

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Fakultet for miljøvitenskap og teknologi
Institutt for Naturforvaltning

Masteroppgave 2015
30 studiepoeng

Bruk av laserdata til prediksjon av foryngelse i fjellskog.

Maxim Galashevskiy

Forord

Denne oppgaven er skrevet i forbindelse med gjennomført masterstudie i Skogfag ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Gjennom to studieår på Ås ble jeg interessert i en moderne metode for datafangst som nå er i rask utvikling – flybåren laser-skanning. Kunnskap om denne metoden og erfaring fra Landsskogtaksering ledet meg til en tanke om at flybåren laser-skanning kan bli benytt i dette programmet. Etter deltagelse i feltdatainnsamling for prosjekter som gikk på undersøkelse av endringer i tregrensen mot fjell med laser-skanning, bestemte jeg meg for å benytte innsamlet materiale for å teste om laserdata kan benyttes for registrering av småtre ved Landsskogtakseringen i Norge.

Jeg er takknemlig til Dr. Ole Martin Bollandsås ved Institutt for Naturforvaltning (INA) for veiledning og konstruktiv kritikk under oppgaveskriving. En stor takk rettes også til Vegard Lien som var med under feltarbeid.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Bruhagen, 10. mai 2015

Maxim Galashevskiy

Sammendrag

I 1919 begynte nordmenn den første landsskogtakseringen. Denne landsdekkende taksering av skog gjennomføres fortsatt ved manuell feltregistrering. Ulike fjernmålingsmetoder benyttes per i dag for resursregistrering og forskning. Flybåren laser-skanning er en av aktuelle registreringsteknikker som kan bli benyttet under Landsskogtaksering i nærmeste fremtiden. Under Landsskogtakseringen registreres blant annet foryngelse. Dette gjøres ved småtreregistrering. Småtreregistrering utføres ved manuell opptelling av unge trær i tre høydeklasser etter treslag. Resultater av opptelling interpoleres til tilstøtende område. I denne oppgaven ble undersøkt om flybåren laser-skanning kan benyttes for registrering av småtrær i fjellskog.

Studien ble utført på et ca 270 km² stort studieområde som strekker seg fra Tromsø til Tvedestrand (Norge). Innenfor studieområdet ble etablert 75 sirkulære prøveflater tilsvarende prøveflater som benyttes under Landsskogtaksering. Radiusen til prøveflaten utgjør 8,92 m, totalt areal av prøveflater som ble registrert utgjør 18,7 daa. Prøveflater var etablert i områder med fjellskog. Den dominerende treslag på registrerte prøveflatene er fjellbjørk (*Betula pubescens ssp. czerepanovii*). Skogsforyngelse ble registrert under feltarbeid i sommer 2012 på flere mindre flater innenfor hver prøveflate. Studieområdet ble registrert med flybåren laserskanner sommeren 2012/2013. Tetthet- og høyde-baserte laser-variabler og flate-variabler ble regnet ut for hver prøveflate. Flate- og laser-variabelens evne å forklare variasjon i foryngelse ble analysert ved lineare regresjonsmodeller og statistiske tester.

Lineare regresjonsmodellene demonstrerte at både tetthet-, høyde-baserte laser-variabler og flate-variabler kan forklare variasjon i foryngelse i fjellbjørk-dominert fjellskog. Flate-variabler har bedre forklaringssevne på variasjon i foryngelse enn tetthet- og høyde-baserte laser-variabler. Regresjonsmodeller som kombinerer laser- og flate-variabler kan gi bedre resultater enn modeller som er bygd på bare flate- eller laser-variabler.

Abstract

The first National Forest Inventory was started in Norway in 1919. The traditional field-registration is still the main method that utilizes in this program. Various remote sensing methods for resource registration and research were introduced since beginning of the National Forest Inventory. Airborne laser scanning is one of the modern remote sensing methods that can be introduced in the National Forest Inventory in the near future. Forest regeneration is one of the parameters in this program. Manual counting of young trees conduces into three height classes by height/diameter and three spices. Results of counting interpolates to the adjacent area. In this study was investigated whether airborne laser scanning can be used for registration of small trees in mountain forests.

The study was conducted on an approximately 270 km² study area stretched from Tromsø to Tvedestrand (Norway). Within the study area were established 75 circular sample-plots corresponding sample-plots used in the National Forest Inventory program. The radius of the sample-plots was 8,92 m, total area of sample-plots that were registered was 18,7 ha. Sample-plots were established in areas of mountain forests. The dominant species on sample-plots is mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *Czerepanovii*). Various parameters were registered during fieldwork in summer 2012. Study area were registered with airborne laser scanner summer 2012/2013. Density- and height-based laser variables, topological variables and variables, describing vegetation, were calculated for each sample plot. The ability of variables to explain variation in forest regeneration was analyzed with linear regression models and statistical tests.

Linear regression models demonstrated that both density-, height-based laser variables, topological and vegetation-variables may explain the variation in the regeneration of the mountain birch-dominated mountain forests. Topological and vegetation-variables have better explanatory ability than density- and height-based laser variables. Regression models that combine laser-, vegetation- and topological variables can perform better than models that are built on only one type of variables.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
1.1	Skogtaksering.....	1
1.2	Fjellskog.....	2
1.3	Fjernmåling av skog.....	3
1.4	Problemstilling.....	4
2	Materiale og metoder.....	5
2.1	Studieområdet.....	5
2.2	Innsamling av feltdata.....	6
2.2.1	Taksering av prøveflater	6
2.2.2	Småtreregistrering.....	8
2.3	Laser-skanning.....	9
2.4	Flate-variabler.....	10
2.5	Modellutvikling.....	13
3	Resultater.....	16
4	Diskusjon.....	18
5	Litteratur.....	21
	Vedlegg 1	
	Vedlegg 2	
	Vedlegg 3	

1 Innledning

1.1 Skogtaksering

De første systematiske registreringer av skogressurs ble foretatt på slutten av det 18. århundre i Sentral-Europa (Brack 2008; McRoberts et al. 2010). Registreringsmetoder ble utviklet i løpet av det 19. århundre fra enkle synfaringer til linje- og prøveflate-takseringer med måling av stammediametere og tre-høyder (Brack 2008).

I begynnelsen av det 20. århundre begynte de enkle europeiske og nordamerikanske land registrering av sine skogsressurser på nasjonalt nivå (McRoberts et al. 2010). Formålet med de første landsdekkende registreringer var å estimere skogressursene med spesielt fokus på tilgjengelig stående tømmervolum (McRoberts et al. 2010).

Norge var det første landet i verden som foretok en landsdekkende skogtaksering. Siden oppstarten i 1919 er det gjennomført ti mer eller mindre landsdekkende takster. Takseringsopplegget har vært under stadig utvikling og modernisering gjennom årene (Strand 1994).

De to første landstakstene ble gjennomført ved hjelp av linjetaksering. Alle trær ble registrert innenfor et 10 meter bredt belte langs bestemte linjer gjennom skogen (Strand 1994). Prøvetakseringer og teoretiske beregninger viste at ved å gå over til prøveflater kunne en oppnå bedre nøyaktighet enn ved linjetakst for samme kostnad (Eriksen 2007). Ved den tredje, fjerde og femte taksten ble det benyttet et cluster-design der 20 prøveflater lå langs sidene i kvadrater med sidelengder på 1 km (Strand 1994). Fra den sjette landsskogtakseringen ble det benyttet et opplegg med permanente prøveflater, som ble etablert i et forband på 3 x 3 km over hele skogarealet under barskoggrensen i alle fylker bortsett av Finnmark (Eriksen 2007). Flatesentrum og prøvetrær ble markert og registrert slik at det samme arealet og de samme trærne kunne bli registrert på nytt ved seinere takseringer (Granhus et al. 2012). Dette ga mye bedre muligheter for å dokumentere endringene som skjer i skogen (Strand 1994).

I den andre halvparten av det 20. århundre ble forskerne oppmerksomme på at klimaet sannsynligvis var i endring (IPCC 1990). Flere ressurser ble derfor rettet mot forskning på blant annet klimaendringenes påvirkning på miljøet og samspillet mellom ulike arter, samt konsekvenser av endringene. Norge og om lag 185 andre land, har etter signering og ratifisering av Klimakonvensjonen og Kyoto-protokollen forpliktet seg til å redusere utslipp av klimagasser, og å rapportere statistikk over binding av karbondioksid i skog til Forente Nasjoners klimakonvensjon (UNFCCC 2008).

Tall over binding av karbondioksid i norsk skog estimeres av Institutt for Skog og Landskap. Instituttet oppgraderte takseringsopplegget ved oppstart av den niende landsskogtakseringen, for å måle biomassen og estimere lagring av karbon også i fjellskog. Det ble etablert prøveflater i områder over barskoggrensen i tillegg til de tidligere etablerte prøveflatene under barskoggrensen. Omfattende arealer i fjellområder og i Finnmark, som nå er kledt med uproduktiv eller lavproduktiv fjellbjørkskog, ble dermed inkludert i takseringen (Granhus et

al. 2012). Disse områdene får nå stadig mer oppmerksomhet på grunn av migrasjon av skoggrensen og endringer i skogen som følge av global oppvarming (ACIA 2004).

Det utføres per i dag flere klimaendringsrelaterte forskningsprosjekter knyttet til fjellskogene. Norges forskningsråds har finansiert programmet «Klimaendringer og konsekvenser for Norge» (NORKLIMA), som ble gjennomført fra 2004 til 2013, og et tilsvarende program «KLIMAFORSK» som ble påbegynt i 2014. Under disse programmene gjennomføres ulike undersøkelser av klimaeffekter på biologiske prosesser som regulerer rekruttering og vekst av nye trær i fjellskog og langs den alpine tregrensa (Ørka 2009), og om flybåren laser-skanning kan være en aktuell teknikk for å detektere små trær i fjellskog og i overgangssonene til alpine områder (Bollandsås 2008; Thieme et al. 2011; Ørka et al. 2012).

1.2 Fjellskog

Fjellskog er skog i nordboreal og subalpin sone der temperaturen er en sterkt begrensende faktor for vekst og frømodning av trær (Mork 1968). Fjellskogen er preget av lav sommertemperatur og kort vekstsesong, sparsom frøsetting og dårlig frømodning, mye nedbør og høy humiditet, svak fordamping på grunn av lav temperatur, hyppig og sterk vind, lav temperatur i jordbunnen, sparsomt strøfall, langsom omsetning i humuslaget og ugunstige spireforhold for frø (Mork 1968). Fjellskog utgjør en betydelig del av Norges skogareal (Børset 1994; Solbraa 2001).

Overgangssonen mellom fjellskog og treløse alpine arealer kalles for tregrense. Tregrensen defineres som og går der hvor avstanden mellom trærne med høyde på minst 2 meter blir større enn 30 meter (Larsson 2004).

Treslagene stiller ulike minstekrav til varme. Tetraterm er et uttrykk for middeltemperatur i vekstsesongen (juni, juli, august og september). Kravet for tetraterm hos gran og furu er 8,4 °C, for rogn (*Sorbus aucuparia*), gråor (*Alnus incana*) og hegg (*Prunus padus*) er den 7,7 °C. Dunbjørk tåler enda lavere tetraterm på 7,5 °C (Skinningmoen 1969). Derfor ligger grensen for bjørk og andre hardføre lauvtreslag høyere over havet enn for gran og furu. Vanligvis dannes skoggrense i Norge av fjellbjørk og derfor kan den også kalles for lauvskoggrensen.

Skoggrensen mot fjellet ligger i meget forskjellig høyde over havet i ulike landsdeler. Den synker nordover, men stiger med økende avstand fra kysten. Lokalklima som påvirkes av terreng og eksposisjon har også stor betydning på vekstforhold og dermed skoggrense. I Trøndelag ligger skoggrense mellom 200 og 300 m o. h. langs kysten og mellom 400 og 650 m o. h. i den østlige delen. Nedre grense av fjellskog i Østlandet og i Telemark ligger ved 600 m o. h., i Aust-Agder ved 500-550 m og i Vest-Agder enda noe lavere i gjennomsnitt (Skinningmoen 1969; Solbraa 2001).

Frøsetting og frømodning i fjellskog blir dårligere med stigende høyde på grunn av synkende lufttemperatur. Under slike forhold har treslag med stor evne til vegetativ formering fortrinn (Børset 1985). Bjørk kan formere stubbeskudd og rotskudd. Gran har også evnen til å formere

seg vegetativt under ekstreme klimaforhold. Nedbøyde grener av grantrær kan slå rot og danne et selvstendig tre (Skinemoen 1969).

Ifølge resultatene fra den niende landsskogtakseringen (Tabell 1), utgorde trær med brysthøydiameter under 50 mm (småtrær) ca. 3 % av den totale kubikkmassen i skogen (Granhus et al. 2012). Total antall småtrær i norske skoger var ca. 72 milliarder (Granhus et al. 2012). Småtreregistrering er en del av landsskogtakseringen og er grunnlaget for dette estimatet. Formålet med småtreregistreringen er å samle objektive data for treantall og volum av trær som er for små til å bli med i klavingen. Dataene beskriver også, og blir et mål for forhandsgjenveksten i eldre skog. En slik informasjon om foryngelse i skogen er viktig for vurdering av fremtidig utvikling av skogressurs på nasjonalt nivå (Eriksen 2007).

Tabell 1. Antall trær (i 1000) høyere enn 10 cm, og med brysthøydiameter mindre enn 50 mm, fordelt på treslag. Totalt for produktiv og uproduktiv skog.

Landsdel	Totalt	Andel, %	Gran, %	Furu, %	Lauv, %
Nord-Norge	15824	21.9	2.5	1.1	96.4
Midt-Norge	11528	16.1	10	4.5	85.5
Vestlandet	10028	13.9	2.2	2.9	94.9
Østlandet	25706	35.6	20.6	7.1	72.3
Sør-Norge	8781	12.2	0.8	0.9	98.3
Totalt	72068	100			

1.3 Fjernmåling av skog

Manuell skogregistrering er ofte teknisk utfordrende, tids- og resurskrevende. Bruk av fjernmålingsdata som bilder og laserdata, innsamlet fra bakken, ved flyvning eller fra satellitt-monterte instrumenter for å kartlegge og estimere resurser og endringer på store arealer, kom for alvor i gang mot slutten av det 20. århundre (Næsset 2007). En norsk undersøkelse viser at flybåren laser-skanning er den mest økonomisk gunstige fjernmålingsteknikken i skogbrukssammenheng per i dag (Eid et al. 2004).

Laser-skannere baserer seg på en optisk fjernmålingsteknikk som heter LiDAR (forkortelse fra engelsk: Light Detection And Ranging). LiDAR-teknikk brukes til måling av avstand til fysiske objekter. Ved å måle tidsforskjellen mellom et emittert lasersignal og et reflektert lys kan avstanden til objekter beregnes. Denne teknologien ble oppfunnet i USA på 1960-tallet (Flood 2001). De første studier med LiDAR-baserte måleinstrumenter ble gjennomført i begynnelsen av 70-tallet.

De første LiDAR-baserte måleinstrumentene kunne danne en profil av objektene de var rettet mot. Seinere ble det introdusert laserskannere som er LiDAR-baserte instrumenter med bevegelige speil som varierer vinkelen på lyspulsene slik at de fordeles over et område.

Det første forsøket med bruk av flybåren laserskanner (FLS) for skogregistreringsformål, er beskrevet i en studie fra 1977 av sovjetiske forskere, «Possibilities of laser aerial photography for forest profiling» (Solodukhin et al. 1977). Mangelen på nøyaktighet i koordinatfestingen av laserpulsene var i begynnelsen en faktor som bremsset utvikling av teknikken. Det var da man fikk tilgang til teknologier som Global Positioning System (GPS) og Inertial Navigation System (INS) at utviklingen av laser-skanning utviklet seg raskt (Næsset et al. 2004). Med INS og GPS kan laser-skanner nøyaktig registrere sin beliggenhet i rommet under skanning og dermed stedfeste laserdata.

I 2001 ble den første fullstendige bestandtakseringen av skog med FLS gjennomført av norske skogforskere (Næsset 2001). Denne metoden har hatt en rask utvikling og kommersialisering. Per i dag er FLS den ledende metoden for skogregistrering i forbindelse med skogplanlegging i Norge.

1.4 Problemstilling

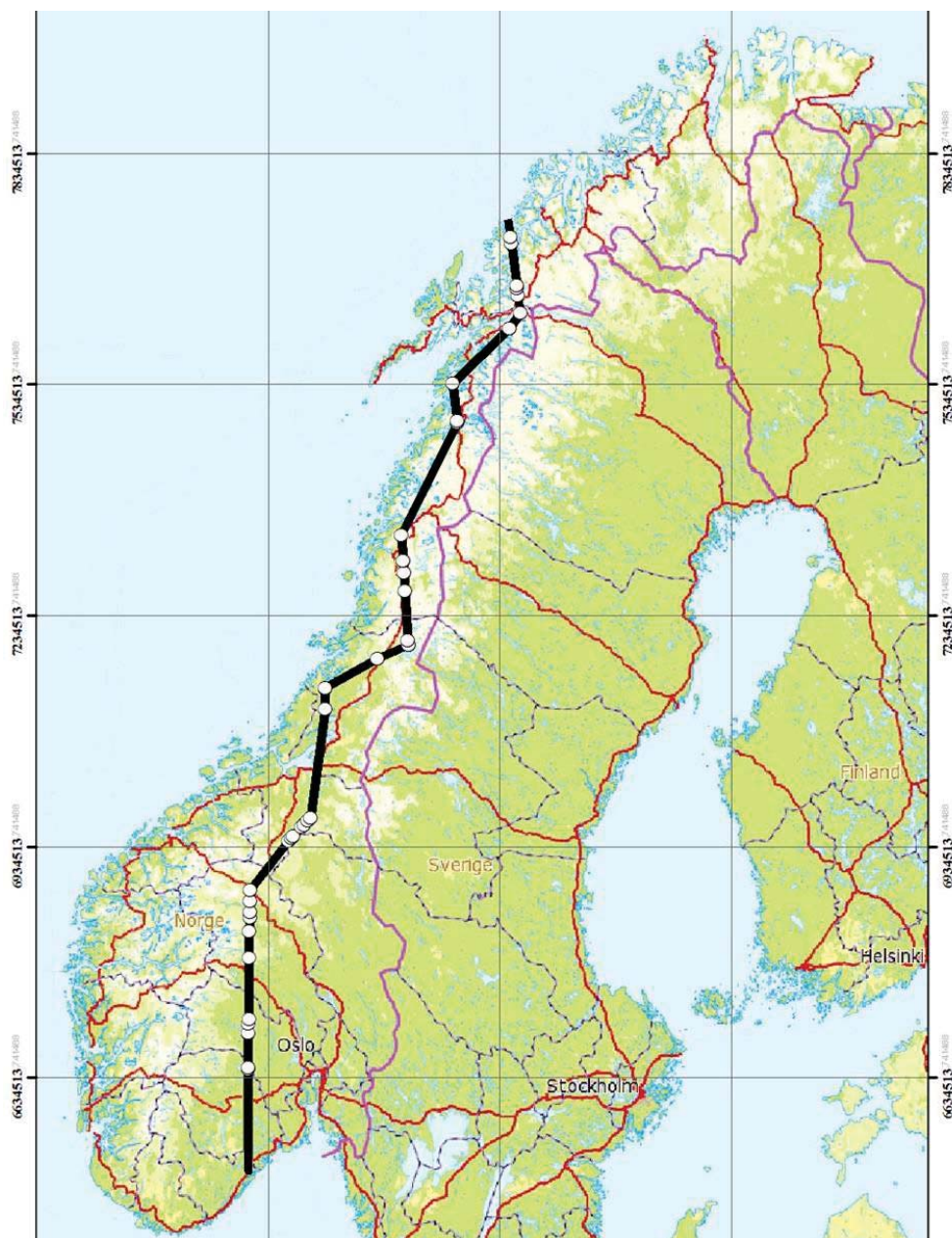
Norsk Institutt for Skog og Landskap benytter per i dag manuell registrering under Landsskogtaksering. Men takstmetodene som benyttes av Landsskogtakseringen er under stadig utvikling og introduksjon av laser-skanning kan bli et neste trinn i metodeutviklingen. For å benytte laserdata i småtreregistrering, skal evne av laserdata å forklare variasjon i foryngelse undersøkes nærmere. Bolland et al. (2008) konkluderte i sin studie at laservariabler kan forklare variasjon i foryngelse i fleraldret granskog. I denne oppgaven ønskes det å undersøke foryngelse i fjellskog.

Problemstillingen i denne oppgaven er å finne ut om laserdata kan bidra til forklaring av variasjon i skogforyngelse i fjellskog.

2 Materiale og metoder

2.1 Studieområdet

Studieområdet er en 1500 km lang og ca 180 m brei korridor som går gjennom fjellskogområder mellom Tromsø og Tvedestrand (Norge). Total areal av studieområdet utgjør ca 25 000 ha. Innenfor korridoren ligger 75 prøveflater med radius på 8,92 m og samlet areal på 18,7 daa. Grupper av prøveflater (opp til 3 stk. per lokalitet) ligger spredt i et transekt i fjellskog nær skoggrensen. Den dominerende treslag i områder hvor prøveflater ble etablert er fjellbjørk (*Betula pubescens ssp. czerepanovii*).



Figur 1. Kart som viser studieområdet. Hvite punkter viser prøveflater; svart linje indikerer området som ble registrert med flybåren laser.

2.2 Innsamling av feltdata

I denne oppgaven er det benyttet deler av et større datasett, innsamlet for flere ulike studier. Laser-skanningen og feltregistreringene ble gjennomført i studieområdet i 2008 og gjentatt i 2012/2013.

Datasettet som er benyttet i denne oppgaven består av felt- og laser-registreringer innsamlet i 2012/2013. Feltdata inkluderer målinger av permanente landsskogtakseringsflater og tilsvarende tilleggsflater i fjellskog (omtales i denne oppgaven som prøveflater). Tilleggsflatene ble målt etter samme instruks som de ordinære permanente landsskogflatene og ble etablert for å øke mengden feltdata for modellutvikling. Opplegget for gjennomført feltarbeid er basert på Landsskogtakseringens feltinstruks (Eriksen & Viken 2008), beskrevet i avsnitt 2.2.1. og 2.2.2.

2.2.1 Taksering av prøveflater

Det ble utført registreringer på 75 prøveflater. Fire flater er imidlertid ekskludert fra datasettet på grunn av manglende registreringer. Data for totalt 71 prøveflater ble benyttet (Tabell 2; 3).

En del av de registrerte prøveflatene var permanente landsskogflater som ligger i fjellskog nær skoggrensen og som faller inn i det laser-skannede transektet. Disse prøveflatene er plassert i skogområder over hele Norge i grid med sidelengde på 3 km. På avstand fra 50 til 300 m langs senterlinjen i transektet fra en del av disse permanente landsskogflater ble det etablert fra 1 til 3 tilsvarende prøveflater (Figur 2).

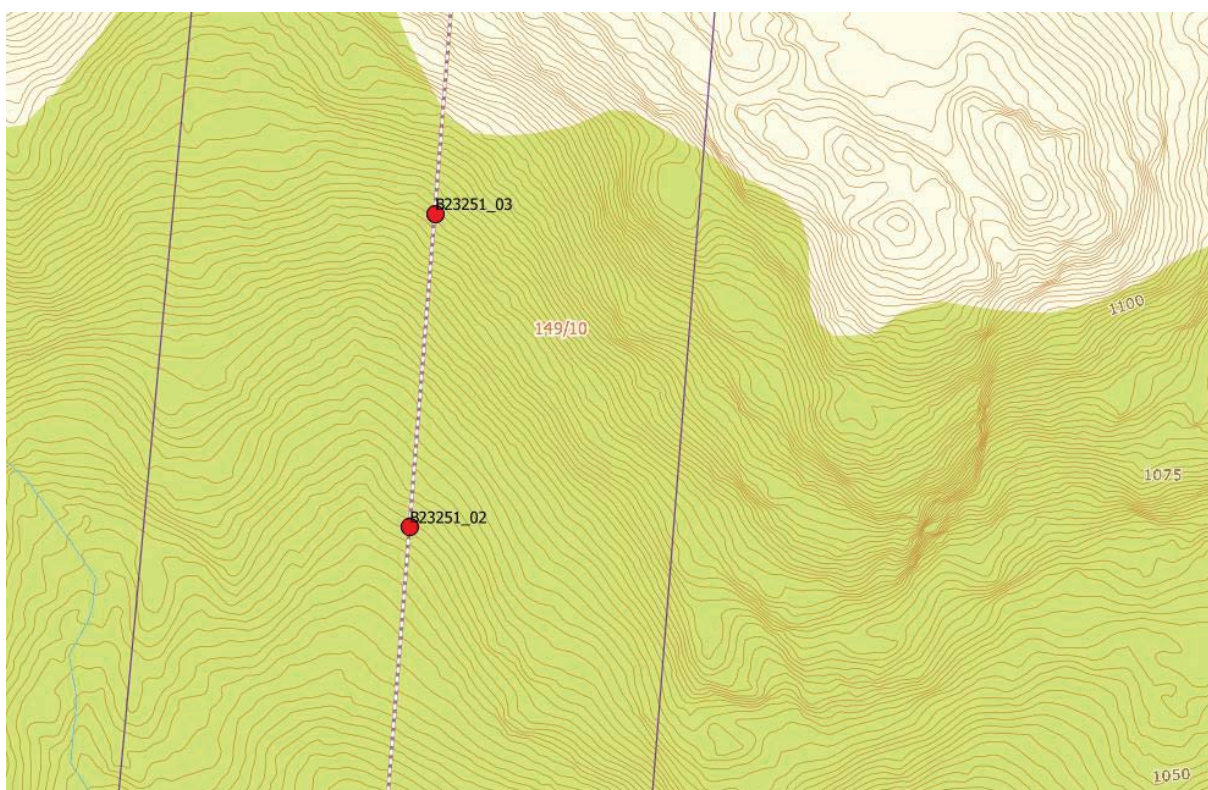
På prøveflatene ble det registrert alle trær med diameter i brysthøyde ($\text{dbh} \geq 50 \text{ mm}$). Data ble lagret i feltdatainnsamler. Kvalitative parameterne ble lagret som tall-koder. Det ble totalt registrert 1286 trær. Ved registrering av brysthøydiameter ble klaven holdt vinkelrett på treets lengdeakse, og med linjalen rettet nøyaktig mot eller fra flatesentrum på avstanden 130 cm langs stammen fra gjennomsnittlig terrengnivå rundt trerot. Hvis levende tre manglet bark på klavestedet, ble det estimert et tillegg for bark tilsatt målt verdi (Eriksen & Viken 2008).

Alle klavetrær har egen ID, og kan identifiseres ved hjelp av avstand og retning fra flatesentrum. Trær som ikke ble registrert som klavetrær ved tidligere taksering og som passert klavegrensen ($\text{dbh} \geq 50 \text{ mm}$) ble registrert med egen ID, avstand og retning fra sentrum.

Retning ble bestemt med Suunto kompass fra flatesentrum til treets midtpunkt i brysthøyde og oppgitt i grader etter 400 grader skala (gon). Horisontal avstand fra flatesentrum til treets sentrumspunkt i brysthøyde ble registrert med avstands- og høydemåler (Eriksen & Viken 2008). Det ble benyttet avstands- og høydemåler (Vertex III). Avstands- og høydemåleren ble kalibrert før bruk på hver prøveflate i samsvar med bruksanvisning.

Kronedekningsprosent ble registrert på prøveflatene som samlet arealdekning til alle trær på prøveflaten i prosent av flatearealet. Som trær ble det regnet alle trær og busker som er eller kan bli 5 m høye på det aktuelle voksestedet.

Koordinater i sentrum av prøveflatene ble registrert med to Topcon Legacy E+ GNSS-mottakere. Flateidentitet og navnet til GPS-fil, samt antennehøyde ble registrert. Registreringsprosessen bestod av montering av basestasjon på et punkt med kjent posisjon, logging av flatesenter med en rovertmottaker, og etterprosessering av filer fra basestasjon og rovertmottakeren på PC i programmet Topcon Tools. Basestasjon ble montert på Kartverkets fastemerker i nærheten av området hvor registrering ble foretatt (maksimal avstand 20 km).



Figur 2. Illustrasjon med prøveflater B23251_03 og B23251_02 som ligger i fjellskog. Nore og Uvdal kommune Buskerud. Grønn farge symboliserer skog, lys bun farge symboliserer treløs areal. Avstand mellom prøveflater 100 m. Linjer symboliserer transektets avgrensning og sentrumslinje.

2.2.2 Småtreregistrering

Småtreregistrering ble gjennomført på småtre-flater innenfor hver prøveflate. Småtre-flater med radius 1,3 m ble lokalisert 5 m fra sentrum til prøveflate i hver kardinalretning (N, Ø, S, V). Det registrerte arealet utgjør 21,23 m² eller 8,4 % av en prøveflate.

Alle levende lauv- og bartrær høyre enn 0,3 m, med diameter under 50 mm, ble telt opp innen hver småtreplate. Samlet antall småtrær registrert på småflater, tilhørende en prøveflate ble multiplisert med forholdet mellom prøveflateareal og samlet småflateareal. Dette er gjort for å estimere totalt antall småtrær på hele prøveflaten.

Tabell 2. Oversiktstabell over alle prøveflaterflater, fordelt på registreringsfylkene, og med gjennomsnittlige verdier for hvert fylke.

Fylke	Antall flater	N _{gj} daa ⁻¹	St. avvik N	Gj. antall klavetrær per daa	Gj. kronedekning, %
Nordland	25	2955.5	91.3	11.9	38.0
Tromsø	8	7222.1	203.7	14.3	42.6
Nord-Trøndelag	8	694.4	16.4	12.6	35.6
Sør-Trøndelag	6	833.3	27.6	15.7	38.0
Oppland	12	1296.3	22.1	30.3	63.5
Buskerud	4	1250.0	31.0	28.3	69.5
Telemark*	1	141.5	-	34	28
Hedmark	7	714.3	26.1	8.7	27.9
Totalt	71	2396.7		16.4	43.4

N_{gj} - gjennomsnittlig antall småtrær per daa;
* - Gjennomsnittsverdier for Telemark er verdier registrerte på flaten B19251_02.

2.3 Laser-skanning

Laser-skanningen av studieområdet ble gjennomført av det norske firmaet TerraTec AS sommeren 2012 og 2013. Studieområdet ble inndelt i 147 flyvningslinjer og ble flydd med et Piper PA-31 Navajo fly. Gjennomsnittsfarten under flyvning ble holdt på ca. 75 m/s. Flyet holdte en flyvningshøyde på ca 800 meters over bakken.

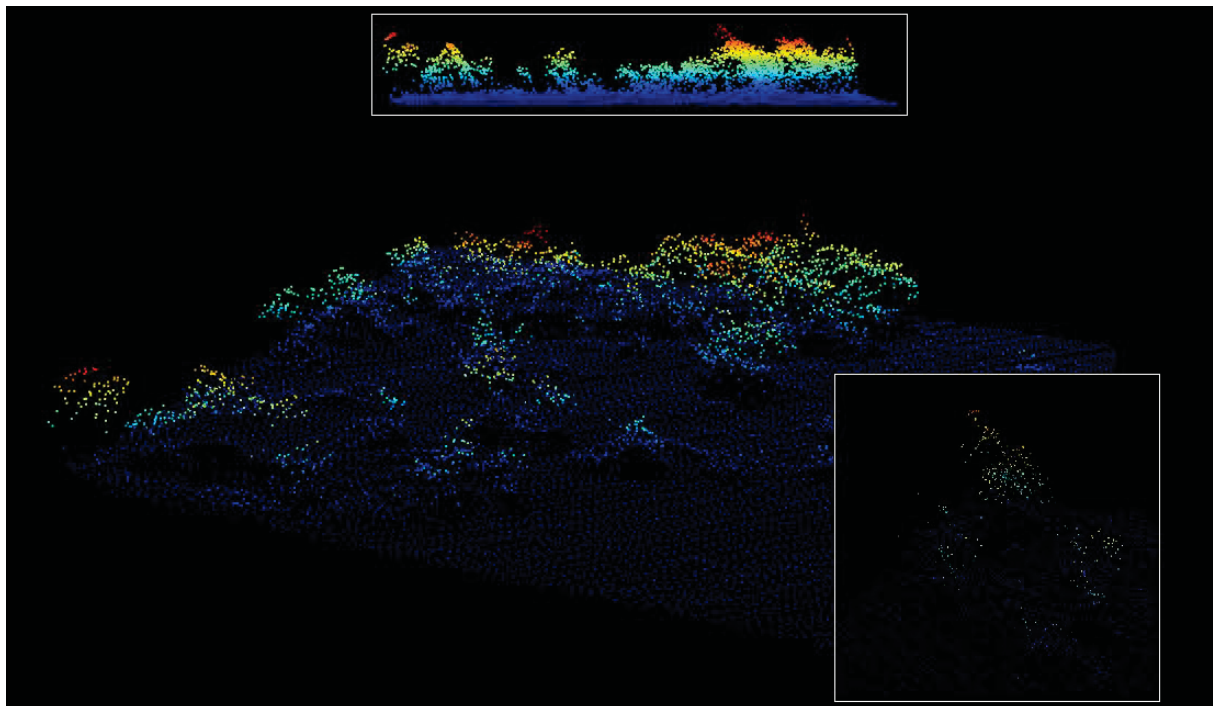
Flybåren laser-skanner Leica ALS50-I ble benyttet. Prosessering av laserdata ble gjennomført av Blom Geomatics Norway AS.

Laser-variabler

I denne oppgaven ble benyttet areal-metode. Ved areal- metoden lager man regresjonsmodell som kan predikere verdier av skogsvariabler per bestemt arealenhet. Regresjonsmodellen beskriver sammenheng mellom laser-variabler og feltdata fra kalibreringsflater (Næset et al. 2004). I denne oppgaven ble benyttet høydebaserte laser-variabler (høydevariabler) og tetthetsbaserte laser-variabler (tetthetsvariabler). Begge typer av variabler baseres på høydefordeling av ekko. Høydevariablene er høyder ved ulike persentiler av høydefordelingen til ekkoene på prøveflaten. Høyde- og tetthetsvariabler ble beregnet for hver prøveflate.

Laser data (Figur 3) er en samling av stedfestede ekko. Disse ekkoene er punkter hvor laserpuls fra laserskanner traff objekter i området som blir skannet (vegetasjon og bakke).

Tetthetsvariablene er andeler av ekko i 10 ulike sjikt med lik høyde, som er fordelt mellom 0,5 meter over bakken og 95 % av maksimal ekkohøyde, i forhold til det totale antall ekko som ble reflektert fra prøveflata.



Figur 3. Illustrasjon av laserdata fra oppgavens studieområde.

2.4 Flate-variabler

Tabell 3 gir en oversikt over to typer av flate-variabler. Dette er topologiske variabler (avstand fra ekvator, avstand fra kyst, elevasjon, hellingsprosent, hellingsretning) og variabler som beskriver vegetasjonen på prøveflaten.

Tabell 3. Oversikt over topologiske variabler og bestandsvariabler.

Beskrivelse av flate-variabler	Symbol, enheter
Breddegrad. Temperaturen er en begrensende faktor for vekst og reproduksjon av trær. Ved bevegelse nordover blir klima kjøligere. Det skal være et inverst forhold mellom verdien av Y og antall småtrær. Avstand fra ekvatoren beskrives av Y-koordinat til sentrum av prøveflate.	Y, meter
Avstand fra null-meridian til senter av prøveflate (X-koordinat av prøveflatens sentrum).	X, meter
Elevasjon. Høyde i forhold til havnivå. Avstanden fra ekvatoren beskrives av koordinater til sentrum av prøveflate.	Z, meter
Antall klavetrær på prøveflate (total antall levende klavetrær på en prøveflate). Antall trær med brysthøydiameter over 50 mm kan påvirke etablering av nye trær. Frøsettings-, spirings-, og etableringsforhold i fjellskog er bedre i områder med flere etablerte trær enn i et område hvor det er mindre trær.	T, stykk
Kronedekning.	K, %
Grunnflatesum. Denne variabelen regnes ut som en sum av arealene til snitter stammer (på brysthøydenivå) av klavetrær som ble registrert innenfor prøveflate.	S, m ²
Hellingsretning. Variabelen ble registrert ved kartdataanalyse i programverktøy Quantum GIS 2.2.	E, grader.
Hellingsprosent. Denne variabelen beskriver bratthet av området hvor prøveflate lokaliseres. Variabelen ble registrert ved kartdataanalyse i programverktøy Quantum GIS 2.2.	H, %
Avstand fra kysten. Ved bevegelsen fra kysten blir klimaforhold mer kontinentalt. Dette skal ha virkning på vekstforhold og foryngelse.	O, meter

Avstand fra kysten til prøveflaten ble målt på kart som luftlinje fra prøveflatens sentrum til kystlinje. Variabelen ble regnet ut ved en analyse av kartdata i programverktøy Quantum GIS 2.2.	
---	--

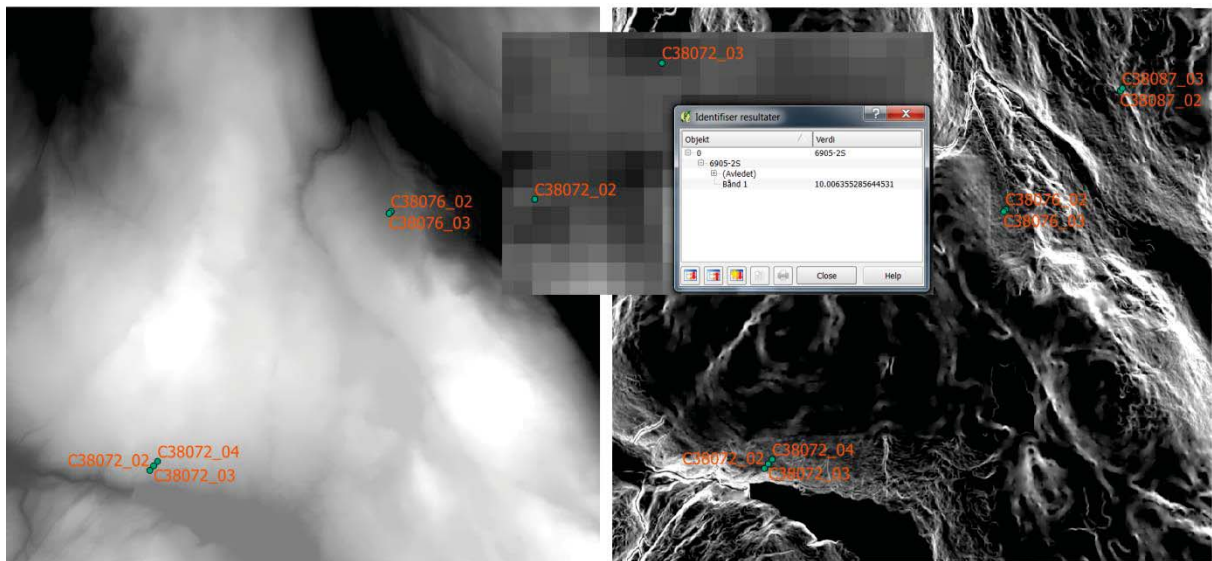
Tabell 4. Oversikt over flate-variabler.

Variabel	Gj.snitt	St.avvik
Breddegrad, Y, meter	7 173 51	310 447
Avstanden fra kysten, O, meter	41 111	34169
Elevasjon, Z, meter	668	276
Antall klavetrær, T, stykk	16,6	15,7
Kronedekning, K, %	43,2	29,2
Grunnflatesum, S, m ²	0,09	0,08
Hellingsretning, E, grader.	110	70,0
Hellingsprosent, H, %	143	7,0
X, m	654 902	122 522

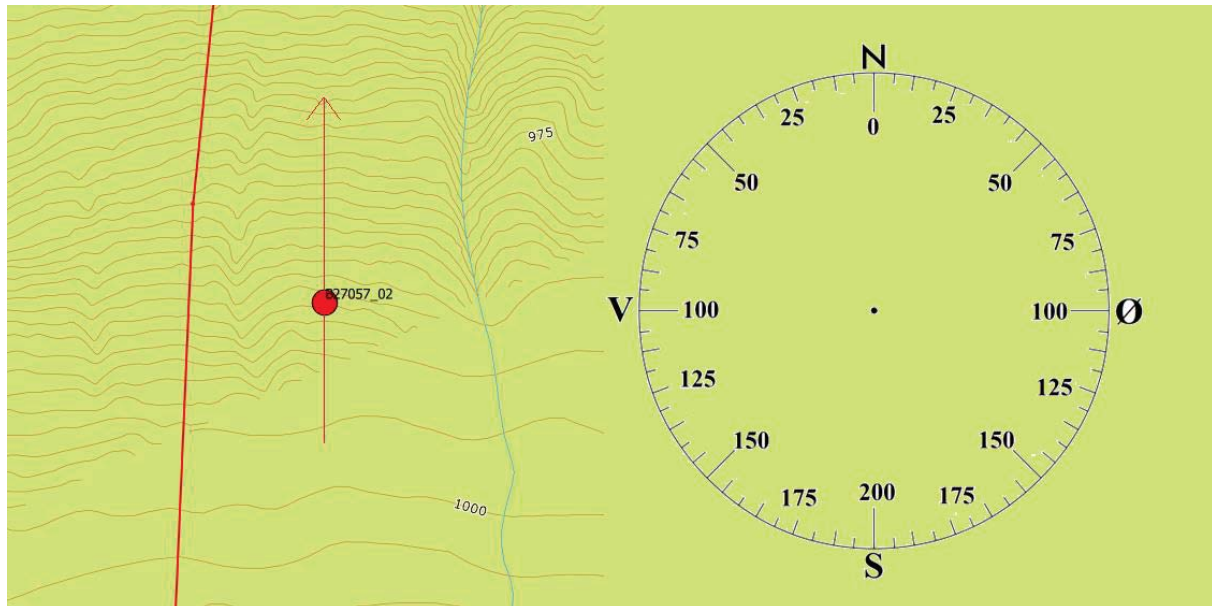
Flate-variablene hellingsprosent (*H*) og hellingsretning (*E*) ble ikke målt opp under felttaksering av prøveflater. Disse variablene ble registrert ved bruk av geografiske informasjons systemer (GIS) fra Felles Kartdatabase (FKB).

Datasettet «hellingsprosent» inneholder Norges landareal som er inndelt i grid med pikselstørrelse på sidelengde på 10 m. For hver piksel ble det beregnet en hellingsprosent-verdi. Hellingsprosent for flate ble regnet som variabel verdi tilhørende piksel, hvor sentrum til prøveflate befant seg (Figur 5). Hellingsprosent beskriver skråningens bratthet og viser noe om med hvilken vinkel sola treffer området. Hellingsprosenten beskriver også områdets tilgang på sigevann, noe som kan medføre at viktige for trærnes vekst næringsstoffer føres med fra de høyereliggende områdene til lavereliggende (Stage 1976).

Hellingsprosent og hellingsretning beskriver sammen voksestedets sol- og sigevannforhold (Stage 1976). Denne variabelen ble registrert etter eget skala (Figur 5). Prøveflater som ligger på skråninger, vendte mot sør fikk maksimal verdi etter skalaen likt 200, grunnet beste solforhold. Prøveflater som ligger på skråninger, vendte mot vest og øst, fikk mindre hellingsretning verdi tilsvarende 100. Prøveflater, liggende på nordvendte skråninger fikk minimal verdi tilsvarende 0 på grunn av dårlige solforhold som betinger dårlige vekstforhold.



Figur 4. Utklipp fra programmet Quantum GIS. Til venstre: FKB rasterdata; til høyre: analyse av stigning.



Figur 5. Skala for registrering av hellingsretning. Hellingsretning-verdi for prøveflate B27057_02 er 0.

2.5 Modellutvikling

For å undersøke evne av flate- og laser-variabler å forklare variasjon i foryngelse, ble det utviklet regresjonsmodeller for observert antall småtrær på prøveflatene. Ulike typer regresjonsmodeller har blitt benyttet i skogrelaterte forskningsprosjekter tidligere. Kun lineare regresjonsmodeller ble imidlertid utviklet i denne oppgaven (Ligning 1). Regresjonsmodeller bygges opp på forklaringsvariabler. Slike variabler forklarer variasjon av avhengig variabel.

$$f(a) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad \text{Ligning 1}$$

$f(a)$ - avhengig variabel;

b_0, b_1, b_k - koeffisienter;

x_1, x_2, x_k - forklaringsvariabler;

k - antall av elementer i modell.

Den avhengige variabelen i denne oppgaven er N – antall småtrær per prøveflate. Flate- og laser-variabler ble benyttet som forklaringsvariabler. I tillegg til flate- og laser-variabler i regresjonsmodellutvikling ble benyttet kombinerte flate-variabler: YxZ og YxO (Tabell 5), transformerte flate- og laser-variabler (naturlig logaritme: $lnh5, lnt10, \dots$; kvadratroter: $h5ROT, t10ROT, \dots$; kvadrat: $h5x2, t10x2, \dots$) og transformerte kombinerte flate-variabler ($ln YxZ; ln YxO; YxZ.ROT; YxO.ROT; YxZx2$ og $YxOx2$). Transformasjon av variabler ble benyttet for å forsøke å oppnå bedre residualfordeling (Næsset & Bjerknes 2001).

Tabell 5. Kombinerte flate-variabler som ble benyttet i modellutvikling

Variabel	Korrelasjon mot N	Symbol, enheter
Multiplikasjon av Y-koordinat og prøveflatens elevasjon (Z-koordinat til prøveflatns sentrum).	-0.195	YxZ, m
Multiplikasjon av Y- og X-koordinater til prøveflatns sentrum.	0.295	YxX, m

Proessen med modellutvikling gikk gjennom tre faser. Modellene ble navnet med tall-kode. Første tallet kommer etter fasen av modellutviklingen, det andre tallet er modellens løpenummer.

I den første fasen av modellutviklingen (Vedlegg 1) ble det benyttet bare flate-variabler. For de 11 flate-variablene som er beskrevet i tabell 3 ble det kalkulert transformasjoner. For modellutviklingen ble det benyttet både ikke-transformerte flate-variabler og 15 transformerte flate-variabler som har høyeste korrelasjon med den avhengige variabelen N .

I den andre fasen av modellutviklingen (Vedlegg 2) ble det benyttet bare laser-variabler. Det ble generert 36 høydevariabler og 10 tetthetsvariabler. Det ble gjort et utvalg på 15 variabler blant disse 46 variablene. Disse 15 var de variablene som ble rangert høyest med hensyn på korrelasjon til responsvariabelen N . For de utvalgte variablene ble det generert transformerte

variabler. Blant disse utvalgte laser-variabler og transformerte laser-variabler ble de 20 med høyeste korrelasjon til variabelen N valgt ut og benyttet i modellutviklingen.

I den tredje fasen av modellutviklingen (Vedlegg 3) til variabler som ble benyttet i den beste modellen fra modellutviklingens første fase, ble det tilsatt variabler fra den beste modellen fra trinn to.

For å bedømme kvaliteten av de utviklede regresjonsmodellene ble det benyttet følgende koeffisienter: kvadratroten av gjennomsnittlig kvadrert avvik mellom predikert og observert verdi (RMSE); justert determinantkoeffisient (R^2_{just}); variance inflation factor (VIF) og signifikansnivå (p-verdi).

RMSE er en kvadratroten av gjennomsnittlig kvadrert avvik mellom observert verdi og verdi, predikert med modell (Ligning 2). Jo lavere verdi av RMSE – desto bedre er modellen og forklaringsnivåen til variabler i denne modellen. Lav RMSE indikerer at predikerte verdier avviker lite fra de observerte verdier på prøveflatene.

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n_o - n_v}} \quad \text{Ligning 2}$$

SSE - Sum av kvadrerte avvik;
 n_o - antall observasjoner;
 n_v - antall forklaringsvariabler.

Determinantkoeffisient (R^2) er et statistisk mål på hvor godt regresjonslinjen er tilnærmet de observerte verdiene. Denne koeffisienten kan ha verdi mellom 0 og 1. Jo høyere er R^2 , desto bedre passer regresjonslinjen med datasettet.

Determinantkoeffisient stiger ved økning av antall variabler i en modell, selv om forklaringsvariablene ikke forklarer variasjonen til avhengig variabelen. Derfor er R^2 ikke et godt kriterium for å velge ut en god modell med mange forklaringsvariabler. I denne oppgaven ble benyttet R^2_{justert} for å ta hensyn til et høyt antall forklaringsvariabler som benyttes i modellene.

R^2 (Ligning 3) og R^2_{justert} (Ligning 4) ble beregnet på følgende måte:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum(N_i - \text{gj.snitt } N)^2 - \sum(N_i - \text{predikert } N_i)^2}{\sum(N_i - \text{gj.snitt } N)^2} \quad \text{Ligning 3}$$

SSE - Sum av kvadrerte avvik;
 SST - Sum kvadrerte residualer;
 i - observasjon 1, 2, 3...;
 N_i - observert antall småtrær på prøveflaten.

$$R^2_{\text{just}} = \frac{(1 - R^2)(n_v - 1)}{n_v - n_o - 1} \quad \text{Ligning 4}$$

Multikollinearitet er lineær sammenheng mellom flere forklaringsvariabler i en regresjonsmodell. Kollineare forklaringsvariabler forklarer noe av den samme variasjonen til avhengig variabel, uten å øke forklaringsevne til modellen. Regresjonsmodeller med flere kollineare verdier er overtilpasset til datasettet de er bygd på og kan fungere dårlig.

I denne oppgaven ble **variance inflation factor (VIF)** benyttet for å utelukke kollineare forklaringsvariabler fra modeller (Ligning 5). VIF-verdier >10 ble vurdert som indikator på multikollinearitet.

$$VIF_i = \frac{1}{1-R_i^2} \quad \text{Ligning 5}$$

i - forklaringsvariabel 1, 2, 3, 4, ...;

R_i^2 – verdien av determinasjonskoeffisient for modellen.

Variabelberegningene, statistiske analyser og modellutvikling ble gjennomført i statistisk programverktøy R.

3. Resultater

Resultatene av modellutviklingen er vist i tabell 6. Den laveste RMSE som ble oppnådd i modeller med kun laser-variable (trinn II) er 91,7. Den beste regresjonsmodellen basert på flate-variable har RMSE på 83,5. Ved tilsetning av laservariable til den beste modellen, bygd på bare flate-variable, ble RMSE redusert til 75,5.

Tabell 6. Lineare regresjonsmodeller som beskriver foryngelse av fjellskog ut fra flate-variable og laser-variable.

Variabel	Kor. med N	1-1 ^A	1-2 ^A	2-1 ^B	2-2 ^B	3-1 ^C	3-2 ^C	3-3 ^C	3-4 ^C	3-5 ^C
Ln O	-0.322	☐								
YxXx2	0.321	☐								
YxX	0.310		☐			☐	☐	☐	☐	☐
K	0.278	☐	☐			☐	☐	☐	☐	☐
T	0.227								☐	☐
H	0.221		☐			☐	☐	☐	☐	☐
Z	-0.203	☐								
YxZ	-0.196		☐			☐	☐	☐	☐	☐
S	0.187									☐
E	0.040		☐			☐	☐	☐	☐	
t10	-0.160				☐	☐	☐	☐	☐	☐
h5x2	-0.159			☐						
h5	-0.150				☐		☐	☐	☐	☐
h22.5x2	-0.145			☐	☐			☐	☐	☐
t8	-0.134			☐						
R²_{just}		0.156	0.164	0.006	0.023	0.156	0.253	0.252	0.259	0.2718
p-verdi		0.004	0.0048	0.342	0.211	0.0089	0.0005	0.0008	0.0009	0.0006
RMSE		84.630	83.564	92.534	91.735	83.311	77.756	77.233	76.221	75.561

^A - modeller med kun flate-variable;

^B - modeller med kun laser-variable;

^C - modeller med både flate-variable og laser-variable;

☐ - variabel som er benyttet i modell;

O - avstand fra kysten;

YxX – kombinert variabel: anstand fra ekvator ganget anstand fra null-meridian;

K – kronedekning på prøveflate;

T - antall klavetrær, registrert på prøveflate;

H - hellingsprosent;

Z - elevasjon av prøveflate;

YxZ - kombinert variabel: anstand fra ekvator ganget elevasjon;

S – grunnflatesum for prøveflate;

E - hellingsretning;

I den første fasen av modellutviklingen ble det benyttet kun flate-variable, transformerte flate-variable og kombinerte flate-variable. Modell 1-2 inkluderer forklaringsvariablene hellingsretning og hellingsprosent, kronedekning, produktet av Y-koordinat og prøveflatens elevasjon, og produktet av Y-koordinat og X-koordinat til prøveflatens sentrum.

I den beste modellen fra trinn I nr. 2-2 inngår tetthetsvariabelen t10, høydevariabelen h5 og modifisert høydevariabelen h22.52. Høydebaserte variabler h5 og h22.52 beskriver vegetasjon i nedre sjiktet.

I den tredje fasen av modellutvikling (Vedlegg 3) til variabler i modellen 1-2, ble det tilsatt laser-variablene benyttet i modellene 2-1 og 2-2. Tabellen 6 viser at fra modellen 3-1 til modellen 3-4 ble redusert RMSE verdien fra 83,3 til 75,5 og R^2_{just} steget fra 0,15 til 0,27.

4. Diskusjon

I denne oppgaven ble laserdata håndtert etter areal-metode. Samme metode ble benyttet i en studie hvor skogsforryngelse ble estimert med laser-variabler som beskriver strukturen til kronesjiktet i fleraldret granskog (Bollandsås et al. 2008). Antall småtrær ble estimert på et areal, ut fra laser-variabler, som direkte beskriver egenskaper til vegetasjon på dette arealet.

Den alternative metoden (enkelttre-metoden) ble benyttet for detektering av enkeltstående småtrær i «fronten» av tregrense i samme studieområdet som benyttes i denne oppgaven (Stumberg et al. 2014; Thieme et al. 2011). Studien påviste at den valgte metoden fungerer bra for detektering av trær med høyde over 1 m. Kun 49 % av trær med høyde under 1 m ble detektert ved analyse av laserdata (Stumberg et al. 2014; Thieme et al. 2011). Ved enkelttre-metode analyseres kronesjiktets overflate, kun de dominerende trær blir registrert, og en del av data blir oversett (Hyypä & Inkinen 1999). En del av terreng-formasjoner i fjellskog kan bli klassifisert som småtrær. Dette betyr at enkelttre-metode passer dårlig for registrering av forryngelse i fjellskog. Ved bruk av arealmetoden med kalibrering på prøveflater skal oppnås bedre resultat.

I denne oppgaven demonstrerte flate-variabler bedre korrelasjon med forryngelsen enn tetthet-baserte og høyde-baserte laser-variabler. Men predikerte verdier med både modellene bestående av laser-variabler og modellen med kun flate-variabler viste stort avvik fra feltregistrerte verdier. Den beste modellen 3-5 (Tabell 6), bygd på både tetthet-baserte og høyde-baserte laser-variabler og flate-variabler har RMSE på 75,5 ved gjennomsnittlig vedri for feltregistrerte forryngelse på 52,09. Det er mulig at lav presisjon skyldes datasettet som ble brukt. Prøveflater som ble benyttet ligger veldig spredt geografisk. En ny undersøkelse med flere prøveflater fra samme område sannsynligvis vil gi en modell med mye høyere presisjon.

Det er mulig at lav presisjon av utviklete modellene skyldes også i viss grad en del registrerte småtrær med høyde mellom 0,3 og 0,5 m. Under feltdatainnsamling ble telt opp småtrær med høyde fra 0,3 m. Men terskelverdien ved utregning av tetthet-baserte og høyde-baserte laser-variabler ble satt på 0,5 m. Dette betyr at laser-variabler som ble benyttet i denne oppgaven kan ikke forklare variasjon i forryngelse med høyde under 0,5 m direkte.

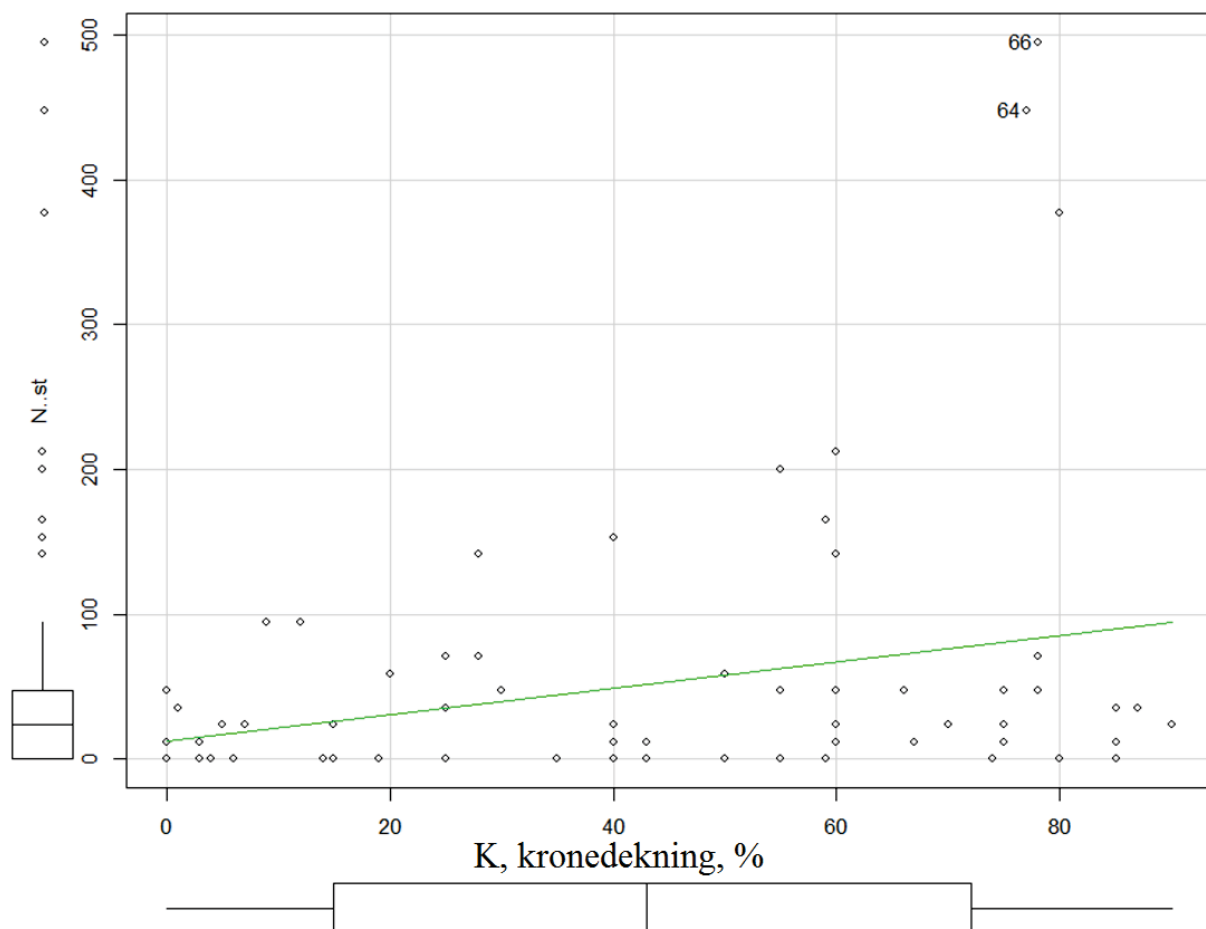
Ved småtrærregistrering under Landsskogtaksering telles opp trær i tre høydeklasser: trær med høyde 0,1 - 1,3 m; trær med høyde over 1,3 m og brysthøydiameter under 25 mm; og trær med høyde over 1,3 m og brysthøydiameter mellom 25 og 50 mm (Eriksen & Viken 2008). Dataen på et så høyt detaljeringsnivå kan bli oppnådd kun ved manuell feltregistrering.

Variabelen kronedekningsprosent som ble benyttet i modellutvikling ble registrert som samlet arealdekning til alle trær (trær og busker som er eller kan bli 5 m høye på det aktuelle voksestedet) på prøveflaten i prosent av flatearealet. Registrert kronedekningsprosent har korrelasjon mot antall registrerte småtrær på 0,27 (Figur 6). Dette betyr at jo større areal av prøveflate er dekt med kroner av større trær, desto mer småtrær er registrert på prøveflaten.

Bållandsås et al. (2008) fant i sin studie at laser-variabler som beskriver overliggende vegetasjon i fleraldret granskog har god korrelasjon med mengden av forhåndsgjenvekst. I tett

skog tilgang til lys er en av de viktigste begrensende faktorene for etablering av nye trær. Og kronedekning hadde inverst forhold til mengde av foryngelse.

Kronesjiktet i fjellskog er mer glissent og etablering av nye trær er svært vanskelig. Tilgang til sollys er ikke den viktigste begrensende faktor for etablering i fjellskog. Større åpninger i kronesjiktet i fjellskog vil ikke betinge potensiale for god foryngelse som i skog som ligger i lavlandet. Eksistens av etablerte trær betinger potensielle muligheter for etablering av nye trær, fordi de eldre trær produserer frø eller reproduserer seg vegetativt, bidrar med strøfall og kan danne ly.



Figur 6. Sammenheng mellom kronedekning og antall småtrær, registrerte på prøveflater i fjellskog innenfor studieområde.

I denne studien ble lineare regresjonsmodeller benyttet for å undersøke evne av laser-variabler å forklare variasjon i foryngelse. I flere tilsvarende studier ble benyttet lineære regresjonsmodeller (Bollandsås et al. 2008; Heurich et al. 2005). Det er mulig at mer avanserte regresjonsmodeller kan gi bedre resultater ved estimering av foryngelse i fjell skog ved bruk av laser-variabler. Det ble ikke funnet informasjon om tilsvarende undersøkelser ble foretatt.

Ulike laser-variabler som for eksempel variasjonskoeffisient og standartavvik til ekkos høydefordeling, kronetetthet, tetthet av underskog benyttes i skogrelaterte undersøkelser (Martinuzzi et al. 2009; Wing et al. 2012). I denne oppgaven ble benyttet kun høyde- og tetthet-baserte laser-variabler. Det kan være aktuelt å undersøke evnet til forklaring av variasjon i foryngelse av de ovennevnte laser-variablene, som ble ikke benyttet i denne oppgaven.

Ved beregning av laser-variabler i denne oppgaven ble benyttet både første og siste ekko. Studien av Bollandås et al. (2008) viser at laser-variabler som er regnet for siste ekko har bedre forklaringsevne på variasjon i foryngelse i fleraldret gran-dominert skog, enn laser-variabler for første ekko. I studien av Heurich et al. (2005) ble benyttet første og siste ekko sammen. For å konkludere om bruk av begge typer av ekko eller av kun første eller siste ekko for utregning av laser-variabler vil gi bedre resultat i forbindelse med forklaring av variasjon i fjellskogens foryngelse, skal en ny undersøkelse gjennomføres.

Denne oppgaven viser at tetthet-baserte og høyde-baserte laser-variabler kan bidra til forklaring av variasjon i foryngelse i fjellskog og kan øke presisjon av resultater. Studien viser at ved bruk av lineære regresjonsmodeller for estimering av foryngelse i bjørkdominert fjellskog kan RMSE reduseres med 9,5 % ved inkludering av tetthet-baserte og høyde-baserte laser-variabler.

Lineære regresjonsmodellene for estimering av skogsforyngelse i fjellskog bygd bare på tetthet-baserte og høyde-baserte laser-variabler ga i denne studien 21,4 % større RMSE enn modeller som inkluderer både laser- og flate-variabler. Flate-variabler som ble benyttet i modellutvikling registreres under taksering (kronedekning) av landsskogflater, eller kan regnes ut fra data innsamlet under Landsskogtakseringen, eller kan registreres ved enkel kartdata-analyse i GIS-programmer (hellingsretning, hellingsprosent, geografiske koordinater, elevasjon).

Det er, foreløpig, ikke mulig å konkludere om laserdata innsamlet ved flybåren laser-skanning kan forbedre kvalitet på Landsskogtakseringens estimeringer av skogsforyngelse i fjellskog. Få å få svar på det, skal man gjennomføre en undersøkelse, hvor permanente landsskogtakseringsflater vil bli taksert etter original opplegget, og datasettet vil ha større antall registreringer.

5. Litteratur

- ACIA. (2004). *Impacts of a warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press. 146 s.
- Bollandsås, O. M. (2008). *Feltinstuks: Effect of changing climate on the alpine tree line and mountain forest carbon pools along 1,500 km N-S and elevation gradients*. 43 s.
- 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.
- Brack, C. L. (2008). *A Brief History of Forest Inventory*. History of Inventory. The Australian National University, Canberra. Tilgjengelig fra: <http://fennerschool-associated.anu.edu.au/mensuration/history.htm> (lest 10.03.2015).
- Børset, O. (1985). *Skogskjøtsel: skogsøkologi*. Oslo: Landbruksforlaget. 494 s.
- Børset, O. (1994). Norsk fjellskogskjøtsel - et tilbakeblikk og en oppsummering. *Aktuelt fra Skogforsk*: Norsk Institutt for skogforskning. 12 s.
- 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.
- Eriksen, R. (2007). *Landsskogtakseringens takstsystemer*. Norsk Institutt for skog og Landskap. Tilgjengelig fra: <http://www.skogoglandskap.no/fagartikler/2007/1197454382.24> (lest 10.01.2015).
- Eriksen, R. & Viken, K. O. (2008). Landsskogtakseringens feltinstruks. *Håndbok fra Skog og landskap* 05/2008.
- Flood, M. (2001). Laser Altimetry : from science to commercial LIDAR mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67 (11): 1209-1217.
- Granhus, A., Hylen, G. & Ørnelund-Nilsen, J. (2012). Statistikk over skogforhold og skogressurser i Norge registrert i perioden 2005-2009. *Ressursoversikt fra Skog og landskap*: Norsk institutt for skog og landskap. 85 s.
- Heurich, M., Persson, A., Holmgren, J. & Kennel, E. (2005). Detecting and measuring individual trees with laser scanning in mixed mountain forest of central Europe using an algorithm developed for Swedish boreal forest. *International archives of photogrammetry. Remote sensing and spatial information sciences*. 307 - 312 s.
- Hyypä, J. & Inkinen, M. (1999). Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 16(2): 27-42.
- IPCC. (1990). Climate change, the IPCC scientific assessment. I: Houghton, J. T., Jenkins, G. J. & Ephraums, J. J. (red.). 410 s.
- Larsson, J. Y. (2004). *Skoggrensa i Norge: indikator på endringer i klima og arealbruk?*, b. 3/04. Ås: NIJOS. 44 s.
- Martinuzzi, S., Vierling, L. A., Gould, W. A., Falkowski, M. J., Evans, J. S., Hudak, A. T. & Vierling, K. T. (2009). Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability. *Remote Sensing of Environment*, 113 (12): 2533-2546.
- McRoberts, R. E., Tomppo, E. O. & Næsset, E. (2010). Advances and emerging issues in national forest inventories. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25 (4): 368-381.
- Mork, E. (1968). *Økologiske undersøkelser i fjellskogen i Hirkjølen forsøksområde*, b. B. 25, h. 7. Oslo: Vesenet. 467-614 s.
- Næsset, E. (2001). Ressurskartlegging med flybåren laser-scanner: Snart virkelighet. *Norsk Skogbruk*, 5.

- 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. (2007). Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 22 (5): 433-442.
- Skinemoen, K. (1969). *Skogskjøtsel*. Oslo: Landbruksforlaget. 724 s.
- Solbraa, K. (2001). *Skogskjøtsel: teknisk fagskole : fordypningsområde skogskjøtsel*. Oslo: Gan. 206 s.
- Solodukhin, V., Zukov, A. & Mazugin, I. (1977). Possibilities of laser aerial photography for forest profiling. *Lesnoe Khozyaisto (Forest Management)*, 10: 53-58.
- Stage, A. R. (1976). An expression for the effect of aspect, slope, and habitat type on tree growth. *Forest Science*, 22 (4): 457-460.
- Strand, L. (1994). *Kilde til kunnskap: landsskogtakseringen 75 år*, b. nr 9/94. Ås: NIJOS. 158 s. : ill. s.
- Stumberg, N., Bollandsås, O., Gobakken, T. & Næsset, E. (2014). Automatic detection of small single trees in the forest-tundra ecotone using airborne laser scanning. *Remote sensing*, 6 (10): 10152-10170.
- 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.
- UNFCCC. (2008). Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts. United Nations Framework Convention on Climate Change. 127 s.
- Wing, B. M., Ritchie, M. W., Boston, K., Cohen, W. B., Gitelman, A. & Olsen, M. J. (2012). Prediction of understory vegetation cover with airborne lidar in an interior ponderosa pine forest. *Remote Sensing of Environment*, 124 (1): 730-741.
- Ørka, H. O. (2009). *Kort- og langsiktig kartlegging av effekter av globale klimaendringer på skog*. Forest Inventory and monitoring Research Group at NMBU-INA. Tilgjengelig fra: <http://www.forestinventory.no/?p=208&lang=NO> (lest 01.02.2015).
- Ørka, H. O., Wulder, M. A., Gobakken, T. & Næsset, E. (2012). Subalpine zone delineation using LiDAR and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 119 (0): 11-20.

Vedlegg 1. Modellutvikling. Fase I

	Kor med N	1-A	1-B	1-C	1-D	1-E	1-F	1-G	1-1*	1-2*
O,ln	0.322	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
YxX,x2	0.321	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	
Xx2	0.316	☐	☐							
YxX	0.310	☐								☐
X	0.306	☐								
YxX,ROT	0.303	☐	☐	☐	☐			☐		
Yx2	0.301	☐	☐	☐	☐	☐				
X,ROT	0.300	☐								
Y	0.298	☐								
X,ROT	0.297	☐								
Y,ROT	0.297	☐								
YxX,ln	0.295	☐								
Y,ln	0.295	☐								
X,ln	0.294	☐								
K	0.278	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
O	0.275	☐								
Kx2	0.271	☐								
K,ROT	0.268	☐								
T,ln	0.252	☐								
T,ROT	0.251	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
T	0.227	☐								
H	0.221	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐
Z	0.203	☐	☐	☐					☐	
YxZ	0.196	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐
S	0.187	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
E	0.040	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐
R^2_{just}		0.243	0.126	0.117	0.129	0.126	0.140	0.149	0.156	0.164
p-verdi		0.030	0.063	0.067	0.045	0.041	0.024	0.019	0.004	0.0048
RMSE		66.167	80.732	81.853	81.953	82.759	82.770	82.359	84.630	83.564

* - modell, hvor alle forklaringsvariabler har VIF verdi ≤ 10 ;

☐ - variabel som er benyttet i modell.

Vedlegg 2. Modellutvikling. Fase II

	Kor med N	2-A	2-B	2-E	2-F	2-G	2-H	2-J	2-K	2-L	2-N*	2-1*	2-2*
t10x2	-0.165	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
t9x2	-0.163	☐	☐										
t10	-0.160	☐	☐	☐	☐	☐	☐						☐
t8x2	-0.160	☐	☐	☐									
h5x2	-0.159	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		☐	
t7x2	-0.154	☐	☐										
t10ROT	-0.150	☐	☐										
h5	-0.150	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐				☐
t9	-0.148	☐	☐	☐	☐								
h15x2	-0.146	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐		
h12.5x2	-0.146	☐	☐	☐	☐	☐							
h22.5x2	-0.145	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
t6x2	-0.144	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐					
h7.5x2	-0.144	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐			
h10x2	-0.143	☐	☐	☐	☐	☐	☐						
t8	-0.134	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
t10LN	-0.129	☐											
t9ROT	-0.125	☐											
h5ROT	-0.121	☐											
h7.5	-0.118	☐											
R^2_{just}		0.121	0.072	0.101	0.069	0.080	0.092	0.054	0.041	0.054	-0.009	0.006	0.023
p-verdi		0.130	0.209	0.111	0.178	0.136	0.099	0.175	0.211	0.144	0.506	0.342	0.211
RMSE		75.141	80.260	81.149	83.311	83.506	83.681	86.819	88.133	88.217	92.534	92.534	91.735

* - modell, hvor alle forklaringsvariabler har VIF verdi ≤ 10 ;

☐ - variabel som er benyttet i modell.

Vedlegg 3. Modellutvikling. Fase III

Variabel	Korrelasjon med N	3-1*	3-2*	3-3*	3-4*	3-A	3-5*
O,ln	0.322						
YxX,x2	0.321						
Xx2	0.316						
YxX	0.310	☐	☐	☐	☐	☐	☐
X	0.306						
YxX,ROT	0.303						
Yx2	0.301						
X,ROT	0.300						
Y	0.298						
O,ROT	0.297						
Y,ROT	0.297						
YxX,ln	0.295						
Y,ln	0.295						
X,ln	0.294						
K	0.278	☐	☐	☐	☐	☐	☐
X	0.275						
Kx2	0.271						
K,ROT	0.268						
T,ln	0.252						
T,ROT	0.251						
T	0.227				☐	☐	☐
H	0.221	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Z	0.203						
YxZ	0.196	☐	☐	☐	☐	☐	☐
S	0.187					☐	☐
E	0.040	☐	☐	☐	☐	☐	
t10x2	-0.165						
t9x2	-0.163						
t10	-0.160	☐	☐	☐	☐	☐	☐
t8x2	-0.160						
h5x2	-0.159						
t7x2	-0.154						
t10ROT	-0.150						
h5	-0.150		☐	☐	☐	☐	☐
t9	-0.148						
h15x2	-0.146						
h12.5x2	-0.146						
h22.5x2	-0.145			☐	☐	☐	☐
t6x2	-0.144						
R ² _{just}		0.156	0.253	0.252	0.259	0.2632	0.2718
p-verdi		0.0089	0.0005	0.0008	0.0009	0.0011	0.0006
RMSE		83.311	77.756	77.233	76.221	75.377	75.561

* - modell, hvor alle forklaringsvariabler har VIF verdi ≤ 10;

☐ - variabel som er benyttet i modell.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no