. Samlet sett antyder resultatene at ved bruk av denne metodikken, kan drone og SPL benyttes med god nøyaktighet til å si noe om hvor stort behovet for ungskogpleie er, for å redusere kostnader knyttet til feltbefaringer.

Abstract

Efficient planning and accurate assessments are crucial for implementing timely and effective measures in the forest. This is particularly important in the young forest phase, where decisions are made about the development of the future. In order for a forest owner to plan effectively and reliable forest assessments in addition to sufficient information about each area unit area are required. Currently airborne laser scanning is the most common method used. However, use of drone in forestry is becoming more successful by obtaining real-time overviews. The main goal of this master's thesis is to predict the need for tending of young forest at the stand level using drone-based image matching and single photon lidar. These predictions were further used to estimate the annual requirement for tending the young forest between two forest assessments. As a result of enabling the forest owner to determine the optimal timing for these interventions.

Four regression models were calibrated: Two for ALS data and two for drone data to predict mean height and the number of cleared trunks. The dataset consists of 26 stands with 8-12 sample plots of 40 m² arranged into 68 randomly placed clusters in each stand. The young forest was defined of having heights between 0,5-8,0 m and not having been recently managed. For the sample plots both height and density variables were calculated to describe the spatial structure of the point cloud. The predictive ability of the model was evaluated with the mean prediction error (RMSE) for drones ranging from 1.21-1.28 m for average height and from 157 to 170 for the number of cleared trunks. When a logarithmic transformation was applied, the RMSE for mean height decreased. All models were significant overall although not all explanatory variables were statistically significant.

The predictions were presented in a cross-tabulation. For drone data, the accuracy was 45% in the first year and 88% in year 15. In contrast airborne laser scanning achieved an accuracy of 76% in the first year and 87% in year 15.

This master's thesis presents a methodology for estimating the need for tending of young forest stand level. It further recommends to 1) using larger datasets with greater variations, 2) further developing the models and 3) flying drones with RTK in stable, optimal weather conditions while making multiple passes. The results suggest by using this methodology, drones and SPL can achieve sufficient accuracy in estimating the need for young forest tending and potentially reducing field survey costs.

Innholdsfortegnelse

Fordord.....	I
Sammendrag.....	III
Abstract.....	V
1. Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Ungskog.....	1
1.2.1 Ungskogpleie	2
1.2.2 Behovet for ungsogpleie	2
1.3 Skogtaksering	3
1.3.1 Laserskanning	3
1.3.2 Ubemannede luftfartøyer	4
1.4 Formål	5
2. Materiale og Metode	6
2.1 Studieområde.....	6
2.2 Forarbeid	7
2.2.1 Referansedata.....	7
2.2.2 Droneflyving.....	7
2.3 Feltarbeid.....	8
2.3.1 Droneflyving.....	8
2.3.2 Innsamling av referansedata	8
2.3.4 Flytting av cluster	10
2.3.5 Regulert treantall	10
2.3.6 Leica Geosystems Single Photon LiDAR 100.....	10
2.4 Dataprosessering	11
2.4.1 Referansedata.....	11
2.4.2 Flybåren laserskanning	11
2.4.3 Punktskyer fra drone.....	12
2.5 Modellering	13
2.5.1 Modellbygging.....	13
2.5.2 Transformasjoner	14
2.5.3 Kryssvalidering.....	14

2.6 Prediksjon av behovet for ungskogpleie	15
2.6.1 Vegg-til-vegg-prediksjon	17
3. Resultater	18
3.1 Lineære regresjonsmodeller.....	18
3.2 Logaritmisk transformert modell	19
3.3 Validering av regresjonsmodeller	20
3.4 Validering av transformerte modeller	21
3.5 Ungskogpleiebehovet uten transformasjon.....	22
3.6 Feilmatrise for ungskogpleiebehovet.....	23
3.8 Feilmatrise for ungskogpleiebehovet med logaritmisk transformasjon.....	26
3.9 Ungskogpleiebehov på bestandsnivå.....	28
4. Diskusjon	29
4.1 Datainnsamlingen.....	29
4.2 Modellene.....	31
4.3 Bruk av drone og flybåren laserskanner i ungskog	32
4.4 Anbefaling for videre forskning	34
5. Konklusjon.....	36
Erklæring.....	37
Litteraturliste	38

1. Innledning

Kapittel 1. Innledning omhandler bakgrunn for studien, relevant tematikk, hva som er blitt utført tidligere og studiens formål.

1.1 Bakgrunn

Skogen dekker omtrent 44 prosent av det norske landarealet (Norsk Institutt for Bioøkonomi, 2021), hvorav omtrent 15 prosent er ungskog (Dalen, 2017). For å optimalisere skogressursene er riktig skogskjøtsel til rett tid viktig, spesielt i ungskogfasen. For at man skal kunne ta riktige beslutninger i ungskogfasen, er skogeier avhengig av å ha definerte mål for hva han eller hun ønsker med egen skog. Disse målene kan være å maksimere lønnsomheten, ha jevn avvirkning, eller skjøtte skogen med hensyn til rekreasjon, friluftsliv og miljø. For å ta beslutninger som oppnår målsettingene, er man avhengig av informasjon om både fortid, nåtid og framtid (Eid, 2023). Dersom vi skal inneha relevant informasjon og planlegge for fremtiden, kreves det presise skogtakster som sikrer at vi tar riktige beslutninger til rett tid.

1.2 Ungskog

Ungskog er en viktig fase i omløpstiden og det er her grunnlaget for videre skogskjøtsel dannes (Eriksson, 2004). Riktig skjøtsel i denne fasen vil danne grunnlaget for å øke både kvaliteten og verdien på fremtidig skog, blant annet gjennom stimulert vekst på enkelttrenivå (Braastad & Tveite, 2000; Fahlvik, u.å.; Pettersson et al., 2012).

I skoginventering er det vanskelig å si noe om ungskog i sin helhet, da det ofte er store variasjoner i både tetthet og høyde innad i samme bestand. Dette støttes av flere studier hvor det er brukt laser i ungskog for å se på både høyde og tetthet. Korhonen et al. (2013) forsøkte å klassifisere behovet for ungskogpleie, men konkluderte med at man ikke bare kunne basere seg på flybåren laserskanning, på tross for at det fungerte bra for produksjonsskog. Det er også utført flere andre liknende studier med andre resultater. Felles konklusjon er at det er vanskelig å få presise data på treantallet, som både Næsset og Bjerknes (2001) og Ørka et al. (2016) konkluderte med. I dag brukes laser operativt i hogstklasse II, som følge av at det er den mest kostnadseffektive metodikken (Eid et al., 2004).

1.2.1 Ungskogpleie

Ungskogpleie er et av de mest lønnsomme tiltakene man gjør i skogen (Braastad & Tveite, 2000; Rindal et al., 2017). Dette skjøtselstiltaket gjennomføres stort sett når trærne er mellom 1 og 4 m høye, men før fremtidstrærne hemmes og skades. Utgangstettheten etter ungskogpleie bør uavhengig av bonitet, være minst 200 gran per daa og minst 250 furu per dekar (Rindal et al., 2017).

Det står ingen krav om at ungskogpleie må utføres i Skogbrukslova (2005) §6, men Norsk PEFC-Skogstandard (2022) har noen krav til hvordan en eventuell ungskogpleie skal utføres. I kravpunkt 15. Langsiktig Virkesproduksjon, står det blant annet at man skal vurdere behovet for ungskogpleie, og at ungskogfeltene skal følges opp. Dette for å sikre god vekst, men også rask etablering av ny skog med tilfredsstillende tetthet. Ungskogpleie skal også gjennomføres på en slik måte at man utnytter arealets muligheter for å skape stabile bestand, og kvalitetsproduksjon med tanke på fremtidige klimaendringer. Dette skal også gi grunnlag for variasjon i avvirknings- og foryngelsesmetoder. En annen viktig del av kravene er at man skal tilstrebe barblanding, med lauvholt der dette tillates av forholdene.

1.2.2 Behovet for ungskogpleie

I dag er det en del usikkerhet i skogbruksplanen når det gjelder behovet for ungskogpleie. Dette da mange skogbruksplaner i Norge er forholdsvis gamle, da de gjerne har et omløp på 15 år (Skogeierforbund, u.å). Gitt at skogbruksplaner blir ajourført på de eiendommene dette finnes, må man etter planting ut i skogen for å vite hvordan behovet for ungskogpleie er. Dette er tidkrevende og kostbart. I en bacheloroppgave «Bruk av drone og kunstig intelligens til registrering av treantall og trehøyder i ungskog» fra 2023, hevder Lotten (s.20) at det i gjennomsnitt tar rundt 1,7 minutter per dekar for feltbefaring (Lotten, 2023). Det er flere studier som viser til høye kostnader knyttet til feltbasert inventering, selv om presisjonen blir høyere. Derimot varierer dette ut ifra hvor mange prøveflater som skal legges ut og hvor store bestandene er, da tid brukt mellom hver prøveflate må medregnes (Eid et al., 2004; Holmstrom et al., 2003)

For å vurdere behovet for ungskogpleie legges det tradisjonelt ut prøveflater med 30–60 meters mellomrom. Dersom man støter på en hindring, flyttes prøveflaten 10 meter. Hver prøveflate består av en sirkel på 50 m², markert med en 3,99 m lang tellestang. Trærne innenfor sirkelen telles, og antallet multipliseres med 20 for å beregne trær per dekar (Statsforvalteren, 2019). For bestand med et areal på under 10 dekar kreves 6 prøveflater. Ved arealer mellom 10 og 20 dekar

trengs 10 prøveflater, mens det for arealer mellom 21 og 40 dekar er nødvendig med 14 prøveflater. Dersom arealet overstiger 40 dekar, skal det benyttes minst 20 prøveflater (Statsforvalteren, 2019). For å vite hvor mange ryddestammer man har i hver prøveflate, må man vite hvor mange trær som skal stå igjen etter utført ungskogpleie. Hva som er ønskelig regulert treantall er basert på skogeiers preferanser for hvilke tiltak som skal gjøres i fremtiden, og ikke minst hvilke treslag som vokser der. Å vurdere behovet for ungskogpleie ved hjelp av denne metodikken er tidkrevende, spesielt over et større areal, slik som tidligere studier hevder.

1.3 Skogtaksering

For å få gjennomført stedstilpasset ungskogpleie til korrekt tid, er det viktig at man har gode skogtakster. I dag er flybåren laserskanning (FLS) med arealbasert kartlegging den mest brukte takstmetodikken ved skogbruksplanlegging i Norge (Næsset, 2013). Flybåren laserskanning ble tatt i bruk da det gir pålitelige data kostnadseffektivt, sammenlignet med konvensjonelle feltmålinger (Eid et al., 2004). Arealmetoden består av flere steg. Aktuelle områder plukkes ut og blir kartlagt før det blir gjennomført sampling. Disse områdene blir laserskannet og denne dataen kalibrerer en regresjonsmodell, deretter blir egenskapene over takstområdet predikert ved bruk av regresjonsmodellene (Næsset, 2013). Avhengig av hvor presis informasjon man ønsker, så er skoginventering både kostbart og tidkrevende.

1.3.1 Laserskanning

Laserskannere ble først testet i på 1960-tallet (Nelson, 2013; Solodukhin et al., 1979). Først i 1979 ble flybåren laserskanning testet (Nelson, 2013). Flybåren laserskanner har blitt brukt i en rekke studier siden 1980-tallet (Naesset, 1997a; Naesset, 1997b; Nilsson, 1996; Næsset et al., 2004) og dette ble begynnelsen til bruken av Light detection and ranging (lidar). Laseren sender ut pulser av nær-infrarødt lys i en bane under flyet, som returnerer til laserskanneren når den treffer en trestamme, bakken eller andre objekter. Under skanningen registreres de nøyaktige tidspunktene for både utsendelse av punkter fra sensoren og mottak av retursignalet (Nordkvist & Olsson, 2013), og posisjonen til hvert punkt fastsettes ved hjelp av Global Navigation Satellite System (GNSS) (Maltamo et al., 2014).

I tillegg til den tradisjonelle lidar-skanneren finnes det også en annen teknologi kalt, Single Photon Lidar. Begge skanningsmetodene har fordeler og ulemper (Mandlbürger et al., 2019; Rätty et al., 2021). Selve skanningen foregår på samme måte, men SPL100 krever kun ett detektert foton for hver rekkeviddemåling, i motsetning til en tradisjonell vifteskanning. Målet

med denne typen laserskanner er at den med mindre tidsbruk kan gi mer presise data over større områder (Mandlbürger et al., 2019). Det er gjort flere studier med SPL med gode resultater for flersjiktet skog (Wästlund et al., 2018), som ungskog ofte kan være. Derimot varierer presisjonen mellom de ulike studiene, og fordelene og ulempene må veies opp mot hverandre for om man bør bruke multi- eller enkelt foton (Yu et al., 2020).

Det er utført flere studier hvor det har blitt sett på bruk av fly med laserskanner med gode resultater. En av disse studiene er utført av Næsset og Bjerknes (2001), hvor antall trær og høyde ble estimert. I studien hadde alle ungskogfeltene en høyde lavere enn 6 m. Resultatene for høydeestimeringen ga tilfreds stillende resultater, mens det var utfordringer knyttet til å estimere korrekt antall trær. Korhonen et al. (2013) forsøkte å direkte klassifisere behovet for ungskogpleie innen de neste fem årene med bruk av laserdata. Dette ble ikke helt suksessfullt da det var det samme problematikk knyttet til antall trær som for Næsset og Bjerknes (2001). Derimot viste deg seg at metodikken gir nokså gode resultater og studien konkluderte med at man kan redusere feltbefaringer, men at direkte klassifisering kan benyttes til en viss grad.

I en studie utført av Ørka et al. (2016) ble det forsøkt å predikere ulike variabler i ungskog. For høyde fikk de gode resultater som støttes av de andre studier. Derimot når det kom til totalt treantall ble det noe større feil i prediksjonene med en RMSE på 46 prosent. For antall dominerende stammer var det betydelig lavere feil, 18 prosent. Konklusjonen til Næsset og Bjerknes (2001) og Korhonen et al. (2013) med deres konklusjoner med at det er krevende å få gode resultater på treantall støttes av Ørka et al. (2016).

1.3.2 Ubemannede luftfartøyer

I nyere tid har ubemannede luftfartøyer (ULF) som droner kommet på markedet og gradvis inn i skogforskningen. Dette skaper rom for å undersøke om droner kan benyttes som et supplement til FLS for å få overblikk over behovet for ungskogpleie. ULF gir en allsidig og kostnadseffektiv plattform når det gjelder analyser, datainnsamling og overvåking av skog. En fordel med ULF sammenlignet med FLS er at det er både billigere og enklere å bruke, noe som gjør at skogeier eller skogbruksleder kan benytte seg av det i større grad. Å benytte seg av drone gir økt fleksibilitet og rask datainnsamling, i motsetning til FLS som krever omfattende planlegging og er kostbart. En annen fordel med ULF er at de ofte har, eller kan utstyres med høyoppløselige kameraer, multispektrale sensorer, lidar-systemer og de kan gi sanntidsposisjon. Ved å fly over skogen i varierende høyder og vinkler, muliggjør droner innsamling av omfattende datasett som inkluderer treartssammensetning, kronestruktur, biomassefordeling og økosystemdynamikk.

Det er i nyere tid gjort flere studier hvor det er benyttet ULF, blant annet en studie av Hao et al. (2021) hvor de skulle se på nøyaktigheten av tetthet og høyde i ungskog bestående av kinesisk gran (*Cunninghamia lanceolata*) med bruk av drone. Resultatene i denne studien viser gode prediksjonsevner. Dronen som ble benyttet hadde multispektralt kamera. Puliti et al. (2015) gjorde også en lignende studie hvor resultatene de oppnådde var gode, med nesten like høye R^2 verdier som i den kinesiske studien som oppnådde 0,89. Hartley et al. (2020) oppnådde gode resultater ved å sammenligne dronebasert laserskanning med bildematching. Resultatene for høyde viste 0,05 høyere R^2 ved laserskanning enn fotogrammetri.

1.4 Formål

I 2023 ble det brukt nesten 150 mill. NOK på ungskogpleie (Statistisk sentralbyrå, 2024). Blir ungskogpleie utført til feil tid, vil dette kunne være kostbart for skogeier på lang sikt i form av lavere skogproduksjon da ungskogpleie bidrar til økt vekst Skogbrukets Kursinstitutt et al. (2017). Prisen på ungskogpleie øker også i takt med høyde og tetthet, hvis akkordsatser fra en prismatrise er utgangspunktet for prissettingen.

Formålet med studien er å se på hvor godt egnet drone (DF) og single photon lidar (SPL) er som verktøy til å predikere ungskogpleiebehovet på bestandsnivå. For å se på nøyaktigheten til begge metodikkene skal dette sammenlignes med referansedata. Dette skal forenkle arbeidet for skogeiere og skogbruksledere ved å gi presis informasjon om hvor og når ungskogpleie bør utføres.

For å predikere behovet for ungskogpleie på bestandsnivå, er det flere delmål i studien:

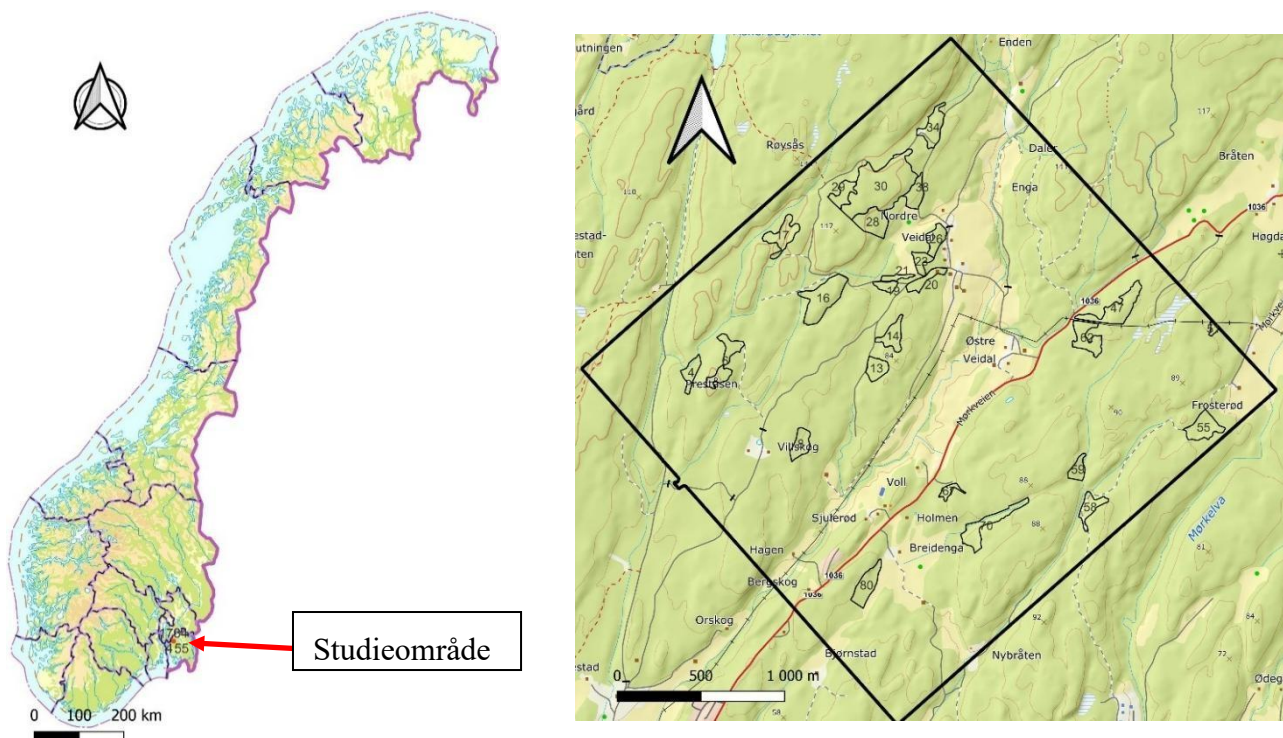
1. Evaluere nøyaktigheten av predikert behovet for ungskogpleie på bestandsnivå ved bruk av dronebasert bildematching og single photon lidar
2. Kunne si noe om tidspunkt for når det bør utføres ungskogpleie i de ulike bestandene
3. Kunne si om drone og single photon lidar er gode nok verktøy til å kartlegge behovet for ungskogpleie mellom to skogtakster

2. Materiale og Metode

Kapittel 2. Material og Metode omhandler informasjon om studieområdet, forarbeid til feltarbeidet og selve forarbeidet. Videre omhandler kapittelet prosessering av data, modellering og prediksjoner.

2.1 Studieområde

Studieområdet befinner seg i Våler kommune (59°30'N 10°55'E, 70-120 moh.) i Østfold fylke (Figur 1). Dette er et kvadratisk område på ca. 8,5 km². Skogen er aktivt skjøttet og består hovedsakelig av furu (*Pinus sylvestris*) og gran (*Picea abies*), men spesielt i den yngre skogen er det en del bjørk (*Betula sp.*). Andre lauvtreslag som eik, osp, rogn, selje, gråor, lønn og lind forekommer også. Jordprofilene består av et tynt lag med mose, etterfulgt av organisk materiale og deretter sand eller leire. På høyder er jordsmonnet skrint og sandholdig, og dermed lave boniteter. Der finner man stort sett furua. I de lavere områdene er det mer fuktig og høyere boniteter, og dermed større innslag av gran og lauvtrær. Hogstmetodene har hovedsakelig vært frøtrestilling i furubestand og flatehogst i granbestand (Moan et al., 2025).



Figur 1. Kart over studieområdet. Kartet til venstre viser hvor i Norge det ligger, mens kartet til høyre viser hvor bestandene i studieområdet befinner seg.

2.2 Forarbeid

I forkant av feltarbeidet ble det utført litt forarbeid. Dette går nærmere gjennom i delkapittel 2.2 Forarbeid. Herunder planleggingen for innsamlingen av referansedata og droneflyvingen.

2.2.1 Referansedata

Denne studien ble utført i skog som på tidspunktet for utarbeidelse av gjeldende skogbruksplan, var definert som enten hogstklasse I eller II. Disse områdene ble identifisert ved hjelp av bestandsinndelingen i hogstklassekartet funnet hos Geonorge (2022). Koordinater for prøveflatesenter ble valgt tilfeldig i hvert bestand. For å unngå flateoverlapp, var det minimum 20 m mellom hvert prøveflatesenter, og for å sikre at alle flater i sin helhet lå innenfor bestandet, var alle flatesenter minimum 10 m fra bestandskanten. Dette for å unngå kanteffekter, da skogstrukturen ofte er annerledes i bestandskantene enn lenger inn i bestandet (Harper et al., 2005). Bestand som hadde så lite areal at de kun hadde plass til én flate ble utelatt fra studien, fordi det var ønskelig med et estimat på bestandsvariasjon beregnet som variasjonen mellom flater. Utlekkingen av prøvflater medførte derfor at flere bestand ble utelukket.

2.2.2 Droneflyving

Til bruk i droneflygningen ble programmet DJI GS Pro benyttet, hvor flyruter ble tegnet med utgangspunkt i ortofoto. Her ble både hogstklasse I og II inkludert som følge av at skogbruksplanen var gammel, og det er vanskelig å si noe om trehøyden på et ortofoto. For å sikre seg at alle aktuelle bestand ble tatt med i planleggingen av flyvingene, ble ortofotoet sammenlignet med hogstklassekartet. Flyrutene ble også tegnet inn noe større enn bestandsgrensene for å være sikker på at hele bestandet ble flydd. I denne prosessen ble bestand nærmere bolighus enn 150 m utelukket grunnet regelverk (Luftfartstilsynet, u.å.). Som kriterier for droneflyvingen gjaldt 100 m flyhøyde, og bildene hadde 20% overlapp til hver side og 80% overlapp fremover. Dette for å sikre at samme treet ble tatt bilder av flere ganger fra ulike vinkler.

2.3 Feltarbeid

I dette delkapittelet skal det gås nærmere inn på hvordan feltarbeidet ble utført og innsamlingen av referansedata. Alt av feltarbeid ble utført i 2024.

2.3.1 Droneflyving

I studien ble det benyttet en DJI Mavic 2 Pro, som er en multikopterdrone. Det ble også benyttet en niende generasjon iPad som var tilkoblet en standard DJI Controller. Se Tabell 1 for dronespesifikasjonene (DJI Oslo, 2018).

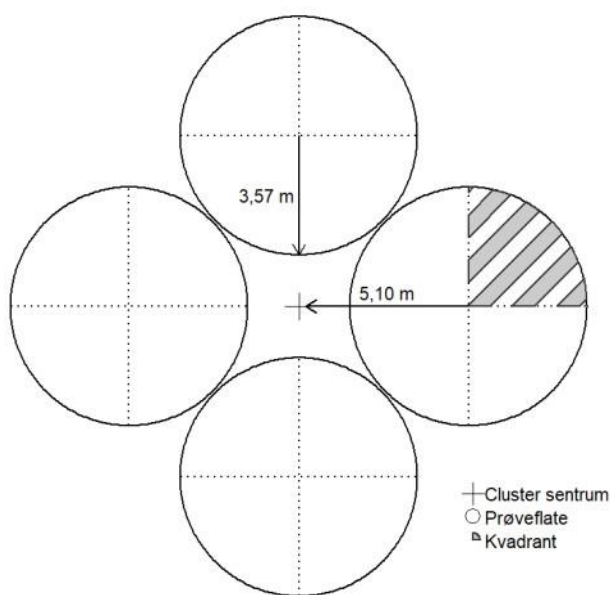
Tabell 1. Spesifikasjoner for DJI Mavic 2 Pro (DJI Oslo, 2018).

DJI Mavic 2 Pro	
Vekt	907 gram
Utvendige mål	214×91×84 mm
Temperatur for bruk	-10°C til + 40°C
Flyhastighet	< 72 km/time
Maksimal flytid	31 minutter
Sensor	1" CMOS
Effektive Piksler	20 millioner
Synsfeltet	omtrent 77°
35 mm format-ekvivalent	28 mm
Blenderåpning	f/2.8–f/11
Fokusområde	1 m - ∞
Lukkerhastighet	8–1/8000s
GNSS	GPS+GLONASS

Droneflyvingen ble utført i 2 omganger i 2024. Én av rundene med flyving ble utført i april måned før det kom lauv i skogen, mens den andre runden med flyving ble utført i juli og august måneder mens det var lauv på trærne. Under droneflyvingen ble det funnet landingsplasser som lå slik til at avstanden til dronen aldri oversteg 150 m, og den var innen synsvidde etter lovverket (Luftfartstilsynet, u.å.). Dronen var forhåndsprogrammert til å fly ruten selv med funksjonen Return to Home (RTH), slik at dronen letter, flyr ruten og lander på landingsplassen igjen selv.

2.3.2 Innsamling av referansedata

Dataene ble samlet inn gjennom sommeren 2024. Innsamling av referansedata i studien ble ikke gjort på tradisjonell måte, men med metodikken for hogstklasse I og II beskrevet i «Instruks for feltarbeid i Våler 2023» (Bollandsås, 2023). I denne studien ble prøveflatene lagt ut i cluster, bestående av fire småflater. Illustrasjon av dette vises i Figur 2. Radiusen i hver sirkelflate var 3,57 m, slik at arealet av hver småflate ble 40 m². Ut fra hovedsentrum ble det lagt en småflate i hver kardinalretning, henholdsvis i rekkefølgen nord, øst, sør og vest. Sentrum for disse flatene var 5,1 m fra hovedsentrum. Det ble navigert til flatesentrene ved hjelp av et nettbrett.



Figur 2. Illustrasjon for utlegging av prøveflater i Cluster.

I hovedsentrum ble det satt opp en EmlidReach med tilhørende program Reachview 3, som er en Real-Time Kinematic (RTK), som sto og logget under målingene. For å finne kardinalretningene ble det brukt kompass, og for å finne avstanden fra hovedsentrum til flatesentrum ble det benyttet målebånd. Det ble registrert en grovposisjon til hver av flatesentrumene gjennom programmet ArcGIS Survey123. Inne i dette programmet ble også alt av referansedata notert ned.

I hver av sirkelflatene ble det registrert hvilket bestand målingene ble utført i, og hvilket hovedcluster det var. Antall trær ble registrert ved hjelp av en 3,57 m lang stang. Det totale treantallet og antall gran, furu og lauv innenfor lengden av stanga ble telt og notert ned. Videre ble det registrert totalt antall regulerte trær av hvert treslag, for så å dele det opp i fire kvadranter inne i hver flate. Kvadrantene ble oppdelt etter kardinalretning hvor første kvadrant var fra nord til øst, andre kvadrant fra øst til sør, tredje kvadrant fra sør til vest og fjerde kvadrant fra vest til nord. I hver av disse kvadrantene ble det registrert om det fantes uregulerte trær, og i så fall hvilket treslag dette var. Høyden til de uregulerte trærne ble også registrert. Deretter ble antall regulerte trær registrert med samme metodikk.

Høyden til det første treet i hver kvadrant, både for de uregulerte og regulerte trærne ble registrert. Dette ble utført med bruk av en Vertex høydemåler i de tilfellene hvor trærne var høyere enn at det gikk an å bruke målebånd. For å defineres som et «tre», ble det satt krav om at det måtte være minimum 50 cm høyt og maksimalt 8 m høyt.

Trær som var enten lavere enn 50 cm eller høyere enn 8 m ble ikke registrert. Var trærne over 50 cm høye, men med diameter mindre enn 2 cm, ble de heller ikke registrert.

Høyderegringene ble gjort på alle prøveflater med noen unntak. Bestand med trehøyde under 50 cm eller over 8 m ble ekskludert, i tillegg de bestand hvor det nylig var utført ungsogpleie. Var ungsogpleien noe eldre slik at lauvet begynte å vokse opp igjen eller en ny ungsogpleie burde bli utført, forble disse i studien.

2.3.4 Flytting av cluster

I noen tilfeller måtte clusterne flyttes. Dette skyldtes at det var store steiner, bekker og grøfter, basveier, MIS-figurer, livsløptrær og frøtrær som dekte et stort areal av prøveflata eller clusterne. Det var også tilfeller der hogstklassekartet ikke stemte, slik at bestandsgrensen var annerledes ute i felt enn på kartet. Dette medførte at noen av clusterne havnet i bestandskantene og måtte flyttes. Ved en eventuell flytting ble clusterne flyttet 5 m lenger inn i bestandet, fortrinnsvis nordover gitt at dette var mulig. I de tilfellene hvor 5 m ble for lite grunnet hindringen, ble clusterne flyttet ytterligere 5 m. Hvis bestandet var for lite for flytting utgikk dette clusteret.

2.3.5 Regulert treantall

Som forutsetning i innsamlingen av referansedata, ble det bestemt at det maksimalt kunne være 8 regulerte trær per flate. Dette fordi man anser 200 trær per dekar som fulltettet (Fitje, 1998). I hver kvadrant kan det maksimalt være to fremtidstrær, disse må stå minimum 1 m fra hverandre. Eventuelle overstandere ble sett bort fra og ikke tatt med som et regulert tre. Definisjonen av en overstander er i studien et tre som er høyere enn 8 m, eller er vesentlig høyere enn resterende trær.

2.3.6 Leica Geosystems Single Photon LiDAR 100

I studien ble det flydd med en Single Photon LiDAR skanner (SPL 100), hvor det på forhånd før flyvingen ble planlagt flyruter. Flyvingen ble utført med en høyde på 10 300 fot med et fotavtrykk på 1 500 meter. Overlappen for skanningen var 60-61,6% fremover og 55,6% til hver side. Pulsrepetisjonen som ble brukt var på 60 kHz som gir 6 millioner pulser per sekund (Bach, 2024).

2.4 Dataprosessering

Dette delkapittelet tar for seg hvordan dataprosesseringen foregikk. Dette dreier seg om behandling av referansedata, laserdata og dronedata.

2.4.1 Referansedata

For hver flate bestående av fire småflater ble det beregnet et gjennomsnitt for totalt treantall og regulert treantall. Hver av disse flatene fikk sin egen ID. Deretter ble det differansen mellom det totale treantallet og det regulerede treantallet beregnet for hvert av treslagene gran, furu og lauv. For hver flate ble det også beregnet en gjennomsnittshøyde for det totale antallet trær og de regulerede trærne. Dette kan ses i Tabell 3. Siden referansedataen ble samlet inn på 40 m² store flater, ble antall trær og regulerede trær regnet om til antall per dekar.

Tabell 3. Oppsummering av datasettet. *Nt* = Totalt treantall, *Hd* = Høyde uregulert, *Nr* = Regulert treantall, *Ht* = Regulert høyde, *Nd* = Differansen mellom totalt og regulert treantall.

Egenskap	Variasjonsbredde	Gjennomsnitt	Standardavvik
Datasettet (n=67)			
Andel gran (%)	0 - 89	23.4	19.6
Andel furu (%)	0 - 16	8.8	11.1
Andel lauv (%)	0 - 15	30.7	25.6
Nt	56 - 1094	393.1	238.1
Hd	1.39 - 7.19	3.8	1.4
Nr	38 - 200	143.5	52.6
Ht	1.25 - 6.20	2.8	1.0
Nd	0 - 888	249.6	201.8

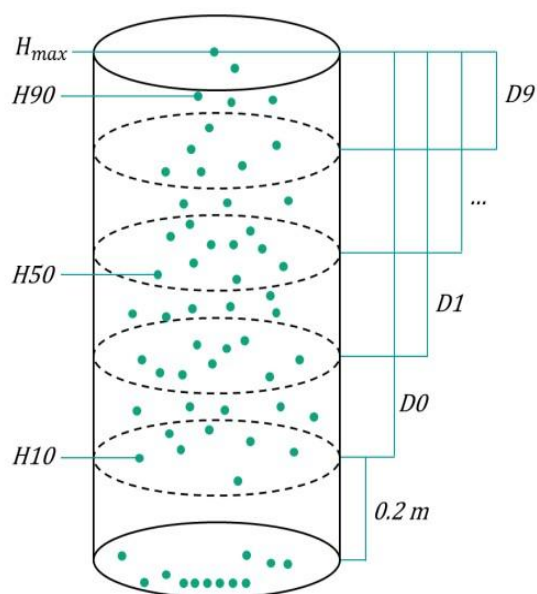
2.4.2 Flybåren laserskanning

Arealet til hver flate ble klippet ned til 250 m² slik at det stemte med arealet til felldataen. Standardvariabler ble benyttet for å hente ut maksimal høyde over terskelen, gjennomsnittshøyde, standardavvikene i høyde, variasjonskoeffisient, høyde kurtose, skjevhet i høydefordelingen, høydepersentiler og tettheten i de ulike lag. Dette er gjort basert på den norske tradisjonen og vises i Figur 3 (Næsset & Gobakken, 2008). For at dette skulle kunne prosesseres videre med referansedataene, ble datasettet for laserdataen og referansedataen koblet sammen ved hjelp av flate-id, laser-filene og koordinatene for målepunktene.

2.4.3 Punktskyer fra drone

Dronebildene fra hver flyrute ble lastet opp i DroneDeploy, hvor alle objektene på bildene ble sett på fra ulike vinkler basert på den prosentvise overlappen. Dette dannet grunnlag for beregning av dybde og posisjoner i bildene. Objektene fra ulike bilder som enten var like eller de samme ble brukt til å triangulere hvor i 3D-rommet et gitt punkt befant seg. Dette resulterte i punktskyer som ble normalisert ved hjelp av bakkepunkter fra laserskanningen, før det ble generert en digital terrengmodell basert på punktskyene fra droneflyvingen.

Deretter ble det klippet til et areal på 250 m^2 rundt målepunktene og gjennomført beregninger av standardvariablene med samme metodikk som for laserdataene (Næsset & Gobakken, 2008). Det ble et problem med lavt samsvar mellom feltobservert trehøyde og høyde fra dronene. Dette kom av at flere av flatene hadde overstandere som ikke påvirker beslutningen om ungskogpleie. Det var derfor nødvendig å fjerne laserekkoene fra disse trærne. En enkelttresegmentering ble gjort for å identifisere de aktuelle laserekkoene, og de ble deretter utelatt fra videre analyser.



Figur 3. Illustrerer de forskjellige høyde- og tetthetsvariablene som beskriver den romlige strukturen til en punktsky innenfor en prøveflate (Bollandsås et al., 2008; Noordermeer, 2017). Hvert punkt i figuren representerer et laserekko. På venstre side vises høydevariablene, der H_{max} angir den høyeste laserhøyden, og $H(x)$ representerer den høyden i vegetasjonen der x prosent av pulsene traff vegetasjonen på et lavere nivå. På høyre side fremvises tetthetsvariablene, der $D(x)$ viser den relative andelen laserpulser som har truffet over den nedre terskelen for fraksjon x . Figur hentet fra (Bollandsås et al., 2008).

2.5 Modelling

Delkapittelet tar for seg modellbygging, transformasjoner og kryssvalidering av valgte modeller.

2.5.1 Modellbygging

For å utvikle modellen ble høyde- og tetthetsvariabler fra både DF og FLS benyttet, med mål om å identifisere hvilke variabler som hadde sterkest sammenheng med behovet for ungsogpleie. Trehøyden ble deretter benyttet til å identifisere tidspunktet for når ungsogpleie bør utføres. Prediktorene for modellene ble valgt gjennom den stegvise funksjonen ‘regsubsets’ i Rstudio. Denne metodikken heter ‘best-subsets’, og fungerer ved at både forward selection og backward elimination etter Bayesian Information Criterion (BIC) blir benyttet. For å unngå overtilpasning ble det satt en grense på 10 prediktorer. Dette kriteriet favoriserer minimering av residualfeil, og modeller som har flere forklaringsvariabler blir straffet med et straffelegg for antall parametere i modellen. Dette bidrar til å unngå at modellen blir overtilpasset (Burnham & Anderson, 2004).

Differansen mellom totalt treantall og regulert treantall, sammen med den uregulerte middelhøyden, avgjør behovet for ungsogpleie på et gitt tidspunkt. Det ble derfor utarbeidet to modeller med DF data og to med FLS data som forklaringsvariabler.

Utgangsmodellene ble bestående av de ulike standardvariablene og er formulert slik:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \text{bonitet} + \beta_2 H_{\max} + \beta_3 H_{\text{mean}} + \beta_4 H_{\text{sd}} + \beta_5 H_{\text{cv}} + \\ \sum_{i=1}^9 \beta_{5+i} H_i + \sum_{j=0}^9 \beta_{14+j} D_j + \sum_{k=1}^3 \beta_{24+k} \text{sd}H_k + \sum_{l=1}^9 \beta_{27+l} \text{sd}H_l + \\ \sum_{m=0}^9 \beta_{37+m} \text{sd}D_m + \varepsilon$$

Hvor Y = uregulert gjennomsnittshøyde eller differansen mellom totalt treantall og regulert treantall, bonitet = H40 bonitet, $H_{\max}$ = maksimal høyde, H_{mean} = gjennomsnittlig høyde, H_{sd} = Standardavviket til første laserpulshøyde, H_{cv} = variasjonskoeffisient til første laserpulshøyde, H_i = høydepersentilene, D_j = lassertetthet, $\text{sd}H_k$ = standardavvik til høydeparameterne, $\text{sd}H_l$ = standardavvik til høydepersentilene, $\text{sd}D_m$ = standardavvik til lasertettheten, ε = modellens feilledd som er antatt uavhengig.

Det ble også testet ikke-lineære modeller, men denne modelltypen førte ikke til noen forbedring av modellene. Det ble derfor videre benyttet ‘regsubsets’-modellene.

For å se på multikollineariteten, ble det satt som kriterium at «variance information factor» (VIF) ikke kunne overstige fem.

Dette vil si at VIF ble regnet ut for hver prediktorvariabel som inngikk i de mulige modellene. Hvis $VIF > 5$ for noen av prediktorvariablene, ble modellen tilpasset på nytt.

For hver modell ble R^2 , R^2_{adj} og Residual Standard Error (RSE) dokumentert, og brukt til endelig modellvalg. R^2_{adj} er en justert R^2 som tar hensyn til antall prediktorvariabler i modellen. R^2_{adj} vil kun øke i de tilfellene hvor det er en prediktorvariabel som forbedrer modellens forklaringskraft mer enn ved en tilfeldighet. RSE gir en indikasjon på hvor nøyaktig modellen fanger opp variasjonen i dataene.

2.5.2 Transformasjoner

For å forbedre alle modellene ble ulike transformasjoner testet i modelltilpasningen:

- Logaritmisk transformasjon av responsvariablene
- Logaritmisk transformasjon av prediktorvariablene
- Logaritmisk transformasjon av både respons og prediktorvariablene.
- Kvadratrots transformasjon av responsvariablene
- Kvadratrots transformasjon av alle prediktorvariablene
- Kvadratrots transformasjon av prediktor- og responsvariablene
- Ingen transformasjon

Transformasjon hadde ikke noen hensikt for tetthetsmodellene. For høydemodellene ble det påvist en hensikt å benytte seg av logaritmisk (log) transformasjon av både responsvariabel og prediktorvariablene. Derimot førte de logaritmiske høydemodellene til en negativ skjevhet i prediksjonene. De ble derfor tilbaketransformert og justert for denne skjevheten, som følge av at den logaritmiske transformasjonen er biased (Bollandsås et al., 2009). Korrigeringen av skjevhet ble utført med «ratio of means» før modellene kunne brukes i prediksjoner (Snowdon, 1992).

2.5.3 Kryssvalidering

Alle fire modellene ble verifisert ved å foreta kryssvalidering. Dette som grunnlag for å se på prediksjonsevnen til hver modell. Som følge av at det ikke fantes uavhengig datasett, ble det foretatt en «10-folds» kryssvalidering. Dette er en «k-folds» kryssvalidering med bruk av 10 grupperinger som delte opp datasettet med 6 til 7 cluster per gruppe. Under kryssvalideringen ble 9 grupper brukt til å trene modellen som så ble testet på den 10. gruppen. Dette rullerte slik at hvert cluster både hadde blitt brukt til å trenes på, men også blitt testet på en gang. Det ble brukt «10-fold» da denne metoden er et godt kompromiss mellom bias og varians (Berrar, 2019; Kohavi, 1995).

2.6 Prediksjon av behovet for ungskogpleie

Behovet for ungskogpleie ble vurdert i alle bestand. Før prediksjonene kunne gjennomføres, ble det definert hva behovet for ungskogpleie er. Dette ble definert som differansen mellom det totale treantallet og det regulerte treantallet. Etter samtale med Rune Glæserud, som er plansjef i Glommen Mjøsen Skog, ble det satt grenser for klasseinndelingen for behovet av ungskogpleie. Disse klassene er som følger (Glæserud, 2025):

- ‘Ikke behov’ - opp til det regulerte treantallet per dekar
- ‘Kan’ - fra det regulerte treantallet + inntil 50 trær per dekar
- ‘Bør’ - fra det regulerte treantallet + mellom 50 – 150 trær per dekar
- ‘Må’ - fra det regulerte treantallet + over 150 trær per dekar.

Høydeklasseinndelingen ble utformet som en felles kategorisering på tvers av treslag, for å imøtekomme variasjoner i anbefalt tidspunkt for gjennomføring av ungskogpleie. Tidspunktet for ungskogpleie varierer mellom treslag. I granbestand er det avgjørende at ungskogpleie utføres før bjørka blir høyere enn grana (Brække & Granhus, 2004). I furubestand gjennomføres vanligvis en avstandsregulering i to omganger. Først når høyden er rundt 2 m og deretter når høyden er rundt 6 m. Dette for å redusere risikoen for beiteskader.

For bjørk anbefales det å opprettholde høy tetthet over lengre tid for å fremme rett stammeform (Pettersson et al., 2012). Ifølge Rindal et al. (2017) bør ikke ungskogpleie gjennomføres før trærne har nådd en høyde på minst 1 m, og helst ikke seinere enn en høyde på 6 til 8 m høye. Klasseinndelingen for høyde er et kompromiss for de ulike treslagene. Klasseinndelingen for høyde var som følger:

- ‘Ikke behov’ – opp til 1,5 m middelhøyde
- ‘Kan’ – fra 1,5 m til 2,5 m
- ‘Bør’ – fra 2,5 m til 5,5 m
- ‘Må’ – fra 5,5 m til 8 m

Det som eventuelt hadde en høyde over 8 m, og hadde et behov for ungskogpleie, ble kategorisert som ‘Behov over 8 m’. Nye klasser ble satt ved å kombinere høyde og tetthet for å avgjøre hvilket behov det er for ungskogpleie til gjeldene tid:

- Ikke behov
- For tidlig
- Tidlig
- Optimalt
- Kritisk

Disse klassene ble satt av følgende kriterier. Hvis tettheten tilsa «Ikke behov» ble dette den dominerende faktor slik at endelig klassetildeling ble «Ikke behov. Derimot hvis tettheten har en annen kategori ble høyden den styrende faktor for tidspunktet. Dette fremstilles i Tabell 4. Videre ble det antatt at hvis et område ble klassifisert som ‘Kritisk’ eller ‘Optimalt’ i et år, vil det utføres ungsogpleie. Disse områdene ble klassifisert som ‘Ungskogpleid’ året etter. Flatene som var klassifisert som ‘Tidlig’ i et år kunne bli klassifisert som ‘Optimalt’ året etter hvis høydeveksten tilsa dette. Årsaken til at dette var mulig var at den feltmålte høyden og de predikerte høydene for henholdsvis DF og FLS ble fremskrevet i 15 år ved hjelp av høydefunksjonen «Heightgrowth» i R. Funksjonen bruker H40-bonitet og predikert eller målt høyde for å studere høydeveksten, for så å fremskrive høyden over en bestemt tidsperiode. Dermed kunne utviklingen av behovet for ungsogpleie mellom to takster observeres som en tidslinje.

Dette ble utført for å kunne si noe om behovet for ungsogpleie hvert enkelt år, og dermed kunne planlegge en eventuell ungsogpleie flere år fremover i tid. Dette ble utført både for modellene med og uten logaritmisk transformasjon.

Tabell 4. De ulike behovskategoriene for kombinert tetthet og høyde.

Tetthet	Høyde	Kombinert
Ikke behov	Ikke behov	Ikke behov
Kan	Ikke behov	For tidlig
Bør	Ikke behov	For tidlig
Må	Ikke behov	For tidlig
Ikke behov	Kan	Ikke behov
Kan	Kan	Tidlig
Bør	Kan	Tidlig
Må	Kan	Tidlig
Ikke behov	Bør	Ikke behov
Kan	Bør	Tidlig
Bør	Bør	Optimalt
Må	Bør	Optimalt
Ikke behov	Må	Ikke behov
Kan	Må	Optimalt
Bør	Må	Kritisk
Må	Må	Kritisk

I prediksjonene ble det alltid predikert på DF og FLS. Feltobservasjonene ble fremstilt på samme måte for seinere sammenligning. Det ble først foretatt en prediksjon på kun differansen i treantall, og videre kun på uregulert høyde. På bakgrunn av at produksjonstabellene ikke tar høyde for økning i treantallet i hogstklasse II, ble det antatt at antall ryddestammer var konstant gjennom hele 15-årsperioden.

2.6.1 Vegg-til-vegg-prediksjon

For å predikere behovet for ungskogpleie på bestandsnivå, ble det benyttet en vegg-til-veggprediksjon i R. I denne funksjonen ble det først opprettet et grid på $15 * 15$ m som dekte alle punktskyene. Videre ble alle standardvariablene hentet frem, slik at de aktuelle variablene som inngår i modellene kunne bli brukt igjen. De prediktorene som inngikk i hver modell, ble benyttet til å predikere hver for seg før disse ble interpolert til en prediksjon for høyde og tetthet. Disse ble så slått sammen med bakgrunn i de klassene som er forhåndsbestemt. Videre ble bestandsgrensene lastet opp slik at hele bestandet, hvor det fantes punktsky fra bildematchingen, ble oppdelt i ungskogpleiekategoriene ut ifra hvordan høyden og tettheten var inne i hver gridcelle. Dette ble utført for modellene både med og uten logaritmisk transformasjon.

3. Resultater

Kapittel 3. Resultater tar for seg de viktigste resultatene som kom frem av denne studien og blir presentert i tabeller, figurer og tekstform.

3.1 Lineære regresjonsmodeller

Det ble utviklet fire modeller til bruk i prediksjonene for behovet for ungsogpleie. I Tabell 5 kan man se statistikken for hver modell. For DF og FLS ble det utviklet en modell for differansen mellom totalt og regulert treantall (Nt) og en modell uregulert høyde (H).

Tabell 5. Oversikt over hvor mye hver prediktor forklarer hver forklaringsvariabel og modellenes forklaringskraft.

	Responsvariabler			
	DF		FLS	
	Nt	H	Nt	H
Konstantledd	348.598 ± 47.325***	2.4176 ± 0.1978***	-9.748 ± 54.596	0.69472 ± 0.32421*
Hkurt	-5.619 ± 2.548*			
H80	-39.930 ± 10.605***			
D9	1208.157 ± 256.713***			
H10		-0.1983 ± 0.1803		
H40		0.2529 ± 0.1349.		
H30			-94.429 ± 30.956**	
D1			522.414 ± 153.152**	
D8			2107.595 ± 1265.700	
Hmean				0.04783 ± 0.09094
H10				2.60712 ± 0.46716***
R ²	0.29	0.07	0.39	0.41
R ² _{adj}	0.25	0.04	0.37	0.39
Residual SE	174.7	1.03	161.1	0.82

Signif.koder: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Modellene forklarte henholdsvis 29, 7, 39 og 41 prosent av variasjonen i responsvariablene. FLS-modellene viser bedre prediksjoner enn det DF-modellene gjør, med «Residual SE» på henholdsvis 161,1 og 0,82 mot 174,7 og 1,03.

3.2 Logaritmisk transformert modell

Det ble utviklet modeller med logaritmisk transformasjon for høyde (H), for både DF og FLS. Dette for å forbedre forklaringsevnen til disse modellene for responsvariablene. Resultatene kan ses i Tabell 6.

Tabell 6. Oversikt over hvor mye hver prediktor forklarer hver forklaringsvariabel med logaritmisk transformasjon og modellens forklaringskraft.

	Responsvariabler	
	DF log(H)	FLS log(H)
Konstantledd	1.10593 ± 0.07939***	0.54429 ± 0.12226***
logH10	-0.31330 ± 0.17208.	
logH40	0.37990 ± 0.14977*	
logHmean		0.02641 ± 0.08756
logH10		1.30000 ± 0.23476***
R ²	0.1	0.39
R ² _{adj}	0.07	0.38
Residual SE	0.26	0.21
Signif.koder: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1		

Av de to modellene med logaritmisk transformasjon, er alle prediktorvariablene for modellen for DF signifikante på et 0,05-nivå eller bedre. Forklaringsevnen har økt med bruk av logaritmisk transformasjon for DF, men sunket for FLS. R² har økt fra henholdsvis 0,07 til 0,1, for FLS har den derimot sunket fra 0,41 til 0,39. «Residual Standard Error» har sunket en del for begge modellene etter tilbaketransformasjon.

3.3 Validering av regresjonsmodeller

For å se hvor stor forskjellen er mellom modellene og de feltobserverte målingene, ble det beregnet RMSE, den gjennomsnittlige y-verdien og differansen i minimumsverdien, maksimumsverdien, gjennomsnittet og standardavviket, som blir fremstilt i Tabell 7. Dette ble gjort for alle de fire modellene uten transformasjon.

Tabell 7. Oversikt over hvor gode prediksjonene er mot de feltmålte verdiene.

					Differanse mellom predikert og feltmålt verdi			
	Respons	RMSE	RMSE%	$\bar{y}$	min	max	gjennomsnitt	standardavvik
DF	N (Daa)	170.21	68.2	249.63	-558.95	280.41	-1.58	171.49
	H (m)	0.74	26.8	2.77	-2.83	1.39	-0.01	0.75
FLS	N (Daa)	157.48	63.1	249.63	-460.25	391.33	-0.27	158.67
	H (m)	0.52	18.9	2.77	-1.23	1.06	0.00	0.53

For N (Daa) så er det stor avstand mellom feltmålt- og predikert verdi. Det samme gjelder for standardavviket. Med en RMSE på 170 og 157 utgjør dette stor forskjell i antall trær per dekar. For H er avstanden mellom den feltmålte og den predikerte verdien 0,74 m for DF og 0,52 m for FLS.

3.4 Validering av transformerte modeller

De transformerte modellene ble også validert på samme måte som modellene uten transformasjon. I Tabell 8 ser man hvor godt prediksjonene samsvarer med de feltmålte verdiene før justering, mens det i Tabell 9 vises samsvaringen etter justering.

Tabell 8. Oversikt for hvor gode prediksjonene er for de feltmålte verdiene med transformasjon, før justering for skjevhet.

					Differanse mellom predikert og feltmålt verdi			
	Respons	RMSE	RMSE%	$\bar{y}$	min	max	gjennomsnitt	standardavvik
DF	H (m)	1.28	46.3	2.77	-2.03	3.23	0.85	0.97
FLS	H (m)	1.21	43.6	2.77	-0.83	3.17	0.90	0.81

RMSE er for både DF og FLS på over 1.7 m. Standardavviket er henholdsvis 0,97 og 0,81 for DF og FLS. Den gjennomsnittlige y-verdien er lik for begge modellene på 2,77.

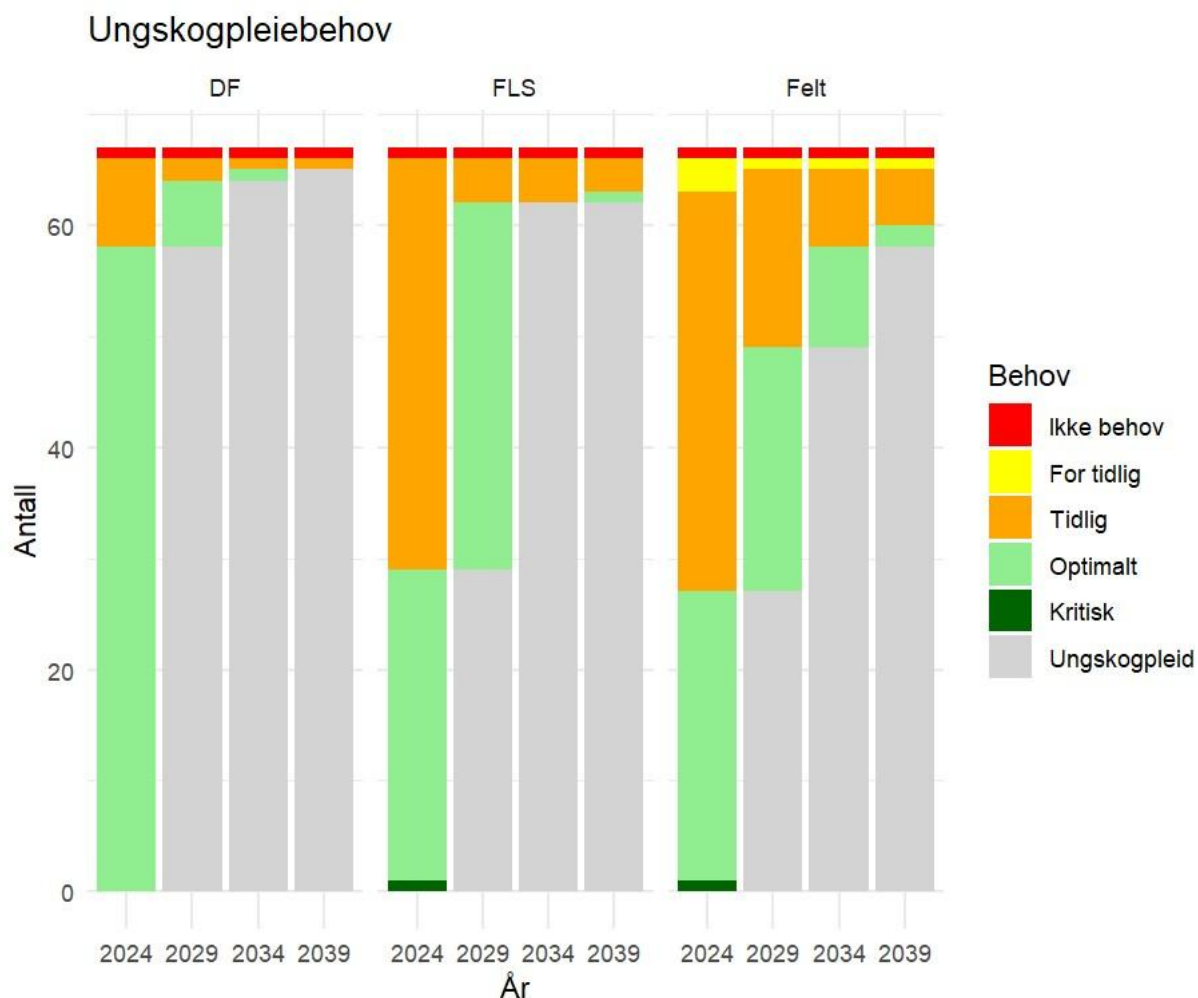
Tabell 9. Oversikt for hvor gode prediksjonene er for de feltmålte verdiene med transformasjon, etter justering for skjevhet.

					Differanse mellom predikert og feltmålt verdi			
	Respons	RMSE	RMSE%	$\bar{y}$	min	max	gjennomsnitt	standardavvik
DF	H (m)	0.97	35.0	2.77	-3.04	2.14	-0.03	0.98
FLS	H (m)	0.81	29.1	2.77	-1.66	1.61	-0.02	0.81

Etter justeringen for skjevheten er gjennomsnittet for DF og FLS henholdsvis -0,03 og -0,02. Avstanden mellom den predikerte og feltmålte verdien er nå 35,0 prosent og 29,1 prosent.

3.5 Ungskogpleiebehovet uten transformasjon

For å se hvordan behovet for ungskogpleie endrer seg over tid, fremvises dette i Figur 4 som et stolpediagram for DF, Feltmålt og FLS for årene 2024, 2029, 2034 og 2039 som tilsvarer hele takstperioden på 15 år.



Figur 4. Behovet for ungskogpleie hvert femte år over en 15 års periode for DF, Felt og FLS.

Andelen 'Ungskogpleid' etter år 15 er høyest for DF og lavest for Felt. For alle tre metodikkene er andelen lik for 'Ikke behov'. De øvrige kategoriene varierer en god del fra år til år for DF, Felt og FLS. Prediksjonene for DF viser at ingen flater blir 'Kritisk', mens Felt og FLS viser at det allerede i det første året er én flate med et kritisk behov.

3.6 Feilmatrise for ungsogpleiebehovet

For å illustrere behovet for ungsogpleie er det satt opp feilmatriser for henholdsvis år 2024 og 2039, som starten og slutten på perioden prediksjonene er utført for. For 2024 vises feilmatrisen i Tabell 10 for DF og i Tabell 11 for FLS, mens det for år 2039 vises i Tabell 12 for DF og Tabell 13 for FLS.

Tabell 10. Feilmatrise for predikert behov med DF mot Feltmålt behov i år 2024.

	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	DF vs. Felt Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	Accuracy
Ikke behov		1					0 %
For tidlig							0 %
Tidlig	1	1	5	1			62 %
Optimalt		1	31	25	1		43 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid							0 %
Accuracy	0 %	0 %	14 %	96 %	0 %	0 %	45 %
Kappa	0.08						

Feilmatrisen i Tabell 10 viser at det kun er 5 flater som er korrekt plassert i 'Tidlig' og 25 i 'Optimalt'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 45 prosent.

Tabell 11. Feilmatrise for predikert behov med FLS mot Feltmålt behov i år 2024.

	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	FLS vs. Felt Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	Accuracy
Ikke behov		1					0 %
For tidlig							0 %
Tidlig	1	2	29	5			78 %
Optimalt			7	21			75 %
Kritisk					1		100 %
Ungskogpleid							0 %
Accuracy	0 %	0 %	81 %	81 %	100 %	0 %	76 %
Kappa	0.56						

Feilmatrisen i Tabell 11 viser at det er 51 flater som er korrekt plassert, og dette er 29 flater i 'Tidlig', 21 flater i 'Optimalt' og 1 flate i 'Kritisk'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 76 prosent.

Tabell 12. Feilmatrixe for predikert behov med DF mot Feltmålt behov i år 2039.

	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	DF vs. Felt Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	Accuracy
Ikke behov		1					0 %
For tidlig							0 %
Tidlig			1				100 %
Optimalt							0 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid	1		4	2		58	89 %
Accuracy	0 %	0 %	20 %	0 %	0 %	100 %	88 %
Kappa	0,25						

Feilmatrixen i Tabell 12 viser at det er 59 flater som er korrekt plassert, og dette er 1 flate i 'Tidlig' og 10 flater i 'Ungskogpleid'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 88 prosent.

Tabell 13. Feilmatrixe for predikert behov med FLS mot Feltmålt behov i år 2039.

	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	FLS vs. Felt Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	Accuracy
Ikke behov			1				0 %
For tidlig							0 %
Tidlig	1		1	1			33 %
Optimalt						1	0 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid		1	3	1		57	92 %
Accuracy	0 %	0 %	20 %	0 %	0 %	98 %	87 %
Kappa	0,31						

Feilmatrixen i Tabell 13 viser at det er 58 flater som er korrekt plassert, og dette er 1 flate i 'Tidlig' og 57 flater i 'Ungskogpleid'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 87 prosent.

