

Egenskaper för värmebehandlat virke

Rasmus Söborg
Institutionen för ekonomisk och industriell utveckling
Maskinteknik – Träteknik
LiU-IEI-TEK-A-08/00408-SE
Handledare och examinator: Stig-Inge Gustafsson

2 juni 2008

Sammanfattning

Värmebehandling av virke, som metod för att modifiera virkets egenskaper, är inte någon nyhet på marknaden. Att egenskaperna hos virke förändras då det utsätts för höga temperaturer har varit känt länge och flera metoder för värmebehandling har utvecklats och industrialiserats. I Sverige har dock värmebehandlat virke inte slagit igenom på marknaden i någon större grad.

Värmebehandlat virke tillskrivs en mängd förbättrade egenskaper jämfört med obehandlat virke, t ex ökat motstånd mot nedbrytning och ökad dimensionsstabilitet. Färgen på virket förändras också vid värmebehandling. Virket blir mörkare vilket gör det attraktivt som alternativ till populära träslag som inte växer i Sverige. Värmebehandling förbättrar dock inte alla egenskaper hos virket utan även försämringar, t ex av de mekaniska egenskaperna, förekommer. En avvägning mellan de förbättrade och försämrade egenskaperna krävs alltså för att göra värmebehandlat virke användbart.

Inte bara korrekt information om försämrade egenskaper är viktigt då värmebehandling ska behandlas som modifieringsmetod av virke. Hur stora förbättringarna är sätter också gränser för vilka områden virke behandlat i höga temperaturer lämpar sig för. Ett exempel är motstånd mot biologisk nedbrytning där värmebehandlat virke visar på en klar förbättring, men något totalt skydd innebär värmebehandling inte.

För att skapa en korrekt bild av de egenskapsförändringar som behandling i höga temperaturer medför för virke, har utgångspunkten i det här arbetet varit att gå igenom oberoende forskning. Värmebehandling är en intressant modifieringsmetod som definitivt kan användas för att förädla svenskt virke. Behandlat virke visar på fukttegenskaper som klart förbättras i jämförelse med obehandlat virke vilket är en stor fördel vid användning utomhus och i andra miljöer med stora fuktväxlingar. Den förbättrade dimensionsstabiliteten öppnar för nya användningsområden och en allmän kvalitetshöjning för traditionella träprodukter. Den mörka färg som värmebehandlingen resulterar i har stor potential att göra värmebehandlat virke populärt för inredningsdetaljer. Värmebehandling är också en process som kan göras väldigt miljövänlig vilket är en stor konkurrensfördel gentemot många andra modifieringsformer.

De begränsningar i användning som behandling i höga temperaturer leder till för virke bör inte utgöra något hinder för lyckad användning, så länge användaren är medveten om dem. Försämringar av mekaniska egenskaper som brottgräns gör att värmebehandlat virke inte bör användas som konstruktionsvirke. I applikationer som ställer mycket höga krav på motstånd mot svampangrepp är det tveksamt om de förbättrade egenskaperna för värmebehandlat trä är tillräckliga. Precis som för normalt virke krävs ytbehandling för att den nya färgen ska bevaras hos värmebehandlat virke.

Förord

I slutet av vårterminen 2007 började jag se mig om efter lämpliga ämnen till mitt examensarbete. Utöver träteknik är nya material och hur de kan användas ett område jag finner intressant och som går hand i hand med en stor del av utbildningen jag läst. Stig-Inge Gustafsson, lärare i flera av de kurser jag läst i ämnet träteknik de senaste åren, tipsade mig om att ta kontakt med Johan Palm på Träcentrum i Nässjö och se om han hade några bra uppslag på intressanta områden för ett examensarbete.

Ett av de ämnen som kom upp som förslag var värmebehandling som förädlingsmetod av virke, något jag fann intressant och som stämde överens med både med önskan att göra ett examensarbete inom träteknik och med mitt intresse för användningen av nya material.

Tillsammans med Stig-Inge Gustafsson som ställde upp som handledare och Johan Palm och Susanne Johansson på Träcentrum togs riktlinjer för ett examensarbete fram och under höst terminen 2007 satte jag igång med arbetet. Och nu är det klart, till sist, det har dragit ut på tiden. Så förutom att hoppas att arbetet kommer vara till hjälp och ge svar på frågor kring värmebehandlat virke återstår bara att framföra ett tack till Stig-Inge, Johan och Susanne. Inte bara för den hjälp de bidragit med och den tid de lagt ned, utan också för deras tålamod med projektet.

Innehåll

1	Inledning	7
1.1	Syfte	7
1.2	Avgränsningar och förtydliganden	8
1.3	Rapportens uppbyggnad och läsanvisningar	9
1.4	Metodik	9
2	Trä, fukt och torkning	10
2.1	Virkes uppbyggnad	10
2.2	Trä och vatten	12
2.3	Trätorkning	15
3	Litteraturstudie	17
3.1	Tidigare sammanfattningar	17
3.2	Metoder för värmebehandling	17
3.3	Kemiska förändringar i trä vid värmebehandling	19
3.3.1	Kemiska förändringar vid olika behandlingstemperaturer	19
3.3.2	Sammanfattning av resultat	20
3.4	Fuktkvot	20
3.4.1	Förändringar i jämviktsfuktkvot	20
3.4.2	Varför ändras jämviktsfuktkvoten	22
3.4.3	Sammanfattning av resultat	22
3.5	Dimensionsstabilitet	23
3.5.1	Hur påverkas dimensionsstabiliteten	23
3.5.2	Sammanfattning av resultat	25
3.6	Nedbrytning	25
3.6.1	Svampangrepp	25
3.6.2	Motstånd mot svampangrepp hos värmebehandlat virke	27
3.6.3	Sammanfattning av resultat – svampangrepp	30
3.6.4	Skador orsakade av insekter	30
3.6.5	Insekter och värmebehandlat virke	30
3.6.6	Sammanfattning av resultat – insektsangrepp	31
3.7	Mekaniska egenskaper	32
3.7.1	Böjhållfasthet och elasticitetsmodul	33
3.7.2	Brottgräns	34
3.7.3	Hårdhet, skjuvhållfasthet och skruvurdragningskraft	34
3.7.4	Färgförändring som mätmetod	34
3.7.5	Sammanfattning av resultat	34
3.8	Färgförändringar	35

3.8.1	Teknisk beskrivning av färgförändringar	35
3.8.2	Färgförändringar av trä under värmebehandling	36
3.8.3	Färgbeständighet	38
3.8.4	Sammanfattning av resultat	39
3.9	Ytbehandling och limning	39
3.9.1	Limning	40
3.9.2	Limning av värmebehandlat virke	41
3.9.3	Sammanfattning av resultat – limning	42
3.9.4	Ytbehandling och betsning	43
3.9.5	Ytbehandling och betsning av värmebehandlat virke	43
3.9.6	Sammanfattning av resultat – ytbehandling och betsning	44
3.10	Övrigt	44
3.10.1	Värmebehandling för andra produkter än massivt virke	45
3.10.2	Energiåtgång och kostnader för värmebehandlat virke	45
3.10.3	Brandsäkerhet	46
3.10.4	Lukt och emissioner	46
4	Resultat	48
4.1	Fördelar för möbel- och inredningsprodukter	48
4.2	Fördelar för bygg och utomhustillämpningar	49
4.3	Miljö	50
4.4	Bearbetning och behandling av värmebehandlat virke	50
5	Diskussion	52
5.1	Reflektioner kring arbetet med examensarbetet och dess innehåll	52
5.2	Reflektioner över resultat	53

Figurer

1.1	Skärmvägg för utomhusbruk tillverkad av värmebehandlat virke .	7
2.1	Stammens uppbyggnad	10
2.2	Riktningar och snittytor	11
2.3	Fibermättnadspunkt	13
2.4	Deformationer vid torkning	13
2.5	Luftfuktighet	14
2.6	Jämviktsfuktkvot	15
2.7	Uttorkningshastigheter	16
3.1	Behandlingsschema ThermoWoodprocessen	18
3.2	Viktminskning vid värmebehandling	20
3.3	ASE_{35} för värmebehandlad medelhavstall	24
3.4	Blånadssvamp och brunröta	26
3.5	Husbock och angripet virke	31
3.6	Hårdheten beroende av fuktkvot	32
3.7	CIELAB systemet	36
3.8	Färgförändring av gran	37
3.9	Färgförändring av björk	38
3.10	Värmebehandlat virke utsatt för solljus	39
3.11	Färgförändring på ytan för värmebehandlat virke utsatt för solljus	40
3.12	Kontaktvinkel	43
3.13	Värmebehandlad björk behandlad med olja	44
3.14	Emissioner för värmebehandlat och obehandlat virke	47

Tabeller

2.1	Lämpliga jämviktsfuktkvoter	14
3.1	Minskad jämviktsfuktkvot	21
3.2	Dimensionsförändringar	24
3.3	Beständighetsklasser	25
3.4	Behandlingstemperaturer för Thermowood klasser	27
3.5	Limtyper och beständighet	41
3.6	Skjuvhållfasthet för olika limfogar	42

Kapitel 1

Inledning

Det här examensarbetet är gjort vid LiTH i samarbete med Träcentrum i Nässjö. Arbetet handlar om värmebehandlat trä, dvs virke vars egenskaper förändrats efter att det blivit utsatt för hög temperatur. Att virkets egenskaper kan förändras genom att det utsätts för höga temperaturer har varit känt länge och det finns idag flera olika metoder för värmebehandling som industrialiserats i olika hög grad. Johan Palm och Susanne Johansson vid Träcentrum har intresserat sig för värmebehandlat trä och ansåg att det skulle vara lämpligt att göra ett examensarbete om. Något de tyckte fattades var sammanställd opartisk information om värmebehandlat trä och dess egenskaper i förhållande till annat virke.



Figur 1.1: Skärmvägg för utomhusbruk tillverkad av värmebehandlat virke. Design: Hans Mårtensson Foto: Susanne Johansson

1.1 Syfte

En hel del forskning kring effekterna av behandling av virke i höga temperaturer har genomförts och publicerats. Den består till största del av vetenskapliga

artiklar vilket gör den svåröversiktlig och inte speciellt lättåtkomlig. Målet med arbetet blev alltså att sätta sig in i den forskning som genomförts och att sammanställa den på ett bra sätt, detta för att göra det enkelt att ge svar på vilka positiva och negativa egenskaper värmebehandlat virke har i jämförelse med obehandlat virke för att avgöra till vilka användningsområden värmebehandlat virke är lämpliga.

Ett mål med arbetet var också att basera informationen i det på oberoende forskning och att i så stor utsträckning inte använda material som publicerats av företag verksamma inom området.

1.2 Avgränsningar och förtydliganden

Som redan nämnts är huvudsyftet med det här examensarbetet att ge en samlad och lättillgänglig bild av värmebehandlat trä och dess egenskaper och begränsningar i jämförelse med obehandlat virke. Det kräver att det är tydligt definierat vad som menas med värmebehandlat trä. Egenskaperna hos virke förändras i olika grad vid behandling i olika temperaturer. I det här examensarbetet utgår det från att värmebehandlat trä blivit behandlat vid minst 160°C, vid de flesta aktuella metoderna använder man sig av högre temperaturer.

Bland de olika metoder för värmebehandling som finns idag har mest fokus lagts på den finska metoden Thermowood, den idag vanligaste metoden. Även Johan Palm och Susanne Johansson vid Träcentrum fann den metoden mest intressant, men även andra metoder har också studerats. De olika metoder som idag finns för att värmebehandla trä skiljer sig ifrån varandra tekniskt, men resultatet blir ungefär detsamma. Så för att få en så bred bild av värmebehandlat virkes egenskaper som möjligt, togs även undersökningar utförda på virke som behandlats med andra metoder med i studien.

Från Träcentrums sida var intresset störst för effekterna av värmebehandling på lövträ. Det var dock svårt att hålla studien enbart till lövträ eftersom mycket av materialet som publicerats kring värmebehandlat trä baserar sig på undersökningar av värmebehandlat barrträ. Likheter mellan löv- och barrträ anses dock vara så stora att även information om värmebehandlat barrträ är relevant. Något som framhålls i en stor del av det material som publicerats om värmebehandlat trä är att det behandlade virkets egenskaper varierar med träslaget, precis som för obehandlat virke.

Vid de flesta metoder som används för värmebehandling idag sker behandlingen i perioder med olika temperaturer för att få det slutgiltiga resultatet. Med behandlingstemperatur som nämns för olika undersökningar i det här arbetet menas den högsta temperatur som använts under behandlingen.

Förändringarna i egenskaper för värmebehandlat virke beror på kemiska förändringar i virket. Dessa kemiska förändringar utgör grunden för mycket forskning kring effekten av värmebehandling på virke. I det här arbetet har dock fokus lagts på vad förändringarna betyder för användandet av virket och inte på utförlig kartläggning och diskussion av de kemiska reaktioner som sker vid värmebehandling. Mycket av den forskning som publicerats kring kemiska förändringar är svår att förstå utan grundläggande kunskaper i kemi och när värmebehandlat virkes egenskaper ska diskuteras är följderna av kemiska förändringar intressantare för de flesta. I flera delar av arbetet är det dock svårt att inte ta med kemiska förändringar i diskussionen utan att resultatet blir ofull-

ständigt. Att förklara de olika avsnitten med ett så lätt språk som möjligt har självklart varit ett mål i arbetet, men i flera avsnitt har teknisk terminologi varit svårt att undvika.

1.3 Rapportens uppbyggnad och läsanvisningar

För att underlätta arbetet och få en viss struktur på rapporten har resultatet av litteraturstudien delats in i olika delar baserat på egenskapsförändringar som kan ses som viktiga när värmebehandlat trä ska beskrivas och jämföras med obehandlat trä.

Varje del inleds med en kort genomgång av grundläggande fakta om trä. Också fakta om mätmetoder och klassificeringar enligt standardiserade normer tas upp i de delar där relevant information finns.

Efter inledningen följer en genomgång av forskning kring ämnet och resultatet av denna. Varje del avslutas med en sammanfattning av de resultat som hittats under litteraturstudien, vilka slutsatser som kan dras av dessa och områden där mer forskning skulle vara intressant.

Rapporten avslutas med en presentation av de resultat och slutsatser som kan dras om värmebehandlat trä som material i stort och en diskussion av vilka användningsområden som värmebehandlat virke är lämpligt för.

1.4 Metodik

För att få en bred bild av den forskning som genomförts kring värmebehandlat virke gjordes en litteraturstudie av ämnet där inledningsvis allt material som hittades studerades. Självklart blev det nödvändigt att tidigt i arbetet sortera bort stor del av det genomgånna materialet eftersom det antingen inte var relevant eller att det inte kunde ses som oberoende forskning. Den största delen av materialet som använts består av publicerade vetenskapliga artiklar, merparten av dessa hittades med hjälp av universitetets databaser. Också material publicerat av företag verksamma inom värmebehandling studerades, dock med förbehållet att dessa inte kan ses som oberoende källor utan vidare.

Målet med arbetet har ju som sagt inte bara varit att reda ut vilka områden forskning bedrivits och resultatet av denna utan också att göra fakta kring värmebehandlat virke mera lättåtkomlig än i dess nuvarande form. Därför delades rapporten upp i delar efter de egenskaper som anses viktigast.

För att analysera resultatet och dra slutsatser kring för- nackdelar med värmebehandling jämfördes resultaten av litteraturstudien med egenskaper för obehandlat virke eller virke behandlat med andra metoder för att ändra egenskaperna hos virke. Olika egenskaper har jämförts först var för sig för att sedan dra slutsatser om lämpliga och olämpliga användningsområden.

Kapitel 2

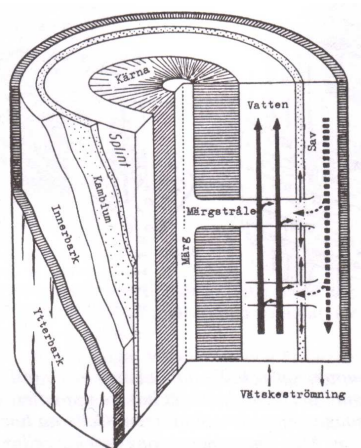
Trä, fukt och torkning

Trä tar upp och ger ifrån sig vatten vid förändringar i luftfuktighet i omgivningen vilket har stor inverkan på dess användbarhet som material. Färskt virke innehåller stora mängder vatten och måste tas om hand och torkas på rätt sätt för att undvika skador och göra det lämpligt för olika användningsområden.

2.1 Virkes uppbyggnad

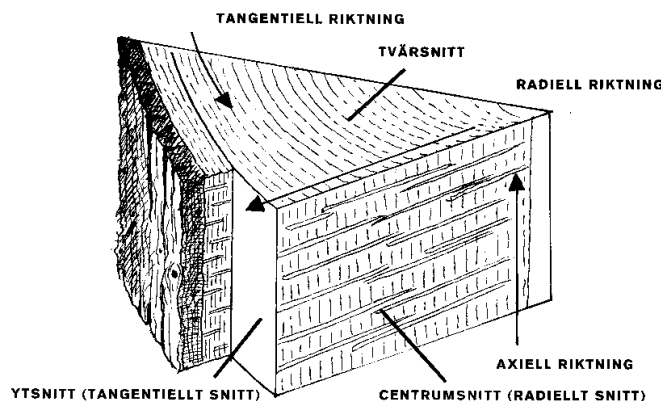
Stammens uppbyggnad är i stort sätt lika för barr- och lövträd, på cellnivå är lövträdsveden mer komplicerad än veden i barrträd.

Längst in i stammen finns märgen som omges av ved vilken utgör den största delen av stammen. Hos många träslag kan veden delas upp i kärnved och splintved. Kärnveden finns längst inne i stammen kring märgen och utgör olika stora delar av stammen beroende på träslag. Kärnveden fyller ingen aktiv funktion i trädet, men bidrar med stadga. Utanför kärnan finns splintveden, det är i de yttre lagren av splintveden som den huvudsakliga transporten av vätska och näringsämnen i trädet sker.



Figur 2.1: Stammens uppbyggnad. Figur från Esping [15]

I trädstammar och virkesstycken definieras tre olika riktningar och tre snittytor. Längs med stammen går den axiella riktningen. Den radiella riktningen går från stammens mitt utåt mot barken. Längs med årsringarna går den tangentiella riktningen. Tvärsnitt går rakt genom stammen. Centrumsnitt eller radiellt snitt går genom stammen parallellt med den radiella och den axiella riktningen. Ytsnitt eller tangentiella snitt går längs med den tangentiella riktningen se figur 2.2.



Figur 2.2: Riktningar och snittytor. Figur från Dahlgren m fl [10]

I veden kan man med olika tydlighet beroende på träslag se årsringar som utgörs av vår- och sommarved. Årsringarna bildas när trädets tillväxt sker på olika sätt under olika delar av tillväxtperioden. De olika tillväxtsätten gör att vår- och sommarved ibland skiljer sig från varandra i egenskaper. Vårved slits ned betydligt snabbare än den hårdare sommarveden för vissa träslag, vilket blir tydligt i användningsområden där förslitningen är stor t ex golv.

Lövträd delas in efter hur kärnen för vätsketransport i veden fördelar sig på vår- och sommarved. Bandporiga träslag har många och stora kärn i vårveden och betydligt mindre kärn i sommarveden. Hos ströporiga träslag kan årsringarna vara svårare att urskilja än hos de bandporiga då kärnen fördelar sig jämnt över vår- och sommarved i storlek och antal.

Utanför veden finns ett lager kambium, vilket är levande celler där tillväxten sker både inåt och utåt. Längst ut på stammen sitter barken som utgörs av innerbarken, där näringstransport nedåt i trädet sker, och ytterbarken. Transport av vätska uppåt i trädet sker i de yttre lagren av splintveden. Radiell närings- och vätsketransport sker i mägstrålar som går horisontellt från stammens centrum och utåt. [15] [10] [20]

De kemiska beståndsdelarna som bygger upp trä är cellulosa, hemicellulosa och lignin, samt mindre mängder extraktivämnen. Cellulosa och hemicellulosa består av långa polymerer medan ligninet binder ihop polymererna. Uppbyggnaden med långa molekylkedjor på längden som hålls samman av ligninet gör att de flesta träslag klarar betydligt större dragbelastning än tryckbelastning i fiberriktningen [15].

Generellt innehåller lövträd mer hemicellulosa men mindre lignin än barrträd. Cellulosainnehållet är ungefär samma för löv- och barrträd [10].

Extraktivämnena i trä varierar i mängd och sammansättning mellan olika träslag. Exempel på extraktivämnen är terpenier, hartssyror och estrar. Extraktivämnena spelar ingen stor roll i virkes uppbyggnad men vissa extraktivämnen kan påverka virkets motståndskraft mot nedbrytning för vissa träslag [15].

Veden i barrträd utgörs till största del av långsmala celler som löper vertikalt i trädet. Dessa kallas trakeider och fungerar både som transportväg för vätska i trädet och ger trädet dess stabilitet. På trakeiderna sitter porer som kan stängas och öppnas för att vätska ska kunna transporteras mellan cellerna. Radiellt i trät finns trakeider i märkestrålarna. I märkestrålarna finns också levande parenkymceller i vilka trädet lagrar näring, även längs med stammens riktning förekommer mindre mängder parenkymceller. I vissa barrträd finns också hartskanaler som kan löpa i både vertikalt och horisontellt beroende på träslag. [15]

Veden i lövträd består av fler typer av celler än veden i barrträd. Veden innehåller trakeidceller precis som barrved men vertikalt sker den huvudsakliga vätsketransporten i kärl, ihåliga celler som sitter på rad och bildar rör för vätsketransport. I lövträd finns också långsmala libriformceller som bidrar till trädets styrka. Generellt så har lövträd betydligt kortare fibrer än barrträd. I lövträd finns också märkestrålar och parenkymceller för näringslagring och vätsketransport horisontellt i trädet. [15]

2.2 Trä och vatten

Levande träd innehåller mycket vatten men även efter avverkning och förädling påverkas fukttinnehållet i trä av omgivningen. Fuktmängden i virke benämns som virkets *fuktkvot* som är förhållandet mellan vikten av vattnet i virket och vikten av virkets absolut torra vikt (virkets vikt efter att det torkats i ugn tills att allt vatten har försvunnit).

$$Fuktkvot(\%) = \frac{Vattnets\ vikt}{Virkets\ torra\ vikt} * 100$$

I färskt virke finns vatten i två former, fritt vatten i cellhålrummen, kallat kapillärvatten och vatten i cellväggarna som är delvis bundet till cellulosamolekylerna.

Det fria vattnet avdunstar fort bort när virket torkas medan vattnet i cellväggarna kräver högre temperaturer för att förångas. Fuktkvoten då det inte finns något fritt vatten inuti cellerna men cellväggarna är helt mättade med vatten kallas *fiber mätnadspunkten* se figur 2.3.

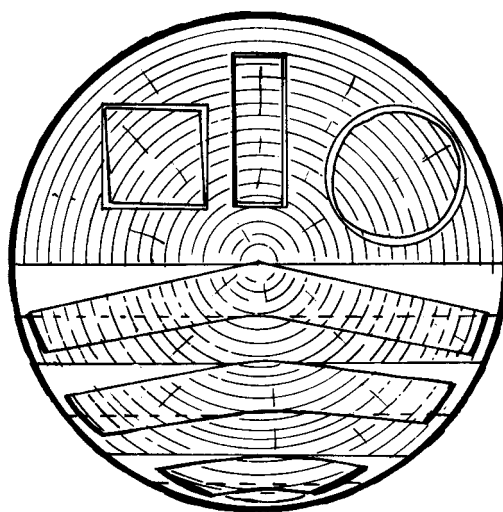
För de flesta träslag ligger fiber mätnadspunkten på ca 25-30 %. Det är vid fuktkvotsförändringar under fiber mätnadspunkten som virkesvolymen förändras, cellväggarna krymper respektive sväller när vatten avges eller tas upp. Hur mycket virket rör sig vid fuktförändringar beror på träslaget, från nysågat till möbeltorrt sker en volymminskning på 8-12 % för de flesta vanliga träslag.

Trä krymper olika mycket i olika riktningar, tangentiellt krymper det mest. Krympningen från färskt till 0 % fuktkvot ligger på mellan 5 och 10 % för de flesta i Sverige vanliga träslag. Radiellt är krympningen ungefär hälften av vad



Figur 2.3: Fiber-mättnadspunkten och fördelningen av vatten i virke. Figur från Thomassen [39]

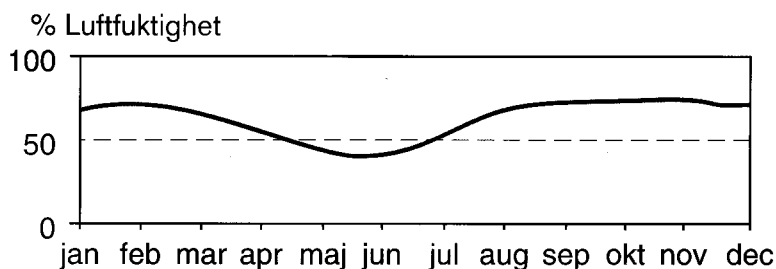
den är tangentiellt och axiellt är den nästan obefintlig. Att trä krymper olika mycket i olika riktningar leder till att olika deformationer och sprickor kan uppstå vid torkning, se figur 2.4. Det betyder att de formförändringar som uppstår när ett virkesstycke krymper påverkas av hur stycket är sågat ur stammen. [15] [10]



Figur 2.4: Normala deformationer från färskt till snickeritorr nivå för bok. Figur från Thomassen [39]

Obehandlat trä ställer in sig på en speciell fuktkvot efter den relativa luftfuktigheten (RH) och temperaturen i miljön det är i. Den fuktkvot då trä inte längre tar upp eller ger ifrån sig vatten kallas för *jämviktsfuktkvoten* se figur 2.6. Jämviktsfuktkvoten beror förutom på den relativa luftfuktigheten och temperaturen hos omgivningen också på träslaget. I de flesta miljöer varierar den relativa luftfuktigheten och temperaturen beroende på t ex årstider se figur 2.5. Det betyder att trä kommer att ändra jämviktsfuktkvot och svälla eller krympa när cellväggarna tar upp eller ger ifrån sig vatten. Dessa dimensionsrörelser kan

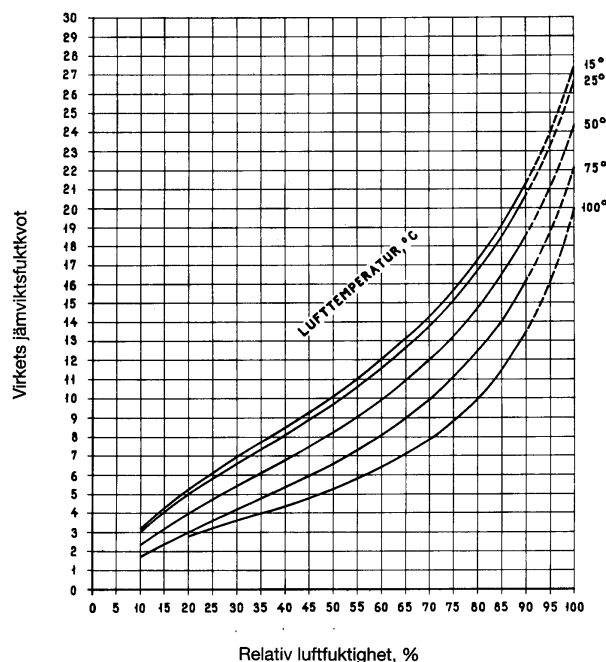
vara ett stort problem när trä ska användas och leder till många av de begränsningar som finns för trä som material. Hur lång tid ett virkesstycke behöver för att ställa in sig på den jämviktsfuktkvot som motsvarar rådande temperatur och relativ luftfuktighet varierar. Virketsstyckets dimensioner påverkar hur snabbt inställningen sker och grova bitar kan ta lång tid på sig innan de når jämviktsfuktkvoten. Beroende på användningsområde bör virke ha torkats till en lämplig fuktkvot innan den slutgiltiga produkten monteras, se tabell 2.1.



Figur 2.5: Den genomsnittliga luftfuktigheten utomhus under ett år. Figur från Dahlgren m fl [10]

Trämöbler, kryssfanér o dyl i hus med centralvärme (jämviktsfuktkvotens variation 7-11%)	5-7%
Innerdörrar, inredningar, parkett o dyl i hus med centralvärme (jämviktsfuktkvotens variation 7-11%)	6-8%
Trämöbler, kryssfanér o dyl i sommarvillor med kakelugns- uppvärmning och öppen spis	9-12%
Innerdörrar, inredningar, parkett o dyl i sommarvillor med kakelugnsuppvärmning och öppen spis	10-13%
Fönster, ytterdörrar, byggnadsvirke och föremål som endast delvis används utomhus	12-15%
Virke och föremål av trä som ständigt förvaras utomhus men skyddade för nederbörd	14-18%

Tabell 2.1: Lämpliga jämviktsfuktkvoter för färdiga produkter. Siffror från Esping [15]



Figur 2.6: Förhållande mellan Temperatur, relativ luftfuktighet och jämviktsfuktkvot. Figur från Thomassen [39]

2.3 Trätorkning

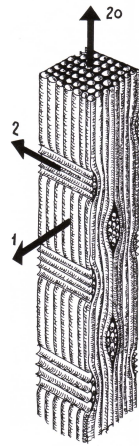
Torkning av virke är viktigt av flera orsaker. För att undgå stora formförändringar bör virke torkas till den fuktkvot som kommer vara jämviktskvot i den slutgiltiga användningsmiljön för produkten. Virkets beständighet påverkas av torkning. Får virke med en fuktkvot på 20% eller mer ligga oskyddat ökar risken för svampangrepp kraftigt. Även många av de mekaniska egenskaper hos trä påverkas av fuktkvoten i virket.

Vatten avdunstar inte från trä jämnt fördelat från alla ytor. Uttorkningshastigheten är dubbelt så stor radiellt som tangentiellt i virke. Axiellt är uttorkningshastigheten som störst, ca tio gånger större än radiellt, se figur 2.7. Ändytorna kan alltså vara torra medan delar i mitten av virkesstycket fortfarande är fuktiga.

Torkningen ska självklart gå så fort som möjligt av ekonomiska skäl t ex lagerkostnader. Torkning är dock en avancerad process som måste ske i rätt takt för att inte riskera att stora delar av ett virkesparti förstörs av torkskador.

Torkning av trä kan göras utomhus, processen är dock svår att kontrollera och tar lång tid. Brädgårdstorkning medför också att produktionen styrs av årstider och innebär att det är omöjligt att få ned fuktkvoten i virket till riktigt låga nivåer. Virket kommer alltså inte vara torkat till den önskvärda fuktkvoten när det levereras.

Torkning sker idag oftast i avancerade torkanläggningar där temperatur och luftfuktighet styrs noga för att uppnå bästa resultat.



Figur 2.7: Uttorkningshastigheter i de olika riktningarna. Figur från Esping [15]

Kapitel 3

Litteraturstudie

3.1 Tidigare sammanfattningar

En del sammanfattningar av värmebehandlat virkes egenskaper har gjorts, bland annat tas värmebehandlat trä upp i en rapport från Sveriges Byggindustrier; *Egenskaper hos modifierat virke* av Hannah Epmeier, Robert Kliger och Mats Westin som kom ut 2004 [14]. I rapporten beskrivs kort olika metoder för värmebehandling och effekterna av värmebehandling har på virke.

Thermowood handbook ges ut av The Finnish Thermowood Association, en förening för de företag som använder sig av Thermowoodprocessen för att värmebehandla trä [2]. I *Thermowood handbook* beskrivs de flesta aspekter av Thermowoodprocessen och egenskaperna för trä behandlat med den. *Thermowood handbook* innehåller mycket fakta och är man intresserad av virke behandlat med Thermowoodprocessen är den användbar. I det här arbetet har den dock används sparsamt då fokus varit granskning av forskning som inte publicerats av de verksamma företagen själva.

Vid Luleå Tekniska Högskola bedrivs en del forskning kring värmebehandling av trä. De senaste åren har två publikationer med mål att ge en helhetsbild av värmebehandlat virke givits ut därifrån. Examensarbetet *Värmebehandlat trä ur ett produktperspektiv* av Elisabeth Viktorsson [41] består av information om värmebehandlat virke och undersökningar av det som material i produkter ur olika perspektiv. Den tekniska rapporten *Värmebehandling av trä: från ett historiskt perspektiv till kommersiell produktion av idag* av Bror Sundqvist [38] är som titeln antyder en genomgång av material som presenterats kring värmebehandlat virke.

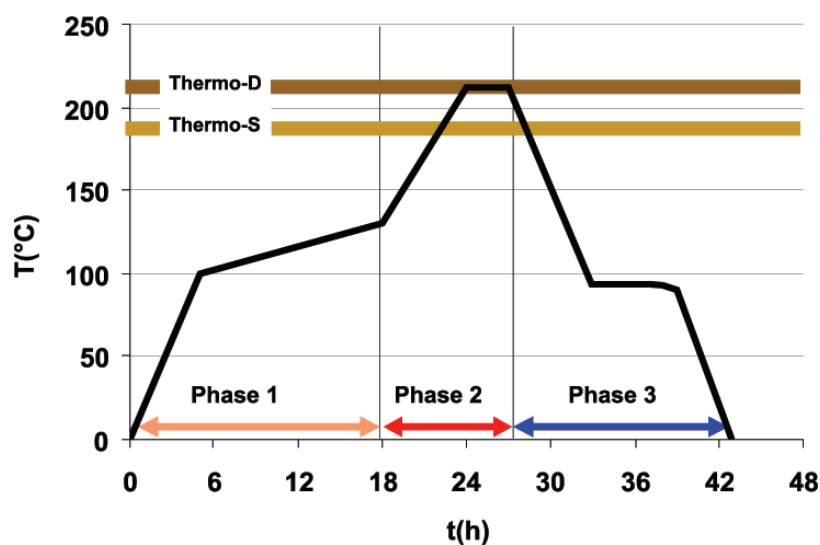
Fler sammanfattningar och arbeten om värmebehandlat virke går definitivt att hitta. Dock är det omöjligt att få med allt, då ett examensarbete är en uppgift med begränsningar när det gäller tid och omfattning.

