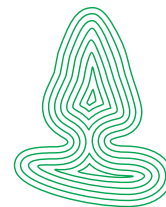


Rapport

fra Skog og landskap

22/2013



GRANTØRKEPROSJEKTET

skog+
landskap

NORSK INSTITUTT FOR
SKOG OG LANDSKAP

Sluttrapport

Svein Solberg¹, Kjell Andreassen¹, Clara Antón-Fernández¹, Isabella Børja¹, Jan Čermák⁵, Lise Dalsgaard¹, Lars Eklundh⁴, Monica Garcia⁴, Arthur Gessler³, Douglas Godbold⁷, Rainer Hentschel³, Zachary Kayler³, Palle Madsen², Nadezhda Nadezhdina⁵, Sabine Rosner⁷, Jan Světlík⁵, Mari Mette Tollefsrud¹, Ole Einar Tveito⁶, Bernt-Håvard Øyen¹.

¹Norsk institutt for skog og landskap, ²Københavns Universitet, ³Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung(ZALF), Tyskland, ⁴Lunds Universitet, ⁵Mendel University, ⁶Meteorologisk institutt, ⁷Universität für Bodenkultur (BOKU), Østerrike



GRANTØRKEPROSJEKTET

Sluttrapport

Svein Solberg¹, Kjell Andreassen¹, Clara Antón-Fernández¹, Isabella Børja¹, Jan Čermák⁵, Lise Dalsgaard¹, Lars Eklundh⁴, Monica Garcia⁴, Arthur Gessler³, Douglas Godbold⁷, Rainer Hentschel³, Zachary Kayler³, Palle Madsen², Nadezhda Nadezhdina⁵, Sabine Rosner⁷, Jan Švětlík⁵, Mari Mette Tollefsrud¹, Ole Einar Tveito⁶, Bernt-Håvard Øyen¹.

¹Norsk institutt for skog og landskap, ²Københavns Universitet, ³ Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Tyskland, ⁴ Lunds Universitet, ⁵Mendel University, ⁶Meteorologisk institutt, ⁷Universität für Bodenkultur (BOKU), Østerrike

ISBN: 978-82- 311-0205-2

ISSN: 1891-7933

Omslagsfoto: Fremtidsutsikten for gran i lavlandet på Østlandet er ikke så bekymringsfull som først antatt. Foto: Arne Steffenrem, Skog og landskap

FORORD

Grantørke er stedvis et plagsomt problem. Enkelte veksterlige bestand i hkl 3-4 på høy bonitet rammes av toppskranting, gulning av baret og avdøing. Disse skadene har vært bakgrunnen for grantørke-prosjektet. Dette av 2 grunner. Årsaken til skadene har aldri vært helt klarlagt, og det har vært en bekymring for at disse skadene er en forsmak på hva vi har i vente med klimaendringer for gran i den sørligste delen av landet.

Ås, desember 2013

Svein Solberg

SAMMENDRAG

Grantørkeprosjektet har fokusert på tørkeproblemer på gran i lavlandet på Østlandet. Toppskranting og avdøying har forekommet på enkelte lokaliteter i veksterlige granbestand i hkl 3-4. Gjentatte befaringer av slike skader gjennom de siste 20-25 år har tydet på at tørke er hovedårsaken, men at det er komplekse årsaksforhold. Det har vært et hovedmål i prosjektet å stille en diagnose på disse skadene. Videre har prosjektet fokusert på klimaendringene og risikoen for at tørkeskader på gran kan øke over tid. Endelig har prosjektet også tilrettelagt for en diskusjon mellom forskning, forvaltning og praktiskere om skogbehandling og alternativer til konvensjonell skogbehandling med gran for å møte klimaendringene.

Toppskrantingen som ble undersøkt i dette prosjektet hadde de samme symptomer som observert i mange tidligere befaringer, dvs. misfarging og avdøying av topper og gradvis forverring av skadene nedover i krona, etterfulgt av avdøying av hele trær. Resultatene bekrefter at tørkestress om sommeren har vært utløsende faktor for skadene, og at de undersøkte skadene i dette prosjektet ble utløst av moderat tørke i somrene 2004-06. Disse somrene hadde perioder i juni og juli med høy fordampning pga høye temperaturer og vedvarende vind, og lite nedbør. Dette førte til nedbørunderskudd og moderat tørkestress. Flere påfølgende år med moderat tørkestress har ført til kavitasjon i vannledningsbanene i stammen hos en del trær. Deler av yteveden har blitt satt ut av spill som vannledningsbaner. Utviklingen av høyde- og diametervekst, samt funn av tørkeringer og traumatiske harpikskanaler i disse årene understøtter at det har vært et tørkestress.

Skadene forekommer noe hyppigere på spesielle jordtyper, særlig på marine avsetninger (leirjord) og på sand- og forvittringsjord med høy dreneringsgrad. Resultatene tyder på at visse trær har vært særlig utsatte for slike skader, noe som kanskje kan være genetisk betinget og være grunnlag for foredling mot tørkeresistens. Trær som har blitt rammet av toppskranting har forbrukt mer vann enn andre trær ved å ikke effektivt lukke spalteåpningene i tørkeperioder. Disse skadde trærne har også gjennomgående hatt større trakeider (større tverrsnitt) og tynnere cellevegger i tidligveden, noe som øker risikoen for alvorlige skader på vannledningsbanene i stammen (kavitasjon og kollaps av trakeider). Påfølgende, aggressivt angrep av honningsopp kan ha vært medvirkende til skadene. Våre undersøkelser indikerer at dette har vært av mindre betydning, men gir ikke noe klart svar på dette.

Vi har satt disse skadene inn i en større sammenheng, med data for mortalitet og tilvekst fra andre datasett. Dette indikerer at toppskranting og grantørke først og fremst er et alvorlig problem i enkelte bestand, men at det samlet sett for landsdelen har mindre betydning. Skadeomfanget på gran har vært moderat i forhold til skader etter sterke tørkesomre som 1947, -74, -76, -77 og -92. Avdøyingen (mortaliteten) på skogoppsynets overvåkingsflater gjennom perioden 1989-2007 var 0,7 % av grantrærne, noe som ikke er uvanlig høyt sammenliknet med mortaliteten på landsskogtakseringens felt. Mortaliteten toppet seg i 2006 og 2007 (1,4 %), noe som understøtter klimatisk stress i årene 2005 og 2006 som viktig årsak. Flybilder for hele Vestfold fra 2007 er brukt til automatisk deteksjon og stedfesting av tørrgran. Denne undersøkelsen viste at 0,4 % av grantrærne var døde. Skadene opptrådte relativt spredt på alle typer lokaliteter, men var noe hyppigere på de oppsprukne vulkanske bergartene i Vestfold og på marine avsetninger. En undersøkelse av bonitetsutvikling på gran i lavlandet på Østlandet viste en økning i H40 høydebonitet på noe over en bonitetsklasse. Dette ble beregnet fra langsiktige feltforsøk og gjennomsnittet økte fra 19,8 til 23,6.

Vi konkluderer med at framtidsutsiktene for gran i denne landsdelen er mindre bekymringsfulle enn antatt før prosjektet startet. Høyere temperatur i vekstsesongen vil i stor grad oppveies av mer nedbør. Samlet sett tyder resultatene på at vi vil få en økning i produksjonsevne på gran over hele landet, også i lavlandet på Østlandet. Risikoen for

tørkeskader i enkelte år kan likevel øke noe. Dette sammen med at det er betydelig usikkerhet omkring hvor sterke klimaendringene blir gjør at det kan være fornuftig å spre risiko ved å blande andre treslag som eik, svartor og bjørk inn i granbestand. Særlig synes dette aktuelt på marine avsetninger og veldrenerte jordtyper.

Prosjektet har også vist at satellittovervåking har et potensiale for å overvåke vekst og vitalitet i granskog, i form av årlige verdier som kan utfylle årringindekser fra borprøver.

Nøkkelord: Gran, tørke, klima

INNHold

Forord	ii
Sammendrag	iii
1. Innledning	1
2. Arbeidspakke 1: Tilvekst og mortalitet.....	3
2.1. Mortalitet	4
2.2. Utvikling av produksjonsevne på langsiktige feltforsøk.....	5
3. Arbeidspakke 2: Deteksjon av tørrgran i flybilder.....	6
3.1. Deteksjon i flybilder og årsaksfaktorer.....	7
4. Arbeidspakke 3: Feltstudier: Diagnose og årsaksmekanismer for toppskranting hos gran.....	8
4.1. Jordundersøkelser	9
4.2. Utvikling av høyde- og diametervekst.....	10
4.3. Proveniens	11
4.4. Fysiologiske og anatomiske undersøkelser av veden	12
4.5. Isoptopanalyser	13
4.6. Vanntransport i stammen	14
4.7. Avdøying av røtter	15
4.8. Honningsopp.....	16
4.9. Klimatiske forhold	17
5. Arbeidspakke 4: Scenarier for tørkestress på gran ved klimaendringer	18
5.1. Klimascenarier	19
5.2. Effekter av klimaendring på tilvekst i skog.....	20
5.3. Sammenheng mellom årringbredde og vegetasjonsindekser fra satellitt	21
6. Arbeidspakke 5: Mulige endringer i skogbehandlingen i lavlandet på Østlandet for å møte klimaendringene	22
6.1. Treslag og skogbehandling for å møte klimaendringene.....	23
7. Diskusjon	24
8. Konklusjon	26
Etterord	27
Litteratur	27

1. INNLEDNING

Toppskranging i 40-60 år gammel gran er ofte observert i vitale, veksterlige bestand i lavlandet på Østlandet. Symptomene opptrer i dominante og ko-dominante trær i produktive bestand i hkl 3 og 4, og ofte på tidligere dyrket mark. Angrepne trær har toppskranging, avtakende toppskuddlengder og gul misfarging av barnålene. I bestand med slike skader finnes ofte også tre andre typer skader og symptomer, - næringsmangel, barkbilleangrep og aggressivt honningsoppangrep under barken på stubbe og rothals. Det er velkjent at tørkestress kan utløse eller forårsake slike skadetyper. Vi har brukt grantørke som en felles betegnelse på disse skadene. I mange tilfeller dør trærne med toppskranging 1- 4 år etter at symptomene dukker opp. Tørke, dvs tilgangen på vann, er en begrensende faktor for granskogens vekst i denne delen av landet (Andreassen et al. 2006), og kan også være en årsaksfaktor for toppskrangingen og de andre skadetyperne. Skadene fører til økte kostnader ved hogst av angrepne trær og redusert produksjon fordi angrepne bestand ofte må sluttavvirkes ca 10 før vanlig hogstmodenhetsalder. I tillegg reiser disse skadene spørsmålet om skogbehandlingen bør endres for å møte ei framtid med et varmere klima.

Prosjektets hovedhypotese var at klimascenariets økende temperatur og avtakende nedbørmengde om sommeren vil føre til mer tørkestress på gran i lavlandet på Østlandet. Hovedmålet med prosjektet var å identifisere risikofaktorer for grantørke, klarlegge mekanismer for toppskranging-skadene og vurdere mulige alternativer for en framtidorientert skogbehandling for skog på Østlandet, særlig i lys av tørkestress hos gran. Delmålene for prosjektet var å

- beskrive og diagnostisere skadene, dvs. beskrive symptomer, identifisere betydningen av biotiske skadegjørere og lage kart for den geografiske utbredelsen av skadene
- identifisere mest sannsynlige årsaks-mekanismer, dvs gjennom feltstudier og analyser av langtids-datasett skulle skader, tilvekst og mortalitet bli relatert til voksestedforhold, bestandsforhold og styrken på tørkestress
- lage scenarier for effekten av klimaendring, dvs bruke klima-scenarier for Norge til å predikere de regionale områder hvor tørkestress vil opptre som en følge av klimaendringer
- legge til rette for en diskusjon om alternativer for skogbehandlingen på Østlandet, dvs en gruppe med eksperter og spesielt interesserte skogbrukere vil bli dannet og gjennom arbeidsmøter og reiser diskutere hvordan skjøtselen av gran og treslagsvalg kan tilpasses usikkerheten ved klimaendringer.

Organisering av prosjektet

Prosjektet er delt opp i 5 arbeidspakker (AP), som hver inneholdt ulike aktiviteter.

- Arbeidspakke 1. Tilvekst og mortalitet
- Arbeidspakke 2. Deteksjon av tørrgran i flybilder
- Arbeidspakke 3. Feltstudier: diagnose og årsaksmekanismer for toppskranging hos gran
- Arbeidspakke 4. Scenarier for tørkestress på gran ved klimaendringer
- Arbeidspakke 5. Mulige endringer i skogbehandlingen i lavlandet på Østlandet for å møte klimaendringene

Tabell 1. Deltakende institusjoner og forskere fordelt på arbeidspakker

Instusjon	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5
Københavns universitet					
• Palle Madsen					X
Leibniz-Zentrum für Agrarland Forschung (ZALF), Tyskland					
• Arthur Gessler			X		
• Rainer Hentschel			X		
• Zachary Kayler			X		
Lund universitet					
• Lars Eklundh				X	
• Monica Garcia				X	
Mendel University					
• Jan Cermak			X		
• Nadezhda Nadezhkina			X		
• Jan Svetlik			X		
Meteorologisk institutt					
• Ole Einar Tveito			X	X	
Universitet für Bodenkultur (BOKU), Østerrike					
• Sabine Rosner			X		
• Douglas Godbold			X		
Norsk institutt for skog og landskap					
• Kjell Andreassen			X	X	
• Clara Anton	X	X			
• Isabella Børja			X		
• Lise Dalsgård			X		
• Svein Solberg	X	X	X	X	X
• Mari-Mette Tollefsrud			X		
• Bernt Håvard Øyen	X				

2. ARBEIDSPAKKE 1: TILVEKST OG MORTALITET

Formålet med denne arbeidspakka var å beregne utvikling av bonitet over lengre tid og kvantifisere mortalitet ved å bruke eksisterende datasett fra langsiktige feltforsøk og skogoppsynets overvåkingsflater.



Fig. 1. Bestand I hogstklasse 3-4 med høy mortalitet. Foto Svein Solberg.

2.1. Mortalitet

2.1.1. MATERIALE OG METODER

Vi har her brukt data for skogoppsynets overvåkingsflater, som var i drift med årlige registreringer fra 1988 til 2007. dette er et stort datasett med mange felt og mange trær per felt, og det egner seg derfor godt for å undersøke avdøying av trær, som forekommer sjeldent, dvs. rammer under 1 % av trærne per år. Vi har her undersøkt mortalitet ved å pare trær fra et år til det neste, og telle opp antall trær som var levende i et år og døde i det neste. Dette er regnet om til mortalitet i % av treantallet per felt. I og med at beregningene krever observasjoner fra 2 år, blir første år med mortalitetsdata 1989. Kun grantær på grandominerte felt inngår. Trær av alle sosiale klasser inngår, dvs. også undertrykte. Vi har imidlertid beregnet det også ved å utelukke undertrykte trær og resultatene ble svært like, både for mortalitet i % og for variasjon mellom år.

2.1.2. RESULTATER

I gjennomsnitt for alle årene var mortaliteten 0,69 % av treantallet (Fig. 2). Dette er ikke unormalt høyt. Til sammenlikning har mortaliteten på landsskogtakseringens felt med gran som hovedtreslag vært 0,8 %. Mer detaljert har mortaliteten for gran vært 0,78 % for hele landet, og 0,81 % for Østlandet. Mortaliteten varierte imidlertid betydelig fra år til år, noe som indikerer at regionale variasjoner i værforhold har spilt en betydelig rolle for mortaliteten hos gran. De høyeste verdiene forekom i 2006 (1,2 %) og 2007 (1,4 %). Vi vet at grantrær svekket av tørkestress og andre stressfaktorer ofte angripes av honningsopp og dobbeltøyet barkbille, og de dør en stund etter stresset. Dobbeltøyet barkbille svermer i august og trærne dør i løpet av høsten og vinteren. Det er derfor sannsynlig at den høye mortaliteten i 2006 og 2007 skyldes klimatisk stress, som tørke, i de foregående årene 2005 og 2006.

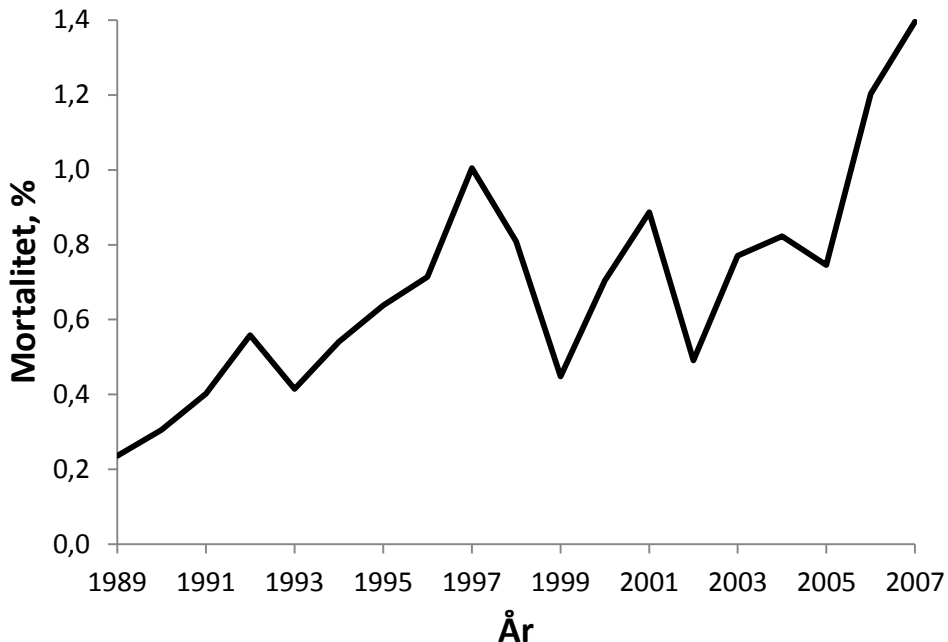


Fig. 2. Mortalitet på skogoppsynets overvåkingsflater 1989 – 2007.

2.2. Utvikling av produksjonsevne på langsiktige feltforsøk

2.2.1. MATERIALE OG METODER

For å undersøke om det finnes langsiktige trender i bonitet på lavlandet på Østlandet har vi brukt data for utvikling av trehøyde fra langsiktige feltforsøk. Dette er felter hvor det gjennom mange tiår har vært utført regelmessige tremålinger. Feltene er etablert for å studere effekter av skogbehandling, men de regelmessige høydemålingene over flere tiår gjør dem også velegnet for å studere bonitetsutvikling. Vi har imidlertid fjernet alle felt hvor behandlingen kan ha påvirket høydeveksten, dvs. felt som er tilført gjødsel eller andre kjemiske forbindelser, som har hatt heltre-tytning, har hatt såringsforsøk, og bledningsfelt hvor boniteringstrærne er hogd. Felt med færre enn 3 gjentak av tremåling er fjernet fra datasettet. Vi har brukt data fra felt < 300 m. o. h. i fylkene som deltar i prosjektet, dvs. Akershus, Oslo, Vestfold, Buskerud, Telemark og Aust-Agder. Etter dette bestod datasettet av 60 forsøksfelt og totalt 1196 måleperioder i perioden 1928 – 2010. Noen felt kommer inn og noen faller ut av datasettet gjennom denne perioden, men det har liten betydning for resultatene fordi det er et stort antall observasjoner. Vi har beregnet utviklingen av bonitet ved å benytte dataene for overhøyde og alder, dvs dette viser utviklingen av høydebonitet (H40). Beregningene er aggregert opp for 10-års perioder. Antall måleperioder i datasettet økte over tid. Fra 1940-tallet har hvert tiår mer enn 75 målinger, og mest var det på 1990-tallet med 303 målinger.

2.2.2. RESULTATER

Høydeboniteten i dette datasettet har gjennomgående økt med litt over en bonitetsklasse, eller nesten 4 meter, i gjennomsnitt fra 19,8 til 23,6 (Fig. 3). Lavest høydebonitet var det på 1930-tallet, med et gjennomsnitt på 19,8 m, og deretter var det en økning på 2,5 m frem til 1960-tallet. På 1970-tallet var det en midlertidig nedgang på 0,3 m, som trolig skyldes tørkesomrene i det tiåret. Fra 1980-tallet har det vært en betydelig økning på 1,4m. Årsaken til økningen kan delvis være tilførselene av nitrogen med nedbøren, som har økt siden 1950-tallet. Klimatiske forhold kan være en del av årsaken til økende bonitet, men hvor mye de klimatiske forholdene kan forklare av økningen de siste 30 årene er ukjent.

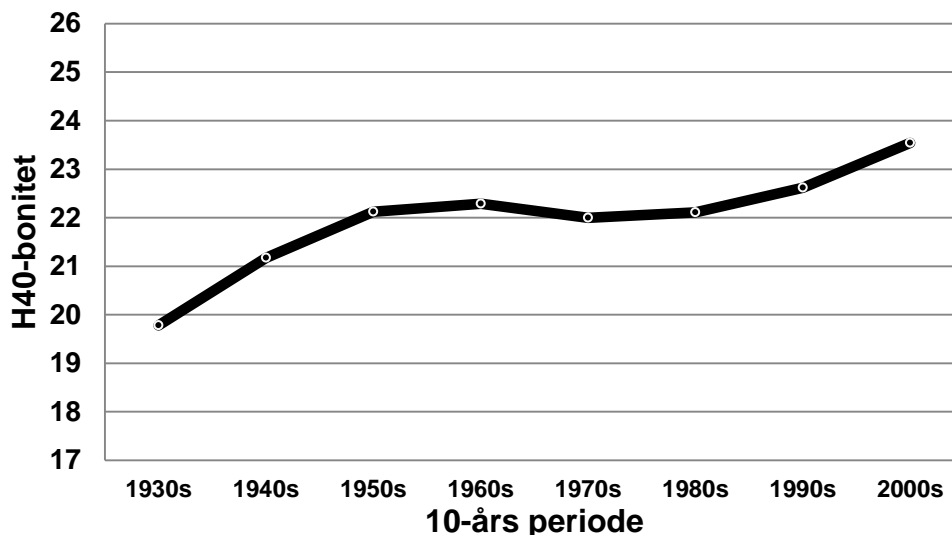


Fig. 3. Utvikling av høydebonitet (H40) i lavlandet på Østlandet 1930-2010, basert på Skog og Landskaps langsiktige feltforsøk.

3. ARBEIDSPAKKE 2: DETEKSJON AV TØRRGRAN I FLYBILDER

Formålet med denne arbeidspakka var å detektere tørrgran i flybilder over hele Vestfold fylke, og knytte omfanget av tørrgran til geologiske og topografiske forhold, samt bestandsforhold. Det er ferdigstilt en algoritme som automatisk detekterer enkelttrær og så klassifiserer disse til 4 mulige klasser, dvs. gran, furu, løvtrær og tørrgran.

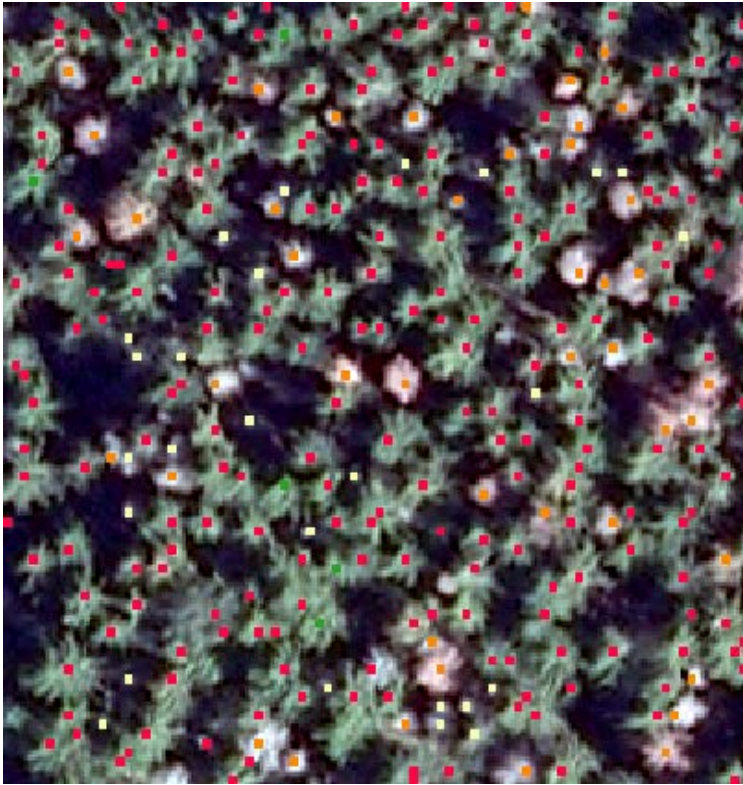


Fig. 4. Utsnitt av flybilde (50 m x 50 m) hvor de enkelte trær er automatisk klassifisert som gran (rød), furu (gul), lauv (grønn) og tørrgran (orange).

3.1. Deteksjon i flybilder og årsaksfaktorer

3.1.1. MATERIALE OG METODER

Vestfold fylke ble dekket av omløpsfotografering med flybilder i 2007. Flybildene ble tatt opp og prosessert til ortofoto av Blom, Oslo. Ortofotoet ble levert som 1400 ruter på 1,2 km x 1,6 km, og inneholdt 5 kanaler; dvs blå, grønn, rød, nærinfrarød, samt en høydeverdi.

Pixelstørrelse var 20 cm. Høydeverdien var gitt som høyde over bakken og ble generert ved fotogrammetri, samt at en digital terrengmodell for Vestfold ble trukket fra overflatehøydene. Vi utviklet et dataprogram (algoritme) for automatisk finne alle trær, samt klassifisere disse som gran, furu, lauv og tørrgran. I klassifiseringen brukte vi algoritmen MAXLIKE, og brukte landsskogningsringens felldata i Vestfold samt 4 skogområder med mye tørrgran som et treningsdatasett for spektrale egenskaper. Beregningene var krevende og tok omkring 10 døgn på en litt kraftig PC. Antall trær i de ulike kategoriene ble aggregert opp til 50 m x 50 m store ruter, og vi beregnet en tørrgran-prosent for hver rute definert som antall tørrgran i % av alle grantrær. Vi knyttet disse dataene til andre digitale GIS datasett, dvs løsmasse- og berggrunns-kart fra NGU og terrengforhold fra terrengmodellen DTED10. I denne sammenkoblingen av data brukte vi senterpunktet i hver 50 m x 50 m rute, dvs at hver rute ble tilegnet geologivariable og terrengvariable for senterpunktet.

3.1.2. RESULTATER

Totalt sett fant beregningsprogrammet 61 millioner trær, fordelt på 75 % gran, 11 % furu, 14 % lauv og 0,4 % tørrgran. De 0,4 % tørrgran utgjorde 244 000 trær. Dette er ikke uvanlig høyt sammenliknet med Landsskogningsringens data for Norge, men rask avvirking av granskog med tørkeskader i Vestfold kan gjøre at man kan underestimere omfanget av mortalitet i granskog. Som en del av kvalitetssikringen av disse dataene beregnet vi en regresjonsmodell for gjennomsnittlig trehøyde estimert fra fotogrammetridataene i ortofotoet og gjennomsnittlig trehøyde målt i felt på landsskogningsringens felt, og dette gav et bra resultat med $R^2=0,82$. Generelt var det kun svake sammenhenger mellom frekvensen av tørrgran og forklaringsvariable, men det var en tendens til at tørrgran forekom hyppigst i sentrale områder av Vestfold hvor man også finner oppsprukket og veldrenert berggrunn fra eruptive bergarter.

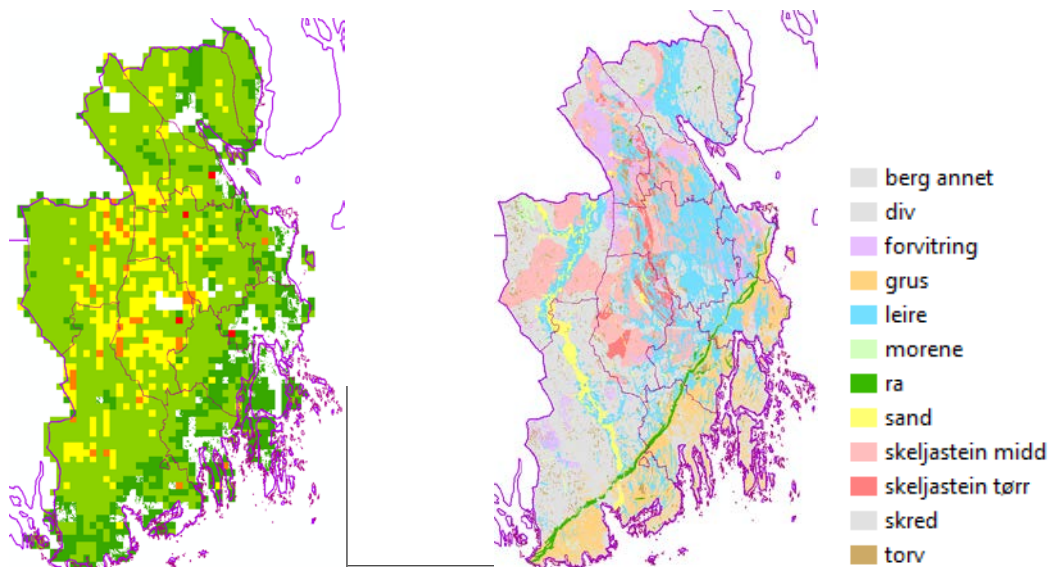


Fig. 5. Mengde tørrgran i Vestfold i % av antall grantrær beregnet ut fra flybilder 2007 (venstre), og geologiske forhold (høyre).

4. ARBEIDSPAKKE 3: FELTSTUDIER: DIAGNOSE OG ÅRSAKSMEKANISMER FOR TOPPSKRANTING HOS GRAN

Elleve skogbestand med typiske symptomer på toppskranting ble valgt ut subjektivt på Østlandet, fordelt på alle de 6 fylkene som deltar i prosjektet (Østfold, Akershus/Oslo, Buskerud, Vestfold, Telemark og Aust-Agder). I hvert bestand etablerte vi et felt med 10 par av trær, dvs et tre med toppskranting og et symptomfritt nabotre som referanse. Trærne i disse parene ble brukt som prøvetrær for detaljerte undersøkelser, mens alle de øvrige trærne på feltene fikk en forenklet registrering. To av feltene, Hoxmark og Sande, har vært særlig intensivt undersøkt. I noen av aktivitetene har det vært etablert et tilleggfelt, slik at antall felt har vært 12.

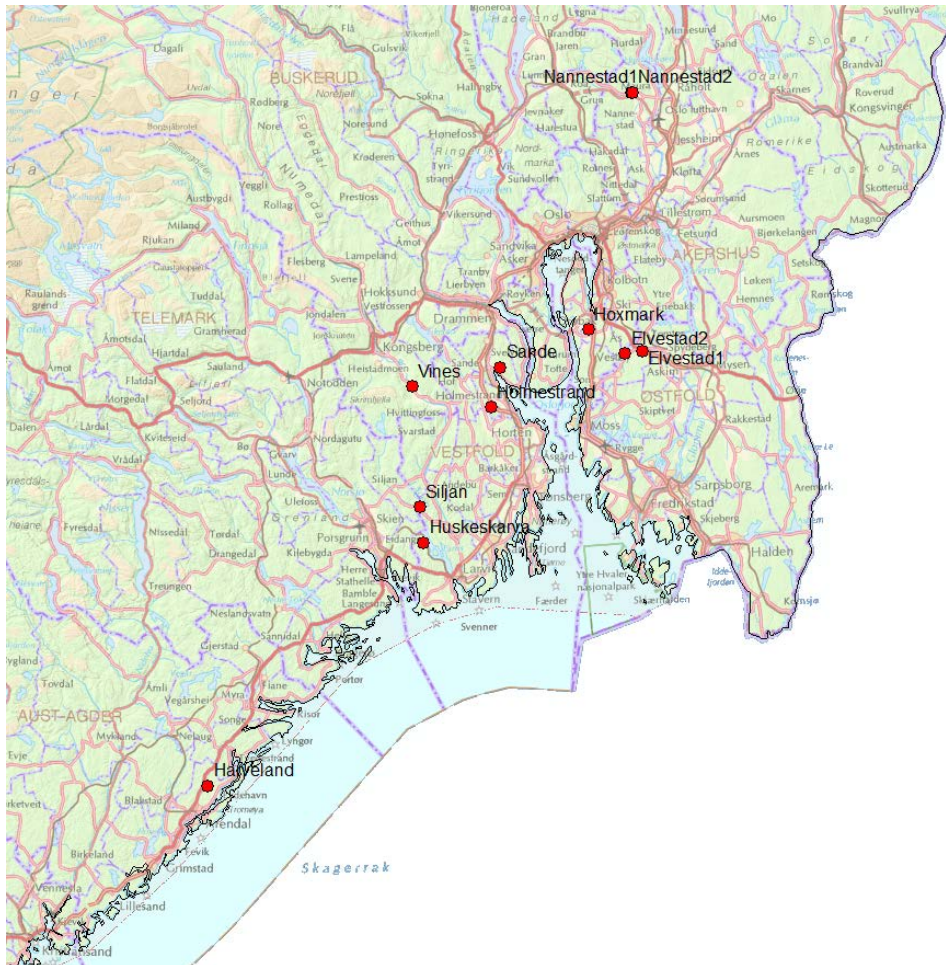


Fig. 6. Lokaliseringen av de 11 undersøkte skadefeltene.

4.1. Jordundersøkelser

4.1.1. MATERIALE OG METODER

Jordanalyser ble gjort i de 11 feltene. Jorddybde ble bestemt med jordspyd separat rundt trær med toppskranting og for de friske referansetrærne. Jordprøver ble tatt av humussjiktet, og nedover i mineraljorda mot en maks dybde på 60 cm. Prøvene av mineraljorda ble inndelt i sjikt etter farge, dvs sjiktene A, B og C. Vi kjørte kornfordelingsanalyse på hvert sjikt separat. Prøvene ble først tørket ved 105 °C, tørrvekt ble bestemt og mengde organisk materiale bestemt med glødetaps-måling. Kornfordelingen ble bestemt som andeler sand, silt og leire, med kornstørrelse sand 63-2000 µm, silt 2-63 µm og leire < 2 µm. Kornfordelingen ble sammenliknet med kornfordelingen på landsskogtakseringens felt. I tillegg ble skadebestandene knyttet til løsmasse-data fra Norges geologiske undersøkelser ut fra bestandenes koordinater.

4.1.2. RESULTATER

Vi kan gruppere skadefeltene i 2 kategorier. Tre av skadefeltene kommer i en kategori med tørkesvak mark. Her har vi de to bestandene i Nannestad samt Huskeskarva (Vestfold) som hadde grovkornet jord, dvs. et høyt innhold av sand. Nannestad-feltene lå på en breelavsetning, mens Huskeskarva var forvittringsmateriale. Feltene i Nannestad hadde i tillegg den grunneste jorda av alle feltene, med 22 cm jorddybde. Her var det også en klar og statistisk sikker forskjell i jorddybde for de skadde og de friske trærne, med henholdsvis 14 cm og 31 cm. I den andre kategorien finner vi de øvrige 9 skadefeltene, som alle lå på marine avsetninger. De fleste av dem (8) lå på et tynt og usammenhengende dekke av marin avsetning, i veksling med bart fjell. Jorddybdene var her 36-69 cm, og det var ingen systematisk forskjell i jorddybde for trær med toppskranting og referansetrærne. At dette var marine avsetninger ble bekreftet av kornfordelingen, som viste at disse feltene hadde et høyt innhold av leire. Frekvensen av marin avsetning på disse feltene var altså 75% (9/12), og til sammenlikning er frekvensen av marine avsetninger kun 16% blant landsskogtakseringens felt på Østlandet under 300 moh. Dette indikerer at marine avsetninger er en risikofaktor for toppskranting. Antall felt er svært lavt (12), men på den annen side er de valgt ut av det lokale skogoppsynet som typiske felt med slike skader. Samlet sett tyder dette på at toppskrantingen særlig finnes på marine avsetninger og på tørkesvak mark (grovkornet og grunn jord).

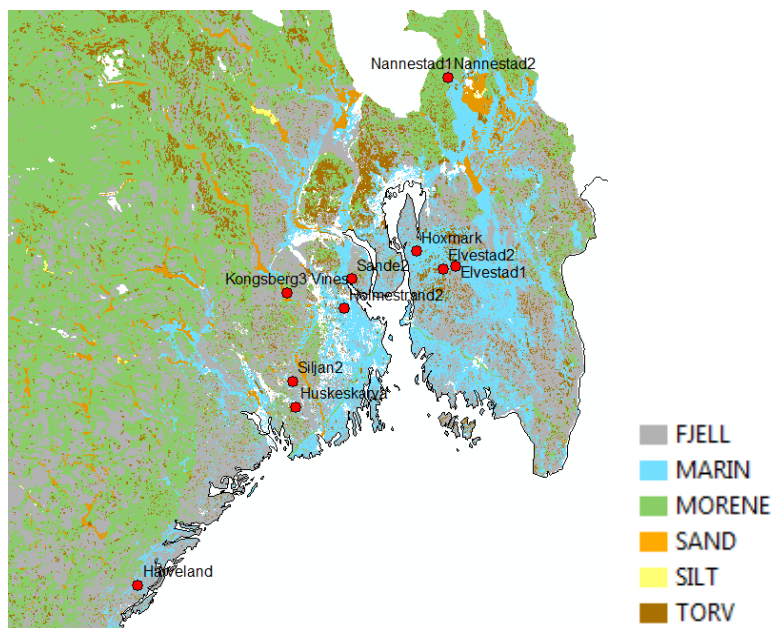


Fig. 7. Lokaliseringen av de 11 skadefeltene på løsmassekart fra Norges geologiske undersøkelser.

4.2. Utvikling av høyde- og diametertilvekst

4.2.1. MATERIALE OG METODER

Diameter- og høydevekst ble målt på prøvetrærne. Årringbredde ble målt på borprøver tatt i brysthøyde på alle prøvetrær. Høydevekst tilbake til år 2000 ble målt på prøvetrærne fra Hoxmark og Sande. Dette ble gjort ved å splitte toppene av trærne etter margen og lokalisere stedene for overvintrende knopper i margen. En overvintrende knopp setter et merke i margen, et såkalt nodalt diafragma. Dette er en liten struktur i margen som inneholder en luftlomme. I enkelte tilfeller ble disse undersøkt i mikroskop. Høydeveksten hvert år ble bestemt ved å måle avstanden mellom disse. Det dannes ikke nodalt diafragma ved høstskudd, og derfor kan høydeveksten bestemmes langt sikrere på denne måten enn ved å måle avstanden mellom greinkranser. Det er imidlertid et tidkrevende arbeid og derfor ble dette kun gjort på to felt.

4.2.2. RESULTATER

Både diameter- og høydeveksten avtok fra 2004 til 2006, og delvis til 2007 (Fig 8 og 9). Dette indikerer at det har vært ugunstige klimatiske forhold i årene 2005 og 2006. Videre var det tydelig at veksten på trær med toppskranting begynte å skille seg fra kontrolltrærne omkring 2007. Etter 2007 fortsetter høydeveksten å avta ned mot null på de skadde trærne, mens de friske kontrollene henter seg inn og har en normal høydevekst videre. Tilsvarende var det for diameterveksten. Den fortsatte å avta hos de skadde trærne etter 2007, mens den tok seg opp til normalt nivå på de friske. Dette indikerer at de skadde trærne har fått en irreversibel skade som følge av klimatisk stress i 2005 og 2006. Utviklingen av høydevekst er særlig viktig her for å forstå skadetypens årsak, fordi det er et av hovedsymptomene ved toppskranting. Den avtakende høydeveksten var bare delvis synkronisert mellom de skadde trærne. For hvert av disse trærne oppstod den som en brå og kraftig nedgang i ett år, og dette året varierte noe. Dette indikerer at en annen, og ikke-synkronisert skadeårsak spiller en medvirkende rolle. Dette kan være en biotisk skadegjører som honningsopp.

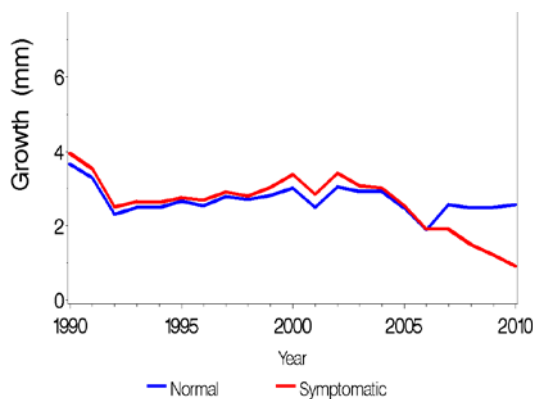


Fig. 8. Årringbredder for prøvetrærne 1990-2010. Rød = skadde trær, blå = friske kontroll-trær

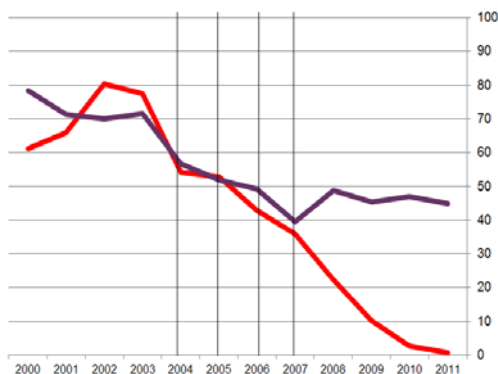


Fig. 9. Toppskuddlengder for prøvetrærne 1990-2010. Rød = skadde trær, blå = friske kontroll-trær

4.3. Proveniensen

4.3.1. MATERIALE OG METODER

Prøvetrærnes proveniens ble bestemt ved DNA-analyse, som enten nordeuropeisk eller mellomeuropeisk. Dette ble gjort på 240 prøvetrær, dvs i 10 par av trær på hvert av tolv feltene. Totalt DNA ble ekstrahert fra kambium eller nåleprøver med DNeasy Plant Mini Kit (Qiagen). Granpopulasjoner i Nord- og Mellom-Europa har vært adskilt over flere istider og har derfor utviklet seg genetisk forskjellig. Blant annet kan nordeuropeiske og mellomeuropeiske provenienser skilles ved å undersøke genetisk variasjon i mitokondrie-DNA (Tollefsrud et al. 2008). Hos gran nedarves mitokondrie-DNA bare fra mor, og undergår ikke rekombinasjon og spres bare med frø. Mitokondrie-DNA er derfor ikke påvirket av pollenflyt og kan brukes til å fastslå opprinnelsen til frøet som treet vokste opp fra. I mitokondrie-DNAet finnes det i mellomeuropeiske provenienser en sekvens på 33 basepar som mangler i nordeuropeiske provenienser. For å skille nordeuropeisk og mellomeuropeisk proveniens utviklet vi et såkalt allel-diskriminerings assay med kvantitativ PCR. Dette assayet registrerer tilstedeværelse eller fravær av disse 33 baseparene. For å teste om det var noen sammenheng mellom proveniens og toppskranting gjorde vi en parvis t-test. Vi kodet mellomeuropeisk proveniens som verdien 1 og nordeuropeisk som verdien 0, og beregnet for hvert par en differanse, og gjennomsnittsberegnet denne per felt. Denne differansen kunne variere fra -1 (dvs. skadene kunne 100% knyttes til nordeuropeisk proveniens), 0 (ingen proveniens-effekt, og 1 (skadene kunne 100% knyttes til mellomeuropeisk proveniens).

4.3.2. RESULTATER

Fire felt (Nannestad1 og 2, Elvestad 1 og Siljan 2) hadde bare trær med nordeuropeisk opprinnelse, mens de resterende åtte feltene hadde trær med både nordeuropeisk og mellomeuropeisk opprinnelse. Av 240 trær hadde 83 trær mellomeuropeisk proveniens, og 54 % av dem hadde toppskranting mens 46 % var friske. Av de 157 trærne med nordeuropeisk opprinnelse var 48 % skadde mens 52 % var friske. Når vi parer trærne til 120 par får vi et bra grunnlag for å teste provenienseffekten. I 103 par hadde trærne samme proveniens. Blant de 17 parene hvor det var forskjellig proveniens så hadde 12 par mellomeuropeer som skadd og norsk som frisk, mens de resterende 5 par var omvendt (Tabell 2). Som det framgår av dette er sammenhengen mellom proveniens og skade svak, og knapt nok merkbar. Når vi regnet proveniensene om til tallverdier og gjorde en parvis t-test fikk vi gjennomsnittsverdien 0,05. Denne verdien er nær null, som igjen viser at sammenhengen er svak. Tilhørende hypotesetest (N = 12 bestand) gav sannsynligheten $p = 0,046$ for at verdien 0,05 kunne være et resultat av bare tilfeldigheter. Effekten var altså statistisk sikker, men likevel svak. Dette betyr at mellomeuropeisk proveniens sannsynligvis øker risikoen for toppskranting, men at denne økningen er svært liten. Risikoen er hovedsakelig styrt av andre forhold.

Tabell 2. Frekvens av proveniens-kombinasjoner i de undersøkte parene av trær

Skadd tre	Friskt tre	Antall par
Mellomeuropeer	Mellomeuropeer	33
Mellomeuropeer	Norsk	12
Norsk	Mellomeuropeer	5
Norsk	Norsk	70
Sum		120

4.4. Fysiologiske og anatomiske undersøkelser av veden

Yteveden hos gran består av minst 10 årringer. Vannledningsevnen i disse årringene er viktig for å skaffe nok vann til krona. Ved akutt tørke kan det oppstå en nedgang i vannledningsevnen i disse årringene, ved at det oppstår luft- eller gassbobler eller ved at trakeidene kollapser. Dette kan være irreversibelt og gi en langvarig nedgang i vannledningsevnen i stammen. Risikoen for slike skader avhenger av ved-egenskapene i disse årringene, og er avgjørende for treets mulighet for å overleve. Høy risiko for slike skader henger sammen med vedtetthet. Tett ved er karakterisert ved trangere trakeider og tjukkere cellevegger, noe som delvis henger sammen med en stor seinvedandelen i årringen.

4.4.1. MATERIALE OG METODER

Risikoen for tørkeskader i vannledningsbanene varierer mellom trær og mellom år. Man bruker gjerne uttrykket 'hydraulisk sårbarhet', og den kan tallfestes med målinger av P_{50} , dvs den graden av tørkestress som må til for å indusere et tap på 50% av vannledningsevnen i veden. Prøver fra 12 prøvetrær på Hoxmark og 12 fra Sande ble tatt høy oppe i krona, dvs i 10. internodium fra toppen. Hydraulisk sårbarhet, P_{50} , ble målt i alle vedprøvene ved testing i laboratorium. I tillegg ble det tatt borprøver med en diameter på 1,2 cm fra brysthøyde på alle de 220 prøvetrærne, dvs 110 med toppskranting og 110 friske kontroller. De ble visuelt undersøkt i mikroskop for tørkeringer, dvs tette partier i årringen.

4.4.2. RESULTATER

Målinger i vedprøvene viste at hydraulisk sårbarhet, P_{50} , var sterkt korrelert med vedtetthet ($r = 0.89$). Målinger viste også at trær med lav vedtetthet hadde store, tynnveggede trakeider (et høyt forholdstall mellom trakeidestørrelse (tverrsnitt, «lumen») og celleveggtykkelse). De skadde trærne hadde gjennomgående slike egenskaper, dvs lav tetthet, lav P_{50} -verdi og lavt celleveggtykkelse / lumen-forhold sammenliknet med de friske trærne. Dette var tydelig i årene før toppskrantingen startet. De hadde altså vedegenskaper som gjorde dem mer utsatte for å få varig nedsatt vannledningsevne opp til toppen av krona. Dette er trolig en del av årsaken toppskrantingen. Vedegenskaper som disponerer for tørkeskader kan være arvelige, og dette gir grunnlag for å selektere for tørkeresistens i foredlingen av granplanter. Lav vedtetthet henger sammen med høy diameter-tilvekst hos gran, og seleksjon bar for høy tilvekst kan altså være risikabelt, dersom man ikke tar hensyn til risikoen for tørkeskader. Mikroskopering av veden viste for øvrig tørkeringer i flere år, dvs i 1975, i perioden 1986–1994 (særlig 1992), og i 2005, 2006 og 2009.

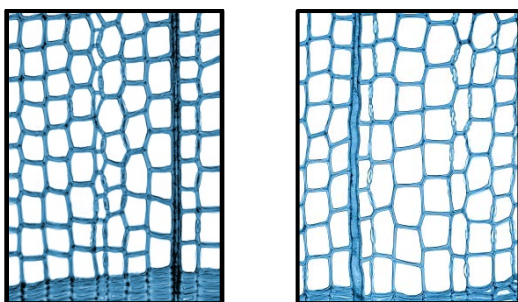


Fig. 10. Tverrsnitt av ved med ulik vedtetthet og ulik risiko for skader på vannledningsbanene. Til venstre ved fra et tre med høy tørkeresistens, dvs med trange trakeider og tukke cellevegger. Til høyre tverrsnitt av ved fra et tre med høy risiko.

4.5. Isotopanalyser

Vi brukte isotopanalyser for å undersøke trærnes vannforbruk og kontroll av spalteåpningene. I 1 % av alle karbon-atomer i verden er det et ekstra nøytron i kjernen, og disse kalles da ^{13}C i stedet for det vanlige ^{12}C . Klorofyllet foretrekker ^{12}C i fotosyntesen og har en viss evne til å selektere disse framfor ^{13}C . Hvis det imidlertid oppstår tørkestress og spalteåpningene lukkes, så må fotosyntesen bruke den luften som er blitt stengt inne i barnålene og over tid må fotosyntesen gradvis gå over til ^{13}C . Konsentrasjonen av ^{13}C i forhold til ^{12}C øker derfor i treet under en tørkeperiode, også i veden som blir avsatt i årringen.

4.5.1. MATERIALE OG METODER

På hvert av feltene Sande og Hoxmark tok vi vedprøver fra borprøver fra 6 par av trær i brysthøyde og på sørsiden av stammen. Vedprøvene ble videre delt opp i prøver for hver årring. Disse prøvene ble malt opp og homogenisert, og analysert med en såkalt isotopforhold masse-spektrometer ved laboratoriet ved Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Tyskland. Isotopdataene ble så omregnet til såkalt 'intrinsic water use efficiency' (WUE_i), som betyr hvor mye karbon (mol) som er fiksert i fotosyntesen per mengde vann (mol) som er forbrukt.

4.5.2. RESULTATER

Resultatene tyder på at trær med toppskranting gjennomgående var «vannsløser» sammenliknet med de friske kontrolltrærne ved siden av. De skadde trærne hadde lavere WUE_i -verdier enn kontrollene (Fig. 11). Denne forskjellen mellom skadde og friske trær var konsistent for begge feltene og for alle undersøkte år, også i årene før toppskrantingen startet omkring 2005. Vi tolker dette som at de skadde trærne ikke lukker spalteåpningene i barnålene under tørkestress like effektivt som de friske trærne. Dette fører til at de lettere får alvorlige tørkeskader, som kavitasjon av xylemet, dvs blokkering av vanntransporten oppover til krona. Det at forskjellene mellom de to gruppene av trær var konstant over tid, og altså var til stede før toppskrantingen startet omkring 2005, viser at dette var en egenskap i trærne som predisponerte for tørkeskader. Dette kan være en arvelig egenskap, og i så fall kan det gi et grunnlag for en foredling mot mer tørkeresistente provenienser. Men dette kan ikke slås fast på bakgrunn av denne studien. Forskjellen mellom de to gruppene kan også skyldes forskjeller i lokale voksestedsforhold og skader.

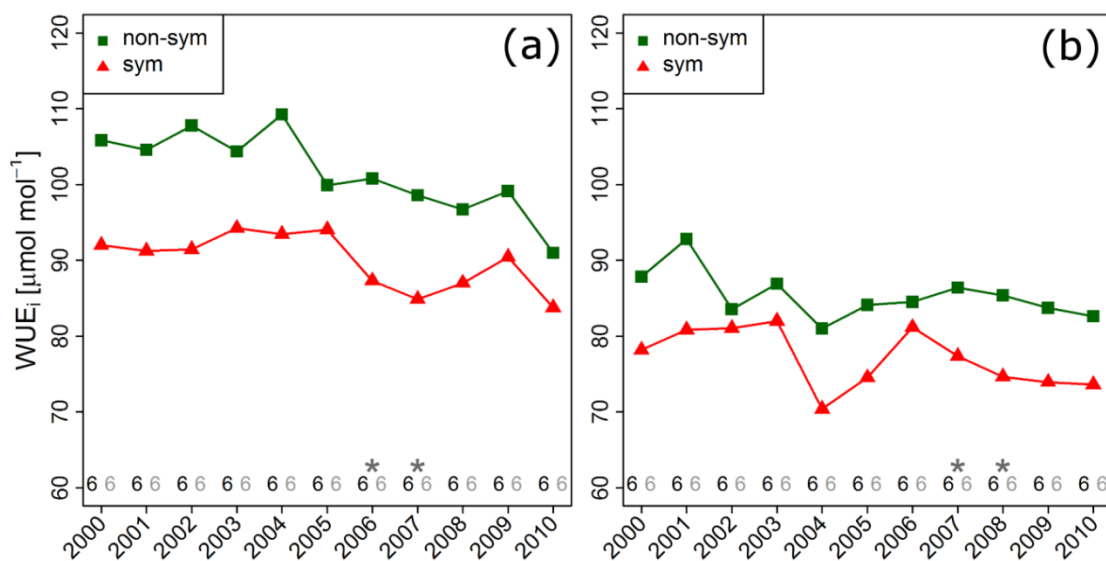


Fig. 11. Gjennomsnittlig 'Intrinsic Water Use Efficiency' (WUE_i) i trær med toppskranting (rød) og friske kontrolltrær (grønn) fra Sande (venstre) og Hoxmark (høyre). Antall trær bak hver måling var alltid 6, og * angir om forskjellen mellom skadde og friske trær i et år var statistisk sikker på 5% nivå.

4.6. Vanntransport i stammen

Formålet med denne arbeidspakke var å måle vanntransporten i stammen av trær med og uten toppskranting.

4.6.1. MATERIALE OG METODER

Seks par av trær ble valgt ut på hvert av feltene Hoxmark og Sande. Vanntransporten oppover i stammen ble målt med såkalt heat field deformation method (HFD, Nadezhdina 2012). Man setter en metallnål med elektrisk oppvarming inn i stammen og måler temperaturen med temperatursensorer i ulike retninger og avstander fra oppvarmingspunktet. Vanntransporten i stammen virker avkjølende. Temperaturen som måles med sensorene kan dermed regnes om til vanntransport. Hvert tre ble seinere felt, og stammeskiver ble tatt av dem. Den vannledende delen av veden i disse stammeskivene ble så bestemt ved hjelp av lys-gjennomskinnelighet. Dette ble gjort ved å holde stammeskivene mot lyset, og lokalisere de vannledende områdene ut i fra at de er gjennomskinnelige for lys. Ved å sammenholde data fra de ulike temperatur-sensorene med data fra lys-gjennomskinnelighet ble vanntransportens fordeling i et tverrsnitt av stammen bestemt.

4.6.2. RESULTATER

Gjennomgående hadde trær med toppskranting lavere vanntransport i stammen enn de friske trærne. Samtidig hadde de flekker og felter i yteveden som var uten vanntransport. Ved å kombinere disse dataene er vanntransportens fordeling illustrert i Fig. 12. Vi ser at vanntransporten er lavere og ujevnt fordelt i det skrantende treet.

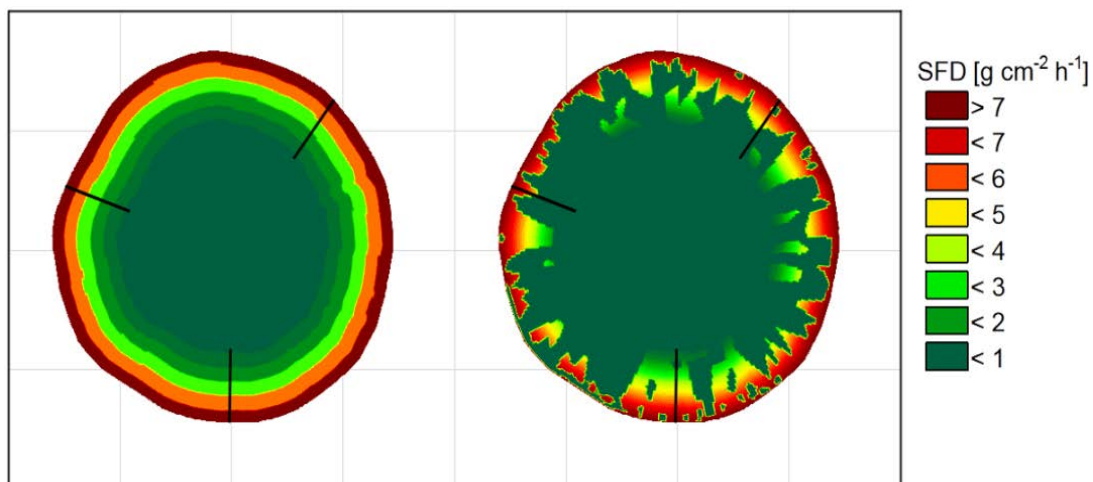


Fig. 12. Vanntransport (g per cm² per time) i stammen for et friskt tre (venstre) og et tre med toppskranting (høyre).

4.7. Avdøing av finrøtter

Formålet med denne aktiviteten var å måle mengden av levende og døde finrøtter.

4.7.1. MATERIALE OG METODER

I de to feltene Sande og Hoxmark ble det tatt jordprøver i nærheten av skadde og friske trær. Prøvene ble tatt 1 m fra trærne på motsatt side av tre-parene, dvs 1 m mot den siden som vendte vekk fra det andre treet i paret. Jordprøvene ble delt opp til en delprøve for hvert av jordsjiktene O (humussjikt), A (utvaskingssjikt) og B (utfellingssjikt). Prøvene ble tørket ved 70° C og alle finrøtter < 2 mm ble tatt ut av prøvene. Finrøttene ble så sortert i kategoriene levende og døde, og deretter veiet.

4.7.2. RESULTATER

I humussjiktet var det klare forskjeller mellom skrantende og friske trær. I dette sjiktet hadde de skadde trærne lavere mengde levende finrøtter og høyere mengde død finrøtter (Fig. 13).

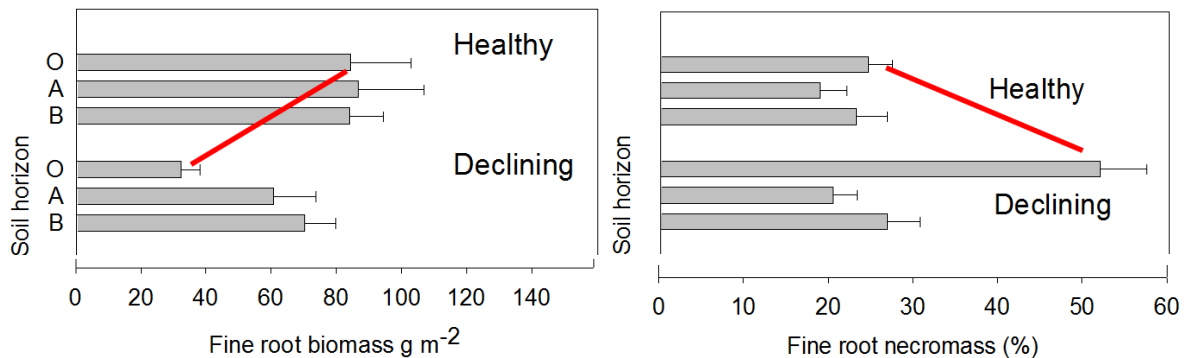


Fig. 13. Venstre: Mengde levende finrøtter og høyre: mengde døde finrøtter hos friske trær (over) og trær med toppskranting (under) på Hoxmark.

4.8. Honningsopp

4.8.1. MATERIALE OG METODER

Forekomst av aggressivt angrep honningsopp (*Armillaria* sp.) ble undersøkt ved visuell observasjon av rothals og stubbe. I 2011 ble dette gjort på alle de 240 prøvetrærne (120 par av trær) samt alle andre trær på de sirkulære 250 m² store feltene. Soppen ble påvist ved funn av karakteristiske hvite vifter av mycel eller rhizomorfer. Disse finnes mellom barken og veden ved slike aggressive angrep. I de tilfeller da rhizomorfer ble funnet, ble disse klassifisert som enten flattrykete eller runde avhengig av hvordan tverrsnittet var. Påvisning av slike symptomer ble kun gjort i de tilfeller da barken hadde løsnet fra veden. Dette, sammen med at kun stubbe og rothals ble undersøkt (dvs ikke rotsystemet), betyr at disse undersøkelsene kun fanger opp en del av angrepene. I 2013 ble 150 av prøvetrærne (75 par) undersøkt på nytt. Undersøkelsene var nå grundigere ved at barken ble fjernet med øks på stubbe og rothals. Det ble også sett etter fruktlegemer, men det ble ikke observert. En enkel metodisk studie ble utført ved Nannestad-feltene. Vi valgte her ut 8 trær med toppskranting men uten honningsopp på stubbe og rothals. På hvert tre avdekket vi en hovedrot 4 m utover fra stubben. På 3 av trærne fant vi da honningsopp 3-4 m ut på denne rotgreina. Dette betyr at soppen ofte kan ha et aggressivt angrep på rotsystemet uten at dette kan påvises på stubbe og rothals.

4.8.2. RESULTATER

Soppen ble i 2011 funnet på kun 3 av de 240 prøvetrærne. To av disse var trær med toppskranting, mens ett var en frisk kontroll. Totalt ble soppen funnet på 457 av de totalt 3890 trærne, dvs 12%. I og med at disse undersøkelsene var enkle og ikke-destruktive så er dette et nedre tall for frekvensen av aggressivt honningsopp-angrep. Av de 457 trærne hadde 367 hvite mycelvifter, mens 90 hadde rhizomorfer. Av disse 90 hadde 34 rhizomorfer med rundt tverrsnitt, mens 56 hadde flatt tverrsnitt. Et flatt tverrsnitt indikerer et klart aggressivt angrep, hvor rhizomorfene har presset seg fram mellom bark og ved og møtt motstand fra en frisk bark. Et rundt tverrsnitt indikerer et sekundært angrep, hvor barken allerede var død da soppen etablerte seg. I 2013 ble soppen påvist på 17 av de 75 symptomatiske trærne og på 10 av de friske referansetrærne. Dette betyr en noe høyere frekvens på de skadde trærne. En Chi-kvadrat hypotesetest ble gjort og den viste at sannsynligheten var ganske lav ($p = 0,14$) for at denne skjeve fordelingen med høyere frekvens av sopp på symptomatiske trær kunne skyldes en tilfeldighet. Undersøkelsen viser altså at frekvensen av honningsopp var lav, den var bare noe høyere i skadde trær enn i referansetrærne, og der det var rhizomorfer så hadde de i mange tilfeller et rundt tverrsnitt. Dette kan tyde på at honningsoppen har hatt liten betydning for skadene. Imidlertid viser den enkle metodestudien at metodikken med å undersøke stubbe og rothals ikke er tilfredsstillende for å avgjøre om honningsoppen er tilstede, og vi må konkludere med at dens betydning er usikker.



Fig. 14. Aggressivt angrep av honningsopp. Under død bark vises mycel og rhizomorfer. Foto: Svein Solberg

4.9. Klimatiske forhold

4.9.1. MATERIALE OG METODER

Ulike klimadata er beregnet for ulike lokaliteter analysert i prosjektet. Utgangspunktet for disse dataene er griddete klimakart som er basert på romlig interpolasjon av temperatur og nedbør (Tveito m.fl., 2005). Skalaen til de griddete datasettene er 1 x 1 km i rom og 1 døgn i tid. Følgende parametre er beregnet for de 11 lokalitetene: døgnmiddeltemperatur, døgn nedbør, midlere månedstemperatur, månedsnedbør, antall dager med nedbør pr måned, periode med oppholdsvær, vekstgraddager pr. måned og Palmer tørkeindeks. I tillegg er potensiell fordampning beregnet for værstasjonen Oslo-Blindern. Snø- og jordfuktighetsdata er hentet fra senorge.no. Disse dataene er modellert med de samme griddete temperatur og nedbørdataene beskrevet ovenfor som inngangsverdier. Data for perioden 1961-2012 er behandlet, men med et hovedfokus på perioden 2000-2010. Tørke er en tilstand beskrevet som langvarig underskudd på nedbør, samtidig som evapotranspirasjonen er høy. Dette modelleres i hydrologiske modeller som bl.a. brukes til flomvarsling (Beldring m.fl. 2003).

4.9.2. RESULTATER

Det var et moderat tørkestress i somrene 2004, -05 og -06. Nedbørmengden var i perioder av disse somrene lavere enn potensiell evapotranspirasjon, dvs et nedbørunderskudd, og en form for tørke som kan kalles 'meteorologisk tørke', dvs hvor tilgangen på vann i jorda har noe mindre betydning (Fig. 15). Det var en kombinasjon av høy temperatur og vedvarende vind av svak-moderat styrke som har ført til høy potensiell evapotranspirasjon. Temperaturen i Norge har vist en jevn økning de siste 15-20 årene, og de fleste årene etter 2000 er blant varmeste siden 1900. På Østlandet er temperaturøkningen størst om vinteren og våren, mens økningen er mer moderat sommer og høst. 2006 var en svært varm sommer på Østlandet.

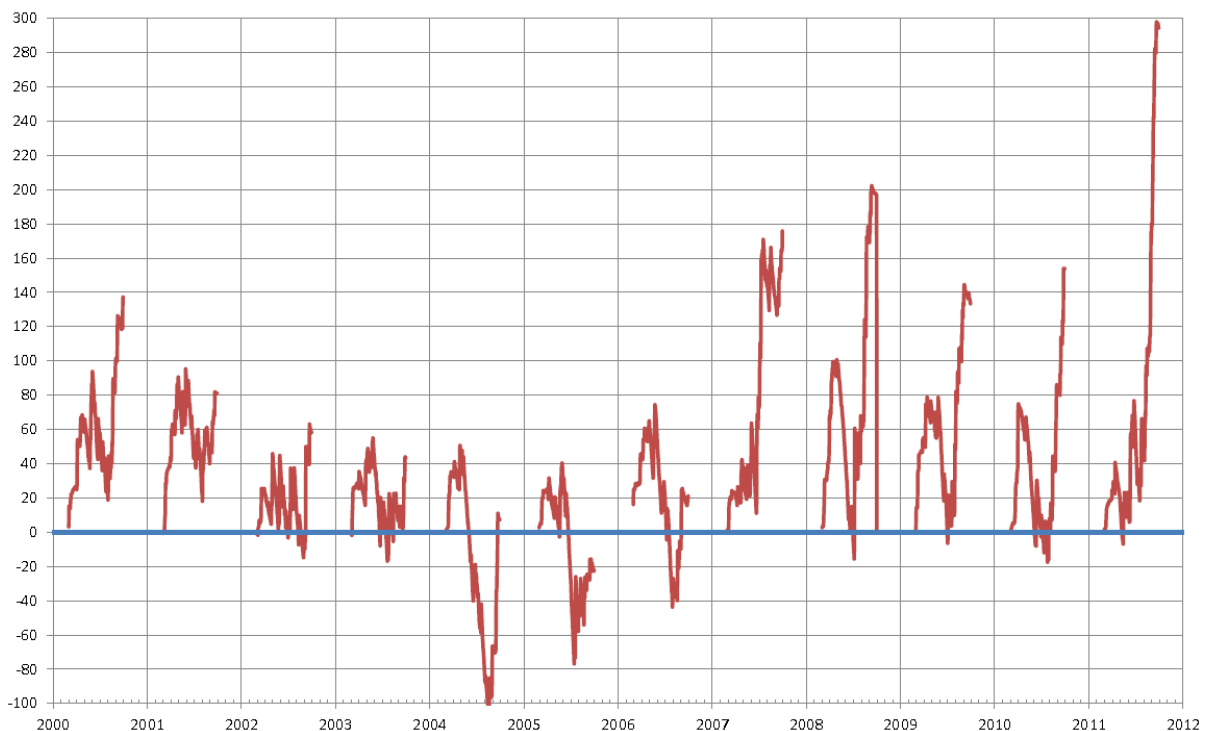


Fig. 15. Nedbøroverskudd (= nedbør – potensiell evapotranspirasjon) for Blindern Oslo for perioden 2000 – 2012. De tre årene 2004 – 2006 skiller seg ut ved å ha nedbørunderskudd.

5. ARBEIDSPAKKE 4: SCENARIER FOR TØRKESTRESS PÅ GRAN VED KLIMAENDRINGER

Hovedmålet med denne arbeidspakke var å lage et scenario for skogens tilvekst under klimaendring, med særlig fokus på en mulig nedgang i produksjonsevne i lavlandet på Østlandet på grunn av et mulig tørrere sommerklima. Dette arbeidet inkluderte både klimadata og tilvekstdata. I tillegg var det et mål i denne arbeidspakke å undersøke om satellittdata kan supplere eller erstatte årringmålinger som uttrykk for skogens vekst.



Fig. 16. Tilvekstboring.

5.1. Klimascenarier

5.1.1. MATERIALE OG METODER

Klimasimuleringer bygger på en rekke nasjonale og internasjonale forskningsprosjekter (RegClim, GeoExtreme, NorACIA, NorClim og PRUDENCE). Disse scenariene er basert dels på en regional klimamodell og dels på en globalmodell. Alle framskrivningene er skalert slik at de gjelder endringer fra perioden 1961–1990 (normalperioden) til 2071–2100. En fullstendig oversikt og omtale av modeller og utslippsscenarier er gitt av Hanssen-Bauer m. gl. (2009). Klimascenarier er basert på empiriske klimaobservasjoner og et bestemt nivå for fremtidig utslipp av klimagasser (utslippsscenarier). Scenariet HADB2 ligger til grunn for de klimatiske verdiene vi benytter i perioden 2071-2100 ved framskrivning av tilvekst i skog. Dette scenariet er ofte brukt ved framskrivninger av klima og utslippsscenarier ut fra dagens kunnskapsstatus.

5.1.2. RESULTATER

Det ventes varmere klima i alle landsdeler og for alle årstider. Årsmiddeltemperaturen i Norge ventes å øke med 2,3 til 4,6 °C innen år 2100, mest om vinteren og minst om sommeren. Temperaturen forventes å øke mest i Nord-Norge. I Finnmark øker den med 3 til 5,4 °C på årsbasis. På Vestlandet øker temperaturen med mellom 1,9 og 4,2 °C. Vekstsesongen blir betydelig lenger med en forventet økning på 1–2 måneder. Nedbøren vil øke med mellom 5 og 30 %.

Tabell 3. Månedsmiddel for temperatur og nedbør på Østlandet

		Under 300 moh.		Over 300 m.o.h	
		Normal	Scenarier	Normal	Scenarier
		1961-1990	2071-2100	1961-1990	2071-2100
Temperatur	Mai	8,9	11,8	6,5	9,7
	Juni	13,3	15,4	10,9	13,2
	Juli	14,7	17,3	12,3	14,9
	August	14	17,3	12	14,9
Nedbør	Mai	69,8	92,5	58,2	85,5
	Juni	72,3	86,8	71,6	88,6
	Juli	84,9	79,7	83,3	78,4
	August	100,4	79,1	86,2	72,4

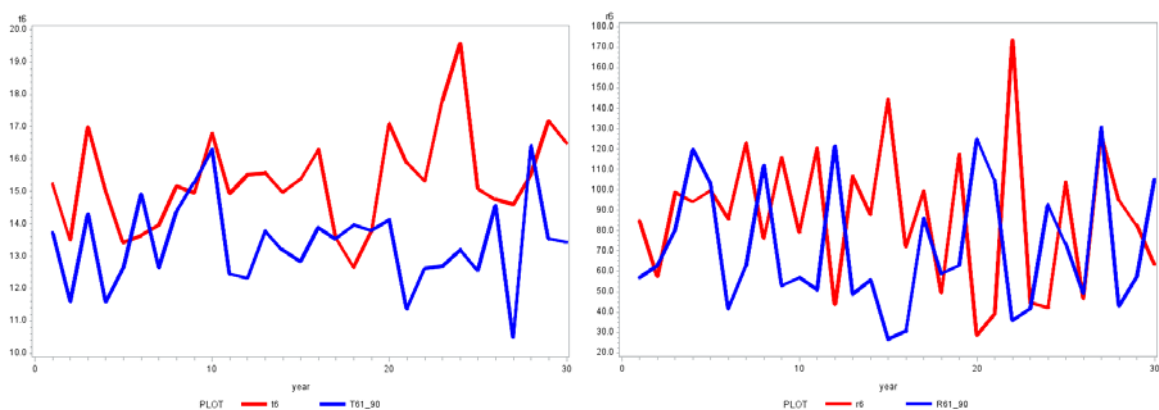


Fig. 17. Normalverdier 1961-1990 (blå) og scenarier 2071-2100 (rød) i lavlandet under 300 m.o.h. på Østlandet. Temperatur til venstre og nedbør til høyre.

5.2. Effekter av klimaendring på tilvekst i skog

Formålet med denne aktiviteten var å lage scenarier for utvikling av skogens produksjonsevne under en klimaendring med +2 grader.

5.2.1. MATERIALE OG METODER

En input til scenariet er såkalte klimarespons-funksjoner. Dette er modeller som beskriver hvordan tilveksten endrer seg ved endringer i klimatiske forhold, og er basert på årringbredder fra borprøver og historiske værdata tatt fra nærliggende lokaliteter. Vi tok tilvekstprøver (borrkjerneprøver) i brysthøyde fra grantrær på skogoppsynets overvåkingsflater for skogskader. Årlig diametertilvekst fra borprøvene ble regnet om til årringindekser for å unngå alderseffekter og effekter av tynninger. Historiske værdata for temperatur og nedbør er basert på daglige målinger på ca 400 meteorologiske stasjoner i Norge, hvor disse er interpolert til hver overvåkingsflate. Ut fra dette har vi beregnet Palmer tørkestyrkeindeks, som integrerer nedbør og temperatur til et uttrykk for tørke. Alle værdataene ble regnet om til månedsverdier. For å lage klimarespons-funksjonene brukte vi en stegvis, multippel regresjonsanalyse, der årringindeks var avhengig variabel og forklaringsvariablene ble valgt ut fra værdataene. De variablene som som klart forbedret modellen (statistisk sikkert bidrag, $p < 10\%$) ble tatt inn i modellen. Vi delte landet inn i 4 regioner og beregnet funksjoner for hver region: 1. Østlandet <350 m.o.h., 2. Østlandet >350 m.o.h., 3. Vestlandet (Rogaland, Hordaland, Sogn og Fjordane, Møre og Romsdal), og 4. Nord-Norge inklusive Trøndelag.

Disse modellene (klimarespons-funksjonene) ble så brukt sammen med klimadata for en realisasjon av en gitt klimaendring for å generere scenariet for tilvekst. Med begrepet «realisasjon» mener vi her at hvert felt og hver dag i perioden 2071-2100 er gitt verdier for nedbør og temperatur, hvor både forventning og variasjon er tatt hensyn til. Det betyr at vi hadde tidsserier med værdata for feltene som inkluderte typiske variasjoner fra dag til dag, og også tilfeldige ekstremverdier. Vi har da fått modellerte årringindekser for perioden 2071-2100 og har regnet disse om til %-verdier i forhold til årringindekser for 1961-1990. Scenariet for klima er basert på empiriske klimaobservasjoner og et bestemt nivå for fremtidig utslipp av klimagasser. Vi benyttet scenariet «HADB2»

5.2.2. RESULTATER

Resultatene viste en økning av tilveksten hos gran i det alle landsdeler. Økningen (ΔV) var størst i Nord-Norge og i høyereliggende skog på Østlandet, der den var ca 18 % (Tabell 4). I lavereliggende strøk av Østlandet og på Vestlandet ble økningen 12-13 %. Temperaturøkningen gav altså ikke noen nedgang i lavlandet på Østlandet, som ventet pga mer tørke. Dette skyldes at i den delen av sommeren der det meste av tilveksten skjer, juni, så ventes det at temperaturøkningen vil følges av en nedbørøkning. Det blir altså ikke tørrere i juni. Så lenge trærne har nok vann så kan de utnytte temperaturøkningen til å øke tilveksten. Det må understrekes at disse resultatene gjelder et klimascenario på bare +2 grader.

Tabell 4. Modeller og scenarier for tilvekst i gra. Palmer er tørkestyrkeindeks, N er antall felt brukt i modelleringen, og ΔV er endring i diametertilvekst for perioden 2071-2100 i forhold til perioden 1957-1998

Region	Modell for årringindeks	R ²	N	ΔV
Østlandet <350 moh	$0,377 + 0,037T_{jul} + 0,0012N_{jun} + 0,025Palmer_{aug}$	0,32	228	+12 %
Østlandet >350 moh	$0,377 + 0,014T_{jun} + 0,035T_{jul} + 0,0005N_{aug} + 0,02Palmer_{jul}$	0,32	167	+18 %
Vestlandet	$0,366 + 0,021T_{mai} + 0,012T_{jun} + 0,026T_{jul} - 0,011Palmer_{aug}$	0,49	73	+13 %
Nord-Norge	$0,119 + 0,025T_{mai} + 0,044T_{jun} + 0,026T_{jul} - 0,0008N_{mai} + 0,0013N_{jun} - 0,0008N_{aug}$	0,67	154	+18 %

5.3. Sammenheng mellom årringbredder og vegetasjonsindekser fra satellitt

Årringindekser fra trær har i lang tid vært benyttet som en indikator på hvor god vekst trærne har hatt i det enkelte år bakover i tid. I denne aktiviteten har vi undersøkt om årringindekser kan suppleres med eller erstattes av satellittdata. Vi har her prøvd ut satellittsensoren MODIS. Den sitter på satellittene Terra og Aqua, og tar bilder over hele kloden hver dag eller annenhver dag. Sensoren har flere bølgelengder, inkludert rødt og nærinfrarødt. Ettersom klorofyllet i trærne benytter rødt lys men i liten grad benytter nærinfrarødt, så kan man generere et uttrykk for fotosynteseaktivitet ved vegetasjonsindeksen $NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$, hvor NIR = reflektans av nærinfrarødt sollys og R er reflektans av rødt sollys. Høy fotosynteseaktivitet gir høy $NDVI$ ettersom R minsker fordi plantene absorberer rødt lys. $NDVI$ varierer mellom -1 og 1.

5.3.1. MATERIALE OG METODER

Vi valgte ut 14 av skogoppsynets overvåkingsflater i Vestfold, med det kriterium at de skulle ha grandominert skog omkring seg i et sirkelformet område med radius 1 km. Dette var nødvendig fordi MODIS har store pixler (250 m x 250 m). På hvert felt valgte vi ut 10 grantrær som ble boret i brysthøyde. Vi målte årringbredder i borprøvene, som gav en tidsserie for hvert tre. Disse tidsseriene ble filtrert med et 33 år (det aktuelle året ± 16 år) langt gauss-filter for å fjerne langtidstrender i tilvekst samt effekter av eventuelle tynninger. På denne måten fikk vi årringindekser med middelverdi 100 for hvert tre, som skal representere effekten av klimatiske variasjoner fra år til år. Vi ekstraherte $NDVI$ -verdier fra MODIS for hvert år, aggregert opp til 8 dagers maksimumsverdier. Ut fra dette hentet vi ut maksimum 8-dagers verdi for hver sommer, som representerer den 8 dagers-verdien hvor fotosynteseaktiviteten var høyest.

5.3.2. RESULTATER

Det var en sterk samvariasjon mellom årringindeks og maksimum 8-dagers $NDVI$ -verdi. Særlig tydelig var det at sommeren 2006 hadde lav tilvekst på trærne og også hadde lav $NDVI$ -verdi, dvs at fotosynteseaktiviteten ikke nådde opp på samme verdi som de andre somrene. Dette indikerer at man for framtiden kanskje kan overvåke skogens vitalitet og tilvekst på regional skala ved hjelp av vegetasjonsindekser fra MODIS. Nye satellitter med høyere oppløsning (Sentinel-2) kan muliggjøre dette på lokal skala og på bestandsnivå.

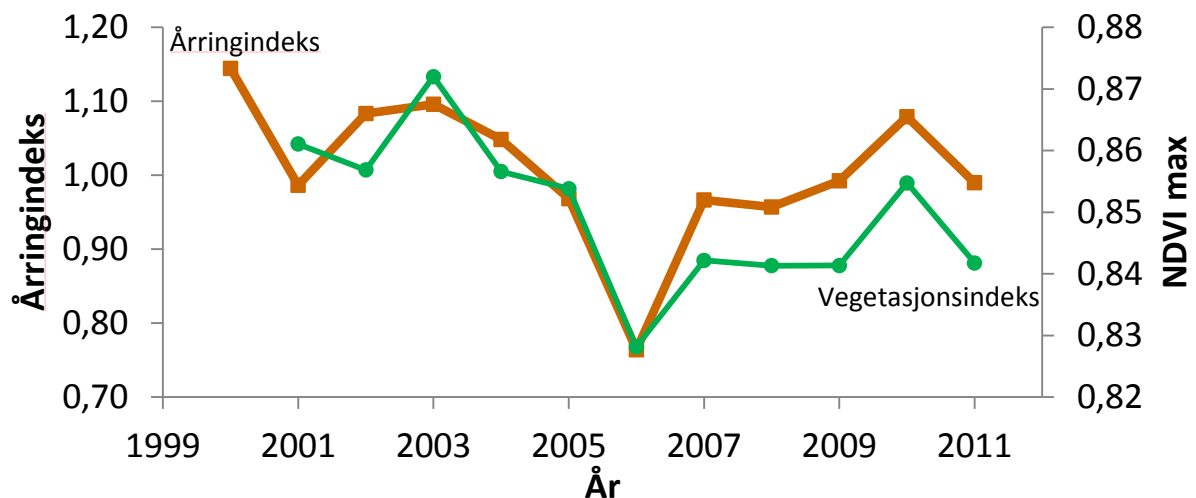


Fig. 18. Årringindeks for 14 granfelt og maksimumsverdi for $NDVI$ vegetasjonsindeks fra satellittsensoren MODIS for et sirkulært område med 1 km radius rundt hvert felt for perioden 2000-2011.

6. ARBEIDSPAKKE 5: MULIGE ENDRINGER I SKOGBEHANDLINGEN I LAVLANDET PÅ ØSTLANDET FOR Å MØTE KLIMAENDRINGENE

Denne arbeidspakke har ikke inneholdt forskning, dvs generering av ny viten. Den har derimot utgjort en overføring av eksisterende viten fra dansk skogbruk til norsk skogbruk på Østlandet. Formålet med denne arbeidspakke var å tilrettelegge for en kompetanseoppbygging om bruk av løvtrær og andre alternativer til gran i skogbruket i denne landsdelen. Arbeidet har bestått i en rekke befaringer og møter i Norge og Danmark, hvor norske skogbrukere har fått informasjon og råd basert på erfaringer og forskning i dansk skogbruk.



Fig. 19. Arbeidsgruppa fra vestfoldskogbruket på utferd i Danmark 2011. Foto Palle Madsen.

6.1. Treslag og skogbehandling for å møte klimaendringene

Det er i prosjektet vist at gran er særlig utsatt for tørkeskader på visse lokaliteter. Det er derfor vurdert alternativer til konvensjonelt skogbruk med gran på slike lokaliteter. Treslagsblanding kan være et alternativ, fordi det gir risikospredning. Ulempen ved treslagsblanding er at det krever mer skjøtsel, og mer kompetanse om spesielle skjøtelsesformer. Det er for øvrig også slik at vi i Norge har få naturlige treslag å velge mellom, sammenliknet med artsmangfoldet i Nord-Amerika og Asia, noe som skyldes fjellkjeder og havområder i Europa som har virket som barrierer under treslagenes forflytninger mellom istider. Dette kan være et argument for å introdusere fremmede treslag i større grad til Norge.

6.1.1. TRESLAGSVALG PÅ PROBLEMOMRÅDE 1: MARINE AVSETNINGER

Dette er jordtyper med høyt leireinnhold, hvor gran er ekstra utsatt for skader ved drukning av finrøtter når vannspeilet i jorda står høyt, og ved tørkestress og vindfall på grunn av grunt og svakt utviklet rotsystem. Samtidig er dette områder med høy produksjonsevne.

Alternativ 1. Korte omløp med rein gran: Dette er en enkel løsning som ikke krever noen tilpasninger i dagens skogskjøtsel. Omløpstida kan være omkring 40 år, eller inntil bestandet begynner å skranke.

Alternativ 2. Barblanding med grupper av løvtrær: Plantet enkelttreblanding af gran og furu (50/50%) med 20 m x 20 m grupper av lind og svartor på 30-40% av arealet.

Alternativ 3. Eik-furu-lind-svartor i grupper: Trærne står i gruppevis blanding, hvor gruppene er 40 m x 40 m. En variant er å ha lind og svartor innblandet som enkelttrær. Trærne kan plantes eller såes.

6.1.2. TRESLAGSVALG PÅ PROBLEMOMRÅDE 2: VELDRENERT JORD

Dette er jord med lav vannkapasitet, som sand, forvittringsmateriale og oppsprukken berggrunn. Gran er her utsatt for tørkeproblemer.

Alternativ 1. Barblanding med grupper av bøk og lind: Barblandingen kan bestå av 50% gran, 25% lerk og 25% douglas, mens bøk og lind kan stå i 20 m x 20 m grupper på 10-20% av arealet. Lerk, og til en viss grad gran, fungerer som skjermtrær for douglas og bøk. Planting bør benyttes.

Alternativ 2. Eik og furu i grupper: Det plantes eik og furu 50/50% i 40 m x 40 m grupper.

Alternativ 3. Bøk, lind og douglas med hjelpekultur: En skjermtrær etableres ved planting av lerk, - 110 trær per daa. Senere såes bøk, lind og douglas under skjermen. Skjermen må deretter tynnes hardt, og man må ikke vente for lenge med dette. Generelt kan innslag av naturlig forynget bjørk utnyttes som skjerm, mens naturlig forynget gran må fjernes i de tilfeller der den kan utgjøre konkurranse med andre ønskede hovedtreslag.



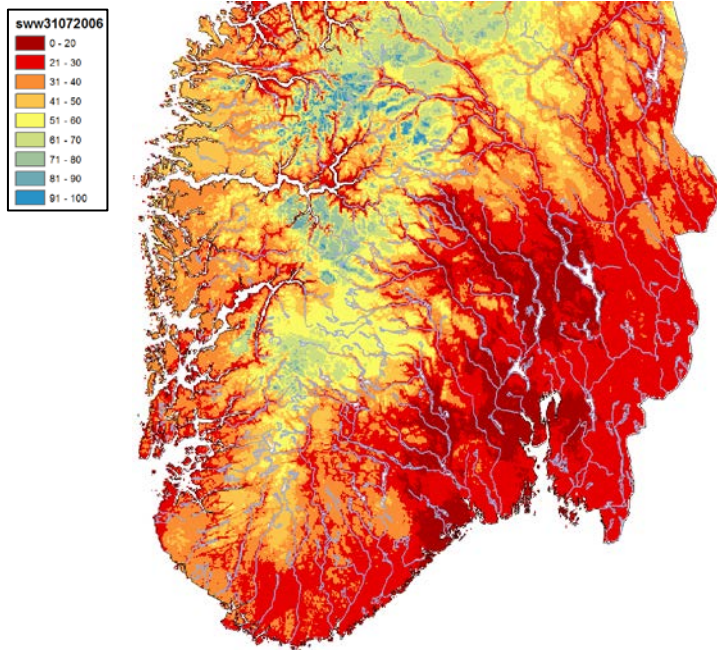
Fig. 20. Eksempel på skogbehandling i Danmark. Douglas plantet under skjerm av osp. Skjermens oppgave er å hindre frost og dempe oppslag av ugress.

7. DISKUSJON

Årsaken til toppskrantingen har vært moderat tørkestress i somrene 2004, -05 og -06. Nedbørmengden var i perioder av disse somrene lavere enn potensiell evapotranspirasjon. Det var altså et nedbørunderskudd, og en form for tørke som kan kalles 'meteorologisk tørke', dvs hvor tilgangen på vann i jorda har noe mindre betydning (Fig. 21). Det var en kombinasjon av høy temperatur og vedvarende vind av svak-moderat styrke som har ført til høy potensiell evapotranspirasjon. Trær som ble rammet av dette fikk kraftig uttørking av toppene. Det oppstod kavitasjon i vannledningsbanene i stammen, dvs luft- eller gassbobler som hindrer vanntransport. Kavitasjon er reversibelt, men dette krever et aktivt trykk av vann oppover fra rotsystemet. Undersøkelser viste betydelig avdøing av finrøtter, noe som kan være en følge dels av tørken og dels av at kavitasjonen har svekket treet generelle helsetilstand og dermed transporten av karbohydrater fra krona til røttene. Med en vedvarende kavitasjon i stammen har enkelte grantrær kommet inn i en ond sirkel med kraftig skranting.

Det var bare spredte enkelttrær som ble rammet av skadene, og disse stod blant helt friske grantrær. Resultatene tyder på at de rammede grantrærne har vært ekstra mottakelige for disse tørkeskadene. Gjennomgående har de hatt dårligere kontroll på spalteåpningene, noe som er vist ved at de hadde lavere konsentrasjon av ^{13}C i veden enn friske kontrolltrær (Gessler 2011). Gjennomgående har de også hatt trakeider med større tverrsnitt og tynnere cellevegger. Store trakeider (tverrsnitt) øker risikoen for kavitasjon, mens tynne cellevegger øker risikoen for kollaps av trakeiden (Rosner m. fl. 2013). Vi har ut fra dette generert en hypotese om at vi har to former av gran. Den første formen har vi valgt å kalle 'vannsløser', dvs trær som tydeligvis ikke er tilpasset tørkestress. De hadde både dårlig kontroll på spalteåpningene og store, tynnveggede trakeider i vårveden. De har trolig ikke lukket spalteåpningene effektivt i somrene 2004 – 2006, og dermed fått en sterk skade. Den andre formen har vi kalt 'de tørkeresistente', og de har hatt god kontroll på spalteåpningene og mer trange, tjukkevagede trakeider i vårveden. Dette er naturligvis en pedagogisk framstillingsmetode, mens det i virkeligheten trolig er slik at grantrær fordeler seg over en gradient av spalteåpningskontroll og en gradient av trakeideegenskaper. Resultatene tyder på at dette er genetiske styrte egenskaper, fordi de har vært stabile gjennom de undersøkte årene. At det er genetisk kan imidlertid ikke fastslås ut fra dette prosjektet, og bør undersøkes nærmere i videre prosjekter. Hvis dette virkelig er genetisk styrt gir det grunnlag for en foredling for å øke tørkeresistens hos gran.

Som nevnt over var tørken i disse somrene 2004-2006 en meteorologisk tørke, hvor markvannsinholdet kanskje spilte en noe mindre rolle enn ved vanlig tørkestress. Det var imidlertid også lavt beregnet markvannsinhold i flere perioder i disse somrene, dvs lavere enn 20 % og 30 % av potensiell markvannsinhold. Figuren under viser markvannssituasjonen da den var på det laveste i 2006, den 30. juli. Store deler av lavlandet på Østlandet hadde markvannsverdier under 30 % og en del områder under 20 %. 2006 var en svært varm sommer på Østlandet. Nedbørverdiene i perioden 2000-2010 ligger moderat over normalnedbørverdien for de fleste årene. Unntaket er 2005 og 2006 der sommernedbøren ligger på eller like under normalverdien. I 2005 var også våren litt mer nedbørfattig enn normalen. I perioden 2000-2010 hadde årene 2005 og 2006 et moderat vannunderskudd. Markvannutviklingen gjennom disse to somrene er beregnet med hydrologiske modeller, og viste at minimumsverdiene lavere enn 25 % i begge somrene, noe som betyr at de var blant de 25 % tørreste somrene i Oslo.



Figur 21. Aktuelt markvannivå 30. juli 2006 (% av total vannkapasitet). Figuren viser lave verdier for store deler av Østlandet, verdier som ligger under 25 % persentil verdien (den underste blå prikkete linjen i diagrammet over).

Tørken i somrene 2004-2006 var kun moderat. Det var betydelig tørrere i tørkesomre som 1947, 1976 og 1992 (Solberg 2004). Skadeomfanget var imidlertid også kun moderat, og langt mer beskjedent enn i de nevnte tørkeårene. Avdøingen for denne landsdelen var normal, men toppet seg i årene 2006 og 2007. Toppskrantingen må derfor karakteriseres som et stort problem på enkelte lokaliteter, men av liten betydning for landsdelen samlet sett. At granskogen generelt ikke har problemer i denne landsdelen understøttes av resultatene for utvikling av bonitet. Høydeboniteten har gjennomgående økt med litt over en bonitetsklasse, eller nesten 4 meter, i gjennomsnitt fra 19,8 til 23,6 på de langsiktige feltforsøkene. Lavest høydebonitet var det på 1930-tallet, med et gjennomsnitt på 19,8 m, og deretter var det en økning på 2,5 m frem til 1960-tallet. På 1970-tallet var det en midlertidig nedgang på 0,3 m. Fra 1980-tallet har det vært en betydelig økning på 1,4 m. Årsaken til økningen kan delvis være tilførselene av nitrogen med nedbøren, som har økt siden 1950-tallet. En økt produksjonsevne på 5-20% i den sørligste delen av Norge som følge av nitrogentilførselene er vist i andre studier (Solberg m. fl. 2004; 2009). I denne landsdelen er tilførselene 0,5 – 2 kg N/daa per år. Den største tilførselen finner vi i den sørligste delen av landet, og i mengde tilsvarer den det som tidligere var anbefalt gjødslingsdose i skog, dvs. 15 kg N/daa hvert 7. år. Det kan også være klimaendringseffekter i bonitetsendringene, dvs endringer i temperatur, nedbørmengde og CO₂-konsentrasjon. Nedgangen på 1970-tallet er trolig en effekt av flere tørre somre, dvs 1974, 1976 og 1977. Dette viser at klimatiske forhold har en effekt, men hvor mye de klimatiske forholdene kan forklare av økningen de siste 30 årene er ukjent. Temperaturen i Norge har vist en jevn økning de siste 15-20 årene, og de fleste årene etter 2000 er blant varmeste siden 1900. På Østlandet har temperaturøkningen vært størst om vinteren og våren, mens økningen har vært moderat sommer og høst. Scenariene for utvikling av tilvekst viste også at klimaendringene vil føre til en økning framover mot slutten av dette århundre, dersom den globale temperaturstigningen blir 2 grader.

Lokaliteter uten sigevann i marka har vært særlig utsatt, dvs områder som er flate, med god drenering eller dårlig rotutvikling. De marine avsetninger med høyt leireinnhold ser ut til å

være særlig utsatte. Det er velkjent at gran er ekstra utsatt for ulike skader på leire, dvs mer utsatt enn de fleste andre treslag.

Prosjektet har også vist at satellittovervåking har et potensiale for å overvåke vekst og vitalitet i granskog, i form av årlige verdier for vegetasjonsindekser. Slike indekser kan utfylle årringindekser fra borprøver, og ved at satellitter kan gjøre heldekkende og regelmessig opptak i tid kan man få fram variasjoner i tid og rom. Vi har i dette prosjektet brukt satellittsensoren MODIS. Den har lav romlig oppløsning, dvs 250 m x 250 m pixler. I nær framtid vil vi få tilgang på de nye Sentinel overvåkingssatellittene. Særlig vil sentinel-2, med planlagt oppskyting i 2015 kunne gi data av samme type som MODIS, men med langt høyere oppløsning.

8. KONKLUSJON

Prosjektets hovedhypotese var at klimascenariets økende temperatur og avtakende nedbørmengde om sommeren ville føre til mer tørkestress på gran i lavlandet på Østlandet. Toppskranting og andre typer tørkeskader på gran i denne landsdelen i dag kunne være et første tegn til at klimaendringene allerede har begynt å føre til tørkeskader i den aller varmeste og tørreste delen av landet, langs sørgrensa for den boreale sone mot den nemorale sone. Samlet sett viser resultatene fra prosjektet at det ikke er grunnlag for denne bekymringen, fordi:

- Økt temperatur om sommeren vil oppveies av mer nedbør, særlig på forsommeren
- Toppskrantingen er ikke et omfattende problem, men kun et lokalt problem på enkelte lokaliteter, og omfanget av mortalitet er normalt for landsdelen som helhet
- Produksjonsevnen på gran har økt med omkring en bonitetsklasse siden 1930-tallet
- Skogens tilvekst er beregnet å øke under et klimascenario med +2 grader

Vi vil imidlertid understreke at dette er basert på en global temperatur-stigning på 2 grader. Mye tyder på at oppvarmingen blir større, og dette sammen med at det er stor usikkerhet omkring klimaendringene, gjør at det er stor usikkerhet om hvordan grana vil klare seg. Dette taler for risikospredning ved å satse på flere treslag og korte omløpstider. For øvrig viser det brukte klimascenariet (HadB2) i dette prosjektet at det kun er i mai og juni at økt nedbør vil kompensere for økt temperatur, mens det blir lavere nedbørmengder og dermed mer tørkestress i juli og august. Dette kan særlig føre til mer angrep av dobbeltøyet barkbille, som svermer på ettersommeren og angriper tørkestresset gran. Prosjektet har også vist at satellittovervåking har et potensiale for å overvåke vekst og vitalitet i granskog, i form av årlige verdier som kan utfylle årringindekser fra borprøver.

ETTERORD

Vi takker Norges Forskningsråd, Fylkesmannens landbruksavdeling i Østfold, Akershus/Oslo, Buskerud, Vestfold, Telemark og Aust-Agder, samt Viken skog og AT skog via Skogtiltaksfondet for finansiering av prosjektet.

LITTERATUR

- Andreassen, K. & Øyen, B.-H. 2002. Nye tilvekstmodeller for granskog. Aktuelt fra Skogforsk 6/02, 10-12.
- Andreassen, K., Eid, T. & Tomter, S. 2008. Bestandstilvekstmodeller for alminnelig ensaldret skog i Norge. Forskning 6/08, 1-19.

- Andreassen, K., Solberg, S., Tveito, O. E., Lystad, S. L. 2006. Regional differences in climatic responses of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Norway. *Forest Ecology and Management* 222(1-3): 211-221.
- Beldring, S., Engeland, K., Roald, L.A., Sælthun, N.R. og Voksø, A. (2003) Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway, *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3), 304-316.
- Børja I, Světlík J, Nadezhdin V, Čermák J, Rosner S, Nadezhdina N. 2013. Sap flow dynamics as a diagnostic tool in Norway spruce. *Acta Horticulturae* 991: 31-36.
- Børja I, Světlík J, Nadezhdin V, Čermák J, Rosner S, Nadezhdina N. 2013. Sap flow dynamics – a diagnostic tool in early assessment of health status in Norway spruce. Submitted to *Trees* (13. December 2013)
- Gessler, A., 2011. Carbon and oxygen isotopes in trees: tools to study assimilate transport and partitioning and to assess physiological responses towards the environment. *Prog. Bot.* 72 72, 227–248.
- Hanssen-Bauer, Inger (Ed) 2009: Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning. Norsk klimasenter, 136 s.
- Nadezhdina N., Vandegehuchte MW., Steppe K. 2012. Sap flow measurements based on Heat Field Deformation method. *Trees*.26:1439-1448.
- Rosner S, Světlík J, Andreassen K, Børja I, Dalsgaard L, Evans R, Karlsson B, Tollefsrud MM and S. Solberg 2013. Wood density as a screening trait for drought sensitivity in Norway spruce. *Can. J. For. Res.* In press.
- Solberg, S, Andreassen, K., Clarke, N., Tørseth, K., Tveito, O.E., Strand, G.H. & Tomter, S. 2004. The possible influence of nitrogen and acid deposition on forest growth in Norway. *Forest Ecology and Management*. 192: 241-249.
- Solberg, S. 2004. Summer drought, - a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. *Forest pathology* 34: 93–104.
- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G.J., Lange, H., Andreassen, K., Garcia Fernandez, P., Hildingsson, A., & deVries, W. 2009. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management*, 258: 1735–1750.
- Světlík J, Børja I, Rosner S, Čermák J, Nadezhdin V and Nadezhdina N. 2013. Differential Translucence Method as a Verification to Sap Flow Measurement in Norway Spruce with Symptoms of Top Dieback. *Acta Horticulturae* 991: 285-292.
- Tollefsrud, M.M., Kissling, R., Gugerli, F., Johnsen, Ø., Skrøppa, T., Cheddadi, R., van der Knaap, W.O., Latałowa, M., Terhurne-Berson, R., Litt, T., Geburek, T., Brochmann, C. & Sperisen, C. (2008) Genetic consequences of glacial survival and postglacial colonization in Norway spruce: combined analysis of mitochondrial DNA and fossil pollen. *Molecular Ecology*, 17, 4134-4150.
- Tveito, O.E., Bjørndal, Skjelvåg A.O. & Aune, B. 2005. A GIS-based agro-ecological decision system based on gridded climatology. *Meteorol. Appl.* 12, 57–68