

Träs svällning på mikro- och makronivå



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Bygg- och miljöteknologi / Byggnadsmaterial

Examensarbete:
Marie Grönvold

© Copyright Marie Grönvold

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Lunds Universitet
Box 882
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering
Lund University
Box 882
SE-251 08 Helsingborg
Sweden

Tryckt i Sverige
Media-Tryck
Biblioteksdirektionen
Lunds universitet
Lund 2016

Sammanfattning

Syftet med studierna var att undersöka sambandet mellan träs radiella svällning på mikro- och makronivå och hur svällningen korrelerade med träs densitet. Syftet var även att undersöka om lumens storlek förändrades från torrt till vattenmättat tillstånd för trä med olika densitet.

Två olika experiment utfördes. I det första experimentet undersöktes de olika träslagen i ett ljusmikroskop. Där fotograferades träproven i $\times 400$ förstoring och celler kunde urskiljas på individuell nivå, först i vattenmättat tillstånd och därefter i helt torrt tillstånd. Bilderna analyserades sedan och mätningar av individuella celler gjordes för att beräkna svällningskoefficienten S i radiell riktning, lumens areaförändring och cellväggens areaförändring. Dessutom beräknades svällningen mellan två fasta punkter. I det andra experimentet mättes den makroskopiska radiella svällningen, först i vattenmättat tillstånd och därefter i helt torrt tillstånd, med mätklocka. Mätresultaten från de mikroskopiska studierna och de makroskopiska studierna analyserades och jämfördes med varandra och med litteraturvärden.

Resultatet från mikroskopistudien visade att lumens area för de celler som studerades både kunde minska och öka. För de tio celler (medelvärde) som studerades per träslag var tendensen att för träslag med lägre densitet ökade lumens area, från torrt till vattenmättat tillstånd, medan det för träslag med högre densitet istället minskade. Sambandet var in princip linjärt. Det var dock stora spridningar inom varje art och vidare studier måste utföras för att eventuellt säkra ett samband. Studien visade att det fanns en viss korrelation mellan den radiella svällningen och träs densitet. Det är dock inte helt linjärt och det är oklart vad avvikelserna beror på. Fibermåtnadspunkten skiljer sig troligtvis åt för de olika träslagen och ingen hänsyn har tagits till det. Att mäta den radiella svällningen genom att välja ut två fasta punkter i träprovet var en bra metod då svällningen mycket väl överensstämde med litteraturvärden. Svällningskoefficienter från de makroskopiska mätningarna visade också en viss samstämmighet med den radiella svällningen på mikroskopisk nivå. En del värden var dock något högre. Det kan bero på att det vid makroskopiska mätningarna var svårt att mäta i ren radiell riktning och delar av tangentiell riktning kom med i resultatet.

En utmaning var att komma på en metod att få bra bilder, där enskilda celler kunde identifieras och sedan hitta tillbaka till samma del av träprovet efter torkning. Metoden som användes i försöket fungerade bra men var tidskrävande. Metoden skulle kunna utvecklas ytterligare för att ge en ännu bättre bild av hur svällningen för trä med olika densitet ser ut.

Nyckelord; svällningskoefficient, radiell svällning, densitet, trä, lumen

Abstract

The aim of this study was to examine if the radial swelling of wood correlated with the density of the wood. The aim was also to investigate whether the area of the lumen changed from dry to water-saturated state for wood with different densities.

Two different experiments were performed. In the first experiment a light microscope was used to examine different species of wood. The wood samples were photographed with a magnification of $\times 400$ and the cells could be identified at an individual level, first in a water-saturated state then completely dry. The images were analyzed and the swelling coefficient was calculated (for the radial direction). The change in area of the lumen was also measured as well as the change of the cell wall area. In addition, the swelling between two fixed points was determined. The second part of the experiment was to measure the radial swelling, from water-saturated state to completely dry, was measured at a macroscopic level using larger specimens ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$). The results from the two experiments were analyzed and compared with each other and literature values for radial swelling.

The result from the microscopic study shows that the lumen area of the cells could both decrease and increase. There is a tendency that for wood with lower density the lumen area increased, from dry to water-saturated state, while for wood with higher density the lumen area decreased. It was an almost linear correlation. However, there was a large spread within each species and further studies must be made to ensure a correlation. The study showed that there is some correlation between the radial swelling of wood and its density, but it was not completely linear. The difference in fiber saturation point for the different species probably had an impact, but it could also be due to the change in lumen size or both. Measuring the radial swelling by selecting two fixed points was a good method and the values corresponded very well with literature values. Swelling coefficients from the macroscopic measurements were slightly higher than literature values, which may be due to the difficulties in measuring in a pure radial direction.

One of the biggest challenges was to find a method that would result in good images, where individual cells could be identified and then find the exact same part of the wood after drying. The method used in the experiment worked very well although it was time consuming. The method could be further developed to provide even better images for studying swelling of wood.

Keywords; swelling coefficient, radial swelling, density, wood, lumen

Förord

Det här examensarbetet ingick som avslutande moment av utbildningen Byggteknik med arkitektur (180 Hp) och utfördes på avdelningen Byggnadsmaterial på Lunds tekniska högskola 2016 i samarbete med Biomassevidenskab og teknologi, Köpenhamns universitet.

Arbetet har gett mig en ökad förståelse för träs struktur och dess svällningsegenskaper, men det har även gett mig en inblick i forskarvärlden och det är erfarenheter som jag kommer bära med mig.

Varmt tack till min handledare Maria Fredriksson som har varit ett stort stöd och bistått med vägledning och ett härligt engagemang. Jag vill även tacka mina danska handledare Emil Engelund Thybring och Lisbeth Garbrecht Thygesen för att ni tog så väl hand om mig när jag spanade på träceller i mikroskop vid Köpenhamns universitet. Stefan Backe vill jag också passa på att tacka, framför allt för att du hjälpte mig såga till pyttesmå dubbar.

Kristianstad september 2016

Marie Grönvold

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
2 Teori	3
2.1 Träets struktur på makronivå	3
2.1.1 Stammens uppbyggnad	3
2.1.2 Kärnved och splintved	4
2.1.3 Märgstrålar.....	5
2.1.4 Hartskanaler.....	5
2.2 Träets struktur på mikronivå	5
2.2.1 Cellens uppbyggnad	5
2.2.2 Celler i barrträ	6
2.2.3 Celler i lövträ	7
2.2.4 Porer som förbinder celler	8
2.2.5 Densitet och <i>specific gravity</i>	9
2.3 Vatten i trä och fuktbetingande rörelser	10
2.4 Beskrivning av träslag i försök	13
2.4.1 Abachi (<i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum)	14
2.4.2 Poppel (<i>Populus x canadensis</i> Moench.)	15
2.4.3 Gran (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.).....	16
2.4.4 Bok (<i>Fagus sylvatica</i> L.).....	17
2.4.5 Azobé (<i>Lophira alata</i> C.F. Gaertn.)	18
3 Material och Metod	19
3.1 Material	19
3.2 Mätning av mikroskopisk svällning	20
3.3 Mätning av makroskopisk svällning	21
4 Resultat	23
4.1 Mikroskopisk svällning	23
4.2 Makroskopisk svällning	26
5 Diskussion	27
6 Referenser	31
7 Bilagor	33
7.1 Bilaga 1; Bilder mikroskopi	33

1 Inledning

Användningen av trä som byggnadsmaterial sträcker sig långt bak i tiden. Det naturliga har varit att använda sig av de byggmaterial som funnits tillgå i den närmsta omgivningen. Över hela världen finns det hundratals år gamla träbyggnader, i Sverige är den äldsta bevarade träbyggnaden troligen Granhults kyrka utanför Växjö, byggd runt 1220 (Thörnqvist 2008). På senare tid har intresset för att bygga med trä ökat. Regeringen beslutade 2002 om att ta fram en nationell strategi för att främja ökad användning av trä och träprodukter i byggandet, där en del av strategin på lång sikt går ut på att stödja forskningen om trä för att främja ett modernt träbyggande (Näringsdepartementet 2004).

Hus som byggs idag har allt högre energikrav på sig vilket har lett till minskad energianvändning för uppvärmning. För att nå en högre energiprestanda så ökar dock även materialanvändningen. Byggnaders klimatpåverkan förskjuts i och med detta alltmer till byggprocessen. En rapport från Sveriges byggindustrier (2015) visade att materialproduktionen står för majoriteten av klimatpåverkan från byggprocessen. Det är då allt viktigare att minska användningen av energikrävande material såsom betong och öka användningen av material som har låg klimatpåverkan, där trä är ett bra alternativ (Liljenström et al. 2015).

Anledningen till att trä är anses vara ett material med låg klimatpåverkan är att när träd växer binder de koldioxid via fotosyntes och lagrar det i stam, grenar, rötter och marken. När träd dör och förmultnar så frigörs koldioxiden till atmosfären igen. Det ingår således i ett kretslopp. Vid avverkning och framställning av träprodukter så fortsätter kolet att vara bundet tills dess att produkten har tjänat ut sitt syfte och förbränns. Då frigörs energi och koldioxidet fångas åter igen upp av atmosfären. Om biomassa återanvänds och återvinns, betyder det att koldioxiden hålls utanför atmosfären under längre tidsperioder. Den temporära lagringen av koldioxid är en betydande faktor för träbyggnaders potential att minska klimatpåverkan (Penaloza 2015).

Trä har dock även en del nackdelar som byggnadsmaterial. Det är ett organiskt material som bryts ner av mikroorganismer när det utsätts för höga fukthalter. Trä är inte heller volymbeständig. För att utveckla nya tekniska lösningar och bygga hållbara träkonstruktioner så behövs förståelse och kunskap om träs struktur och egenskaper. Fokus i det här examensarbetet har varit att undersöka dimensionsförändringar i trä orsakade av fukt. Trä sväller när vatten tas upp och binds i cellväggen och krymper när vatten avges. I en äldre studie av träs svällning, har det beskrivits att storleken på lumen, det vill säga cellhålligheten innanför cellväggarna, inte ändras när trä krymper eller sväller

(Stamm 1964). I så fall betyder det att svällningen är proportionell mot träs densitet. Senare forskning menar på att storleken på lumen i cellerna inte alls är konstant som påstås tidigare. Enligt studier utförda på Douglasgran (*Pseudotsuga menziesii*) av Murata och Masuda (2006) så kan lumens storlek både öka och minska i storlek när trä upptar vatten.

1.1 Syfte

Syftet med studierna var att undersöka sambandet mellan träs radiella svällning på mikro- och makronivå och hur svällningen korrelerade med träs densitet. Syftet med studierna var även att undersöka om lumens storlek ändrades från torrt till vattenmättat tillstånd för olika träslag.

2 Teori

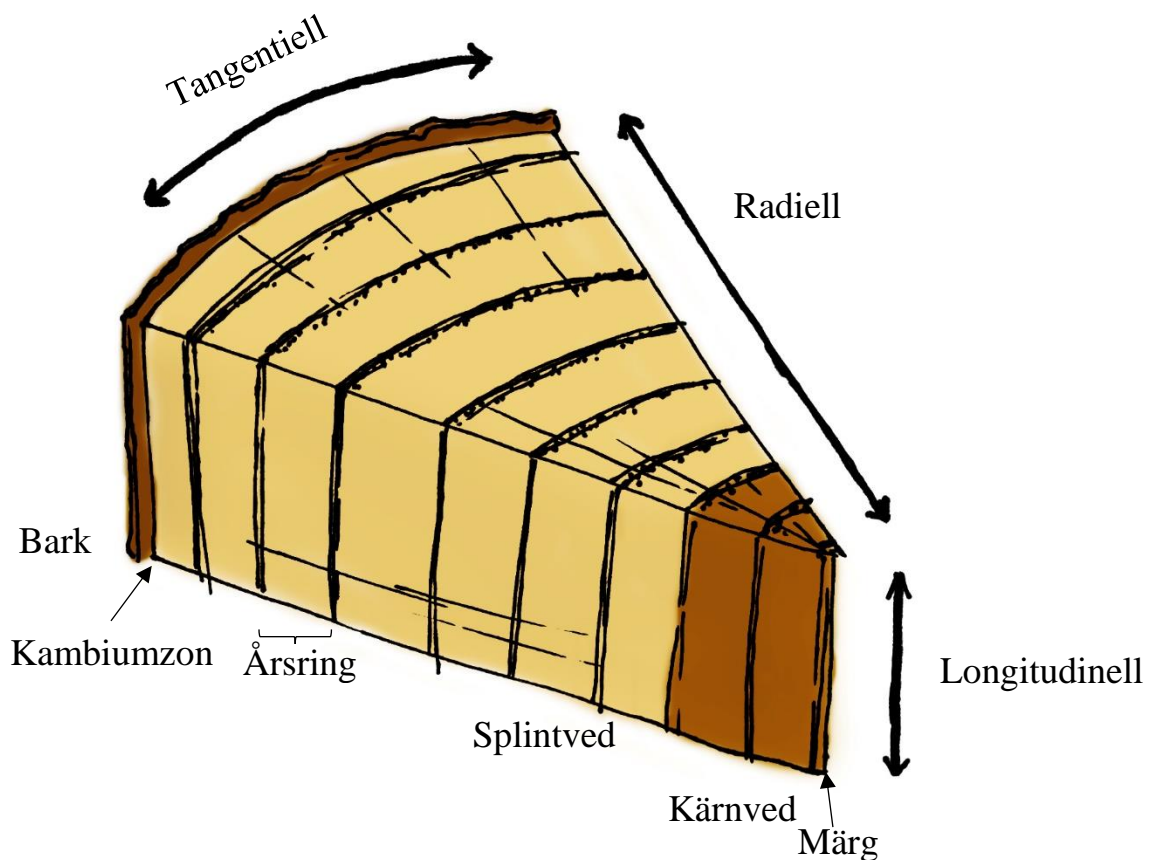
När ingen annan referens angetts så refererar nedanstående text till Dinwoodie (2000) och Shmulsky and Jones (2011).

2.1 Träets struktur på makronivå

2.1.1 Stammens uppbyggnad

Den största delen av trädets biomassa finns i trädstammen. För ett barrträd är andelen stam $\frac{2}{3}$ av det totala trädet (Saarman 1992). Stammen har tre viktiga funktioner att uppfylla. Den första är att vara den bärande enheten för trädets krona, den andra funktionen är att vara ledningsorgan för vatten och mineraler och den tredje och sista uppgiften för stammen är att agera förvaringsdepå för kolhydrater tills dess att de behövs.

I mitten av stammen löper mörgen i trädets längdriktning. Den omges av veden (xylem) och sträcker sig upp till toppen. Från toppen växer trädet på längden och bildar nya grenar. Mörgen består av tunnväggiga celler som kan lagra näring. Mörgen är endast ett par mm bred i tvärsnitt och formen kan variera. Tvärsnittets form kan användas för att identifiera olika träslag (Saarman 1992). I vissa delar av världen är tillväxten hos trädet kontinuerlig, då tenderar trädet få en enhetlig jämn struktur. I Sverige är klimatet tempererat med fyra årstider och tillväxten blir då säsongsbetonad vilket resulterar i att träden får årsringar. Vårveden bildas när växtsäsongen börjar och det primära behovet för trädet är ledning. I slutet av växtsäsongen bildas sommarveden och då är den dominerande funktionen stöd. För barrträd ger det här växtsättet, tunnväggiga och porösa trakeider i början av växtsäsongen, det främjar den rikliga vätsketransport som behövs för tillväxt. I slutet av växtsäsongen bildas alltmer tjockväggiga trakeider. I ett vanligt barrträd kan sommarveden vara ca tre gånger tyngre än vårveden (Saarman 1992). Trä är ett anisotrop material med olika strukturella och fysikaliska egenskaper i olika riktningar. Första huvudriktningen är longitudinella riktningen som går längs med trädet och stammens längdriktning. Vid ett tvärsnitt av stammen kan två riktningar till identifieras. Den radiella riktningen utgår från trädets mitt ut mot barken och den tangentiella riktningen följer tangenten till årsringarna. Träs huvudriktningar finns presenterade i figur 1.



Figur 1. Träets tre huvudriktningar.

2.1.2 Kärnved och splintved

Splintveden är den yttre, ofta ljusare delen av ved i en trädstam. Det är främst där ledning och förvaring av vatten och mineraler sker. De delar i mitten som inte längre utför de här uppgifterna, kallas kärnved. Även om det oftast finns en tydlig färgskillnad mellan kärn- och splintved så är det inte den avgörande faktorn för att skilja dem åt. Definitionen av kärnved är att där finns inga levande celler, de återfinns endast i splintveden (Kollmann 1968). Bredden på splintveden varierar mellan olika typer av träd och beror även på tillväxthastigheten, trädets ålder och storleken på dess krona. Träd med stor krona tenderar ha en mindre andel kärnved eftersom det har ett stort vätsketransportsbehov och splintveden behövs för att tillgodose de behoven (Hillis 1962). Andelen splintved av trädets tvärsnitt är ungefär 10 % till 60 %. Hos mycket unga träd täcker splintveden hela tvärsnittet. Kärnveden har hos vissa träslag bättre beständighet än splintveden. Det beror främst på de ämnen som ansamlas i kärnveden. Ett samlingsnamn på dessa substanser är extraktivämnena. De här ämnena bidrar till att kärnveden hos vissa träslag antar en mörkare ton och gör träet motståndskraftigt mot svamp och insekter.

Exempel på extraktivämnen är vax, fetter och socker. En del är av större ekonomiskt intresse såsom gummi och harts.

På ett friskt träd är den största delen död vävnad. Trädets reproducerande del återfinns mellan innerbarken och veden, det är ett område som sträcker sig runt om hela trädet och kallas kambiumzonen. Förutom i kambiumzonen så finns det också levande parenkymceller i splintveden. Under växtperioden delar sig celler i den här zonen och det resulterar i två typer av celler. En del som fortsätter att vara meristem, d.v.s. en del av kambiumzonen. Den andra delen blir antingen vedceller inåt (xylem) eller om den bildas utåt, barkceller (floem) till innerbarken. Allt eftersom omkretsen av trädet ökar så måste även den kambiala zonen öka i tangentiell riktning. Det sker genom periodisk tangentiell delning av kambialceller.

2.1.3 Märgstrålar

Märgsstrålarna löper radiellt i trädets tvärriktning och skapar vägar för att transportera och lagra vatten och näring till trädet. En del strålar går från innerbarken till märgen, de kallas primärstrålar. Sekundära märgstrålar är kortare, de sträcker sig inte hela vägen fram till märgen. Ur teknisk synpunkt är märgstrålarna en svaghet i veden och på grund av sitt höga näringsinnehåll så är det en groplats för svampar. Märgstrålarna är också orsaken till att veden lättast klyvs längs deras riktning (Saarman 1992).

2.1.4 Hartskanaler

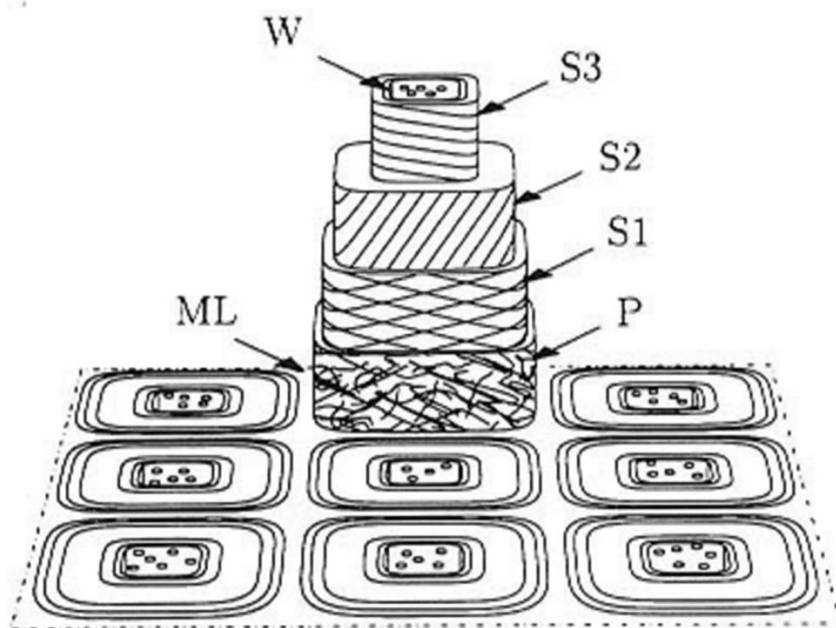
Hartskanaler transporterar och lagrar hartser i barrträd. De förekommer antingen längdriktningen eller i märgstrålarna i radiell riktning. De horisontella och vertikala hartskanalerna är sammankopplade och bildar ett sammankopplat nätverk inne i trädet. Storleken och frekvensen av hartskanaler varierar mellan arter. En hartskanal består av ett intercelluär mellanrum som är omringat av specialiserade parenkymceller som utsöndrar hartser i kanalen. Tall innehåller fler och större kanaler än gran. I gran är harts mer jämnt fördelat över stammen, medan det i tall tenderar att koncentrera sig till kärnveden och roten (Ilvessalo-Pfäffli 1995).

2.2 Träets struktur på mikronivå

2.2.1 Cellens uppbyggnad

Cellen består i minsta beståndsdel av glukos som är sammankopplade i cellulosakedjor och finns inne i cellväggen. Cellulosakedjorna är ordnade i segment som är parallellt ordnade i s.k. mikrofibriller.

Den nybildade cellen består av ett tunt lager membran som kallas den primära väggen. I en process som tar dagar till flera veckor så förstoras cellen och cellväggen blir gradvis tjockare för att sedermera resultera i att ett andra lager bildas på cellens insida, den sekundära väggen. I primärväggen ligger microfibrillerna slumpmässigt spridda till skillnad från i den sekundära väggen, där de ligger microfibrillerna i mycket organiserade mönster. Vidare är den sekundära väggen indelad i 3 st. lager beroende på vilken vinkel microfibrillerna är ordnade. Vanligvis benämner man de väggarna S1, S2 och S3. Att cellen är uppbyggd på det här sättet är den största anledningen till träs svällningsegenskaper. Hur cellen är uppbyggd finns illustrerat i figur 2.



Figur 2. Cellens uppbyggnad; W är vårtlagret, S1,S2 och S3 är delar av det sekundära lagret, P är det primära lagret och ML är mittlamellen (Wadsö 1993).

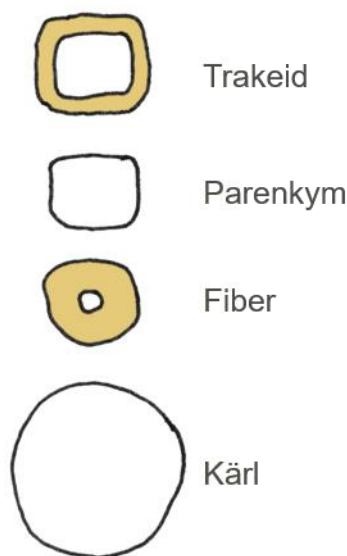
Förutom cellulosa så finns två andra ämnen i trä; hemicellulosa och lignin. De fungerar som sammanfogare och bidrar till den strukturella helheten av trä och även till hårdheten. Hemicellulosan är precis som cellulosa kolhydrater som är uppbyggt av sockerenheter, men innehåller andra typer av delar.

Hemicellulosamolekylen består av betydligt färre enheter än cellulosa. Dess motståndskraft mot lösningar är också dålig i jämförelse. Lignin är en komplex tredimensionell aromatisk molekyl. Ligninet finns i bl. a i mittlamellerna. Den största volymen av lignin återfinns i cellens sekundära vägg och bidrar till träets hållfasthet.

2.2.2 Celler i barrträ

Det finns stora skillnader i hur veden hos barr och lövträd är uppbyggda. De skillnaderna beror bl. a på vilka typer av celler som trädet består av och hur

fördelningen av cellerna ser ut. En principiell skiss för de olika typer av cellerna, i tvärsnitt, visas i figur 3. Majoriteten av barrträden består till 90-95 % av en celltyp; longitudinella trakeidceller. De är ungefär 3-4 mm i längd med en diameter på ca 25-45 μm och är rektangulära i tvärsnittet. De har en hålighets i mitten och är stängda i ändarna. Populärt brukar de liknas vid ett sugrör som går ihop i ändarna. De longitudinella trakeidcellerna har en stabiliserande och ledande funktion. Vidare består en del barrträd även av en mindre andel longitudinella parenkymceller (1-2 %). De är formade ungefär som trakeider, men de är indelade i fler delar på längden. Parenkymcellerna framstår på så sätt som staplade på vart annat i serier. För barrträd är cellerna i mägstrålarna mestadels arrangerade i 1 rad (tangentiell riktning) och 1 till 20 st., ibland upp till 60 st. på höjden. Mägstrålarna i barrträd består antingen av endast parenkymceller eller en kombination parenkymceller och mägstråletrakeider. I de flerskiktiga mägstrålarna finns det alltid en hartskanal i centrum. Mägstrålar upptar ungefär 5-11 % av barrträdens volym (Ilvessalo-Pfäffli 1995) och deras huvudfunktion är att lagra näring.



Figur 3. Principiell skiss, i tvärsnitt, av fyra typer av celler.

2.2.3 Celler i lövträ

I lövträd finns i huvudsak fyra stycken typer av celler; longitudinella parenkymceller, fiber, kärl, och horisontella parenkymceller (i mägstrålarna). De longitudinella parenkymcellerna kan i vissa lövträd, till skillnad från i barrträ, uppta en stor andel av celler i veden, upp till 24 %. Fibrerna kan vid en första anblick visa stora likheter med barrträdens longitudinella trakeider, de är båda långa i förhållande till dess diameter och den radiella bredden hos cellerna kan minska i sommarveden. Fibrerna är dock betydligt kortare i längd än trakeiderna (ofta mindre än 1 mm) och sett i ett tvärsnitt mer runda i

formen. Medan trakeiderna både har en ledande och stabiliserande funktion så har fibrer en mer specialiserad stabiliserande funktion. Den ledande funktionen i veden tar främst kärnen hand om i lövträd. Kärnelementen är relativt korta 0,2-1,2 mm och relativt vida, upptill 0,5 mm. När de befinner sig ovanpå varandra bildar de effektiva ledningsrör. Allt som oftast är kärnen inte helt parallella med en vertikal orientering, utan är snarare uppbyggda som nätverk som med en tangentiell variation bidrar till att trädets grenar får näring från många olika delar av roten. Storleken på kärnen och hur de är ordnade kan användas för att identifiera olika träslag.

Hos vissa lövträd består stora delar av vårveden av kärn med stor diameter omringade av parenkymer och trakeider med endast några få fibrer. I sommarveden minskar kärndiametern och vävnaden består till större del av fibrer. De tekniska egenskaperna hos vårved och sommarved kan därför skilja sig åt. Trä med den här typen av tvåfasset kallad ringporig. Majoriteten av lövträ visar dock endast en liten skillnad hos kärnens storlek mellan vår- och sommarved. De kallas ströporiga.

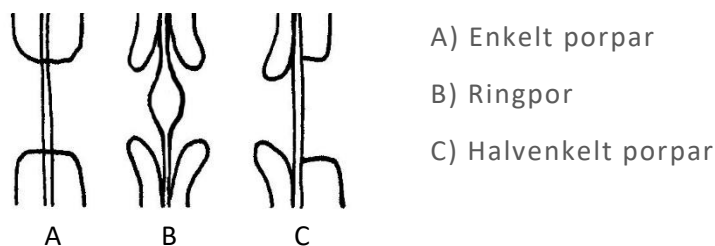
Till skillnad från barrträd så består lövträdens märkestrålar endast av parenkymceller. I tangentiell riktning kan de förekomma i 1 till 30 st. i bredd. Sedd i radiell sektion kan parenkymcellen anta olika former. Antingen kan den vara kvadratisk eller ha en mer rektangulär form. Vid det senare kan den vara arrangerad så att den långa sidan på rektangeln är vinkelrätt orienterad i longitudinell riktning (Ilvessalo-Pfäffli 1995).

2.2.4 Porer som förbinder celler

Alla typer av celler har små hål i den sekundära väggen, s.k. porer. De porer som finns mellan parenkymceller liknar inte de som finns i andra typer av celler. Porerna som är placerade på en specifik plats i en cell är spegelvänt förekommande i cellen intill. De bildar således ett par. Genom de här håligheter kan vätskor och gaser enklare ta sig mellan celler. Porerna är den främsta vägen för transport från en cells lumen till en annan. De porer som finns på parenkymceller kallas enkla porer. Mellan porparen är den primära väggen intakt och endast den sekundära väggen är perforerad. Det tunna lager som finns mellan cellerna, mittlamellen, tillsammans med cellernas primära väggar bildar pormembranet. Mellan parenkymceller och trakeider eller kärn finns halvenkla porer. De har en välvd del på ena sidan och på parenkymcellens sida har den ingen. Det finns ett pormembran men ingen torus. Olika storlekar och former av dessa porer studeras för att se olika särdrag hos barrträd.

Ringporer kallas den typ av porer som inte finns på parenkymcellen. Den har en välvd del kring öppningen och är konkav mot mittlamellen. Pormembranet

i en ringpor genomgår en modifiering, där membranet i mitten blir tjockare genom ackumulation och hårt packat i ett cirkulärt mönster av mikrofibriller. Den här förtjockningen kallas torus. Det som omger torusen kallas margo. Margo skiljer sig från en normal primärvägg genom att ett nät formas av mikrofibrillerna och lägger sig över den primära väggen och sammankopplar torusen till porens utsida. Samtidigt bryts mittlamellen ner och kvar lämnas ett mer eller mindre öppet nätverk. Ringporer har ungefär samma uppbyggnad i barr- och lövträ förutom att membranen skiljer sig en del åt. Membran för alla porkombinationer i lövträ påminner om de som finns i enkla- och halvenkla porpar i barrträ. Tidigare misstänktes att porerna minskar fiberns styrka, men det påståendet finns det inte tillräckligt med vetenskapliga belägg för. Porerna verkar vara utformade på ett sätt så att de har maximal effekt utan att minska styrkan av den sekundära väggen. Olika typer av porer finns redovisade i figur 4.



Figur 4. Olika typer av porer.

2.2.5 Densitet och *specific gravity*

Densitet är ett mått på ett ämnes täthet, dess massa per volymenhet. Densiteten i trä varierar med dess fukttinnehåll. Porositeten hos olika träslag varierar även dess densitet, där trä med hög porositet får en lägre densitet. Även om densiteten för trä kan variera mycket, så är densiteten för cellväggsmaterialet konstant med ungefär 1500 kg/m^3 . Med andra ord om cellumen inte skulle existera så skulle ett maximum för trä i torrt tillstånd vara 1500 kg/m^3 , vilket också kallas kompaktdensiteten för trä. (Dinwoodie 1989). Densitet kan definieras på olika sätt, i det här arbetet är den definierad som torrdensitet.

$$\rho_{torr} = \frac{m_{torr}}{V_{torr}} \quad (\text{Ekv. 1})$$

där ρ_{torr} är torrdensitet, m_{torr} är den torra massan och V_{torr} är den torra volymen.

Ofta i litteratur används begreppet *specific gravity* för att beskriva ett ämnes täthet. *Specific gravity* är förhållandet mellan densiteten av materialet och densiteten för vatten (vid 4°C). Beroende på ifall svällningskoefficienten uttrycks som krympning (baserad på våt volym) eller svällning (baserad på torr volym) så är definitionen av *specific gravity* olika. För svällning definieras *specific gravity*:

$$g = \frac{m_{torr}}{V_{torr}} \times \frac{1}{\rho_{vatten}} \quad (\text{Ekv. 2})$$

där g är *specific gravity*, m_{torr} är den torra massan, V_{torr} är den torra volymen och ρ_{vatten} är densiteten för vatten vid 4 grader (1000 kg/m^3).

Vid användning av ovanstående definition av *specific gravity* så innebär det att direkta paralleller kan dras mellan studier som är beräknade med *specific gravity* och torrdensitet. Tätheten hos cellväggen har studerats av många olika forskare ända sedan mitten av 1800-talet. I de flesta fall har studierna visat en *specific gravity* på mellan 1,45 och 1,54 (Dinwoodie 1989).

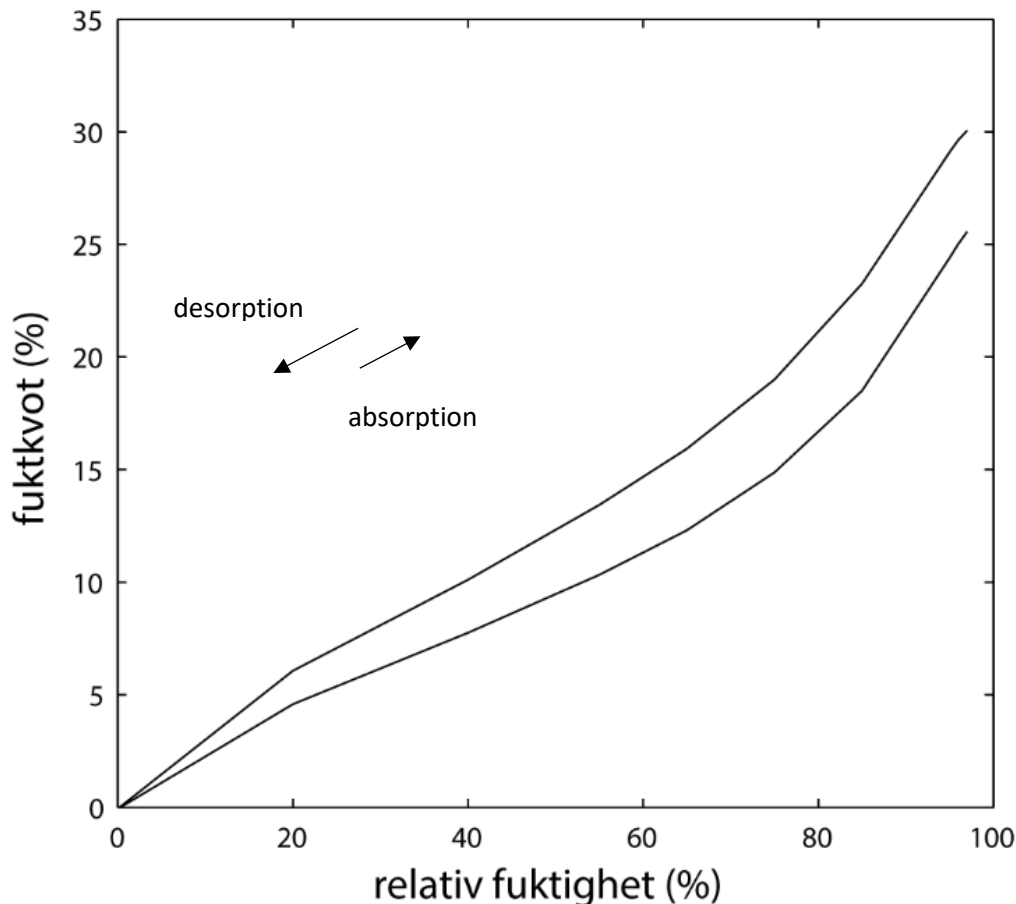
2.3 Vatten i trä och fuktbetingande rörelser

Trä är ett hygroskopiskt material, vilket innebär att det strävar efter att komma i jämvikt med omgivande lufts relativa luftfuktighet. Det råder således ett bestämt förhållande mellan träets jämviktsfuktkvot, den relativa fuktigheten och temperaturen. Det kan beskrivas med en sorptionsisoterm. Hur vatten tas upp (absorption) och avges (desorption) i trä är mycket komplicerade processer. Absorption- och desorptionsisotermen skiljer sig åt. Skillnaden i fuktkvot mellan sorptionsisotermerna kallas hysteres se figur 5. Trä sväller eller krymper beroende på mängden vatten det innehåller och dess egenskaper påverkas mycket av de här processerna (Stamm 1964). Vatten i trä kan lagras på olika sätt, dels i cellväggen och dels i cellhåligheterna. Det sker en gradvis övergång mellan de olika sätten att lagras. Det vatten som finns i cellväggen är hårdare bundet än det vatten som befinner sig i cellhåligheterna, det fria vattnet.

Fuktkvoten u är förhållandet mellan den mängd fukt som ingår en viss materialmängd och den torra massan

$$u = \frac{m - m_{torr}}{m_{torr}} \quad (\text{Ekv. 3})$$

där u är fuktkvot, m är massa vid mättillfället och m_{torr} är den torra massan. Den punkt som nås när cellen inte sväller mer och när hållfastheten inte längre ändras kallas fibermättnadspunkten. Vid rumstemperatur når de flesta träslag fibermättnadspunkten vid 25-30% i fuktkvot. Det finns dock vissa svårigheter att mäta fibermättnadspunkten experimentellt (Skaar 1988). Vid fuktkvoter över fibermättnadspunkten så lagras vatten i lumen och i andra små utrymmen t ex ringporer. Då hålls fukten kvar endast av kapillära krafter (Saarman 1992).



Figur 5. Sorptionsisoterm för gran (*Picea abies* (L.) Karst.) (Fredriksson 2016).

Trä är ett anisotropt material, vilket innebär att det har olika fysikaliska egenskaper i olika riktningar. Trä sväller när det tar upp vatten och krymper när vatten avges. Det är dock endast under fibermättnadspunkten som svällning och krympning sker, när cellväggen tar upp eller avger vatten. Trä krymper/sväller olika i de tre huvudriktningarna. I längdriktningen är krympningen liten, ungefär 0,1-0,2 % för de flesta arter och överstiger sällan 0,4 %. I tangentiell och radiell riktning är svällningen dock betydligt större; svällningen i tangentiell riktning är ca 1,5–3,0 gånger större än i radiell riktning. De avgörande anatomiska faktorerna för skillnader i radiell och tangentiell svällning är troligen förekomsten av märkestrålar, frekvensen av porer på cellväggar i de olika riktningarna, dominansen av sommarved i den tangentiella riktningen samt skillnader i mängden cellmaterial mellan radiell och tangentiell riktning. Det är cellens sekundära vägg som till störst del bestämmer svällningsegenskaperna, S1 och S3 lagret är betydligt tunnare än S2. Således får S2 en större betydelse för hur cellen uppför sig. I S2-lagret är mikrofibrillvinkeln mycket liten mot cellens vertikala axel. Att mikrofibrillerna är ordnade just så har stor betydelse för hur trä sväller. Svällningen sker nämligen vinkelrätt mot mikrofibrillernas längdriktning och de finns ett starkt motstånd till svällning i längdriktning, detta är anledning till att svällningen i längdriktningen är avsevärt mycket mindre än svällningen i

tangentiell och radiell riktning. I S1 och S3 lagret är mikrofibrillerna ordnade i vinkelrätt till cellens vertikala axel (Skaar 1988).

Som tidigare nämnts tidigare så är kompaktdensiteten hos cellväggen i trä ett konstant värde på ca 1500 kg/ m³. Om cellväggens struktur var homogen skulle volymen av krympning och svällning vara oberoende av hålighetsvolymen i träet (Skaar 1988). Stamm (1964) beskriver att det finns tendens till samband mellan svällningen i volym (S) och fibermättnadspunkten (f) och *specific gravity* (g)

$$S = fg \quad (\text{Ekv.4})$$

Vidare menar Stamm (1964) att det finns teoretiska grunder som visar att volymen av lumen och porer måste vara konstant för att det ovanstående sambandet ska gälla. Om svällningen av trä inte skulle variera med *specific gravity*/densitet och all svällning skulle ske inåt och diametern av lumen skulle minska i storlek skulle inte ovanstående samband vara giltigt. Mikroskopiska tester som Beiser (1933) utförde påvisade endast mindre ändringar av area hos lumen av träslagen Gran *Picea sp.* och Björk *Betula sp.* (Siau 1984). Dock skriver Siau (1984) senare att antagandet om att lumen skulle vara konstant inte gäller alla träslag, men att det för det mesta är en rimlig antagelse.

Studier som Stamm och Loughbough (1942) utförde visade på att den beräknade fibermättnadspunkten skilde sig åt på en stor andel av träslagen som ingick i deras experiment och att variationen antingen kunde förklaras med att det faktiskt var så att fibermättnadspunkten skilde sig åt mellan träslagen eller så kunde det kanske bero på att cellhåligheterna krympte eller svällde, eller både och. Skaar (1988) beskriver summeringar av 198 st. träslag från tempererade områden och 209 st. träslag från tropiska områden där resultaten tyder på att det faktiskt verkar, som en generell regel, att volymsvällning är proportionerlig till träs densitet. För träslag från de tempererade områdena blir den beräknade fibermättnadspunkten i spannet med vad som vanligtvis associeras till fibermättnadspunkt för trä, mellan 25 % och 30 %. För de tropiska träslagen verkar fibermättnadspunkten anta ett lägre värde.

Inom varje art och i olika delar av enskilda träd finns det också skillnader i svällning och krympning. Det finns omständigheter som försvårar mätningar på trä. Faktorer som har betydelse är bl. a storleken och formen på biten trä, då träfibrernas riktning och fuktkvot ändras med tjockleken. Densiteten hos träprovet påverkar. Ju högre densitet, desto mer kommer provet att svälla/krympa. Dessutom påverkas träprovet av vilken hastighet det torkas. De inre spänningarna som uppstår p.g.a. skillnaderna av krympning i de olika

riktningarna resulterar ofta i en mindre krympning än normalt. En hastig torkning kan även leda till att vissa celler kollapsar och på så vis leda till en ökad krympning än normalt. Förekomsten av extraktivämnen påverkar också svällning och krympning.

2.4 Beskrivning av träslag i försök

Till försöken har träslag valts med hänsyn till deras olika densitet, för att täcka in ett stort densitetsspann. På så vis kan sambandet mellan dess densitet och svällningen studeras och utredas. I tabell 1 presenteras litteraturvärden för de olika träslagens densitet och svällningskoefficienter i radiell och tangentiell riktning, samt volymsvällning. Vidare presenteras träslagen var för sig, dess växtsätt och användningsområden.

Tabell 1. Densitet och svällningskoefficienter för radiell, tangentiell riktning samt volymsvällning från torrt till vattenmättat tillstånd. Notera att för poppel används värden för asp.

	Torrdensitet [kg/m ³]	Densitet (u=12%) [kg/m ³]	Radiell svällning [%]	Tangentiell svällning [%]	Volym svällning [%]
Abachi (<i>Triplochiton scleroxylon</i> K. Schum)	320-360 ²	360-400 ²	2,8–3,5 ²	4,9–5,9 ²	9-11 ¹
Asp (<i>Populus tremula</i> Linné)	440-490 ²	490-540 ²	3,1–4,5 ²	8,5–9,6 ²	13,5-14 ²
Gran (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)	370-440 ²	390-480 ²	3,6–4,2 ²	7,8–8,8 ²	12,0 ¹
Bok Bok (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	586 ⁵	620 ⁵	3-6 ³	6-12 ³	17,5 ¹
Azobé (<i>Lophira alata</i> Banks ex Gaertn.F.)	990 ⁵	1024 ⁵	8,4 ⁴	11,0 ⁴	17,0 ⁴

¹ Saarman (1992)

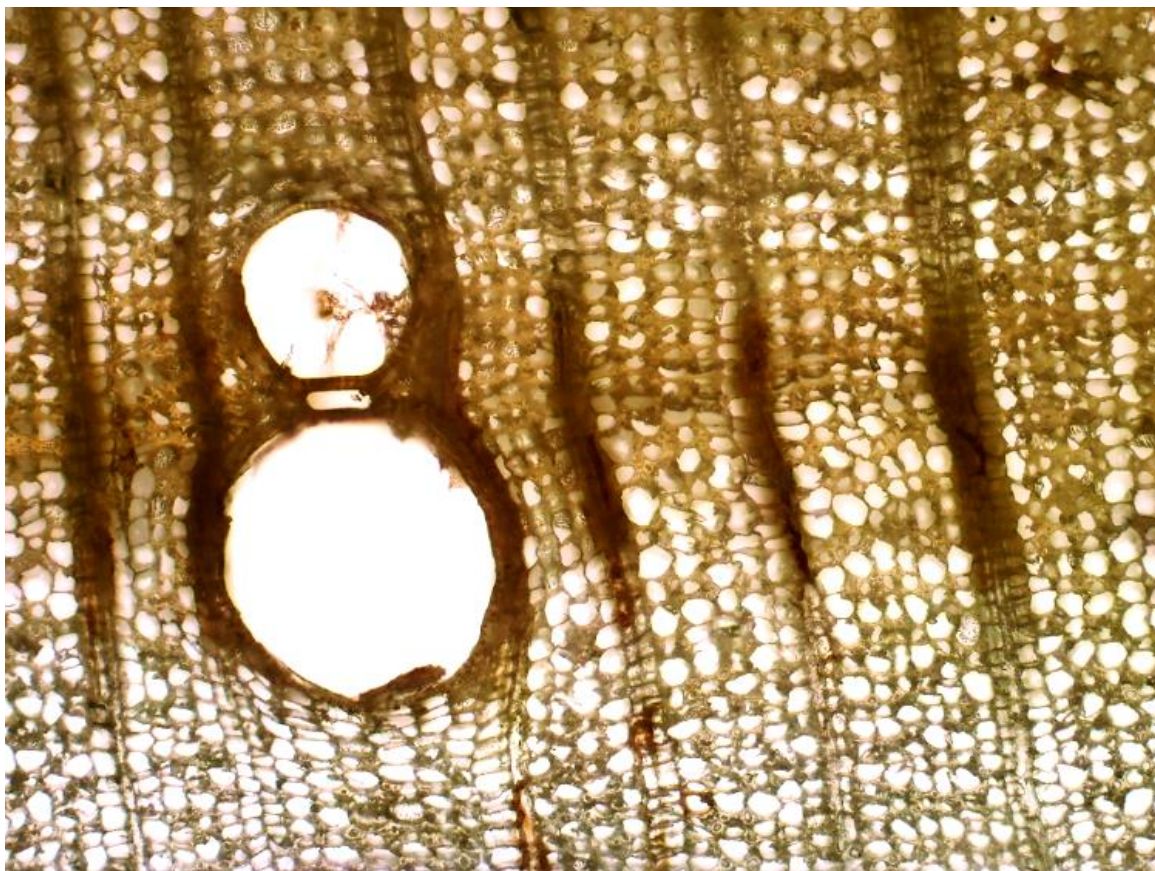
² Boutelje och Rydell (1986)

³ Gryc et al. (2008)

⁴ Simpson och Tenwolde (1999)

⁵ Rijdsdijk och Laming (2013)

2.4.1 Abachi (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum)



Figur 6. Abachi $\times 100$ förstoring

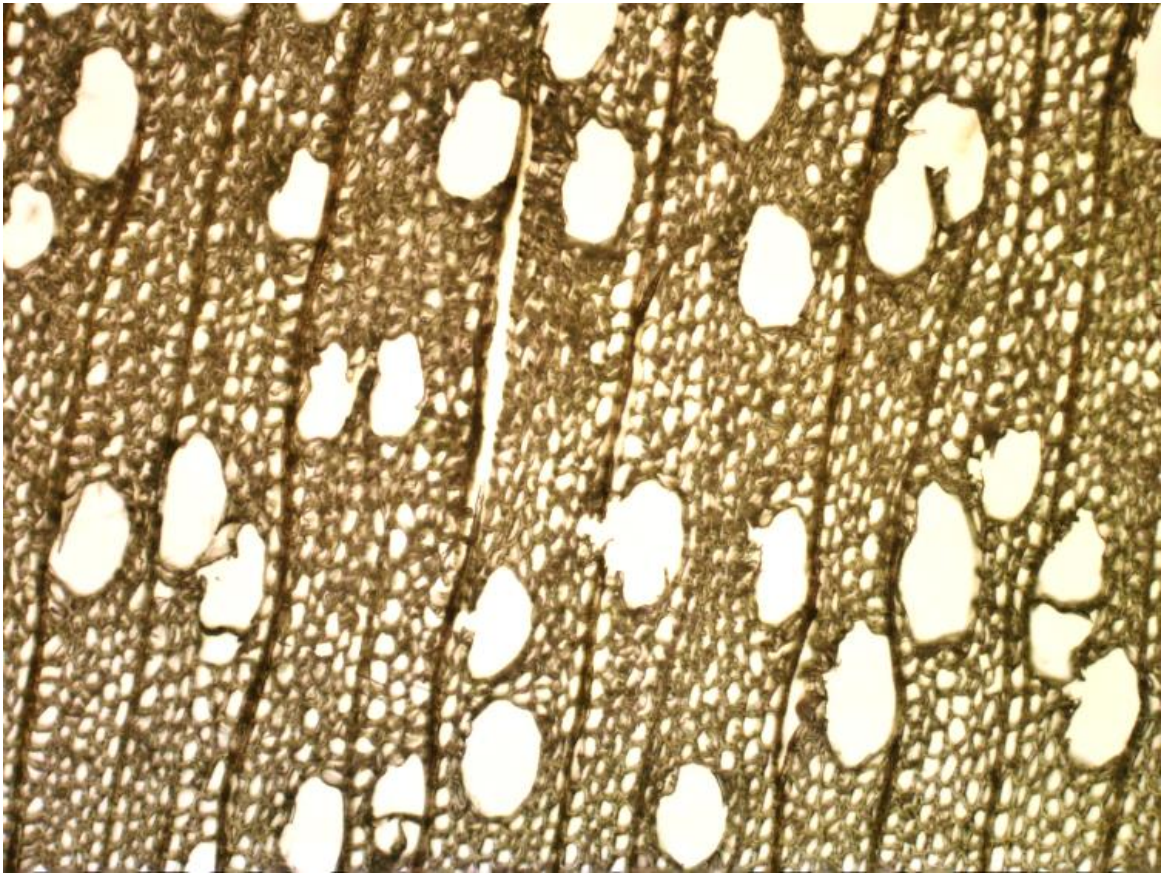
Abachi är ett av de mest utbredda afrikanska tropikträslagen. Det trivs i lövfällande skog i fuktigare savannområden, där en viss torrtid förekommer.

Huvudproduktionsområde är Liberia, Elfenbenskusten, Ghana, Nigeria och Kamerun. Abachi är ett stort träd, ca 30-40 m högt och med mycket kraftiga rotben som ger stammen en oregelbunden form upp till 6-8 m höjd. Därefter är stammen mer rak och kvistfri med en diameter på 1-1,5 m. Färgen på veden är vitaktig gul. Det finns normalt ingen stor färgskillnad mellan splintved och kärnved. Träslaget räknas till ströporigt och vid förstoring syns rikligt med vertikala parenkymceller. Veden har en oangenäm doft i rått tillstånd. Abachi är ett lätt, mjukt och elastiskt träslag och har förhållandevis goda hållfasthetsegenskaper. Fuktrörelserna är små. Abachi torkar mycket snabbt, utan sprickbildning och med liten formförändringen. Abachi används i huvudsak som spärrfaner, blindträ samt till bastulavar p.g.a. sin goda värmeisolerande förmåga (Boutelje och Rydell 1986).

CELLSTRUKTUR

AXIALA PARENKYMCELLER (41 %), FIBRER (22 %), MÄRGSTRÅLAR, PARENKYMCELLER (22 %), KÄRL (7 %) (TABIRIH OCH SEEHANN 1981).

2.4.2 Poppel (*Populus x canadensis* Moench.)



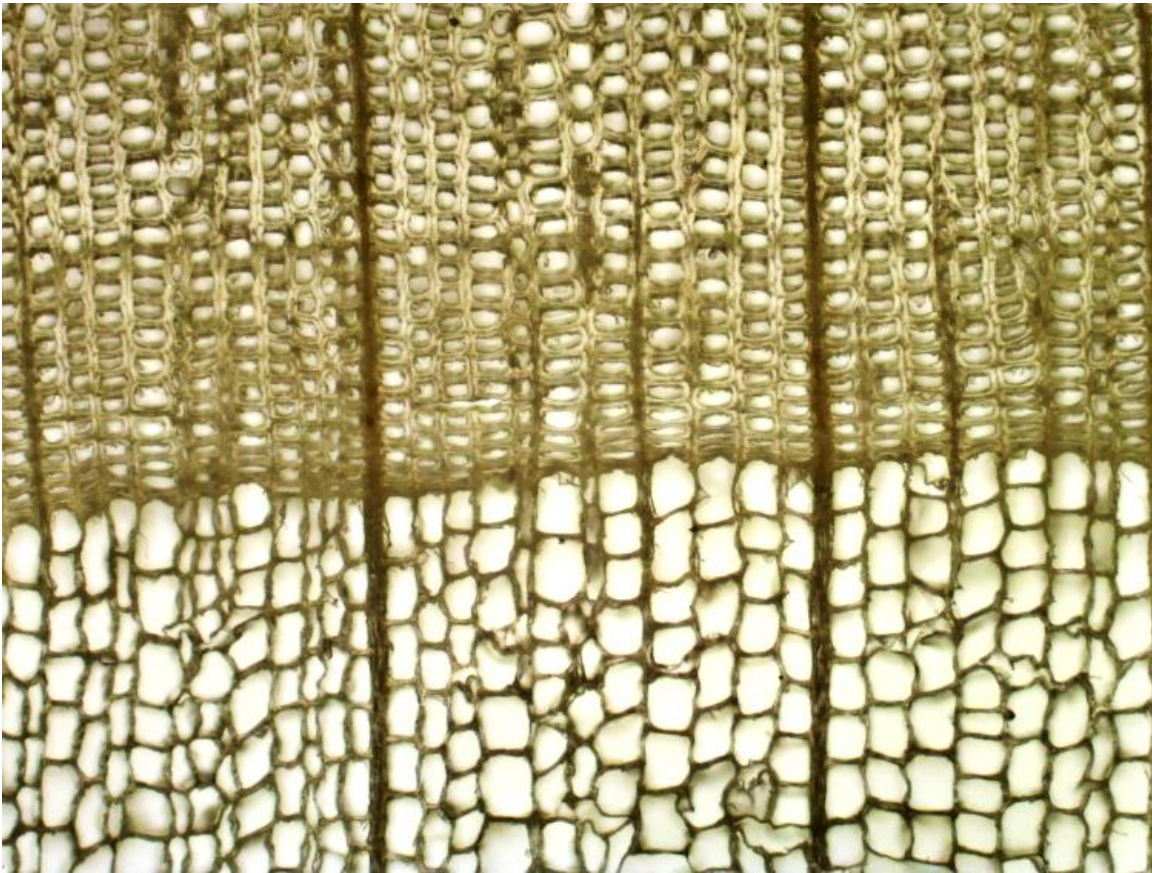
Figur 7. Poppel $\times 100$ förstoring

Poppelarterna är inte inhemska i Sverige, men odlas där. I anatomiskt hänseende överensstämmer poppelved med aspved (*Populus tremula*). Splintveden är vit till gråvit. Kärnveden är gråbrun. Övergången från splint till kärna är svagt märkbar. Poppel har en ströporig struktur. Ingen lukt. Poppel är lätt, löst och mjukt. Lätt att klyva och bearbeta, men ytan "luggar" upp sig. Virket används till bl. a blindfaner i plywood, emballage, tändsticksaskar och leksaker (Saarman 1992).

CELLSTRUKTUR

FIBER MED LÄNGD PÅ 0,2-1,6 MM OCH 13-30 μm VIDA (ILVESSALO-PFÄFFLI 1995).

2.4.3 Gran (*Picea abies* (L.) Karst.)



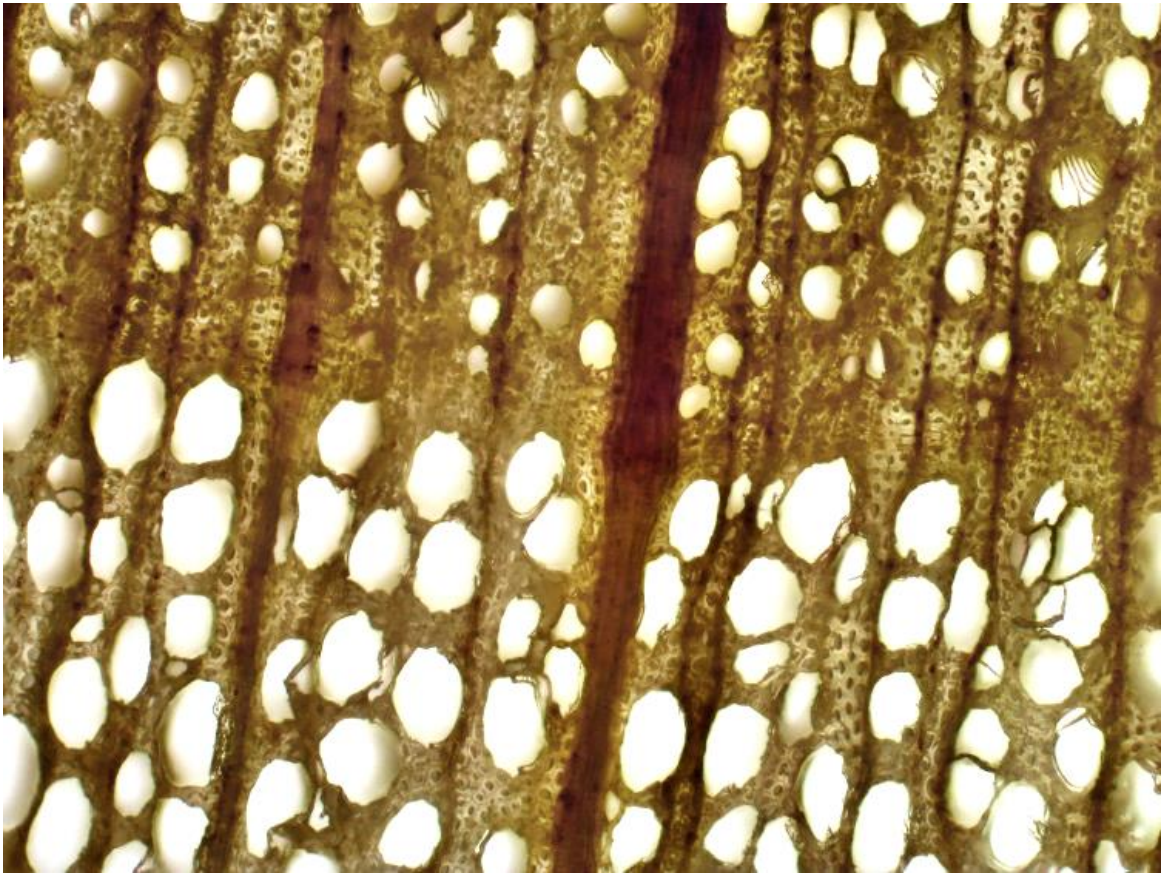
Figur 8. Gran $\times 100$ förstoring

Gran växer i Nordeuropa, bergstrakter i Mellaneuropa, norra Ryssland och delar av norra Asien. Den utgör ungefär hälften av Sveriges skogsbestånd (Saarman 1992). I Norrland finns en dominerande huvudtyp som är utpräglad smalkronig. Den sydligare är mer bredkronig och med horisontellt riktade grenar. Träden avverkas vanligen när de är 15-30 m höga med en brösthöjdsdiameter på 25-50 cm. Både splintved och kärnan är entonigt gulvit i torrt tillstånd. Årsringarna är lätt synliga. I rått tillstånd är fuktkvoten i kärnveden betydligt lägre (30-40%) än i splintveden (110-150%) (Boutelje 1986). Veden innehåller hartskanaler. Torkningen sker snabbt med liten sprickbildning, men det föreligger en viss risk för deformation. Gran används som bygg-, konstruktion- och snickerivirke. Till golv, inredning och möbler mm (Saarman 1992)

CELLSTRUKTUR

BESTÅR TILL 95 % AV LONGITUDINELLA TRAKEIDER SOM ÄR 1,1-6 MM LÅNG OCH 21-40 μ M VIDA (ILVESSALO-PFÄFFLI 1995).

2.4.4 Bok (*Fagus sylvatica* L.)



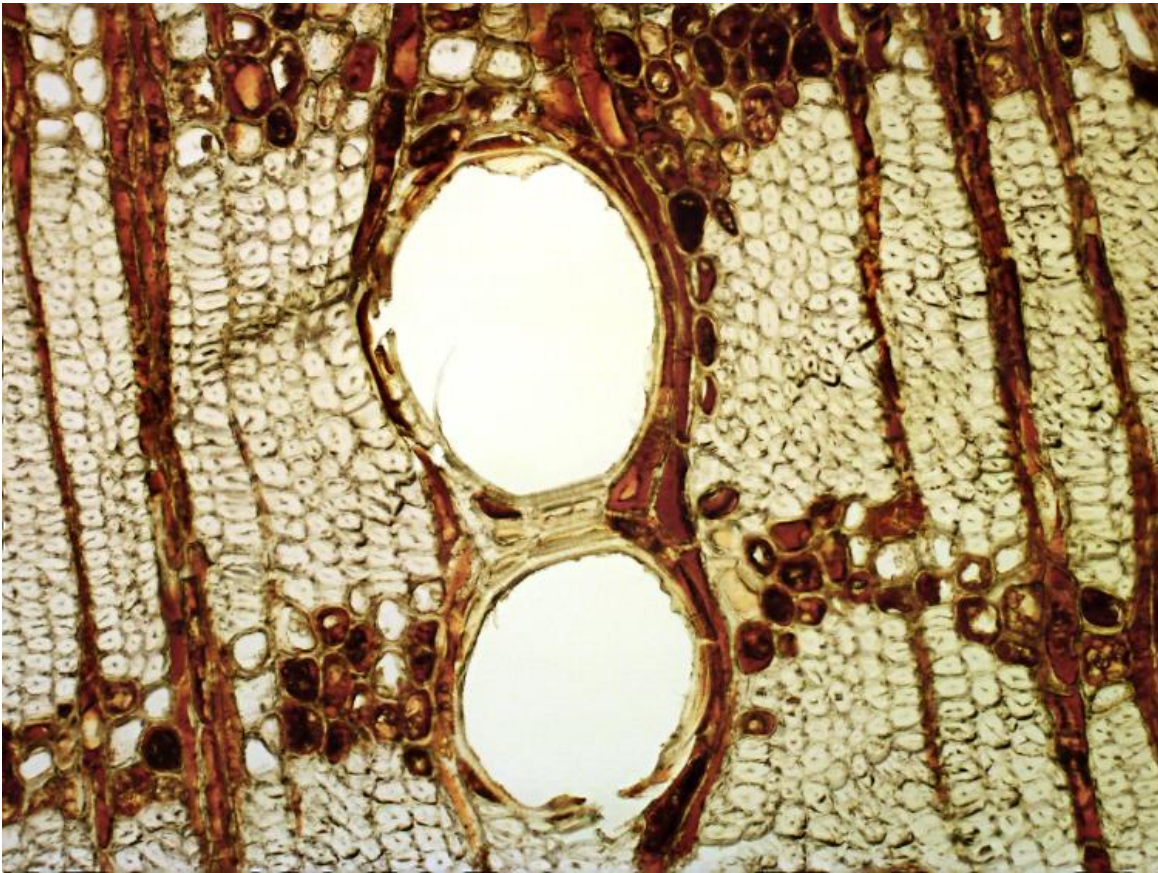
Figur 9. Bok $\times 100$ förstoring

Bok växer i Europa mellan breddgraderna 40° och 60° N. I Sverige växer den huvudsakligen i Skåne och Blekinge (Saarman 1992). Trädet 25-35 m högt med en stamdiameter på 1,5 m. Boken har en stor tät krona. Färgen på veden är vitgul till grå och brunröd och årsringarna är något otydliga. Boken räknas som ströporig med relativt små kärl som är osynliga för ögat. I tangentialsnitt syns mägstrålar i form av karakteristiska små streck. Virket torkar lätt och snabbt. Det finns dock risker för änd- och ytsprickor samt deformationer pga. den stora krympningen. Boken har goda svarvningsegenskaper och användes därför tidigt till vagnmakerier, tunnbinderier, leksaker och redskap. Eftersom boken inte suger åt sig fett, inte har någon lukt och smak så används den också till bl. a glasspinnar (Dahlgren et al. 2013).

CELLSTRUKTUR

I HUVUDSAK BESTÅR BOK AV FIBER SOM ÄR 0,5-1,7 MM LÅNGA OCH 14-30 M VIDA (ILVESSALO-PFÄFFLI 1995).

2.4.5 Azobé (*Lophira alata* C.F. Gaertn.)



Figur 10. Azobé $\times 100$ förstoring

Azobé växer i Västafrika. Trädet kan bli 30-45 m högt och har vanligen en stam med en diameter på 60-100 cm. Kärnveden är mörkröd eller violettbrun. Splintveden är blekt rosaaktigt vit. Det finns en gradvis övergångszon mellan kärnved och splintved (Richter 2009). Eftersom azobé är mycket hårt, rötmotståndig och tålig så passar den till brobyggen, i marin miljö, altandäck och golv. Det är dock svårt att bearbeta och kräver förborring (Saarman 1992). Torkning för tjocklekar över 3,8 mm är mycket svårt (CIRAD 2003).

CELLSTRUKTUR

STRÖPORIG, KÄRL MED EN TANGENTIAL KÄRLDIAMETER 200-315 μm . MYCKET TJOCKVÄGGIGA FIBRER. MEDEFIBERLÄNGD 1,7–2,9 mm. AXIAL PARENKYMCELLER FÖREKOMMER DÄR ÄVEN MINERALER (KRISTALLER) BEFINNER SIG (RICHTER 2009).

3 Material och Metod

3.1 Material

I experimenten ingick 5 olika träslag där urvalet gjordes för att täcka in ett stort densitetsspann. Träslagen var; Abachi (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum), Poppel (*Populus x canadensis* Moench.), Gran (*Picea abies* (L.) Karst.), Bok (*Fagus sylvatica* L.) och Azobé (*Lophira alata* C.F. Gaertn.).

Träproverna, förutom gran, extraherades innan experimenten utfördes för att säkerställa att inga extraktivämnen i proverna påverkade resultaten. De extraherades i en Soxhletapparat i två steg med följande blandningar; steg 1: 150 ml etanol och 300 ml toluen, steg 2: 450 ml aceton och 50 ml vatten. Därefter bestämdes de olika träslagens densitet. Fyra provkroppar av respektive träslag med dimensionerna $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ torkades i $105 \text{ }^\circ\text{C}$ i 24 h. Proverna vägdes därefter och dimensionerna bestämdes med hjälp av ett skjutmått (0.01 mm noggrannhet). Två mått togs på vardera av de tre sidorna och medelvärdet av dessa två mått användes för att beräkna provkropparnas volym. Torrdensiteten bestämdes därefter enligt Ekv. 5. Densiteter för träslagen visas i tabell 2.

$$\rho_{torr} = \frac{m_{torr}}{V_{torr}} \quad (\text{Ekv. 5})$$

Tabell 2. Uppmätt densitet för träslagen som användes i studien. Träproverna är, förutom gran, extraherade.

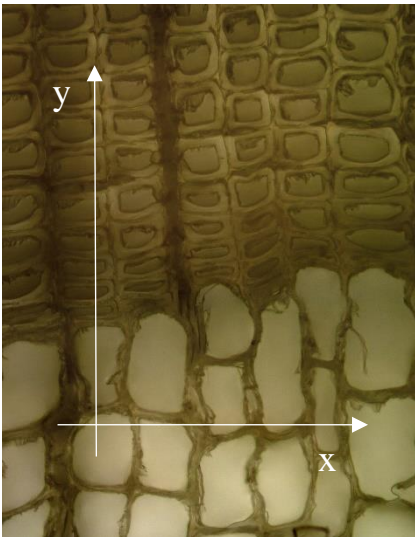
Torrdensitet [kg/m ³]	
Abachi	279
Poppel	399
Gran (ej extraherad)	405
Bok	572
Azobé	977

Proverna vattenmättades med vakuummättningsutrustning som först skapade ett vakuum med 100 Pa under en timme, därefter fylldes behållaren med vatten och trycket ändrades succesivt till atmosfärstryck. Proverna låg sedan kvar i behållaren i ytterligare ca 24 h.

Experimentet delades upp i två delar, en mikroskopisk och en makroskopisk del. För de mikroskopiska experimenten användes 1 prov med måtten; $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$ (radiellt \times tangentiellt \times longitudinellt) och till de makroskopiska experimenten användes 5 st. prover per träslag med måtten; $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ (radiellt \times tangentiellt \times longitudinellt)

3.2 Mätning av mikroskopisk svällning

Tunna skivor av träproven skars med hjälp av en mikrotom (Microtome HM 450, Thermofischer Scientific) med tillhörande stålblad. Skivorna hade en tjocklek på 25 μm och placerades på ett objektglas. För att säkerställa placeringen av provet, dess position på objektglaset, användes aluminiumtejp med UV-, värme- och åldringsbeständigt akryliskt häftämne. Avjoniserat vatten påfördes och sen placerades ett täckglas ovanpå. Proven placerades därefter i ett mikroskop (Leitz Laborlux 12 POL) i 400x förstoring. För att ta bilder användes kamera (Microscope Camera Leica MC170 HD) monterad på mikroskopet. Innan bildtagning noterades en startposition i x- resp. y-led, avläst på mikroskopet, för att efter torkning hitta tillbaka till samma del av provet som vid vattenmättat tillstånd. Fotograferingen utfördes både med förskjutning av fokus i z-led och med förflyttning i y-led (För poppel även i x-led) Se figur 11. Antalet bilder i z-led varierade för att kunna täcka in hela bilden i fokus. Antalet bilder i y-led varierade mellan 11-22 st. med en överlappning på ca 25 %. Programvaran för bildtagningen var Leica Application Suite, vitbalans och exponering valdes manuellt och exposure sattes till 3,6 ms. – 4,7 ms., Gamma 1.0. Upplösningen 2592 x 1944 pixlar, okomprimerad tiff-fil för Gran och Bok. Till Poppel, Abachi och Azobé var upplösningen 1024 x 768 pixlar, okomprimerad tiff-fil.



Figur 11. Visar riktningarna x och y-led. Riktningen i z-led är mot kameran.

Proverna torkades därefter i ugn, utan täckglas, i 105°C i minst 4 h. Proverna förseddes med täckglas igen och tejpades fast på sidorna för att ligga direkt an objektglaset. De fotograferades därefter på samma sätt och med samma inställningar som vid vattenmättat tillstånd.

Bilder tagna på samma område i olika z-höjd ”stackades” med funktionen photomerge i Photoshop CC. De ”stackade” bilderna sammanfogades sedan i y-led vilket gav långsmala bilder med ett större skärpdjup än vad som annars varit möjligt. De färdiga bilderna roterades så att märkestrålarna fick en vertikal riktning. Efter det jämfördes och analyserades bilder i vattenmättat tillstånd med torrt tillstånd. Tio celler valdes ut av varje träslag, urvalet gjordes med hänsyn till var cellerna var tydligast på bilderna i torrt respektive vattenmättat tillstånd. Cellerna som valdes var, förutom för gran, fiber, p.g.a. att de har tjockare cellväggar än andra celler och är på så sätt lättare att analysera. Övriga celler i träproven har tunnare väggar och är svårare att urskilja. En jämförelse kunde sedan göras av exakt samma cells förändring från vattenmättat till torrt tillstånd, vilka celler som analyserades visas i Bilaga 1. Genom Photoshops analysfunktion togs värden fram för areaförändring i cellvägg, radiell förändring samt lumens area. Värden exporterades sedan till Excel (Microsoft) för vidare beräkningar och framtagande av tabeller och figurer. En mätning gjordes också från en fast bestämd punkt till en annan fast punkt i radiell riktning.

Svällningen beräknades med ekvation

$$S = \frac{\Delta L}{L_t} \quad (\text{Ekv } 6)$$

där S är svällningskoefficienten, ΔL är längdändringen och L_t provets torra längd.

3.3 Mätning av makroskopisk svällning

De 25 proverna (5 per träslag) torkades i ugn vid 30 °C. Därefter limmades en dubb på ena sidan av proven och en bricka på andra sidan i radiell riktning. Det för att säkerställa att mätning av proverna skulle ske på exakt samma ställe varje gång. Limmet som användes var ett fuktresistent epoxilim av fabrikatet Loctite 3421. De placerades därpå i ugn vid 30 °C igen i ca 24 h.

Innan mätningarna kunde påbörjas vakuummättades prover på samma sätt som beskrivits ovan. Proven mättes med hjälp av en mätklocka av fabrikatet Johansson, med en noggrannhet på 0,001 mm, se figur 12. För att säkerställa värdena användes en mätreferens. Mätningarna inleddes med att läsa av ett värde från mätreferensen, varpå mätningarna av proverna sedan utfördes. Värdena på mätningarna gav provens radiella längd vid vattenmättat tillstånd.

Efter mätningarna torkades proverna i 105 °C i ugn, 24 h. Därefter mättes mätreferens och prover igen. Värdena på mätningarna gav provernas radiella

längd vid helt torrt tillstånd. För att beräkna svällning användes precis som vid de mikroskopiska beräkningarna Ekv. 6.



Figur 12. Ett träprov mäts i radiell riktning i en mätklocka.

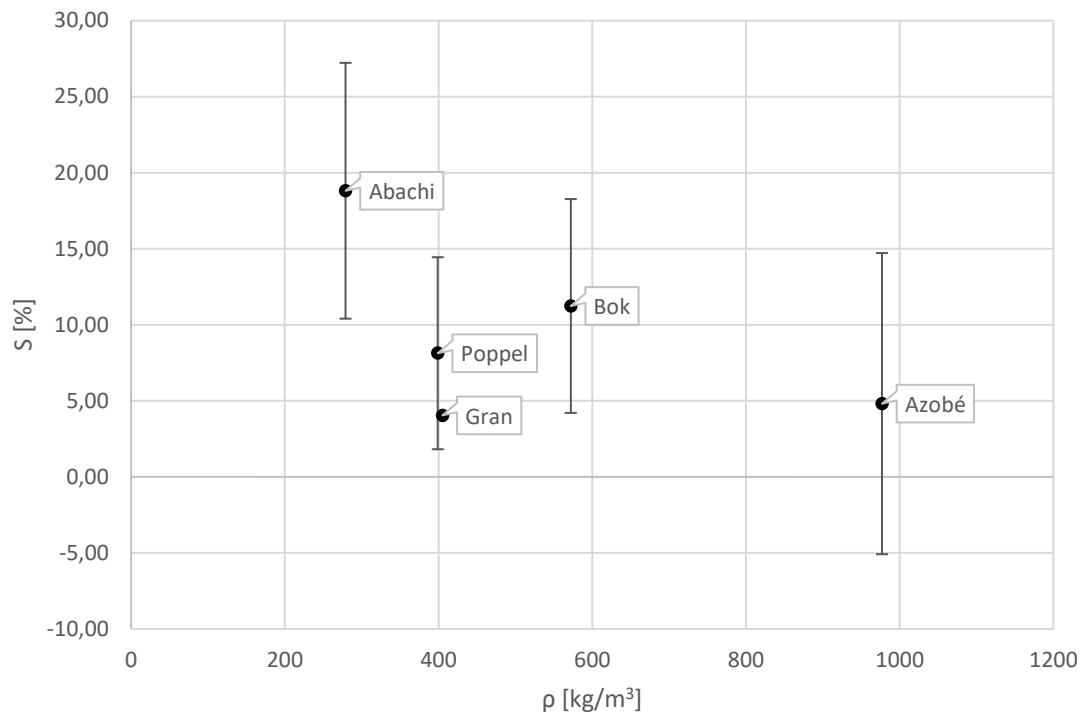
4 Resultat

4.1 Mikroskopisk svällning

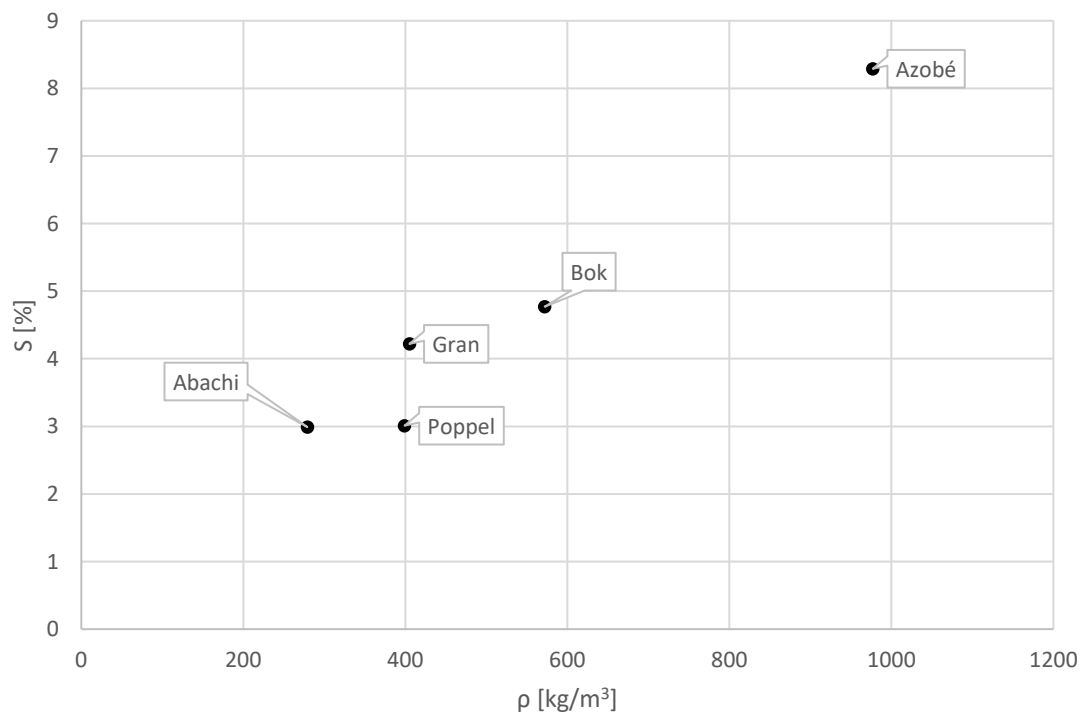
Bilder från mikroskopistudierna finns i Bilaga 1. Där visas det vattenmättade provet presenterat bredvid det helt torra för respektive träslag och de celler som ingick i mätningarna finns markerade. Ett sammanställt resultat från försöket finns i tabell 3. Resultatet av den radiella svällningen vid mätningen av 10 st. celler visade ingen korrelation mellan svällning och densitet, se figur 13. Resultatet för gran är uppdelat mellan sommarved och vårved och 5 celler av varje typ användes för beräkningarna. Ett uppskattat totalt värde för gran antogs där andelen sommarved uppskattades till 25 % och vårved till 75 %. Mätningarna mellan två fasta punkter, se figur 14, uppvisade en viss korrelation mellan svällning och densitet. Lumens area ökade hos abachi, var nästan oförändrad för gran och poppel och för bok och azobé minskade arean (figur 15). För kärnen i bokprovet sågs dock en ökning area av lumens area. Cellväggens svällning för samtliga prover förutom azobé gav ett medelvärde för de olika träslagen på mellan 46,6% - 61,2%. För azobé uppmättes en svällning som var lägre (medelvärde 17,7%) (figur 16).

Tabell 3. Svällning för de träslag som användes i studien samt standardavvikelse. Total radiell svällning för individuella celler, lumens areaförändring samt cellväggens svällning (area). I tabellen redovisas även svällningskoefficienten beräknad på två fasta punkter. Densitet avser hela träprov, ej enskilda celler.

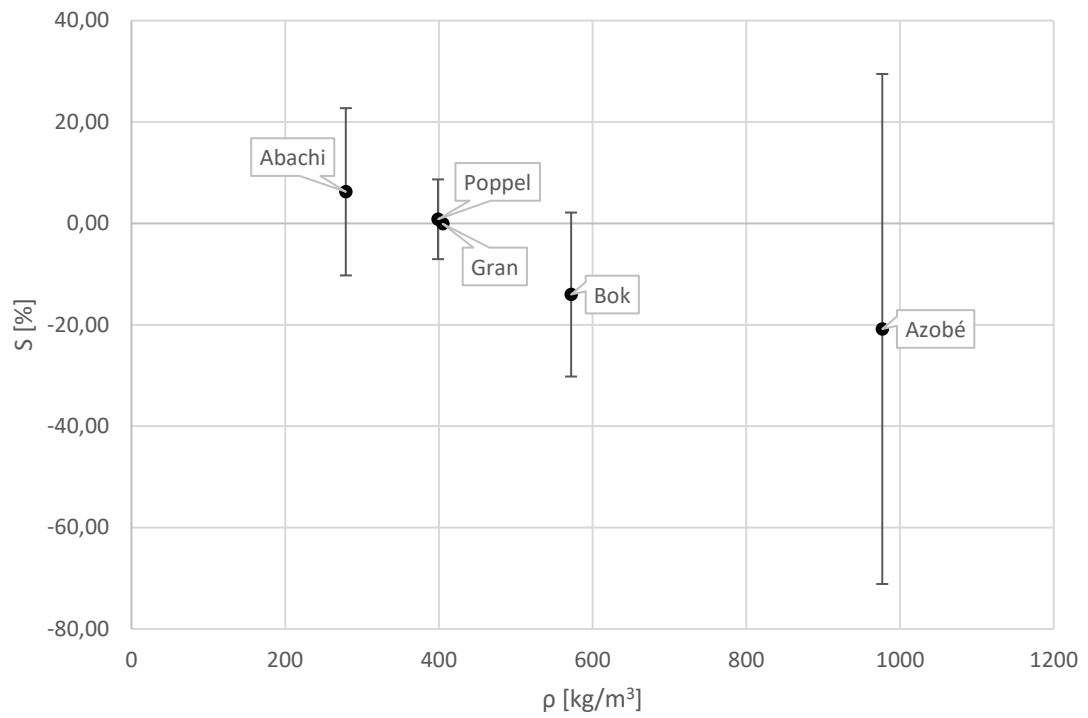
	Densitet [kg/m ³]	Radiell (10 celler) [%]	radiell (två fasta punkter) [%]	Lumens area (10 celler) [%]	Cellväggens area (10 celler) [%]
Abachi	279	18,81	2,99	6,24	46,6
<i>Std</i>		8,4		16,5	17,8
Poppel	399	8,13	3,01	0,82	50,7
<i>Std</i>		6,3		7,9	12,3
Gran (sommarved 25 %) (vårved 75 %)	405	4,04	4,25	-0,08	61,2
Bok	572	11,24	4,77	-14,03	52,3
<i>Std</i>		7,0		16,2	14,8
Azobé	977	4,82	8,29	-20,83	17,7
<i>Std</i>		9,9		50,3	12,9
Gran sommarved	405	10,91	12,57	-1,37	57,0
<i>Std</i>		2,3		6,4	12,4
Gran vårved	405	1,76	1,44	0,35	62,7
<i>Std</i>		5,3		2,9	9,3
Bok (kärn)	572			5,94	
<i>Std</i>				21,1	



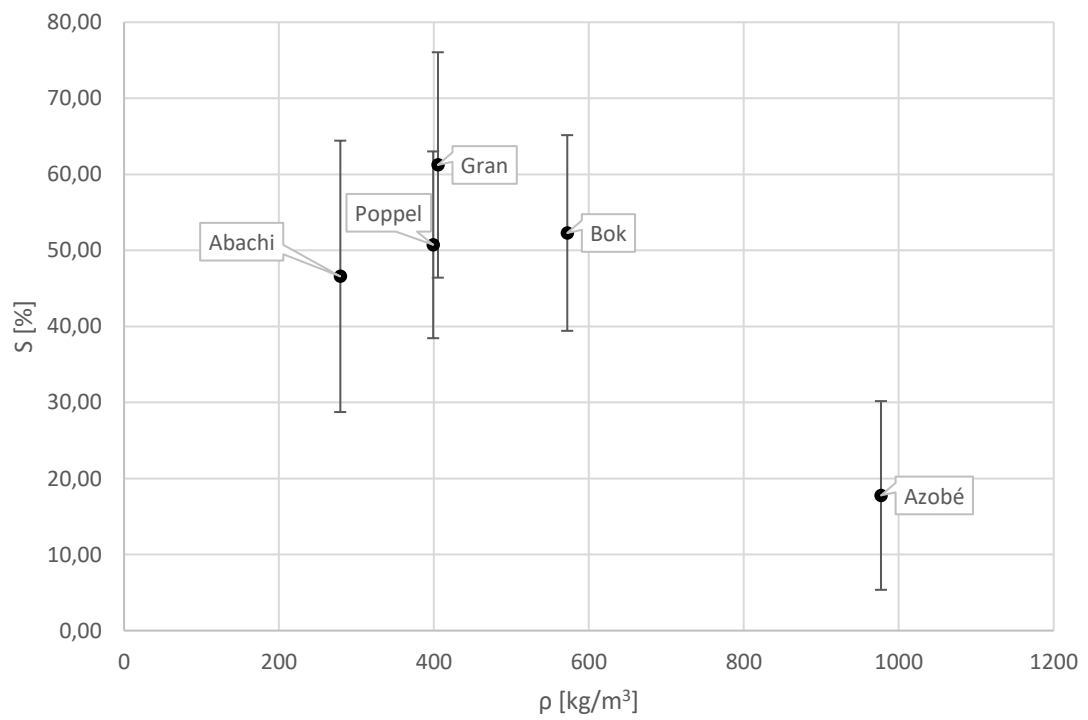
Figur 13. Den radiella svällningen från torrt till vattenmättat tillstånd, medelvärde beräknat på tio individuella celler/träslag.



Figur 14. Radiell svällning beräknad utifrån två fasta punkter, från torrt till vattenmättat tillstånd.



Figur 15. Lumens areaförändring, från torrt till vattenmättat tillstånd.



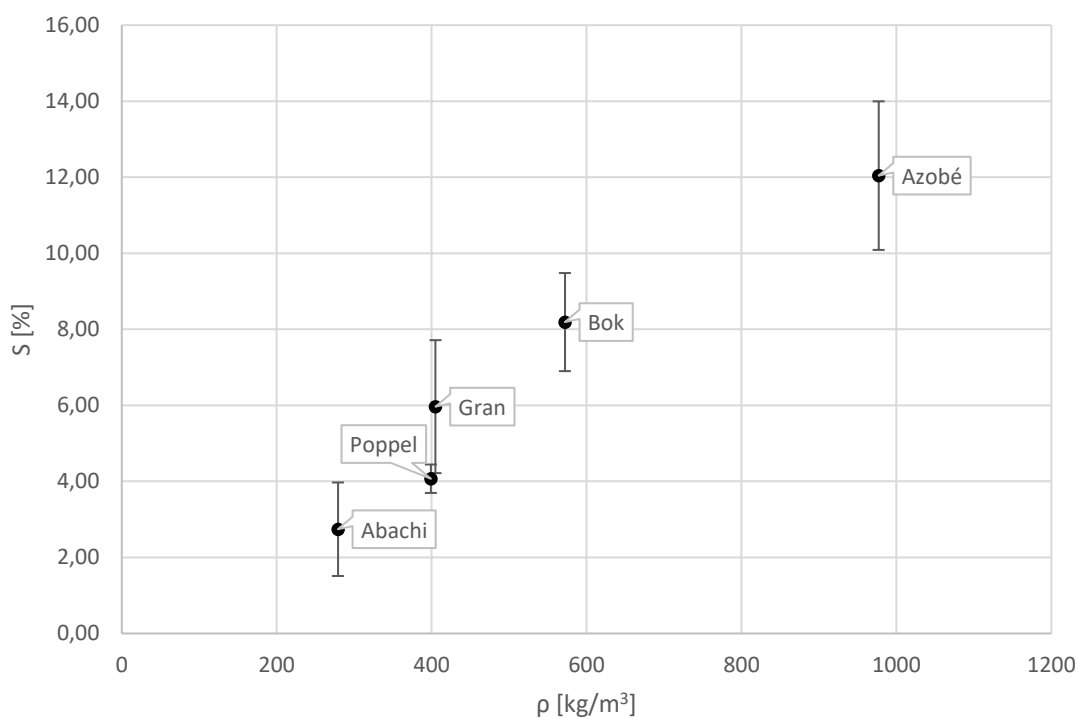
Figur 16. Svällning av cellvägg, från torrt till vattenmättat tillstånd.

4.2 Makroskopisk svällning

Resultaten av de makroskopiska mätningarna redovisas i tabell 4 samt i figur 17. Värt att notera är att de makroskopiska mätningarna, se figur 17, verkar följa samma mönster som mätningarna mellan två fast punkter se figur 14.

Tabell 4. Radiell makrosvällning av träprover av olika densitet, mätt med mätklocka, från torrt till vattenmättat tillstånd.

	Densitet [kg/m ³]	radiell svällning [%]
Abachi	279	2,74
<i>Std</i>		1,2
Poppel	399	4,07
<i>Std</i>		0,37
Gran	405	5,97
<i>Std</i>		1,75
Bok	572	8,19
<i>Std</i>		1,29
Azobé	977	12,04
<i>Std</i>		1,95

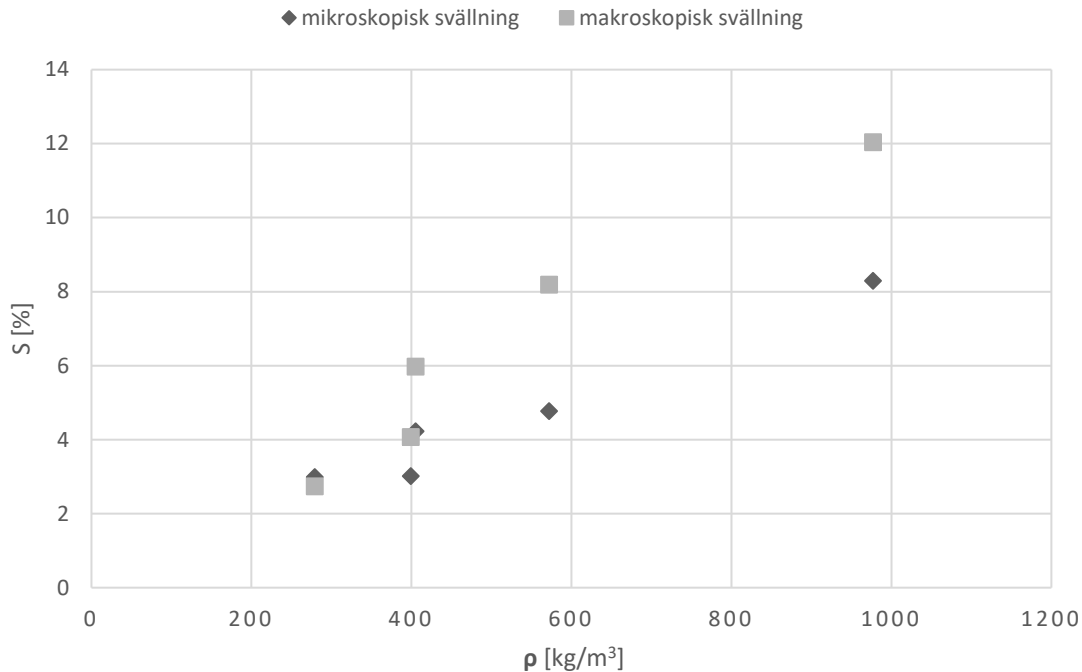


Figur 17. Radiell svällning för trä med olika densitet, från torrt till vattenmättat tillstånd.

5 Diskussion

Resultatet från mätningarna av radiell svällning på de tio individuella cellerna visade inte på någon korrelation mellan svällning och densitet (figur 13). Det höga värdet på svällning hos abachi beror troligtvis på att mätningarna gjordes på fibrer som endast utgjorde en liten andel av celltyperna i provet. Fibrer har tjockare cellvägg och står således för en betydande del av den totala svällningen. Fibrer hos abachi hade en större radiell svällning än fibrer hos azobé vilket kanske kan bero på att fibrerna i abachi var omgärdade av andra typer av celler med ”svagare” cellväggar medan azobé i större utsträckning bestod av fiberceller i hela provet. Från mätningarna av radiell svällning av tio individuella celler så visade endast gran siffror som överensstämde med litteraturvärden av makrosvällning (tabell 1). Det beror troligtvis på att gran nästan endast består av longitudinella trakeidceller, om än med olika tjocklek på cellväggarna mellan sommarved och vårved. Det ger också en indikation på att det eventuellt går att mäta celler på en enskild nivå, men hänsyn måste också tas till den totala sammansättningen av celler i provet för att få värden som överensstämmer med mätningar av svällning på makronivå. Det kan också vara så att vissa celler deformeras i samband med svällningen och eftersom mätningarna utgår från högsta till lägsta punkt av cellen så kan det ge ett missvisande resultat.

För samtliga prov i studien stämde de beräknade värdena för radiell svällning mellan två fasta punkter (figur 14) mycket väl med litteraturvärden (tabell 1). Vid experiment där endast undersökningar av olika träslags svällning genomförs så verkar den här metoden fungera bra. Arbetet med sammansättningen av bilder i Photoshop skulle kunna minskas jämfört med metoden som användes i experimentet, då det endast är orientering mellan två punkter som behövs och att urskilja enstaka celler inte är nödvändigt. Med fördel kunde en mindre optisk förstoring väljas för att på så sätt täcka in en större del av provet och möjliggöra mätningar både i radiell och i tangentiell riktning. För att kunna dra några slutsatser för metoden med mätningar av radiell svällning mellan två fasta punkter så behöver flera mätningar göras per träslag. I studien utfördes endast en mätning per träslag.



Figur 18. En jämförelse mellan makroskopisk svällning och mikroskopisk svällning (mellan två fasta punkter) Figuren visar en kombination av figur 14 och figur 17.

Resultaten av de beräknade svällningskoefficienterna vid de makroskopiska mätningarna och mätningarna mellan två fasta punkter visade en viss samstämmighet, men svällningskoefficienterna från de makroskopiska mätningarna visade generellt ett högre värde än de mikroskopiska värdena, se figur 18. Det kan bero på att det är svårt att makroskopiskt mäta i helt radiell riktning. Vid mätning av både radiell och tangentiell riktning borde ett värde kunna uppmätas vars areavärde bättre överensstämmer med litteraturvärden. För att begränsa omfattningen studierna har endast mätningar utförts i radiella riktningen och det gör det svårare att dra paralleller mellan de mikroskopiska och makroskopiska mätningarna. Vidare väckte experimentet funderingar över om 3d-scanning kunde vara ett alternativ för mätningar på makroskopisk nivå.

Från mätningarna av cellväggens areaförändring, se figur 16, verkar det som att cellväggen har en liknande svällning för de olika träproverna, dock med ganska stor spridning inom varje träprov. Från teorin så går det att läsa att det främst är S2 lagret och i vilken vinkel microfibrillerna är ordnade som styr hur svällningen sker i de tre huvudriktningarna. Om microfibrillerna är ordnade på liknande sätt hos de olika träslagen så borde det, precis som resultaten visade, vara liknande svällning för de uppmätta cellerna. Cellväggen består av samma cellväggsmaterial med en kompaktdensitet på 1500 kg/m³. Med en *specific gravity* på 1,5 och en antagen fibermättnadspunkt på 30 % skulle Ekv. 4 ge en svällningskoefficient på 45 %. Om den teorin stämmer och om det bortses från den longitudinella svällningsriktningen så borde också resultatet av

cellväggens svällning för de olika träslagen anta ett liknande värde med det teoretiska på 45 %. Det går tyvärr inte att anta en fibermättnadspunkt på 30 % för samtliga träslag, men det kan ge en indikation på om det går att använda metoden för att mäta cellväggens area. Cellväggens svällning var för samtliga prover förutom azobé mellan 46,6% - 61,2%. Resultatet är alltså något högre än 45 %. Oklart vad det beror på, det kan vara att det finns skillnader i fibermättnadspunkt mellan träslagen. Det kan också vara så att mikrofibrillernas vinkel i S2-lagret skiljer sig åt mellan olika celler och träslag. Det kan också bero på att bilderna i vissa fall varit otydliga och då försvårat mätningarna av celler. Att azobé avvek från de andra träproverna kan bero på att det var extra svårt att mäta i bilderna av azobé eftersom de är ganska otydliga och hade en mycket liten lumen, det kan också bero på att azobé har en lägre fibermättnadspunkt eller så kan det vara en kombination.

Resultatet från mätningarna av celllumen visade att lumen, i medelvärde, ökade i area för abachi för att vara in princip oförändrad för poppel och gran och för att sedan minska i area för bok och azobé. Det utfördes även mätningar av lumen på bokkärlen och där kunde en liten ökning av lumens area noteras. Att lumens area förändrades för den enskilda cellen kunde konstateras och mätas, där det inom träslaget både kan minska och öka i area. Det fanns en stor spridning inom de olika träslagen. Tendenserna verkar vara att vid lägre densitet ökar lumen i area från torrt till vattenmättat tillstånd och vid högre densiteter istället minska i area. Att sambandet in princip är linjärt kan vara en tillfällighet och vidare studier behöver utföras för att eventuellt säkerställa ett samband. I studierna som Murata och Masuda (2006) utförde på Douglasgran (*Pseudotsuga menziesii*) så ökade lumens storlek när fuktupptagningen var långsam och minskade när den utsattes för snabb uppfuktning. I studierna som utfördes i det här examensarbetet så vattenmättades först proverna och sedan torkades. Att vattenmätta prov med vakuummättningsutrustning ger en ganska snabb uppfuktning, men det är svårt att dra paralleller mellan metoderna som Murata och Masuda använde sig av. Det bör även tilläggas att de endast utförde experiment på ett litet antal celler (2 st+ 8 st) och enligt mina studier så kan förändringarna av lumens storlek variera mellan celler inom samma träslag. Frågan är då hur starka slutsatser som kan dras från deras studier.

Det fanns vissa svårigheter att få tillräckligt bra bilder att mäta i för vissa träslag, speciellt för abachi och azobé var det svårt att urskilja 10 celler som dessutom var tydliga både på vattenmättat och helt torrt prov. Både poppel och abachi uppvisade tecken på kollaps av tunnväggade celler som kan påverka resultaten av mätningar och urvalet av celler. Valet av de tio cellerna gjordes som tidigare nämnts utifrån de celler som var tydligast i både torrt och vattenmättat tillstånd.

En del av examenarbetet var att komma på en bra metod att få bra bilder, där enskilda celler kunde identifieras och sedan hitta tillbaka till samma del av träprovet efter torkning. Metoden som användes i försöket fungera bra, om än tidskrävande. Att fotografera med en högre upplösning skulle innebära att kvalitén och arbetet med att sammanfoga bilder kunde minskas. Analysen av bilder gjordes genom att markera celler i Photoshop. Om det finns ett automatiskt sätt att analysera så kunde det vara ett sätt att få större mängd data och på så sätt öka resultatets trovärdighet.

6 Referenser

- Beiser, W. 1933. *Mikrographische quellungsuntersuchungen von Fichten- und Buchenholz an Mikrotomschnitten im durchfallenden Licht und an Holzklötzchen im auffallenden licht*. Kolloid Zeitschrift
- Boutelje, J.B. och Rydell, R. 1986. *Träfakta -44 träslag i ord och bild*. Träteknik Centrum, Stockholm.
- CIRAD Forestry Department 2003. *Tropix 5.0*
<http://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/EN/Africa/AZOBE.pdf> (hämtad 2016-08-19).
- Dahlgren, T., Wistrand, S. och Wiström, M. 2011. *Nordiska träd och träslag*. 5:e reviderade upplagan. Ljungbergs tryckeri, Klippan.
- Dinwoodie, J.M. 1989. *Nature's Cellular, Polymetric Fiber-composite*. The institute of Metals, London, Vermont.
- Dinwoodie, J.M. 2000. *Timber, its nature and behavior*. London, New York.
- Fredriksson, M. och Johansson, P. 2016. *A method for determination of absorption isotherms at high relative humidity levels: measurements on lime-silica brick and Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.)*. *Drying Technology* 34(1): 132-141.
- Gryc, V., Vavrčik, H. och Gomola, Š. 2008. *Selected properties of European beech (Fagus sylvatica L.)*. Journal of forest science.
- Hillis, W.E. 1962. *Wood Extractives and Their Significance to the Pulp and Paper Industries*. Academic Press New York and London.
- Ilvessalo-Pfäffli, M.-S. 1995. *Fiber Atlas, Identification of Papermaking fibers*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Kollmann, F.F.P., Coté Jr W.A. 1968. *Principles of Wood Science and Technology I, Solid Wood*. Springer-Verlag New York Inc.
- Liljenström, C., Malmqvist T., Erlandsson M., Fredén J., Adolfsson I., Larsson G. och Brogren M. 2015. *Byggandets klimatpåverkan*. Sveriges byggindustrier.
- Murata, K. och Masuda, M. 2006. *Microscopic observation of transverse swelling of latewood tracheid: effect of macroscopic/mesoscopic structure*. The Japan Wood Research Society.
- Näringsdepartementet. 2004. *Mer trä i byggandet –underlag för en nationell strategi för att främja trä i byggandet*. Regeringskansliet.
- Peñaloza, D. 2015. *Exploring climate impacts of timber buildings -The effects from including non-traditional aspects in life cycle climate impact assessment*. KTH, Stockholm, Sweden.
- Richter, H.G. och Dallwitz, M.J. 2000 onwards. *Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval*. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 25th June 2009. <http://delta-intkey.com>.
- Rijsdijk, F. och Laming, P.B. 2013. *Physical and Related Properties of 145 Timbers: Information for practice*. Springer-Science+Business Media, B.V.
- Saarman, E. 1992. *Träkunskap*. Markaryds Grafiska, Markaryd.
- Shmulsky, R. och Jones, P.D. 2011. *Forest products and wood science: an introduction, 6:th edition*. Wiley-Blackwell, Chichester.
- Siau, J.F. 1984. *Transport Processes in Wood*. Springer-Verlag, Berlin.
- Simpson, W. och Tenwolde, A. 1999. *Wood handbook - Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Skaar, C. 1988. *Wood-Water Relations*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Stamm, A.J. 1964. *Wood and Cellulose Science*. The Ronald Press Company, New York.

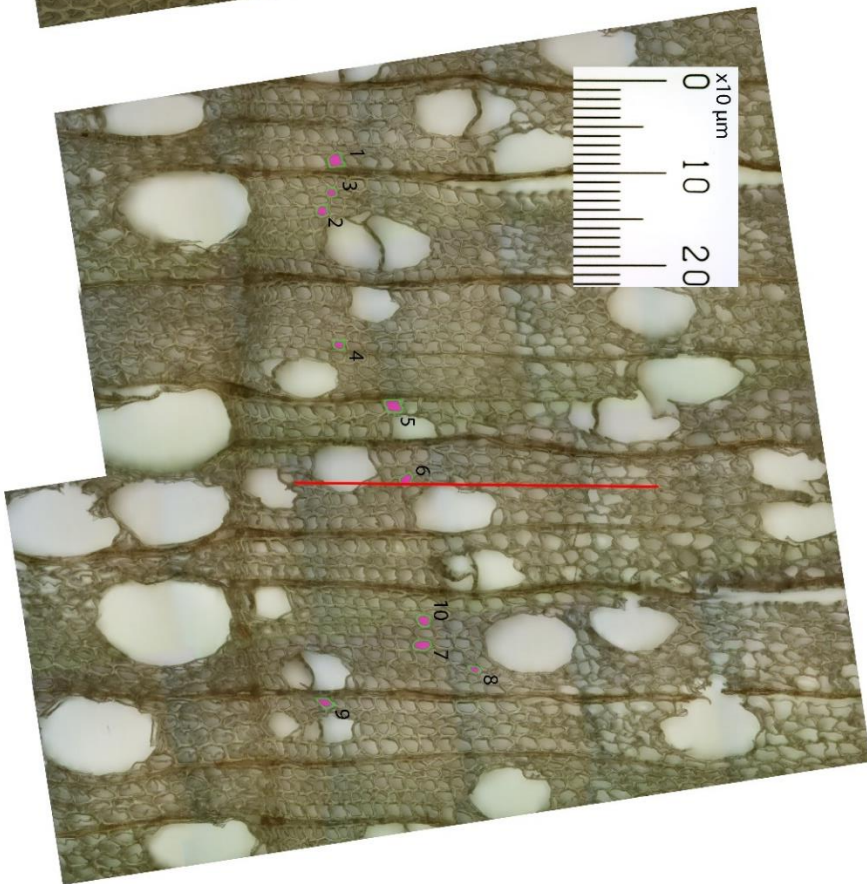
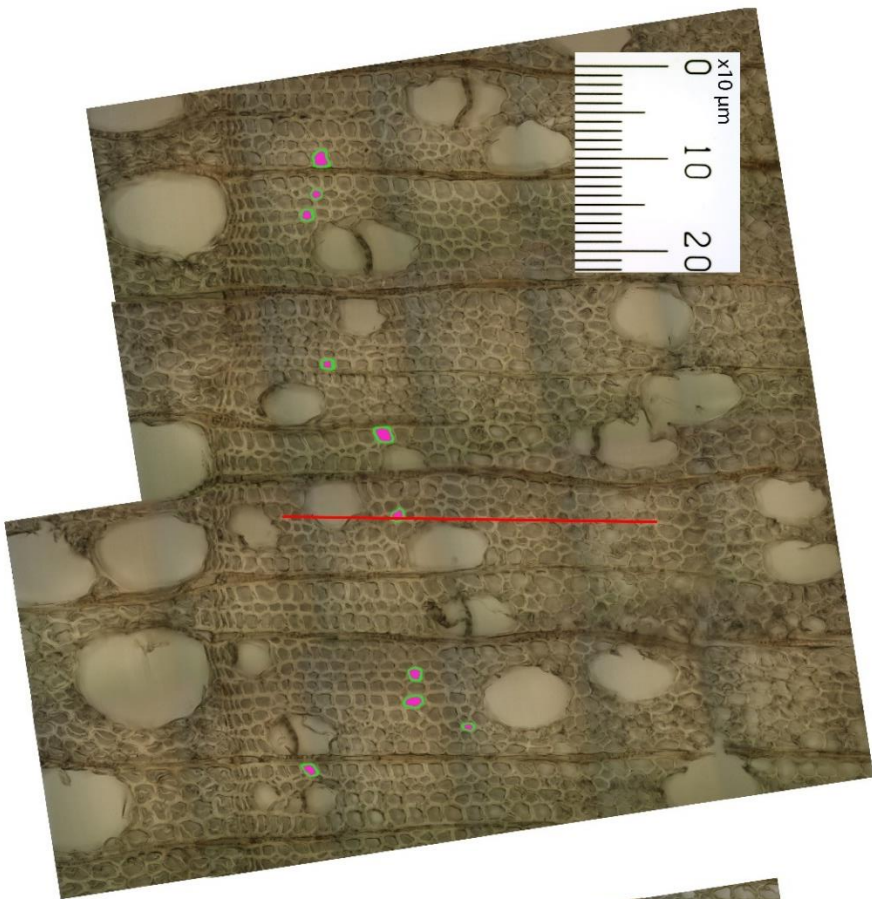
- Tabirihi, P.K. och Seehann G. 1981. *Biological Characteristics of Abachi Wood*
- Thörnqvist, T. 2008. *Trä som byggnadsmaterial, krav och riktlinjer*. Statens fastighetsverk.
<http://www.sfv.se/sv/bygg-pa-kunskap/byggnadsvard/tra-i-byggnader/> (hämtad 2016-04-22)
- Wadsö, L. 1993. *Studies of Water Vapour Transport and Sorption in Wood*. Doctoral Thesis, Building Materials Lund University, Lund.

7 Bilagor

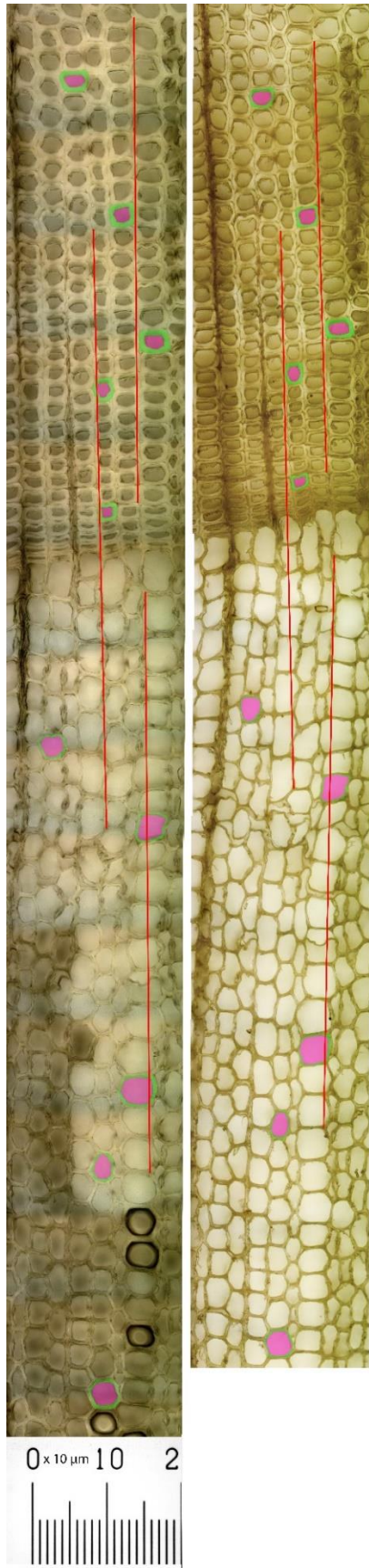
7.1 Bilaga 1; Bilder mikroskopi



Bilder av abachi (*Triplochiton scleroxylon*) $\times 400$ förstoring, vattenmättat t.v. och torrt t.h.



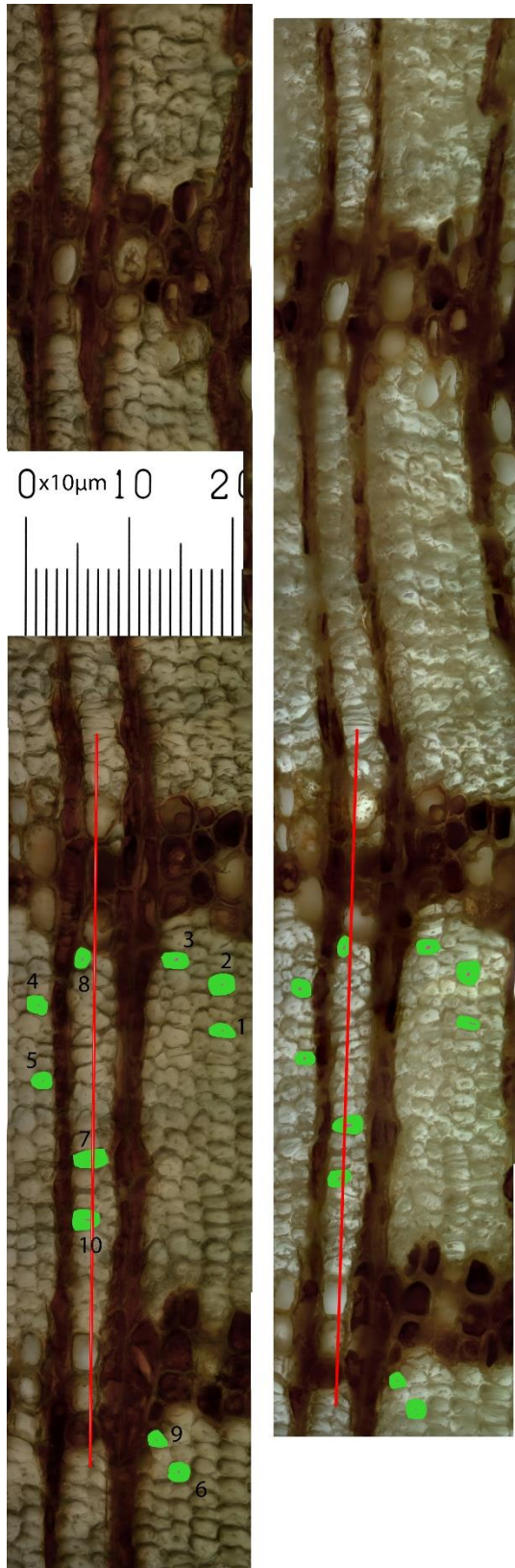
Bilder av poppel (*Populus x canadensis Moench*) $\times 400$ förstoring, vattenmättat ovan och torrt under.



Bilder av gran (*Picea abies*) $\times 400$ förstoring, vattenmättat t.v. och torrt t.h.



Bilder av bok (*Fagus sylvatica*) $\times 400$ förstoring, vattenmättat t.v. och torrt t.h.



Bilder av azobé (*Lophira alata*) $\times 400$ förstoring, vattenmättat t.v. och torrt t.h.