3.2 Metoder för värmebehandling

Flera metoder för värmebehandling har utvecklats och industrialiserats i olika hög grad. Som tidigare nämnts, har material om effekterna av alla typer av värmebehandling studerats för att få en så bred bild som möjligt. I delar av de undersökningar som studerats i det här arbetet, har virket blivit värmebehandlat

med mindre typer av utrustning t ex autoklaver och ugnar. De flesta metoder ger liknande resultat, men självklart har det i varje fall gjorts en bedömning om hurvida det aktuella materialet är intressant för det här arbetet.

Bland de mest förekommande metoderna för värmebehandling används någon form av medium, för att uppvärmningen ska ske i en syrefattig miljö, då närvaro av syre påverkar resultatet av värmebehandlingen. Behandlingen består oftast av en uppvärmningsfas då temperaturen höjs i intervaller med en bestämd hastighet till den slutgiltiga behandlingstemperaturen, se exempel i figur 3.1. Sedan följer en behandlingsfas i den aktuella temperaturen och därefter en avsvlningsfas. Hur lång tid de olika faserna pågår och vilken temperatur som används beror på behandlingsmetod och önskat resultat.



Figur 3.1: Behandlingsschema ThermoWoodprocessen. Figur från ThermoWood Brochure www.thermowood.fi

De idag vanligaste metoderna för värmebehandling är:

- **ThermoWood** Ånga används som medium, virket behandlas i 185°C-225°C.
- **Platowood** Virket värms först upp i vattenbad under högt tryck med temperaturer runt 160°C-190°C och torkas sedan innan det värms upp till 170°C-190°C i kvävgasatmosfär.
- **Le Bois Retifié** Kvävgas används som medium, virket behandlas i 210°C-240°C.
- **Naturholzschutz** Behandlingen sker i olja med temperaturer på 180°C-220°C.
- **Le Bois Perdure** Virket värms upp och behandlas vid 200°C-240°C i mättad ånga.

- **Övriga metoder** Flera andra metoder för värmebehandling finns, de flesta liknar någon av de ovanstående. Som exempel kan nämnas Baschild-metoden som är snarlik Thermowoodmetoden.

3.3 Kemiska förändringar i trä vid värmebehandling

Trä består till största delen av tre beståndsdelar; hemicellulosa, cellulosa och lignin. De olika beståndsdelarna är olika känsliga för höga temperaturer och börjar påverkas vid olika delar av värmebehandlingen.

3.3.1 Kemiska förändringar vid olika behandlingstemperaturer

Nedbrytningen av beståndsdelarna tar fart ordentligt runt behandlingstemperaturer vid ca 200°C. Hemicellulosa är den beståndsdel som påverkas vid lägst temperatur. Kraftig nedbrytning startar runt 200°C och är den process som tillskrivs de största förändringarna av egenskaperna för trä vid värmebehandling. Därefter börjar cellulosa brytas ned i stora mängder vid 240°C och lignin vid 280°C [9]. Egenskaperna hos trä börjar dock att förändras vid lägre temperaturer och även lignin, den av huvudkomponenterna i trä som är minst känslig mot höga temperaturer, bryts ned vid värmebehandling [42].

Det är inte bara nedbrytning av beståndsdelarna i trä som leder till förändrade egenskaper vid värmebehandling. Andra kemiska reaktioner, som förändrad uppbyggnad av polymerer genom nya tvärbindingar, påverkar virkets egenskaper, t ex vattenabsorption.

Även eventuella extraktivämnen i virke påverkas vid behandling i höga temperaturer.

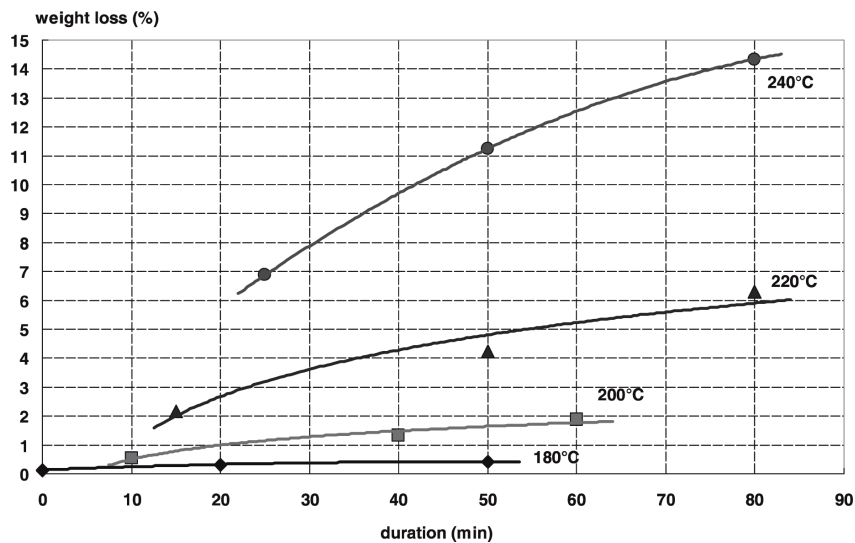
Delar av dem frigörs vid värmebehandling, och tillsammans med ämnen som frigjorts vid nedbrytningen av huvudkomponenterna, bör de tas hand om vid produktionen av värmebehandlat trä, t ex genom förbränning [2].

Vid värmebehandling minskar trä i vikt till följd av kemiska nedbrytning av dess beståndsdelar. Flera av de egenskapsförändringar, som sker för trä vid värmebehandling, redovisas som funktion av viktminskningen, då effekten av värmebehandling beror på flera faktorer i behandlingen. Viktminskningen (ML) under värmebehandling anges i procent av ursprungsvikten och räknas ut enligt:

$$ML(\%) = 100 * (m_1 - m_2)/m_1$$

Där m_1 och m_2 är provets vikt då det torkats till 0 % fuktkvot före respektive efter värmebehandlingen.

Den faktor som påverkar viktminskningen mest är behandlingstemperaturen. Vid behandling i lägre temperaturer avtar viktminskningen med ökad behandlingstid vid konstant temperatur. För behandlingar med högre temperaturer fortsätter viktminskningen under en längre del av behandlingen. Prover som behandlats i 180°C genomgår som mest en viktminskning på 0,5% medan behandlingstemperaturer på 200°C, 220°C och 240°C med samma behandlings-



Figur 3.2: Viktminskning vid värmebehandling. Figur från Paul m fl [27]

metod leder till viktminskningar på 2%, 6,5% och 14% om behandlingen får fortgå tillräckligt lång tid, se figur 3.2. [27]

3.3.2 Sammanfattning av resultat

Alla delar av virket påverkas i olika omfattning kemiskt av värmebehandling, vilket bidrar till de förändrade egenskaperna. De kemiska förändringar som sker är inte enbart nedbrytning av beståndsdelarna utan också andra förändringar, t ex förändringar av polymernätverk i virket.

Den process parameter som spelar störst roll för de kemiska förändringarna är behandlingstemperaturen. En längre behandlingstid ger generellt inte samma egenskapsförändringar som en kortare behandlingstid vid en högre temperatur.

3.4 Fuktkvot

Obehandlat virke påverkas kraftigt av fuktförändringar i omgivningen. Flera av de problem, som man måste ta hänsyn till då trä ska användas som material, beror på att trä ändrar fuktkvot beroende på luftfuktighet och temperatur.

Även trä, som behandlats vid temperaturer lägre än de som i den här rapporten räknas som minimum för att virket ska kallas för värmebehandlat, visar förändringar av egenskaper i förhållande till fukt. [32] [19]

3.4.1 Förändringar i jämviktsfuktkvot

Jämviktsfuktkvoten hos värmebehandlat trä sjunker med ökad viktminskning, alltså ju större förändringarna i virket som skett vid värmebehandlingen. Värmebehandlad valnöt (*Juglans regia*) och fågelbär (*Prunus avium*) ställer efter

fyra veckor i 20°C och 65% RH in sig på 4% fuktkvot, för obehandlat trä ligger samma jämviktsfuktkvot på ca 12%. [8]

Precis som med många andra egenskapsförändringar av behandlat virke är det behandlingstemperaturen som främst avgör hur stora förändringarna kan bli. Gran *Picea abies* som obehandlad har en jämviktsfuktkvot på 9,5% vid 20°C och 65% RH når ned till en jämviktsfuktkvot på 5,5% vid samma förhållande då den behandlats i 240°C under tillräckligt lång tid, se tabell 3.1. 240°C är dock en högre temperatur än vad som används vid de flesta industrialiserade värmebehandlingsmetoder. I samma förhållanden visar gran behandlad i 180°C en jämviktsfuktkvot på strax under 8,5% och för behandlingstemperaturerna 200°C och 220°C varierar jämviktsfuktkvoten mellan 8–8,5% respektive 6,5–7,5% beroende på behandlingstid. [27]

Behandlingstemperatur (°C)	Obehandlad	180	200	220	240
Jämviktsfuktkvot vid 20°C och 65% RH (%)	9,5	8,5	8	6,5	5,5

Tabell 3.1: Minskad jämviktsfuktkvot för gran beroende på behandlingstemperatur. Siffror från Paul m fl [27]

Förändring av jämviktsfuktkvoten märks tydligare ju högre luftfuktighet behandlade prover utsätts för. För gran och bok som fått ställa in sig på jämviktsfuktkvoter vid 66%, 86% och 100% RH under en längre tid ökar skillnaden mellan behandlade prover och obehandlade kontrollprover med högre luftfuktighet. Jämförelse med resultaten för värmebehandlad björk (*Betula pubescens*), medelhavstall (*Pinus pinaster*) och ask (*Fraxinus excelsior*), som genomgått samma försök, visar att jämviktsfuktkvoten vid 100% RH är generellt lägre för lövträden (12% för alla tre träslag) än för barrträden (16% för medelhavstall och 20% för gran). En trolig orsak till skillnaden mellan löv- och barrträd är den högre andelen hemicellulosa i lövträd. [22]

För flera träslag skiljer sig vattenabsorptionen mellan splint- och kärnved, splintved tar ofta upp mer vatten än kärnved. En undersökning visar att den tidigare skillnaden mellan splint- och kärnved påverkas olika för gran och tall *Pinus sylvestris*. För gran påverkas splint- och kärnveden på samma sätt av värmebehandlingen, ju högre temperaturer virket behandlats med desto mindre blir vattenabsorptionen. För splintveden hos tall ökar vattenabsorptionen för virke behandlat i 170°C, 190°C och 210°C i jämförelse med obehandlade referensprover. Endast splintved från tall som behandlats i 230°C visar en minskning i vattenabsorption. För tallens kärnved minskar vattenabsorptionen vid värmebehandling i alla de aktuella temperaturerna. Minskningen följer dock inte samma mönster som för gran, för behandlingstemperaturer upp till och med 210°C ökar vattenabsorptionen med temperaturen även fast den är lägre än för obehandlade referensprover. [26]

De olika resultaten för de två träslagen gör det svårt att dra några slutsatser kring generella skillnader i inverkan av värmebehandling på splint- och kärnved för olika träslag.

Också hastigheten med vilken kapillärvattnet tas upp av virke påverkas av vär-

mebehandling. Jämfört med obehandlad tall, är upptagningshastigheten för tall behandlad med Thermowoodmetoden betydligt lägre. [24]

3.4.2 Varför ändras jämviktsfuktkvoten

Minskningen av jämviktsfuktkvot som värmebehandlat virke vill ställa in sig på är förmodligen ett resultat av flera av de kemiska förändringar som beskrivs i del 3.3 *Kemiska förändringar i trä vid värmebehandling*. Olika kemiska reaktioner sker vid olika temperaturer och påverkar fuktutbytet med omgivningen på olika sätt.

Mycket av förändringarna i vattenabsorption beror på att tillgängligheten till de fria hydroxylgrupper, som binder vatten i virket, minskar. Boonstra och Tjederdsma listar de vanligaste orsakerna som [5]:

- Depolymerisation, d v s nedbrytning av kolhydraterna, främst av hemicellulosa leder till en minskning av det totala antalet hydroxylgrupper, inklusive fria hydroxylgrupper.
- Andelen cellulosa ökar, cellulosan är ett kristallint ämne i vilket hydroxylgrupperna inte är lättillgängliga för vattenmolekyler.
- En ökning av tvärbindingar i ligninnätverket vilket minskar tillgängligheten till fria hydroxylgrupper för vattenmolekylerna.

Fuktegenskaperna för värmebehandlat trä är säkerligen en kombination av dessa förändringar i virket. Förändringen av ligninnätverken verkar dock spela en stor roll enligt flera artiklar, vilket är intressant, då det annars är enkelt att tillskriva nedbrytningen av hemicellulosa de flesta förändringarna som sker vid värmebehandling [5] [40].

3.4.3 Sammanfattning av resultat

Som nämnts är många av de problem som kan uppstå när trä används som material, relaterade till dess vattenabsorption. Som konsument av produkter i värmebehandlat trä är kanske inte lägre jämviktsfuktkvot något de flesta skulle reflektera över. Det är, precis som för de kemiska förändringarna, effekterna på andra egenskaper, t ex dimensionsstabilitet och nedbrytning som är intressanta. Sänkningen av jämviktsfuktkvot är dock en positiv egenskap som inte ska bortses ifrån. Även om sänkningar som nämns inte verkar så stora är det utan tvekan så att de har en stor betydelse och kan ge märkbart bättre resultat för en mängd användningsområden. Många av användningsområdena där värmebehandlat virke brukar framhållas som speciellt lämpligt är miljöer med kraftiga skillnader i RH, t ex utomhus och i badrum.

Sänkningen av jämviktsfuktkvot är alltså en klar förbättring av virkes egenskaper vid värmebehandling, den öppnar för en del nya användningsområden och förbättringar i produkter, där trä redan används som material.

3.5 Dimensionsstabilitet

Dimensionsstabilitet är ett område där värmebehandling förbättrar virkets egenskaper. Att dimensionsstabiliteten förbättras är nära sammankopplat med sänkningen av jämviktsfuktkvot och vattenabsorption eftersom det är vid fuktförändringar i omgivningen som trä rör sig.

Olika metoder används för att beskriva förbättrad dimensionsstabilitet i literaturen. Flera baseras på att man räknar ut ett provs dimensionsskillnader i procent vid olika luftfuktigheter. För att räkna ut provers svällning (SW) används följande formel [4]:

$$SW(\%) = 100 * (h_{RH} - h_{absolut\ torr})/h_{absolut\ torr}$$

Där $h_{treated}$ är dimensionen för ett prov vid en relativ luftfuktighet och $h_{oven-dry}$ är samma dimension då provet är helt torrt.

Uttrycket *Antishrink Efficiency* (ASE) [17], det används för att beskriva hur mycket mindre ett värmebehandlat prov krymper i jämförelse med ett obehandlat:

$$ASE_{RH}(\%) = 100 * (S_{ej\ behandlad} - S_{behandlad})/S_{ej\ behandlad}$$

Där RH står för aktuell relativ luftfuktighet och S står för shrinking, dvs krympningen i procent för obehandlade respektive behandlade prov då en dimension (L) av provet vid den aktuella luftfuktigheten jämförs med samma dimension vid 0% relativ luftfuktighet:

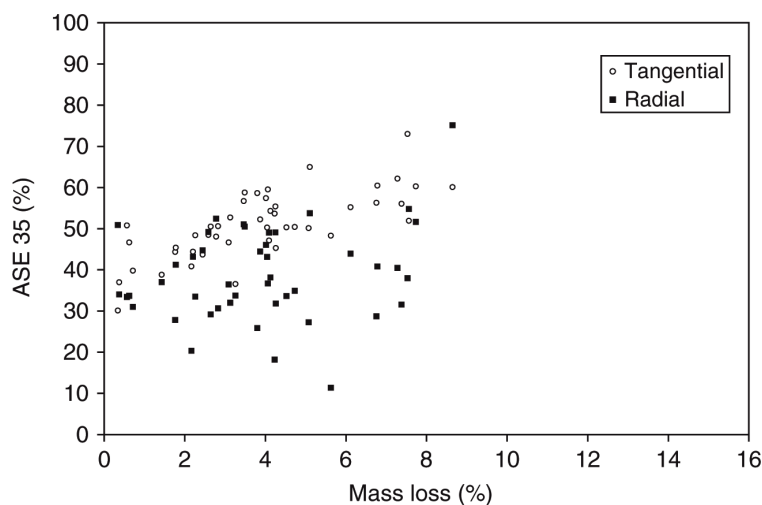
$$S_{RH}(\%) = 100 * (L_{RH} - L_{0\%})/L_{RH}$$

3.5.1 Hur påverkas dimensionsstabiliteten

Virkes dimensionsstabilitet ökar vid behandling i höga temperaturer. Även vid temperaturer betydligt lägre än de som används vid den typ av värmebehandling som behandlas i det här arbetet, märks en skillnad i dimensionstabilitet. Mellan prover torkade i 50°C respektive 110°C finns en tydlig skillnad i hur fukttinhåll och tjocklek påverkas, när proverna utsätts för cykliska klimatförändringar, även efter att det blivit utsatt för flera cykler håller effekten i sig [12].

ASE för medelhavstall (*Pinus pinaster*) och eukalyptus (*Eucalyptus globulus*) påverkas tydligt av värmebehandling. Även efter behandlingar som medfört en liten viktminskning (dvs påverkan) hos provbitar sker en märkbar ökning av ASE se figur 3.3. ASE ökade mer i tangentiell än i radiell, men skillnaden är inte så stor. I axiell sker ingen större skillnad vid värmebehandling. Skillnaden i ASE märks tydligare då prover utsätts för lägre luftfuktigheter (dvs det märks större skillnad i krympning mellan behandlade och obehandlade prover då dimensioner vid 35% RH jämförs med samma dimensioner vid 0% RH än då dimensionsförändringen jämförs mellan t ex 65% RH och 0% RH). För ASE_{35} var de största värdena i radiell mellan 40 och 57% för medelhavstall och mellan 73 och 90% för eukalyptus [17].

Tall (*Pinus sylvestris*) som behandlats med ThermoWood metoden visar en maximal volymsvällning på 6,5% vilket är en halvering värdet på den maximala volymsvällningen för obehandlad tall, som under samma förutsättningar är ca 13%. Skillnaden i svällning mellan värmebehandlade och obehandlade prover blir större ju högre RH proverna utsätts för. [24]



Figur 3.3: ASE_{35} som funktion av viktminskning för värmebehandlad medelhavstall Figur från Esteves m fl [17]

Jämförelse mellan dimensionsförändringar för värmebehandlad och obehandlad valnöt (*Juglans regia*) och fågelbär (*Prunus avium*) visar på en tydlig förbättring av dimensionsstabiliteten efter värmebehandling. Vid en förändring av RH från 30% till 80% genomgår värmebehandlad valnöt en medel tjockleksförändring på 0,74%, samma förändring för obehandlad valnöt är 1,89%. För valnöt ger ytbehandling samma förbättringar för dimensionsstabiliteten på värmebehandlade prover som för prover som inte genomgått värmebehandling. För fågelbär är samma effekt inte lika klar, se tabell 3.2. [8]

	Ytbehandling	Bredd	Tjocklek
Obehandlad	Nej	1,10	1,87
Fågelbär	Ja	1,18	1,53
Behandlad	Nej	0,53	0,75
Fågelbär	Ja	0,68	0,43
Obehandlad	Nej	1,52	1,89
Valnöt	Ja	1,41	1,43
Behandlad	Nej	0,65	0,74
Valnöt	Ja	0,50	0,48

Tabell 3.2: Dimensionsförändringar i % för obehandlade och värmebehandlade prover mellan 30% och 80% RH. Med och utan ytbehandling. Tabell från Brunetti m fl [8]

Hur mycket dimensionsstabiliteten ökar, beror inte bara på behandlingstemperaturen, utan också behandlingstiden är viktig. Det finns tydliga samband mellan behandlingstid, behandlingstemperatur och antishrink efficiency i det behandlade materialet [37] och virket sväller mindre ju längre tid det behandlats [4].

3.5.2 Sammanfattning av resultat

Värmebehandling ökar effektivt dimensionsstabiliteten för virke. Flera undersökningar pekar på att värmebehandling kan halvera dimensionsförändringarna vilket är en klar fördel för de flesta träslag och användningsområden. De minskade dimensionsförändringarna leder till bättre resultat vid flera traditionella användningar av virke, men öppnar också för användningsområden, som virkes benägenhet att röra sig vid fuktförändringar i omgivningen tidigare omöjliggjort.

3.6 Nedbrytning

Nedbrytning genom angrepp av svampar, bakterier och insekter är ett stort problem som påverkar kvaliteten och livslängden för träprodukter, främst i utomhusbruk. Den begränsade livslängden för trä i utomhusmiljö betyder att det för vissa användningsområden har svårt att konkurrera med andra material, t ex plast eller metall. Olika behandlingar för att ge trä bättre motstånd mot virkesförstörande organismer finns på marknaden, t ex tryckimpregnering. Värmebehandling av trä leder till ökad motståndskraft mot nedbrytning och är ur miljösynpunkt bättre än flera av de andra behandlingarna på marknaden. Till sammans med den minskade permeabiliteten och ökade dimensionsstabiliteten gör värmebehandlat trä till ett intressant material för utomhusbruk. Hur beständigt mot virkesförstörande organismer värmebehandlat trä är ett område där riktig information är viktigt så att virket inte används på fel sätt i tro att den förbättrade motståndskraften mot nedbrytning är tillräcklig.

Beständighetsklasser Enligt CEN-normen klassificeras virkes naturliga beständighet vid markkontakt och mot angrepp av virkesförstörande organismer enligt fem klasser, se tabell 3.3.

1 Mycket beständig
2 Beständig
3 Måttligt beständig
4 Svagt beständig
5 Icke beständig

Tabell 3.3: Beständighetsklasser

Några exempel på hur träslag vanliga i Sverige är klassificerade är ek klass 2, tall klass 3-4, gran klass 4 och björk klass 5. Klasserna gäller träslagets naturliga beständighet, dvs deras nedärvda resistens mot angrepp av virkesförstörande organismer. Klasserna gäller för kärnved, all splintved räknas till klass 5 [10].

3.6.1 Svampangrepp

Flera arter av svampar kan attackera trä med skador av olika omfattningar som följd. Man kan dela in svampar som angriper trä i tre grupper:

- **Mögelsvampar** lever främst på ytan på virke och har inga större effekter på virkets mekaniska egenskaper. De kan dock leda till dålig lukt och allergi.
- **Blånadssvampar** är den svamptyp som tar kortast tid på sig att attackera virke om förutsättningarna är bra. Svampangrepp av blånadssvampar leder till missfärgning av veden, se figur 3.4, men har precis som mögelsvamparna ingen stor inverkan på virkets mekaniska egenskaper.
- **Rötsvampar** som består av brunröta och vitröta och som båda angriper cellstrukturen i trä och kan ge stora skador på virke. Brunröta angriper och bryter ned cellulosa och lämnar ligninet vilket ger det angripna virket en brun färg, se figur 3.4. Vitröta konsumerar i både cellulosa och lignin vilket lämnar ett vitaktigt restämne i den angripna veden.



Figur 3.4: Trä angripet av blånadssvamp till vänster och brunröta till höger. Figurer från Hoadley [20]

Effekten av en svamp nedbrytning av trä mäts, precis som effekten av värmebehandling, i viktminskningen som uppstår då svampen bryter ned träet. För att utvärdera hur mycket nedbrytning en svamp orsakat i ett prov torkar man provet och jämför dess vikt med provets vikt innan det utsättes för svampen enligt följande formel [18]:

$$ML'(\%) = 100 * (m_2 - m_3)/m_2$$

Där m_2 och m_3 är provets ugnstorra vikt innan respektive efter att det blivit utsatt för svampangrepp.

Det finns fyra grundförutsättningar för att svampar ska angripa virke [20]:

- Rätt temperatur krävs för att svampar ska trivas, vid för höga eller låga temperaturer kan inte svampen växa vidare.
- Näringsämnen i träet som svampen kan leva av. För de flesta träslag är splintveden betydligt näringsrikare och mottagligare för svampangrepp än kärnveden.

- Svampar behöver syre för att kunna växa, t ex så drabbas virke som förvaras under vatten av mindre svampangrepp än virke som förvaras på land.
- Fukt är en nödvändighet för att svampar ska trivas, i virke med en fuktkvot lägre än 20% är risken för svampangrepp väldigt liten.

Ett problem är att det kan vara svårt att använda träprodukter utan att utsätta dem för relativt bra förutsättningar för svamptillväxt, människor trivs inte heller vid för höga eller låga temperaturer och vid utomhusbruk är det omöjligt att kontrollera fuktkvoten i omgivningen.

The Finnish Thermowood Association har delat in trä behandlat med Thermowoodprocessen i två klasser, Thermo-S och Thermo-D efter vilken behandlingstemperatur som används, se tabell 3.4. Beständigheten för Thermo-S är klassad som klass 3 och Thermo-D som klass 2 enligt standarden EN 113 *Träskydd - Bestämning av den förebyggande skyddseffekten hos träskyddsmedel mot rötsvampar - Provnig*. [2]

	Barrträd (gran och tall)	Lövträd (björk och asp)
Thermo-S	190°C	185°C
Thermo-D	212°C	200°C

Tabell 3.4: Behandlingstemperaturer för Thermowood klasser, [2]

3.6.2 Motstånd mot svampangrepp hos värmebehandlat virke

Gran (*Picea abies*), som behandlats i temperaturer högre än de som vanligen används i kommersialiserade metoder för värmebehandling, visar tydligt att värmebehandling har effekter på motståndet mot nedbrytning. Provbitar behandlade i 220°C hamnar i klass 3 respektive 2 enligt EN 350-1 beroende på behandlingstid. Vid 240°C når provbitarna klass 1 för alla behandlingstider som testats. [27]

För radiatatal (*Pinus radiata*) och björk (*Betula pendula/pubescens*) som blivit behandlade med plato-processen och utsatt för brun- och vitrötsvampar är resultaten varierande. Den värmebehandlade radiatatalen visar en märkbar förbättrad motståndskraft mot brunrötesvampen *Coneophora puteana* och en mindre förbättring av motståndskraften mot brunrötesvampen *Poria placenta*. Mot vitrötsvampen *Coriolus versicolor* är förändringen av motståndskraft hos den värmebehandlade radiatatalen liten eller ingen alls. Den värmebehandlade björken visar på förbättrad motståndskraft mot både brunrötesvampen *Coneophora puteana* och vitrötsvamparna *Coriolus versicolor* och *Stereum hirsutum* [6].

En jämförelse av motståndskraften mot brunrötesvampen *Gloeophyllum trabeum* för värmebehandlat trä och trä som impregnerats med ACQ-C (Alkaline Copper Quaternary type C) pekar på att värmebehandling inte kan mäta sig

med impregnering när det gäller att förhindra svampangrepp. Banksianatall (*Pinus banksiana*) och tulpanträd (*Liriodendron tulipifera*), båda träslag som anses mottagliga för svampen, visade efter impregnering med ACQ-C väldigt små viktminskningar. De värmebehandlade proverna visar en viktminskning betydligt större än de impregnerade och effekten av svampangrepp hos de värmebehandlade bitarna kan inte bortses ifrån. Jämfört med obehandlade prover ger värmebehandlingen dock en klar förbättring i motståndskraft. Viktminskningen efter att varit utsatta för svampen i tolv veckor var 9,53% respektive 17,8% för värmebehandlad banksianatall och tulpanträd, för obehandlade prover var viktminskningen 65,0% och 68,5%. För impregnerat trä var de minsta viktminskningarna 0,78% och 1,42% [35].

Både radiatall och gran som värmebehandlats visar en stor förbättring i motståndskraften mot blånadssvampar, inga värmebehandlade prover från de två träslagen visade någon förekomst av blånadssvamp efter att varit utsatta för svampen i tre månader. På obehandlade prover som blivit utsatta för svampen under samma tid hade svampen spridit sig. För mögelsvamparna var förändringarna olika för radiatall och gran. För radiatall visade de värmebehandlade proverna större förekomst av mögel på ytan än de obehandlade efter tre månader. För gran var mängden mögel på ytan mindre på de värmebehandlade proverna än de obehandlade [6].

Det förbättrade motståndet mot svampangrepp kan bero på flera olika förändringar i trä vid värmebehandling. Hakkou m fl har listat de i litteraturen vanligaste förklaringarna och resonerat kring dessa [18]:

- Stor nedbrytning av hemicellulosan som är en av de viktigaste näringskällorna för virkesangripande svampar.
- Kemiska förändringar av polymererna i trä som försvårar för de enzymer som är inblandade i nedbrytningen vid svampangrepp.
- Den minskade vattenabsorptionen gynnar inte tillväxten för svampar.
- Bildandet av extraktivämnen under värmebehandlingen som fungerar som bekämpningsmedel mot svamp.

Det träslag som undersökts är bok (*Fagus sylvatica*) som värmebehandlats i kvävgasatmosfär vid tio olika temperaturer från 20°C till 280°C och blivit utsatt för vitrotsvampen *Coriolus versicolor*.

Mätningar av viktminskning på grund av nedbrytning orsakad av svampen visar att nedbrytningen börjar avta märkbart hos prover behandlade i 180°C för att sedan fortsätta sjunka med höjd behandlingstemperatur upp till 280°C, då ingen viktminskning på grund av nedbrytning alls sker (280°C är dock en betydligt högre temperatur än maxtemperaturen vid de flesta industrialiserade behandlingarna).

Kemiska förändringar av polymerer och minskat hemicellulosainnehåll

Den viktminskning som sker i trä till följd av kemiska förändringar under värmebehandling, uppkommer främst på grund av kemisk nedbrytning av hemicellulosa. Jämför man de kemiska förändringar som sker i trä och dess ökade

motståndskraft mot svampangrepp som funktion av behandlingstemperatur, ser man att de börjar öka vid ungefär samma temperatur, strax innan 200°C. Hemicellulosa är en av de viktigaste näringskällorna för virkesförstörande svampar så man kan alltså dra slutsatsen att det minskade innehållet av hemicellulosa är en bidragande faktor till värmebehandlat virkes ökade motståndskraft mot svampangrepp.

Coriolus versicolor kan förutom hemicellulosa även bryta ned lignin och polysackarida komponenter i trä. Lignin är den av huvudkomponenterna i trä som genomgår förändringar vid högst temperatur. Effekten av svampangrepp minskar med höjd behandlingstemperatur ända upp till 280°C då behandlat virke inte längre är mottagligt för svampangrepp. Det tyder på att det inte enbart är det minskade hemicellulosainnehållet som påverkar motståndskraften mot svampangrepp då de förändringarna sker till största del vid lägre behandlingstemperaturer. Det gör det troligt att även förändring av lignin polymerer gör trä mer motståndskraftigt mot svampangrepp, svampens enzymer känner inte igen de förändrade ligninnätverk som uppkommit under värmebehandling och klarar därför inte av att bryta ned dem [18].

Minskad vattenabsorption

Förändringen av virkets vattenabsorption sker övervägande vid behandlingstemperaturer från 130°C till 160°C och de största ökningarna av virkets motståndsförmåga mot svampangrepp sker vid temperaturer från 180°C och uppåt. Trots att fuktupptaget minskar, fortsätter alltså angreppen av svamp och den minskade vattenabsorptionen är alltså inte en betydande faktor för den ökade motståndskraften mot svampangrepp vid värmebehandling [18].

Giftiga extraktivämnena

Som nämns i avsnitt 3.3 frigörs en del av de extraktivämnena som finns i virke vid värmebehandling. Det mesta av dessa försvinner ur virket i behandlingsprocessen, men en del ämnen blir kvar i virket vilket skulle kunna bidra till den ökade motståndskraften mot svampangrepp.

Bildandet av extraktivämnena börjar vid ca 160°C och tar fart ordentligt vid ca 200°C. Vid jämförelse mellan värmebehandlade prov, där extraktivämnena blivit bort extraherade och där de är kvar, finns skillnader för prover behandlade vid lägre temperaturer. Dessa visar på en skyddande effekt hos extraktivämnena som bildats vid värmebehandling. Skillnaden är dock väldigt liten och för prover både där extraktivämnena extraherats och inte, sker en betydande minskning av svampens påverkan på virket vid ca 180°C och försätter sedan att sjunka med höjd behandlingstemperatur. Det gör det svårt att dra slutsatser kring extraktivämnenas inverkan [18].

Även i andra undersökningar är extraktivämnens påverkan på den ökade motståndskraften mot svampangrepp oklar. Värmebehandlad tall (*Pinus sylvestris*), gran (*Picea abies*) och poppel (*Populus alba*) som utsatts för brunröts-svamparna *Gloeophyllum trabeum* och *Poria placenta* och vitrötsvampen *Irpex lacteus* efter att extraktivämnena extraherats med vatten, aceton eller kloroform ($CHCl_3$) visar på blandade resultat då prover jämförs med prover där ingen extrahering genomförts. Skillnaderna är inte så stora och något mönster är svårt att se. För vissa av träslagen och svamparna är viktnedgången större för

dem prover där extraktivämnena extraherats och för andra inte. För poppel är vikminskningen större för prover som inte extraherats för samtliga svamparter [22].

Bildandet av extraktivämnen har alltså inte någon betydande del i den ökade motståndskraften hos värmebehandlat trä.

Behandlingstemperaturen påverkar hur mycket motståndet mot svampangrepp ökar vid värmebehandling. En stor förändring sker då trä behandlats i temperaturer över 200°C. Spån av tall når upp till beständighetsklass 2 enligt EN 113 efter behandling vid 220°C om behandlingstiden är tillräcklig och klass 1 vid behandling i 240°C. Behandling vid lägre temperaturer ökade motståndet mot svampangrepp betydligt mindre trots att de givit upphov till lika stor viktnedgång under värmebehandlingen [27].

3.6.3 Sammanfattning av resultat – svampangrepp

Hakkuo m fl kommer fram till slutsatsen att det är kemiska förändringar och inte giftiga extraktivämnena eller minskad vattenabsorption som är de främsta anledningarna till värmebehandlat virkes förbättrade egenskaper att stå emot svampangrepp. Det är en intressant slutsats, då man annars enkelt förklarar den ökade motståndskraften mot svampangrepp med den minskade vattenabsorptionen, eftersom fukt generellt står för dem största problemen, när det kommer till användning av trä i utomhusmiljö.

Värmebehandling har en positiv effekt på virkes motståndskraft mot svampangrepp men något fullständigt skydd ger den inte. Rötsvampar kan trots värmebehandling bryta ned trä och värmebehandling kan inte jämföras med tryck impregnering i motståndskraft mot virkes förstörande organismer. Att värmebehandlat virke inte kan ersätta impregnerat trä i alla användningsområden betyder dock inte att den ökade motståndskraften mot svampangrepp är en obetydlig förändring av egenskaper vid värmebehandling.

För en del produkter är det förbättrade skyddet mot virkes förstörande organismer inte tillräckligt, t ex så är det inte rekommenderbart att använda värmebehandlat virke i applikationer med markkontakt.

Beständigheten påverkas också av ytbehandlingar vilket inte tagits upp i den här delen av arbetet, för värmebehandlat trä i utomhusbruk rekommenderas dock någon form av ytbehandling. Ytbehandling tas upp i del 3.9 *Ytbehandling och limning*.

3.6.4 Skador orsakade av insekter

Insekter angriper trä i olika omfattning, framför allt insektslarver gräver sig genom virke och kan orsaka omfattande skador. Skadorna kan vara rent estetiska eller innebära allvarliga försämringar av mekaniska egenskaper beroende på art. Olika insekter angriper trä i olika skeden, några arter angriper nyfällda träd eller virke som ligger för torkning och andra torrt virke i färdiga produkter.

3.6.5 Insekter och värmebehandlat virke

Valnöt (*Juglans regia*) och fågelbär (*Prunus avium*) visar efter värmebehandling inte någon förbättrad motståndskraft mot larver av skalbaggen *Trichoferus*



Figur 3.5: Husbock *Hylotrupes bajulus* och byggnadsvirke som angrips av husbock. Figurer från Ehnström och Axelsson [13]

holosericeus. För båda träslagen var antalet ingångs hål större på värmebehandlade bitar än på obehandlade, trots att de blivit utsatta för samma antal larver. Inledande tester med valnöt och insekten *Lyctus brunneus* visade inte heller på någon tydlig förbättring av motståndskraften. [8]

Termiter är inte något stort problem i Sverige, men på många andra håll i världen är problemen omfattande. Vid undersökning visade den amerikanska termitarten *Reticulitermes flavipes* inte några tecken på att attackera värmebehandlat virke i mindre omfattning än obehandlat. För banksianatall (*Pinus banksiana*), tulpanträd (*Liriodendron tulipifera*) och asp (*Populus tremuloides*) var skillnaden i angrepp mellan behandlade och obehandlade prover obetydlig. Det enda träslaget i undersökningen där som visade någon skillnad i termitangrepp mellan värmebehandlade och obehandlade bitar var tall (*Pinus sylvestris*), den värmebehandlade tallen var märkbart mer utsatt för termiternas attacker än den obehandlade. Förmodligen beroende på att något ämne i den obehandlade tallen som verkar avstötande på termiter brutits ned under värmebehandlingen [23].

I *Thermowood Handbook* [2] nämns undersökningar där Thermowood visat sig vara mindre attraktivt för insekter än normalt virke, vilket skulle kunna bero på den minskade terpenavgivningen hos värmebehandlat trä. Tester visar också att värmebehandling inte hindrar termiter från att attackera virke.

3.6.6 Sammanfattning av resultat – insektsangrepp

Motståndskraft mot insektsangrepp är ett intressant område, eftersom flera av de förändringar som sker i trä vid värmebehandling, ger det behandlade virket fördelar mot obehandlat när det gäller utomhusbruk, d v s när risken för insektsangrepp är som störst. De resultat, som presenteras i artiklar som använts i det här examensarbetet, tyder på att värmebehandlat virke inte är mer motståndskraftigt än virke som inte värmebehandlats. Insektsangrepp är dock ett brett område där arter av insekter och vilka förutsättningar som gör virke

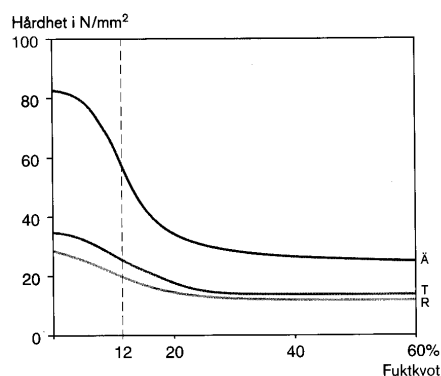
attraktivt för dem varierar kraftigt över olika delar av världen. Under arbetet med det här examensarbetet, har väldigt lite information om ämnet hittats i litteratur om värmebehandlat trä, och det kan alltså ses som ett ämne där mer forskning skulle vara intressant. Framför allt undersökningar kring de i Sverige vanliga virkesförstörande insekter.

I *Thermowood Handbook* konstateras också att mer forskning inom området behövs [2].

3.7 Mekaniska egenskaper

De mekaniska egenskaperna för trä skiljer sig mellan olika träslag, men också variation i virke från olika enskilda exemplar förekommer. Trä är inte ett homogent material och egenskaperna kan skilja sig i olika riktningar för samma stycke. Olika mekaniska egenskaper påverkas av fel som kvistförekomst och reaktionsved.

Fuktkvoten i virke har stor inverkan på de flesta av de mekaniska egenskaperna. Under fibermättnadspunkten ökar egenskaper som böjhållfasthet, Elasticitetsmodul och hårdhet med minskad fuktkvot, se figur 3.6.



Figur 3.6: Hårdheten beroende av fuktkvot för olika snittytor. Å= ändyta, T= tangentiellt, R= radiellt. Figurer från Dahlgren m fl [10]

Värmebehandling av trä leder till flera förändringar av virkes mekaniska egenskaper. Virket blir sprödare vilket både påverkar användningsområden och faktorer vid bearbetning. De flesta förändringar av de mekaniska egenskaperna för trä vid värmebehandling är inte positiva förändringar. De är dock viktiga att ta upp eftersom de utgör en begränsning av användningsområden, och inte tas upp på samma sätt som förbättringar i marknadsföring av värmebehandlat trä.

Hur värmebehandlat trä skiljer sig från obehandlat när det kommer till bearbetning, är ett viktigt område eftersom det är lätt att tro att samma metoder som används vid bearbetning av obehandlade träslag, utan vidare kan användas vid bearbetning av värmebehandlat virke av samma träslag.

Nedan förklaras kort de materialtekniska termer som används i delen om värmebehandlat virkes mekaniska egenskaper, inom parenteser står de enheter som används för de olika termerna:

- *Hårdhet* (Brinell eller Janka), definieras som motståndet hos ett träslag mot intryckning av föremål på dess yta.
- *Seghet/Slaghållfasthet* (kJ/m^2), är ett mått på det minsta arbete som krävs för att i ett slag åstadkomma brott.
- *Brottgräns* (MPa), är den spänning i ett material då brott uppstår.
- *Elasticitetsmodul* (MPa), är ett materials förmåga att töjas elastiskt när det utsätts för spänningar, virkets styvhet.
- *Böjhållfasthet* (MPa), är ett mått på hur stor belastning virket tål vid böjning.
- *Skjuvhållfasthet* (MPa), är ett mått på motståndskraften mot spänningar som uppstår vid skjuvning.
- *Skjuvbrottgräns* (MPa), är den spänning i ett material då brott vid skjuvning uppstår.

Förändringar av de mekaniska egenskaperna vid värmebehandling är kopplade till samma faktorer som viktminskningen och förändringar av mekaniska egenskaper redovisas ofta som funktion av viktminskningen i procent precis som andra egenskaps förändringar. Precis som att olika träslag har olika egenskaper innan värmebehandling påverkas träslag olika av behandling i höga temperaturer. Undersökning av effekten av värmebehandling på fem olika kanadensiska träslag visar att förändringen av elasticitetsmodulen varierar mellan en sänkning på 28% och en ökning på 30%. Även för träslagen var för sig märks skillnader beroende på faktorer i behandlingen [36]. Några generella förändringar för de flesta träslag finns dock. Virkets seghet och brottgräns sjunker och sänkningen av brottgräns är som regel högre än sänkningen av elasticitetsmodulen [37].

3.7.1 Böjhållfasthet och elasticitetsmodul

Olika parametrar av behandlingen påverkar hur stora förändringarna av de mekaniska egenskaperna blir. Precis som för de flesta egenskapsförändringar vid värmebehandling är det behandlingstemperatur och behandlingstid som påverkar virket i störst omfattning. Försök med sikta gran (*Picea sitchensis*) och gran (*Picea abies*) visar att böjhållfasthet och elasticitetsmodul ökar initielt vid lägre temperaturer av behandlingen för att sedan sjunka märkbart [25]. För gran ökar böjhållfastheten vid behandling i upp till 100°C för att sedan sjunka med 44–50% när behandlingstemperaturen ökas från 100°C till 200°C [4]. Liknande siffror för förändring av böjhållfastheten fås för björk, efter tre timmars behandling i 200°C med Thermowood metoden var minskningen av böjhållfastheten för felfri björk 43% [21]. Också för medelhavstall (*Pinus pinaster*) och eukalyptus (*Eucalyptus globulus*) visar undersökningar att böjhållfastheten sjunker då effekterna av behandlingen (viktminskning) ökar. Elasticitetsmodulen för eukalyptus visar ett liknande mönster, den ökar vid viktminskningar upp till 4% för att sedan plana ut och sjunka kraftigt för viktminskningar på ca 8% och högre [17].

3.7.2 Brottgräns

Brottgränsen för gran påverkas på liknande sätt som böjhållfastheten och elasticitetsmodulen. För små viktminskningar kan värmebehandlade prover visa en högre brottgräns än obehandlade när de utsätts för en konstant relativ luftfuktighet, förmodligen beroende på att fuktkvoten förändras mindre hos värmebehandlade prover [7]. Vid behandlingar med större påverkan på virket, vilket innefattar de flesta av de idag industrialiserade behandlingarna, sjunker dock brottgränsen kraftigt. Framför allt vid behandlingar med temperaturer över 200°C förändras brottgränsen i jämförelse med obehandlat virke, vilket stämmer väl överens med andra förändringar som sker i trä vid värmebehandling. För kanadensisk björk är sänkningen cirka 35% vid behandlingar över 200°C. Lägre uppvärmningshastighet och fuktinnehåll i behandlingsmiljön påverkar också brottgränsen negativt medans behandlingstidens inverkan är liten [31].

3.7.3 Hårdhet, skjuvhållfasthet och skruvurdragningskraft

Forskning visar en mindre ökning av hårdheten hos kanadensisk björk som genomgått värmebehandling, ökningen är störst vid behandlingstemperaturer över 200°C men följer inte ett lika jämnt mönster som förändringar i andra mekaniska egenskaper [31]. Hos värmebehandlad valnöt och fågelbär syns en tydlig ökning av hårdheten för båda träslagen. [8]

Vid slagtest förekom skjuvbrott i en stor del av proverna av björk behandlad med Thermowood metoden. Även om det inte är skjuvhållfastheten som testats kan man från resultatet dra slutsatsen att ökad temperatur eller behandlingstid leder till försämrade skjuvhållfasthet längs med fibrerna [21].

Motståndet mot skruvutdragningskraft börjar som flera andra av de mekaniska egenskaperna hos virke minska efter att behandlingstemperaturen nått över 200°C [31].

3.7.4 Färgförändring som mätmetod

Bekhta och Niemz finner ett samband mellan den totala färgförändringen och minskningen av böjhållfasthet hos gran, och tar upp möjligheten att använda färgförändringar av värmebehandlat trä som ett sätt att förutspå försämringar av mekaniska egenskaper [4]. Det är dock svårt att se användbarheten av en sådan metod vid industrialiserad värmebehandling av trä i stora volymer. Vid standardiserad värmebehandling bör förändringar av de mekaniska egenskaperna vara kartlagda med experiment och sedan vara förutsägbara för bestämda behandlingar av olika träslag. Också Johansson och Morén tar upp möjligheten att använda färgförändring som en metod att förutspå förändringar av styrka hos virke under värmebehandling. Deras resultat visar att färgförändringar inte är lämpligt att använda som indikator av styrkeförändringar och att modeller som baseras på processparametrar ger bättre resultat [21].

3.7.5 Sammanfattning av resultat

Värmebehandling leder i stort till en försämring av virkes mekaniska egenskaper. För många användningsområden är de mekaniska egenskaperna för värmebehandlat virke tillräckliga, men det är inte rekommenderat att använda

värmebehandlat virke i bärande konstruktioner. De olika egenskaperna påverkas på olika sätt och i varierande omfattning av behandling, men som generellt slutresultat kan man säga att virket blir hårdare och sprödare. Förändringen mot hårdare och sprödare virke medför inte bara att virket inte passar till vissa användningsområden utan ställer också nya krav vid bearbetning och montering av produkter.

3.8 Färgförändringar

Att virkes färg kan förändras genom att behandla det i höga temperaturer är välkänt och möjligheten att göra ljusa träslag mörkare har stor potential vid förädling av nordiska träslag. Vid värmebehandling förändras virkes färg till mörkare och virket blir helt genomfärgat vilket är en positiv egenskap för många användningsområden. För att färgförändringarna ska bli användbara krävs det att färgförändringarna går att styra så att samma färg kan produceras om och om igen. För att färgförändringen ska gå att använda som försäljningsargument för värmebehandlat virke är kunskap om dess beständighet också viktigt. Hur den nya färgen påverkas av faktorer i virkets användningsmiljö och om färgen kan skyddas med ytbehandling är exempel på sådan information.

3.8.1 Teknisk beskrivning av färgförändringar

För att beskriva färger används ofta CIELAB systemet, se figur 3.7, som bestämts av Commission Internationale de l'Éclairage. I systemet beskrivs en färg av koordinaterna L^* , a^* och b^* i ett tredimensionellt koordinatsystem. L^* axeln beskriver ljushet (0=svart och 100=vit), a^* axeln går från röd (+) till grön (-) och b^* axeln går från gul (+) till blå (-). Genom att mäta färgen hos en provbit före och efter en behandling kan man räkna ut hur stor förändringen för de olika parametrarna och den totala färgförändringen blivit under värmebehandlingen enligt följande formler:

$$\Delta L^* = L_v^* - L_r^*$$

$$\Delta a^* = a_v^* - a_r^*$$

$$\Delta b^* = b_v^* - b_r^*$$

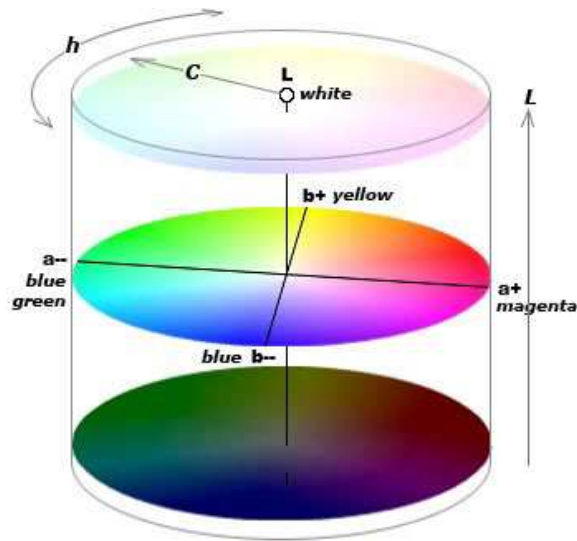
Där variabler med index v är värdet för respektive parameter efter värmebehandling och variabler med index r är parametervärdet för motsvarande obehandlade referensprov.

Där förändringen anges i procent har Δ värdet delats med värdet för referensprovet enligt:

$$\Delta L^*(\%) = 100 * (L_v^* - L_r^*)/L_r^*$$

$$\Delta a^*(\%) = 100 * (a_v^* - a_r^*)/a_r^*$$

$$\Delta b^*(\%) = 100 * (b_v^* - b_r^*)/b_r^*$$



Figur 3.7: CIELAB systemet. Figur från <http://www.cielab.com.au/whatiscielab.php>

3.8.2 Färgförändringar av trä under värmebehandling

Som för många av egenskapsförändringarna vid värmebehandling är behandlingstemperaturen den faktor som påverkar slutresultatet främst. Mellan bitar av gran behandlade i 100°C och obehandlade är färgförändringen liten i jämförelse med färgförändringen som sker om behandlingstemperaturen ökas till 150°C eller 200°C. Den totala färgförändringen går från knappt 5% vid behandlingstemperatur på 100°C till nästan 20% vid 150°C och 55% vid 200°C. Tester visar också att de största färgförändringarna sker under de första timmarna av behandling. [4]

Ett samband mellan färgförändring och viktminskning vid värmebehandling är tydligt. Det stämmer väl med att behandlingstemperaturen har en avgörande inverkan på färgförändringen. Behandlingstiden har självklart också en inverkan på hur stor färgförändringen blir. För medelhavstall (*Pinus pinaster*) blir ljushetsförändringen ΔL^* -19,2% respektive -29,9% då virket behandlats i 190°C i 2 och 12 timmar (siffrorna gäller den axiella snittytan, skillnaderna är dock av samma storleksordning för de radiella och tangentiella snittyterna). När behandlingstemperaturen ökas till 200°C blir ljushetsförändringen för samma behandlingstider -20,3% och -34,1% och -34,6% och -40,8% för 210°C. Då provbitar behandlats i 6 timmar blir förändringen -28,1%, -30,7% och -39,5% för de tre olika temperaturer som använts. Det stämmer med de tidigare uppgifterna att det är under de första timmarna av behandling de största förändringarna i färg sker [16]. Man kan också dra slutsatsen att det är behandlingstemperaturen som sätter gränsen för hur stora förändringarna kan bli, och att inverkan av behandlingstiden består i hurvida behandlingen pågått i tillräckligt lång tid för att färgförändringen ska ha nått dess maximum.

Förändringen av L^* parametern följer samma mönster för gran (*Picea abies*),



Figur 3.8: Färgförändring av gran behandlad med ThermoWood metoden, från vänster till höger: obehandlad, Thermo-S och Thermo-D. Figur från ThermoWood Brochure www.thermowood.fi

medelhavstall och eukalyptus (*Eucalyptus globulus*). Värdet på L^* parametern sjunker, d v s träet blir mörkare med ökad behandlingstemperatur.

För de andra parametrarna i CIELAB systemet är något klart mönster i förändringarna inte lika klart. För gran och medelhavstall ökar a^* parametern i värde med ökad behandlingstemperatur medan förändringen för eukalyptus är negativ. För b^* parametern är förändringen för värmebehandlad eukalyptus tydligt negativ med större minskningar ju högre behandlingstemperatur som används. Medelhavstallen visar en inledande ökning av värdet på b^* parametern för sedan gå över till en negativ förändring när effekten av värmebehandlingen ökar. Också b^* parametern hos värmebehandlad gran ökar vid behandling i lägre temperaturer för att sedan sjunka till samma nivå som dess ursprungsvärde då en behandlingstemperatur på 200°C används. [16] [4]

CIELAB systemet ger en vetenskaplig möjlighet att mäta färgförändringar, parametrarna kan dock vara svåra att relatera till verkligheten. Vissa träslag kan också vara svåra att mäta då det finns en naturlig variation av färgen i vår- och sommarved, mätresultaten kommer alltså bero på hur snittet ser ut och fördelningen av vår- och sommarved. Det nämns t ex i ovan nämnda undersökningar att proverna för medelhavstall visar på skillnader i mätresultat för olika bitar. [16]

Årsringar och andra mönster i trä är ju något av det som gör det till ett attraktivt material i många tillämpningar och få grossister marknadsför virke med CIELAB parametrar. Färgförändringar beror också på olika faktorer av värmebehandlingen t ex vilket medium som används. De skiljer sig självklart från träslag till träslag. För exakta färgbeskrivningar kommer alltså bara tillverkaren att kunna svara. Själva färgförändringarna är alltså inte av samma



Figur 3.9: Färgförändring av björk behandlad med ThermoWood metoden, från vänster till höger: obehandlad, Thermo-S och Thermo-D. Figur från ThermoWood Brochure www.thermowood.fi

intresse som t ex färgbeständigheten i ett arbete som det här.

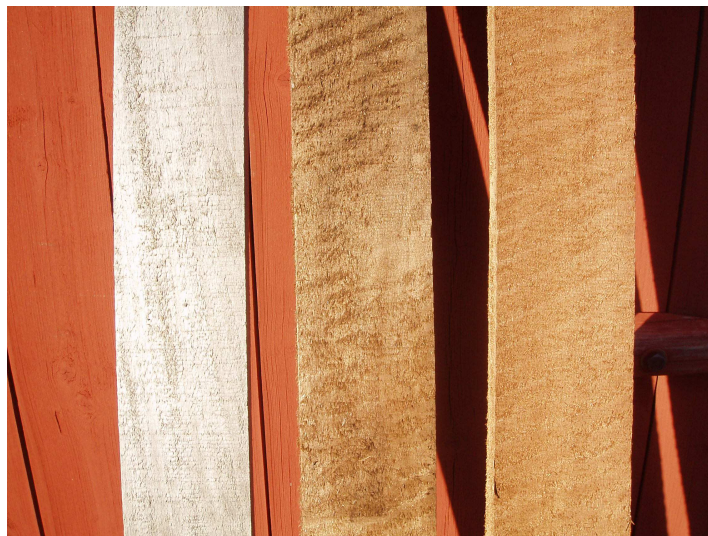
3.8.3 Färgbeständighet

Färgen hos obehandlat trä påverkas av faktorer i miljön där det används. Framför allt i utomhusmiljö påverkas färgen, och skyddande ytbehandling blir nödvändig om färgen inte ska förändras. I många fall ses färgförändringen inte som ett problem. För värmebehandlat virke, där färgen är ett av de starkaste försäljnings argumenten är det självklart viktigt att färgbeständigheten är väl kartlagd och att information om hur färgen kan bevaras finns tillgänglig.

UV-strålning har stor inverkan på färgen hos virke. Undersökningar där värmebehandlade och obehandlade prover utsätts för UV-strålning visar att färgen hos värmebehandlat trä påverkas mindre och långsammare än de obehandlade proverna för lövträslagen ask (*Fraxinus sp.*), bok (*Fagus sylvatica*) och poppel (*Populus sp.*) samt barrträden gran och medelhavstall. [3] [11]

För gran visar värmebehandlade prover också upp bättre färgbeständighet än virke impregnerat med kopparethanolamine. Efter 500 h UV-strålning var den totala färgförändringen för gran enbart 33% av den för obehandlat trä (det kopparethanolamineimpregnerade virket hamnar mellan obehandlat och värmebehandlat i färgstabilitet) [11].

Testerna visar också att de största färgförändringarna mot en mörkare färg sker under de första 100 h av UV-strålning. [11]



Figur 3.10: Värmebehandlat virke utsatt för solljus till vänster, värmebehandlat virke som skyddats från solljus till höger. Foto: Susanne Johansson

3.8.4 Sammanfattning av resultat

Färgförändringen av virke som värmebehandlats är förmodligen en av de viktigaste förändringarna, då det kommer till att konkurrera med vanligt virke, framför allt då de flesta inhemska träslag i Sverige har ljust virke. Värmebehandling gör att färgförändringen sker i hela det behandlade virket som alltså blir genomfärgat vilket är en klar fördel för många användningsområden.

Enligt flera undersökningar inte bara virkes färg utan ökar också dess färgstabilitet vid värmebehandling, färgen förändras dock märkbart om obehandlat virke används utomhus. Att värmebehandlat virke påverkas av UV-strålning på liknande sätt, men kanske i mindre omfattning, som obehandlat trä råder det inte något tvivel om. Om värmebehandlat trä ska användas utomhus, och man inte vill att färgen ska förändras, krävs det att virket behandlas så att det skyddas från UV-strålning. Även i *Thermowood handbook* nämns att en skyddande behandling behövs, om virket kommer att utsättas för direkt solljus.

Det är så klart inte helt korrekt att utan vidare kategorisera den mörkare färgen som en positiv egenskap då vilken färg som föredras på produkter av trä skiljer sig mellan olika individer. När färgförändringar nämns som något positivt i det här arbetet syftas det så klart på de tillfällen då en mörkare färg ses som något positivt. Om värmebehandlat virke väljs för andra egenskaper än den förändrade färgen och mörkt trä inte är önskvärt kan virket som en del av ytbehandlingen målas och på så sätt få en helt annan färg.

3.9 Ytbehandling och limning

Värmebehandling påverkar virkets egenskaper för några typer av ytbehandling och limning. Framst är det den minskade vattenabsorptionen som gör att an-



Figur 3.11: Färgförändring på ytan för värmebehandlat virke utsatt för solljus. Där virket ristats syns den ursprungliga färgen efter värmebehandlingen. Foto: Susanne Johansson

vändandet av vissa färger och lim kan ge sämre resultat.

3.9.1 Limning

Lim är en viktig del av trä- och möbelindustrin och en mängd olika limtyper finns på marknaden. Vilket lim som används i en produkt väljs efter krav på olika egenskaper för limmet, t ex bindningskraft, färg och beständighet. Miljön som den färdiga produkten ska användas i är viktig att ta hänsyn till vid limning, eftersom beständigheten mot fukt och höga temperaturer varierar kraftigt för olika typer av lim. Ett lim som ger mycket gott resultat inomhus kan alltså fungera dåligt i utomhusmiljö. I tabell 3.5 återges de vanligaste limtyperna indelade efter beständighet.

När två trätytor limmas mot varandra hålls de två ytorna ihop av både mekaniska och kemiska bindningar. Olika limtyper är tillverkade av olika ämnen och förutsättningarna för att en limning ska bli lyckad skiljer sig mellan olika typer av lim. Några limtyper kräver att limfogarna får härda under tryck eller värme för att resultatet ska bli lyckat andra, limtyper smälts innan limningen och härda då det svalnar. Det finns också limtyper som är beroende av fukt i virket för att härda och ibland sprutas vattenånga över träytorna som ska limmas för att få limfogarna att härda snabbare. Precis hur härdeningen av en limfog sker beror på limtyp och material som limmas, Raknes nämner två reaktioner som måste ske för att en limfog ska skapas [33]:

1. Limmet måste binda sig till vart och ett av de två virkesstyckena. D v s det måste uppkomma elektriska attraktionskrafter mellan molekylerna i limmet och molekylerna i arbetsstyckena.
2. Lims substansen, som fyller mellanrummet mellan virkesstyckena måste härda. D v s limmet måste omvandlas till ett fast ämne som är starkt nog att hålla virkesstyckena samman och dessutom motstå de yttre påkänningar

som förbandet blir utsatt för. Sammanhållningen sker genom primära eller sekundära bindningar mellan limmolekylerna.

Beständighet	Limtyp
1. Väderbeständiga lim	Fenollim Resorcinollim Vissa epoxilim
2. Lim med god väderbeständighet	Melaminlim Polyuretanlim Härdande PVAc-lim Epoxilim
3. Fuktbeständiga lim	Karbamidlim (urea) "Vattenfasta" kaseinlim
4. Lim för bostadsrum	Kaseinlim PVAc-lim Kontaktlim Smältlim

Tabell 3.5: De vanligaste limtyperna indelade efter beständighet i grupper enligt Raknes [33]

3.9.2 Limning av värmebehandlat virke

En jämförelse mellan resultaten för obehandlat och värmebehandlat trä vid limning med resorcinollim och polyuretanlim visar på blandade resultat. För träslagen tall (*Pinus sylvestris*), amerikansk asp (*Populus tremuloides*), tulpanträd (*Liriodendron tulipifera*) och banksianatall (*Pinus banksiana*) har skjuvhållfastheten för limfogar med de två limtyperna testats. Sektioner av laminerade balkar utsattes vakuum-tryck-genomblötning- (vacuum-pressure-soaking) och torkningscykler för att se hur beständigheten för limfogarna påverkades.

För alla träslagen och båda typerna av lim minskade skjuvhållfastheten. Störst var skillnaden för amerikansk asp i båda fallen, medan tall och banksianatall uppvisade väldigt små sänkningar av skjuvhållfastheten när resorcinollim användes. Vid 75-98% av skjuvhållfasthetstesten var det virket som gick sönder och inte limfogen som släppte. Den minskade skjuvhållfastheten beror alltså snarare på förändringar i träet än på försämrade limegenskaper. För banksianatall som limmats med resorcinollim och amerikansk asp som limmats med polyuretanlim ökar andelen test, där det är i virket och inte i limfogen som brotten uppstått. För de andra testen ligger andelen brott i själva virket på samma nivå (över 90%) för både obehandlat och värmebehandlat trä.

För vakuum-tryck-genomblötning/torkning testerna skiljer sig resultaten en del mellan de olika träslagen. I stort kan man se att tall och banksianatall klarar testet bättre än de andra två träslagen oavsett limtyp eller värmebehandling. För tall och banksianatall klarar de värmebehandlade proverna testet sämre än de obehandlade. För amerikansk asp och tulpanträd är det svårare att se något generellt samband mellan värmebehandling och limfogens förmåga att klara av testerna, med undantaget för amerikansk asp som limmats med resorcinollim där värmebehandlingen medförde en klar försämring i limfogens hållbarhet.

Mellan de två limtyperna är det svårt att se någon generell skillnad i resultat, för tall ger resorcinollim ett bättre resultat men för de andra träslagen finns det inget tydligt mönster för de värmebehandlade proverna. [30]

Också andra undersökningar pekar på en försämring av resultaten för olika lim vid limning av värmebehandlat trä. En viktig aspekt av området är dock hur stora försämringarna är och hur stor inverkan de har på olika användningsområden. Melaminlim och polyuretanlim som testats på värmebehandlad gran visar på en försämring i skjuvhållfasthet från 6,28 till 4,86 MPa och 6,25 till 5,51 MPa jämfört med obehandlade prover för de två träslagen då de testas under torra förhållanden. För båda träslagen är andelen brott i virket 100% för både obehandlade och värmebehandlade prover.

När samma test utförs på prover som kokats i vatten i 6 timmar visar alla limfogar, obehandlade som värmebehandlade, lägre skjuvhållfasthet oavsett limtyp. För melaminlimet är skjuvhållfastheten 3,12 respektive 1,32 MPa för obehandlat och behandlat virke. För polyuretanlim är skjuvhållfastheten i limfogen mellan värmebehandlade bitar starkare än den mellan obehandlade bitar efter kokning. Skillnaden är dock liten, 3,82 respektive 3,21 MPa. [34]

Försämringen i skjuvhållfasthet i limfogar vid limning av värmebehandlat virke i jämförelse med limning av obehandlat är större för resorcinollim än för melaminlim och polyuretanlim. Det gäller både då proverna genomgått kokning och inte. I tabell 3.6 redovisas skjuvhållfastheten för limfogar av melaminlim, polyuretanlim och resorcinollim för obehandlad och värmebehandlad gran.

Limtyp	Melaminlim	Polyuretanlim	Resorcinollim
Behandling och test	Skjuvhållfasthet (MPa)		
Obehandlad	6,28	6,25	5,78
Obehandlad, kokad	3,12	3,21	3,39
Behandlad	4,36	5,51	2,18
Behandlad, kokad	1,32	3,82	0,69

Tabell 3.6: Skjuvhållfasthet för olika limfogar. Siffror från Sernek m fl [34]

Limning av valnöt (*Juglans regia*) med PVAc-lim visar också på tydliga försämring av skjuvhållfastheten för limfogar. Försämringen är dock inte så stor att skjuvhållfastheten når minimum värden enligt EN 204 (klass D3). [8]

3.9.3 Sammanfattning av resultat – limning

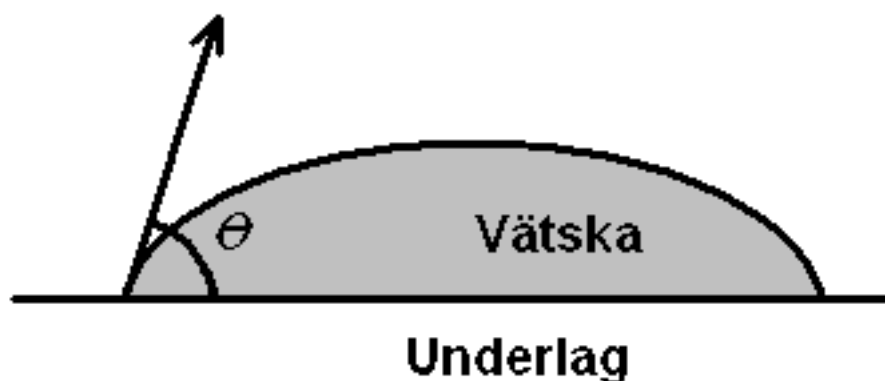
I flera av de undersökningar som ingår i detta arbete beskrivs en klar försämring av skjuvhållfastheten för limfogar för värmebehandlat virke i jämförelse med limfogar hos obehandlat. Resultaten för limning av värmebehandlat virke med resorcinollim visar på klara försämringar. Då resorcinollim är ett vanligt lim för utomhus bruk är detta något att vara uppmärksam på, då värmebehandlat virkes lämplighet för utomhus bruk ofta framhålls som en stor fördel. Hur stora försämringarna är varierar kraftigt och för flera limtyper är andelen skjuvbrott i virket (dvs inte i limfogen) av samma storlek som för obehandlat virke. För många användningsområden av värmebehandlat virke kan samma limtyper som för obehandlat virke användas med tillräcklig styrka i limfogar som resultat.

Forskning tyder också på att lösningar där limning ger utmärkt resultat går att hitta, så länge man inte utgår ifrån att samma metoder som vid limning av obehandlat virke ska gå att använda utan vidare. T ex kräver den minskade vattenabsorptionen att längre presstider används för vissa limtyper. Utveckling av nya limtyper och vidare utveckling av gamla sker hela tiden och lim utvecklats speciellt för värmebehandlat virke är inte någon omöjlighet.

3.9.4 Ytbehandling och betsning

Olika typer av behandlingar används för att skydda träprodukter och för att göra dem mer estetiskt tilltalande. För att ändra färg på virke används metoder där färg placeras på träytan, som färg och anilinbetsar (vattenlösliga), och kembetsar som tränger in i träet och förändrar färgen på kemisk väg [10]. Mer genomskinliga ytbehandlingar, t ex lackning och oljebehandling används också för att skydda och förändra virkets utseende. Kunskap om användbarheten av olika behandlingar på värmebehandlat trä är viktig för att det behandlade virket ska bli användbart kommersiellt. Färgförändringen av trä efter värmebehandling måste skyddas mot UV-strålning med ytbehandlingar, framför allt vid utomhusbruk, om den ska bevaras. Värmebehandling ses ofta som ett miljövänligare alternativ till t ex impregnering vilket gör miljövänliga ytbehandlingsmetoder intressanta. Dock är många miljövänliga ytbehandlingar vattenbaserade vilket kan göra dem svåra att använda på värmebehandlat trä.

Kontaktvinkeln θ mellan en vätska och ett material, se figur 3.12, är ett mått på hur väl vätskan väter materialet. Ju mindre kontaktvinkel ju bättre väter vätskan materialet.

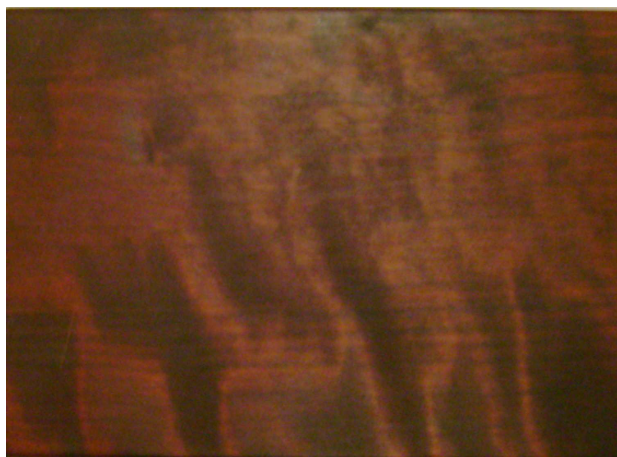


Figur 3.12: Kontaktvinkel θ för en vätskedroppe

3.9.5 Ytbehandling och betsning av värmebehandlat virke

För tall (*Pinus sylvestris*) som värmebehandlats i olja i 220° är kontaktvinkeln för vatten betydligt större än för obehandlat trä men också större än för DMDHEU-behandlat virke (en annan metod för att öka dimensionsstabiliteten

och nedbrytningsmotståndet). Test med färg och betset visar dock på omvända resultat, kontaktvinkeln är minst för värmebehandlat trä och störst för det obehandlade virket och det DMDHEU-behandlade mellan de två andra. Det kan finnas flera orsaker till att det värmebehandlade virket visar upp mindre kontakt vinklar än de andra proven och författarna konstaterar att mer forskning behövs på området. Men de betseter och de färger som ingick i undersökningen var vattenbaserade akryl betseter eller färg (...medium build acrylic waterborne stain/paint) så resultaten indikerar att det finns miljövänliga behandlingar som fungerar med värmebehandlat trä. [29]



Figur 3.13: Värmebehandlad björk behandlad med olja Foto: Rasmus Söborg

3.9.6 Sammanfattning av resultat – ytbehandling och betsning

De förändrade egenskaperna för värmebehandlat virke kan leda till problem vid användandet av vissa ytbehandlingar. Området ytbehandling och betsning är också ett där mer oberoende forskning än den som hittats under arbetet med det här examensarbetet skulle vara intressant. Problemen med ytbehandlingar verkar dock vara som störst om man utan förbehåll använder sig av samma produkter som för obehandlat virke. Flera typer av behandlingar fungerar utan tvekan bra på både värmebehandlat och obehandlat virke, och precis som för lim så pågår utvecklingen av gamla och nya ytbehandlingar hela tiden. När det gäller vilka ytbehandlingar som lämpar sig för värmebehandlat virke är information från tillverkare av både virke och ytbehandlingar viktigt för att ett bra resultat ska uppnås. Finska ThermoWood Association har sammanställt *ThermoWood Manual on Surface Treatment* just av den anledningen.

3.10 Övrigt

Litteratur studien har delats in i de områden som anses viktigast av de förändringar som sker i virke vid behandling i höga temperaturer. Några egenskaper

och aspekter som inte fått någon egen del i rapporten men som ändå kan vara intressanta tas upp i den här delen. Informationen kring olika aspekter av värmebehandlat virke i den här delen av arbetet är mindre än i den övriga litteraturstudien och kommer i flera fall enbart från en enstaka källa men kan ändå vara värda att nämna. Energi åtgång och kostnader för värmebehandlat virke är såklart ett ämne som det skulle gå att skriva betydligt mer om, det har dock inte varit fokus för det här arbetet och nämns därför bara i korthet.

3.10.1 Värmebehandling för andra produkter än massivt virke

Värmebehandling leder till permanenta förändringar av polymererna som bygger upp trä och ger trä dess egenskaper. Hittills i det här arbetet, har de förändringar av egenskaper som sker, främst beskrivits med utgångspunkten att det värmebehandlade materialet ska användas som helt virke och ersätta massivträ i produkter, där de nya egenskaperna medför en förbättring. Trä används också som material i en mängd olika produkter där egenskaperna hos trä tas tillvara på andra sätt. T ex i olika typer av skivmaterial, där allt från stora fanerblad till små spån används för att skapa skivor med bra egenskaper utan många av de problem och begränsningar som kommer med användandet av massivträ. De förändringar som skett på molekylnivå under värmebehandling kan självklart vara användbara i produkter där trä används som råmaterial. I många produkter används trä, som i massiv form räknas som låg kvalitet eller rester från annan produktion. Möjligheten att ytterligare förädla spill från träindustri och annat virke, som inte har någon marknad som massivträ, ökar alltså.

Spån för tillverkning av OSB-skivor påverkas självklart på samma sätt som annat trä när det värmebehandlas. Flera positiva effekter syns sedan också i den färdiga skivan, t ex minskad vattenabsorption och svällning vid fuktförändringar i omgivningen. Bindningsförmågan mellan spånen ökar, vilket öppnar för tillverkning av skivor med mindre bindemedel, utan att göra egenskaperna sämre. Också vid tillverkning av andra typer av skivor är det troligt att värmebehandlat material kan användas för att förbättra slutproduktens egenskaper [28].

Under arbetet har en stor mängd artiklar och publicerat material gått igenom, men endast ett fåtal artiklar kring användandet av värmebehandling för annat än förädling av massivträ har hittats. Självklart kan artiklar ha missats och många av de genomgångna artiklarna tar enbart upp förändringarna i trä under värmebehandlingen, utan att ta hänsyn till vilken form det behandlade virket är i. Området är dock intressant och mer forskning och tillämpningar lär komma.

3.10.2 Energiåtgång och kostnader för värmebehandlat virke

Olika metoder för uppvärmning används vid de olika metoderna för värmebehandling och självklart kan olika energikällor användas för samma metod. Hur mycket energi som går åt för värmebehandling varierar, faktorer som metod, behandlingstemperatur och behandlingstid påverkar självklart. Också träslag och

fuktkvoten i virket som ska behandlas påverkar energiåtgången. Både färskt och torkat virke kan värmebehandlas med flera av de befintliga behandlingarna. I *Thermowood handbook* uppges att energiåtgången vid behandling med Thermowoodmetoden bara är 25% högre än för normal torkning av virke. [2]

Vid värmebehandling finns också möjligheten att ta till vara spillvärmen som bildas vid värmebehandlingen. Det är självklart en process vars möjlighet varierar med värmebehandlingsmetod och andra förutsättningar på lokal nivå. Som exempel kan nämnas företaget Scandinavian Finewood som använder sig av Thermowoodmetoden. I deras anläggning används överskottsvärmen till att värma upp fabrikslokalerna. [1]

Kostnaderna för värmebehandlat virke är starkt beroende av de allmänna priserna på virke. Under tiden det här arbetet skrevs (våren 2008) angav Scandinavian Finewood att de tog 7000–7500 kr/ m^3 beroende på dimension för björk behandlad med Thermowoodmetoden. Vid värmebehandling med Thermowoodmetoden ställs höga kvalitetskrav på virket som ska behandlas. Det bidrar självklart till att göra slutpriset högre. [1]

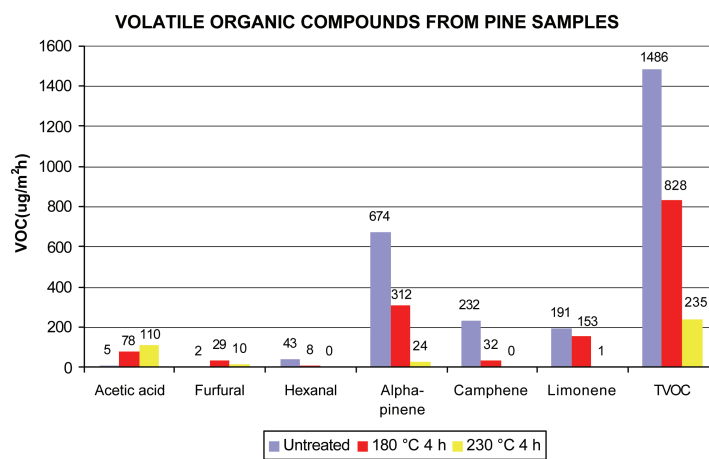
3.10.3 Brandsäkerhet

Värmebehandlat virke passar bra till flera områden inom byggbranschen, både inom och utomhus. Det leder till frågor kring värmebehandlat virkes brandegenskaper. De undersökningar kring ämnet som hittats under arbetet med det här examensarbetet är publicerade i *Thermowood Handbook*. Resultaten visar bland annat på en kortare antändningstid för värmebehandlat virke i jämförelse med obehandlat men att värmebehandlat virke inte skiljer sig avsevärt ifrån obehandlat när det gäller brandsäkerhet. Testerna har dock bara utförts i mindre omfattning och grundliggare undersökningar skulle vara intressant.

Inledande tester med brandhämmande medel (fire retardants) visar på goda resultat när de används på värmebehandlat virke [2].

3.10.4 Lukt och emissioner

Värmebehandlat virke avger vissa flyktiga ämnen. För de flesta av ämnena var nivåerna som avges från värmebehandlat virke lägre än de för obehandlat virke, se figur 3.14. Virke behandlat med Thermowoodmetoden har ofta en rökaktig lukt vilket förmodligen kommer ifrån avgivningen av furfural. Rökluften försvinner dock med tiden eller när ytbehandling används [2].



Figur 3.14: Emissioner för värmebehandlat och obehandlat virke. Figur från *Thermowood Handbook* [2]

Kapitel 4

Resultat

Det finns många orsaker att välja värmebehandlat virke, användningsområden där de förändrade egenskaperna passar. Det finns också många områden där värmebehandlat virke är sämre än obehandlat virke och olämpligt. Att veta vilka begränsningar trä, som behandlats i höga temperaturer har, gäller inte bara de områden där egenskaperna blivit sämre i jämförelse med obehandlat virke utan också de områden där förbättringar skett. Värmebehandling leder t ex till en ökad motståndskraft mot biologisk nedbrytning hos virke, vilket gör det lämpligt för utomhusbruk. Värmebehandlat virke är dock inte helt opåverkat av svampangrepp. Där motstånd mot nedbrytning av virket har hög prioritet, kommer värmebehandling förmodligen inte kunna konkurrera med t ex impregnering med metallsalter.

Behandling av virke i höga temperaturer sänker jämviktsfuktkvoten och detta medför en klar förbättring av egenskaperna. Det öppnar för nya användningsområden och tillämpningar. Det är inte den sänkta jämviktsfuktkvoten i sig som medför förbättrade egenskaper, men dess inverkan på andra egenskaper t ex dimensionsstabiliteten. Även fast många positiva förändringar av virke vid värmebehandling inte enbart är en följd av den lägre vattenabsorptionen, så är den utan tvekan en stor fördel.

4.1 Fördelar för möbel- och inredningsprodukter

Flera av de förbättringar av egenskaper för värmebehandlat virke som tas upp i det här arbetet, och i annan information, är förändringar som blir tydligast vid utomhusbruk. Flera förbättringar är dock tydliga inomhus även om de är större i utomhusmiljö. Den förbättrade dimensionsstabiliteten kan användas för att minska vissa av de problem som följer då luftfuktigheten förändras inomhus. Flera av de problemen är inte så stora, men dock märkbara, t ex lådor som passar bra under vissa årstider men har dålig passform under andra delar av året.

De estetiska fördelarna för värmebehandlat virke är förmodligen de fördelar som är tydligast vid användning i möbler och inredningsdetaljer. Färgförändringen som sker vid värmebehandling sker inte bara på ytan utan virket blir genomfärgat. Detta är en klar fördel i många avseenden. Att som tidigare nämnts kunna ersätta mörka exotiska träslag med svenska har också flera fördelar.

Vilka trender som är aktuella och vad som är populärt när det gäller färg på virke i möbler och inredning varierar över tiden. Någon analys av läget på design marknaden är därför svår och det vore också att gå utanför de ramar som satts för det här arbetet och mitt kunskapsområde. Att värmebehandlat virke, främst pågrund av sin färg, har en stor potential i möbler och inredningsdetaljer som t ex luckor och skivor är det dock inte någon tvekan om.

Den försämring av de mekaniska egenskaperna som gör att värmebehandlat virke inte lämpar sig för bärande konstruktioner, är inte så stora att de borde utgöra något problem vid mycket av användningen av trä i möbler. Självklart är det något som bör ta med i konstruktionarbetet med varje specifik möbelmodell, men i de flesta fall borde det inte vara något problem.

Bastu och badrum kan ses som ett specialfall av inomhusmiljö då skillnaderna i fuktnivåer som möbler och inredning utsätts för är väldigt stora. I badrum väljer man ofta andra material än trä. Den minskade jämviktsfuktkvoten för värmebehandlat virke gör så klart att det passar i fler tillämpningar i våta miljöer än obehandlat virke. Värmebehandlat virke är dock inte opåverkat av förändringar i luftfuktigheten, så en hel del av problemen finns kvar om än i mindre omfattning.

I bastuinredning används trä ofta, bland annat på grund av dess låga värmeledningsförmåga, som gör det skönt att sitta på även i en varm bastu. Av den anledningen, tillsammans med den minskade jämviktsfuktkvoten, passar värmebehandlat virke för bastuinredning. Det ska också nämnas att det är ett område som nämns i material publicerat av Thermowood Association som lämpligt för virke behandlat med Thermowoodprocessen.

4.2 Fördelar för bygg och utomhustillämpningar

Flera av de egenskaper som framhålls som positiva för värmebehandlat virke märks tydligare vid användning utomhus än inomhus. Fuktförändringarna är större utomhus, då vi så långt som möjligt försöker ha ett likadant klimat inomhus året om, medan klimatet utomhus varierar med årstiderna. Påfrestningarna på virke är också större utomhus med de förändringar i vädret som sker hela tiden. Nederbörd och solljus hör till faktorer som påverkar virket hållbarhet och utseende. Risken för angrepp av virkes förstörande organismer är större utomhus även fast t ex många insekter också angriper även produkter i trä inomhus.

Intresset för trä som byggmaterial ökar. Användning av träprodukter är kostnadseffektivt och ofta bra ur miljö- och energisynpunkt. Värmebehandlat virke lämpar sig inte för bärande konstruktioner. Men i många andra tillämpningar av trä i byggnader kan de förbättrade egenskaperna för värmebehandlat virke vara en fördel. Som exempel kan nämnas panel för husfasader.

För många andra typer av utomhus användning passar värmebehandlat virke bra. I möbler för utomhusbruk och som virke för altaner och liknande konstruktioner är den sänkta jämviktsfuktkvoten och den ökade dimensionsstabiliteten tydliga förbättringar. Den ökade motståndskraften mot nedbrytning ska inte heller underskattas som fördel. Även om den inte går att jämföra med den hos tryckimpregnerat virke så utgör det en klar förbättring och en användbar fördel.

Beständigheten påverkas såklart av eventuella ytbehandlingar som används för att skydda virket. Det totala motståndet mot nedbrytning beror då såklart på vilken typ av behandling som används och hur det underhålls fortlöpande. Ytbehandling rekommenderas för flera utomhusanvändningar av värmebehandlat virke, det ökade nedbrytningsmotståndet som följer av behandlingen utgör då såklart en bra grund för att virket ska tåla miljön så länge som möjligt.

4.3 Miljö

Värmebehandling är en process som går att göra väldigt miljövänlig. Vid Thermowoodprocessen används inga kemikalier och det behandlade virket kan återvinnas på samma sätt som vanligt trä. Om även miljövänliga alternativ används för limning och ytbehandling blir miljöbelastningen för användningen av värmebehandlat virke väldigt liten. När det gäller vilka metoder för limning och ytbehandling som används, spelar självklart information från tillverkarna en stor roll för vad som väljs. Som exempel på medvetet miljöarbete kan nämnas företaget Scandinavian Finewood som startat upp värmebehandling i Sverige under slutet av 2007. Scandinavian Finewood samarbetar med det tyska företaget Biopin, som tillverkar produkter för ytbehandling, för att hitta väl fungerande ytbehandlingslösningar som är miljövänliga. Även möjligheten att ersätta utländska mörka träslag med värmebehandlat virke har miljöfördelar. Transportsträckorna minskar och skogsavverkning i utvecklingsländer sker ofta under tveksamma förhållanden i fråga om etik och miljöhänsyn, vilket är ytterligare ett skäl att välja virke från Sverige.

Kring miljövänlighet och återvinning har inte så mycket material hittats under arbetet, det mesta som finns kommer från *Thermowood Handbook* som ges ut av tillverkarna av virke behandlat med Thermowoodprocessen. Enligt den så kan förbrukat Thermowood virke tas tillvara och återanvändas på samma sätt som vanligt trä, alltså beroende på vad det använts till och vilka behandlingar i form av limning och ytbehandlingar som använts [2]. Mer information kring återvinning av olika former skulle vara intressant.

4.4 Bearbetning och behandling av värmebehandlat virke

Bearbetning av värmebehandlat virke har inte tagits upp i någon större omfattning i det här arbetet. En del nya aspekter är viktiga att tänka på vid bearbetning. Viktigt blir då korrekt information i alla led, så att det värmebehandlade virket inte blandas ihop med obehandlat virke, när det gäller bearbetningsmetoder.

Alla limtyper och ytbehandlingar har inte samma effekt på värmebehandlat virke som på obehandlat. Hur virkets egenskaper för limning och ytbehandlingar påverkas av behandling i höga temperaturer varierar självklart med lim- och behandlingstyp, flera ger tillfredställande resultat och andra inte.

Väl fungerade metoder för limning och ytbehandling är viktigt om värme-

behandlat virke ska bli användbart i möbellindustrin och för inredningsdetaljer. Forskning visar på att det är fullt möjligt att hitta lösningar som ger gott resultat vid limning och ytbehandling av värmebehandlat virke. Som redan nämnts är metoder för limning och ytbehandling ett område som hela tiden utvecklas så något problem för användandet av värmebehandlat virke bör det inte utgöra. Precis som för bearbetning är det viktigt att man inte utgår från att samma metoder som för vanligt virke ska gå att använda utan vidare.

Viktigt när det gäller fungerande metoder för limning och ytbehandling blir att bra information når ut till användarna, vare sig det är företag som tillverkar produkter i värmebehandlat virke eller privat personer. Information från tillverkarna av virket blir förmodligen avgörande. Som tidigare nämns har t ex *ThermoWood Manual on Surface Treatment* sammanställts av The Finnish Thermowood Association av den anledningen, det är dock viktigt att den informationen följer med virket ut till försäljare och användare. Också information från tillverkarna av de lim och ytbehandlingar som används, kan vara till stor hjälp när värmebehandlat virke ska användas. Framför allt om/efter värmebehandlat virke blivit en självklar del av virkesmarknaden, borde intresset att ta fram nya lösningar anpassade för värmebehandlat virke finnas.

Kapitel 5

Diskussion

5.1 Reflektioner kring arbetet med examensarbetet och dess innehåll

Ett av målen med arbetet har som sagt varit att utgå ifrån oberoende forskning kring värmebehandlat virke och att inte använda sig av material publicerat av tillverkarna. Värmebehandling är en komplicerad process som utförs med olika metoder och där enskilda processparametrar har stor inverkan på slutresultatet. Det har det inneburit att exakta siffror över förändrade egenskaper som inte bara är aktuella för den specifika undersökningen har varit svårt att ange. De metoder för värmebehandling som använts i de undersökningar som studerats för det här arbetet, har självklart liknade effekter på virke vilket gör att generella slutsatser kan dras. I flera av de undersökningar som studerats har mindre metoder på laboratorie nivå använts för behandling i stället för någon av de större mer industriellt tillämpbara metoderna. Att ange exakta siffror för en metod som enbart gäller för den och under exakta förhållanden har därför undvikits utom i exempel syfte. Exakta siffror över förändringar kommer främst tillverkarna själva stå för, även fast den informationen inte kan ses som oberoende finns det i de flesta fall ingen anledning att misstro den. För att värmebehandlat virke ska bli en del av marknaden är information från tillverkarna avgörande. Att basera arbetet på information redan publicerad i t ex *Thermowood Handbook* har inte bara undvikits på grund av att det inte kan ses som oberoende information, men också eftersom det redan blivit publicerat i samlad och tillgänglig form.

Kring olika delar av de förändringar värmebehandlat virke visar i jämförelse med obehandlat virke skiljer sig mängden forskning som hittats under arbetet med det här examensarbetet. För vissa egenskaper har mängden information som hittats varit så liten att det har nämnts i respektive del, det gäller t ex värmebehandlat virkes motståndskraft mot insektsangrepp. Andra egenskapsförändringar har studerats grundligt i flera undersökningar och enbart ett urval av aktuella artiklar har använts.

Ett område där mängden publicerade forskningsresultat är betydligt större än vad det getts utrymme i det här arbetet är de kemiska förändringar som sker i virke vid värmebehandling. Ett uppenbart skäl till att de kemiska förändringarna enbart beskrivs i ett kort kapitel är såklart att jag som skrivit är

maskiningenjör och mycket av den publicerade forskningen kring ämnet kräver större kemikunskaper än jag besitter för att en större sammanställning ska vara intressant. Den begränsningen gäller dock inte enbart mig, större delen av de personer som är intresserade av värmebehandlat virke för egen användning eller för försäljning i olika former har inte heller någon längre kemiutbildning bakom sig och är förmodligen mer intresserade av hur virket påverkas i användning än de bakom liggande kemiska förändringarna. Det gäller dock också flera av de andra förändringarna, som tidigare nämnts är t ex det förändrade fukt utbytet med omgivningen något som de flesta slutanvändare finner betydligt mindre intressant än ökat motstånd mot nedbrytning. Att skriva ett tekniskt examensarbete kring förändringarna i virke vid behandling i höga temperaturer utan att ta upp minskningen av jämvikts fuktkvoten skulle dock vara löjligt och ett examensarbete vid en teknisk högskola bör ju också skilja sig avsevärt ifrån material riktat direkt till slutkonsumenter av produkten. Frågan blir då på vilken nivå det här examensarbetet ligger och vilka det riktar sig till. Ett självklart svar är så klart Susanne Johansson och Johan Palm vid Träcentrum som var de som först kom med iden om ett arbete som sammanfattade egenskaperna hos värmebehandlat virke. Men de har varit delaktiga under hela arbetet så förhoppningsvis har eventuella frågetecken från deras sida klarats ut efter hand som rapporten vuxit fram. Utöver dem är det förhoppningen att arbetet går tillräckligt djupt tekniskt för att vara intressant både om man vill veta mer och bilda sig en allmän uppfattning av behandling i höga temperaturers påverkan på virke. Men också tillräckligt begripligt för att vara användbart om man inte vill sätta sig in i den på många sätt krångliga och tekniska terminologin som används i de flesta av de artiklar som använts som faktagrund för arbetet.

Att tolka vetenskapliga artiklar skrivna på fackspråk och förklara innebörden av dessa har varit ett av de större momenten i arbetet. Även med en civilingenjörsutbildning just genomgången har det varit långt ifrån lätt att urskilja och ta till sig relevant fakta. Det är dock förmodligen den bit av arbetet som jag lärt mig mest av, tillsammans med att hitta aktuella artiklar i olika databaser.

5.2 Reflektioner över resultat

Att de förändringar som sker i virke vid behandling i höga temperaturer är positiva för flera användningsområden är det ingen tvekan om. Inom flera områden är förbättringarna så märkbara att värmebehandlat virke ur produktperspektiv bör kunna konkurrera med andra typer av virkesbehandlingar och även andra material. Att värmebehandlat virke kan produceras med väldigt miljövänliga metoder ökar självklart ytterligare konkurrensfördelen gentemot flera andra material.

Mycket tyder på att det som inledande skulle göra värmebehandlat populärt på marknaden är den mörka färg som uppnås vid behandling i höga temperaturer och inte de förbättrade egenskaperna. Värmebehandling utgör dock en bra möjlighet för förädling av svenskt virke. Även om avancerade tillämpningar där den fulla potentialen tas tillvara, först blir vanliga efter att värmebehandlat virke har letat sig in på marknaden i produkter, där de estetiska värdena är dominerande.

Som nämns i delen *Reflektioner kring arbetet* har omfattningen av den genomgånna forskningen med en mängd olika metoder för värmebehandling gjort det svårt att ange exakta siffror över förändringar. Av samma orsak har det undvikits att ge detaljerade råd i hur man använder sig av värmebehandlat virke på bästa sätt. Området bearbetning har som tidigare nämnts mer eller mindre helt utelämnats. Egenskaper vid limning och ytbehandling tas däremot upp, några direkta rekommendationer om hur man ska gå tillväga för att uppnå bästa resultat nämns dock inte. Att försöka reda ut bästa tillvägagångssätt i detalj för olika typer av användning baserat på artiklar utan egna försök ger förmodligen inte något vidare resultat för ett ämne som träbearbetning. Fokus har därför lagts på att redogöra för de allmänna egenskaper och begränsningar som bör iaktas vid användning av värmebehandlat virke. För t ex virke producerat med Thermowoodmetoden finns också detaljerad information kring bearbetning och behandling publicerad av tillverkarna. Att återge sådan information i det här arbetet känns inte aktuellt eller nödvändigt.

Det väcker så klart frågan om resultatet av arbetet överhuvudtaget är användbart eller bara stapling av redan kända fakta på varandra? Förhoppningsvis innehåller arbetet en del korrekt information kring sånt som bara är allmänt antaget kring värmebehandlat virke. Att sambandet mellan flera av de förbättrade egenskaperna och de förändringar som sker i virke vid behandling i höga temperaturer är mer komplex och inte enbart beror på den minskade jämviktshumiditeten är exempel på information som enkelt missas då det är fuktväxlingar i omgivningen som i vanliga fall leder till de flesta problem vid användning av trä som material.

Värmebehandling som förädlingsmetod av virke är inte någon nyhet men trots det utgör det inte någon stor eller vanlig del av virkesmarknaden i Sverige. I Finland där träslag och miljö är tämligen lika de svenska är värmebehandlat virke betydligt vanligare. En anledning är såklart att Thermowoodprocessen är finsk och att den tekniken utvecklats där. Det räcker inte som förklaring men att hitta en sådan är ju inte heller målet i det här arbetet. Något som man kan konstatera är dock att riktig information lär vara avgörande, både då det gäller begränsningar för att t ex undvika övertro på den förbättrade motståndskraften mot nedbrytning och när det kommer till bearbetning av det behandlade virket. Värmebehandlat virke är inte bara användbart i produkter på den svenska marknaden utan utgör ju också en bra metod för förädling av svenskt timmer. Oberoende information verkar det helt enkelt inte som om man kan få för mycket av i dagsläget.

Det finns det som tyder på att värmebehandlat virke till sist ändå är på väg att etablera sig på den svenska marknaden, om än i liten skala till att börja med. Flera företag, t ex Scandinavian Finewood, har under den senaste tiden startat upp eller ska starta produktion av värmebehandlat virke i Sverige vilket bör påverka tillgänglighet och påverkan på marknaden.

CEN har också börjat på att jobba med en Teknisk Specifikation av värmebehandlat virke. När det här arbetet skrivs har ingen slutgiltig version släppts. Att reda ut och standardisera olika värmebehandlingars inverkan på virke känns som en aktuell uppgift som kan göra det lättare att använda sig av virke behandlat i höga temperaturer.

Litteraturförteckning

- [1] Ulf Andersson. *Scandinavian Finewood*. Muntlig källa, www.sfw.se.
- [2] The Finnish Thermowood Association. *Thermowood Handbook*. The Finnish Thermowood Association, 2003.
- [3] N Ayadi, F Lejeune, F Charrier, B Charrier, and A Merlin. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(3):221–226, 2003.
- [4] P Bekhta and P Niemz. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holz-forschung*, 57(5):539–546, 2003.
- [5] M J Boonstra and B Tjeerdsma. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(3):204–211, 2006.
- [6] M J Boonstra, J van Acker, E Kegel, and M Stevens. Optimisation of a two-stage heat treatment process: durability aspects. *Wood Science and Technology*, 41(1):31–57, 2007.
- [7] M Borrega and P P Kärenlampi. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Online First, 2007.
- [8] M Brunetti, C Cremonini, A Crivellaro, E Feci, S Palanti, B Pizzo, and R Santoni, I Zanuttini. Thermal treatment of hardwood species from Italian plantations: preliminary studies on some effects on technological of wood. *International Scientific Conference on Hardwood Processing - Proceedings*, pages 325–333, 2007.
- [9] C E Byrne and D C Nagle. Carbonization of wood for advanced materials applications. *Carbon*, 35(2):259–266, 1997.
- [10] T Dahlgren, S Wistrand, and M Wiström. *Nordiska Träd och Träslag*. Stiftelsen Arkus, Åsögatan 122, 116 24 Stockholm, 2004.
- [11] M Deka, M Humar, G Rep, B Krijež, M Sentjurc, and M Petri. Effects of UV light irradiation on colour stability of thermally modified, copper ethanolamine treated and non-modified wood: EPR and DRIFT spectroscopic studies. *Wood Science and Technology*, 2007.

- [12] K Edvardsen and K M Sandland. Increased drying temperature its influence on the dimensional stability of wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 57(3):207–209, 1999.
- [13] B Ehnström and R Axelsson. *Insektsnag i bark och ved*. ArtDatabanken SLU, Box 7007, 750 07 Uppsala, 2002.
- [14] H Epmeier, R Kligler, and M Westin. *Egenskaper hos modifierat virke FoU-Väst Rapport 0403*. Sveriges Byggindustrier, Ekmansgatan 1, 411 32 Göteborg, 2004.
- [15] B Esping. *Trätorkning 1a*. Träteknik, 1992.
- [16] B Esteves, A V Marques, I Domingos, and H Pereira. Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*, 2007.
- [17] B Esteves, A V Marques, I Domingos, and H Pereira. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*, 41(3):193–207, 2007.
- [18] M Hakkou, M Pétrissans, P Gérardin, and A Zoulalian. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. *Polymer Degradation and Stability*, 91(2):393–397, 2006.
- [19] M Hakkou, M Pétrissans, A Zoulalian, and P Gérardin. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 89(1):1–5, 2005.
- [20] R B Hoadley. *Understanding wood : a craftsman's guide to wood technology*. The Taunton Press, 2000.
- [21] D Johansson and T Morén. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(2):104–110, 2006.
- [22] D P Kamdem, A Pizzi, and A Jermannaud. Durability of heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 60(1):1–6, 2002.
- [23] D Kocaefe, B Chaudhry, S Poncsak, M Bouazara, and A Pichette. Thermogravimetric study of high temperature treatment of aspen: effect of treatment parameters on weight loss and mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 42(3):854–866, 2007.
- [24] A Krause, C Hof, and H Militz. Novel wood modification processes for window and cladding products. *The international research group on wood preservation. Paper prepared for the 35th annual meeting Ljubljana, Slovenia 6-10 June 2004*, 2004.
- [25] Y Kubojima, T Okano, and M Ohta. Bending strength and toughness of heat-treated wood. *Journal of Wood Science*, 46(1):8–15, 2000.
- [26] S Metsä-Kortelainen, T Antikainen, and P Viitaniemi. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170°C, 190°C, 210°C and 230°C. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(3):192–197, 2006.

- [27] W Paul, M Ohlmeyer, and H Leithoff. Thermal modification of OSB-strands by a one-step heat pre-treatment Influence of temperature on weight loss, hygroscopicity and improved fungal resistance. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(1):57–63, 2007.
- [28] W Paul, M Ohlmeyer, H Leithoff, M J Boonstra, and A Pizzi. Optimising the properties of OSB by a one-step heat pre-treatment process. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64(3):227–234, 2006.
- [29] M Petri, B Kneht, A Krause, H Militz, M Pavli, M Petrissans, A Rapp, M Tomazi, C Welzbacher, and P Gerardin. Wettability of waterborne coatings on chemically and thermally modified pine wood. *Journal of Coatings Technology and Research*, 4(2):203–206, 2007.
- [30] S Poncsak, S Q Shi, D Kocaefe, and G Miller. Effect of thermal treatment of wood lumbers on their adhesive bond strength and durability. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21(8):745–754, 2007.
- [31] S Poncsák, D Kocaefe, M Bouazara, and A Pichette. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Science and Technology*, 40(8):647–663, 2006.
- [32] R Popper, P Niemz, and G Eberle. Investigations on the sorption and swelling properties of thermally treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63(2):135–148, 2005.
- [33] E Raknes. *Trälimning*. Trätekt, 1988.
- [34] M Sernek, M Boonstra, A Pizzi, A Despres, and P Gérardin. Bonding performance of heat treated wood with structural adhesives. *Holz als Roh- und Werkstoff*, Online First, 2007.
- [35] J L Shi, D Kocaefe, T Amburgey, and J Zhang. A comparative study on brown-rot fungus decay and subterranean termite resistance of thermally-modified and ACQ-C-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(5):353–358, 2007.
- [36] J L Shi, D Kocaefe, and J Zhang. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 65(4):255–259, 2007.
- [37] A J Stamm, H K Burr, and A A Kline. Staybwood–Heat-Stabilized Wood. *Ind Eg Chem*, 38(6):630–634, 1946.
- [38] B Sundqvist. *Värmebehandling av trä: från ett historiskt perspektiv till kommersiell produktion av idag*. Luleå Tekniska Universitet, 2003.
- [39] T Thomassen. *Trätorkningsteknik*. Lövträinstitutet i Ydre, 1998.
- [40] B F Tjeerdsma and H Militz. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 63(2):102–111, 2005.
- [41] E Viktorsson. *Värmebehandlat trä ur ett produktperspektiv*. Luleå Tekniska Universitet, 2007.

- [42] E Windeisen, C Strobel, and G Wegener. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. *Wood Science and Technology*, 41(6):523–536, 2007.