3.7 Ungskogpleiebehov med logaritmisk transformasjon

Behovet for ungskogpleie ved bruk av logaritmisk transformasjon, er fremstilt på lik måte som uten transformasjon. Figur 5 viser behovet for ungskogpleie for en 15 års periode for DF, Felt og FLS med bruk av logaritmisk transformasjon.



Figur 5. Behovet for ungskogpleie hvert femte år over en 15 års periode for DF, Felt og FLS med logaritmisk transformasjon på høydemodellene.

I Figur 5 ser man en stor andel av flaten bli ‘Ungskogpleid’ i 2029 hos DF. Andelen ‘Ikke behov’ er én flate for alle metodene i alle årene. I år 2039 er andelen ‘Ungskogpleid’ ganske lik for alle tre metodene. Kategoriene ‘Optimalt’ og ‘Tidlig’ er de som er mest forskjellig mellom metodene. Felt er eneste med kategorien ‘Kritisk’.

3.8 Feilmatrixe for ungsogpleiebehovet med logaritmisk transformasjon

For å illustrere behovet for ungsogpleie, er det satt opp feilmatrixer for henholdsvis år 2024 og 2039, som er starten og slutten på perioden prediksjonene er utført for. For 2024 vises feilmatrixen i Tabell 14 for DF og i Tabell 15 for FLS. Mens det for år 2039 vises i Tabell 16 for DF og Tabell 17 for FLS.

Tabell 14. Feilmatrixe for predikert behov med DF mot Feltmålt behov i år 2024 med logaritmisk transformasjon.

	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	DF vs. Felt Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	Accuracy
Ikke behov		1					0 %
For tidlig							0 %
Tidlig	1	1	8	1			73 %
Optimalt		1	28	25	1		45 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid							0 %
Accuracy	0 %	0 %	22 %	96 %	0 %	0 %	49 %
Kappa	0,14						

Feilmatrixen i Tabell 14 viser at det er 33 flater som er korrekt plassert. Dette er 8 flater i 'Tidlig' og 25 flater i 'Optimalt' som er korrekt plassert. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 49 prosent.

Tabell 15. Feilmatrixe for predikert behov med FLS mot Feltmålt behov i år 2024 med logaritmisk transformasjon.

	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	FLS vs. Felt Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	Accuracy
Ikke behov		1					0 %
For tidlig							0 %
Tidlig	1	2	21	5			72 %
Optimalt			15	21	1		57 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid							0 %
Accuracy	0 %	0 %	58 %	81 %	0 %	0 %	63 %
Kappa	0,33						

Feilmatrixen i Tabell 15 viser at det er 42 flater som er korrekt plassert, og dette er 21 flater i 'Tidlig' og 21 flater i 'Optimalt'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 63 prosent.

Tabell 16. Feilmatrixe for predikert behov med DF mot Feltmålt behov i år 2039 med logaritmisk transformasjon.

	DF vs. Felt						Accuracy
	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	
Ikke behov		1					0 %
For tidlig							0 %
Tidlig			1				100 %
Optimalt							0 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid	1		4	2		58	89 %
Accuracy	0 %	0 %	20 %	0 %	0 %	100 %	88 %
Kappa	0,25						

Feilmatrixen i Tabell 16 viser at det er 59 flater som er korrekt plassert, og dette er 1 flate i 'Tidlig' og 58 flater i 'Ungskogpleid'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 88 prosent.

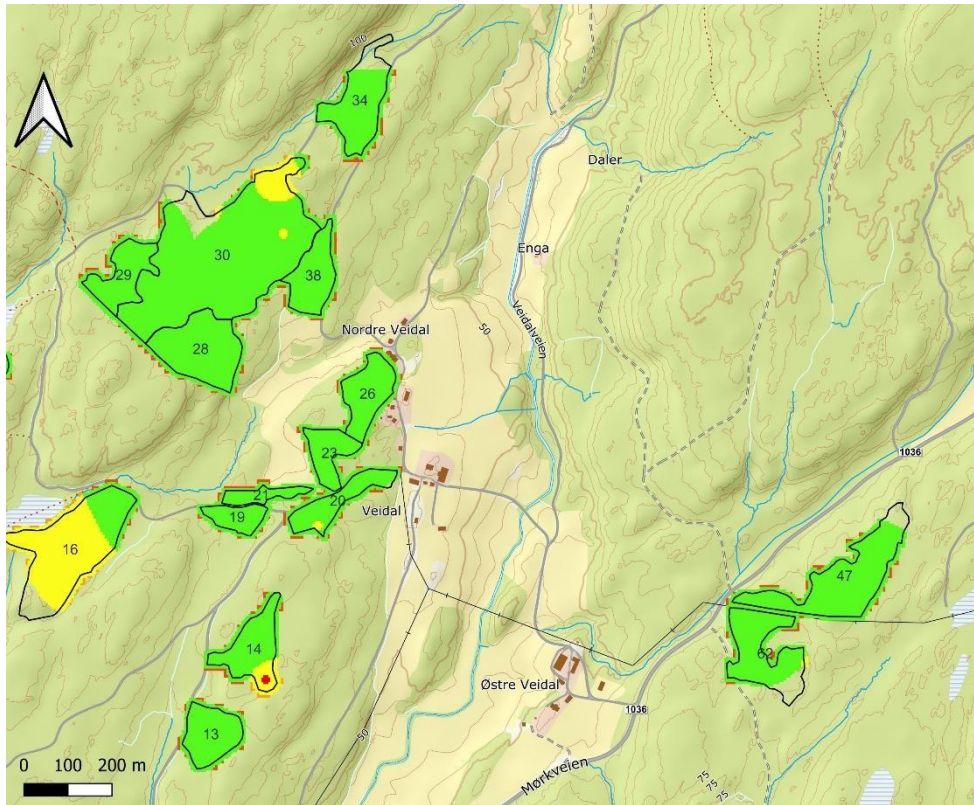
Tabell 17. Feilmatrixe for predikert behov med FLS mot Feltmålt behov i år 2039 med logaritmisk transformasjon.

	FLS vs. Felt						Accuracy
	Ikke behov	For tidlig	Tidlig	Optimalt	Kritisk	Ungskogpleid	
Ikke behov			1				0 %
For tidlig							0 %
Tidlig	1		1	1			33 %
Optimalt						1	0 %
Kritisk							0 %
Ungskogpleid		1	3	1		57	92 %
Accuracy	0 %	0 %	20 %	0 %	0 %	98 %	87 %
Kappa	0,31						

Feilmatrixen i Tabell 17 viser at det er 34 flater som er korrekt plassert, og dette er 1 flate i 'Tidlig' og 57 flater i 'Ungskogpleid'. Samlet sett har prediksjonene en nøyaktighet på 87 prosent.

3.9 Ungskogpleiebehov på bestandsnivå

For å se hvordan behovet for ungskogpleie er på bestandsnivå fremvises dette i Figur 6. Dette er da kun for år 2024 som eksempel på hvordan dette vil kunne se ut i kartet. Dette viser hvor det er behov for ungskogpleie i hvert enkelt bestand.



Figur 6. Behovet for ungskogpleie på bestandsnivå, her vist for år 1 (2024). Grønt = Optimalt, gult = tidlig, rødt = Ikke behov.

I Figur 6 ser man hvordan behovet for bestandsnivå varierer innad i bestand, men også mellom bestand. I bestand 14 er det et mindre område hvor det er 'ikke behov', et større område som er 'tidlig' og et stort areal som er 'optimalt'. I bestand 13 er det derimot 'optimalt' i hele bestandet.

4. Diskusjon

Denne studien har gitt ny informasjon for hvordan drone og single photon lidar kan benyttes i det operative skogbruket for å vurdere behov for ungskogpleie, men også hva som bør undersøkes nærmere for å optimalisere bruken av drone for best mulige resultater. I dette kapittelet skal de ulike funnene, styrkene og svakhetene diskuteres nærmere.

4.1 Datainnsamlingen

Tidlig i databehandlingen ble det oppdaget at det var liten sammenheng mellom høydepercentilene til dronedataen og laserdataen. Dette førte til en segmentering av enkelttrær, der alle trær over 10 m ble utelukket for å forsøke en forbedring av sammenhengen. Segmenteringen bedret sammenhengen noe, men det ble fortsatt ikke tilfredsstillende. Det kan være flere årsaker til dette. En av de kan være at overstanderne var lavere enn 10 m, særlig i de bestandene hvor middelhøyden var lav.

Dronepunktskyene ble etablert ved matching av innsamlede bilder, dette gir en slags ‘smoothing-effekt’ hvor åpninger i tett skog og trær i glissen skog blir visket ut (Ørka, 2025). Eksterne faktorer som vind, sollys og skygger kan også påvirke dronen og bildene. Været var varierende under flyvningene, noen av dagene var solrike, mens andre dager besto av en del vind og skyer. Dronen som ble benyttet har heller ikke RTK montert. Posisjonsavvik sammenlignet med dataen fra SPL100 kna derfor forekomme, slik at flatene fra dronen og flyet ikke blir identiske.

Det var heller ikke tilfredsstillende sammenheng mellom totalt antall trær for DF og feltmålinger. Her kan problemene ligge hos feltmålingene og ikke nødvendigvis bare i dronedataen da det er krevende å telle nøyaktig antall trær i tette bestand med mye bjørk. Derimot er det utført flere studier hvor totalt treantall har vært krevende å estimere, både ved bruk av flybåren laser og drone (Korhonen et al., 2013; Næsset & Bjerknes, 2001; Ørka et al., 2016). Sammenlignes resultatene fra denne studien med Ørka et al. (2016) er feilen knyttet til totalt antall trær omtrent den samme.

Avviket var relativt stort for den uregulerte høyden mellom de ulike metodene. En årsak til dette kan være at det er utfordrende å måle riktig høyde på trær i ungskogbestand, slik at de målte høydene kan avvike fra den faktiske høyden, samtidig som drone har vist varierende resultater i tidligere studier (Hao et al., 2021; Hartley et al., 2020; Puliti et al., 2015). Bakgrunnen for avvik i høydemålingen kan være at høyden kun ble feltmålt på det første treet i hver kvadrant, totalt fire per prøveflate, som dannet grunnlaget for en gjennomsnittsberegning.

Dette skaper en viss usikkerhet, men hvis man sammenligner usikkerheten knyttet til høydemålingene med Puliti et al. (2015) ligger den forventede feilen på omtrentlig det samme, med rundt 0,7 m.

Dersom det første treet var en overstander, ble det andre treet målt. Dette medfører avvik mellom feltmålinger, DF og FLS, ettersom punktskyene registrerer høyder for alle trær. Eventuelle unøyaktigheter i dataene kan dermed påvirke både prediksjoner og resultater. Ser man nærmere på de nevnte studiene har deres høydemålinger høyere forklaringskraft enn i denne studien. Hao et al. (2021) studerte nøyaktigheten av høyden hos kinesisk gran ved bruk drone og oppnådde R^2 på 0,89 mot denne studien som oppnådde en R^2 på 0,1.

Metodikken for innsamling av referansedata i denne studien er sampling. Dette skaper en usikkerhet. Det kan være usikkerhet knyttet til antall trær eller høyden av trær. Eventuelle feil i målingene kan i stor grad påvirke resultatene og redusere påliteligheten av dataen. Ved eventuelle feilmålinger kan de reelle høydene og treantallet ligge nærmere estimatene fra DF eller FLS enn de registrerte referansedataen. Derimot så er det omtrent samme usikkerhet til både høyde og tetthet i denne studien som i de tidligere nevnte studiene. Det støtter oppunder det at både verktøyene drone og SPL kan benyttes til å predikere behovet for ungskogpleie.

Enkelte prøveflater hadde naturlige hindringer som bekker og store steiner. På bakgrunn av dette måtte noen cluster flyttes. I enkelte tilfeller var det ikke mulig å unngå disse hindringene som medførte at disse clusterne ble påvirket av enten kanteffekter og frø- eller livsløptrær. Selv om det ble forsøkt å filtrere ut overstandere gjennom enkelttre-segmentering, har trolig resultatene blitt noe påvirket likevel. Påvirkningen skyldes at veksten i nærheten av frøtrær er betydelig redusert, både med hensyn til treantall og høydevekst (Valkonen et al., 2002). I andre studier har også spesielt overstandere vært et problem, der har det blitt korrigert for skjevhet som i Hartley et al. (2020). En annen ofte brukt metodikk som også er benyttet i denne studien er segmentering av enkelttrær (Hartley et al., 2020).

Tilfeldig utlegging av cluster i forkant av datainnsamlingen reduserte risikoen for bias ute i felt og dermed ubevisst påvirkning av resultatene. Dette tross for at tilfeldig utlegging avviker fra tradisjonell taksering og operativt skogbruk, hvor systematisk prøveflatelegging har vist seg mest effektivt for å sikre representativitet (Maltamo et al., 2011). Prøveflateleggingen ble begrenset til maksimalt tre cluster per bestand. Basert på en tidligere studie utført av Ørka et al. (2016) bør det være 40-50 prøveflater for taksering av ungskog i en områdetakst. Dette er det samme antallet som brukes i eldre skog (Næsset, 2004).

4.2 Modellene

Ettersom dataene fra DF og FLS viste svakere korrelasjon med feltdata enn forventet, var det utfordrende å velge forklaringsvariabler til modellene. Dette medførte at enkelte av variablene i modellene ikke var statistisk signifikante. Forsøk på å fjerne disse variablene førte imidlertid til at modellens samlede signifikans ikke lenger tilfredsstilte et 0,05-nivå. Variablene ble derfor beholdt i modellene slik at modellene samlet sett var statistisk signifikante på et $\alpha = 0,05$ -nivå.

Som følge av at modellene hadde svak forklaringskraft ble både kvadratrot- og logtransformasjoner testet på modellene. Kvadratrottransformasjon svekket forklaringskraften, mens log-transformasjon førte til forbedringer. For høydemodellene ga log-log-transformasjon best resultat, med bedre forklaring enn modeller der kun responsvariabelen ble log-transformert. For modellen med differanse i treantall som responsvariabel, ga ingen av transformasjonene forbedret forklaringskraft, og det ble derfor benyttet lineær modell for denne responsvariabelen. Noordermeer (2017) forsøkte også transformasjoner med god suksess.

I en studie av Wu et al. (2024) kom de frem til at ikke-lineær modell ga best resultater, mot for i denne studien hvor lineær regresjon ga bedre utfall enn ikke-lineær. I andre studier som i Ramdani og Furqon (2022) ble det benyttet maskinlæringsmodell som XGBoost, hvor denne ga best resultater. Dette er en modelltype som burde blitt testet på datasettet i denne studien da den har vist gode resultater i flere studier som skal klassifisere, slik som i Ramdani og Furqon (2022). En annen type modell som egner seg til clustersampling er 'Mixed Effects' (Zuur et al., 2009). Denne modelltypen ble ikke testet siden alle målingene i et cluster ble gjennomsnittlig beregnet til en flate i stedet for fire flater. Derimot er det en modelltype som kunne blitt testet ved å modellere med bruk i de fire opprinnelige flatene før gjennomsnittsberegningen.

Log-transformasjonen førte til at R^2 for høydemodellen økte fra 0,07 til 0,10 for DF til tross for en økning i det gjennomsnittlige avviket mellom de observerte og predikerte verdiene, mens det ble en liten nedgang for FLS. For DF-modellen økte R^2_{adj} fra 0,04 til 0,07, noe som indikerer en svak forbedring i forklaringskraften, i forhold til antall forklaringsvariabler.

Modellene vurderes derfor som statistisk svake og med lavere nøyaktighet enn i tidligere studier (Puliti et al., 2015; Ørka et al., 2016). Variabelen H80 har en negativ koeffisient med signifikant p-verdi, noe som indikerer en negativ effekt på predikert høyde. D9 har derimot en høy positiv koeffisient med sterk signifikans, og bidrar positivt til modellen. Disse sammenhengene forsterkes ved bruk av log-transformasjon som vist i Tabell 6 og 7.

Tetthetsmodellen viser en tilsvarende svakhet som høydemodellen. For drone er RMSE på 170 trær per dekar, og prosentfeilen utgjør 68 %, noe som indikerer betydelige feil i predikert totalt treantall. Dette kan påvirke klassifiseringen av behov for ungskogpleie, slik at modellens resultater ikke stemmer overens med felldata. Selv om den gjennomsnittlige prediksjonsfeilen ligger nær null, noe som indikerer fravær av systematisk skjevhet, er det et tydelig behov for forbedringer for å oppnå mer presise estimater. Derimot er ikke feilen større i denne studien mot for i de øvrige nevnte som også har du studert tetthet i ungskog.

Ved sammenligning av DF- og FLS-modellene, viser både tetthet- og høydemodellene bedre resultater med data fra laserskanning enn fra dronedata. Dette er som forventet, ettersom dronen ble benyttet til bildematching og ikke hadde laserskanner basert på funnene til Hartley et al. (2020) som sammenlignet bruk av laserskanner og fotogrammetri. Det er derimot rimeligere og enklere å benytte seg av drone, og derfor må det vurderes om dronebasert bildematching gir god nok nøyaktig hvis man vurderer kostnad og nytte. Modellens signifikans indikerer at dronedata forklarer en betydelig andel av variansen, til tross for noe svakere prediksjonsevne. Med noen justeringer, som modellforbedring og større datasett, kan dronedata brukes som et effektivt verktøy for sanntidsinformasjon i skogbruke og et godt supplement til FLS.

Det kan også være hensiktsmessig å undersøke alternative transformasjoner eller modelltilnærminger. Noordermeer (2017) utforsket bruk av standardavvik på variabler fra romlige skalaer, en metode som også ble benyttet av Bolland et al. (2008) ved prediksjon av naturlig foryngelse i flersjiktete granbestand. Noordermeer (2017) viste imidlertid at metoden kun hadde begrenset effekt i ungskog, og den ble derfor ikke inkludert i denne studien, selv om metodikken kunne vært interessant å undersøke ytterligere.

4.3 Bruk av drone og flybåren laserskanner i ungskog

Flere studier som tidligere nevnt, har vist at droner og laserskannere kan estimere høyde og tetthet med god nøyaktighet. Det har også denne studien bekreftet at er mulig.

I denne studien ble både dronebasert bildematching og flybåren laserskanning benyttet for å predikere behovet for ungskogpleie. Begge metodene viser en tendens til å predikere et større behov for ungskogpleie hos flere flater enn det feltobservasjonene tilsa, spesielt med data fra dronen. Dette er problematisk i operativt skogbruk, ettersom det gir feil informasjon om det faktiske behovet for ungskogpleie i de ulike bestandene. Det er imidlertid verdt å merke seg at nøyaktigheten økes for både drone og FLS utover i 15-års perioden.

Datasettet preges av lav variasjon, noe som kan ha påvirket resultatene. Det var begrenset med data for modelltrening, og kun flater med lave og middels boniteter som inngikk i studien. Bestand hvor det nylig var utført ungskogpleie ble utelukket. Middelhøyden i disse bestandene skilte seg fra flertallet blant de øvrige bestandene. Dette ga ytterligere mindre variasjon i datasettet. Flere cluster ble utelukket grunnet unøyaktige RTK-målinger, ettersom enkelte målinger ikke var registrert med et tilstrekkelig signal over en lang nok tidsperiode. Dette resulterte i at posisjonene til prøveflatene ikke var nøyaktige nok til å inkluderes i videre analyser, noe som igjen førte til redusert variasjon mellom bestandene. Flyruten til dronen ble planlagt ut fra ortofoto og ikke hogstklassekartet, noe som førte til at enkelte punkter falt utenfor dronebildene. Dette medførte ytterligere utelukkelse av bestand, som kunne vært unngått med en alternativ metode.

Den digitale overflatemodellen (DSM) utarbeidet med dronedata viste indikasjoner på unøyaktigheter da DSM-en viste noen negative verdier der de skulle vært null. De predikerte høydene burde derfor antakelig vært noe høyere enn de faktisk ble, og dermed kunne samsvaret mellom predikert og feltobservert høyde vært forbedret.

Prediksjonene ved bruk av framskriving av innsamlede data gir høyere nøyaktighet for både FLS og DF i år 15 enn i det første året. Et interessant funn er at i år 15 har prediksjonene på dataen høyere nøyaktighet enn for data fra SPL. De første årene er det store forskjeller i nøyaktigheten til DF sammenlignet med feltmålingene og FLS, men forskjellen reduseres utover perioden. Dette kan tyde på at man kan støtte seg på FLS de første fem årene av takstperioden, for så å fly drone i år 5 av takstperioden for å få oppdaterte data som vil kunne gi mer presis informasjon.

Det som er interessant med disse resultatene, er at de strider noe med funnene til Korhonen et al. (2013), som konkluderte med at det ikke er mulig å klassifisere behovet for ungskogpleie uten gjennomføring av feltbefaringer. Denne studien viser derimot at det er mulig, men med risiko for feilklassifiseringer. Det er også brukt forskjellige metodikker i disse to studiene, som kan være en årsak til ulike funn. Dette i form av at Korhonen et al. (2013) delte opp bestandene i klasser basert på behovet for ungskogpleie. De ulike klassene var 'umiddelbart behov for ungskogpleie', 'behov for ungskogpleie innen fem år' og 'bestand uten behov for ungskogpleie de neste 10 årene'. Dette skiller seg fra denne studien hvor det er sett på behovet for ungskogpleie i hvert enkelt bestand for hvert år oppdelt i ulike klasser for hvor stort behovet er.

Kombinasjonen av tetthets- og høydeklasser danner grunnlaget for klassifiseringssystemet brukt i studien. Selv om dette gir en systematisk tilnærming til vurdering av ungskogpleiebehov,

oppstår utfordringer ved bruk av klassifiseringssystemet på tvers av treslag. Artsvise forskjeller i vekstmønstre og skjøtselsbehov gjør det problematisk å bruke generiske høydeklasser slik som brukt i denne studien. En mulig forbedring er å tilpasse klassene etter treslag, som vil kunne gi andre resultater.

Videre kan kombinasjonen av tetthets- og høydeklasser gi et til dels misvisende inntrykk. Eksempelvis tolkes kombinasjonen 'kan' (tetthet) og 'må' (høyde) som 'optimalt', noe som kan gi inntrykk av at tidspunktet er ideelt, selv om det i realiteten kun bør gjennomføres ungskogpleie nå på grunn av høyden. Dette kan ha ført til enkelte feilklassifiseringer i analysen.

Til tross for disse svakhetene viser resultatene at dronebasert bildematching og single photon lidar kan benyttes til å si noe om behovet for ungskogpleie. Dette muliggjør en mer differensiert og stedstilpasset skogskjøtsel, i motsetning til det homogene bestandsskogbruket som har preget tidligere praksis. Som illustrert i Figur 6, viser Bestand 14 en variasjon i behovsnivåene. Dette understreker potensialet for differensierte inngrep i ett og samme bestand, i tråd med prinsippene om stedstilpasset skogskjøtsel slik de er formulert i Norsk PEFC-Skogstandard (2022).

Sammenligner man disse resultatene med tidligere studier, er det høyere nøyaktighet hvis man ser på år 15 i denne studien enn det Korhonen et al. (2013) oppnådde med direkte klassifisering. Dette støtter oppunder argumentasjonen om at både SPL og drone både hver for seg og som et supplement til hverandre kan benyttes til å predikere behovet for ungskogpleie på bestandsnivå. Denne studien støtter Wästlund et al. (2018) sine resultater om bruk av SPL. Den gir gode prediksjoner i flersjiktet skog, som ofte er karakteristisk for ungskog.

4.4 Anbefaling for videre forskning

Det er flere mulige svakheter i studien som bør undersøkes nærmere for å forbedre resultatene. For det første anbefales det å benytte seg av et større studieområde med større variasjon. Et mer variert datasett vil kunne gi et bedre grunnlag for modellene, og dermed økt sannsynlighet for at metoden i større grad kan gi presise nok data til det operative skogbruket.

Det er også viktig å gjennomføre dronelflyvninger ved flere anledninger, for å sikre best mulig bildekvalitet. Flere flyvninger vil kunne fange ulike tilstander i skogen, noe som gir et bedre grunnlag for presis bildematching. Her bør droneoperasjonene planlegges slik at de utføres under gunstige værforhold, det vil si når det er vindstille og overskyet. Slike forhold reduserer risikoen for skygger og andre forstyrrende elementer som kan påvirke tolkningen av bildene negativt, slik som sterke solforhold og vind. Videre kan det være nyttig å eksperimentere med

ulike flyhøyder. En tidligere studie har vist gode resultater med en flyhøyde på 125 m (Puliti et al., 2015). Likevel kan varierende høyde gi nye innsikter om hvordan bildedataen kan utnyttes for å forbedre prediksjonene.

En annen mulig forbedring er å benytte en laserskanner på dronen, som vil gi resultater på nivå med tradisjonell FLS da spesielt med tanke på de første årene av takstperioden. Selv om denne løsningen er kostbar, kan den være relevant i situasjoner der nøyaktighet er av avgjørende betydning.

Klassifiseringen og kategoriseringen for ungskogpleiebehovet er en stor usikkerhetsfaktor i studien. Videre undersøkelse av dette anbefales for at hensyn til hvert treslag skal kunne tas.

Samlet sett peker disse anbefalingene på at det finnes flere lovende tilnærminger for å forbedre bruken av droner i skogforvaltning. Dette vil kunne bidra til en mer kostnadseffektiv og nøyaktig metode for å overvåke og skjøtte ungskogen best mulig.

5. Konklusjon

Basert på resultatene, fremkommer det at droner kan utgjøre en svært verdifull ressurs for å identifisere behovet for ungskogpleie. Ved å benytte droner oppnår man et oppdatert oversiktsbilde av skogen, noe som gir et bedre grunnlag for å prioritere hvilke bestand som bør undersøkes nærmere. Denne tilnærmingen kan erstatte deler av de mer tidkrevende og kostbare tradisjonelle metodene, slik som FLS-undersøkelser og markbefaringer. Hvis man velger å fly drone oftere enn hvert 15. år som et supplement til FLS vil dataen bli ytterligere forbedret da man får sett skogen i sanntid hver gang man velger å fly.

Sammenlignet med konvensjonelle metoder tilbyr dronebruk flere fordeler. Ikke bare reduseres tiden brukt på individuell befaring, men skogeiere og skogbruksledere får også en mer helhetlig og dynamisk oversikt som gjør det mulig å sette inn tiltak på rett sted til riktig tid. Selv om studiens resultater gir gode indikasjoner, er det rom for forbedring når det gjelder nøyaktigheten i prediksjonene. Videre forskning og utvikling av metoden vil kunne styrke modellen, slik at den bedre kan tilpasses de operative behovene og sikre at ungskogpleien gjennomføres med best mulig prioritering. Deriblant bør det undersøkes nærmere hvordan man kan løse problemet med overstandere for å få tilfredsstillende nøyaktighet på høyden.

Samlet sett fremstår droner som et lovende supplement til periodiske FLS-undersøkelser, ettersom de er kostnadseffektive, enkle å manøvrere og bidrar til en mer effektiv og bærekraftig skogforvaltning. Denne studien viser at behovet for ungskogpleie på bestandsnivå ved bruk av dronebasert bildematching fungerer like godt som SPL og man kan basert på disse prediksjonene ved hjelp av framskriving si noe om tidspunktet for når ungskogpleie bør utføres med god nøyaktighet. Drone fungerer derfor godt som et supplement til flybåren laserskanning, hvor man kan velge å fly mellom to SPL skogtakster for å få oversikt over treantall og høyde i ungsbogen ved behov for informasjon.

Ærklæring

I denne studien er det blitt benyttet kunstig intelligens (KI) i form av ChatGPT til noen i steg i metodekapittelet. Dette er i form av noe koding og å få rettet opp feilmeldinger i R studio. ChatGPT er også benyttet til noe språkvask og enkel setningsoppbygging enkelte steder for å forbedre språket og flyten i teksten.

Litteraturliste

- Bach, M. M. (2024). *SPL100 Norway Pilot Project 2024*.
- Berrar, D. (2019). *Cross-validation*.
- Bollandsås, O. M., Hanssen, K. H., Marthiniussen, S. & Næsset, E. (2008). Measures of spatial forest structure derived from airborne laser data are associated with natural regeneration patterns in an uneven-aged spruce forest. *Forest Ecology and Management*, 255 (3-4): 953-961.
- Bollandsås, O. M., Rekstad, I., Næsset, E. & Røseberg, I. (2009). Models for predicting aboveground biomass of *Betula pubescens* spp. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24 (4): 318-332.
- Bollandsås, O. M. (2023). *Instruks for feltarbeid i Våler, sommeren 2023*.
- Brække, F. H. & Granhus, A. (2004). *Ungskogpleie i naturlig forynget gran på middels og høy bonitet*: Skogforsk.
- Braastad, H. & Tveite, B. (2000). *Ungskogpleie i granbestand. Effekten på tilvekst, diameterfordeling, kronehøyde og kvisttykkelse*: Norsk institutt for skogforskning.
- Burnham, K. P. & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological methods & research*, 33 (2): 261-304.
- Dalen, L. S. (2017). *Nye rekord tall for skogen i Norge*: Norsk institutt for bioøkonomi.
Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/nyheter/nye-rekordtall-for-skogen-i-norge>.
- DJI Oslo. (2018). *DJI MAVIC 2 Pro*. Tilgjengelig fra: <https://djioslo.no/produkt/mavic-2/djimavic-2-pro/>.
- Eid, T., Gobakken, T. & Næsset, E. (2004). Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19 (6): 512-523.
- Eid, T. (2023). *Planleggingsteori – notater for Skog300*: MINA, NMBU.
- Eriksson, P. (2004). Røjning. I.
- Fahlvik, N. (u.å.). Røjningens inverkan på beståndet.
- Fitje, A. (1998). *Tremåling*, b. 2: Landbruksforlaget.
- Geonorge. (2022). *Skogbruksplan - Hogstklasser og aldersklasser*. Geonorge: Geonorge.
- Glæserud, R. (2025). *Klasseinndeling ungskogpleiebehov*. Nordhagen, M. (red.).
- Hao, Z., Lin, L., Post, C. J., Jiang, Y., Li, M., Wei, N., Yu, K. & Liu, J. (2021). Assessing tree height and density of a young forest using a consumer unmanned aerial vehicle (UAV). *New Forests*, 52: 843-862.
- Harper, K. A., Macdonald, S. E., Burton, P. J., Chen, J., Broszofke, K. D., Saunders, S. C., Euskirchen, E. S., Roberts, D., Jaiteh, M. S. & Esseen, P. A. (2005). Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conservation biology*, 19 (3): 768-782.
- Hartley, R. J., Leonardo, E. M., Massam, P., Watt, M. S., Estarija, H. J., Wright, L., Melia, N. & Pearse, G. D. (2020). An assessment of high-density UAV point clouds for the measurement of young forestry trials. *Remote Sensing*, 12 (24): 4039.

- Holmstrom, H., Kallur, H. & Stahl, G. (2003). Cost-plus-loss analyses of forest inventory strategies based on kNN-assigned reference sample plot data. *Silva Fennica*, 37 (3): 381-398.
- Kohavi, R. (1995). *A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection*. Ijcai: Montreal, Canada.
- Korhonen, L., Pippuri, I., Packalén, P., Heikkinen, V., Maltamo, M. & Heikkilä, J. (2013). Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. *Silva Fennica*, 47 (2).
- Lotten, J. (2023). *Bruk av drone og kunstig intelligens til registrering av treantall og trehøyder i ungskog*: Høgskolen i Innlandet.
- Luftfartstilsynet. (u.å.). *Droneregler*. Tilgjengelig fra: <https://luftfartstilsynet.no/droner/droneregler/droneregler/#header50:header46>.
- Maltamo, M., Bollandsås, O. M., Næsset, E., Gobakken, T. & Packalén, P. (2011). Different plot selection strategies for fieldtraining data in ALS-assisted forestinventory *Forestry*, 84. doi: 10.1093/forestry/cpq039.
- Maltamo, M., Næsset, E. & Vauhkonen, J. (2014). Forestry applications of airborne laser scanning. *Concepts and case studies. Manag For Ecosys*, 27: 460.
- Mandlbürger, G., Lehner, H. & Pfeifer, N. (2019). A comparison of single photon and full waveform lidar. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4: 397-404.
- Moan, M. Å., Bollandsås, O. M., Saarela, S., Gobakken, T., Næsset, E., Ørka, H. O. & Noordermeer, L. (2025). Site index determination using a time series of airborne laser scanning data. *Forest Ecosystems*, 12: 100268.
- Naesset, E. (1997a). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 52 (2): 49-56.
- Naesset, E. (1997b). Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote sensing of environment*, 61 (2): 246-253.
- Nelson, R. (2013). How did we get here? An early history of forestry lidar1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39 (sup1): S6-S17.
- Nilsson, M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote sensing of environment*, 56 (1): 1-7.
- Noordermeer, L. (2017). *Taksering av ungskog med flybåren laserskanning*. Masteroppgave. Ås: Norwegian University of Life Sciences, Ås.
- Nordkvist, K. & Olsson, H. (2013). *Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket*: Institutionen för skoglig resurshushållning, Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.
- Norsk Institutt for Bioøkonomi. (2021). *Skogen i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.skogbruk.nibio.no/skogen-i-norge>.
- Norsk PEFC-Skogstandard. (2022). *NORSK PEFC SKOGSTANDARD*.

- Næsset, E. & Bjerknes, K.-O. (2001). Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote sensing of Environment*, 78 (3): 328-340.
- Næsset, E. (2004). Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19 (2): 164-179.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. (2004). Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19 (6): 482-499.
- Næsset, E. & Gobakken, T. (2008). Estimation of above-and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment*, 112 (6): 3079-3090.
- Næsset, E. (2013). Area-based inventory in Norway—from innovation to an operational reality. I: *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies*, s. 215240: Springer.
- Pettersson, N., Fahlvik, N., Karlsson, A., Redaktör, S. & Fries, C. (2012). *Skogsskötselserien: Røjning*: Skogsstyrelsen.
- Puliti, S., Ørka, H. O., Gobakken, T. & Næsset, E. (2015). Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 7 (8): 9632-9654.
- Ramdani, F. & Furqon, M. T. (2022). The simplicity of XGBoost algorithm versus the complexity of Random Forest, Support Vector Machine, and Neural Networks algorithms in urban forest classification. *F1000Research*, 11: 1069.
- Rindal, T. K., Geir Myklestad & Pettersen, J. (2017). Ungskogpleie. *Skogkurs resymé*, nr. 2 (7): 4.
- Räty, J., Varvia, P., Korhonen, L., Savolainen, P., Maltamo, M. & Packalen, P. (2021). A comparison of linear-mode and single-photon airborne LiDAR in species-specific forest inventories. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 1-14.
- Skogbrukets Kursinstitutt, Glommen Skog, Mjøsen Skog, Viken Skog, SB Skog, Nortømmer, Statskog & Fylkesmennene i Hedmark og Oppland. (2017). *Ungskogpleie øker verdien på skogen din*.
- Skogbrukslova. (2005). *Lov om skogbruk (LOV-2005-05-27-31)*. Landbruks- og matdepartementet. Lovdata: <https://lovdata.no/pro/lov/2005-05-27-31>.
- Skogeierforbund, N. (u.å). *Skogbruksplan*. Tilgjengelig fra: <https://skog.no/skogfaglig/skogbruksplan/>.
- Snowdon, P. (1992). Ratio methods for estimating forest biomass. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 22 (1): 54-62.
- Solodukhin, V., Mazhugin, I., Zhukov, A. Y., Narkevich, V., Popov, Y. V., Kulyasov, A., Marasin, L. & Sokolov, S. (1979). Laser aerial profiling of forest.
- Statistisk sentralbyrå. (2024). *Skogkultur*. Statistisk sentralbyrå. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/skogkultur>.
- Statsforvalteren, i. I. (2019). *Metode for beregning av plantetetthet ved kontroll av foryngelsesfelt*.

- Valkonen, S., Ruuska, J. & Siipilehto, J. (2002). Effect of retained trees on the development of young Scots pine stands in Southern Finland. *Forest Ecology and Management*, 166 (1-3): 227-243.
- Wu, Y., Zhang, Z., Qi, X., Hu, W. & Si, S. (2024). Prediction of flood sensitivity based on Logistic Regression, eXtreme Gradient Boosting, and Random Forest modeling methods. *Water Science & Technology*, 89 (10): 2605-2624.
- Wästlund, A., Holmgren, J., Lindberg, E. & Olsson, H. (2018). Forest variable estimation using a high altitude single photon lidar system. *Remote Sensing*, 10 (9): 1422.
- Yu, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Wang, Y., Liang, X., Matikainen, L. & Hyypä, J. (2020). Comparing features of single and multi-photon lidar in boreal forests. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168: 268-276.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N., Saveliev, A. A., Smith, G. M., Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A. & Smith, G. M. (2009). Mixed effects modelling for nested data. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*: 101-142.
- Ørka, H. O., Gobakken, T. & Næsset, E. (2016). Predicting attributes of regeneration forests using airborne laser scanning. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42 (5): 541-553. Ørka, H. O. (2025). *Sitat*.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway