



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning, MINA

Tregrensedynamikk i Norge – Endringer i treantall, mortalitet og vekst for pionærtrær langs en breddegradsgradient

Treeline Dynamics in Norway – Changes in Number
of Trees, Mortality and Growth for Pioneer Trees
along a Latitudinal Gradient

Kenneth Langlie Simensen

Skogfag

Forord

Denne masteroppgaven i skogfag er skrevet ved Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA), og markerer slutten på min tid som skogfagstudent ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven tar for seg endringer i treantall, vekst og mortalitet for trær i tregrensekotonen. For en skogfagstudent som på fritiden er veldig glad i å være på fjellet var tanken på å skrive en masteroppgave om trærnes aktivitet i overgangen mellom disse økosystemene veldig tiltalende.

Jeg vil rette en stor takk til alle som har vært med på å gjøre muliggjøre denne oppgaven. En stor takk rettes til min hovedveileder Dr. Ole Martin Bollandsås og min tilleggsveileder Prof. Kari Klanderud. Jevnlige faste møter og stor tilgjengelighet når behov har oppstått har vært til enorm hjelp. Tusen takk for gode tilbakemeldinger og konstruktiv kritikk igjennom hele prosessen. En stor takk rettes også til min andre tilleggsveileder, Phd-stipendiat Ida Marielle Mienna, for uvurdelig hjelp med det statistiske arbeidet og god dialog rundt fremdriften forøvrig. Denne våren ville vært mye tyngre om det ikke ville vært for dette. Denne oppgaven har blitt utført i tilknytning til forskningsprosjektet ForestPotential, og har mottatt økonomisk støtte til gjennomføring av feltarbeid av ForestPotential og UNIFOR. Tusen takk for støtten.

Til slutt vil jeg gjerne takke mine medstudenter for alle gode diskusjoner, hyggelige kvelder og artige sprell på skogbrukersalen, så vel som studentsamfunnet i Ås. En ekstra spesiell takk rettes til Mannskoret Over Rævne for mange gode historier og minner som jeg vil ta med meg resten av livet!

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Ås, 15. mai 2018

Kenneth Langlie Simensen

Sammendrag

Økt kunnskap om endringer blant trærne i tregrensen, hvordan de manifesterer seg og hva som ligger til grunn for dem, har vært studert i over 100 år. Begrensninger i temperatur har lenge vært ansett som en av de viktigste grunnene til den trærnes reduserte etablering og vekst i overgangen mot de alpine fjellområdene. Samtidig som at klimaforandringer har blitt mer og mer fremtredende har det også blitt en økning i forskning med mål om å avdekke hva som vil komme til å skje i tregrensen i fremtiden. Resultatene fra en økning i empirisk forskning fra rundt andre verdenskrig indikerer at grunnlaget for etablering og vekst i tregrenseøkotonen er mer komplisert enn at den kun er begrenset av temperatur, og at andre faktorer som nedbør, topografi og konkurranse etc. også kan være avgjørende.

I Norge har forskningen på tregrensen de senere årene for det meste vært gjennomført på en lokal skala. Denne studien derimot er basert på 114 prøveflater, fordelt på 36 lokaliteter. De ble etablert i 2008, målt på nytt i 2012 og til slutt målt i 2018. Dette gir et godt grunnlag for å oppdage trender i endringer for trærne i tregrenseøkotonen i Norge som helhet.

Formålet til denne studien var å kvantifisere de faktiske endringene i treantall, høyde, diameter, kronediameter og mortalitet i tregrensen. Det ble også undersøkt hvilken sammenheng klimatiske og topografiske forklaringsvariabler hadde med disse endringene. Resultatene av den deskriptive statistikken viste at det generelt var en økning i treantall i tregrensen mellom 2008 og 2018. Det ble påvist en signifikant trend for relativ økning i høydevekst i en sør-nord-gradient. For kronediameter var denne trenden motsatt med mindre økning i den samme gradienten. Den relative mortaliteten på prøveflatene var høyest i sør og lavest i nord.

Modelleringen ble gjennomført med «*generalized linear models*» (GLM). Her ble det avdekket signifikante negative sammenhenger mellom endringer i høyde og sommernedbør og -temperatur, samt en positiv sammenheng mellom høyde og oseanitet. For endringer i diameter er det kun avdekket en negativ sammenheng med sommertemperatur. I modellen for mortalitet er det funnet positive sammenhenger med sommertemperatur og oseanitet, og negativ sammenheng med vinternedbør. Det ble ikke funnet noen signifikante sammenhenger mellom noen av responsvariablene og de topografiske forklaringsvariablene, bratthet og helningsretning.

Abstract

Increasing the knowledge concerning changes among trees in the treeline ecotone, how they manifest themselves and the underlying reasons, have been subject of study for over 100 years. Limitations in temperature has long been seen as one of the most important reasons for the trees reduced establishment upwards towards the alpine mountain range. At same time as that climate change has become more and more prominent, there has also been an increase in research to uncover what will happen in the treeline ecotone in the future. The results from an increase in empirical research since the second world war indicate that the basis for establishment and growth in the treeline ecotone is more complicated than as to be limited by merely temperature, and that factors like precipitation, topography and competition etc. also may be crucial.

In Norway, the research in recent years has mostly been conducted on a local scale. This study, on the other hand, is based on 114 sample areas, partitioned on 36 different localities. The sample areas were established in 2008, measured again in 2012, and finally measured in 2018. This gives a good foundation for discovering trends in changes for trees in the treeline ecotone in Norway, as a whole.

The purpose of this study was to quantify the actual changes in the number of trees, height, diameter, crown diameter and mortality in the treeline ecotone, and to examine what relationship the climatic and topographic explanatory variables had with these changes as well. The results of the descriptive statistics showed a general increase in the number of trees between 2008 and 2018. There was detected a significant trend for relative increase in height increment in a south-to-north gradient. For crown diameter this trend was opposite with a smaller increment in the same gradient. The relative mortality per locality also had a significant decreasing trend from south to north.

The modeling was done with “*generalized linear models*” (GLM). There were found significant negative relationships between changes in height, and summer precipitation and -temperature, as well as a positive relationship with oceanity. For changes in diameter there was only found a negative relationship with summer temperature. In the model for mortality there was found a positive relationship with summer temperature and oceanity, and a negative relationship with winter precipitation. There were not found any significant relationships between any of the response variables and the topographic explanatory variables, slope and aspect.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VII
1 Innledning.....	1
2. Material og metode.....	4
2.1 Studieområdet	4
2.2 Prøveflater	5
2.3 Treregistrering	6
2.4 Innledende beregninger	7
2.4.1 Treantall/ha	8
2.4.2 Mortalitet.....	8
2.5 Klimadata.....	9
2.6 Topografiske data	9
2.7 Statistiske analyser	9
2.7.1 Generelt.....	9
2.7.2 Deskriptiv statistikk	10
2.7.3 Valg av forklaringsvariabler	10
2.7.5 Modelling.....	11
3. Resultater.....	12
3.1 Treslag/Treantall.....	12
3.1.1 Treslagsfordeling	12
3.1.2 Mortalitet.....	13
3.1.2 Endring i treantall	15
3.2 Endring i høyde, diameter og kronediameter	16

3.2.1 Endring på høydeklassenivå	16
3.2.2 Endring på lokalitetsnivå	17
3.3 Modeller.....	19
3.3.1 Endring - høyde.....	19
3.3.2 Endring diameter.....	19
3.3.3 Endring – kronediameter.....	20
3.3.4 Mortalitet.....	20
4. Diskusjon.....	21
4.1 Endringer i treantall	21
4.2 Endring i høyde	22
4.3 Endring i diameter	23
4.4 Endring i kronediameter	24
4.5 Mortalitet	25
5. Oppsummering og konklusjon	27
6. Litteratur.....	29

1 Innledning

Klimaet er alltid i endring. Den rådende konsensusen i forskningen tilsier at verden på et generelt nivå blir varmere, og at dette skjer i et raskere tempo enn i tidligere endringsregimer (Smith et al. 2015). Dette vil potensielt ha ulike konsekvenser for forskjellige steder. Estimerer tyder på at enkelte områder vil oppleve mer av værtypene de allerede har, i form av at tørre områder blir tørrere, og at andre områder med mye nedbør vil oppleve enda mer nedbør (IPCC 2014). Det er også slik at det finnes områder som kan få endret værmønsteret mer i en annen retning enn hva som tradisjonelt har vært, samt steder hvor effekten av endringene vil oppleves som mindre (IPCC 2014). Alle disse mønstrene i endringer kan påvirke tregrensens form og utbredelse.

Økt kunnskap om endringer i tregrensen, hvordan de manifesterer seg og hva som ligger til grunn for dem, har vært studert helt siden 1800-tallet da Alexander von Humboldt beskrev tregrensen som en grense for livsformer i et globalt perspektiv (Körner 2012). Det har vært variasjoner i hvor vitenskapelige tilnærmingene til å finne forklaringer har vært, fra de tidligste tilnærmingene på starten av 1900-tallet av Schröter og Däniker med lite empiriske data, til undersøker på lokal skala med mer eksperimentelle tilnærminger fra rundt andre verdenskrig (Körner 2012). Tranquillini gikk igjennom mange av disse undersøkelsene for så å prøve å forklare fenomenet tregrense i et globalt perspektiv, dog på bakgrunn av stort sett europeiske studier (Körner 2012). Etterhvert ble det gjennomført mange flere studier fra flere deler av verden av blant annet Hermes, Troll og Lauer, og man begynte å kunne danne grunnlaget for hva som var generelt gjeldende faktorer i utformingen av tregrensa (Körner 2012).

Tregrensen defineres av det høyeste voksestedet for et enkelt tre opp mot den alpine tundraen (Snl 2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) sin definisjon av skog er arealer på minst 0.5 hektar med mer enn 10% kronedekke, hvor trær er eller kan bli over fem meter høye (NATIONS 2016). Skoggrensen finner man da hvor dette ikke lenger viser seg gjeldende. Slike grenser kan være vanskelige å trekke da det kan være store variasjoner innenfor gitte områder. Det kan derfor være mer hensiktsmessig å se på endringen fra skog til fjell som en overgangssone, eller en økoton. (Hufkens et al. 2009) definerer en økoton som: "En miljømessig stokastisk samspillssone mellom økologiske systemer med egenskaper definert i rom og tid, med styrken av samspillet og deres drivende prosesser". Tregrenseøkotonen danner da et belte som ligger mellom skoggrensen og tregrensen. I dette beltet vil en finne arter som hører hjemme i både alpin tundra og skog, og bredden på denne

økotonen vil variere i stor grad, da overgangen fra skog til fjell omfatter et bredt spekter av variasjoner i topografiske og klimatiske forhold (Gazol et al. 2017; Körner 2012).

Endringer i klima kan være med på å endre forutsetningene for tilstedeværelsen av de forskjellige treslagene i tregrensen. For noen trær vil endringene være positive, for andre kan de være negative, med tanke på blant annet økt konkurranse fra andre arter eller grunnet endrede temperatur- og/eller nedbørsforutsetninger (Tingstad et al. 2015). Et område med stor variasjon i klima er Norge. Landet er delt inn i fem av de totalt syv typene klimatiske soner som brukes i verden i dag (Moen 1998). Denne soneinndelingen kategoriserer det norske landskapet i henhold til generelle klimatiske soner, der den mest oseaniske kategorien finnes på Vestlandet. Her vil man finne et fuktigere klima med høyere vintertemperaturer. Når man beveger seg lenger inn i landet blir klimaet tørrere og vintertemperaturene lavere. Men det er ikke bare klima som påvirker hvor trær greier å etablere seg og vokse.

Det er også store variasjoner i topografien i Norge, med høye fjell både i innlandet, og ved kysten. Slike lokale forhold kan ha en påvirkning trærnes utbredelse. Noen av disse forholdene utgjør rene fysiske barrierer hvor etablering gjøres umulig. «The summit syndrome» er et eksempel på en type tregrense som ikke er en klimatisk alpin tregrense. Disse kan forekomme på mye lavere elevasjon enn i nærliggende områder, og er et resultat av en kombinasjon faktorer som for bratt terreng for spredning av frø, kraftig vind og erosjon av substrat (Körner 2012). Andre forhold som kan ha en innvirkning er for eksempel forskjell på solinnstråling mellom sørvendte og nordvendte bakker, da dette kan føre til at snøen ligger lengre og kortere vekstsesong for nordvendte områder (Cui et al. 2017; Singh 2018). Slike forhold medfører varierende forutsetninger for liv, og som en konsekvens av dette vil tregrensen manifestere seg på forskjellige måter på forskjellige steder.

Tregrensa i Norge har vært både lavere og høyere enn hva den er i dag, dette henger mye sammen med forskjellige klimaregimer som har vært opp igjennom tidene (Huntley et al. 2013; Oberg & Kullman 2011). Under istiden var mye av Norge dekket av et tykt islag som legger sine naturlige begrensninger for liv, og tregrensen var naturligvis mye lavere enn den er per i dag. Etter istiden ble det en kraftig økning i temperatur som førte til at trær vokste ved høyere elevasjoner enn i dag (Birks 2015). Dette var da gjeldende for store deler av Skandinavia. I Norge er trærne på Hardangervidda nå borte, og i Sverige har tregrensa for *Picea abies* (gran) sunket med 120 meter de sammenliknet med 8000 år siden, justert for landheving etter istiden (Kullman 1996). Man vet altså at endringer i trærnes utbredelse forekommer over tid.

Eventuelle endringer økotonen kan for eksempel føre til flere store trær oppover fjellsidene og mer skog med mulighet for tømmerproduksjon. En utvidelse av tregrensen i Norge kan også føre til endringer i vegetasjonssammensetningen i disse områdene. Konkurransforholdene mellom artene som finnes her kan endres, og dette kan igjen føre til at noen arter kan bli fortrent, og at andre tar over. En økning i antall trær kan for eksempel også føre til mer mat for klovdyr og økte bestander da de får mer å beite på (Herrero et al. 2016). Samtidig kan endringer i tregrensen føre til endrede forutsetninger for CO₂-beregninger når man ser på hele klimaregnskapet i Norge under ett (Myers-Smith et al. 2011). På den ene siden vil det kunne bli et større grunnlag for karbonfangst i stående trær, mens det på den andre siden stilles spørsmål ved hva som vil være konsekvensene av endringer i albedo-effekten (de Wit et al. 2014).

En litteratursammenstilling gjennomført i 2018 pekte på at selv om det er utført en del forskning på tregrensen i Norge er mange av disse studiene utført over korte tidsrom og gjerne i en lokal utstrekning (Bryn & Potthoff 2018). Her ble det påpekt et behov for studier med en empirisk tilnærming, i stor geografisk utstrekning som bør bli fulgt opp over lang tid. Denne studien baserer seg på prøveflater som ble etablert i 2008, som ble målt igjen i 2012 og 2018. Prøveflatene strekker seg over en >1000 km lang gradient, og målingene gjort her gir informasjon om endringer basert på et stort antall trær over et stort geografisk område. Dette vil kunne bidra til å legge et grunnlag for å kunne si noe om tregrenseøkotonen i Norge som en helhet. Går den opp i elevasjon eller ned, blir den bredere eller smalere?

Formålet med denne oppgaven var derfor å belyse hva som er dagens situasjon i tregrenseøkotonen i Norge og hvilke endringer som har skjedd der over tid. Observerbare endringer i vekst, rekruttering og mortalitet på trær i tregrensen ble analysert. På bakgrunn av de ovennevnte studiene var mine hypoteser som følger: (H1) Det vil være en økning i antall trær i tregrensen, (H2) temperatur og nedbør i tetratermen er viktig for tilvekst og rekruttering, (H3) klimadata for tidligere perioder har en innvirkning på tilvekst og mortalitet for inneværende tiårsperiode, (H4) det er høyere tilvekst og rekruttering i sørhellinger enn i nordhellinger og (H5) høyere vekst og lavere mortalitet på områder med lavere bratthet.

2 Material og metode

Denne masteroppgaven er skrevet som en del av forskningsprosjektet ForestPotential, som igjen er en del av arbeidet til en forskergruppe som arbeider med skogregistrering og -overvåkning (SkogRover) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), herunder Fakultetet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA). Forskningsprosjektet har en tidsramme på 4 år (2018-2021), og det bygger videre på arbeidet til tidligere forskningsprosjekter ved NMBU. I forbindelse med de tidligere forskningsprosjektene ble det 2006/2007 opprettet et 1500 km langt og 200 m bredt transekt som går fra lengst sør i Norge til lengst nord, hvor laserdata ble innhentet. Dette transektet ligger over mange tregrenser i Norge og er da utgangspunktet for utvelgelsen av prøveflatene til denne studien. Formålet til dette forskningsprosjektet er å kvantifisere endringene i tregrensen for videre analyser, da dette har implikasjoner for både fremtidig tømmerproduksjon og karbonbinding. Det har blitt samlet inn data i form av treregistrering, vegetasjonsregistrering, laserscanning, multispektrale bilder og dronebilder. Disse har da blitt supplert med klimadata fra meteorologisk institutt og historiske beitedata. Totalt sett gir dette et godt utgangspunkt for å erverve ny kunnskap om de endringene som forekommer og grunnlaget for hvorfor de er slik de er, samt å utvikle nye metoder for ressursregistrering.

2.1 Studieområdet

Denne studien er en tidsstudie over utvikling blant trær i tregrensa og baserer seg på observasjoner på 114 prøveflater etablert i 2008, fordelt på 36 forskjellige lokaliteter langs en breddegradsgradient som går fra Veggli (60°N) i sør til Senja (69°N) i nord (Figur 1). Lokalitetene er alle, bortsett fra én, lagt til områder hvor det normalt ikke ferdes folk, slik at det skal være minst mulig fare for at de skal bli utsatt for menneskelig inngripen. Det er klimatiske forskjeller mellom lokalitetene langs både kyst-innlandsgradienten og breddegradsgradienten.



Figur 1: Geografisk plassering av de 36 lokalitetene, valgt ut ifra et 1500 km langt og 200 m langt transekt.
(Thieme et al. 2011)

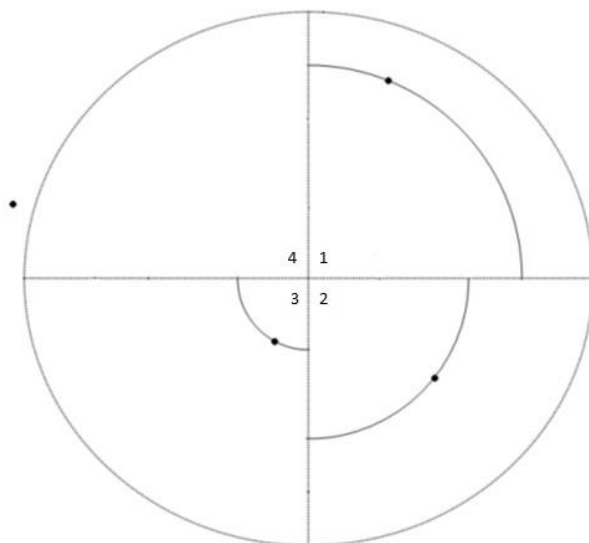
2.2 Prøveflater

På alle lokalitetene ble det etablert to til fire sirkulære prøveflater med en radius på 25 meter. Alle prøveflatene ble lagt i forband i overgangen mellom skog og fjell, men det var en del variasjon i bratthet og hellingsretning. Avstanden mellom sentrum av prøveflatene var 50 meter, 100 meter eller 150 meter avhengig av bredden på tregrenseøkotonen. Alle flatesentra ble posisjonert med GPS med +/- 2 cm nøyaktighet. Prøveflatene er også delt inn i fire kvadranter i henhold til kardinalretningene. Kriteriet for hvilke trær som ble valgt ut var metoden truncated point-center-quarter (t-PCQ), som er en metode for å beregne tetthet hvor man i hver av kvadrantene velger det som er nærmest sentrum (av det man ønsker å undersøke).

2.3 Trerregistrering

Trerregistreringen har nå blitt gjennomført tre ganger. Den første registreringen var i 2008, andre gang var i 2012, og foreløpig siste registrering ble gjennomført i 2018. Det var i arbeidsinstruksen for feltarbeidet i 2008 spesifisert at det skulle registreres tre treslag: gran (*Picea abies*), furu (*Pinus sylvestris*) og bjørk (*Betula pubescens.*), men i 2012 ble det ved en feil også registrert rogn (*Sorbus aucuparia*) og osp (*Populus tremula*). Disse to treslagene ble da også inkludert i 2018. Alle de tre gangene ble registreringene gjennomført i tidsrommet juni-september. Videre beregninger har tatt utgangspunkt i datasettene fra registreringene i 2008 og 2018 for å kunne regne med lengst mulig vekstperiode.

Det ble navigert til prøveflatenes sentrum ved hjelp av GPS. I hver kvadrant ble treet (uavhengig av art) som var nærmest sentrum og levende i hver høydeklasse merket (Figur 2). De respektive klassene var som følger: høydeklasse 0 = 0 – 0.99 m, høydeklasse 1 = 1.00 – 1.99 m og høydeklasse 2 = 2.00 m og over. Hvis ingen kvadranter manglet trær i noen høydeklasse ble det registrert maksimalt 4 trær per høydeklasse, totalt 12 trær per prøveflate. Videre ble trær fra de tidligere registreringene (2008 og 2012) sjekket og hvis dette var andre trær enn de merkede, ble disse også innmålt og registrert på skjema. Data som ble registrert per tre var høyde, diameter, kronediameter (NS og ØV) og posisjon.



Figur 2: Illustrasjon av utvelgelsen av trær i en bestemt høydeklasse på en gitt prøveflate, hvor treet nærmest sentrum (svart prikk) i hver kvadrant (1-4) blir registrert. I kvadrant 4 var det nærmeste treet mer enn 25 meter unna, og ble da ikke registrert.

Høyde ble normalt målt med en to meter lang målepinne som er delt inn i cm, men enkelte store trær ble målt med Vertex hypsometer. Trærne ble målt fra der roten gikk ned i bakken, dette for å være konsekvent da noen trær hadde en stamme som lå langs bakken i varierende lengder. Høyden som ble registrert var det høyeste punktet på treet/krona hvor det var grønne blader/nåler. Diameter ble målt i millimeter med standard tømmerklave. Der det var mulig ble stammen klavet i retning inn mot sentrum. Ved flere levedyktige stammer fra samme rot ble diameter målt på stamme nærmest sentrum. Kronens diameter i nord/sør og øst/vest retning ble målt i centimeter. Kronediametermålingene ble sjekket mot kompass for å finne riktig retning. Kronens ytterste grønne blader/nåler ble målt 90 grader på målepinnen for korrekt måling.

De målte verdier ble notert på papirskjema, og alle nye og gamle trær ble registrert med, eller sjekket opp mot GPS med +/- 2 cm nøyaktighet. Da posisjonen på nye trær ble registrert på GPS ble de gitt hver sin unike kode for videre databehandling.

2.4 Innledende beregninger

Dataene er bearbeidet på to nivåer, avhengig- og uavhengig av høydeklasse.

2.4.1 Treantall

I henhold til PCQ-metoden som er benyttet skal man i hver av de fire kvadrantene lete utover fra sentrum og finne det nærmeste individet av hva man skal estimere tettheten til, i dette tilfellet trær. Man måler avstand til sentrum i de fire kvadrantene og med gjennomsnittsavstanden kan man beregne antall/m² (Cottam et al. 1953). PCQ-metoden kan modifiseres til å ha en begrenset radius, også kalt truncated (avkortet). Denne metoden kan benyttes der det kan forventes at nærmeste individ er uforholdsmessig langt fra sentrum, og angir en korreksjonsfaktor for tomme kvadranter. I dette tilfellet ble det benyttet en grenseverdi for radius på 25 meter. Gjennomsnittlig radius (avstand til sentrum) kvadrert under brøkstreken, med 1 som dividend, blir ganget med korreksjonsfaktor (*CF*) for tomme kvadranter for å få et estimat på treantall/m², se likning 1. (Warde & Petranka 1981). Videre multipliserer man med 10 000 for å finne treantall/ha. Heretter vil treantall/ha refereres til som treantall. Endring i treantall, se likning 2, ble regnet ut som forskjellen mellom det estimerte treantall for 2008 og 2018 pluss et tillegg for å kompensere for døde trær i form av den relative mortalitetsprosenten (Likning 3).

$$Treantall = \frac{1}{\bar{r}^2} * CF * 10\ 000 \quad (1)$$

$$\Delta Treantall = Treantall\ 2018 + Treantall\ 2008 * \frac{Døde\ trær\ 2018}{Treantall\ 2008} - Treantall\ 2008 \quad (2)$$

2.4.2 Mortalitet

Den relative mortaliteten viser den relative andelen av de opprinnelig målte trærne (i 2008) som har dødd innen måletidspunktet i 2018. Trær som ikke har noen grønne blader/nåler ble klassifisert som døde.

$$Mortalitetsprosent = \frac{Døde\ trær\ i\ 2018}{Totalt\ antall\ trær\ målt\ i\ 2008} \quad (3)$$

2.5 Klimadata

Døgnverdier for maksimumstemperatur, minimumstemperatur, gjennomsnittstemperatur og akkumulert nedbør for perioden 1957 til 2018 var tilgjengelig for alle de 36 lokalitetene. Verdiene for hver lokalitet er ikke direkte målinger, men interpoleringer mellom målinger ved offisielle målestasjoner i nærheten (Tveito et al. 2005). Interpoleringene ble utført av Meteorologisk institutt. Gjennomsnittlige temperatur- og nedbørsverdier for periodene 1998-2007 (P1) og 2008-2017 (P2) ble beregnet for både sommer- (mai-august) og vinterhalvåret (desember-mars). Variabler som representerer endring i sommertemperatur og nedbør, ble beregnet som differansen mellom P2 og P1.

Norge er delt inn i forskjellige vegetasjonsseksjoner der forskjeller i klimafaktorer som sommertemperatur, luftfuktighet og vintertemperatur er viktige elementer. Forskjellen mellom disse er større når jo lenger inn i landet en kommer, og gir følgelig forskjellig eksistens- og vekstgrunnlag for forskjellige arter. Lokalitetene som er benyttet i denne studien er finnes i 4 av disse seksjonene. De gjeldende seksjonene har betegnelsene klart oseanisk seksjon, svakt oseanisk seksjon, overgangsseksjon og svakt kontinental seksjon. Klart oseanisk seksjon er nærmest havet, og har blitt gitt lavest verdi i modellberegningene. Oseanitet som kategori har blitt brukt i modellering for å avdekke eventuelle sammenhenger med endringer og mortalitet.

2.6 Topografiske data

Tredimensjonale koordinater (nord, øst, elevasjon) ble hentet ut fra GPS-målingene gjort på hver flate. På bakgrunn av LiDAR-punkter har det også blitt regnet ut verdier for stigning og helningsretning på lokalitetsnivå. Det er brukt en metode kalt *Inverse Distance Weighted* (IDW) hvor blir interpolert en stigning som vil være som et vektet snitt av stigningen og retningen på lokaliteten.

2.7 Statistiske analyser

2.7.1 Generelt

Alle de statistiske analysene ble utført i programmet Rstudio versjon 1.1.463.

Variablene som undersøkes nærmere er som følger og vil heretter refereres til som responsvariablene:

- Høyde

- Diameter
- Kronediameter
- Treantall
- Mortalitet

Først ble det beregnet deskriptiv statistikk for responsvariablene for å undersøke hvilke endringer som faktisk har skjedd. Videre ble det brukt *Generalized Linear Models* (GLM) for å prøve å forklare de observerte endringene.

2.7.2 Deskriptiv statistikk

Andel av hvert treslag ble regnet ut som det totale antall registrerte trær av et gitt treslag, relativt til det totale antallet registrerte trær.

Høydeklasseavhengig mortalitet ble beregnet som gjennomsnittet av den relative mortalitetsprosenten for alle lokaliteter i sin respektive høydeklasse. Det ble benyttet boksplokk for å illustrere variasjonen. Videre ble det beregnet relativ mortalitet for alle trær per lokalitet, hvor det samtidig illustreres hvilken høydeklasse de døde trærne tilhører.

For høydeklasseavhengige endringer er verdiene beregnet som et gjennomsnitt av endringer for alle trær i sin respektive høydeklasse over hele breddegradsgradienten, uavhengig av lokalitet. For høydeklasseuavhengige endringer er verdiene beregnet som et gjennomsnitt av alle trær på sin respektive lokalitet, uavhengig av høydeklasse. Det ble brukt lineær regresjon for å undersøke om det var en trend i endringer langs en sør-nord-gradient.

2.7.3 Valg av forklaringsvariabler

Forklaringsvariablene ble valgt gjennom en prosess som startet med at ble utført korrelasjonsanalyser for å avdekke sterk korrelasjon mellom aktuelle variabler (se Vedlegg). Her er det satt en grense for sterk korrelasjon på 0.7. Hvis noen variabler er meget sterkt korrelert indikerer det at de forklarer mye av det samme, og vi kan få en situasjon hvor de er med å skyve resultater i en retning uten at de er signifikante på egenhånd. Videre ble det gjennomført en screening hvor alle forklaringsvariablene ble benyttet og kjørt i GLM-modeller med forskjellige responsvariabler for å avdekke hvilke som oftest var signifikante. Der det var sterkt korrelerte forklaringsvariabler ble den som var oftest signifikant i screening-prosessen valgt. Etter at hele denne prosessen var gjennomført ble de gjeldende forklaringsvariablene:

- Oseanitet
- Bratthet
- Helningsretning
- Gjennomsnittlig temperatur vinter
- Gjennomsnittlig nedbør vinter
- Gjennomsnittlig temperatur sommer
- Gjennomsnittlig nedbør sommer
- Endring temperatur sommer
- Endring nedbør sommer

2.7.5 Modellering

For å undersøke endringer i høyde, diameter og kronediameter er det benyttet GLM som er en variant av lineær regresjon som tillater at responsvariablene har en annen fordeling enn normalfordeling.

For mortalitet er det benyttet en GLM hvor det forventes at responsen er negativt binomisk fordelt. Denne kan brukes der det er telldata og det er en overdispersjon i dataene. Overdispersjon vil si at den observerte variansen er større enn det en vil forvente av tilsvarende teoretisk modell.

For alle GLM, også negativ binomiell GLM, er det utført en steg-funksjon hvor utgangspunktet er å starte med alle forklaringsvariablene i en GLM (eller andre statistiske modeller) for at den så fjerner én og én forklaringsvariabel etter å ha sammenliknet Aikake information criterion (AIC) for den inneværende og den forrige modellen. Så lenge AIC er lavere ved den inneværende modellen, vil den igjen fjerne en forklaringsvariabel til den sitter igjen med modellen med lavest oppnåelig AIC ut ifra forutsetningene.

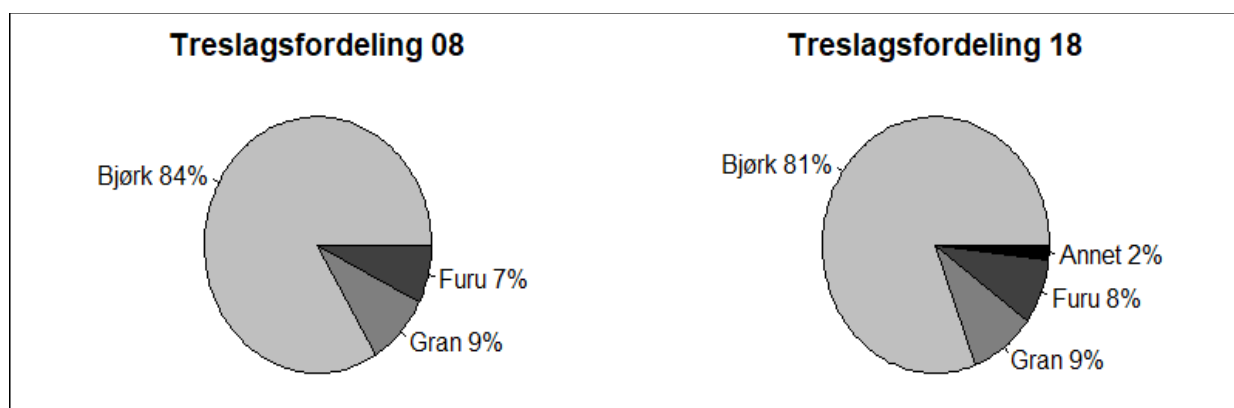
Forklaringsvariablene har blitt ansett som statistisk signifikante ved p-verdier lavere eller lik 0,05.

3 Resultater

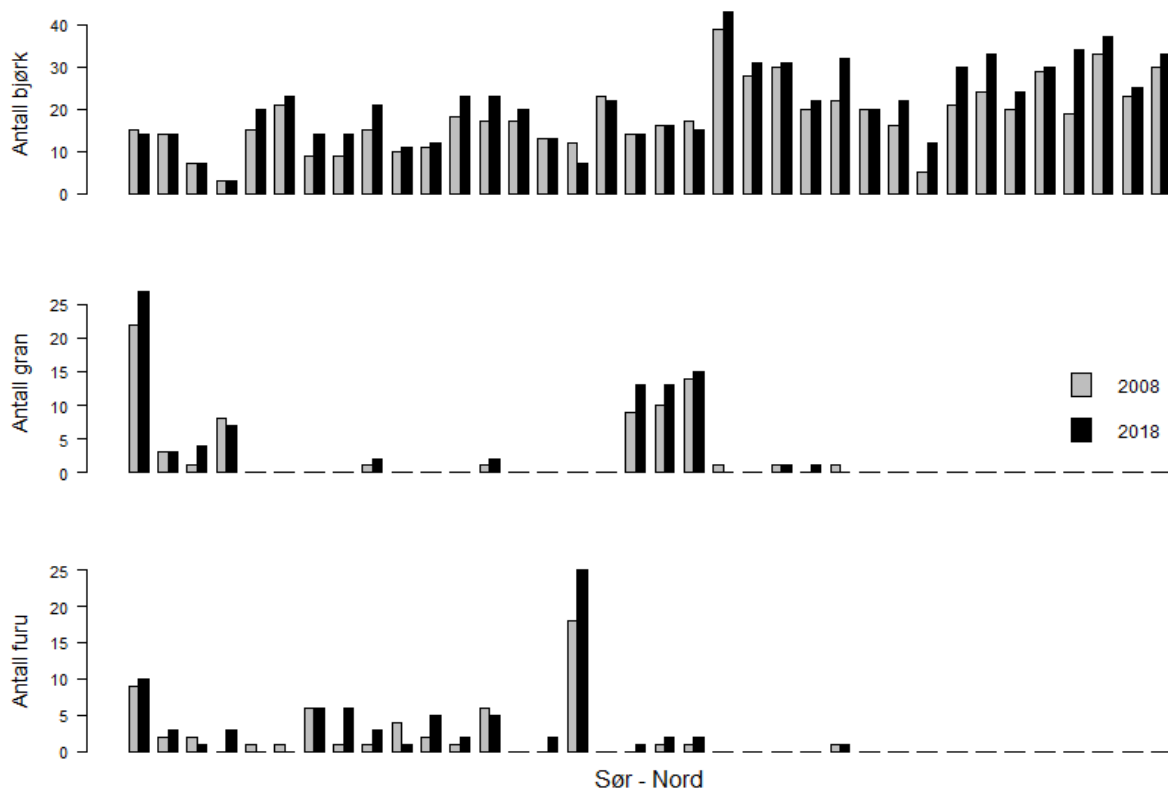
3.1 Treslag/Treantall

3.1.1 Treslagsfordeling

Totalt var det 784 trær som ble registrert i 2008. Av disse var 655 bjørk, 72 gran og 57 furu. Totalt 71 av disse trærne hadde dødd innen 2018. I 2018 hadde det totale antallet trær økt til 949, og antallet bjørk hadde økt til 765, gran hadde økt til 88 og furu hadde økt til 78. I tillegg har det i 2018 blitt registrert 13 rogn og 5 osp, i figur 3 er disse samlet i kategorien «Annet». Det kommer frem at andelen bjørk har blitt redusert med cirka 3%, og andelen furu og «Annet» har økt med cirka 1% og 2% henholdsvis. Figur 4 viser fordeling av de treslagene bjørk, gran og furu, i henholdsvis 2008 og 2018. Det er endring i antall registrerte trær, som oftest økning, på lokalitetene, men ingen tydelig endring i hvor man finner de forskjellige treslagene.



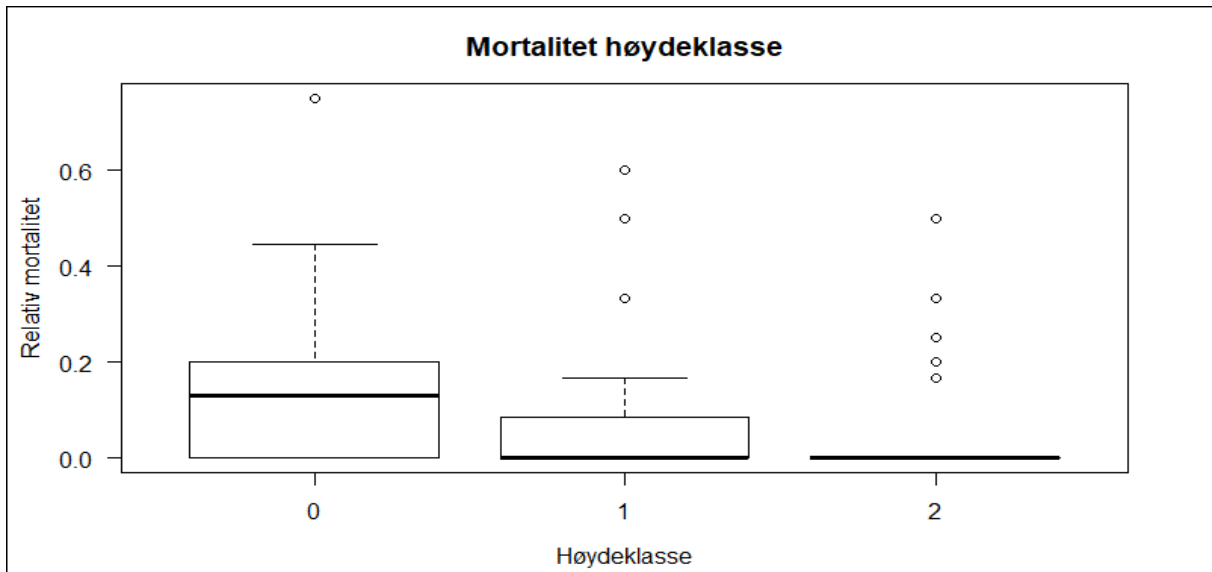
Figur 3: Endring i treslagsfordeling for alle trær mellom 2008 og 2018.



Figur 4: Fordeling av registrerte bjørk, gran og furu på alle de forskjellige lokalitetene i 2008 og 2018.

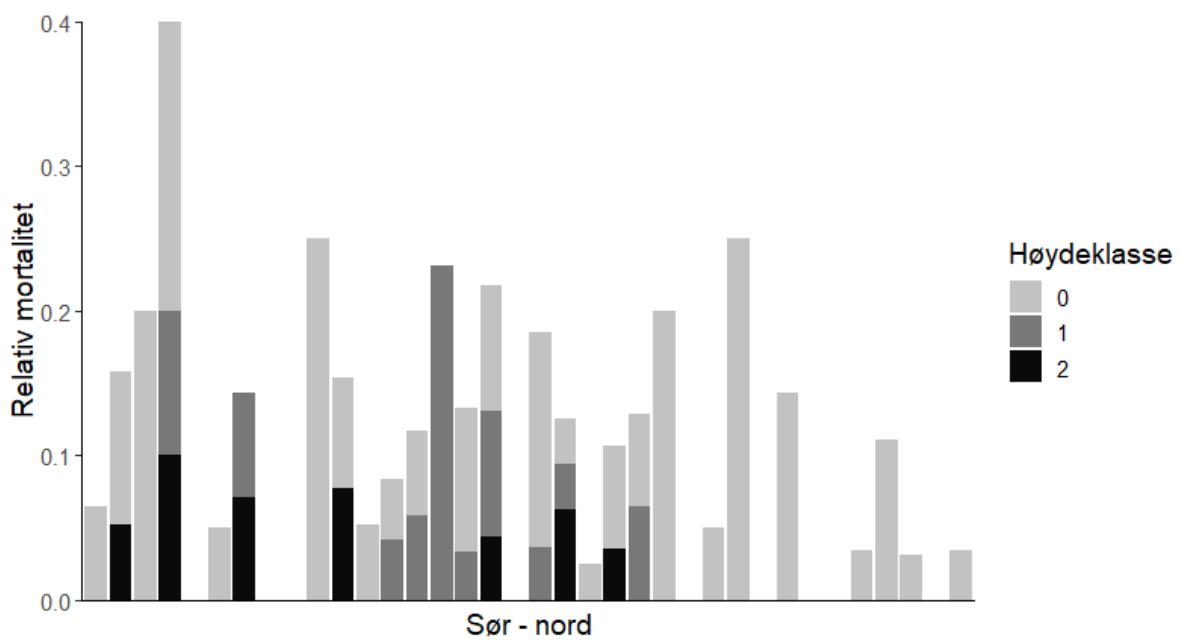
3.1.2 Mortalitet

Det er en større relativ andel av trær i høydeklasse 0 som døde i løpet av observasjonsperioden, enn i høydeklasse 1 og høydeklasse 2 (Figur 5). Gjennomsnittlig høydeklasseavhengig mortalitet er beregnet til 14.6% for høydeklasse 0, 7.4% for høydeklasse 1 og 7% for høydeklasse 2. Lokalitetene med høyest mortalitet i de respektive høydeklassene har en relativ mortalitet på henholdsvis 75%, 60% og 50%.



Figur 5: Relativ mortalitet i høydeklasse 0, 1 og 2 per lokalitet.

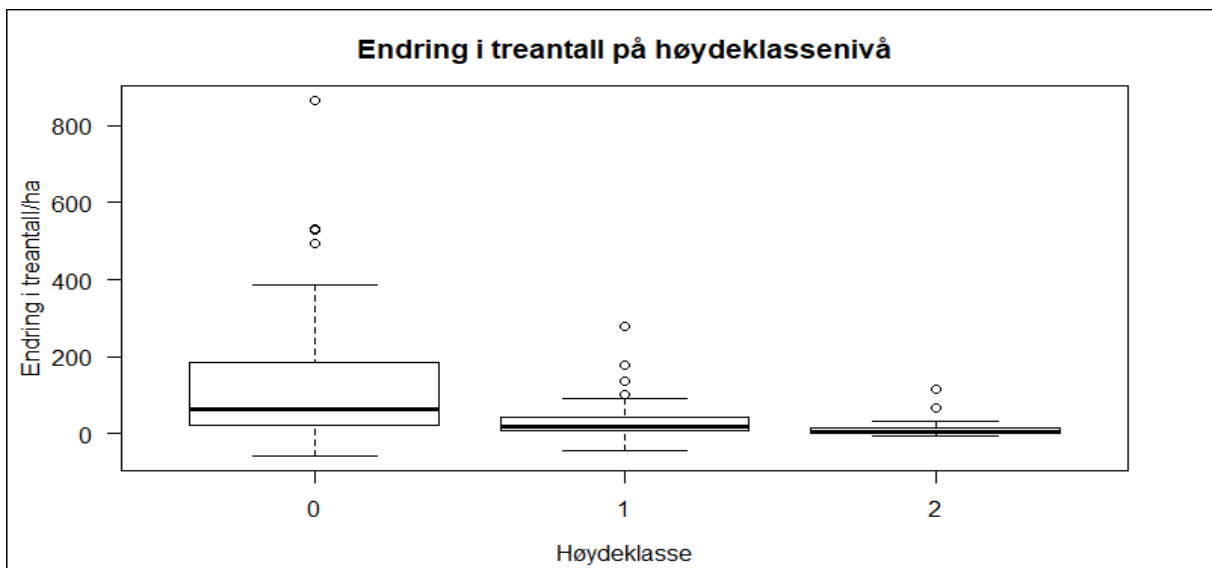
For alle lokalitetene sett under ett er det 9.6% av de registrerte trærne som har dødd i perioden. Figur 6 viser den relative mortaliteten på de forskjellige lokalitetene fordelt på de ulike høydeklassene. Det er en signifikant nedgang i relativ mortalitet når en går fra sør mot nord.



Figur 6: Relativ mortalitet for alle målte trær på de individuelle lokalitetene totalt og fordelt på høydeklasse.

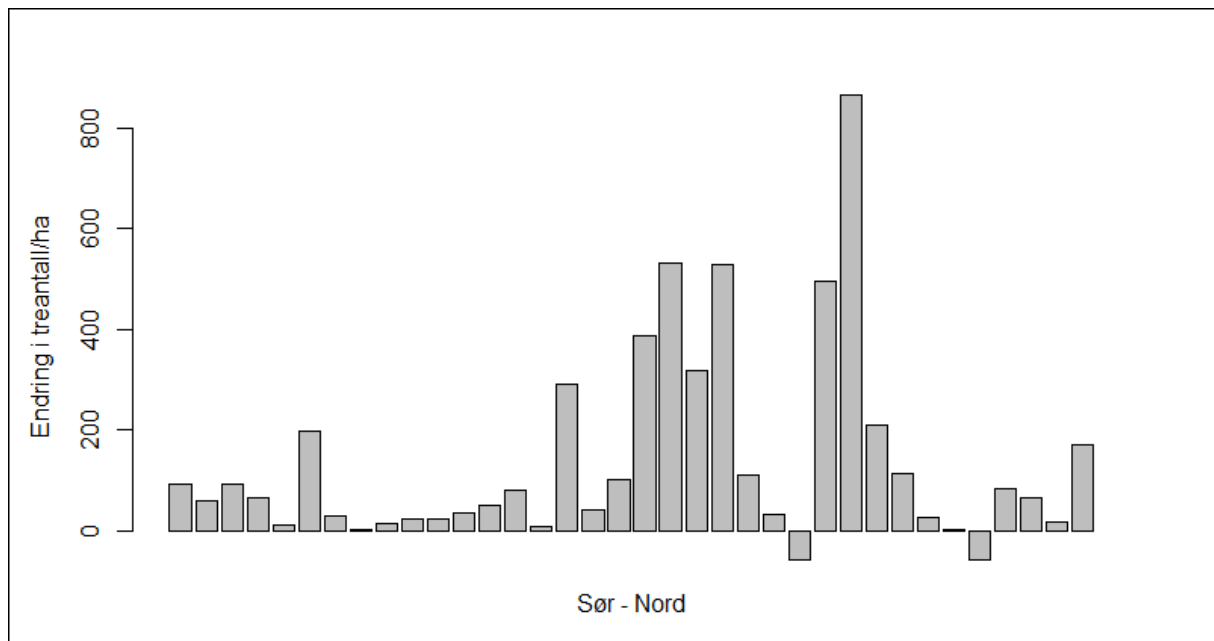
3.1.2 Endring i treantall

For høydeklasse 0, 1 og 2 var gjennomsnittsendringen per lokalitet en økning på 140 trær/ha, 39 trær/ha og 12 trær/ha (Figur 7). Figur 7 viser en tydelig trend til at endringen er større, jo lavere høydeklasse. Resultatene viste også at treantallet var forholdsvis konstant over observasjonsperioden for høydeklasse 2. For høydeklasse 1 og høydeklasse 2, er estimatet basert på trær som har vokst seg inn i en høyere høydeklasse og som nå er nærmere enn det tidligere nærmeste treet i sin respektive kvadrant.



Figur 7: Rekruttering av treantall/ha i hver høydeklasse av høydeklassene 0,1 og 2.

Lokaliteten med størst negativ endring i estimert treantall i høydeklasse 0 var -58.25 trær/ha, lokaliteten med høyest positiv endring var 866 trær/ha. Figur 8 viser forskjell i estimert treantall i høydeklasse 0 i 2008 og 2018, og gir således en indikasjon på rekruttering, det vil si nye trær som har etablert seg på prøveflatene i årene mellom 2008 og 2018.

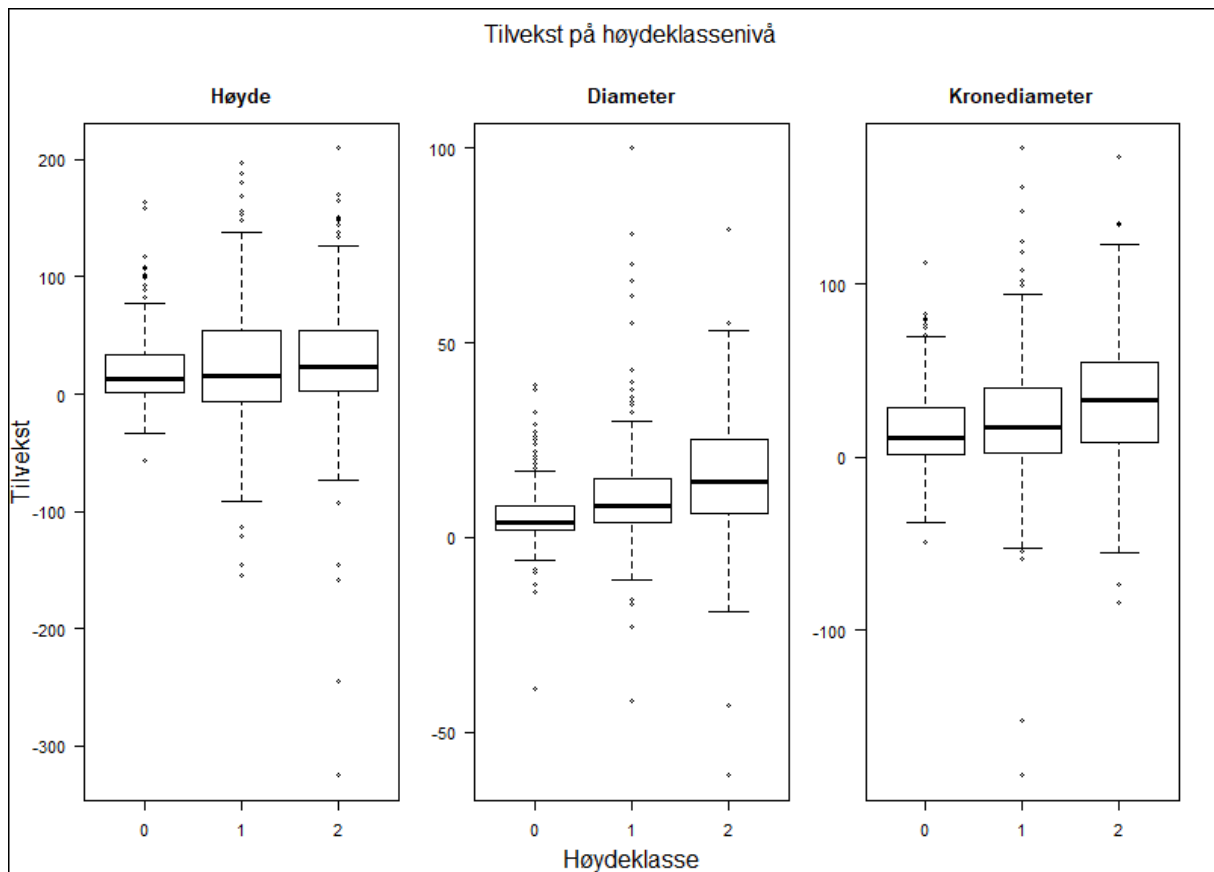


Figur 8: Rekruttering i høydeklasse 0 på de individuelle lokalitetene

3.2 Endring i høyde, diameter og kronediameter

3.2.1 Endring på høydeklassenivå

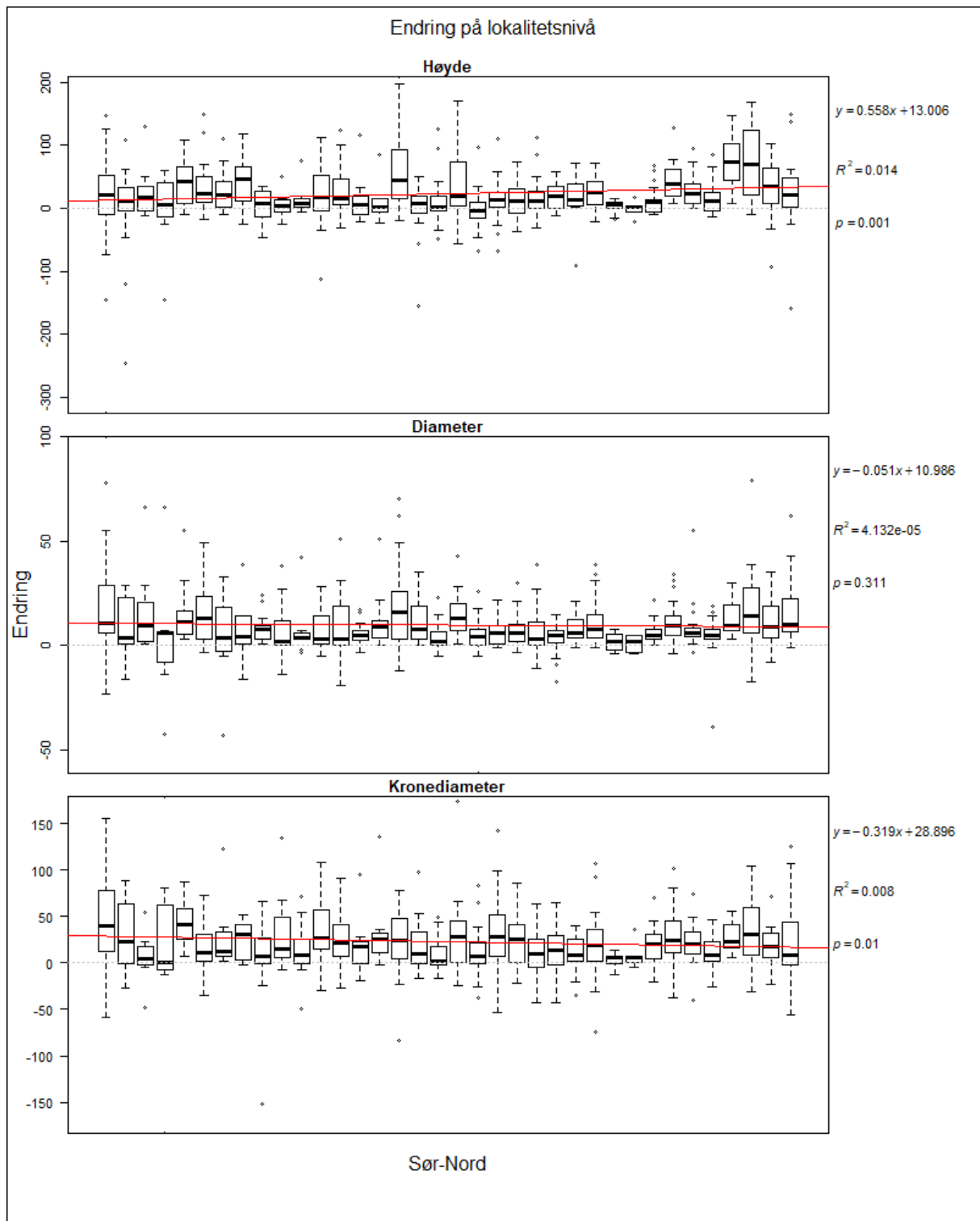
For høydeklasse 0, 1 og 2 var gjennomsnittlig høydeendring henholdsvis 20.1 cm, 25.3 cm og 29.3 cm (Figur 9). Gjennomsnittlig diameterendring til de respektive klassene var henholdsvis 5.7 mm, 11.4 mm og 15.7 mm. Gjennomsnittlig kronediameterendring var på 16.4 cm, 21.7 cm og 35.4 cm. For høydeendring var variasjonen rundt gjennomsnittet størst i høydeklasse 1, for diameter og kronediameter var den størst i høydeklasse 2. Det er for alle kategoriene en større gjennomsnittlig endring når en går opp i høydeklasse.



Figur 9: Høydetilvekst (cm), diametertilvekst (mm) og kronediametertilvekst for alle trær, fordelt på høydeklasse 0, 1 og 2

3.2.2 Endring på lokalitetsnivå

Den gjennomsnittlige høydeendringen for alle trær sett under ett var en økning på 23.99 cm, og det er en signifikant økning når en går fra sør mot nord (Figur 10). Gjennomsnittlig endring i diameter for alle trær var en økning på 9.9 mm. Endring i kronediameter for alle trær var en gjennomsnittlig økning på 21.1 cm, og det er en signifikant reduksjon i økningen når en går fra sør mot nord.



Figur 10: Høydeendring (cm), diameterendring (mm) og kronediameterendring for alle trær, fordelt på lokalitet. Den røde linjen viser trend.

3.3 Modeller

3.3.1 Endring - høyde

For alle trær sett under ett er det en negativ sammenheng av sommernedbør og -temperatur på høydeendringen (Tabell 1). Det indikerer at mer nedbør og økte temperaturer på sommeren vil gi en mindre endring i høyde. For oseanitet er det en positiv sammenheng med høydeendring.

Tabell 1: Resultat fra GLM med alle trær som datagrunnlag og høyde som responsvariabel. Antall stjerner angir signifikansnivå (*=0.05, **=0.01).

Høyde	Alle trær
Intercept	119.118 **
Nedbør sommer	-7.703 *
Temperatur sommer	-12.546 *
Oseanitet	13.031 *
AIC	316.91

3.3.2 Endring diameter

Økt sommertemperatur har en signifikant negativ sammenheng med endring i diameter (Tabell 2).

Tabell 2: Resultat fra GLM med alle trær og høydeklasse 0, 1 og 2 som datagrunnlag og diameter som responsvariabel. Antall stjerner angir signifikansnivå (*=0.05, **=0.01).

Diameter	Alle trær
Intercept	28.164 **
Temperatur sommer	-2.922 *
Oseanitet	2.632 ·
Endring sommertemperatur	8.274 ·
AIC	217.27

3.3.3 Endring – kronediameter

Det er ikke funnet signifikante sammenhenger i modelleringen for endring i kronediameter (Tabell 3).

Tabell 3: Resultat fra GLM med alle trær og høydeklasse 0, 1 og 2 som datagrunnlag og kronediameter som responsvariabel.

Kronediameter	Alle trær
Intercept	30.635 ***
Endring sommertemp.	12.467 ·
Nedbør vinter	-1.621 ·
AIC	270.56

3.3.4 Mortalitet

Modelleringen viser at både sommertemperatur og oseanitet har en positiv sammenheng med mortalitet (Tabell 4). Derimot er sammenhengen mellom vinternedbør og mortalitet negativ.

Tabell 4: Resultat fra GLM med alle trær og høydeklasse 0, 1 og 2 som datagrunnlag og kronediameter som responsvariabel.

Mortalitet	Alle trær
Intercept	-3.946 *
Temperatur sommer	0.477 *
Nedbør vinter	-0.318 **
Bratthet	0.057 ·
Oseanitet	0.419 *
AIC	131.8

4 Diskusjon

4.1 Endringer i treantall

Som forventet hadde det totale antallet registrerte trær økt fra 2008 til 2018 (Figur 4). Da det i henhold til den daværende instruksen ikke ble registrert osp og rogn i 2008 kan man ikke si noe om hvorvidt de var kandidater for registrering på dette tidspunktet. Dette kombinert med at de øvrige endringene er såpass små kan man ikke si med sikkerhet at det er noen tydelig trend på endring av treslagsfordeling (Figur 3).

Når det gjelder hvor de forskjellige treslagene finnes i geografisk utstrekning er det kun ett tilfelle hvor det er registrert gran på en lokalitet som det ikke tidligere var gran. For furu gjelder dette tre lokaliteter (Figur 4). I Sverige er det funnet tendenser til at furu beveger seg mer inn på tidligere bjørkedominerte områder (Kullman 2014), men at slike endringer vil foregå sakte over tid forutsatt at den globale oppvarmingen fortsetter. Bjørk er derimot registrert på alle lokaliteter både i 2008 og 2018 og generelt er det mest økning i bjørk. Dette vises ved at antallet registrerte gran og furu er mye mindre og den relative andelen er forholdsvis lite forandret. Grana har opprinnelig innvandret fra Russland i øst og er vel etablert i store deler av Norge, men den er ikke naturlig hjemmehørende på store deler av Vestlandet og nord for Saltfjellet (Tollefsrud et al. 2008). Selv om slike endringer tar lang tid er det er mulig at det over tid kan komme endringer forhold til dagens utbredelse og at den vil etablere seg på disse områdene.

Det er størst variasjon i estimatene for endring i treantall i høydeklasse 0, og det er kun to lokaliteter med negativ endring (Figur 8). Dette kan tyde på at det generelt er en økning av antall små trær (høydeklasse 0) i tregrensa i Norge. Det er derimot også viktig å ta høyde for at en økning i antall små trær ikke nødvendigvis er sidestilt med at tregrensen går opp i elevasjon. Det er nødvendig at det rekrutteres trær lengre opp i økotonen og at disse overlever til å bli voksne trær for at tregrensen skal bevege seg oppover mot fjellet (Körner 2012). Men en litteratursammenstilling gjennomført av (Harsch et al. 2009) viste at bare ifølge 52% av studiene beveget tregrensen seg opp i elevasjon. Ifølge (Dalen & Hofgaard 2005) er det også regionale forskjeller i Norge når det kommer til endring av tregrensens elevasjon. De fant ut at det er en stillstand eller progresjon mot alpine områder i sør- og midt-Norge, og en svak resesjon blant 2 meter høye trær i nord.

Det må også tas høyde for at det er en arealbasert sannsynlighetsfaktor for registrering når det kommer til estimatene for treantall. Når kun det nærmeste treet i en kvadrant blir registrert vil

det det være stor forskjell i tilgjengelig areal om det tidligere treet var eksempelvis fem meter eller 15 meter fra sentrum. Videre er det slik at om et tre som var to meter fra sentrum har avgått, og det nåværende nærmeste treet er 20 meter unna, vil det påvirke estimatet for treantall i negativ retning. Dette fordi denne verdien regnes ut fra gjennomsnittsavstand til sentrum på alle kvadrantene og prøveflatene på en gitt lokalitet. Det vil da også være slik at én, eller flere, slike situasjoner vil få større utslag for en lokalitet med to prøveflater enn én med fire da det vil være færre verdier å dele gjennomsnittet på. Dette kan føre til en del usikkerhet i estimatene, spesielt der det er færre flater og få trær. På den andre siden er de beregnede endringene gjort med likt utgangspunkt for en gitt lokalitet i 2008 og 2018. Det kan derfor likevel være slik at dette kan gi gode indikasjoner på faktiske endringer i treantall på lokalitetene. Det at den relative mortaliteten er høyere i lavere høydeklasser og at den estimerte endringen i treantall er lavere men positiv i høyere høydeklasser indikerer at det er få, men flere, godt tilpassede trær som vokser til å bli over to meter.

4.2 Endring i høyde

Høydeveksten øker med høydeklasse (Figur 9). Samtidig er det en signifikant trend for større gjennomsnittlig høydeendring fra sør mot nord (Figur 10). Khutornoi har funnet at for bartrær i tregrensen kan stammetykkelsen i rothalsen som produseres for å støtte 1 meter høyde, være opptil dobbelt så tykk som i vanlig skog (Körner 2012). Dette betyr ikke at diametertykkelsen i rothalsen nødvendigvis vokser fortere, men heller at høydeveksten blir redusert. Når en da tar høyde for fraværet av bartrær i nord kan dette være med på å forklare noe av denne trenden.

Det er en negativ sammenheng mellom endring i høyde og økt sommertemperatur (Tabell 1). Dette står i kontrast til tidligere funn som vektlegger temperatur som en begrensende faktor for vekst (Körner & Paulsen 2004). På den annen side kan økt temperatur tidlig om sommeren føre til tidligere blomstring (Weijers et al. 2018). En konsekvens av dette er at det myke vevet kan bli sårbart for sene frosthendelser som igjen kan resultere i redusert vekst. (Compostella & Caccianiga 2017) viste at påvirkningen av temperatur i tregrensen kom til forskjellige uttrykk innenfor et relativt begrenset område. De fant både brå og gradvise tregrenser som var både stillestående og framskredne, under sammenliknbare temperaturregimer. Alt dette tyder på at rollen temperaturen spiller for høydeveksten er kompleks og også henger sammen med andre faktorer.

En negativ sammenheng finnes også mellom høydeendring og økt sommernedbør (Tabell 1). Her kan beiting være en faktor som potensielt spiller en dobbelt rolle (Herrero et al. 2016). De har funnet at selv om økt nedbør kan gi økt vekst, kan det samtidig føre til økte populasjoner av klovdyr som da beiter mer og følgelig gir en negativ effekt på trærnes vekst på bakgrunn av defoliering. Videre kan økt nedbør og temperatur potensielt ha en større positiv effekt for andre arter enn trær, med en påfølgende negativ konsekvens i form av økt konkurranse (Okano & Bret-Harte 2015). Modellen indikerer at trærne har en større positiv endring i høyde med økt avstand fra hav. Dette sammenfaller da med de øvrige resultatene i modelleringen for høyde, da mer nedbør tilsynelatende har en negativ effekt på høydeveksten.

Negative endringsverdier for høyde kan til dels forklares med registreringsmetoden. Høyden ble målt vertikalt fra der roten går ned i bakken til det høyeste punktet på treet med grønne blader/nåler. Dette betyr at i tilfeller med toppbrekk eller defoliering kan man få negative vekstverdier. Man kan også få negative verdier dersom et tre har en stamme med en veldig skrå helning. Da kan det oppstå en situasjon hvor det egentlig er en positiv endring i treet lengdetilvekst, men hvor treet samtidig tynges ned av at den ekstra vekten slik at de øverste grønne bladene er lavere i 2008 enn 2018.

4.3 Endring i diameter

Endringen i diameter er også større for større trær (Figur 9). Men her er det ikke funnet noen signifikant trend for endring langs breddegradsgradienten (Figur 10). I modelleringen for endring i diameter er det funnet en negativ sammenheng med sommertemperatur (Tabell 2). En studie fra permafrostsonen i Sibir har vist at frem til 1970 var det en jevn diametertilvekst hos trærne, men med økt oppvarming av områdene gikk denne økningen ned (Kharuk et al. 2019). Sammenhengen i dette tilfellet var at den økte temperaturen førte til endringer i vanntilgjengeligheten med vannstress som konsekvens. Dette kan også være tilfellet for noen områder i tregrensen. (de Andres et al. 2015) har derimot funnet at lavere enn optimale temperaturer har en begrensende effekt på diametertilvekst hos trær i tregrensen. Modeller er også utviklet for å predikere diametertilvekst hos furu i tregrensen frem til år 2100, hvor disse antyder at det kommer til å være en moderat vekst hos trær i tregrensen (Matias et al. 2017). Det er nærliggende å anta at det kommer til å fortsette med varierende tilvekstmønster på de forskjellige lokalitetene i denne studien da den favner over et bredt spekter av biotiske og abiotiske variasjoner på de forskjellige lokalitetene.

Diametermålingene er gjort ved rothalsen og der det er mulig ble den målt med klaven inn mot sentrum av prøveflaten. Det er dog en del trær hvor det kan være problematisk å få til dette. Noen trær har for eksempel doble stammer, krokete rothals etc. Dette kan ha ført til litt forskjellig måleposisjon og/eller måleretning på stammen i 2008 og 2018. I tregrensen kan det potensielt kan gå flere år hvor trærne vokser med en ringbredde på 0.1 mm (Paulsen et al. 2000). Dette kan da være med å øke sannsynligheten for feilmålinger når målegrunnlaget er på en såpass liten skala og måleutstyret er forholdsvis grovt.

4.4 Endring i kronediameter

Økning i kronediameter følger den samme trenden som for høyde og diameter, med større økning for større trær (Figur 9). I motsetning til høydeendringene er det en signifikant reduksjon i økningen fra sør mot nord (Figur 10). Det er lav forklaringsgrad for endringer i kronediameter (Tabell 3). Det virker også å være lite litteratur på hva som forårsaker endringer i kronens utbredelse for trær i tregrensen, da fokuset i forskningen virker å helle mer mot å forklare diameter- og høydeendringer. Et toårig eksperiment i Kina viste at økt temperatur og mer CO₂ i atmosfæren førte til økt vekst i kronen (Hou et al. 2010). Denne veksten kan dog forbli oversett dersom en ikke samtidig tar andre faktorer i betraktning. Det er for eksempel funnet at for gran kan vind føre til irregulære kroneform (Kaspar et al. 2017).

For endring i kronediameter er knekte greiner og defoliering hovedgrunnene til negative verdier. Defoliering kan være en konsekvens av biotiske faktorer som insektangrep eller beiting (Hauck et al. 2008; Herrero et al. 2016). Med økte temperaturer er det en risiko for økte insektangrep fra insekter som vanligvis holder til ved lavere elevasjoner. Dette kan føre til alt fra en liten reduksjon i kronen til et tre, til massive skader over store områder hvis angrepet blir stort nok (Davis & Frontz 2003). En liten reduksjon i krone vil ikke være nok for at et tre vil dø, tendensen er at de er helt friske året etter igjen (Hauck et al. 2008). Å kvantifisere effekten av insektangrep vil være viktig i forhold til å kunne estimere endringer i tregrensen i fremtiden. Beiting er en faktor som kan påvirke på to måter. Hvis det blir en reduksjon i antall beitende dyr i et område vil man få en potensielt få en økning i trærnes vekst, på motsatt side kan det bli økt defoliering hvis det blir flere beitende dyr. Det er altså veldig mye som kan påvirke endringer i kronen til et tre i tregrensen og mer forskning er essensielt for å kunne forstå og forklare hvorfor de forekommer.

4.5 Mortalitet

Mortaliteten er høyest for trærne i høydeklasse 0, vesentlig mindre i høydeklasse 1 og lite i høydeklasse 2 (Figur 5). Dette sammenfaller med den generelle enigheten om at for alle planter er det størst risiko for å dø når de er på et tidlig livsstadium (Körner 2012). Når trærne er små er konkurranse et viktig aspekt. (Zhang et al. 2009) viste at enkelte arter kan ha en negativ effekt for tilstedeværelsen av spesifikke trær, og det er nærliggende å anta at flere slike sammenhenger finnes. Tidligere modelleringer har vist at mortaliteten for små trær har sammenheng med mangel på tilgjengelig vann (Simeone et al. 2019). Men det er modelleringen ikke funnet noen sammenheng mellom mortalitet og nedbør.

Figur 6 viser fordelingen av relativ mortalitet i hver høydeklasse fordelt på det totale registrerte treantallet på de forskjellige lokalitetene. Det er interessant at det ikke er noen trær i høydeklasse 1 og 2 som har dødd nord for Trofors. Av trærne som har dødd i høydeklasse 1 og 2 lenger sør finner vi både bjørk, furu og gran. Det er en signifikant reduksjon i relativ mortalitet blant de målt trærne i en sør-nord-gradient med en signifikans på $P < 0.05$. Oseanitet har en positiv sammenheng med mortalitet. Dette indikerer at det er flere trær som dør når avstanden til havet øker, noe som også bekreftes av datagrunnlaget. En grunn til dette kan være at klimaet ved havet generelt er mildere og våtere og følgelig kan gi utslag i form av redusert fare for eksempelvis uttørking (Lett & Dorrepaal 2018).

Modellen indikerer at når det blir varmere er det flere trær som dør (Tabell 4). Når den gjennomsnittlige temperaturen øker over tid er det også fare for ekstreme perioder som har er vesentlig varmere enn vanlig da temperaturer kan avvike stort fra generelle trender (Easterling et al. 2000). Slike perioder kan være med på å øke faren for tørkestress og uttørking av særlig små planter (Galiano et al. 2011). Et annet aspekt er hvor fort det blir varmere. Noen konkurrerende arter kan også ha en større fordel av økt temperatur enn trærne, da spesielt de små, slik at noe av næringsgrunnlaget kan bli borte eller redusert (Moen et al. 2008).

Vinternedbør har derimot en negativ sammenheng med mortaliteten. Med andre ord vil det si at når det er mer snø så er det færre trær som dør. Dette gir mening da et snødekke gir beskyttelse mot vind, og når man vet at det under snøen er mer stabile temperaturer, vil det samtidig gi beskyttelse mot frostskafer og frosttørke (Germino et al. 2002). Frosttørke forekommer der trærne er eksponert for sterkt sollys sent på vinteren. Dette kan føre til avnåling eller bladtap (Körner 2012), noe som er aktuelt for unge trær som er av en størrelse hvor de er høyere enn snølaget på en gitt plass, men det er aldri observert slike skader på voksne trær. For store trær

er det derimot en risiko forbundet med store nedbørsmengder om vinteren, gjerne i kombinasjon med sterk vind. Dette vil føre til en økt fare for toppbrekk, en fare som er ekstra høy i tregrensen sammenliknet med andre steder (Jalkanen & Konopka 1998). De kvantifiserte risikoen for snøbrekk og fant ut at furu hadde høyest risiko, etterfulgt av gran og at bjørk hadde minst risiko av de tre. Når en da tar den reduserte andelen bartrær i nord i betraktning vil dette kunne være med på å forklare den synkende trenden av døde store trær mot nord.

5 Oppsummering og konklusjon

Som forventet ble det funnet en økning i treantall i tregrenseøkotonen (H1). Denne økningen gjelder da for alle høydeklasser. Når det kommer til endring i treantall er det riktignok en sannsynlighetsfaktor det må tas høyde for. Da utregningen for å estimere treantall baserer seg på gjennomsnittlig avstand til sentrum av prøveflatene, vil det være slik at steder med trær som allerede er registrert nærme sentrum vil ha en lavere sannsynlighet for at nye trær vil etablere seg mellom det eksisterende treet og flatens sentrum. Slik kan man potensielt få en situasjon hvor prøveflater hvor det faktisk har vært mye rekruttering ikke blir fanget opp, og andre prøveflater hvor det tidligere var registrert få trær som var langt fra sentrum får en markant økning i estimert treantall ved at nye trær har et mye større areal å etablere seg på uten at dette reflekterer den reelle endringen i treantall. Det store antallet prøveflater (114) kan på tross av dette ha vært med på å jevne ut konsekvensene av slike forhold, slik at den beregnede økningen i treantall kan antas å være en god estimator på at en økning i treantall faktisk har funnet sted.

Videre viste resultatene at klimatiske faktorer som temperatur og nedbør hadde en sammenheng med endringene i trærnes vekst og mortalitet. Dette støttet opp under forventningen i H2 og H3. Samtidig er det knyttet en del usikkerhet til noen av variablene som er benyttet. Klimadataene er interpolert fra nærmeste fysiske målestasjon, hvor avstanden til denne kan variere i større eller mindre grad. Gitt dette vil det sannsynligvis være avvik fra estimatene brukt i denne analysen og de faktiske forhold. Slike forhold kan ha stor eller liten innvirkning på resultatene avhengig størrelse og om feilene er systematiske eller tilfeldige.

Bratthet og helningsretning ser ut til å en svært lav forklaringsgrad i modelleringen da de ikke i noen av modellene viser seg signifikante. Dette står i kontrast til forventningene i H4 og H5, og er overraskende da flere studier antyder at faktorer som solinnstråling, fukt og konkurranse m.m. kan påvirke vekst, rekruttering og mortalitet forskjellig under forskjellige topografiske forhold (Dearborn & Danby 2017; Elliott & Cowell 2015; Salzer et al. 2014; Yirdaw et al. 2015; Zhao et al. 2013). Verdiene i denne studien er gitt som en gjennomsnittlig verdi per lokalitet. Det er mulig at dette er på en for grov skala og at man heller bør gå ned på et mer detaljert nivå da det kan være store forskjeller mellom helningsretningen og brattheten på selve lokaliteten og forholdene for de individuelle prøveflatene eller trærne.

Målingene til denne studien er utført med et tidsspenn på ti år, dette er litt kort tid da forandringer i tregrensen kan ta lang tid da det er helt i tålegrensen for hvor trær kan leve og

vokse (Körner 2012). På den andre siden er det målt et stort antall trær på mange lokaliteter over en lang breddegradsgradient. Dette vil være med på jevne ut og redusere støy i datagrunnlaget. Følgelig er dette et godt utgangspunkt for å observere endringer over tid, spesielt om disse skulle blitt etablert som permanente prøveflater. Under feltarbeidet i 2018 ble det også hengt ut temperaturmålere som vil måle temperatur på alle lokalitetene. Dette vil gi kunne innspill på hvor store eventuelle feilmarginene er for de interpolerte dataene fra meteorologisk institutt.

Resultatene av denne studien indikerer at det er en økning i treantall og trærnes vekst i tregrenseøkotonen, og har gitt innblikk i hvilke faktorer som påvirker dette og hvordan de påvirker. Det anbefales å benytte seg av disse prøveflatene i fremtidig forskning til å observere endringene over en lengre tidsperiode, og gjennomføre nye mer detaljerte analyser for slik å kunne bidra til å øke forståelsen av hvilke endringer som forekommer i tregrenseøkotonen, og hvorfor, både i Norge og globalt.

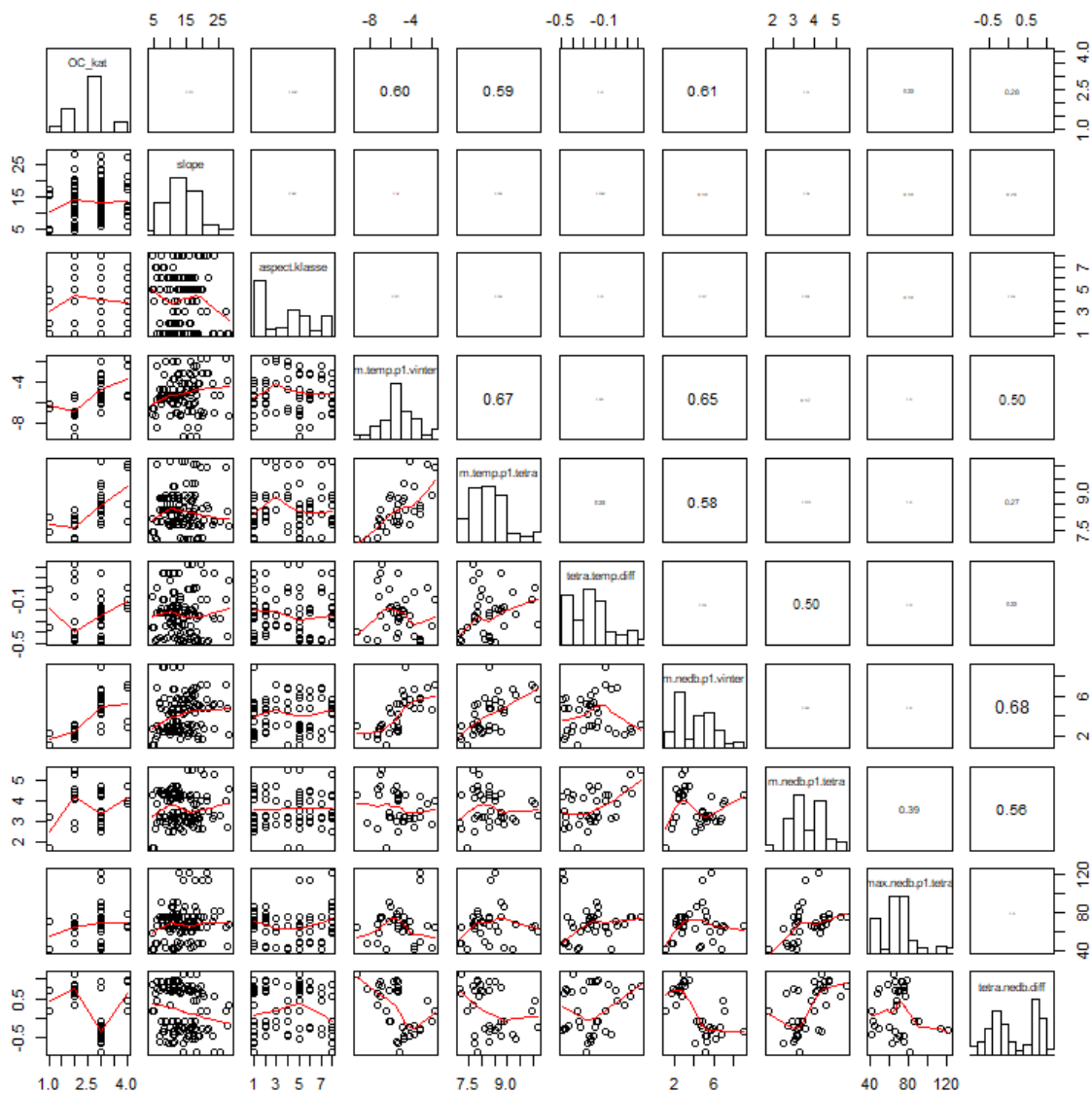
6. Litteratur

- Birks, H. H. (2015). South to north: Contrasting late-glacial and early-Holocene climate changes and vegetation responses between south and north Norway. *Holocene*, 25 (1): 37-52.
- Bryn, A. & Potthoff, K. (2018). Elevational treeline and forest line dynamics in Norwegian mountain areas - a review. *Landscape Ecology*, 33 (8): 1225-1245.
- Compostella, C. & Caccianiga, M. (2017). A comparison between different treeline types shows contrasting responses to climate fluctuations. *Plant Biosystems*, 151 (3): 436-449.
- Cottam, G., Curtis, J. T. & Hale, B. W. (1953). Some Sampling Characteristics of a Population of Randomly Dispersed Individuals. *Ecology*, 34 (4): 741-757.
- Cui, J. N., Qin, J. H. & Sun, H. (2017). Population Spatial Dynamics of *Larix potaninii* in Alpine Treeline Ecotone in the Eastern Margin of the Tibetan Plateau, China. *Forests*, 8 (10): 17.
- Dalen, L. & Hofgaard, A. (2005). Differential regional treeline dynamics in the Scandes Mountains. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 37 (3): 284-296.
- Davis, D. D. & Frontz, T. M. (2003). Growth and mortality of bigtooth aspen trees stressed by defoliation. *13th Central Hardwood Forest Conference, Proceedings*, 234: 538-543.
- de Andres, E. G., Camarero, J. J. & Buntgen, U. (2015). Complex climate constraints of upper treeline formation in the Pyrenees. *Trees-Structure and Function*, 29 (3): 941-952.
- de Wit, H. A., Bryn, A., Hofgaard, A., Karstensen, J., Kvalevag, 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.
- Dearborn, K. D. & Danby, R. K. (2017). Aspect and slope influence plant community composition more than elevation across forest-tundra ecotones in subarctic Canada. *Journal of Vegetation Science*, 28 (3): 595-604.
- Easterling, D. R., Meehl, G. A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R. & Mearns, L. O. (2000). Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289 (5487): 2068-2074.
- Elliott, G. P. & Cowell, C. M. (2015). Slope aspect mediates fine-scale tree establishment patterns at upper treeline during wet and dry periods of the 20th century. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 47 (4): 681-692.
- Galiano, L., Martinez-Vilalta, J. & Lloret, F. (2011). Carbon reserves and canopy defoliation determine the recovery of Scots pine 4 yr after a drought episode. *New Phytologist*, 190 (3): 750-759.
- Gazol, A., Moiseev, P. & Camarero, J. J. (2017). Changes in plant taxonomic and functional diversity patterns following treeline advances in the South Urals. *Plant Ecology & Diversity*, 10 (4): 283-292.
- Germino, M. J., Smith, W. K. & Resor, A. C. (2002). Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecology*, 162 (2): 157-168.
- Harsch, M. A., Hulme, P. E., McGlone, M. S. & Duncan, R. P. (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12 (10): 1040-1049.
- Hauck, M., Dulamsuren, C. & Heimes, C. (2008). Effects of insect herbivory on the performance of *Larix sibirica* in a forest-steppe ecotone. *Environmental and Experimental Botany*, 62 (3): 351-356.
- Herrero, A., Almaraz, P., Zamora, R., Castro, J. & Hódar, J. A. (2016). From the individual to the landscape and back: time-varying effects of climate and herbivory on tree sapling growth at distribution limits. *Journal of Ecology*, 104 (2): 430-442.
- Hou, Y., Luo, Z. K., Jenerette, G. D., Qiao, Y. Z. & Wang, K. Y. (2010). EFFECTS OF ELEVATED CO₂ AND TEMPERATURE ON GROWTH AND MORPHOLOGY OF FIR (*ABIES FAXONIANA* REHD. ET WILS.) AND NATIVE HERBS IN A TREELINE ECOTONE: AN EXPERIMENTAL APPROACH. *Polish Journal of Ecology*, 58 (2): 311-322.
- Hufkens, K., Scheunders, P. & Ceulemans, R. (2009). Ecotones in vegetation ecology: methodologies and definitions revisited. *Ecological Research*, 24 (5): 977-986.

- Huntley, B., Long, A. J. & Allen, J. R. M. (2013). Spatio-temporal patterns in Lateglacial and Holocene vegetation and climate of Finnmark, northernmost Europe. *Quaternary Science Reviews*, 70: 158-175.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC. 151 s.
- Jalkanen, R. & Konopka, B. (1998). Snow-packing as a potential harmful factor on *Picea abies*, *Pinus sylvestris* and *Betula pubescens* at high altitude in northern Finland. *European Journal of Forest Pathology*, 28 (6): 373-382.
- Kaspar, J., Hosek, J. & Treml, V. (2017). How wind affects growth in treeline *Picea abies*. *Alpine Botany*, 127 (2): 109-120.
- Kharuk, V. I., Ranson, K. J., Petrov, I. A., Dvinskaya, M. L., Im, S. T. & Golyukov, A. S. (2019). Larch (*Larix dahurica* Turcz) growth response to climate change in the Siberian permafrost zone. *Regional Environmental Change*, 19 (1): 233-243.
- Korner, C. & Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31 (5): 713-732.
- Kullman, L. (1996). Norway spruce present in the Scandes Mountains, Sweden at 8000 BP: New light on holocene tree spread. *Global Ecology and Biogeography*, 5 (2): 94-101.
- Kullman, L. (2014). Treeline (*Pinus sylvestris*) landscape evolution in the Swedish Scandes - a 40-year demographic effort viewed in a broader temporal context. *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 68 (3): 155-167.
- Körner, C. (2012). ***Alpine Treelines: Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits***. 1 utg. Basel: Springer. XI, 220 s.
- Lett, S. & Dorrepaal, E. (2018). Global drivers of tree seedling establishment at alpine treelines in a changing climate. *Functional Ecology*, 32 (7): 1666-1680.
- Matias, L., Linares, J. C., Sanchez-Miranda, A. & Jump, A. S. (2017). Contrasting growth forecasts across the geographical range of Scots pine due to altitudinal and latitudinal differences in climatic sensitivity. *Global Change Biology*, 23 (10): 4106-4116.
- Moen, A. (1998). *Nasjonalatlas for Norge: Vegetasjon*. Hønefoss: Statens kartverk.
- Moen, J., Cairns, D. M. & Lafon, C. W. (2008). Factors structuring the treeline ecotone in Fennoscandia. *Plant Ecology & Diversity*, 1 (1): 77-87.
- Myers-Smith, I. H., Forbes, B. C., Wilkening, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., Tape, K. D., Macias-Fauria, M., Sass-Klaassen, U., Levesque, E., et al. (2011). Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities. *Environmental Research Letters*, 6 (4).
- NATIONS, F. A. A. O. O. T. U. (2016). *GLOBAL FOREST RESOURCES ASSESSMENT 2015*. Rome.
- Oberg, L. & Kullman, L. (2011). Ancient Subalpine Clonal Spruces (*Picea abies*): Sources of Postglacial Vegetation History in the Swedish Scandes. *Arctic*, 64 (2): 183-196.
- Okano, K. & Bret-Harte, M. S. (2015). Warming and neighbor removal affect white spruce seedling growth differently above and below treeline. *Springerplus*, 4: 14.
- Paulsen, J., Weber, U. M. & Korner, C. (2000). Tree growth near treeline: Abrupt or gradual reduction with altitude? *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 32 (1): 14-20.
- Salzer, M. W., Larson, E. R., Bunn, A. G. & Hughes, M. K. (2014). Changing climate response in near-treeline bristlecone pine with elevation and aspect. *Environmental Research Letters*, 9 (11): 8.
- Simeone, C., Maneta, M. P., Holden, Z. A., Sapes, G., Sala, A. & Dobrowski, S. Z. (2019). Coupled ecohydrology and plant hydraulics modeling predicts ponderosa pine seedling mortality and lower treeline in the US Northern Rocky Mountains. *New Phytologist*, 221 (4): 1814-1830.
- Singh, S. P. (2018). Research on Indian Himalayan Treeline Ecotone: an overview. *Tropical Ecology*, 59 (2): 163-176.
- Smith, S. J., Edmonds, J., Harlin, C. A., Mundra, A. & Calvin, K. (2015). Near-term acceleration in the rate of temperature change. *Nature Climate Change*, 5 (4): 333-336.
- Snl. (2018). *Tregrense*: Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/tregrense> (lest 29. april 2019).

- Thieme, N., Bollandas, O. M., Gobakken, T. & Naesset, 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.
- Tingstad, L., Olsen, S. L., Klanderud, K., Vandvik, V. & Ohlson, M. (2015). Temperature, precipitation and biotic interactions as determinants of tree seedling recruitment across the tree line ecotone. *Oecologia*, 179 (2): 599-608.
- Tollefsrud, M. M., Kissling, R., Gugerli, F., Johnsen, O., Skroppa, T., Cheddadi, R., van Der Knaap, W. O., Latalowa, M., Terhurne-Berson, R., Litt, T., et al. (2008). Genetic consequences of glacial survival and postglacial colonization in Norway spruce: combined analysis of mitochondrial DNA and fossil pollen. *Molecular Ecology*, 17 (18): 4134-4150.
- Warde, W. & Petranka, J. W. (1981). A CORRECTION FACTOR TABLE FOR MISSING POINT-CENTER QUARTER DATA. *Ecology*, 62 (2): 491-494.
- Weijers, S., Beckers, N. & Löffler, J. (2018). Recent spring warming limits near-treeline deciduous and evergreen alpine dwarf shrub growth. *Ecosphere*, 9 (6): 14.
- Yirdaw, E., Starr, M., Negash, M. & Yimer, F. (2015). Influence of topographic aspect on floristic diversity, structure and treeline of afro-montane cloud forests in the Bale Mountains, Ethiopia. *Journal of Forestry Research*, 26 (4): 919-931.
- Zhang, Q. Y., Zhang, Y. C., Peng, S. L., Yirdaw, E. & Wu, N. (2009). Spatial Structure of Alpine Trees in Mountain Baima Xueshan on the Southeast Tibetan Plateau. *Silva Fennica*, 43 (2): 197-208.
- Zhao, Z. J., Shen, G. Z., Tan, L. Y., Kang, D. W., Wang, M. J., Kang, W., Guo, W. X., Zeppel, M. J. B., Yu, Q. & Li, J. Q. (2013). Treeline dynamics in response to climate change in the Min Mountains, southwestern China. *Botanical Studies*, 54: 12.

Vedlegg



Figur 11: Parvis korrelasjonsplot mellom forklaringsvariablene: Oseanitet (OC_Kat), Bratthet (slope), Helningsretning (Aspect.klasse), Temperatur vinter (m.temp.p1.vinter), Temperatur sommer (m.temp.p1.tetra), Endring sommertemperatur (tetra.temp.diff), Nedbør vinter (m.nedb.p1.vinter), Nedbør sommer (m.nedb.p1.tetra), Maks nedbør sommer (max.nedb.p1.tetra) og Endring sommertemperatur (tetra.nedb.diff). De diagonale histogrammene viser frekvensfordelingen av de forskjellige forklaringsvariablene. Korrelasjonsplottene (under histogrammene) vis de forskjellige forklaringsvariablene plottet mot hverandre. Numrene i de øvre panelene er korrelasjonskoeffisienten mellom variablene hvor 1 er fullstendig korrelasjon og 0 er ingen korrelasjon.



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway