



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2019 30 stp**

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning

## **Deteksjon av pionertrær i tregrenseøkotonen ved bruk av tredimensjonale punktskyer fra bildematching**

Detection of pioneer trees in the treeline ecotone  
using three-dimensional point clouds from image  
matching

**Steinar Gilleberg Stensli**

Master skogfag



## Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som avsluttende oppgave for min masterstudie i skogfag ved Norges miljø og biovitenskapelig universitet (NMBU).

Mange har bidratt til denne masteroppgaven. Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder Dr. Ole Martin Bollandsås, som kom med forslag til oppgave, og har alltid har vært tilgjengelig og behjelpelig gjennom hele prosessen.

Også stor takk til veileder og PHD- student Ida Marielle Mienna og veileder og professor Kari Klanderud som har vært en del av prosjektgruppen, og har kommet med gode tilbakemeldinger og har vært behjelpelig under hele prosessen. Også en stor takk til Marie-Claude Jutras-Perreault som har stått for prosesseringen av bildene, og vært til stor hjelp med det tekniske i oppgaven.

Takker alle andre ved NMBU som har vært til hjelp med deler av oppgaven, og familie for korrekturlesing av oppgaven.

Til slutt vil jeg takke alle medstudenter som har gjort dette til fem strålende år ved NMBU.

Ås, Mai 2019

Steinar Gilleberg Stensli



## Sammendrag

Tregrenseøkotonen (overgangssonen mellom skog og treløst alpint område) har alltid vært i endring. I en periode med økning i gjennomsnittstemperatur og en endring i arealbruken, er tregrenseøkotonen forventet å etablere seg i områder inntil nylig var treløse alpine områder. Det er viktig å følge med på endringer i tregrenseøkotonen da den har en viktig økologisk funksjon. Videre vil økt etablering av trær kunne føre til redusert albedoeffekt. På den annen side vil et økende antall trær gi økt biomasse som igjen vil kunne absorbere mer CO<sub>2</sub>. I en periode der endringer i tregrenseøkotonen skjer raskt er det behov for et fjernmålingssystem som kan gjøre dette på en effektiv og presis måte. Bruk av data fra flybåren laserskanning (ALS) har vist seg å være effektivt for deteksjon av pionertrær i tregrenseøkotonen med høyde over en meter, men for de mindre trærne er deteksjonssuksessen langt lavere. Et alternativ til ALS er bildematching, som lager tredimensjonale punktskyer til å måle objekter, noe som har vist seg å ha et potensial til overvåkning av skog.

I denne studien har egnetheten til tredimensjonale punkt-data fra bildematching, brukt til deteksjon av pionertrær i tregrenseøkotonen blitt undersøkt. Dataene er samlet på 31 lokaliteter langs en over 1100 km breddegradsgradient i Norge. Totalt ble 755 fjellbjørk (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*), gran (*Picea abies* (L.) Karst) og furu (*Pinus sylvestris* L.) registrert i felt, og kronevidde og trehøyde ble målt. Områdene ble fotografert ved bruk av drone, og tredimensjonale punktskyer ble laget fra de matchede bildene, punktene ble så normalisert ved å bruke terrengmodeller fra ALS. Analysen av dataen hentet fra bildematchingen viste at det er først når trær blir omtrent 1,2 m, at nesten alle trær blir detektert (>90 %). Totalt ble 73 % av alle trær små trær (<1 m) detektert, og fordelt på treslag var deteksjonssuksessen 45, 25 og 78 for henholdsvis bjørk, furu og gran.

Gjennomsnittsverdien, medianen, maksverdien og standardavviket for høydene til punktene innenfor polygoner med de observerte trærne ble sammenlignet med punkt-høydene innenfor polygoner som ikke inneholdt trær, og alle verdiene viste seg å være signifikant forskjellig mellom de to gruppene av polygoner. Studien har vist at bildematching har en presisjon som er tilsvarende presisjonen som en får fra ALS. Bildematching synes å ha et klart potensial til detektering av pionertrær i tregrenseøkotonen, og det kan synes å være et ytterligere potensial ved å kombinere høydeverdier fra punktskyene med spektralinformasjonen til bildene.



## Abstract

The treeline ecotone (the transition zone between forest and woodless alpine area) has always been changing. In a period with an increased average temperature and changes in land use, the treeline ecotone is expected to settle in areas where, until recently, there were treeless alpine areas. It is important to keep up with changes in the treeline ecotone as it has an important ecological function. Furthermore, increased establishment of trees could lead to a reduced albedo effect. On the other hand, an increasing number of trees will increase the amount of biomass that will again absorb more CO<sub>2</sub>. In a period in which changes in the treeline ecotone occur rapidly, there is a need for a suitable method of monitoring these changes, in an efficient and precise way. Use of data from airborne laser scanning (ALS) has shown to be effective for detection of pioneer trees above one meter, in the treeline ecotone. For the smaller trees, the detection success is lower. An alternative to ALS is image matching, which creates three-dimensional point clouds to measure objects, which has proven to have a potential for monitoring the forest.

In this study, the suitability of three-dimensional point clouds from image matching, used for detection of pioneer trees in the treeline ecotone, has been investigated. The data is collected from 31 locations along an over 1,100 km latitude gradient in Norway. In total, 755 mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*), Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst), and scots pine (*Pinus sylvestris* L.) were recorded in the field, and crown diameter and tree height were measured. The point clouds from the matched images, were normalized using terrain models from ALS. Analysis of data obtained from image matching showed that it is only when trees exceed 1,2 m, that almost all trees are detected (> 90%). In total, 73% of all small trees (<1 m) were detected, and by tree species the detection successes were 45, 25 and 78 for birch, scots pine and Norway spruce. The average value, median, max value and standard deviation for the points within the polygons with the observed trees were compared to the point heights within polygons that did not contain trees, and all the values were significantly different between the two groups of polygons. This study has shown that image matching has a precision level that equals ALS. Image matching seems to have a clear potential for detecting pioneer trees in the tree line ecotone and seem to have a further potential by combining height values from the point clouds with spectral information to the images.





# Innhold

Forord.....	I
Sammendrag.....	III
Abstract .....	V
1 Introduksjon .....	2
1.1 Metoder for overvåking av skog og tregrenseøkotonen .....	3
1.2 Bildematching som et alternativ til ALS.....	4
1.3 Hvorfor har bildematching blitt mer aktuelt.....	5
1.4 Tidligere studier på deteksjon av pionertrær i tregrenseøkotonen og problemstilling for denne oppgaven.....	6
2 Metode.....	7
2.1 Studieområde.....	7
2.2 Tregrenseregistreringer .....	8
2.3 Bildematching .....	9
2.4 Ekstrahering av punkter fra polygon med trær.....	10
2.5 Data analyse .....	11
2.6 Polygoner uten trær .....	12
3 Resultater.....	14
3.1 Deteksjon av pionertrær trær i tregrenseøkotonen .....	14
3.2 Sammenligning av polygoner med og uten trær.....	18
4 Diskusjon.....	20
4.1 Detektering av pionertrær ved bruk av bildematching.....	20
4.2 Sammenligning av polygoner med og uten trær.....	23
4.3 Bruk av bildematching i en operativ sammenheng .....	24
4.4 Videre studier på egnetheten til bildematching for detektering av små trær i tregrenseøkotonen .....	25
5 Konklusjon .....	26
6 Litteratur.....	27



# 1 Introduksjon

I perioden 1880 til 2012 har den globale temperaturen steget med 0,85 grader, og den er forventet å stige ytterligere (Pachauri & Meyer, 2014). Tregrensen påvirkes av endringer i gjennomsnittstemperaturen, og studier viser at den har vært i områder høyere over havet i perioder med høyere gjennomsnittstemperatur. I det siste århundre har tregrensen etablert seg i områder som tidligere var treløse alpine områder (BERNINGER et al., 2002; Holtmeier & Broll, 2005). For å kunne overvåke slike endringer er det et behov for et overvåkingssystem som kan følge med på endringen i tregrensen på en presis og kostnadseffektiv måte.

I denne sammenhengen vil det være upresist å bruke «tregrense», da det vil være vanskelig å si hvor en slik grense går med de definisjonene en bruker for å kategorisere ulike typer vegetasjon, herunder skog. Tregrenseøkotonen vil da være mer presist. «Økotoner er overgangssoner mellom tilstøtende økologiske systemer, og har et sett av egenskaper som er unikt definert av rom- og tid og ved styrken av samspillet mellom tilstøtende økologiske systemer (Hufkens et al., 2009). Skog defineres som; «landområder større enn 0,5 ha som er dekket av trær høyere enn 5 m, og enten at trærnes kronevidde dekker 5- 10 %, eller at det totale dekket av trær og busker overstiger 10 %» (FAO, 2015; Keenan et al., 2015).

Tregrenseøkotonen er overgangssonen mellom skog og tundra i alpine områder og arktiske og antarktiske områder (Harper et al., 2011).

Sett bort ifra den synlige overgangen, er det også en klar økologisk gradient langs tregrenseøkotonen (Holtmeier, 2009). Den klimatiske tregrenseøkotonen vil kun eksistere ved fravær av orografi (høydeforhold) eller ulike former for menneskelig påvirkning. På lokalt nivå, vil abiotiske faktorer som vind, jordtemperatur, lufttemperatur, antall dager med snødekke og biotiske faktorer som beiting, eller annen aktivitet, være begrensende faktorer for tregrenseøkotonen. Tregrenseøkotonen ligger ved toleransegrensen for hva planter krever av de ulike vekstfaktorene, noe som gjør den følsom for klimarelaterte endringer (Callaghan et al., 2002; Holtmeier & Broll, 2005). Den norske tregrenseøkotonen er dominert av fjellbjørk (*Betula pubescens* ssp. *Czerepanovii*), gran (*Picea abies* (L.) Karst) og furu (*Pinus sylvestris* L.). *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*

En økning i gjennomsnittstemperatur vil kunne føre til at planter øker i utbredelse, til både høyere breddegrader og til alpine områder som før var treløse, at artsrikdommen øker, og en forlenget vekstsesong. Økning i temperatur vil imidlertid også kunne føre til at enkelte

planter, som blant annet er avhengig av langvarig snøleie vil kunne forsvinne (Klanderud & Birks, 2003; Kupfer & Cairns, 1996; Lindner et al., 2010; Sætersdal & Birks, 1997).

Endringer i arealbruken, blant annet beiting, er også en viktig årsak til at tregrenseøkotonen etablerer seg på arealer som inntil nylig var treløse, alpine områder, og kanskje det man ser størst effekt av i det korte løp (Gehrig-Fasel et al., 2007).

## 1.1 Metoder for overvåking av skog og tregrenseøkotonen

For å kunne følge med på tilstanden og dynamikken i norske skoger, ble Landsskogstakseringen i 1919 etablert, med bakgrunn i en bekymring over at norske skoger kanskje ble overutnyttet. Ulike takstopplegg har vært brukt, men fra 1986 har Landsskogstakseringen blitt gjennomført ved gjentatte målinger på permanente prøveflater på 250m<sup>2</sup> med fem års mellomrom. Dette har gitt en lang tidsserie med data, og er et viktig hjelpemiddel i offentlig forvaltning, næring og industri. De permanente prøveflatene ligger i et forband på 3x3 km under barskoggrensen, og 3x9 km over barskoggrensen (Astrup et al., 2011; Larsson & Hysten, 2007).

Landsskogstakseringen fungerer godt for å følge med på allerede etablert skog, og endringer i disse områdene. Ved overvåking av tregrenseøkotonen vil hovedproblemet ved en eventuell bruk av data fra Landsskogstakseringen være at dataene er samlet inn på små observasjonsenheter som for dette spesifikke formålet ligger i et relativt grovt forband. Et slikt system vil i liten grad være tilstrekkelig for å kunne overvåke endringer i tregrenseøkotonen. Det gjøres heller ikke registreringer i flater i det som i dag er alpine områder (Larsson, 2004).

Hovedproblemet ligger altså i at Landsskogstakseringen ikke har noe godt overvåkingssystem for tregrenseøkotonen. Årsakene til at det ikke er noe egnet overvåkingssystem på landsbasis kan være de høye kostnadene ved datainnsamling, og mangelen på effektive kartleggingssystemer som kan dekke større områder med en høy grad av nøyaktighet (Thieme et al., 2011). Fjernmåling kan være et godt alternativ, hvor en enkelt kan få heldekkende data over et større område. Det vanligste og mest undersøkte fjernmålingssystemet er flybåren laser skanning (ALS), og ALS kan gi presis tre-dimensjonal karakteristikkk av den vertikale skogstrukturen. ALS har også vist seg å være en informasjonsrik ressurs for skogforvaltere,

hvor det er mulig å estimere en rekke skogegenskaper som høyde, grunnflate og volum (White et al., 2013).

ALS er en fjernmålingsteknikk, hvor det sendes ut laserpulser fra en sensor, pulsene treffer objekter på bakken og det genereres et ekko. Avstanden mellom sensoren og ekko bestemmes, og ekkoet klassifiseres som enten bakke eller vegetasjon. Den innhentede informasjonen brukes til å konstruere en terrengmodell, basert på ekkoene som er klassifisert som bakketreff. Vegetasjonsekkoene blir projisert ned på terrengmodellen slik at man finner høyden over bakken (Næsset, 1997). Ved bruk av ALS til overvåking av tregrenseøkotonen, ligger begrensningene til tettheten av laserpulsene. Tettheten til laserpulsene er avgjørende for om en klarer å detektere små pionertrær i tregrenseøkotonen. En annen viktig begrensning knyttet til detektering av små trær er at laserpulser vil kunne trenge gjennom trekrona, og små trær har gjerne ikke nok masse til å generere et ekko (Næsset, 2009; Thieme et al., 2011).

## 1.2 Bildematching som et alternativ til ALS

Et alternativ til å bruke punktdata fra ALS er data med tilsvarende egenskaper fra såkalt bildematching. Bildematching er en metode der romlig overlappende flyfoto blir brukt til å produsere tredimensjonale punktskyer, som potensielt kan gi mye av den samme informasjonen som ALS.

Nøyaktigheten til informasjonen ALS gir om skogegenskapene, som trehøyde og kubikkmasse, har også blitt dokumentert for bildematching i ens aldret og ensjiktet skog. Det har også blitt vist at høydeestimatene fra bildematching kan gi mer nøyaktige resultater for ung skog på alle boniteter og for gammel skog på lav bonitet, sammenlignet med ALS (Gobakken et al., 2015).

Punktdata fra bildematching vil på sin side ikke trenge gjennom trekronen. Punktene generert fra bildematching har også en langt høyere tetthet sammenlignet med laserpulsene til ALS. Dette er nyttige egenskaper ved detektering av små enkeltrær i tregrenseøkotonen (White et al., 2013). En kan også visuelt tolke informasjon om treslag, skader og sykdommer som fremdeles er vanskelig med ALS. Bruk av ulike flyfotosystemer kan redusere flytiden, da det er mulig å fly høyere og med en høyere hastighet enn ved bruk av ALS (Nurminen et al., 2013; White et al., 2013). Å erstatte ALS med bildematching til skogregistrering, ved tilgang til en pålitelig terrengmodell, kan gi en betydelig kostnadsreduksjon (Gobakken et al., 2015).

### 1.3 Hvorfor har bildematching blitt mer aktuelt

En stadig progresjon i utviklingen av digital fotogrammetri har gjort den langt enklere å bruke. En viktig forbedring er utviklingen i digitale arealkameraer som har gjort det langt enklere å anskaffe overlappende bilder, med en langt lavere kostnad og innsats. Flere bilder fra ulike vinkler gjør det mulig å få samme objekt fra flere ulike perspektiver. Dette reduserer sannsynligheten for okklusjon, altså områder som ikke synligjøres eller er skyggebelagt. Det vil også gjøre det fotograferte objektet mer geometrisk korrekt (White et al., 2013).

Ny datateknologi har laget komplekse algoritmer for anvendelse i bildematching. Denne forbedringen i datateknologi har gjort bildebaserte punktskyer langt mer detaljerte og presise (White et al., 2013). Nylig har også flere programvarepakker for anvendelse i bildematching kommet på markedet, dette har gjort skogovervåkning langt enklere (Gobakken et al., 2015).

For tiden foregår et prosjekt kaldt Nasjonal detaljert høydemodel (NDH). Laserdataene herfra blir fort utdaterte siden ungsoggen vokser, og kan derfor ikke benyttes i nye skogbruksplaner. Eventuelle kostnader ved nye registreringer må tas av skogbruket. Ved bruk av gratis informasjon om terrengoverflaten fra NDH, kan flyfoto brukes til å beregne høyde og kubikkmasse til en langt lavere kostnad enn ved bruk av ALS. Det er også en mulighet for å benytte gratis flyfoto i skogbruket gjennom det nasjonale programmet for omløpsfotografering. Her fotograferes hele landet hvert femte til tiende år (Gobakken & Næsset, 2019).

Det er et økende behov for et fjernmålingsverktøy som kan følge med på endringer i tregrenseøkotonen. Årsaken til at det er et behov for dette er at en endring i tregrenseøkotonens utbredelse vil påvirke jordsmonnet, dyrepopulasjoner, mineraliseringen, planters artssammensetning og biodiversiteten (Holtmeier & Broll, 2007). Etablering av trær på områder som før var treløse vil føre til en redusert albedoeffekt, som kan føre til økende gjennomsnittstemperatur. På en annen side vil et økende antall trær gi økt biomasse som igjen vil kunne absorbere mer CO<sub>2</sub> (De Wit et al., 2014).

#### 1.4 Tidligere studier på deteksjon av pionertrær i tregrenseøkotonen og problemstilling for denne oppgaven

I Norge har det blitt gjennomført studier (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011) der punktdata fra ALS har blitt brukt for å detektere små enkeltrær i tregrenseøkotonen. Med ALS kan man oppdage små trær ned til en meters høyde, med nesten 100 % sikkerhet, avhengig av tettheten til laserpunktene. Hvis trærne er mindre enn en meter, kan det hende at laserpulsene ikke treffer trær som ligger spredt i tregrenseøkotonen.

I en av studiene ved bruk av ALS ble det etablert et transekt i Norge (Thieme et al., 2011). Denne studien tar utgangspunkt i det samme transektet og registreringene ble gjort på nytt i 2018, denne gang ved bruk av bildematching.

I denne studien har egnetheten til tredimensjonale punkt-data fra bildematching, brukt til deteksjon av pionertrær i tregrenseøkotonen blitt undersøkt, Dataene er samlet på 31 lokaliteter langs en over 1100 km breddegradsgradient i Norge. Dette er første gang bildematching blir anvendt til detektering av pionertrær i tregrenseøkotonen. Denne studien vil gi en indikasjon på om dette er et egnet fjernmålingsverktøy i tregrenseøkotonen.

Vil bildematching vise en presisjon tilsvarende den en kan få fra ALS, til detektering av pionertrær i tregrenseøkotonen? Det forventes at sannsynligheten for om et tre blir detektert, øker med økt kronevidde og trehøyde, da dette er tilfellet ved bruk av ALS (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). Det forventes også at det er mulig å se forskjeller i høydeverdier som kommer fra trær, sammenlignet med andre objekter og vegetasjon.

## 2 Metode

### 2.1 Studieområde

Tilgjengelig data per Januar 2019 ble brukt i denne studien.

Studieområdet bestod av 36 lokaliteter fordelt langs en breddegradsgradient fra Senja (69°N) i Troms til Veggli i Buskerud (60°N) (Figur 1). Lokalitetene ligger i tregrenseøkotonen, og består hovedsakelig av lavt voksende vegetasjon, som er tilpasset klimaet i alpine områder. De var økologisk og topografisk ulike, hvor helningsgraden varierte fra flatt til bratt, og artssammensetningen varierte mellom lokalitetene. Det varierte også innad på lokalitetene ettersom hvor høyt over havet man var. Lokalitetene besto hovedsakelig av «krekling (*Empetrum nigrum*), blåbærlyng (*Vaccinium myrtillus*), mose (Bryophyta), lav, blokkebær (*Vaccinium uliginosum*), dvergbjørk (*Betula nana*), røsslyng (*Calluna vulgaris*), smyle (*Avnella flexuosa*) og starr (*Cyperaceae*). På lokalitetene var fjellbjørk, gran og furu de dominerende treslagene, men det var også noen innslag av rogn (*Sorbus aucuparia*) og osp (*Populus tremula*)» (Hilstad, 2019).

Transektet baserer seg på registreringer fra 2008. Her ble lokalitetenes plassering vurdert ut fra oversiktsbilder og kart. Tilgjengeligheten til vei, og nærheten til prøveflater fra Landsskogtakseringen ble også tatt med i vurderingen. På hver lokalitet ble det etablert to til fire sirkulære prøveflater med radius 25 m, lagt på rekke slik at de dekket overgangssonen mellom skog og fjell.





Figur 1- kart som viser de 36 lokalitetene (Thieme et al., 2011).

## 2.2 Tregrenseregistreringer

For hver prøveflate ble sentrum målt inn med posisjoneringsutstyr (GPS/GLONASS) med cm-nøyaktighet. Innenfor hver prøveflate, ble det med utgangspunkt i flatesentrum, gjort et utvalg av trær ved hjelp av Point-Centered Quarter Method (PCQ) (Cottam & Curtis, 1956).

Det ble benyttet en såkalt Truncated Point-Centered Quarter Method. Truncated kommer av at PCQ-samplingen som ble utført, stoppet 25 m fra sentrum (den ble trunkert). Det ble samlet trær i tre høydeklasser: Klasse 0 = 0 – 0,99 m, klasse 1 = 1- 1,99 m, klasse 2 =  $\geq 2$  m. Dette ble gjort innenfor kvadranter i PCQ-flatene. Kvadrantene ble delt inn ved hjelp av nord-sør og øst-vest linjer gjennom sentrum. Hvert tre som var nærmest sentrum for de respektive høydeklassene ble samlet, uavhengig av treslag. Totalt ble maksimum 12 trær registrert per prøveflate, men i flere tilfeller vil det bli færre, da det kan mangle trær i de ulike høydeklassene.

Alle trær ble posisjonert med omtrent 2 cm nøyaktighet. For alle trær ble det målt høyde, diameter ved rot og kronediameter, og treslag ble registrert. Trærne ble målt med en to meter lang målepinne (delt inn i cm), og i tilfeller med større trær enn to meter ble Vertex III hypsometer brukt. Kronediameter ble målt i kardinalretningene.

## 2.3 Bildematching

En drone (eBee) med et S.O.D.A. kamera ble brukt for å ta flyfoto over hver lokalitet. Dette er et kamera designet for fotografering fra drone, som gir presise tredimensjonale modeller av bakken. For å kunne georeferere bildene, ble det for hver lokalitet spredt trekors som skulle fungere som bakkekontrollpunkt. Kontrollpunktene ble posisjonert med GPS med en nøyaktighet på omtrent 2 cm.

I forkant av droneflygningen ble flyruten lagt inn for hver lokalitet i programvaren eMotion 3. Kjøremønsteret skulle ha 80% overlapp sideveis og i fartsretningen, slik at bildene fikk mest mulig overlapp. Før start ble dronen lagt flatt på bakken i et åpent område. Et bakkemodem ble koblet til en laptop, slik at flyruten som dronen skulle fly kunne legges til. Dronen ble kastet opp i luften og gjennomførte så flygingen og billedtakingen automatisk.

Bildenes oppløsning varierte fra de ulike lokalitetene, og strakte seg fra 1,86-4,09 cm/pixel, med et gjennomsnitt på 3,2 cm/pixel. Tettheten til punktene var i gjennomsnitt 92 punkter/m<sup>2</sup>, men varierte mellom 69 og 260 punkter/m<sup>2</sup>.

For å kunne få tredimensjonale punkttskyer av hver lokalitet med høyde og posisjon til hvert punkt, ble bildene fra droneflyvningene etterprosessert. Prinsippet til bildematching går ut på at når et objekt eller punkt blir avbildet fra to ulike perspektiver, gjør stereofotogrammetri det mulig å bestemme posisjonen til det punktet. Når en vet vinkelen og koordinatene til det fotograferte objektet, så kan høyden også regnes ut (White et al., 2013).

Bildene ble først ortorektifisert ved hjelp av bakkekontrollpunktene som ble plassert ut på lokalitetene. Dette ble gjort slik at bildene ble tillagt riktig koordinatsystem, og at trærne som ble fotografert fra ulike vinkler fikk korrekte koordinater. Bildematchingen resulterte i filer med koordinatbestemte tredimensjonale punkttskyer. Slike punkttskyer har i utgangspunktet ikke informasjon om høyden til hvert punkt over bakkenivået, derfor måtte punktene normaliseres. For å normalisere punktene ble en terrengmodell fra ALS-data brukt. ALS-

dataene i denne studien kom fra registreringer i 2008, 2012 og 2013 langs det allerede etablerte transektet.

Utgangspunktet var altså filer (lag) med en terrengmodell hentet fra ALS-registreringer og punktskyer fra bildematching. For å kunne identifisere det overlappende området for disse to lagene, måtte det lages såkalte *bounding boxes*. Dette er polygoner som brukes for å dele opp dataen i mindre polygon. Dette ble gjort i RStudio(R Core Team, 2018), og verdiene innenfor disse polygonene ble ekstrahert. Polygonene fra ALS dataen og punktskyene som overlappet basert på koordinater, ble slått sammen (Pierzchala, 2017).

Det var totalt 36 lokaliteter som ble registrert i felt, men vanskelige værforhold gjorde at det på fire lokaliteter ikke kunne brukes drone. Dermed ble det ikke bilder fra disse fire lokalitetene. På en av lokalitetene ble det problemer med normaliseringen av punktskyene, som resulterte i feil høydeverdier. Denne lokaliteten ble derfor ikke tatt med videre i analysene. Fratrukket disse, var det 31 lokaliteter representert som punktskyer og totalt 755 registrerte trær (648 bjørk, 62 furu og 45 gran).

## 2.4 Ekstrahering av punkter fra polygon med trær

Filene fra forrige prosess inneholdt normaliserte tredimensjonale punktskyer fra bildematchingen, med høyden til hvert punkt over bakkenivå. Målet videre var å se om det var mulig å detektere trærne ved hjelp av punktskyene fra bildematchingen. For å kunne gjøre dette måtte høydeverdiene til hvert enkelt punkt fra trær ekstraheres.

Ved hjelp av funksjonen `st_buffer` (Pebesma, 2018) i det statistiske analyseverktøyet RStudio(R Core Team, 2018), ble det etablert et sirkulært polygon rundt hver av de observerte trærne, med diameter lik den observerte kronediameteren. Det ble deretter foretatt en *overlay* mellom disse trepolygonene og punktdataene fra billedmatchingen. Dette ble gjort i en *loop*, hvor trepolygonene ble slått sammen med bildematchingsdata med samme ID-er (prøveflateID). Deretter kunne punktene som falt innenfor trepolygonet klippes ut. Det ble satt et minimumskrav for høydeverdier på 20 cm, verdier mindre enn dette ble ikke tatt med. Dette resulterte i et datasett med totalt 755 trær, med en ny tilleggsvariabel med punkter og deres tilhørende høyder over bakkenivå.

## 2.5 Data analyse

Ved positive høydeverdier innenfor et trepolygon, ble treet satt som detektert. Fra dette ble det laget en tabell hvor det ble sett på prosentandelen detektert/ikke detektert mot antall trær i hver høydeklasse (0-0,99m, 1-1,99m og  $\geq 2$ m), for henholdsvis bjørk, furu og gran.

For å analysere hvordan forklaringsvariablene (kronevidde og trehøyde) påvirker deteksjonssuksessen ble det tilpasset en logistisk modell. Responsvariabelen ble laget ut fra variabelen med høyden til punktene over terrengmodellen. Treet ble tilegnet tallet 1 om det var treff med positive høydeverdier  $>20$  cm, og 0 om det ikke var noen treff  $>20$  cm innenfor trepolygonet.

Det ble det brukt en generalisert lineær modell (GLM), den logistiske modellen ble tilpasset ved hjelp av glm-funksjonen i R (R Core Team, 2018). I mitt tilfelle blir den binære variabelen (detektert/ikke detektert) logistisk bundet til de uavhengige variablene, som skal vise påvirkningen av kronevidde og trehøyde for henholdsvis bjørk, gran og furu. Følgende modell ble benyttet:

$$\text{Log} \frac{\pi(\text{detektert})}{1-\pi(\text{detektert})} = \alpha + \beta_1 H + \beta_2 D$$

Hvor:

H	Høyden til treet målt i felt (cm)
D	Diameteren til trets krone målt i felt (m)
$\pi$	Den matematiske konstanten Pi

For å se på hvilken av de to modellene som beskrev best sannsynligheten for om et tre blir detektert eller ikke ble Akaiikes Information Criterion (AIC) brukt. Den med lavest verdi er den best forklarende modellen.

## 2.6 Polygoner uten trær

Ved bruk av bildematching vil punkter reflekteres fra det meste av vegetasjon (White et al., 2013), som resulterer i positive høydeverdier fra vegetasjon eller andre objekter som ikke er trær. Dette er hva en kaller falske positive deteksjoner. Problemet med disse falske deteksjonene er at en potensielt kan tro at et tre er detektert, men de positive høydeverdiene viser seg å komme fra andre objekter enn selve treet. Derfor var det behov for å plassere polygoner i områder hvor det ikke var registrert trær, for så å sammenligne høydeverdiene innenfor disse polygonene med høydeverdier innenfor polygonene med trær.

For å gjennomføre dette ble det laget en prøveflate i hver kvadrant hvor det ikke befant seg trær. Det var totalt 99 prøveflater, og 4 kvadranter i hver av disse, i alt 396 kvadranter. Siden utvalget av trær etter PCQ-metoden alltid er det nærmeste i hver kvadrant, kunne det etableres et polygon innenfor dette området. Avstanden måtte subtraheres med radiusen til kronevidden for dette treet. Ut fra informasjon om nærmeste tre hentet fra feltregistreringene, ble det laget en buffersone ved bruk av `st_buffer` (Pebesma, 2018), hvor radiusen til denne sirkelen strekker seg fra sentrum av prøveflaten til nærmeste tre subtrahert med radiusen til kronevidden. Totalt ble det fire sirkler per prøveflate, en for hver kvadrant. For å dele opp sirklene slik at kun området innenfor riktig kvadrant ble brukt, så ble hver kvadrant bli delt opp i kvadrater. Disse skal seinere klippes sammen med sirklene. Kvadratene ble laget ved å bruke sentrumskoordinatene som referanse og deretter posisjonere hvert hjørne basert på dens plassering i prøveflaten, hver lengde var 25 m. Ved bruk av `gIntersection` (Rundel, 2018) ble det laget romlige objekter av kvadratene og bufferne som hadde kryssende linjer og samme kvadrantID.

Om noen av de tilfeldige utplasserte polygonene skulle havne i utkanten av prøveflaten, ville en potensielt kunne få høydeverdier fra et tre. Det var derfor nødvendig å lage en innvendig buffer, her ble `gbuffer` (Rundel, 2018) brukt. Denne skulle være 31 cm innenfor prøveflaten. Innenfor hvert polygon uten trær, ble et sirkelpolygon med diameter lik median kronediameter (31 cm) til de observerte trærne, tilfeldig plassert. Ved bruk av `spsample` (Bivand, 2005) ble et tilfeldig prøvepolygon plassert ut i hver av de nye prøveflatene. Ved så å slå sammen dette med bildematchingsdataene ved bruk av `lasclip` (Auty, 2019), kunne høydeverdiene fra bildematchingsdataen klippes ut innenfor de nye prøvepolygonene.

Fra forrige prosess var det nå to datasett som inneholdt alle punkter med høydeverdier >20 cm, med tilhørende ID, et for polygoner med trær og ett uten trær. Ut fra dette ble det laget en tabell hvor andelen punkter ble telt opp i høydeklassene <25 cm, 25-29 cm, 30-34 cm, 35-39 cm, 40-44 cm, 45-49 cm og >50 cm.

Målet med dette var å se om høydeverdiene til punktene som ble ekstrahert fra de tilfeldige prøvepolygonene fordelte seg ulikt sammenlignet med høydeverdiene til punktene ekstrahert fra trepolygonene. Alle punkter innenfor polygoner med og uten trær med samme kvadrant-ID ble sammenlignet. Totalt var det høydeverdier innenfor 86 kvadranter som ble sammenlignet. Årsaken til en reduksjon fra 396 kvadranter, var kravene om at det må være høydeverdier >20 cm, noe flere av polygonene uten trær ikke hadde, og at noen kvadranter ikke inneholdt trær. Det ble regnet ut gjennomsnittet, maksverdien, minimumsverdien, standardavviket og medianen for høydeverdiene innenfor hver av de 86 polygonene med og uten trær. Deretter ble det kjørt en paret t.test for å teste om punktenes høydeverdier var signifikant forskjellig fra hverandre. Fra dette ble det laget en tabell. Gjennomsnittet av maksverdien, minimumsverdien, standardavviket, gjennomsnittet og medianen ble regnet ut, for å gi et eksempel på hvilke høydeverdier det var. P-verdien fra t.testen ble lagt inn.

## 3 Resultater

### 3.1 Deteksjon av pionertrær trær i tregrensekotonen

Totalt var 755 trær med i analysen, av disse var 648 bjørk, 45 gran og 62 furu.

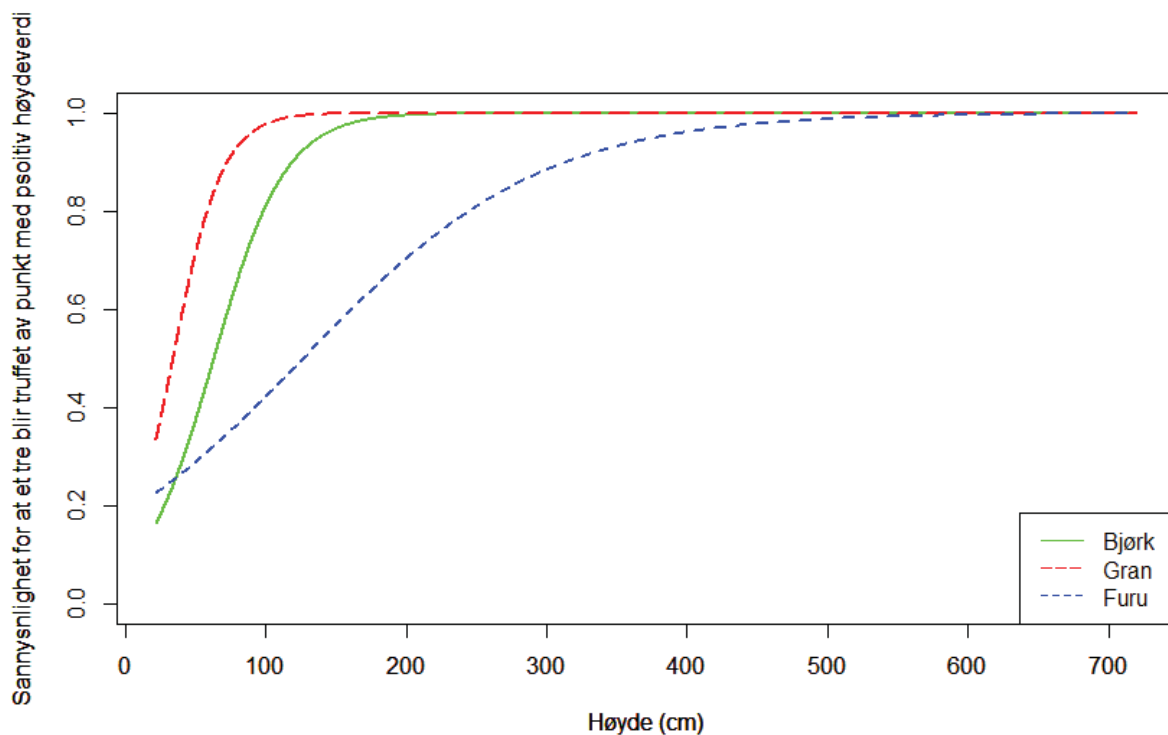
Deteksjonssuksessen for alle trær, uavhengig av treslag og høyde var 73 % (Tabell 1). Fordelt på treslag hadde gran størst deteksjonssuksess på 96 %, deretter bjørk på 74 % og furu på 50%. Fordelt på høydeklasser hadde også gran størst deteksjonssuksess. I høydeklasse 0 – 0,99 har gran enn langt høyere deteksjonssuksess en bjørk og furu (79 mot 45 og 25%). I høydeklasse 1-1,99 m ble nesten all bjørk og gran detektert (henholdsvis 94 og 100 %), og for furu er deteksjonssuksessen lavere, 64 %. Ved høydeklasse  $\geq 2$  m er det fremdeles forskjell, så godt som all bjørk og gran ble detektert (henholdsvis 99 og 100 %), og furu noe lavere, 88 %.

Tabell 1- Deteksjon suksess fordelt på treslag og høydeklasse.

Treslag	Høydeklasse	Antall	Funnet	Detektert %
Bjørk	$\geq 2$ m	149	148	99
	1- 1,99 m	217	204	94
	0 – 0,99 m	282	126	45
	Totalt	648	478	74
Furu	$\geq 2$ m	16	14	88
	1- 1,99 m	14	9	64
	0 – 0,99 m	32	8	25
	Totalt	62	31	50
Gran	$\geq 2$ m	13	13	100
	1- 1,99 m	23	23	100
	0 – 0,99 m	9	7	78
	Totalt	45	43	96
Totalt (Alle trær)		755	552	73

Analysen av GLM modellene viser at sannsynligheten for at et tre blir detektert øker ved økende kronevidde og høyde (Figur 2 og 3). Både høyde og kronevidde hadde en signifikant ( $P < 0,001$ ) sammenheng med sannsynligheten for å detektere treet. AIC verdien for modellen med kronevidde var lavere enn modellen med trehøyde.

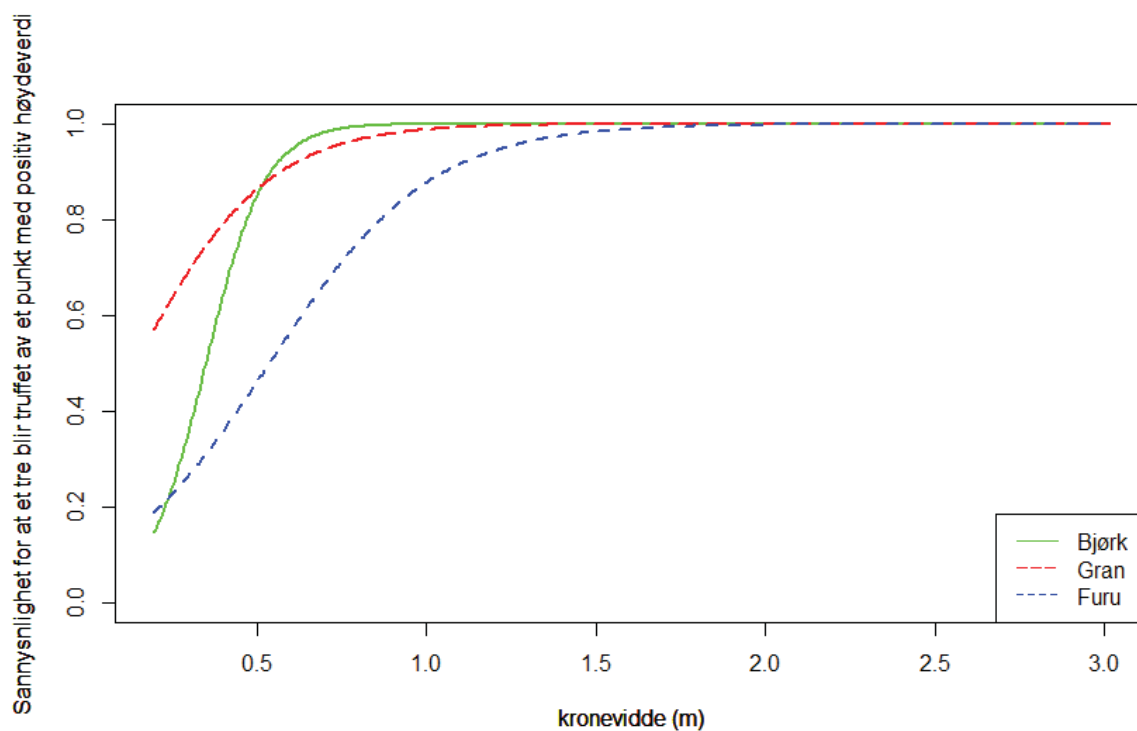
For gran ble nesten alle trær  $>70$  cm detektert (90 %) (Figur 2). For bjørk ble nesten alle trær detektert hvis de var  $>1$  m (90%). For furu er ikke resultatet så tydelig og det er ikke noe tydelig skille ved en bestemt trehøyde. Først når furua nådde en høyde på ca. 3 m ble over 90 % blir detektert.



Figur 2 – Forventet sannsynlighet for at det var minst et punkt fra bildematchingen med positiv høydeverdi innenfor et trepolygon som en funksjon av trehøyde for henholdsvis bjørk (grønn heltrukket linje), gran (rød stiptet linje), og furu (blå stiptet linje)

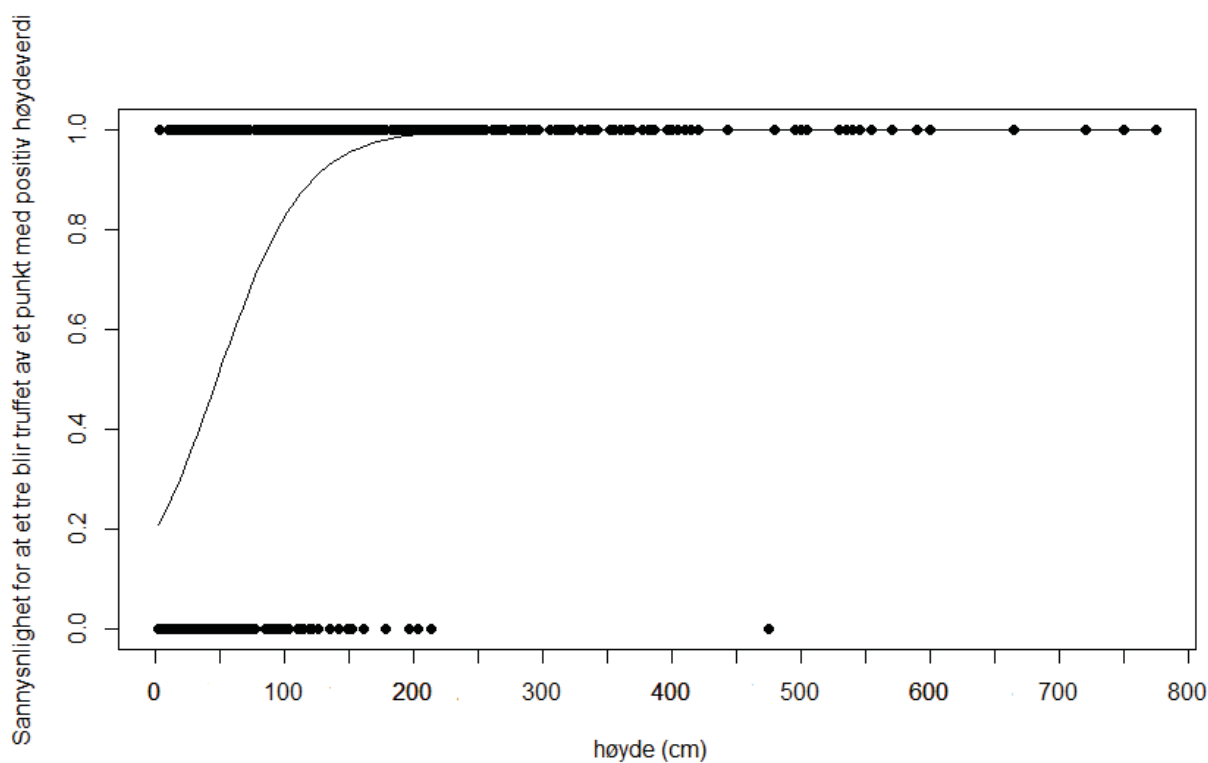


For bjørk og gran ble nesten alle trær detektert (> 90 %) når de nådde en kronevidde >0,6 m (Figur 3). Furu har ikke fullt så klar endring i kurven ved en bestemt kronevidde, men nesten alle ble detektert når kronevidden ble >1,1 m.



Figur 3 – Forventet sannsynlighet for at det var minst et punkt fra bildematchingen med positiv høydeverdi innenfor et trepolygon som en funksjon av kronevidde for henholdsvis bjørk (grønn heltrukken linje), gran (rød stiptet linje), og furu (blå stiptet linje)

Figur 4 viser at for alle treslag samlet (bjørk, gran og furu), så blir nesten alle trær (>90 %) detektert når de når en høyde på omtrent 1,2 m. De fleste trærne som ikke er detektert (nederste linje) ligger mellom 0 og 1 m. Noen av trærne er rundt 2 m og en furu som ikke ble detektert var 4,75m. Analysen av GLM modellen viste at det var kun furu som hadde signifikant påvirkning på deteksjonssuksessen. Sannsynligheten for å detektere et tre vil gå ned hvis treet er furu relativt til at treet er bjørk. Modellen viste også at det var mer sannsynlig å detektere treet hvis det er gran enn bjørk.



Figur 4 - Forventet sannsynlighet for at det var minst et punkt fra bildematchingen med positiv høydeverdi innenfor et trepolygon som en funksjon av høyde for alle treslagene samlet. Hvert punkt representerer et tre.

### 3.2 Sammenligning av polygoner med og uten trær

Tabell 2 viser at det for polygonene med trær var 84150 punkter med høydeverdier >20 cm, hvor den største andelen av punkter hadde verdier >50 cm (66,5 %). For polygonene uten trær var det 34947 punkter med høydeverdier >20 cm, hvor den største andelen av punkter hadde verdier <35 cm (60,6 %).

Tabell 2. Fordelingen av andelen punkter innenfor ulike høyder for polygoner med og uten trær. Prosentene er hvor stor andelen av punktene innenfor høyden er av det totale antallet av punkter

Høyde	Med Trær	%	Uten trær	%
<0.25 cm	4182	5,0	7661	21,9
25-29cm	5277	6,3	8014	22,9
30-34cm	5315	6,3	5507	15,8
35-39cm	4870	5,8	3640	10,4
40-44cm	4353	5,2	2442	7,0
45-49cm	4185	5,0	1474	4,2
>0.50 cm	55968	66,5	6209	17,8

Høydeverdiene innenfor polygoner med og uten trær ble sammenlignet for 86 kvadranter. Den parvise t.testen til disse polygonene, viste at de var signifikant forskjellig fra hverandre på gjennomsnittsverdier, standardavvik, maksverdier og median (Tabell 3). Minimumsverdien var ikke signifikant forskjellig fra hverandre.

*Tabell 3, Snittverdien, standardavviket, minimumsverdien, maksverdien og medianen til høydeverdiene for de 86 kvadrantene som ble sammenlignet for polygonene med og uten trær, og P-verdiene til den parvis t.testen. Tabellen viser et gjennomsnitt av verdiene, for å gi en indikasjon på hvilke høydeverdier det var i de ulike kategoriene.*

	<b>Med trær</b>	<b>Uten trær</b>	<b>P-verdi</b>
Snitt	0.69	0.35	<0.001
Std	0.43	0.09	<0.001
Min	0.21	0.21	0.197
Max	8.23	3.57	<0.001
Median	0.49	0.28	<0.001

## 4 Diskusjon

### 4.1 Detektering av pionertrær ved bruk av bildematching

For små trær (<1 m) var deteksjonssuksessen ved bruk av bildematching på 45 % for bjørk, 25 % for furu og 78 % for gran (Tabell 1). For ALS har det blitt vist en deteksjonssuksess for små trær på henholdsvis 50 % hos bjørk, 37 % for furu og 45 % for gran (Thieme et al., 2011). En annen studie på bruk av ALS i tregrenseøkotonen var deteksjonssuksessen for små trær på henholdsvis 34 % hos bjørk, 9 % for furu og 67 % for gran, her viste det seg også at iterasjonsvinkel ser ut til å ha betydning. (Næsset & Nelson, 2007). I denne studien ble totalt 73 % av alle trær detektert (Tabell 1). Dette sammenfaller med studien på ALS hvor 71% av alle trær ble detektert (Thieme et al., 2011).

Denne studien viser at først når trærne når en høyde på omtrent 1,2 m, så blir nesten alle (>90 %) detektert (Figur 4), og dette sammenfaller med studiene på bruk av ALS i tregrenseøkotonen (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). Som ved deteksjon med bruk av ALS er deteksjonssuksessen ganske lav for de minste trærne. At deteksjonssuksessen er lav for de minste trærne er imidlertid ikke kritisk sett i en sammenheng hvor bildematching skal brukes til en operativ overvåking av tregrenseøkotonen. Av naturlige årsaker vil yngre trær være i fase der de er mindre tolerante for ytre påvirkning som tørke, angrep fra sopp og insekter, derfor er mortaliteten større for disse trærne (Vega & Hofstetter, 2014). Derfor vil det kanskje ikke være hensiktsmessig å ta med de minste trærne, det de større trærne som i denne sammenhengen sier noe om at tregrenseøkotonen har etablert seg på områder som før var treløse.

Analysene viste at deteksjonssuksessen for furu var lavere sammenlignet med gran og bjørk, spesielt i høydeklasse 0 – 0,99 m, men at forskjellene i de høyere høydeklassene var mindre (Tabell 1). Dette sammenfaller med tidligere studier gjort med ALS data, hvor furu hadde lavest deteksjonssuksess for små trær (<1 m), sammenlignet med gran og bjørk (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). Deteksjonssuksessen for furu i de to øverste høydeklassene (Tabell 1) er noe lavere sammenlignet med de fra studiene der det ble brukt ALS (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). For furu er det enkeltindivider av de større trærne som ikke er detektert, blant annet et tre som var 4,75m høyt med en kronevidde på 193 cm. Dette treet ble i felt observert med en veldig tynn krone langs hele stammen, og

kronevidden ble målt helt nederst på stammen. Denne tynne kronen langs stammen kan være forklaringen på at dette treet ikke ble detektert. Med relativt få observasjoner på furu, spesielt sammenlignet med bjørk, vil slike spesielle enkeltindivider gi et klart utslag på resultatet.

Studiene på ALS viste at treslag har en signifikant påvirkning på sannsynligheten for at et tre blir detektert eller ikke, men dette gjelder i all hovedsak for de minste trærne. For trær >1 m blir de fleste trær detektert, uavhengig av treslag (Næsset & Nelson, 2007). At treslag spiller inn på deteksjonssuksessen er ikke uventet, ettersom trær har ulik form. Gran har ofte en tettere krone enn furu og bjørk, og dette er spesielt gjeldene for saktevoksende gran i sub-alpine og alpine områder hvor det dannes en tett krone med mye død kvist. Små bjørke- og furutrær har ikke ha fullt så tett krone som gran. Dette vil ikke alltid være tilfellet på grunn av variasjoner fra individ til individ, men det kan virke å være hovedtrenden blant små trær i alpin sone (Næsset & Nelson, 2007). I denne studien hadde treslag ingen signifikant påvirkning på om et tre ble detektert eller ikke, med unntak av furu for modellen med høyde som forklaringsvariabel ( $p < 0,001$ ). At furu har signifikant påvirkning kan forklares med relativt få observasjoner og store trær som ikke ble detektert. GLM analysene viser likevel at det er en forskjell i deteksjonssuksessen mellom treslagene (Figur 2 og 3).

GLM-analysene viste at høyde og kronevidde hadde en signifikant påvirkning på sannsynligheten for om et tre blir detektert ved bruk av punkttskyer fra bildematching (Figur 2, 3 og 4), dette sammenfaller med tidligere studier (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). Dette var forventet, jo større kronevidde, jo større sannsynlighet er det for at treet skal bli fanget opp av et punkt fra bildematchingen. For ALS er kronevidden den viktigste faktoren for å forklare sannsynligheten for om et tre bli detektert, dette er fordi det er en direkte sammenheng mellom arealet til trekronen og sannsynligheten for at den skal bli truffet av en laserpuls (Næsset & Nelson, 2007). Dette var også gjeldende ved bruk av bildematching, kronevidden var den viktigste faktoren for om en et tre ble detektert. Dette ble bekreftet når modellene ble sammenlignet, modellen hvor kronevidde var den forklarende faktoren hadde en lavere AIC-verdi. At høyde også er med på å forklare om et tre blir detektert eller ikke, kommer av at høyde er sterkt korrelert med kronevidde. I tillegg er også en viss usikkerhet i høydeverdien til hvert punkt, og høyden på et punkt fra et høyere tre vil være med større sannsynlighet forskjellig fra null.

Ser en på deteksjonssuksessen som en funksjon av kronevidde, ble nesten all gran og bjørk detektert når kronevidden var >0,6 m, og nesten all furu når kronevidden var >1,1 m (Figur

3). At furu viser seg å ha en lavere deteksjonssuksess skyldes i dette tilfellet at en del store enkeltindivider ikke ble detektert, noe som ga utslag på dataene. Dette gjaldt blant annet den tidligere nevnte furua med kronevidde på 193cm.

Deteksjonssuksessen som en funksjon av kronevidde (Figur 3) er noe høyere for gran og bjørk sammenlignet med studiene på ALS. Der ble nesten all gran og bjørk detektert når kronevidden var  $>1$  m. (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). I den ene studien på ALS ble nesten all furu detektert når kronevidden var  $>0,5$  m (Thieme et al., 2011), dette avviker fra denne studien. For den andre studien ble nesten all furu detektert når de nådde en kronevidde på  $>1$  m (Næsset & Nelson, 2007), dette sammenfaller med denne studien.

For alle treslagene samlet (bjørk, furu og gran) detekterer punktskyer fra bildematching en større andel trær med mindre kronevidde, sammenlignet med ALS (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). Dette kan trolig forklares med tettheten til punktene fra bildematching sammenlignet med ALS. Tettheten til punktene fra bildematching strakk seg fra 69 til 260 punkter/m<sup>2</sup>, og gjennomsnittet var 92 punkter/m<sup>2</sup>. Med ALS ble nesten alle trær  $\geq 1$  m truffet av minst en laserpuls, når pulstettheten lå mellom 6,8-8,5 punkter/m<sup>2</sup> (Næsset & Nelson, 2007). For ALS er sannsynligheten for om et tre skal bli truffet av minst en laserpuls i all hovedsak er en funksjon av tettheten til laserpulsene (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011).

I denne studien har bildene blitt samlet inn over en lengre tidsperiode, med ulike solvinkler og lysforhold. Slike variasjoner i forholdene under datainnsamlingen ble ikke analysert i denne studien. Det kunne vært interessant å sett på om variasjoner i lys og solvinkel påvirket deteksjonssuksessen. Gobakken et al (2015) konkluderte i sin studie at det var behov for å evaluere effekten av ulike bildeforhold forårsaket av solvinkel og lysforhold i en operativ skala. I den studien ble alle dataene samlet inn samme dag og dermed under ganske like forhold. At dataene i denne studien har blitt samlet inn under ulike forhold, gjør at den mer er representativ for en operativ setting, og styrker dermed datamaterialet i denne studien.

## 4.2 Sammenligning av polygoner med og uten trær

I denne studien var det ingen tilgjengelig klassifisering av små trær eller andre terrengobjekter. Derfor ble det sett på om høydeverdiene til punktene reflektert fra andre objekter rundt trærne fordelte seg ulikt sammenlignet med punkter fra trær og dermed kunne gi en indikasjon om det er mulig å klassifisere funnene. Om det ikke var noen forskjell i høydeverdiene ville det være tilfeldig om en fikk punkter med positive høydeverdier innenfor trepolygonene. Når modellen ble tilpasset på 1-0 data, krevdes det kun at det måtte være punkter med høydeverdier  $>20$  cm innenfor trepolygonet for å gi treet «1». Her ble det i stedet sett på hvilke høydeverdier punktene i trepolygonene hadde, sammenlignet med polygonene uten trær. En forbedring i denne studien ville da vært å klassifisere hvert enkelt punkt basert på informasjon om fordelingen av høydeverdiene, og brukt dette til å detektere trær.

Fordelingen av punkter innenfor de ulike høydeklassene viste seg å være forskjellig fra polygoner med trær sammenlignet med de uten trær (Tabell 2). 66,5 % av punktene lå i høyder  $>50$  cm for polygonene med trær, for polygonene uten trær lå 60,6 % av punktene i høyder  $<35$  cm. Dette var forventet, da trær i de fleste tilfeller vil være høyere enn vegetasjonen rundt, og derfor vil naturlig generere flere punkter i de større høyder sammenlignet med vegetasjon som ikke er trær.

Høydeverdienes gjennomsnitt, median, standardavvik og maksverdi, ekstrahert fra trepolygon og polygoner uten trær viste seg å være signifikant forskjellig fra hverandre (Tabell 3). At trærne faktisk har blitt detektert i alle tilfellene kan ikke vites med sikkerhet, men den signifikante forskjellen styrker sannsynligheten for at punktene ekstrahert fra trepolygonene faktisk er trær. For minimumsverdiene var det ingen signifikant forskjell, dette var forventet da høydeverdier  $<20$  cm ble ekskludert fra analysen.

Punktene innenfor de treløse polygonene viste seg i mange tilfeller å ha høydeverdier  $>20$  cm, dette øker sannsynligheten for at såkalte falske positive deteksjoner vil og kan ha inntruffet. Det var altså ingen klassifisering i forkant av denne studien, men ut ifra registreringene i felt, visste en hvor trærne sto. Om trærne ikke var registrert i felt i forkant, ville det derfor vært en stor overestimering hvis en sa at alle punkter med høydeverdier  $>20$  cm var punkt fra trær. For å finne ut hvor stor denne feildetekteringen er har det blitt forsøkt å detektere andre objekter med samme høyde som trærne med ALS. Dette viste seg å ha en vel så stor suksess som detektering av selve trærne. Næset og Nelson (2007) mener at dette kan tyde på at feiltolkning er en signifikant feil ved detektering av trær.



Det har også blitt vist at det er mulig å skille objekter med samme høyde som trærne, fra trær. Ved gjentatte målinger over tid vil terrengformasjoner og andre objekter som steiner forholde seg stabile. Trær på sin side vil endre seg ved at de vokser eller at nye trær rekrutteres. Det har derfor blitt konkludert at ved bruk av ALS med en viss tetthet av pulser, og en viss tetthet av nye trær, vil det være mulig å oppdage nok nyetablerte trær til å kunne si at rekrutering finner sted (Næsset & Nelson, 2007).

En usikkerhet knyttet til punktskyene fra bildematching er at det har oppstått feil ved normaliseringen. En lokalitet ble fjernet på grunn av dette. Potensielt kan det være feil med normaliseringen på andre lokaliteter også, noe det kan tyde på hvor enkelte av polygonene uten trær hadde høydeverdier på  $>1$  m. Feil ved normaliseringen kan føre til at deteksjonssuksessen har blitt overestimert på grunn av for store høydeverdier. Eventuelt motsatt og høydeverdiene har vært for lave og deteksjonssuksessen har blitt underestimert. Høydeverdiene ekstrahert fra polygonene med trær viste seg likevel i de fleste tilfeller å være høyere enn polygonene uten trær, i de tilfellene hvor det var høydeverdier  $>1$  m.

#### 4.3 Bruk av bildematching i en operativ sammenheng

I en operativ sammenheng kan resultater fra slike treløse polygoner brukes til å klassifisere funnene, ved å bruke fordelingen av høydeverdier til å bestemme om det er et tre eller andre objekter. I en operativ setting vil det i forkant mest sannsynlig ikke være informasjon om trærns posisjon. Ved kartlegging over større områder, kan en se for seg at en deler opp punktskyene til det respektive området inn i flere celler, på eksempelvis  $1 \times 1$  m. I dette tilfellet vil det mest sannsynlig være punkter med positive høydeverdier i alle disse cellene. Et alternativ vil da være å tilpasse modellen basert på materiale fra celler med og uten trær, og bruke egenskapene ved høydefordelingen til punktene i hver celle som forklaringsvariabel. Da vil det ikke lenger være nok med positive høydeverdier innenfor cellen for å si at det er et tre der, men en må ta hensyn til fordelingen av høydeverdiene. Ved gjentatte målinger i samme område, vil man også kunne luke vekk andre objekter som genererer punkter med positive høydeverdier tilsvarende høyder fra trær. Disse vil i all hovedsak ligge på samme sted og vil ikke endre seg i størrelse, noe et tre vil gjøre (Næsset & Nelson, 2007)

Ett fortrinn bildematching har til kartlegging av skog, sammenlignet med ALS, er at det i større grad er muligheter i bruken av spektralinformasjonen. Studier har vist at det er mulig å

gjenkjenne treslag ut fra spektralinformasjonen til bildene (Waser et al., 2011; Zhang & Qiu, 2012). Optisk satellitt data kombinert med topografisk informasjon har vist seg å være nyttig til karlegging av alpin vegetasjon. En studie kombinerte data fra ALS med optisk satellitt data og topografisk informasjon for å klassifisere alpin vegetasjon (Reese et al., 2014). Her ble det vist at klassifiseringspresisjonen økte med 14,2 % ved å kombinere ALS, optisk satellitt data og topografisk informasjon, sammenlignet med bare optisk satellitt data. Klassene som dro mest nytte av å tilegne data fra ALS, var fjellbjørk og vier (*Salix ssp*). Slik kombinasjon av informasjon kan da brukes til å klassifisere funnene, og potensielt vil det være mulig å skille trær fra andre objekter i tregrenseøkotonen. Dette vil være med på å minske sannsynligheten for en overestimering av trær, på grunn av falske positive deteksjoner

Bildematching er avhengig av en pålitelig terrengmodell, at det i Norge nå gjennomføres et landkartleggingsprogram (NDH), gjør at det med tiden ville være tilgjengelig terrengmodell for hele landet (Gobakken & Næsset, 2019). Dette gjør at bildematching blir langt mer aktuelt, når en terrengmodell er tilgjengelig.

#### 4.4 Videre studier på egnetheten til bildematching for detektering av små trær i tregrenseøkotonen

Før det kan konkluderes med at bildematching er et egnet redskap til overvåking av tregrenseøkotonen, trengs det mer studier. I fremtidige studier ville det vært interessant å se videre på fordelingen av høydeverdier fra bildematchingsdata. I denne studien viste det seg at punkter ekstrahert fra polygoner med trær er signifikant forskjellig fra polygoner uten trær, og høydefordelingen er klart forskjellig (Tabell 2 og 3). Med mer data fra bildematching i tregrenseøkotonen, vil det trolig være mulig å få til et ganske så presist verktøy for operativ overvåking i tregrenseøkotonen, basert fordelingen av høydeverdier til å klassifisere funnene.

Det ville også vært interessant med studier der det ble benyttet kameraer med flere spektrale bånd, for å skille trær fra andre objekter. Studier har vist at å kombinere informasjon om høydeverdier med spektralinformasjon til klassifisering av alpin vegetasjon, er mer presist enn klassifisering med spektralinformasjon alene (Reese et al., 2014). Derfor er det nærliggende å tro at en kombinasjon av fordelingen av høydeverdier sammen med spektralinformasjon, vil kunne gjøre bildematching til et relativt presist verktøy til overvåking av tregrenseøkotonen.

## 5 Konklusjon

I denne studien har det blitt funnet ut at når trær blir >1,2 m så blir nesten alle trær (>90 %) i tregrenseøkotonen detektert, ved bruk av bildematching. Den totale deteksjonssuksessen var 73%. Dette viser at bildematching har en tilsvarende presisjon som ALS til detektering av små trær i tregrenseøkotonen. Den viktigste variabelen for om et tre blir detektert eller ikke er kronevidden. Dette sammenfaller med studiene ved bruk av ALS, men der avhenger det også av tettheten til laserpulsene (Næsset & Nelson, 2007; Thieme et al., 2011). Bildematching kan synes i større grad å detektere trær med en mindre kronevidde ALS.

For å finne ut om punktenes høydeverdier fordeler seg ulikt fra polygoner med trær og andre objekter, ble det plassert ut polygoner tilfeldig i områder hvor det ikke var trær. Resultatet fra dette viste at fordelingen var ulik, 66,5% av punktene hadde høydeverdier >50 cm for polygoner med trær. For polygonene uten trær lå 60,6 % av punktene i høyder mellom 20 og 35 cm. Høydeverdiene gjennomsnitt, median, standardavvik og maksverdi var signifikant forskjellig fra hverandre. Dette viser at det er mulig å klassifisere funnene basert på punktenes høydeverdi.

Det har i denne studien blitt undersøkt et tilstrekkelig antall trær til å kunne si at bildematching har et klart potensial til detektering av pionertrær i tregrenseøkotonen, og vil derfor kunne være et nyttig verktøy for å se påvirkning av klimaendring og endret arealbruk på tregrenseøkotonen. Bildematching kan virke å ha et ytterligere potensial hvis høydeverdier kombineres med spektralinformasjon til klassifisering av funnene. Dette er første gang bildematching er anvendt til deteksjon av trær i tregrenseøkotonen. Det bør derfor gjøres ytterligere forsøk før dette kan tas i bruk som et egnet redskap til og overvåking av tregrenseøkotonen.

## 6 Litteratur

- Astrup, R. A., Eriksen, R., Antón-Fernández, C. & Granhus, A. (2011). Skogtilstanden i verneområder og vurderinger av mulighetene for intensivt overvåking gjennom Landsskogtakseringen. *Oppdragsrapport fra skog og landskap*.
- Auty, J.-R. R. a. D. (2019). lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. Tilgjengelig fra: <https://CRAN.R-project.org/package=lidR>.
- BERNINGER, F., GRACE, J. & NAGY, L. (2002). Impacts of Climate Change on the Tree Line. *Annals of Botany*, 90 (4): 537-544. doi: 10.1093/aob/mcf222.
- Bivand, E. J. P. a. R. S. (2005). Classes and methods for spatial data in {R}: R News. Tilgjengelig fra: <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/> (lest 25.04.2019).
- Callaghan, T. V., Werkman, B. R. & Crawford, R. M. (2002). The tundra-taiga interface and its dynamics: Concepts and applications. *Ambio*: 6-14.
- Cottam, G. & Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37 (3): 451-460.
- De Wit, H. A., Bryn, A., Hofgaard, A., Karstensen, J., Kvalevåg, M. M. & Peters, G. P. (2014). Climate warming feedback from mountain birch forest expansion: reduced albedo dominates carbon uptake. *Global Change Biology*, 20 (7): 2344-2355.
- FAO. (2015). FRA 2015, Terms and Definitions.
- Gehrig-Fasel, J., Guisan, A. & Zimmermann, N. E. (2007). Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment? *Journal of vegetation science*, 18 (4): 571-582.
- Gobakken, T., Bollandsås, O. M. & Næsset, E. (2015). Comparing biophysical forest characteristics estimated from photogrammetric matching of aerial images and airborne laser scanning data. *Scandinavian journal of forest research*, 30 (1): 73-86.
- Gobakken, T. & Næsset, E. (2019). Skogtakst basert på flyfoto kan erstatte lasertakstene. *Norsk skogbruk*.
- Harper, K. A., Danby, R. K., De Fields, D. L., Lewis, K. P., Trant, A. J., Starzomski, B. M., Savidge, R. & Hermanutz, L. (2011). Tree spatial pattern within the forest-tundra ecotone: a comparison of sites across Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 41 (3): 479-489.
- Hilstad, I. E. (2019). Krekling (*Empetrum nigrum*) sin påverknad på mortalitet og rekruttering på tre i tregrenseøkotonen. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Upublisert manuskript.
- Holtmeier, F.-K. & Broll, G. (2007). Treeline advance-driving processes and adverse factors. *Landscape online*, 1: 1-33.
- Holtmeier, F.-K. (2009). Mountain timberlines: ecology, patchiness, and dynamics, b. 36: Springer Science & Business Media.
- Holtmeier, F. K. & Broll, G. (2005). Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global ecology and Biogeography*, 14 (5): 395-410.
- Hufkens, K., Scheunders, P. & Ceulemans, R. (2009). Ecotones in vegetation ecology: methodologies and definitions revisited. *Ecological Research*, 24 (5): 977-986.
- Keenan, R. J., Reams, G. A., Achard, F., de Freitas, J. V., Grainger, A. & Lindquist, E. (2015). Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management*, 352: 9-20.
- Klanderud, K. & Birks, H. J. B. (2003). Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *The Holocene*, 13 (1): 1-6.
- Kupfer, J. A. & Cairns, D. M. (1996). The suitability of montane ecotones as indicators of global climatic change. *Progress in Physical Geography*, 20 (3): 253-272.

- Larsson, J. Y. (2004). Skoggrensa i Norge—indikator på endringer i klima og arealbruk. *Forest-Limit in Norway—Indicator on Changes of Climate and Outfield Ecroachment*, *NIJOS-Document*, 3 (04).
- Larsson, J. Y. & Hysten, G. (2007). Skogen i Norge. Statistikk over skogforhold og skogressurser i Norge registrert i perioden 2000-2004: Norsk institutt for skog og landskap.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P. & Kolström, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest ecology and management*, 259 (4): 698-709.
- Nurminen, J. K., Karonen, O. J. & Kokkinen, H. J. (2013). Discovering peer-to-peer content using metadata streams: Google Patents.
- Næsset, E. (1997). Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52 (2): 49-56.
- Næsset, E. & Nelson, R. (2007). Using airborne laser scanning to monitor tree migration in the boreal–alpine transition zone. *Remote Sensing of Environment*, 110 (3): 357-369.
- Næsset, E. (2009). Influence of terrain model smoothing and flight and sensor configurations on detection of small pioneer trees in the boreal–alpine transition zone utilizing height metrics derived from airborne scanning lasers. *Remote Sensing of Environment*, 113 (10): 2210-2223.
- Pachauri, R. K. & Meyer, L. (2014). Climate change 2014 Synthesis Report-Summary for Policymakers: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Pebesma, E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data: The R Journal. Tilgjengelig fra: <https://journal.r-project.org/archive/2018/RJ-2018-009/index.htm> (lest 25.04.2019).
- Pierzchala, M. (2017). Flybilder matching - tutorial. Upublisert manuskript.
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Tilgjengelig fra: <https://www.R-project.org/>.
- Reese, H., Nyström, M., Nordkvist, K. & Olsson, H. (2014). Combining airborne laser scanning data and optical satellite data for classification of alpine vegetation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27: 81-90.
- Rundel, R. B. a. C. (2018). rgeos: Interface to Geometry Engine - Open Source ('GEOS'). Tilgjengelig fra: <https://CRAN.R-project.org/package=rgeos> (lest 25.04.2019).
- Sætersdal, M. & Birks, H. J. B. (1997). A comparative ecological study of Norwegian mountain plants in relation to possible future climatic change. *Journal of Biogeography*, 24 (2): 127-152.
- Thieme, N., Martin Bollandsås, O., Gobakken, T. & Næsset, E. (2011). Detection of small single trees in the forest–tundra ecotone using height values from airborne laser scanning. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37 (3): 264-274.
- Vega, F. E. & Hofstetter, R. W. (2014). Bark beetles: biology and ecology of native and invasive species: Academic Press.
- Waser, L. T., Ginzler, C., Kuechler, M., Baltsavias, E. & Hurni, L. (2011). Semi-automatic classification of tree species in different forest ecosystems by spectral and geometric variables derived from Airborne Digital Sensor (ADS40) and RC30 data. *Remote Sensing of Environment*, 115 (1): 76-85.
- White, J. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Pitt, D. & Woods, M. (2013). The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests*, 4 (3): 518-536.

Zhang, C. & Qiu, F. (2012). Mapping individual tree species in an urban forest using airborne lidar data and hyperspectral imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78 (10): 1079-1087.





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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway