

«ThermoWood®» Handbuch

Vorwort

Dieses Handbuch wurde von den Mitgliedern des finnischen Verbands für Wärmebehandlung von Holz verfasst. Für neue Produkte und Prozesse ist die Bereitstellung von möglichst vielen Fachinformation notwendig, denn nur so kann der Bekanntheitsgrad vergrössert werden. Als Autoren hoffen wir mit diesem Handbuch eine gute Informationsquelle für Produzenten, weiterverarbeitende Industrieunternehmen, Handelsunternehmen und andere Interessenten bereit zu stellen.

Das Ziel dieses Handbuches ist es, ein Mischung aus theoretischen Grundlagen, Versuchsergebnissen aus Laboren und Feldversuchen und praktische Erfahrungen für den Umgang mit ThermoWood zu liefern. Diese Ergebnisse stammen zum grössten Teil von Forschungsinstituten und Hochschulen. Einzelne industrielle Erfahrungen sind zusätzlich mit aufgenommen. Die Angaben in diesem Handbuch dienen ausschliesslich als Informationsquelle. Änderungen der Angaben sind vorbehalten. Für die Richtigkeit und Vollständigkeit wird keine Gewährleistung übernommen.

Das Ziel des finnischen Verband für Wärmebehandlung von Holz ist, diese Handbuch regelmässig mit neuen Erkenntnissen zu aktualisieren.

Der Name «ThermoWood» ist ein registriertes Warenzeichen und darf nur von den Mitgliedern des finnischen Verband für Wärmebehandlung von Holz verwendet werden.

Wir hoffen, dass dieses Handbuch für Sie als Leser informativ und nützlich ist.

INHALTSVERZEICHNIS

KAPITEL 0.	Titelblatt.....	1 – 0
	Vorwort.....	2 – 0
	Inhaltsverzeichnis	3 – 0
KAPITEL 1.	Einleitung	1 – 1
1.1	Vorgeschichte.....	1 – 1
1.2	Technologischer Prozess «ThermoWood®» - Übersicht	1 – 1
1.3	Veränderungen der Holzstruktur und die chemischen Reaktionen .	3 – 1
1.4	Standardisierte Klassifikation der Bearbeitung von «ThermoWood®»	4 – 1
1.5	Verzeichnis der Normen	6 – 1
KAPITEL 2.	Rohstoff.....	1 – 2
2.1	Faktoren, welche die Qualität des wärmebehandelten Holzes beeinflussen	1 – 2
2.1.1	Allgemein	1 – 2
2.1.2	Holzarten.....	1 – 2
2.2	Qualität des Schnittholzes	1 – 2
2.2.1	Hauptsorten der nordlichen weichen Holzarten	1 – 2
2.2.2	Äste	1 – 2
2.2.3	Minimale Forderungen zum Rohstoff	2 – 2
2.2.4	Feuchtigkeit des Holzes	6 – 2
KAPITEL 3.	Die ThermoWood Technologie	1 – 3
3.1	Ausrüstung	1 – 3
3.2	Phasen der Wärmebehandlung.....	1 – 3
3.3	Energie	2 – 3
3.4	Umweltschutzmaßnahmen	2 – 3
KAPITEL 4.	Eigenschaften von «ThermoWood®»	1 – 4
4.1	Chemische Veränderungen.....	1 – 4
4.1.1	Allgemein	1 – 4
4.1.2	Kohlenwasserstoffe.....	2 – 4
4.1.3	Lignin.....	3 – 4
4.1.4	Extraktivstoffe.....	3 – 4
4.1.5	Toxizität.....	3 – 4
4.2	Physikalische Änderungen	4 – 4
4.2.1	Rohdichte	4 – 4
4.2.2	Festigkeit.....	4 – 4
4.2.3	Härte	8 – 4
4.2.4	Gleichgewichtsfeuchte	9 – 4
4.2.5	Schwellen und Verdichtung wegen der Feuchtigkeit	10 – 4
4.2.6	Durchlaßfähigkeit	11 – 4
4.2.7	Wärmeleitfähigkeit.....	11 – 4
4.2.8	Brandsicherheitsmaßnahmen	12 – 4
4.2.9	Biologische Dauerhaftigkeit.....	15 – 4
4.2.10	Widerstandsfähigkeit gegen die Insekten	16 – 4
4.2.11	Dauerhaftigkeit gegenüber Witterung	17 – 4
4.2.12	Farbe.....	20 – 4
4.2.13	Stoffemission.....	22 – 4

KAPITEL 5. Industrielle Bearbeitung von ThermoWood	1 – 5
5.1 Allgemein	1 – 5
5.2 Das sägen	1 – 5
5.3 Das hobeln	1 – 5
5.4 Fräsen	3 – 5
5.5 Schleifen.....	3 – 5
5.6 Verkleben und Verbinden	3 – 5
5.7 Industrielle Oberflächenbehandlung.....	5 – 5
5.8 Praktische Erfahrung der finnischen Holzbearbeitungsgesellschaft	6 – 5
5.9 Gesundheitsschutz und Arbeitssicherheit	7 – 5
KAPITEL 6. Anwendung von «ThermoWood®»	1 – 6
6.1 Arbeiten mit ThermoWood.....	1 – 6
6.2 Verbindungsmittel.....	1 – 6
6.3 Verkleben unter Werkstattbedingungen	2 – 6
6.4 Oberflächenbearbeitung	3 – 6
6.5 Anwendung von «ThermoWood®» für die Saunen	3 – 6
6.6 Wartung.....	3 – 6
6.7 Gesundheitsschutz und Arbeitssicherheit	3 – 6
KAPITEL 7. Bearbeitung und Lagerung von «ThermoWood®».....	1 – 7
7.1 Allgemein.....	1 – 7
7.2 Reste und Abfall	1 – 7
KAPITEL 8. Oft gestellte Fragen und die Antworten.....	1 – 8
BIBLIOGRAFIE	

1. Einleitung

1.1. Vorgeschichte

Bereits vor einigen hundert Jahren wussten die Menschen, dass man mit Feuer Holz dauerhafter machen konnte. Die Wikinger nutzten das Verfahren der Feuerbehandlung für Aussenkonstruktionen, wie beispielsweise bei Umzäunungen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen der Wärmebehandlung von Holz untersuchten Stamm und Hansen 1930 in Deutschland und White 1940 in USA. 1950 setzten Bavendam, Runkel und Buro die Forschung in Deutschland fort. Weitere Veröffentlichungen machten Kollmann und Schneider 1960 und Rusche and Burmester 1970. Die neuesten Forschungen wurden in Finnland, Frankreichs und Niederlande in 1990 durchgeführt. Die intensivsten und vielseitigsten Forschungen wurden von der Gesellschaft "VTT" in Finnland gemacht. Das Institut für Umweltschutztechnologien trug bedeutend zur Realisierung bei.

Aufgrund der Methodik vom "VTT" war die Technologie der Wärmebehandlung von Holzes («ThermoWood») geschaffen. Das Holz wird auf eine Temperatur über 180°C erwärmt und dabei mit Wasserdampf geschützt. Der Wasserdampf schützt das Holz und trägt weiterhin zur chemischen Veränderungen bei. Es entsteht nach der Wärmebehandlung ein umweltfreundliches Holz. Im Vergleich zum unbehandelten Holz ist die Farbe des Holzes dunkler, es verhält sich stabiler in Bezug auf die Veränderungen des Niveaus der Feuchtigkeit, und die Wärmeisolationseigenschaften sind wesentlich verbessert. Dank den hohen Temperaturen, wird auch die Widerstandsfähigkeit gegen Fäulnis verbessert. Andererseits sinkt bei der Behandlung die Biegefestigkeit des Holzes.

1.2. Technologischer Prozess «ThermoWood®» - Übersicht

Die Technologie zur industriellen Herstellung von wärmebehandeltem Holz wurde vom VTT zusammen mit den finnischen Holzbearbeitungsunternehmen entwickelt. Der finnische Verband besitzt die Lizenz für den technologischen Prozess der Wärmebehandlung.

Die Technologie der Wärmebehandlung von Holz kann in drei Hauptphasen aufteilen:

Phase 1. Die Erhöhung der Temperatur und das Trocknen bei der hohen Temperatur. Mittels Wärme und Dampf steigt die Temperatur in der Kammer schnell auf ungefähr 100°C. Danach wird die Temperatur weiter bis auf 130°C erhöht. Dabei wird fast bis zu einer Holzfeuchte von 0% getrocknet.

Phase 2. Wärmebehandlung.
Nach dem Hochtemperaturtrocknen wird die Temperatur innerhalb der Kammer bis zu 185°C - 215°C erhöht. Nach dem Erreichen des notwendigen Niveaus bleibt die Temperatur unverändert über die Dauer von 2 - 3 Stunden. Diese Behandlungszeit richtet sich nach dem Anwendungsgebiet des Erzeugnisses.

Phase 3. Abkühlung und Regulierung der Ausgleichsfeuchte.
An der letzten Phase wird die Temperatur mit Hilfe von Wasserzugabe gesenkt. Wenn die Temperatur von 80 - 90°C erreicht ist, wird das Holz wieder befeuchtet, um den Feuchtigkeitsgehalt auf einem akzeptablen Niveau von 4 - 7% zu bekommen.

ThermoWood® process

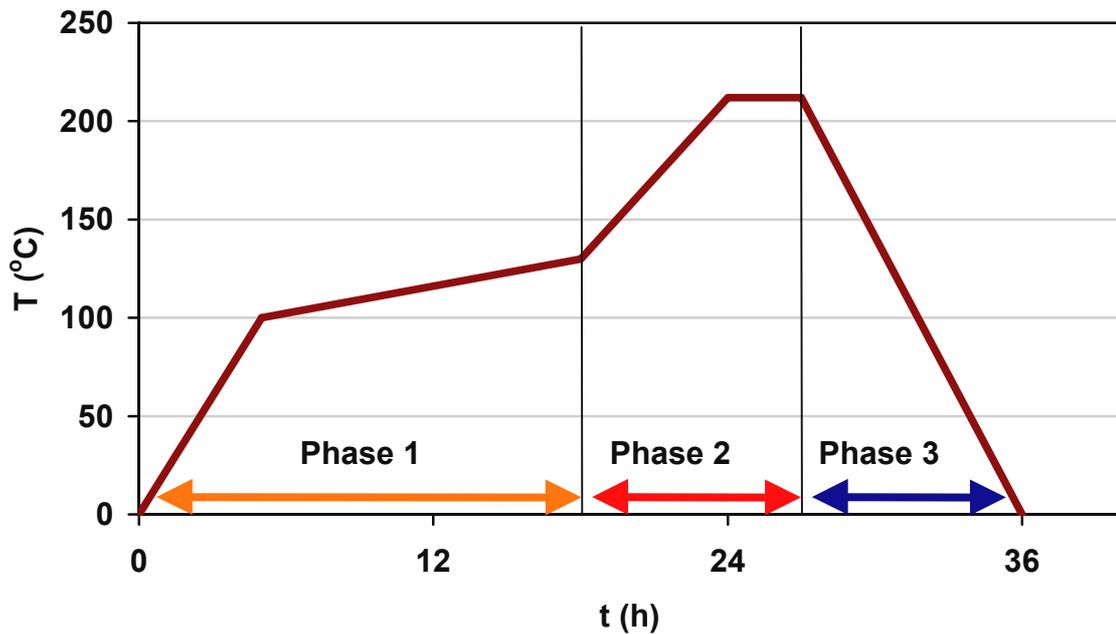


Abb. 1-1. Produktionsvorgangschema

Bei einer Erhöhung oder Senkung der Temperatur wird ein spezielles System der Regulierung verwendet, damit Oberflächenrisse und Innenrisse im Holz verhindert werden. Die Prozessparameter werden entsprechend der Holzart und dem Materialquerschnitt verändert. Als Rohware kann sowohl frisches wie vorgetrocknetes Holz verwendet werden. Wenn man mit frischem Holz beginnt, so wird es mit Hilfe der Schnellhochtemperaturbehandlung getrocknet. Diese Methodik passt sowohl für die weichen, als auch für die harten Holzarten.

Die weiteren Einzelheiten der Technologie der Wärmebehandlung sind im Kapitel 3 aufgeführt.

1.3. Veränderungen der Holzstruktur und die chemischen Reaktionen

Als Ergebnis der Wärmebehandlung ändert sich die Struktur des Holzes. Auf den Abbildungen 2-1 und 3-1 sind die Unterschiede in der Struktur einer gewöhnlichen unbehandelten Kiefer und einer Kiefer nach der Wärmebehandlung gezeigt.

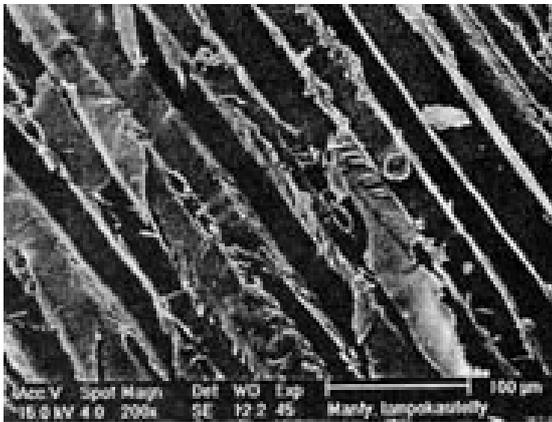


Abb. 2-1. Unbehandelte Kiefer

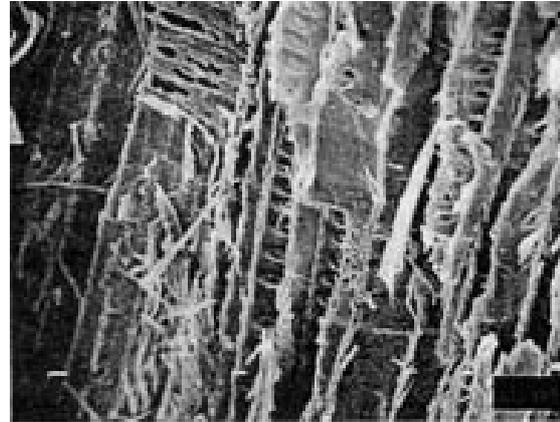


Abb. 3-1. Kiefer nach der Wärmebehandlung

Durch die Erwärmung des Holzes verändern sich eine Reihe seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften. Diese Veränderung beruht zum grössten Teil auf der thermischen Zerstörung der Hemizellulosen. Die erwünschten Veränderungen beginnen bereits ab einer Temperatur von 150°C und nehmen allmähliche bei steigender Temperatur zu. Als Ergebnis bleibt eine Verringerung des Quellverhaltens, die Dauerhaftigkeit wird verbessert, die Farbe wird dunkler, einige Inhaltsstoffe sind entwichen, das Holz wird leichter, es sinkt die Gleichgewichtsfeuchtigkeit, es sinkt der Säuregehalt "pH" und die Wärmeisolationseigenschaften verbessern sich. Doch die Festigkeit und die Härte des Holzes ändern sich auch.

1.4. Standardisierte Klassifikation der Bearbeitung von «ThermoWood®»

Da die Eigenschaften der weichen und harten Holzarten deutlich verschieden sind, haben sie ihre eigene Klassifikation. Es werden zwei Klassen der Wärmebehandlung unterschieden. Es ist unzweckmässig mehr als zwei Klassen zu haben, denn die Holzeigenschaften ändern sich bei steigender Temperatur nur langsam. Wenn die Behandlungstemperatur 200°C überschreitet, beginnen die Holzeigenschaften sich sehr schnell zu ändern. Bei einer Einteilung in mehr als zwei Klassen steigt die Gefahr, dass die veränderten Eigenschaften nicht eindeutig einer Klasse zugeordnet werden können.. Die Temperatur von 215°C erweist sich als Optimum, um hervorragende Eigenschaften zu erreichen.

Bei der Standardklasse der Wärmebehandlung von Holz sind das Quellen und Schwinden, die Farbveränderung und die Dauerhaftigkeit die Zieleigenschaften.

Bei Lieferungen an Industriekunden kann der Behandlungsprozess je nach dem späteren Verwendungszweck des wärmebehandelten Holzes optimiert werden. In diesem Fall wird das Material nicht mit dem standardisierten Schema einer Behandlungsklasse behandelt.

Die Standardklassen der Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung wird in die zwei Standardklassen Thermo-S und Thermo-D unterteilt.

Thermo-S

Der Buchstabe "S" steht für "Stabilität". Neben dem Aussehen ist die Stabilität eine Schlüsseleigenschaft für die Anwendung der entsprechenden Produktion nach dieser Behandlung. Der Mittelwert des tangentialen Quellen und Schwindens dieses Holzes beträgt 6 - 8%. Gemäss dem Standard EN 113 kann die Dauerhaftigkeit des behandelten Holzes dieser Behandlungsklasse der Klasse 3 (mässig dauerhaft) zugeordnet werden.

Empfohlenen Anwendung für Holz der Klasse Thermo-S- der Wärmebehandlung:

Thermo-S – weiche Holzarten	Thermo-S – harte Holzarten
<ul style="list-style-type: none">- Baukomponenten- Einrichtungen in trocknen Anwendungen	<ul style="list-style-type: none">- Einrichtungen- Verkleidungselemente
<ul style="list-style-type: none">- Möbel- Gartenmöbel- Möbel für Sauna- Komponenten für Türen und Fenster	<ul style="list-style-type: none">- Möbel- Fußbodenbeläge- Zubehör für Sauna- Gartenmöbel

Thermo-D

Der Buchstabe "D" steht für „durability (Beständigkeit)". Neben dem Aussehen ist die biologische Beständigkeit eine Schlüsseleigenschaft für die Anwendung der entsprechenden Produktion dieser Behandlungsklasse. Der Mittelwert des tangentialen Quellen und Schwindens beträgt für Holz dieser Klasse 5 -6%. Die Dauerhaftigkeit dieser Produkte kann als dauerhaft, gemäß EN 113 Klasse 2 eingeordnet werden. Die gegebene Klasse der Wärmebehandlung des Holzes wird als verhältnismässig dauerhafte nach dem Standard EN 113 betrachtet; d.h. der eigene Widerstand des Holzes in Bezug auf die Fäulnis entspricht den Forderungen der Klasse 2.

Die empfohlenen Anwendungsgebiete für Holz der Behandlungsklasse Thermo-D:

Thermo-D – weiche Holzarten	Thermo-D – harte Holzarten
<ul style="list-style-type: none"> - Fassaden - Aussentüren - Jalousie - Umweltschutzkonstruktionen - Ausstattung für Saunen und Dampfbäder - Fußbodenbedeckung - Gartenmöbel 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Gebiete der Anwendung - wie für Thermo-S. - Falls die dunklere Farbe gefordert wird, wird Thermo-D verwendet.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Einwirkung des technologischen Prozesses «ThermoWood» auf die Eigenschaften des Holzes, entsprechend den Behandlungsklassen.

Weiche Holzarten (Kiefer und Fichte)

	Thermo-S	Thermo-D
Behandlungstemperatur	190°C	212°C
Dauerhaftigkeit	+	++
Dimensionsstabilität	+	++
Biegefestigkeit	ohne Veränderungen	-
Farbe	+	++

Harte Holzarten (Birke und Espe)

	Thermo-S	Thermo-D
Behandlungstemperatur	185°C	200°C
Dauerhaftigkeit	ohne Veränderungen	+
Dimensionsstabilität	+	+
Biegefestigkeit	ohne Veränderungen	-
Farbe	+	++

1.5. Verzeichnis der Normen

EN 20 – 1	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Schutzeffektivität bestimmt man im Verhältnis zu <i>Lyctus Brunneus</i> (Stephens). Teil 1: Verwendung für die Bearbeitung der Oberfläche (Labormethode).
EN 21	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Toxizität bestimmt man in Bezug auf <i>Anobium punctatum</i> (De Geer) nach der Larvemigration (Labormethode).
EN 46	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Schutzwirkung bestimmt man in Bezug auf die neugeborenen Larven von <i>Hylotrupes bajulus</i> (Linnaeus) (Labormethode).
EN 47	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Bestimmung der Toxizitätswerte gegen die Larven von <i>Hylotrupes bajulus</i> (Linnaeus) (Labormethode).
EN 84	Konservierungsmittel fürs Holz. Beschleunigte Alterung des bearbeitenden Holzes vor der biologischen Prüfung. Auslaugungsvorgang.
EN 113	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Testmethode für die Bestimmung der Schutzeigenschaften in Bezug auf die holzerstörenden Basidiomyzeten. Die Bestimmung von Toxizitätswerte.
EN 117	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Bestimmung von Toxizitätswerte in Bezug auf <i>Reticulitermes santonensis</i> de Feytaud (Labormethode).
EN 252	Die Feldtestmethode für die Bestimmung der relativen Schutzeffektivität der Konservierungsmittel fürs Holz beim Kontakt mit der Erde
EN 302-2	Die Klebmittel für die tragenden Holzkonstruktionen; Testmethoden; Teil 2: die Bestimmung des Spaltungswiderstandes (Labormethode)
EN 335 – 1	Die Beständigkeit des Holzes und der Holzzeugnisse - die Feststellung der gefährlichen Klassen der biologischen Einwirkung - Teil 1: Allgemein
EN 335 – 2	Die Beständigkeit des Holzes und der Holzzeugnisse - die Feststellung der gefährlichen Klassen der biologischen Einwirkung - Teil 2: Anwendung zum Vollholz
EN 350 – 1	Die Beständigkeit des Holzes und der Holzzeugnisse. Die natürliche Beständigkeit vom Vollholz. Teil 1: Die Hauptprinzipien der Durchführung der Teste und der Klassifikation der natürlichen Beständigkeit des Holzes
EN 350 – 2	Die Beständigkeit des Holzes und der Holzzeugnisse. Die natürliche Beständigkeit vom Vollholz. Teil 2: Die natürliche Beständigkeit und Bearbeitungsfähigkeit der einzelnen, besonders wichtigen in Europa Holzarten
EN 392	Lamellenholz - Scherversuche
EN 408	Holzkonstruktionen. Bau- und Lamellenholz. Die Bestimmung einiger physikalischen und mechanischen Eigenschaften
EN 460	Die Beständigkeit des Holzes und der Holzzeugnisse - Die natürliche Beständigkeit vom Vollholz - Das Nachschlagewerk der Forderungen zur Beständigkeit des Holzes, in Bezug auf die Klassen der Gefahr
ENV 807	Konservierungsmittel fürs Holz. Die Bestimmung der Effektivität in Bezug auf die Fäulnismikropilzen und auf die anderen in der Erde wohnenden Mikroorganismen
EN 927 – 1	Lack- und Farbstoffe. Bedeckungsmittel und –systeme für die Außenholzkonstruktionen. Teil 1: Klassifikation und Auswahl
EN 927 – 3	Lack- und Farbstoffe. Bedeckungsmittel und –systeme für die Außenholzkonstruktionen. Teil 3: Prüfung des natürlichen Verwitterns
EN 927 – 4	Lack- und Farbstoffe. Bedeckungsmittel und –systeme für die Außenholzkonstruktionen. Teil 4: Auswertung der Dampfleitfähigkeit (Wasserdampf)
EN 927 – 5	Lack- und Farbstoffe. Bedeckungsmittel und –systeme für die Außenholzkonstruktionen. Teil 5: Auswertung der Wasserdurchlässigkeit
EN 12037	Konservierungsmittel fürs Holz - Die Feldtestmethode der Bestimmung der relativen Schutzeffektivität vom Konservierungsmittel beim Kontakt mit der Erde - die Methode der horizontalen Verbindung bei der Überlappung

- ISO 5660 – 1 Brandprüfung; die Reaktion aufs Feuer; Teil 1: Geschwindigkeit der Wärmeabgabe von den Baunutzholzen (konische kalorimetrische Methode)
- ISO 6341 Wasserqualität - Die Bestimmung des Bremsens der Beweglichkeit von Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea) - Die Prüfung der kurzzeitigen Toxizitätseinwirkung
- ASTM D 3273 Methode der Prüfung des Widerstands zum Schimmelpilzwachstum auf der Oberfläche der inneren Deckung in der Kunstklimatestkammer

2. Rohstoff

2.1. Faktoren, welche die Qualität des wärmebehandelten Holzes beeinflussen

2.1.1. Allgemein

Die Qualität des Ausgangsmaterials spielt eine bedeutende Rolle für die Qualität des Endproduktes, nach der Wärmebehandlung. Grundsätzlich kann die Wärmebehandlung mit jeder Holzarten durchgeführt werden, wobei dann die Prozesssteuerung und die Behandlungsparameter korrigiert und angepasst werden müssen

2.1.2. Holzarten

In Finnland werden für die Wärmebehandlung Holzarten, wie Kiefer (*Pinus sylvestris*), Fichte (*Picea abies*), Birke (*Betula pendula*) und Espe (*Populus tremula*) verwendet. Zusätzlich sind auch schon Erfahrungen mit Kiefer Radiata (*Pinus radiata*), Esche (*Fraxinus excelsior*), Lärche (*Larix sibirica*), Erle (*Alnus glutinosa*), Buche (*Fagus silvatica*) und Eukalyptus gemacht worden.

Die Holzarten unterscheiden sich durch die Jahrringstruktur, der Holzzellenstruktur, der Porosität und der chemischen Zusammensetzung der Zellen und der Inhaltsstoffe. Zusätzlich weisen unterschiedliche Holzarten auch unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Faserlängen auf. Weiche Hölzer haben längere Faser, die einer größeren Streuung unterliegen Faserlänge, als harte Holzarten.

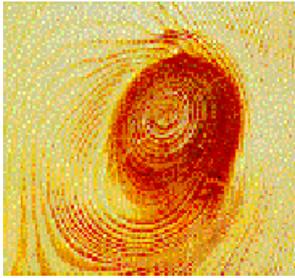
2.2. Qualität des Schnittholzes

2.2.1. Hauptsorten der nordischen weichen Holzarten

Die Qualität des Schnittholzes wird im Rahmen des allgemeinen Kontrollsystems geprüft. Das Schnittholz wird in drei Qualitätsgruppen nach Anzahl, der Erscheinung, der Anordnung und der Größe der Äste, sowie anderen Merkmalen eingeteilt. Diese Qualitäts-, oder besser gesagt Sortiergruppen heißen A, B und C, wobei die Gruppe A noch in die Unterabteilungen A1, A2, A3 und A4 unterteilt wird. Zusätzlich werden noch kundenspezifische Sortierungen angeboten.

2.2.2. Äste

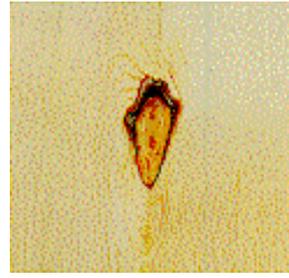
Auf den unten angeführten Abbildungen sind verschiedene Typen von Ästen gezeigt, die bei der Auswahl des Rohstoffs berücksichtigt werden. Für die Wärmebehandlung werden hauptsächlich die Holzarten mit gesunden Ästen verwendet.



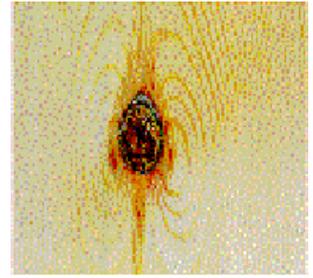
gesunder Ast



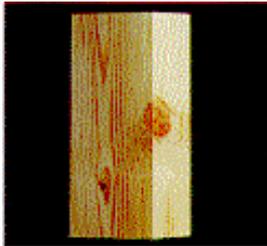
trockner Ast



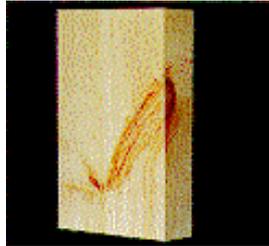
Ast mit Rinde



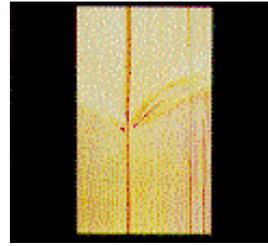
loser Ast



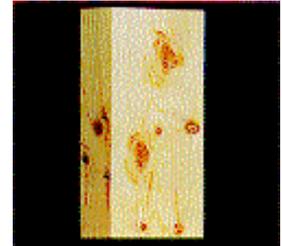
Ast an der Kante



Flügelast



Kornährenast



Astansammlung

2.2.3. Minimale Forderungen zum Rohstoff

Der finnische Verband für wärmebehandeltes Holz hat die Qualitätsanforderungen für Kiefer, Fichte und für die harten Holzarten, die als Rohstoff für die Wärmebehandlung verwendet werden, eingeführt. Diese minimalen Anforderungen sind in den Tabellen 1 und 3 dargestellt.

Tabelle 1-2. Die Forderungen an die Qualität der Kiefer, die für die Wärmebehandlung verwendet werden soll.

QUALITÄT		A+B - Möbel
DIE ÄSTE ⁽¹⁾ auf der schlechtesten Strecke 2 Meter lang		Stück
Hart / trocken	Auf der Sichtseite	8/2
	Auf der Kante	4/1
Die Äste mit einer Rinde		Unzulässig
Astloch oder harter ausfallender Ast		Unzulässig
Maximale Größe des harten Astes auf der Sichtseite		Astgröße, mm
Größe	16, 19, 22, 25 * 75, 100, 115	35
	125, 150	55
	175, 200, 225	55
	32, 38, * 75, 100, 115	55
	125, 150	55
	175, 200, 225	60
	44, 50, *75, 100, 115	60
	125, 150	60
	175, 200, 225	70
	63, 75, * 75, 100, 115	60
	125, 150	60
	175, 200, 225	65
Maximale Größe des Astes auf der Kante		Astgröße, mm
Dicke des Holzes, mm	16,19	= Dicke
	22, 25	22
	32, 38	30
	44, 50	40
	63, 75	50
Übrige Äste		Maximale Größe in % von der Größe des Hartastes
Feste Äste – Sorten A und B		
Ansammlung von Ästen, für einen Ast ⁽²⁾		70
Trockener Ast ⁽³⁾		20
Ast mit Rinde ⁽⁴⁾		Unzulässig
Weicher Ast		Unzulässig
Übrige Defekte		
Oberer Riss		Maximum 20 % der Breite
Offenes Mark		Zugelassen
1	Wenn die Größe des Astes weniger als der Wert in der gegebenen Tabelle ist, wird die grössere Menge der Äste zugelassen, doch darf die Summe der Größen der Äste in mm (= Anzahl der Äste * Durchmesser) für den entsprechenden Typ der Äste nicht überstiegen.	
2	Eine Ansammlung von Ästen sieht Minimum 4 Äste mit dem Durchmesser über 12 mm vor, alle befinden sich innerhalb von 150 mm der Länge der Sichtseite und der Kanten. Wenn die Äste nicht eindeutig durch Holzfasern getrennt sind, werden sie wie ein Ast betrachtet und entsprechend bewertet. Wenn ein Ast mit mehr als ¾ des beiliegenden Holzes verwachsen ist, wird er als Hartast angenommen.	
3	Wenn ein Ast mit mehr als ¾ des beiliegenden Holzes verwachsen ist, wird er als Hartast angenommen.	
4	Wenn weniger als ¼ des Astes mit einer Rinde umgeben ist, wird er als trockener Ast betrachtet.	

Tabelle 2-2. Die Forderungen an die Qualität der Kiefer, die für die Wärmebehandlung verwendet werden soll

QUALITÄT		ST 1-5
DIE ÄSTE ⁽¹⁾ auf der schlechtesten Strecke 2 Meter lang		Stück
Hart / trocken	Auf der Sichtseite	8/2
	Auf der Kante	4/1
Die Äste mit einer Rinde Astloch oder harter ausfallender Ast		Unzulässig
		Unzulässig
Maximale Größe des harten Astes auf der Sichtseite		Astgröße, mm
Größe	16, 19, 22, 25 * 75, 100, 115	35
	125, 150	40
	175, 200, 225	45
	32, 38, * 75, 100, 115	40
	125, 150	45
	175, 200, 225	50
	44, 50, * 75, 100, 115	45
	125, 150	50
	175, 200, 225	55
	63, 75, * 75, 100, 115	50
	125, 150	55
	175, 200, 225	60
Maximale Größe des Astes auf der Kante		Astgröße, mm
Dicke des Holzes, mm	16,19	= Dicke
	22, 25	22
	32, 38	30
	44, 50	40
	63, 75	50
Übrige Äste Feste Äste – Sorten A und B		Maximale Größe in % von der Größe des Hartastes
Ansammlung von Ästen, für einen Ast ⁽²⁾		Nicht mehr als die Summe der Äste
Trockener Ast ⁽³⁾		20
Ast mit einer Rinde ⁽⁴⁾		Unzulässig
Weicher Ast		Unzulässig
Übrige Defekte		
Oberer Riss		Maximum 20 % der Breite
Offenes Mark		Zugelassen
1	Wenn die Größe des Astes weniger als der Wert in der gegebenen Tabelle ist, wird die grössere Menge der Äste zugelassen. Doch darf die Summe der Größen der Äste in mm (= Anzahl der Äste * Durchmesser) für den entsprechenden Typ der Äste nicht überstiegen sein.	
2	Eine Ansammlung von Ästen sieht Minimum 4 Äste mit dem Durchmesser über 12 mm vor und einer maximalen Länge von 150 mm an der Sichtseite und der Kanten. Wenn die Äste nicht eindeutig durch Holzfasern getrennt sind, werden sie wie ein Ast betrachtet und entsprechend bewertet. Wenn ein Ast mit mehr als ¾ des umliegenden Holzes verwachsen ist, wird er als Hartast angenommen.	
3	Wenn weniger als ¼ des Astes mit einer Rinde umgeben ist, wird er als trockener Ast betrachtet.	
4		

Tabelle 3-2. Die Forderungen an die Qualität der harten Holzarten, die für die Wärmebehandlung verwendet sollen

FORDERUNGEN AN DIE QUALITÄT (in Bezug auf alle harten Holzarten, die für die Wärmebehandlung verwendet werden)		
	SORTE E Definition: vierseitiger, ganz tadelloser Seitenschnitt ohne Äste	SORTE A Definition: dreiseitiger Seitenschnitt ohne Äste
Minimale Größen bei dem bei der Lieferung existierenden Feuchtigkeitsgehalt (ca. 18%)		
Breite	Nominalabmessung + 6%, wird noch etwas Millimeter zugelassen	
Dicke	Nominalabmessung +3%, wird noch etwas Millimeter zugelassen	
Risse / Brüche	Unzulässig	
Baumkante	Unzulässig	
Elastizität	= 8 mm / 3 m	
Biegung	= 15 mm / 3 m	
Verdrillung	= 10 mm / 3 m	
Feuchtigkeitsgehalt	< 20 %, gleichmäßig nach ganzer Partie	
Bläue	Unzulässig	
Lieferlängen	> 2 100 mm, möglich kürzer - nach der Vereinbarung	
Verpackung	Entsprechend den Längen, nach jede 100 mm	
Kernholz Dunkel oder hell	Unzulässig	Unzulässig
Verfärbungen, die durch Alterung hervorgerufen wurden	Unzulässig	
Verfärbungen, die nach dem Einschnitt und durch die Lagerung hervorgerufen wurden	Unzulässig	
Gleichmäßige Verfärbungen	Nach Vereinbarung	
Hinweise in Bezug auf die Qualität je nach der Holzart	Birke Es werden die mineralischen Einschlüsse zugelassen.	Birke Die schlechteste Variante der Oberfläche lässt zwei Äste mit max. Größe 10 mm oder ein trockner Ast mit max. Größe 10 mm auf ein Meter des Holzes zu. Das graue Kernholz ist auf den einzelnen Stücken des Holzes mit max. Breite 20 mm und auf einer Länge 0.5 m zulässig.
	Espe Feuchtes Holz oder Zerstörung der Fasern sind unzulässig.	Espe Die schlechteste Variante der Oberfläche lässt einige oberflächliche Äste und verfärbte Bereiche auf den einzelnen Stücken des Holzes zu.

2.2.4. Feuchtigkeit des Holzes

In Bezug auf das Resultat der Wärmebehandlung hat der anfängliche Feuchtigkeitsgehalt keine besondere Bedeutung. Die Bearbeitung kann wie mit frischem , als auch mit getrocknetem Holz durchgeführt werden. Auf jeden Fall wird in der ersten Phase der Bearbeitung das Holz fast bis zur Darre getrocknet. Das Trocknen des Holzes benötigt die längste Zeit im gesamten Prozess.

Das frische Holz enthält Wasser in zwei Formen: ungebundenes Wasser zwischen den Zellen und gebundenes Wasser in den Wänden der Zellen. Beim Trocknen entweicht ein Teil des Wassers vom Raum zwischen den Zellen durch die Kapillaren in Faserrichtung der Richtung der Fasern, verursacht durch die unterschiedliche Oberflächenspannung und dem Dampfdruck. Wenn die Poren zwischen den Zellen eine freie Bewegung vom Wasser zulassen, kann das Wasser einige Metern durchströmen. Andernfalls erfolgt das Austrocknen auf dem Kapillareniveau nur mit einigen Zellen von den Stirnseiten. Der Hauptteil vom Wasser wird mittels der Diffusion durch die Wände der Zellen in Form des Dampfes herausgeführt. Es geschieht durch innere Kanäle der Zellen, die senkrecht zu den Fasern sind.

3. Die ThermoWood Technologie

3.1. Ausrüstung

Die Technologie der Wärmebehandlung basiert auf der Verwendung von Wasser, Dampf und hohen Temperaturen. Die Bedingungen des Prozesses sind wegen einzelnen, aus dem Holz verdampfenden Komponenten korrosionsaggressiv.

Die Anlagen für die Wärmebehandlung werden aus rostfreiem Stahl hergestellt. Besondere Sicherheitsmassnahmen müssen wegen dem Turbokompressoren, der Heizung und den sehr hohen Temperaturen getroffen werden.

Für die Erzeugung der notwendigen Wärmemenge kann man in der Technologie ThermoWood die Systeme der Ölheizung mit Biobrennstoff, Masut oder Gas verwenden. Es sind auch andere Lösungen möglich, wie z.B. direkte elektrische Beheizung. Außerdem soll die im technologischen Prozess verwendete Ausrüstung den Dampferzeuger enthalten.

Die Gase, die aus dem Holz im Laufe der Bearbeitung verdampfen, werden verbrannt. Ein Ziel von Verbrennung ist die Beseitigung der unangenehm riechenden Komponenten, die aus dem Holz verdampfen.

3.2. Phasen der Wärmebehandlung

Trocknung

Die Trocknung ist die längste Phase der Wärmebehandlung. Diese Phase wird auch Hochtemperaturtrocknung genannt. Während dieser Phase sinkt der Feuchtigkeitsgehalt im Holz fast bis auf Null. Die Dauer der Trocknungsphase hängt vom ursprünglichen Feuchtigkeitsgehalt im Holz, von der Holzart und auch von der Materialdicken ab. Als Rohstoff kann frisches, oder auch getrocknetes Holz verwendet werden.

Die normale Trocknung hat wichtige Bedeutung für die Vermeidung von inneren Hitzerrissen. Da das Holz unter der Einwirkung der hohen Temperaturen elastisch wird, ist sein Deformationswiderstand besser, als bei der Trocknung im traditionellen Ofen.

Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung des Holzes wird in einer geschlossenen Kammer, bei Temperaturen von 185 - 215°C, abhängig vom Behandlungsniveau, durchgeführt. Die Phase der Wärmebehandlung beginnt unmittelbar nach der Phase der Hochtemperaturtrocknung. Der Dampf wird bei der Trocknung und bei der Wärmebehandlung als Schutzumgebung verwendet. Diese Schutzumgebung verhindert das Brennen des Holzes und beeinflusst die chemischen Veränderungen, die im Holz stattfinden. Die Phase der Wärmebehandlung dauert 2 - 3 Stunden.

