



Inverkan av röjning och gödsling på mikrofibrillvinkeln i tallens (*Pinus sylvestris* L.) ungdomsved

*The influence of pre-commercial thinning and fertilization on micro fibril
angle in young Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood*

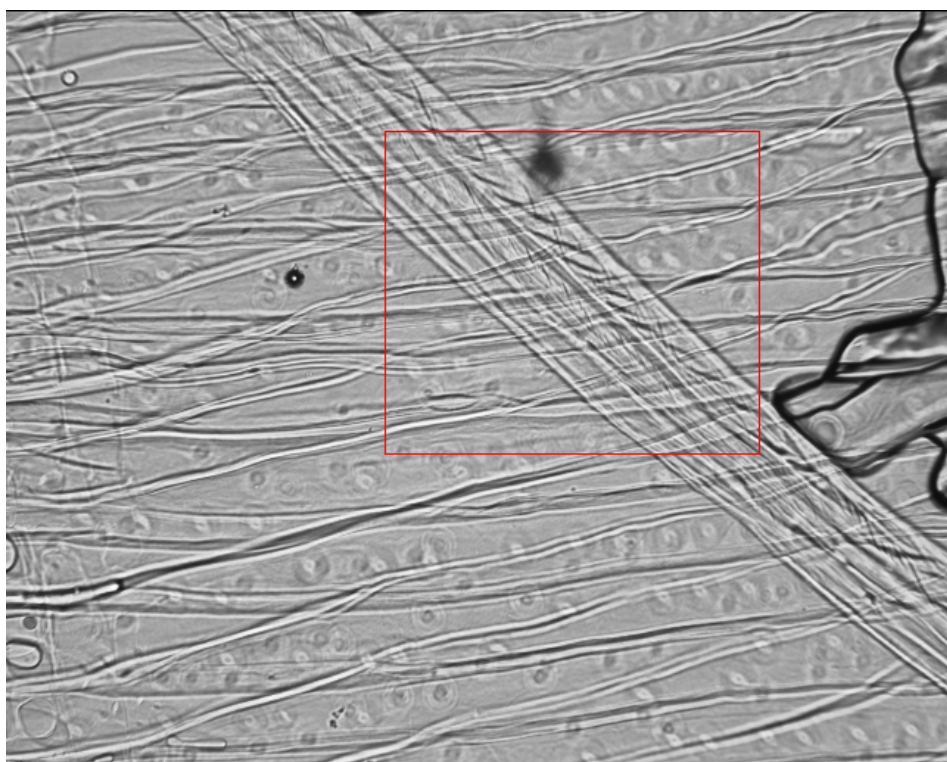


Foto: Björn Henningsson

Björn Henningsson



Examensarbeten

Institutionen för skogens ekologi och skötsel

2012:7

Inverkan av röjning och gödsling på mikrofibrillvinkeln i tallens (*Pinus sylvestris* L.) ungdomsved

*The influence of pre-commercial thinning and fertilization on micro fibril
angle in young Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood*

Björn Henningsson

Nyckelord / *Keywords:*

Skogsskötsel, vedcell, cellvägg, kambial ålder, vedegenskaper, kvalitet, juvenil /
Silvicultural regime, wood cell, cell wall, cambial age, wood structure, quality, juvenile

ISSN 1654-1898

Umeå 2012

Sveriges Lantbruksuniversitet / *Swedish University of Agricultural Sciences*

Fakulteten för skogsvetenskap / *Faculty of Forest Sciences*

Jägmästarprogrammet / *Master of Science in Forestry*

Examensarbete i skogshushållning / *Master degree thesis in Forest Management*

EX0706, 30 hp, avancerad nivå/ *advanced level A2E*

Handledare / *Supervisor:* Thomas Ulvcrona

SLU, Enheten för skoglig fältforskning / *SLU, Unit for field-based forest research*

Examinator / *Examiner:* Urban Bergsten

SLU, Inst för skogens ekologi och skötsel / *SLU, Dept of Forest Ecology and Management*

I denna rapport redovisas ett examensarbete utfört vid Institutionen för skogens ekologi och skötsel, Skogsvetenskapliga fakulteten, SLU. Arbetet har handledts och granskats av handledaren, och godkänts av examinator. För rapportens slutliga innehåll är dock författaren ensam ansvarig.

This report presents an MSc/BSc thesis at the Department of Forest Ecology and Management, Faculty of Forest Sciences, SLU. The work has been supervised and reviewed by the supervisor, and been approved by the examiner. However, the author is the sole responsible for the content.

Förord

Ett stort tack till min handledare Thomas Ulvcrona. Thomas har under hela arbetets gång varit engagerad, positiv samt bidragit med idéer, kloka tankar och konstruktiva tips.

Jag vill även tacka Daniel Eriksson för förevisning av provberedning och mikroskopering, Magnus Ekström för hjälp med statistisk bearbetning av data, min far Olle Henningsson för värdefulla tips främst rörande mikroskopering men även kring fiberidentifiering och Tommy Mörling för hjälp rörande praktiskt arbete i laboratoriet.

Innehållsförteckning

1 Inledning	5
1.1 Bakgrund	5
1.2 Vedcellen.....	5
1.3 Mikroibrillvinkelns variation	6
1.4 Mikroibrillvinkelns betydelse	7
1.5 Påverkan på mikroibrillvinkeln.....	8
1.6 Mätning av mikroibrillvinkeln.....	9
1.7 Problemformulering	9
2 Material och metod	11
2.1 Lokal.....	11
2.2 Urval.....	11
2.3 Provberedning	11
2.4 Datainsamling.....	12
2.5 Statistisk analys	14
3 Resultat	15
3.1 Behandlingens effekt på mikroibrillvinkeln	15
3.2 Mikroibrillvinkelns variation.....	18
4 Diskussion.....	20
4.1 Behandlingens effekt på mikroibrillvinkeln	20
4.2 Mikroibrillvinkelns variation.....	22
4.3 Metod	23
4.4 Slutsatser	24
5 Referenser	26

Inverkan av röjning och gödsling på microfibrillvinkeln i tallens (*Pinus sylvestris* L.) ungdomsved

Sammanfattning

Tall (*Pinus sylvestris* L.) är ett av Sveriges viktigaste trädslag. Med ökad efterfrågan på vedråvara samt ökade krav på naturavsättningar är det viktigt att öka produktionen i skogen. Röjning och tidig gödsling ger ökad volymproduktion men kan ge icke önskvärd påverkan på vedegenskaper som ökad microfibrillvinkel (MFV). MFV är vinkeln mellan microfibrillerna i cellväggs S2-lager och cellens längdaxel och påverkas av ståndort samt konkurrensen om ljus och näringsämnen. Höga MFV resulterar i sämre kvalitet på papper och sågade trävaror. Målet med denna studie var att undersöka huruvida fyra behandlingar; behandling 1, obehandlad kontroll, ingen röjning, ingen gödsling; behandling 2, röjning till 3000 stammar ha⁻¹, ingen gödsling; behandling 3, ingen röjning, gödslat sedan 1997 med 100 kg N ha⁻¹ årligen; behandling 4, röjning till 3000 stammar ha⁻¹ och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha⁻¹ påverkade MFV hos 17-åriga tallar. Detta uppfylldes genom att mäta sprickorna inducerade i vedcellernas S2-lager genom upprepad uppfuktning samt torkning av frilagda vedceller. Resultatet visade att tre år efter behandling gav röjning och årlig gödsling en ökad MFV jämfört med obehandlad kontroll, med den största ökningen för årlig gödsling. Sex år efter första behandlingarna gav samtliga behandlingar en ökad MFV jämfört med obehandlad kontroll och ökningarna var större än tre år tidigare. Röjning, årlig gödsling samt röjning/gödsling påverkade generellt den förväntat gradvisa nedgången från märke till bark på så sätt att MFV ökade med ökande kambial ålder. Variationen i MFV kunde i denna studie inte helt förklaras av kambial ålder, diameter i brösthöjd, trädhöjd, krongräns, antal grannar inom en meter, avstånd till märke eller årsringsbredd. Resultaten visar att man genom olika behandlingar kan påverka MFV i tallens ungdomsved och därmed pekar resultatet också på att det finns möjligheter att utveckla skogsskötselsystem med vilka man kan producera ved av önskad kvalitet.

Nyckelord: skogsskötsel, vedcell, cellvägg, kambial ålder, vedegenskaper, kvalitet, juvenil

Abstract

Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is one of Sweden's most important tree species. With the increase in demand for wood raw materials as well as for nature reserves an increased production is desired. Pre-commercial thinning (PCT) and early fertilization increases volume production but can also negatively affect wood properties such as microfibril angle (MFA). MFA is the angle between the microfibrils in the S2 cell wall layer and the cell's long axis and can be influenced by site and competition for light and nutrients. High MFA results in lower quality paper and sawn timber products. The objective of this study was to investigate whether the four treatments;

treatment 1, control, no PCT, no fertilizer; treatment 2, PCT to 3000 stems ha⁻¹, no fertilizer; treatment 3, no PCT, fertilizer applied since 1997 with 100 kg N ha⁻¹ annually; treatment 4, PCT to 3000 stems ha⁻¹ and fertilized once in 1997 with 100 kg N ha⁻¹ affect MFA of 17-year-old pines. This was achieved by measuring cracks in cell wall of the S2 layer induced by repeated moistening and drying of the macerated wood cells. The results showed that three years after the treatments, PCT and annual fertilization resulted in an increased MFV when compared to the untreated control; with the largest increase with annual fertilization. Six years after the treatments were started all treatments increased MFV when compared to untreated control and the increases were generally greater than three years earlier. PCT, annual fertilization and a combination of both PCT and fertilization affected the expected decline in MFA from pith to bark in such way that the MFA increased with increasing cambial age. The variation in MFA could in this study not be explained by diameter at breast height, tree height, green crown height, number of trees within one meter, distance to pith or width of tree ring. The results imply that it is possible to affect the MFA by different silvicultural management strategies and thereby produce wood with desired quality.

Key words: silvicultural regime, wood cell, cell wall, cambial age, wood structure, quality, juvenile

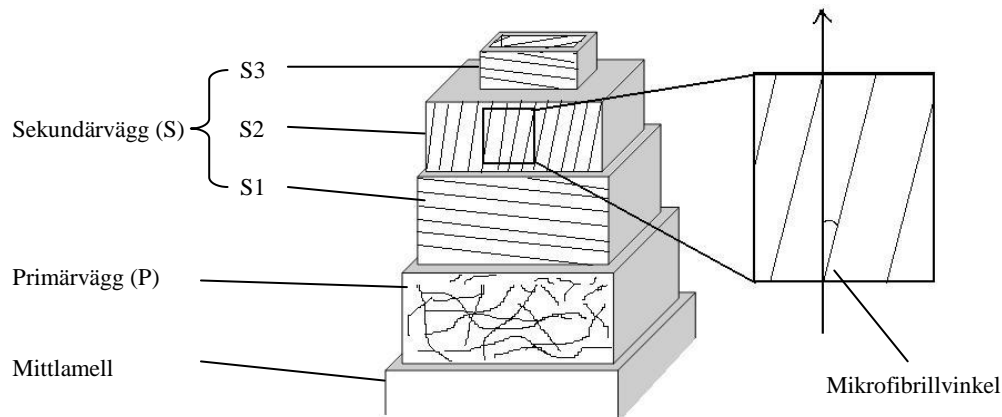
1 Inledning

1.1 Bakgrund

Tall (*Pinus sylvestris* L.) är ett av Sveriges viktigaste trädslag. Det används som råvara till bland annat sågade trävaror, pappersmassa och biobränsle. Då efterfrågan på vedråvara förutspås öka och kraven på naturavsättningar samtidigt ökar är det viktigt att också öka produktionen i skogen. Genom röjning och gödsling kan volymproduktionen ökas genom att konkurrensen om ljus, näring och vatten minskar (Valinger, 1992; Mörling, 1999). En ökad tillväxt kan dock även leda till förändrade egenskaper i veden hos kvarvarande träd som minskad densitet, tunnare cellväggar, kortare fibrer och ökad mikrofibrillvinkel (MFV) (Tsuomis, 1991; Desch & Dinwoodie, 1996). Beroende på vad man sedan använder vedråvaran till kan dessa förändrade vedegenskaper skapa problem i produkter. MFV är en av de viktigaste vedegenskaperna och påverkar vedens och enskilda fibrers mekaniska och fysikaliska egenskaper (Tsuomis, 1991; Desch & Dinwoodie, 1996). Höga MFV resulterar i ved med bland annat lägre styvhet i materialet och problem med ojämn krympning och papper med sämre hållfasthet och styvhet (Daniel, 2009; Donaldson, 2008; Page *et al.*, 1977; Megraw, 1985).

1.2 Vedcellen

Vedceller består till största delen av cellulosa, hemicellulosa och lignin. Cellulosan fungerar som ett skelett och hålls samman av hemicellulosa och lignin. Cellulosakedjorna är hopbuntade till mikrofibriller. Vedcellens cellvägg består av en primär- och en sekundärvägg och vedcellerna är sammanfogade via mittlamellen. Sekundärväggen består tre lager: S1, S2 och S3 (Daniel, 2009). De olika lagren kan särskiljas på riktningen som mikrofibrillerna är lindade runt cellens längdaxel, antingen höger (Z-helix) eller vänster (S-helix) samt vinkeln de bildar mot cellens längdriktning (Daniel, 2009; Lindström *et al.*, 1998). S1 och S3 är relativt tunna och sekundärväggen domineras av S2-lagret (ca 80 % av tjockleken för gran (*Picea abies*)) (Daniel, 2009). S2-lagret är på grund av dess tjocklek och mikrofibrillernas relativt vertikala orientering av avgörande betydelse för att ge vedcellerna styrka och påverkar därmed både de fysiska och mekaniska egenskaperna hos färdiga produkter (Daniel, 2009). Mikrofibrillvinkeln (MFV) definieras som vinkeln mellan mikrofibrillerna i S2-lagret och cellens längdaxel (Lundgren, 2004).



Figur 1. Vedcell och dess olika lager i cellväggen med microfibrillernas riktning samt definitionen av microfibrillvinkel exemplifierad i S2-lagret. Baserad på figurer från Desch & Dinwoodie (1996) samt Daniel (2009).

1.3 Mikrofibrillvinkelns variation

Den naturliga variationen hos MFV kan förklaras av trädets olika behov över dess utveckling i tiden (Donaldson, 2008). En liten planta har stora behov av hög elasticitet för att inte knäckas och därmed höga MFV medan större träd inte har samma behov därmed lägre MFV (Lindström *et al.*, 1998).

MFV varierar inom trädets och i barrträd finner man de högsta MFV i de första fem årsringarna räknat från mären varefter de blir lägre mot barken (Donaldson, 2008). Sambandet med sjunkande MFV från märe till bark då den kambiala åldern ökar bekräftas också av Khalili *et al.* (2001) & Eriksson *et al.* (2006) vilka alla undersökte MFV i tall. Det finns även en variation i MFV från stambasen mot trädtoppen där MFV är som högst vid stambasen och sedan sjunker kraftigt med ökad höjd för att stabiliseras vid ungefär 7 m, för att sedan öka närmare trädtoppen (Donaldson, 2008).

MFV varierar också mellan träd som vuxit upp på samma ståndort. Variationen är som störst i juvenilveden för att sedan minska efter ungefär 15 årsringar och av denna anledning tenderar MFV att vara en signifikant förklarande variabel för styvhet i juvenilveden men däremot inte i den mogna veden (Donaldson, 2008). Detta kan tolkas som att arv har större betydelse i juvenilveden medan miljön har större betydelse i den mogna veden. Få studier har dock utförts där man undersökt sambandet mellan arv och MFV och de indikerar liten eller ingen ärftlig påverkan på MFV (Zobel & van Buijtenen, 1989).

MFV varierar mycket mellan vedceller inom samma årsring (Donaldson, 2008; Daniel, 2009). Studier har visat att denna variation inte minskar med ökande kambial ålder men frekvensfördelningen blir skevare och drar mot fler lägre vinklar (Donaldson, 2008). Bergander

et al. (2002) undersökte variationen i MFV i vårveden hos gran och fann att vinkeln var så mycket som sex gånger högre i början av årsringen jämfört med slutet av årsringen. MFV avtar också från vårved till sommarved och sjunker snabbt i slutet av sommarveden (Donaldson, 2008).

MFV kan variera inom vedcellernas olika sidor. Khalili *et al.* (2001) fann genom att mäta riktningen på hålrummen efter angrepp av soft-rot i veden hos tall att MFV är högre på den radiella sidan jämfört med den tangentiella sidan av vedcellen. Studier på andra barrträdarter än tall har både visat det motsatta förhållandet samt liten eller ingen skillnad i MFV beroende på vilken vägg man mäter (Donaldson, 2008). Khalili *et al.* (2001) undersökte hur MFV varierar inom enskilda vedceller i vårveden hos tall. De fann att MFV var mycket liten på gränsen mellan radiell och tangentiell sida av vedcellen samt att MFV påverkades av porförekomst. Enligt Donaldson (2008) har också flera studier visat att MFV varierar lite i vedcellens längdriktning.

1.4 Mikrofibrillvinkelns betydelse

MFV används ofta för att förklara styrkeegenskaper i ved och den är en allmänt accepterad variabel för att skatta timmer- och fiberkvalitet (Donaldson, 2008). MFV påverkar fiberns longitudinella styvhet och därmed även vedens elasticitetsmodul (Donaldson, 2008). Donaldson (2008) hävdar att egenskaperna hos enskilda fibrers cellväggar, då främst MFV, samt mängden cellvägg det vill säga densiteten är de variabler som bäst förklarar vedens styvhet. Xu *et al.* (2004) undersökte sambandet mellan MFV, densitet och elasticitetsmodul i rotstocken på *Pinus radiata* och fann att MFV hade stor påverkan på elasticitetsmodulen på olika höjder i rotstocken. MFV påverkar också vedens maximala longitudinella töjning (Donaldson, 2008). Enligt Donaldson (2008) har en studie visat att den maximala longitudinella töjningen ökade från 0,5 % till 11 % då MFV ökade från 5° till 50° samt att dragstyrkan minskade från 220 MPa till 35 MPa då MFV var 5° resp. 50°.

MFV har stor påverkan på vedens krympning och krympningsanisotropi (Donaldson, 2008). Krympningen sker till största delen vinkelrätt mot mikrofibrillernas riktning och MFV påverkar enskilda fibrers samt vedens krympningsanisotropi (Donaldson, 2008). Celler med låga MFV har större tangentiell krympning medan celler med höga MFV tenderar att krympa mer i longitudinell riktning (Donaldson, 2008). Megraw *et al.* (1998) visade att sambandet mellan MFV och longitudinell krympning till stor del påverkas av årsringens radiella position samt höjden i trädet. Deras resultat visade att MFV förklarar mellan 60-70% av variationen i longitudinell krympning. Hög krympningsanisotropi i veden kan leda till ökad sprickbildning vid torkning samt formförändringar som kupighet och skevhet hos virke (Desch & Dinwoodie, 1996).

Då MFV påverkar enskilda fibrers styrkeegenskaper påverkas även pappersegenskaper som töjning, styvhet och styrka (Page *et al.*, 1977; Megraw, 1985). Lägre MFV ger högre dragstyrka

och styvhet (Donaldson, 2008). Med ökande MFV minskar elasticitetsmodulen i fiberriktningen för papper tillverkat av barrsulfatmassa och holocellulosa (delignifierade fibrer utan utlösning av cellulosa och hemicellulosa) (Fellers & Norman, 1996). Styrka och töjning hos enskilda kraftfibrer påverkas starkt av MFV där fibern blir svagare och mer töjbar vid högre MFV (Fellers & Norman 1996).

1.5 Påverkan på mikrofibrillvinkeln

Ståndorten och skötselmetod kan genom sin påverkan på tillväxthastigheten också påverka MFV (Donaldson, 2008). Ökad MFV kan i vissa fall förklaras av ökad årsringsbredd då den kombineras med andra vedegenskaper. McMillin (1973) fann att för *Pinus taeda* ökade endast MFV i vårveden till följd av ökad tillväxthastighet då den relativa densiteten (specific gravity) var hög. Enligt Donaldson (2008) visade resultaten från en studie på *Pinus taeda* från 31 provenienser i Kina att latitud, årsmedeltemperatur, årsnederbörd och längden på den frostfria perioden hade signifikant påverkan på MFV samt att graden av påverkan på MFV ökade med trädåldern. Raymond & Anderson (2005) undersökte skillnader i MFV mellan *Pinus radiata* av åldern 19-20 år odlade på före detta betesmark med hög kvävehalt, och på tidigare trädbevuxen mark. De konstaterade att MFV var upp till 10° högre på den före detta betesmarken, vilket innebar en ökning på 14 % totalt sett jämfört med kontrollen. Lindström *et al.* (1998) undersökte hur MFV hos gran påverkades av tillväxthastighet och fann en liten ökning i MFV till följd av ökad tillväxthastighet (enbart kambial ålder förklarade 80 % av variationen). Enligt Brändström (2001) har snabbväxande gran med stor årsringsbredd högre MFV jämfört med träd med liten årsringsbredd. Mattsson (2002) visade i en studie att ökad tillväxt till följd av markberedning gav en något ökad MFV för tall. Mattson visade även att MFV sjunker snabbt med avtagande kambial ålder för att stabiliseras vid en ålder på ungefär 15-20 år. En studie på tall där ved av samma kambiala ålder jämförts utfördes av Eriksson *et al.* (2006). Där undersöktes bland annat hur MFV varierade mellan träd som vuxit upp i täta fröföryngringar och planterade bestånd med brett förband. De fann att MFV var högre för det planterade beståndet för prover tagna på stubbhöjd och intermediär topphöjd. Skillnaderna var större i splintveden jämfört med kärnveden. I kärnveden vid stubbhöjd var MFV för det frösådda beståndet omkring 20° jämfört med 29° för det planterade beståndet (Eriksson *et al.*, 2006). Mörling (1999) undersökte effekterna av gallring och gödsling på tall och fann att under de första fyra åren efter behandling ökade både radiell tillväxt och volymtillväxten för gallring och gödsling. För gödsling försvann denna ökade tillväxt efter 8 år medan den för gallring fortfarande noterades efter 12 år.

Eriksson *et al.* (2006) undersökte bland annat MFV för tall och fann att MFV gick att prediktera utifrån en framräknad funktion med variablerna kambial ålder, ålder på det apikala meristemmet, årsringsbredd samt avstånd till grönkronan. Enligt Zobel & van Buijtenen (1989) visade en studie av *Pinus caribaea* att 76 % av variationen i MFV kunde förklaras av celllängd. Enligt Megraw (1985) som studerat *Pinus taeda* följer MFV samma mönster som celllängd i stammen fast omvänt, det vill säga då celllängden ökar från märke till bark minskar MFV. Fujiwara & Yang

(2000) fann för fyra kanadensiska barrträdsarter en negativ korrelation mellan celllängd och en ökning i omkretstillväxt. Enligt Mörling (1995) gav gallring kortare fibrer hos tall till följd av ökad diametertillväxt.

1.6 Mätning av mikrofibrillvinkeln

Det finns två dominerande typer av metoder för mätning av MFV; mätning av enskilda fibrer genom mikroskopering samt bulkmätning genom röntgendiffraktion eller när-infrarött ljus (NIR) (Donaldson, 2008). Mikroskopimetoderna kan delas upp i de som använder polariserat ljus och de som genom direkt observation mäter MFV (Donaldson, 2008). Det finns flera metoder för direkt observation av MFV varav en är så kallad jodfärgning (Donaldson, 2008). Tidigare ansåg man att observerbara jodkristaller bildades i sprickor i cellväggen (Senft & Bendtsen, 1985) men enligt Donaldson & Frankland (2004) skapar jodkristallerna hålrum i cellväggen genom att komprimera omkringliggande material. Hålrummen bildas sannolikt i områden av cellväggen där porositeten är högre som i gränsen mellan S1 och S2 och i områden av cellväggens olika skikt där porositeten är något högre (Donaldson & Frankland, 2004). Jodfärgning kan ge ojämnt resultat mellan olika prover, samt variation inom prover då olika prover reagerar olika med färgämnet (Donaldson, 2008). Enligt Donaldson & Frankland (2004) beror möjligen den ojämna infärgningen av S2-lagret på variationer i cellväggens nanostruktur.

1.7 Problemformulering

Röjning och tidig gödsling kan ge ökad volymproduktion (Valinger, 1992; Mörling, 1999) och förändrade vedegenskaper (Tsuomis, 1991; Desch & Dinwoodie, 1996). Studier har också visat på ett samband mellan en ökad tillväxt och en ökad MFV (Donaldson, 2008). En ökad MFV kan leda till icke önskvärda mekaniska och fysikaliska egenskaper hos veden och enskilda fibrer (Donaldson, 2008; Desch & Dinwoodie, 1996).

De flesta tidigare studier har fokuserat på sambandet mellan tillväxthastighet eller skötselmetod och MFV i äldre skog medan få studier har undersökt sambanden i yngre skog. Dessutom har man i vissa tidigare studier inte heller tagit hänsyn till den naturliga variationen i MFV och därför jämfört ved med olika kambial ålder.

Denna studie syftar därför till att undersöka effekten av röjning, tidig gödsling samt en kombination av båda på MFV hos ung tall. Målet är att utöka kunskapen om skötselmetodens påverkan på MFV i unga tallbestånd.

Frågeställningar som kommer att besvaras i studien är:

- i) Har behandling (obehandlad kontroll, röjning, årlig gödsling, röjning/gödsling) effekt på MFV?
- ii) Påverkar behandling den gradvisa nedgången av MFV med ökande kambial ålder?
- iii) Kan variationen i MFV förklaras av variablerna kambial ålder, diameter brösthöjd, trädhöjd, krongräns, levande kronans höjd, antal grannar inom en meter, årsringsbredd eller avstånd till märg?

Hypoteser:

- i) Röjning, årlig gödsling samt röjning/gödsling kommer att leda till högre MFV i studerade årsringar jämfört den obehandlade kontrollen.
- ii) Studerade behandlingar påverkar inte nedgången av MFV med ökande kambial ålder.
- iii) Variationen i MFV kan förklaras av variablerna kambial ålder, diameter brösthöjd, trädhöjd, krongräns, levande kronans höjd, antal grannar inom en meter, årsringsbredd eller avstånd till märg.

2 Material och metod

2.1 Lokal

För studien användes vedprover av tall (*Pinus sylvestris* L.) tagna från ett försök beläget vid Degerön, Vindelns kommun i Västerbotten där följande skogsskötselbehandlingar studeras i ungskog: behandling 1, kontroll, ingen röjning, ingen gödsling; behandling 2, röjning till 3000 stammar ha⁻¹, ingen gödsling; behandling 3, ingen röjning, gödslat sedan 1997 med 100 kg N ha⁻¹ årligen; behandling 4, röjning till 3000 stammar ha⁻¹ och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha⁻¹. Skog-An + Superba Mikromix användes för gödslingsbehandlingarna och röjningarna utfördes som låggallringar där även vargar togs bort. Resultat rörande behandlingars effekter på träd- och beståndsvariabler samt fysikaliska vedegenskaper från detta och fler försök redovisas vidare i Ulvcrona & Ahnlund Ulvcrona (2011) samt Ahnlund Ulvcrona (2011). Försöket var beläget i norra Sverige på latituden 64,17°N (WGS 84). I utgångsbeståndet växte vid anläggning blandskog som efter markberedning uppkommit under en naturligt förnygrad fröträdställning av tall. Tall dominerade med inslag av gran (*Picea abies*) och björk (*Betula spp.*). Försöket etablerades 1997 då beståndet var 17 år. Försöksytornas arealer var 900 m² med en fem meter bred omgivande buffertzona. Jordarten var sandig lerjord. Altituden varierade mellan 170 och 190 m, nederbörden 700-800 mm och växtsäsongens längd var 150 dagar. Ståndortsindex var 20 m (H100). Utgångsläget efter anläggning var vad avser stammar per hektar efter behandling 17387 (behandling 1), 3133 (behandling 2), 18456 (behandling 3) och 2700 (behandling 4).

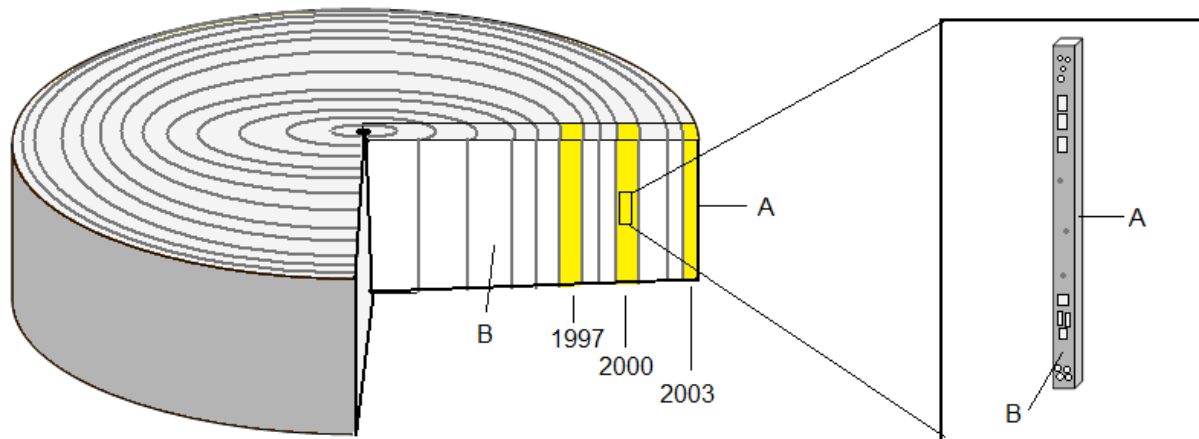
2.2 Urval

Provträden utgjorde de 12 med avseende på höjdklassen dominerande tallarna för att säkerställa jämförbarhet med avseende på tidigare skötselåtgärder samt åtgärder under försöksperioden. De 12 provträden var fördelade med tre per behandling. För att i laboratoriet ytterligare anpassa studiens omfattning exkluderades slumpmässigt ett träd ur varje behandling. Sammanlagt användes åtta träd för denna studie. Provträden var vid provtagningstillfället fria från synliga skador och sjukdomar. Samplingen utfördes hösten 2003 (behandling 1, 2 och 3) samt våren 2004 (behandling 4). Urvalet baserades på att det innan behandlingarna utfördes inte fanns någon signifikant skillnad mellan träden med avseende på årsringsbredd, diameter brösthöjd, trädhöjd och kronandel (Ulvcrona & Ahnlund Ulvcrona, 2011).

2.3 Provberedning

Provtrissor togs i brösthöjd (1,3 m), fryslagrades (-20 °C) och torkades därefter i 85 °C tills dess att ingen ytterligare viktminskning kunde detekteras. Från varje trissa togs ett ungefär 3 mm tjockt transekt radiellt från bark till märke. Detta utfördes av personal från Svartbergets Fältstation Vindeln hösten 2003 och våren 2004. Från transekten isolerades årsringarna från år 2000 samt 2003, och vårveden separerades från sommarveden (figur 2). Vårveden skildes från

sommarveden genom den generellt sett mörkare sommarveden. Årsring 2000 valdes för att säkerställa att skötselningreppet tre år tidigare skulle hinna ge effekt på vedens mikrofibrillvinkel (MFV) och årsring 2003 för att se eventuella samband över tiden. För att minska studiens omfattning mättes endast MFV i vårveden. Inget av proven bedömdes innehålla reaktionsved eller annan avvikande ved.



Figur 2. Vänster; trissa med årsringar av intresse för studien. Försöket inleddes 1997, mikrofibrillvinkeln bestämdes i vårveden för årsringar bildade år 2000 samt 2003. Höger; vedcell. Båda; A tangentiell sida, B radiell sida (icke proportionerlig figur)

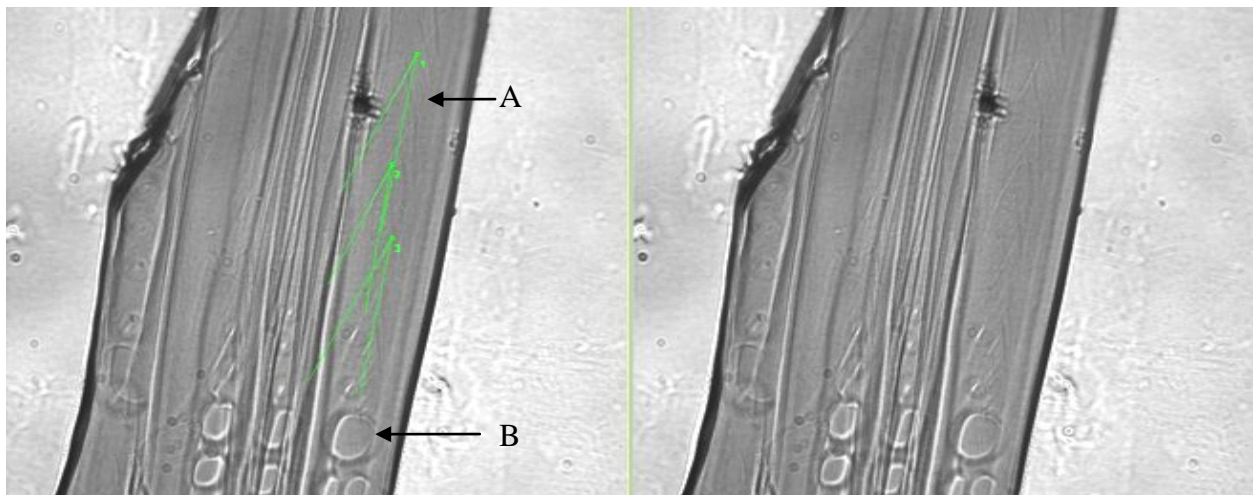
Vedproverna macerades enligt protokoll upprättat av Franklin (1945). I enlighet med protokollet behandlades vedproverna i en lösning bestående av lika delar vatten, ättiksyra och väteperoxid under 48 h vid temperaturen 60 °C. Vedproverna sköljdes sex gånger med avjoniserat vatten och frilades genom skakning i vatten.

En av Eriksson *et al.* (2006) modifierad metod, i sitt ursprung beskriven av Senft & Bendtsen (1985), användes för att inducera sprickbildning i cellväggarna samt för infärgning av cellerna. De frilagda fibrerna (i vattenlösning) placerades på objektglas och tilläts torka fast under rumstemperatur. För att inducera sprickbildning i cellväggens S2-skikt utsattes delproven för tre hydrerings-dehydreringscykler (hydrering i vattenbad, inkubering i 140 °C till dess allt vatten förångats, därefter ytterligare 15 minuter för att säkerställa fullständig torkning). De avsvalnade delproven färgades under 40 minuter i en 2 % lösning av jod-kaliumjodid. Överflödigt färgämne avlägsnades försiktigt med läskpapper varefter två till tre droppar salpetersyra med koncentrationen 60 % samt täckglas applicerades.

2.4 Datainsamling

Sprickorna i vedcellens S2-skikt observerades med ljusmikroskop (Leitz Laborlux S) och digitala bilder togs med CCD-kamera (Kappa DX20HC). Sprickornas respektive vinkel mot

vedcellens längdaxel mättes med verktyget *angle measurement* i bildanalysprogrammet Metreo (Kappa) genom att rita en referenslinje parallellt med vedcellens längdriktning och därefter en linje parallellt med sprickornas längdriktning (figur 3). Mätningarna utfördes på vedcellernas radiella sidor (identifierad genom förekomsten av fönsterporer (cross-field pits - CFP) (Daniel, 2009)) (figur 3), centrerat med avseende på längd- och bredd samt områden fria från porer och skador som kunde antas påverka mätresultatet. Mätningar utfördes endast där minst fyra parallella sprickor var synliga och om möjligt mättes sprickor även på fiberns undersida. Beroende på antalet synliga och godtagbara mikrofibrillsprickor mättes mellan två och sex vinklar per vedcell på mellan åtta och tolv vedceller per träd. Totalt utfördes 444 mätningar av MFV fördelade på 154 vedceller.



Figur 3. A, Mätning mikrofibrillvinkel utifrån sprickor i vedcellens S2-skikt. Notera även synliga sprickor på fiberns nedvända sida. B, fönsterpor/Cross-field pit.

Årsringsbredd och avstånd till mærg mättes på två punkter per årsring med verktyget *mätverktyg* i programmet GIMP 2.6.11 (The GNU Image Manipulation Program) efter trissorna skannats in med skanner (Ricoh MP C4000). En mätpunkt i årsringen slumpades fram och en andra mätpunkt togs så långt bort från den första som möjligt (180° för hela trissor och maximalt möjligt avstånd för halva trissor). Kambial ålder fastställdes genom att på trissor räkna antalet årsringar från mærgen och utåt till årsringarna som bildats under växtsäsongen åren 2000 och 2003.

För att utvärdera mätmetodens påverkan på resultatet valdes också slumpmässigt nio tidigare undersökta vedceller ut och samtliga tidigare mätta mikrofibrillvinklar (26 st.) mättes om. Avvikelsen mellan mätvärdena för enskilda sprickor var som störst $3,34^\circ$ och den totala standardavvikelsen för alla avvikelser var $1,71^\circ$.

2.5 Statistisk analys

Statistisk bearbetning av data skedde i Minitab 16 (Minitab inc.) och R 2.14.0 (The R Foundation for Statistical Computing). Datamängden testades med Anderson-Darling för att fastställa normalfördelning av data ($p=0,569$). Ingen transformation av datamängden var aktuell. För att påvisa eventuella skillnader mellan år, behandling, träd och fiber testades datamängden med variansanalys enligt general linear model. Modellen innehöll komponenterna; Behandling, År, Behandling * År, Träd (Behandling), Träd * År (Behandling), Fiber (Behandling Träd År), med Träd och Fiber som slumpmässiga variabler. För parvisa jämförelser användes Tukeys metod. För samtliga analyser användes signifikansnivån 5 % ($p \leq 0,05$).

Linjär regression användes för att undersöka möjligheten att förklara variationen i MFV utifrån kambial ålder, diameter i brösthöjd, trädhöjd, krongräns, levande kronans höjd, antal grannar inom en meter, årsringsbredd och avstånd till märg (tabell 1, tabell 3). Innan regressionsanalysen utfördes lades allt data samman och ingen hänsyn togs till de olika behandlingarna i den analysen.

Tabell 1. Värden för respektive provträd för diameter i brösthöjd (1,3 m) (mm), trädhöjd (m), krongränsens höjd (m), levande kronans höjd (m) samt antal grannar inom en meter (st.). Data från Ulvcrona & Ahnlund Ulvcrona (2011).

Behandling	1	1	2	2	3	3	4	4
Träd nr.	11	12	21	22	31	32	41	42
Diam. brh. (mm)	84,5	90	78	102,5	102,5	119,5	84,5	100,5
Trädhöjd (m)	6,21	6,5	5,94	6,18	7,62	7,49	6,96	7,4
Krongräns (m)	2,05	2,59	1,71	1,44	3,04	3,1	1,9	1,95
Levande kronans höjd (m)	4,16	3,91	4,23	4,74	4,58	4,39	5,06	5,45
Antal grannar inom 1 m (st)	3	21	0	0	5	8	0	0

3 Resultat

3.1 Behandlingens effekt på mikrofibrillvinkeln

Variansanalysen visade att variabeln behandling (behandling 1, obehandlad kontroll, ingen röjning, ingen gödsling; behandling 2, röjning till 3000 stammar ha⁻¹, ingen gödsling; behandling 3, ingen röjning, gödslat sedan 1997 med 100 kg N ha⁻¹ årligen; behandling 4, röjning till 3000 stammar ha⁻¹ och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha⁻¹) hade signifikant påverkan på mikrofibrillvinkeln (MFV) (tabell 2). Variabeln år (2000; 2003) hade ingen signifikant påverkan på MFV (tabell 2). Det fanns heller ingen signifikant samspelseffekt mellan behandling och år (tabell 2). Variabeln träd hade inom behandling ingen signifikant påverkan på MFV och det förelåg ingen signifikant samspelseffekt mellan år och träd inom behandling (tabell 2). Variabeln fiber hade för specifikt år, behandling och träd signifikant påverkan på MFV (tabell 2).

Tabell 2: Variansanalys av MFV. Effekten på MFV av variablerna behandling, år, träd och fiber.

Variabel	Källa	Frihets- grader	Sekv. kvadratsumma	Just. kvadratsumma	Just. medel- kvadrat- summa	F	p-värde
Mikrofibrillvinkel	Behandling	3	860,378	815,937	271,979	69,07	0,001
	År	1	82,356	40,361	40,361	4,77	0,091
	Behandling*År	3	159,772	150,496	50,165	5,97	0,057
	Träd(Behandling)	4	18,241	15,55	3,887	0,46	0,762
	År*Träd(Behandling)	4	58,155	33,508	8,377	0,24	0,913
	Fiber(Behandling År Träd)	138	5033,144	5033,144	36,472	8,05	0,000
	Error	290	1313,703	1313,703	4,530		
Totalt		443	7525,748				

Signifikanta p-värden i fetstil

Obehandlad kontroll (behandling 1) hade för både år 2000 och 2003 i relation till övriga behandlingar låga MFV (19,10° resp. 18,20°) (tabell 3). MFV för obehandlad kontroll och röjning/gödsling (behandling 4) var för år 2000 jämförbara med varandra (19,10° resp. 19,01°). MFV ökade för röjning (behandling 2) jämfört med obehandlad kontroll till liknande nivå för båda åren (20,10° år 2000; 20,82° år 2003). Årlig gödsling (behandling 3) gav för år 2000 ett medelvärde på 21,41° och för år 2003 var värdena för MFV de högsta uppmätta i studien (23,33°). År 2003 var MFV för röjning/gödsling (20,78°) jämförbar med röjning samma år (20,82°).

Generellt var årsringsbredden minst för obehandlad kontroll och följer sedan för övriga behandlingar ett liknande mönster som redovisats för MFV med störst årsringsbredd för årlig gödsling (tabell 3). Den kambiala åldern var densamma för samtliga behandlingar inom samma år (tabell 3). Avståndet till märg var nära nog detsamma för samtliga behandlingar utom för årlig gödsling där man kan notera en signifikant ökning jämfört med övriga behandlingar från ungefär

28 mm (obehandlad kontroll, röjning, röjning/gödsling) till 34 mm (årlig gödsling) år 2000 och från ungefär 36 mm (obehandlad kontroll, röjning, röjning/gödsling) till 45 mm (årlig gödsling) år 2003 (tabell 3).

Tabell 3: Kambial ålder samt medelvärden för MFV och årsringsbredd för samtliga behandlingar år 2000 och 2003 med standardavvikelsen inom parenteser.

År	Variabel	Behandling 1*	Behandling 2§	Behandling 3⌘	Behandling 4§
2000	Mikrofibrillvinkel (°)	19,10a (2,81)	20,10bc (4,12)	21,41c (3,43)	19,01a (3,91)
	Årsringsbredd (mm)	2,30a	2,69ab	3,50ab	3,36ab
	Kambial ålder (år)	13	13	13	13
	Avstånd till märg (mm)	28,65c	28,59c	34,07b	27,82c
2003	Mikrofibrillvinkel (°)	18,20a (3,24)	20,82bd (3,36)	23,33e (3,33)	20,78cd (3,70)
	Årsringsbredd (mm)	2,52a	2,92ab	3,89b	2,54a
	Kambial ålder (år)	16	16	16	16
	Avstånd till märg (mm)	35,56b	36,27b	44,93a	36,67b

* Kontroll: ingen röjning, ingen gödsling

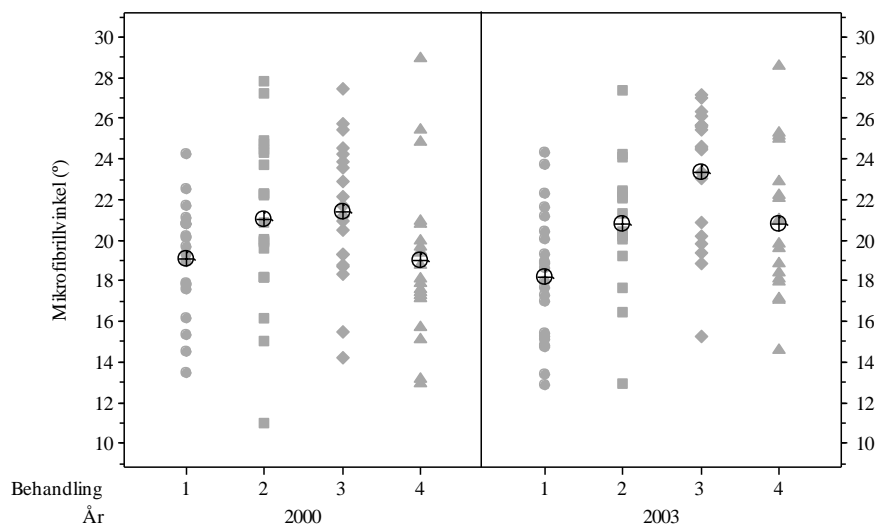
§ Röjning till 3000 stammar ha-1, ingen gödsling

⌘ Ingen röjning, gödslat årligen sedan 1997 med 100 kg N ha-1

§ Röjning till 3000 stammar ha-1 och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha-1

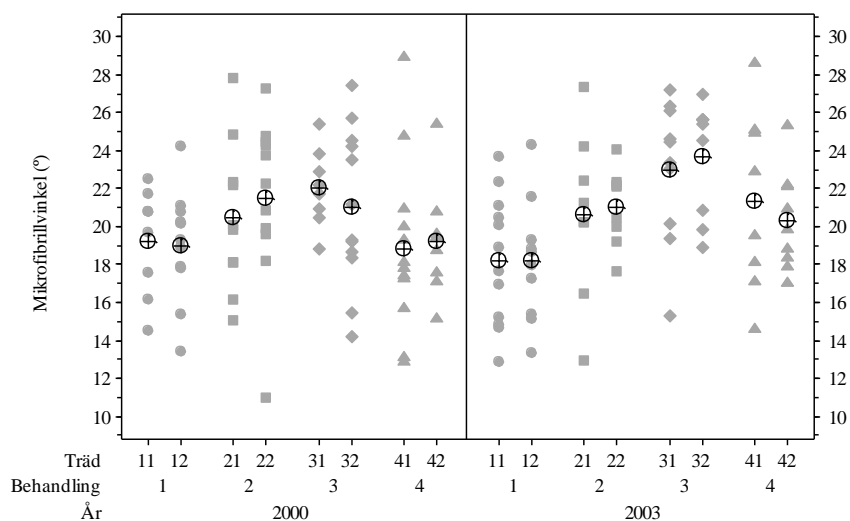
Olika bokstäver indikerar signifikant ($p \leq 0,05$) skillnad. För variabeln mikrofibrillvinkel kan jämförelser göras både horisontellt och vertikalt i tabellen. Standardavvikelse inom parentes

Inga tydliga samband mellan olika behandlingar inom respektive år står att finna genom att observera individuella medelvärden per fiber (figur 4). Genom att observera medelvärden för respektive behandling och de båda undersökta åren kan vissa samband anas. Obehandlad kontroll hade låga MFV både år 2000 och 2003. Röjning gav en något högre MFV för båda åren. MFV ökade därefter ytterligare för årlig gödsling. Röjning/gödsling gav däremot värden jämförbara med obehandlad kontroll för år 2000, och sedan värden jämförbara med röjning för år 2003.



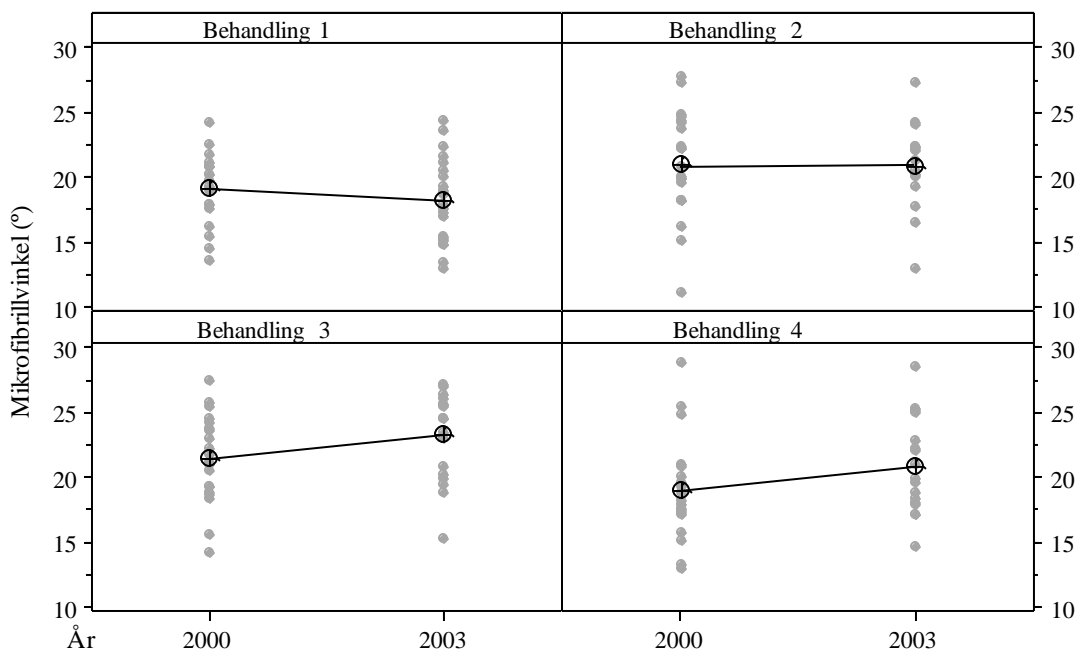
Figur 4. Individuella medelvärden per fiber för microfibrillvinkeln år 2000 och 2003. Cirkel med kryss indikerar fibrernas sammanlagda medelvärde. Behandling 1, obehandlad kontroll, ingen röjning, ingen gödsling; behandling 2, röjning till 3000 stammar ha⁻¹, ingen gödsling; behandling 3, ingen röjning, gödslat sedan 1997 med 100 kg N ha⁻¹ årligen; behandling 4, röjning till 3000 stammar ha⁻¹ och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha⁻¹

Skillnaden mellan trädens sammanlagda fibermedelvärden inom samma behandling var liten och trädparens respektive MFV ser ut att väl följas åt inom respektive behandling (figur 5).



Figur 5. Individuella medelvärden per fiber för microfibrillvinkeln för respektive träd och år. Cirkel med kryss indikerar fibrernas sammanlagda medelvärde. behandling 1, obehandlad kontroll, ingen röjning, ingen gödsling; behandling 2, röjning till 3000 stammar ha⁻¹, ingen gödsling; behandling 3, ingen röjning, gödslat sedan 1997 med 100 kg N ha⁻¹ årligen; behandling 4, röjning till 3000 stammar ha⁻¹ och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha⁻¹

MFV minskade från år 2000 till år 2003 för obehandlad kontroll, däremot ökade den något för röjning från år 2000 till år 2003 (tabell 3, figur 6) men skillnaden mellan åren för båda behandlingarna var icke signifikant. För årlig gödsling och röjning/gödsling MFV från år 2000 till 2003 och ökningen var signifikant säkerställd (tabell 3, figur 6).



Figur 6. Individuella medelvärden per fiber för mikrofibrillvinkeln år 2000 och 2003. Cirkel med kryss indikerar fibrernas sammanlagda medelvärde. Behandling 1, obehandlad kontroll, ingen röjning, ingen gödsling; Behandling 2, röjning till 3000 stammar ha⁻¹, ingen gödsling; Behandling 3, ingen röjning, gödslat årligen sedan 1997 med 100 kg N ha⁻¹; Behandling 4, röjning till 3000 stammar ha⁻¹ och gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha⁻¹

3.2 Mikrofibrillvinkelns variation

För utvärderingen av möjligheterna att utföra en regressionsanalys innehöll ekvationen responsvariabeln MFV och de förklarande variablerna kambial ålder, diameter brösthöjd, trädhöjd, krongräns, antal grannar inom en meter, avstånd till märg samt ringbredd. Variabeln levande kronans höjd uteslöts på grund av stark korrelation med variabeln krongräns. Utvärderingen av möjligheterna att utföra en regressionsanalys resulterade i följande ekvation:

$$(1) MFV = 20,7 - 0,373 \text{ kambial ålder} - 0,017 \text{ diam. brh} - 0,510 \text{ höjd} + 1,51 \text{ krongräns} - 0,134 \text{ antal grannar} + 0,190 \text{ avst. märg} + 0,337 \text{ ringbredd}$$

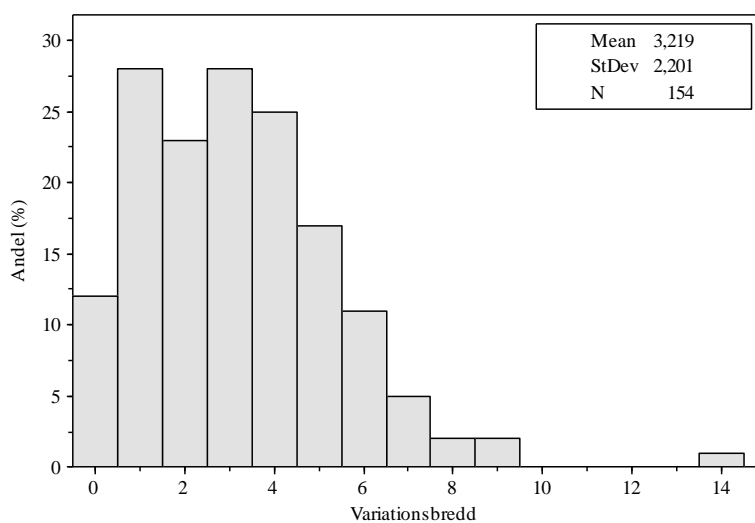
Ingen förklarande variabel var signifikant (tabell 4). För variablerna kambial ålder, diameter brösthöjd, trädhöjd och antal grannar inom en meter var sambandet med MFV negativt. För variablerna krongräns, avstånd till märg och ringbredd var sambandet med MFV positivt.

Tabell 4. Regressionsresultat för studerade variabler med responsvariabel MFV, samtliga behandlingar och år sammanslagna

Förklarande variabel	Koeff.	SE koeff.	T	P
Konstant	20,68	10,73	1,93	0,056
Kambial ålder (år)	-0,3727	0,7775	-0,48	0,632
Diam. brh. (mm)	-0,0166	0,1155	-0,14	0,886
Trädhöjd (m)	-0,5096	0,9747	-0,52	0,602
Krongräns (m)	1,505	1,177	1,28	0,203
Antal grannar inom 1 m (st)	-0,1336	0,0712	-1,88	0,063
Avstånd till märg (mm)	0,1895	0,2595	0,73	0,466
Ringbredd (mm)	0,3372	0,7666	0,44	0,661

S = 3,647, R-Sq = 10,8%, R-Sq(just.) = 6,5%

Variationsbredden (differens max- och minvärde inom fiber) för mätningar av MFV inom fibrer var mellan 0,13 och 13,77, med en standardavvikelse på 2,20 (figur 7).



Figur 7. Variationsbredden (differens max- och minvärde) för mätningar av MFV inom fibrer

4 Diskussion

4.1 Behandlingens effekt på mikrofibrillvinkeln

För att studera om behandlingen hade effekt på mikrofibrillvinkeln (MFV) användes variansanalys enligt general linear model. Analysen visade att behandlingen hade effekt på MFV. Samtliga behandlingar utom röjning/gödsling (behandling 4, röjning till 3000 stammar ha^{-1} , gödslat en gång 1997 med 100 kg N ha^{-1}) år 2000 resulterade i en ökad MFV jämfört med obehandlad kontroll (behandling 1, ingen röjning, ingen gödsling), med de högsta MFV för årlig gödsling (behandling 3, ingen röjning, gödslat årligen sedan 1997 med 100 kg N ha^{-1}). Detta betyder att hypotes 1, det vill säga att röjning (behandling 2, röjning till 3000 stammar ha^{-1} , ingen gödsling), årlig gödsling och röjning/gödsling kommer leda till en ökad MFV, inte kan förkastas för röjning och årlig gödsling men kan förkastas för röjning/gödsling. Skillnaderna mellan behandlingarna var ändå relativt små med den största skillnaden mellan obehandlad kontroll och årlig gödsling år 2003 vilken var ungefär 5° . MFV för röjning/gödsling var för år 2000 lägre än MFV för röjning samma år, och det förelåg ingen skillnad mellan behandlingarna år 2003. Då gödsling i teorin bör ge en ökad tillväxt (Valinger, 1992; Mörling, 1999), borde teoretiskt sett även MFV vara högre för röjning/gödsling jämfört med röjning men resultaten visar alltså på ingen signifikant skillnad mellan behandlingarna. Behandlingen tycktes ha större effekt på MFV för år 2003 jämfört med 2000 eftersom skillnaden mellan obehandlad kontroll och övriga behandlingar var större för detta år vilket även bekräftas av variansanalysen. En liten ökning i MFV hos träd som vuxit snabbt har också observerats av Lindström *et al.* 1998 som undersökte *Picea abies*. Raymond & Anderson (2005) observerade att träd som vuxit på före detta åkermark med höga halter kväve, jämfört med träd som vuxit på mer traditionell skogsmark, i snitt hade 14 % högre MFV sett över samtliga årsringar. En viktig skillnad mellan dessa tidigare studier och denna studie är att här har alla undersökta träd fram till år 1997 vuxit under jämförbara förhållanden för att därefter utsättas för ett skötselgrepp, medan tidigare studier främst har jämfört träd som alltid vuxit på till exempel kväverik mark med träd som alltid vuxit på traditionell skogsmark, det vill säga olika ståndorter vilket försvårar direkta jämförelser. Mörling (1999) undersökte effekterna av gallring och gödsling på tall och fann att total biomassaproduktion per träd ökade efter gallring, medan endast tillväxten av skott och krona ökade efter gödsling. En större krona innebär ett större vindfång och därmed teoretiskt ett ökat behov av flexibilitet. Höga MFV ger mer flexibel ved (Donaldson, 2008) vilket ger den teoretiska slutsatsen att en ökad krontillväxt till följd av gallring och gödsling skulle kunna leda till högre MFV.

Cave (1968) har utvecklat en teoretisk modell samt mätt det faktiska sambandet mellan vedens elasticitetsmodul och MFV för *Pinus radiata*. Baserat på Caves resultat bör en ökning av MFV från 20° till 25° (vilket grovt sett motsvarar obehandlad kontroll respektive årlig gödsling år 2003) teoretiskt sett medföra en minskning i vedens elasticitetsmodul från ungefär 3000 kp/mm^2 till 2300 kp/mm^2 , en minskning motsvarande 23 %. Andra vedegenskaper än MFV som till

exempel densitet kan också påverka elasticitetsmodulen men enligt Cave & Walker (1994) är MFV den absolut viktigaste. Enligt Fellers & Norman (1996) medför en ökning i MFV från 20° till 25° ungefär 23 % lägre elasticitetsmodul i papper tillverkat av barrsulfatmassa.

Variabeln år hade ingen signifikant påverkan på MFV på 5 % nivån men dock på 10 % nivån. Det fanns ingen signifikant samspelseffekt mellan behandling och år på 5 % nivån men dock på 10 % nivån. Förutsatt att samspelseffekten vore signifikant kan man dra slutsatsen att givet en behandling, har undersökt år en effekt på MFV. För obehandlad kontroll observerades som väntat en lägre MFV år 2003 jämfört med år 2000 ($p \geq 0,05$) men skillnaden mellan åren var icke signifikant. Förutsatt att skillnaden hade varit signifikant stämmer dessa resultat väl överens med den gängse uppfattningen att MFV sjunker med ökande kambial ålder det vill säga avtar från märmög mot bark (Khalili *et al.*, 2001; Donaldson, 2008) samt går i linje med hypotes två. Men för övriga behandlingar var sambandet tvärt om; MFV var högre år 2003 jämfört med år 2000 (röjning, $p \geq 0,05$; årlig gödsling, röjning/gödsling, $p \leq 0,05$), en trend som enbart baserat på kambial ålder är utan stöd i litteraturen. Utifrån dessa resultat förkastas hypotes 2, det vill säga att studerade behandlingar inte påverkar den gradvisa nedgången av MFV från märmög till bark. Den ökade tillväxten i årsringen kan ha resulterat i en större ökning i MFV än den minskning som en ökad kambial ålder skulle medföra. Resultatet med en ökande MFV från år 2000 till år 2003 kan vara en indikation på att tillväxten ökat från år 2000 till år 2003, men detta stöds inte av resultatet av årsringsmätningarna. Alternativt kan detta omvända samband vara en indikation på att metoden genererat skevt data, eller att stickprovsstorleken var för liten. Att årsringsmätningarna för denna studie utfördes på redan torkade prover försvårar också tolkningen av resultaten något då trissorna kan ha krympt olika beroende på behandling.

Urvalet av träd inom behandling hade ingen signifikant påverkan på MFV och det förelåg heller ingen signifikant samspelseffekt mellan år och träd inom samma behandling. Resultatet som redovisas i figur 5 bekräftar att skillnaden mellan träd inom samma behandling sett till enskilda år tycks vara liten. Enligt Donaldson (2008) varierar MFV mellan träd främst då juvenilveden jämförs beroende på att den s.k. broad-sence heritabiliteten har större påverkan i juvenilveden jämfört med den mogna veden. I denna studie jämförs ved med kambial ålder 13 och 16 år vilket ligger inom den juvenila veden (Sauter *et al.*, 1999). Resultatet tyder ändå på att MFV varierar relativt lite mellan träd inom samma behandling. Eftersom provträden vuxit upp under liknande förhållanden och samtidigt uppvisade relativt små skillnader med avseende på MFV är det möjligt att detta tyder på att miljön i större utsträckning än arv påverkar MFV i den juvenila veden. Om ved med större kambial ålder jämförts kanske än mindre skillnader mellan träd inom behandlingar kan förväntas. Provträden utgjorde de 12 med avseende på höjdklassen dominerande tallarna för att säkerställa jämförbarhet med avseende på tidigare skötselåtgärper samt åtgärper under försöksperioden. Det är möjligt att MFV hos dessa dominerande tallar som redan innan skötselåtgärperna växte relativt bra påverkades mindre av skötselåtgärperna än om MFV hade mätts på ett stickprov representativt för hela populationen av tallar. Då antalet

studerade träd per behandling endast var två samt antalet fibrer per träd var lågt är det dock svårt att dra några mycket tydliga slutsatser. Med ett större antal träd samt träd ur fler höjdklasser skulle man i större utsträckning kunnat se stickprovet som en representation av en större population träd och därmed också dra slutsatser om MFV i hela populationer.

Variabeln fiber hade en signifikant påverkan på MFV vilket man utifrån den stora variationen i MFV för de olika fibrerna kan ana då man observerar figur 4 och 5. Bergander *et al.* (2002) undersökte variationen i MFV i vårveden hos gran och fann att vinkeln var så mycket som sex gånger högre i början av årsringen jämfört med slutet av årsringen. Till skillnad mot Berganders undersökning frilades fibrerna i denna studie vilket eliminerar möjligheten att se MFV variation på olika positioner i årsringen. I denna studie isolerades enskilda årsringar ur trissorna genom klyvning. Det var ibland svårt att frilägga vårveden närmast sommarveden. Detta skulle kunna innebära att topp- och bottenvärdena för MFV inte kom med i stickprovet vilket kan vara en möjlig förklaring varför så stora skillnader inte observerades i denna studie.

4.2 Mikrofibrillvinkelns variation

Datamängden räckte inte till för att fullt ut kunna utnyttja möjligheterna att med hjälp av linjär regression undersöka om variationen i MFV kunde förklaras av kambial ålder, diameter brösthöjd, trädhöjd, krongräns, levande kronans höjd, antal grannar inom en meter, årsringsbredd och avstånd till märg. Variabeln levande kronans höjd uteslöts först på grund av stark korrelation med variabeln krongräns. Analysen visade sedan att ingen förklarande variabel var signifikant (tabell 4). Resonemang som förs nedan måste till stor del bli kvalificerade diskussioner utan stöd av en fullt ut användbar linjär regression. Den låga förklaringsgraden på 10,8 % visar att en stor del av den uppmätta variationen i MFV på detta dataset inte kan förklaras av ingående variabler. Detta i kombinationen med det faktum att variablerna inte var signifikanta betyder att hypotes 3 förkastas, det vill säga att MFV kan förklaras av ingående variabler. Det är möjligt att MFV beror på fler variabler än de som undersöktes. I denna studie undersöktes till exempel inte genetisk påverkan på MFV som nämns av Donaldson (2008) som en påverkande faktor på MFV. Flera studier har även visat att en stor del av variationen i MFV kan förklaras av variationen i celllängd (Megraw, 1985; Fujiwara & Yang, 2006) men även att densitet kan påverka MFV (Cave & Walker 1994). För variablerna kambial ålder, diameter brösthöjd, trädhöjd och antal grannar var sambandet med MFV negativt. För variablerna krongräns, avstånd till märg och ringbredd var sambandet positivt. Eriksson *et al.* (2006) undersökte bland annat MFV för tall och utvecklade en funktion för att prediktera MFV. Enligt funktionen är sambandet mellan MFV och kambial ålder, ålder på det apikala meristemmet samt avstånd till grönkronan negativt medan sambandet mellan MFV och årsringsbredd är positivt. Erikssons *et al.* (2006) resultat överensstämmer med denna studie för variablerna kambial ålder, krongräns samt årsringsbredd medan åldern på det apikala meristemmet inte undersöktes. Med ökande antal grannar inom en meter minskade MFV (ekvation 1). Eriksson *et al.* (2006) fann att MFV var lägre i täta

fröföryngrade tallbestånd jämfört med glesare planterade bestånd. I denna studie jämfördes ett relativt litet antal mätningar av MFV mot ett än mindre antal mätningar för respektive förklarande variabel. Samtliga förklarande variabler baserades på ett eller två värden per träd, till exempel en trädhöjd, en diameter, två årsringsbredder etc. vilket bör ha påverkat möjligheterna att göra en fullständig regressionsanalys.

Det var en stor intrafibervariation i MFV. Variationsbredden (differens max- och minvärde inom fiber) för mätningar av MFV inom fibrer var mellan 0,13 och 13,77, med en standardavvikelse på 2,20 (figur 7). Enligt Donaldson (2008) har flera studier visat på små skillnader längs fiberns längdaxel. Variationen observerad i denna studie kan möjligen bero på metoden vilket diskuteras vidare nedan.

4.3 Metod

Resultaten påverkades troligen också av den använda metoden. Metoden som användes var en av Eriksson *et al.* (2006) modifierad metod, i sitt ursprung beskriven av Senft & Bendtsen (1985) där sprickbildning i cellväggens S2-skikt inducerades genom snabb torkning och därmed snabb krympning. Infärgning av fibrerna gjordes med en jodkaliumjodidlösning. Efter infärgning droppades syra på objekten varefter täckglas applicerades. Metoden var lätt att tillämpa och krävde förutom mikroskop ingen avancerad utrustning. Den starka syran kunde ibland irritera näsan och angripa objekthållaren i mikroskopet varför det var viktigt att hålla mikroskopet rent. Objektivet kan skyddas med gladpack utan att de optiska egenskaperna förändras nämnvärt. Friläggning av fibrerna medförde att möjligheten att mäta hur MFV förändras från början av vårveden till slutet av sommarveden gick förlorad. Med intakt ved kan stickprovsstorleken troligen minskas då MFV kan mätas på fixa punkter inom ringen. Macerering gör fibrerna mjuka vilket i teorin borde kunna leda till att de vrids eller sträcks på objektglaset. Detta kan påverka resultatet av mätningen av MFV vilket den oväntat stora intrafibervariationen kan vara en indikation på.

Andelen fibrer med synliga och mätbara sprickor var mycket låg (< 1 %). Mikro fibrillsprickorna uppträdde sporadiskt och tenderade att vara väl synliga i vissa prov medan andra prov var helt utan synliga sprickor samt delar av ett prov kunde ha ett stort antal synliga sprickor medan andra delar inte hade någon. Donaldson & Frankland (2004) rapporterade en liknande heterogenitet med avseende på synliga MFV med en jämförbar metod. Sprickorna uppträdde ofta i områden på fibern där störningar i MFV var att vänta, till exempel genom eller i närheten av porer eller där fibern skadats. Detta i kombination med den låga andelen fibrer med synliga mikro fibrillsprickor gjorde provtagningsprocessen tidskrävande och därmed stickproven små. Antalet synliga vinklar bedöms ha varit högst för obehandlad kontroll, samt att fibrerna var tunnare jämfört med övriga behandlingar. Kanske lämpar sig metoden bättre på tunnare fibrer. Icke fullt frilagda aggregat av fibrer tenderade också att spricka oftare än helt frilagda fibrer (se exempel figur 3).

Mätningen av vinklarna var ibland mycket svårt. Sprickor som precis kunde urskiljas i mikroskopet var ibland inte synliga på bildskärmen. Med hjälp av bildbehandlingsprogram skulle sprickorna kunna göras mer synliga och därmed öka precisionen i mätningarna samt antalet möjliga mätningar. Resultatet av mätningarna påverkades också till en viss utsträckning av var i bilden fokus placerades. Detta förstärktes för icke fullt kollapsade fibrer samt fibrer med rundare tvärsnitt. Macererade fibrer kan tappa formen till den grad att det är svårt att avgöra var fokus bör placeras. Metoden gav även utrymme för egna tolkningar. Det var ibland svårt att avgöra om det som mättes faktiskt var en mikrofibrillspricka eller en ojämnhet i fiberns yta. En tvinnad eller en snedsträckt fiber kunde uppvisa liknande mönster av parallella linjer som en fiber med mikrofibrillsprickor. Eriksson *et al.* (2006) beräknade MFV trigonometriskt utifrån okulärmarkeringar. Det är också möjligt att Erikssons metod eventuellt genererade mätningar med något mindre precision än metoden som användes till denna studie då okulärmarkeringarna är fasta därmed inte kan anpassas till fullo efter mikrofibrillsprickorna. Fördelen med direkta mätningar i mikroskop såsom Eriksson *et al.* (2006) tillämpade är att man i större utsträckning är hjälpt av att kunna skifta fokus fram och tillbaka vilket kan göra sprickorna mer synliga. När mätningen sker med hjälp av dator blir bilden mindre skarp och det går inte på samma sätt att skifta fokus fram och tillbaka på grund av fördröjningen i bilduppdateringen.

Metoden genererar prov med mycket varierande antal synliga mikrofibrillsprickor, en osäkerhet i mätningarna på grund av macereringen samt medför även en risk att det som faktiskt mäts inte är mikrofibrillsprickor. Därför anser jag att den bör utvärderas ytterligare mot andra mer säkra och accepterade metoder för att kunna tillämpas med större säkerhet.

4.4 Slutsatser

Den idag vanligaste rekommenderade skötselstrategin för unga skogar är röjning vilken är direkt jämförbar med denna studiens behandling 2 (röjning till 3000 stammar ha⁻¹). Behandlingen gav en ökning av MFV på 1° år 2000 samt 2,6° år 2003 jämförd med den obehandlade kontrollen. Dessa öknings bör ha relativt liten påverkan på veden och fiberns mekaniska och fysikaliska egenskaper. Upprepad gödsling vilket studerades i behandling 3 gav högst MFV vilket innebär att om lägre MFV eftersträvas bör troligen också upprepade gödsling undvikas.

Resultatet visade att man genom skogsskötselåtgärder har potential att påverka MFV hos unga tallar. Då MFV sjunker snabbt i juvenilveden kan man därför genom att avvakta med röjning och gödsling troligen minska andelen ved med höga MFV. Studien visade att en påverkan på MFV finns sex år efter behandling. Ju längre behandlingseffekten håller i sig desto större inverkan får MFV på produkter som tillverkas av veden. Hur länge behandlingseffekten kvarstår bör därför undersökas vidare.

MFV variation kunde inte förklaras tillfredsställande av regressionsanalysens ingående förklarande variabler. Här finns utrymme för mer ingående studier om vad som faktiskt påverkar

MFV. Det vore mycket intressant att undersöka om man genom urval och förädling kan få fram träd vars MFV påverkas mindre av tillväxthöjande skogsskötselåtgärder.

Mycket fokus ligger idag på volymproduktion inom utvecklingen av skogsskötselsystem. Men en ökad volymproduktion kan leda till en icke önskvärd påverkan på vedens och enskilda fibrers mekaniska och fysikaliska egenskaper. Skogsskötsel som ger högkvalitetsved och fibrer för specifika användningsområden bör ha potential att minska skogsindustrins fokus på volymproduktion. Sågade trävaror av högkvalitetsved bör kunna ha mindre dimensioner med bibehållna mekaniska egenskaper. Pappersprodukter med högt ställda krav på styvhet och draghållfasthet bör kunna göras tunnare om fiberråvaran håller högre kvalitet med avseende på MFV. Då MFV har stor påverkan på både ved- och fiberegenskaper är det av stor vikt att ytterligare utöka vår kunskap i vad som påverkar MFV och hur vi kan sköta våra skogar på ett sätt som ger ved och fibrer med önskade egenskaper.

5 Referenser

- Ahnlund Ulvcróna, K. (2011). *Effects of Silvicultural Treatments in Young Scots pine-dominated Stands on the Potential for Early Biofuel Harvests*. Akad. avh. Umeå: Sveriges Lantbruksuniversitet
- Bergander, A., Brändström, J., Daniel, G. & Salmén, L. (2002). *Fibril angle variability in earlywood of Norway spruce using soft rot cavities and polarization confocal microscopy*. *Journal of Wood Science*, vol. 48(4): 255-263
- Brändström, J. (2001). *Micro- and Ultrastructural Aspects of Norway Spruce Tracheids: A Review*. *IAWA Journal*, vol. 22(4), s. 333-353
- Cave I. D. (1968). *The Anisotropic Elasticity of the Plant Cell Wall*. *Wood Science and Technology*, vol. 2, s. 268-278
- Cave, I. D. & Walker, J. C. F. (1994). *Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle*. *Forest Products Journal*, vol. 44(5), s. 43-48
- Daniel, G. (2009). *Wood and Fibre Morphology. I: Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G., Wood Chemistry and Biotechnology*. s. 46-70. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-11-021339-3
- Desch, H. E. & Dinwoodie, J. M. (1996). *Timber – Structure, Properties, Conversion and Use*. London : MacMillan Press LTD. ISBN 0-333-60905-0
- Donaldson, L. (2008). *Microfibril Angle: Measurement, Variation and Relationships – a Review*. *IAWA Journal*, vol. 29(4), s. 345-386
- Donaldson, L. & Frankland (2004) *Ultrastructure of iodine treated wood*. *Holzforschung*, vol. 58, s. 219-225
- Eriksson, D., Lindberg, H. & Bergsten, U. (2006). *Influence of Silvicultural Regime on Wood Structure Characteristics and Mechanical Properties of Clear Wood in Pinus sylvestris*. *Silva Fennica*, vol. 40(4), s. 743-762
- Fellers, C. & Norman, B. (1996). *Pappersteknik*. 3. uppl. Stockholm: Avdelningen för Pappersteknik, Kungl Tekniska Högskolan. ISBN 91-7170-741-7
- Franklin, G. L. (1945). *Preparation of Thin Sections of Synthetic Resins and Wood-Resin Composites and New Maceration Method for Wood*. *Nature*, vol. 155, s. 51
- Fujiwara, S. & Yang, K. C. (2000). *The Relationship Between Cell Length and Ring Width and Circumferential Growth Rate in Five Canadian Species*. *IAWA Journal*, vol. 21(3), s. 335–345

- Khalili, S., Nilsson, T. & Daniel, G. (2001). *The use of soft rot fungi for determining the microfibrillar orientation in the S2 layer of pine tracheids*. European Journal of Wood and Wood Products, vol. 58(6), s. 439-447
- Lindström, H., Evans, J. & Verrill, S. (1998). *Influence of Cambial Age and Growth Conditions on Microfibril Angle in Young Norway Spruce*. Holzforshung, vol. 52, s. 573-581
- Lundgren, C. (2004). *Microfibril Angle and Density Patterns of Fertilized and Irrigated Norway Spruce*. Silva Fennica, vol. 38(1), s. 107-117
- Mattsson, S. (2002). *Pinus contorta growth in northern Sweden as affected by soil scarification*. New Forests, vol. 26(3), s. 217-231
- McMillin, C. W. (1973). *Fibril Angle of Loblolly Pine Wood as Related to Specific Gravity, Growth Rate, and Distance from Pith*. Wood Science Technology, vol. 7(4), s. 251-255
- Megraw, R.A. (1985). *Wood Quality factors in Loblolly Pine. The Influence of Tree Age, Position in Tree, and Cultural Practice on Wood Specific Gravity, Fiber Length, and Fibril Angle*. Atlanta: Tappi Press. ISBN 0898520487
- Megraw, R. A., Leaf, G. & Bremer D. (1998). *Longitudinal Shrinkage and Microfibril Angle in Loblolly Pine*. I: B.G. Butterfield (ed.), *Microfibril angle in wood*, s. 116–139. Christchurch: University of Canterbury
- Mörling T. (1995). *Effekter av beståndsbehandling på tallens vedbildning – en litteraturstudie*. Arbetsrapporter Nr 100. Umeå: Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsskötsel
- Mörling T. (1999). *Effects of Nitrogen Fertilisation and Thinning on Growth and Clear Wood Properties in Scots Pine*. Akad. avh. Umeå: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture
- Page, D. H., El-Hosseiny, F., Winkler, K. & A.P.S. Lancaster (1977). *Elastic modulus of single wood pulp fibres*. Tappi, vol. 60(4), s. 1070-1078
- Raymond, A. & Anderson, D. (2005). *Prior land-use influences wood properties of Pinus radiata in New South Wales*. New Zealand Journal of Forestry Science, vol. 35, s. 72-90
- Sauter, U. H., Mutz, R. & Munro, B. D. (1999). *Determining juvenile-mature wood transition in Scots pine using latewood density*. Wood and Fiber Science, vol. 31, s. 416-425
- Senft, J., F. & Bendtsen, B., A. (1985). *Measuring microfibrillar angles using light microscopy*. Wood and Fiber Science, vol. 17(4), s. 564-567
- Tsoumis, G. (1991). *Science and technology of wood : structure, properties, utilization*. New York: Chapman & Hall. ISBN 0-412-07851-1

Ulvcrona, T. & Ahnlund Ulvcrona, K. (2011). *The effects of pre-commercial thinning and fertilization on characteristics of juvenile clearwood of Scots pine (Pinus sylvestris L.)*. Forestry, vol. 0(0), s. 1-13

Valinger, E. (1992). *Effects of Thinning and Nitrogen Fertilization on Stem Growth and Stem Form of Pinus sylvestris Trees*. Scandinavian Journal of Forest Research, vol. 7, s 219-228

Xu, P., Donaldson, J., Walker, R., Evans, G. & Downes, G. (2004). *Effects of Density and Microfibril Orientation on the Vertical Variation of Low-stiffnes Wood in Radiata Pine Butt Logs*. Holzforschung, vol. 58, s. 673-677

Zobel, B. J. & van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood Variation – Its Causes and Control*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 0-387-50298-X

SENASTE UTGIVNA NUMMER

- 2011:7 Författare: Linda Nilsson
Skogar med höga sociala värden inom Sundsvalls kommun – olika intressenters attityd till den tätortsnära skogen och dess skötsel
- 2011:8 Författare: Charlotte Naucclér
Kan urskog vara kulturlandskap? – En tvärvetenskaplig studie av kulturspår och naturvärden i Eggelatsområdet
- 2011:9 Författare: Anton Larsson
Val av markbehandlingsmetod inom Sveaskogs innehav i norra Sverige
- 2011:10 Författare: Hanna Lundin
Lika oriktigt, som det är att ensidigt hålla på blädning lika förnuftsvidrigt är det att endast vilja förorda traktuggning” – Tidiga kalhyggen i Norrland
- 2011:11 Författare: Ida Karlsson
Brunnsröjning med kedjeröjsåg – effekter på kvarvarande bestånd
- 2011:12 Författare: Elsa Järvholm
Högskärmor och kalhyggesfritt skogsbruk på bördig mark i Medelpad
- 2011:13 Författare: Susanne Wiik
Kalkbarrskogar i Jämtland – vad karakteriserar de områden där kalkberoende mykorrhizasvampar förekommer?
- 2011:14 Författare: Andreas Nilsson
Krymper barrmassaved vid lagring? – En fallstudie i SCA:s Tövasystem
- 2011:15 Författare: Steve Fahlgren
Kärnvedsbildning i tall (*Pinus sylvestris* L.) – Startålder samt årlig tillväxt i Västerbotten
- 2011:16 Författare: Kerstin Frid
Kan hamlingen fortleva som tradition? – en studie över hamlingens historia och framtid i Bråbygden med omnejd
-
- 2012:1 Författare: Liisa Sars
Röjningsformens effekt på den yttre kvalitén hos björkstammar när beståndet närmar sig första gallring
- 2012:2 Författare: Daniel Timblad
Kvalitet och skador i tallungskog efter röjning vid olika stubbhöjder
- 2012:3 Författare: Aron Sandling
Epiphytic lichen flora in a boreal forest chronosequence
- 2012:4 Författare: Elsa Bengtsson
Leaf area index in *Vittelaria Paradoxa* parklands in Burkina Faso estimated by light interception and leaf sampling
- 2012:5 Författare: Tomas Jansson
Estimation of reindeer lichen biomass by image analysis
- 2012:6 Författare: Axel Eriksson
Röjningsformens effekt på tallens (*Pinus sylvestris* L.) tillväxt och kvalitetsegenskaper

Hela förteckningen på utgivna nummer hittar du på www.seksko.slu.se