Abkühlen, Konditionieren

Nach der Wärmebehandlung folgt die Abkühlungsphase. Hierbei wird der Prozess sorgfältig überwacht. Diese Phase muss sehr aufmerksam durchgeführt werden, weil bei zu großen Temperaturdifferenzen zwischen Holz und der Luft das Holz aufreißen kann. Zusätzlich muss durch Feuchtezufuhr die Holzfeuchte für die spätere Verwendung angepasst werden. Das endgültige Feuchtigkeitsniveau im Holz spielt eine wesentliche Rolle für die Betriebskenndaten – es ist schwer mit einem zu trocknen Holz zu arbeiten. Nach dem

Abkühlen soll das endgültige Feuchtigkeitsniveau im Holz 5 - 7% betragen. Abhängig von der Behandlungstemperatur und von der behandelten Holzart kann die Abkühlung 5-15 Stunden dauern.

3.3. Energie

Die Energie ist hauptsächlich für die Trocknung des Holzes erforderlich, die ca. 80% der verwendeten Wärmeenergie benötigt. Der gesamte Energieverbrauch ist nur 25% höher, als bei herkömmlicher Holz Trocknung. Die Anforderungen an die Stromversorgung sind mit den der gewöhnlichen Trocknung gleich zu setzen.

3.4. Umweltschutzmaßnahmen

Da keine Chemikalien erforderlich sind, sondern nur Wasser und Wärme verwendet werden, ist die Wärmebehandlung von ThermoWood ein umweltfreundlicher Prozess. Einzelne Holzinhaltsstoffe werden zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen kontrolliert verbrannt.

An die Abwasseraufbereitung werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Die festen Komponenten im Abwasser werden in spezielle Kläranlage abgetrennt, übrige werden in den Abwasserreinigungsanlagen verarbeitet.

4. Eigenschaften von «ThermoWood®»

Alle im vorliegenden Kapitel beschriebenen Eigenschaften basieren auf den Ergebnissen einer Reihe von Versuchen, die während einigen Jahren in Bezug auf die Wärmebehandlung von Holz durchgeführt wurden. Diese Daten dürfen nur als Informationsmaterial genutzt werden und können sich infolge der Unterschiede zwischen den Teilen des Holzes unterscheiden. Aus den weiteren Versuchen werden die Ergebnisse zur Überprüfung der aufgeführten Ergebnisse, sowie als Ergänzung der fehlenden Eigenschaften, verwendet.

Der Hauptteil der Versuche wurde mit den weichen Holzarten (Kiefer, Fichte) durchgeführt. Einige wurden aber auch mit den harten Arten (Birke, Espe) gemacht. Die Unterschiede zwischen Kiefer und Fichte sind bis auf, Unterschiede in der Rohdichte und der Asttypen, minimal.

4.1. Chemische Veränderungen

4.1.1. Allgemein

VTT, Universität der Technologien von Helsinki und Universität von Helsinki haben im Laufe von 1998 bis 2001 eine Reihe der wissenschaftlichen Arbeiten über die chemischen Veränderungen des wärmebehandelten Holzes im Rahmen des gemeinsamen Projektes, das "Die Mechanismen der Reaktionen des abgeänderten Holzes» benannt ist, veröffentlicht. Weiterhin schrieb Risto Kotilainen von der Universität von Jyväskylä seine Dissertation über «Die chemischen Veränderungen des Holzes bei der Erwärmung 150 - 260°C».

Zum Verständnis über die durch die Wärmebehandlung verursachten Veränderungen der chemischen und physikalischen Struktur des Holzes, muss auf die Grundlagen der chemischen Zusammensetzung, der Struktur und der physikalischen Eigenschaften eingegangen werden.

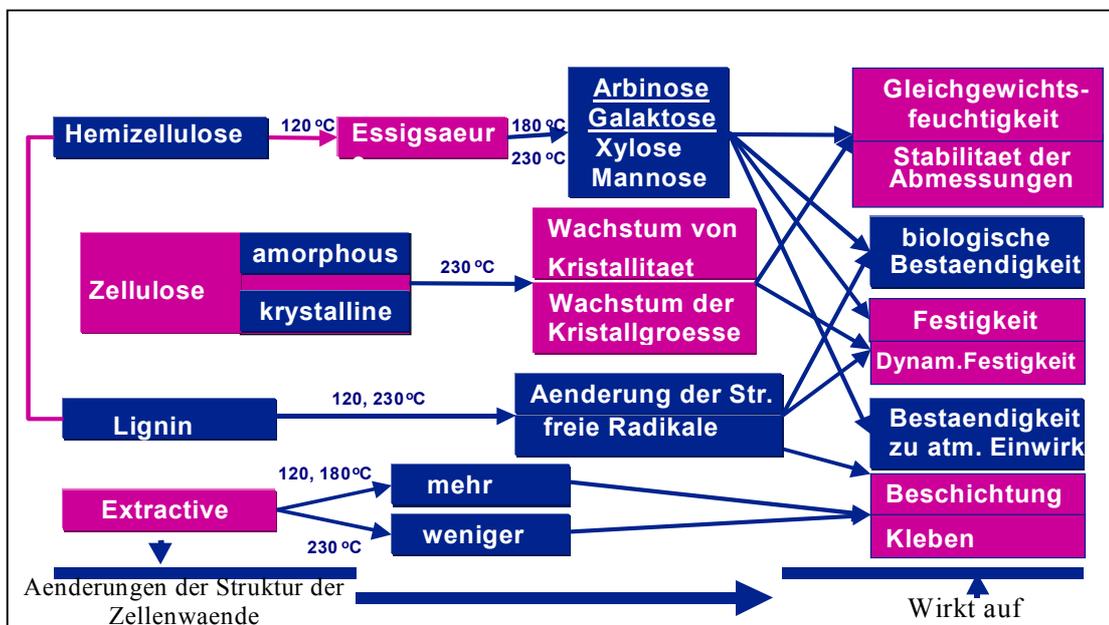


Abb. 1-4. Die Mechanismen der Reaktion des wärmebehandelten Holzes (Quelle: VTT).

Die Hauptkomponenten des Holzes (Zellulose, Hemizellulose und Lignin) werden unter der Einwirkung der Wärme verschiedenartig zerstört. Die Zellulose und das Lignin werden langsamer und bei einer höheren Temperatur, als die Hemizellulose zerstört. Die

Inhaltsstoffe werden leichter zerstört und sie verdampfen aus dem Holz während der Wärmebehandlung.

4.1.2. Kohlenwasserstoffe

Die Zellulose und Hemizellulose gehören zu den Kohlenwasserstoffverbindungen, die die strukturellen Komponenten des Holzes sind. Holz besteht zu etwa 40-50% aus Zellulose, und zu 25-35% aus Hemizellulose. Die Zellulose stellt eine lange Kette (DP 5000-10000) aus Glykose Einheiten dar. Die Hemizellulose besteht aus kürzeren Ketten (DP 150-200) aus verschiedenen Monosacharide. Die Zusammensetzung und der Gehalt von Hemizellulose können sich je nach Holzart unterscheiden. Die Veränderungen erfolgen bei der Wärmebehandlung in beiden Gruppen, doch die grössten Veränderungen geschehen mit dem Sauerstoffgehalt der Hemizellulosen.

Die Komponenten der Zellulose, β -D-Glycoproteinosen, sind mit den (1 \rightarrow 4)-glukosidischen Bindungen vereinigt. Die Zelluloseketten sind durch Bindungen zwischen den Hydroxylgruppen verbunden. Bei Temperaturen unter 300°C sinkt der Polymerisationsgrad in der Zerlegung der Zellulose. Das Wasser entfleucht, es entstehen freie Radikale, Karbonyl, Karboxylaten und Hydroperoxidgruppen und auch das Kohlenoxyd, das Kohlensäuregas und die reaktionsfreudige Holzkohle entweichen.

Die Komponenten von Hemizellulose sind: D-Glykose, D-Mannose, D-Galaktose, D-Xylose, L-Arabinose und eine unbedeutende Menge von L-Rhamnose, 4-O-Methyl von D-Glukuroniksäure und D-Galakturoniksäure. Sie sind durch (1 \rightarrow 4)- oder (1 \rightarrow 6)-Bindungen vereinigt.

Die Essigsäure entsteht bei der Erwärmung des Holzes durch Hydrolyse aus der Acethylhemizellulose. Die entstehende Säure dient als Katalysator bei der Hydrolyse von Hemizellulose bis zu den auflösbaren Zuckern. Außerdem depolymerisiert die entstehende Essigsäure die Mikrofibrillen der Zellulose in der amorphen Umgebung. Die Säure hydrolysiert die Bindungen, die die Elemente der Glykose vereinigen, und teilt die Glykosen auf in kürzere Ketten.

Das Holz enthält nach der Wärmebehandlung bedeutend weniger an Hemizellulose. Es sinkt die Menge des Material, dass von den holzerstörenden Pilzen abgebaut wird. Dieses ist eine der Ursachen für die Verbesserung der Beständigkeit des wärmebehandelten Holzes gegenüber der Zerstörung durch Pilze, verglichen mit den herkömmlich getrockneten Nadelhölzern. Mit der Zerlegung der Hemizellulose sinkt die Konzentration der wasserabsorbierenden Hydroxylgruppen. Dadurch verbessert sich das Stehvermögen des bearbeiteten Holzes im Vergleich zu den weichen Holzarten, die im gewöhnlichen Ofen getrocknet wurden.

Das Zerlegen der Hemizellulose geschieht bei Temperaturen zwischen ca. 200-260°C und die entsprechende Temperatur für die Zellulose beträgt– ca. 240-350°C. Da der Gehalt von Hemizellulose in den harten Holzarten grösser ist, als in den weichen Arten, erfolgt die Zerlegung in den harten Holzarten leichter, als in den weichen. Doch das Aufspalten der Hemizelluloseketten verringert im Gegensatz zum Bruch der Zelluloseketten die Festigkeit des Holzes nicht. Im Gegenteil, der Bruch der Hemizellulosekette verbessert die Druckfestigkeit des Holzes und verringert die Bildung der Spannungen und der elastischen Deformation des Holzes.

4.1.3. Lignin

Das Lignin hält die Holzzellen zusammen. Diese dunkle Substanz ist in den Holzzellen zum grössten Teil in der Mittellamelle und Primärwand zu finden.

Es befindet sich auch in den Wänden der primären und sekundären Zellwand. Der Gehalt vom Lignin in den weichen und harten Holzarten beträgt 25-30% und 20-25%. Die genaue chemische Struktur vom Lignin ist noch nicht genau festgestellt worden, aber die einzelnen Komponenten sind bereits bekannt. Lignin enthält die Elemente von Phenylpropan, die durch die Äther- und die Kohlenstoff - Kohlenstoffbindungen (DP 10-50) verbunden sind. Die weichen Holzarten enthalten hauptsächlich die Guaiacylelemente von Phenylpropan und die harten Holzarten enthalten fast die gleichen Mengen von Guaiacyl- und Syringylelemente von Phenylpropan. Beide weisen auch eine unbedeutende Menge von p-Hydroxylphenylpropan auf.

Die Verbindungen zwischen den Elementen von Phenylpropan werden im Laufe der Wärmebehandlung teilweise zerstört. Die Arylätherbindungen zwischen den Syringylelementen werden leichter, als die Bindungen zwischen den Guaiacylelementen zerstört. Die thermochemischen Reaktionen sind mehr für die Ketten des Allylteiles, als für Aryl-Alkyl-Ätherbindungen charakteristisch. Je länger die Zeit der Selbsthydrolyse ist, desto mehr Kondensationsreaktionen erfolgen. Die Produkte der Kondensation enthalten β -Ketongruppen und die konjugierten Gruppen der Karbonsäure.

Das Lignin ist von allen Holzkomponenten der Teil mit der höchsten Hitzebeständigkeit. am Die Masse des Lignin wird nur dann reduziert, wenn die Temperatur 200°C überschreitet und die β -Arylätherbindungen beginnen zerstört zu werden. Bei diesen hohen Temperaturen sinkt der Gehalt von Ligninmethoxyl und einige der nicht kondensierten Elemente werden in die Elemente vom Benzylbenzoltyp umgewandelt. Die Kondensation vom Benzylbenzoltyp ist eine typische Reaktion für den Temperaturbereich von 120 bis 220°C. Bei der Wärmebehandlung hat diese Reaktion einen bedeutenden Einfluss auf die Lignigeigenschaften wie beispielsweise die Farbe, Reaktivität und Lösbarkeit.

4.1.4. Inhaltsstoffe

Das Holz enthält eine unbedeutende Menge von niedrigmolekularen Komponenten. Die Inhaltsstoffe betragen weniger als 5% vom Holz. Diese Gruppe enthält, zum Beispiel, Terpene, Fette, Wachs und Phenole. Die Inhaltsstoffe haben unterschiedliche Herkunft in den verschiedenen Holzarten und die Menge der Grundstrukturen ist sehr groß. Die Inhaltsstoffe sind keine strukturellen Komponenten des Holzes. Der grösste Teil der Grundstrukturen verdampft leicht bei der Wärmebehandlung.

4.1.5. Toxizität

Die Umweltverträglichkeit der Abwässer von der Wärmebehandlung von Fichtenholz wurde durch das CTBA (EU-Projekt - Verbesserung der nicht dauerhaften Holzarten mittels entsprechender pyrolytischer Wärmebehandlung, 1998) geprüft. Die Teste wurden mit den Abwässern, die nach dem Test EN 84 entnommen wurden, durchgeführt. Bei diesem Test wird, die Fixierung der Bioobjekte an den Holzzellen bestimmt und bewertet. Die kleinen Proben wurden bewässert, und anschliessend wurde das Wasser entsprechend NF-EN ISO 506341 mit Daphnia magna (kleine Süßwasserkrebs) getestet. Die Verstuche der Mikrottoxizität wurden mit den marinen Leuchtbakterien durchgeführt. Die Teste haben gezeigt, dass die Abwässer keine Giftstoffe, die für Daphnia magna gefährlich sind, enthalten und auch für Bakterien unschädlich sind.

Das wärmebehandelte wurde als Knochenersatz (VTT und chirurgische Klinik beim Universitätskrankenhaus, Turku) geprüft. Die Voruntersuchungen gute Ergebnisse gezeigt.

Das wärmebehandelte Birkenholz hat die Eigenschaften, die den Eigenschaften des Knochens ähnlich sind. Dieses Holz ist sauber, Giftstoffe sind nicht gefunden.

4.2. Physikalische Veränderungen

4.2.1. Rohdichte

Die Rohdichte bestimmt man durch das Wiegen des Gewichts und das Vermessen des Musters. Das ThermoWood hat eine geringere Dichte, als das unbehandelte Holz. Dieses hängt mit der Massenänderung des Musters zusammen. Auf der unten angeführten Abbildung 2-4 wird dargestellt, wie die Dichte mit der Erhöhung der Temperatur sinkt. Die Abweichung sind wesentlich und der Koeffizient der gemischten Korrelation klein - wegen der natürlichen Schwankungen der Holzdicke.

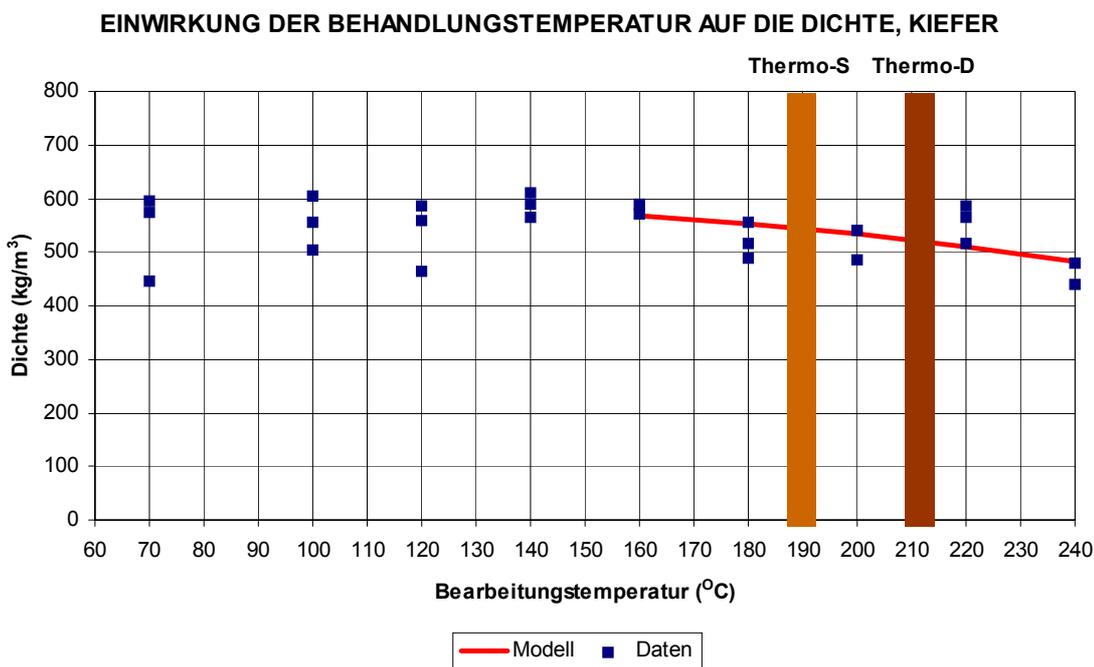


Abb. 2-4. Die Einwirkung der Temperatur der Bearbeitung auf die Dichte der Kiefer bei der Bearbeitung im Laufe von 3 Stunden bei der Temperatur 160-240°C. Die Durchschnittsdichte im Temperaturbereich $T < 160^{\circ}\text{C}$ beträgt $560 \text{ Kg} / \text{m}^3$. Das Testmaterial war bei der relativen Feuchtigkeit 65% abgelagert (Quelle: VTT).

4.2.2. Festigkeiten

Die Festigkeit des Holzes ist, mit der Rohdichte eng verbunden, und das ThermoWood hat nach der Behandlung eine etwas geringere Dichte. Auf solche Weise zeigt, dass ThermoWood in einigen Fällen kleinere Festigkeit hat. Doch, das Verhältnis zwischen dem Gewicht und der Festigkeit kann praktisch unveränderlich bleiben. Die Festigkeit des Holzes hängt auch vom Feuchtigkeitsgehalt und seines relativen Niveaus unter dem Sättigungspunkt der Faser wesentlich ab. Der Vorteil diesem Fall kann in der niedrigeren Gleichgewichtsfeuchtigkeit von ThermoWood in bestehen.

Biegefestigkeit

Es wurden zwei Versuchsweisen zur Ermittlung der Biegefestigkeit angewendet. Im ersten Fall wurde das fehlerfreie Material in einem kleinen Bereich verwendet. Beim zweiten Versuchsaufbau wurde das Material mit den natürlichen Defekten und über einen grösseren

Abschnitt getestet. Die Ergebnisse (Abb. 3-4) haben gezeigt, dass der wesentliche Festigkeitsverlust der Kiefer bei Temperaturen über 220°C beginnt.

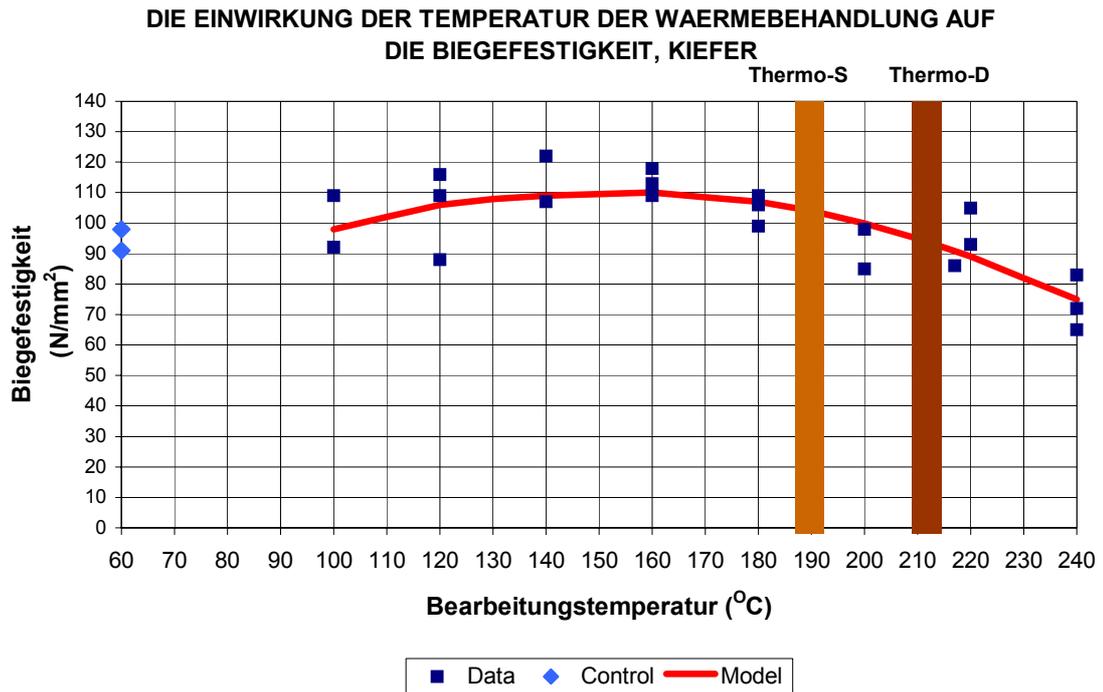


Abb. 3-4. Die Einwirkung der Temperatur der Wärmebehandlung auf die Biegefestigkeit der Kiefer, die Durchschnittsdichte 560 Kg / m³ (Quelle: VTT)

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass die Wärmebehandlung den Elastizitätsmodul nicht wesentlich beeinflusst (Abb. 4-4).

EINWIRKUNG DER TEMPERATUR DER WAERMEBEHANDLUNG AUF DEN ELASTIZITAETSMODUL, KIEFER

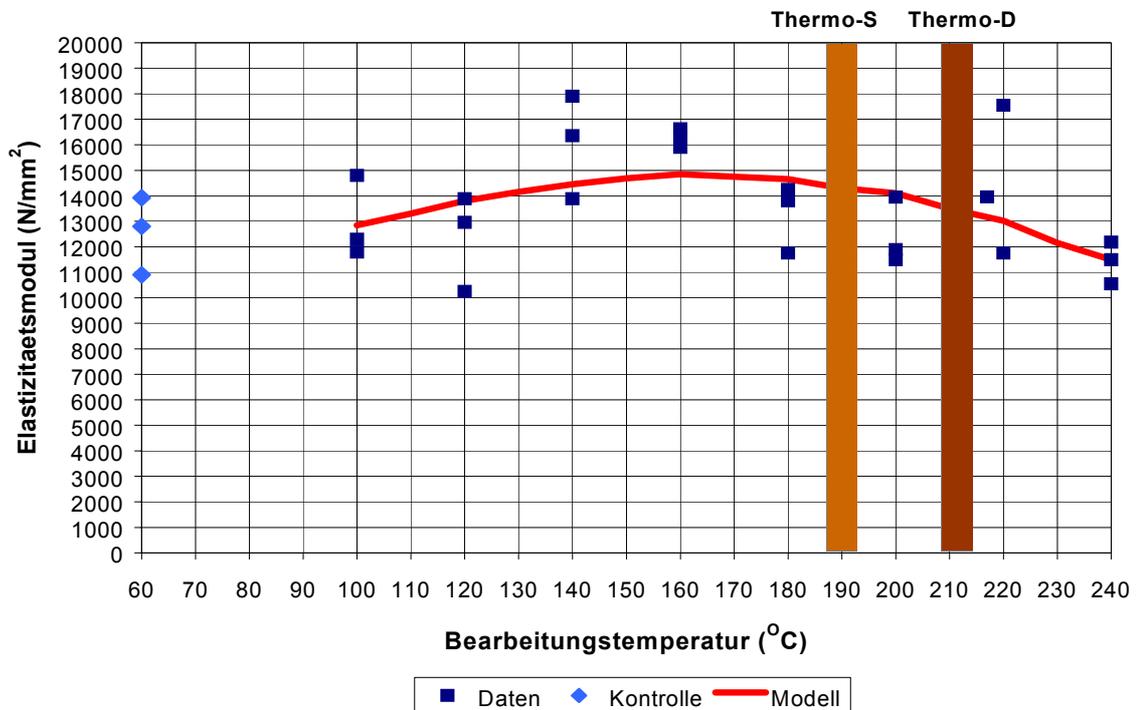


Abb. 4-4. Die Einwirkung der Temperatur der Wärmebehandlung auf den Elastizitätsmodul - Kiefer, die Durchschnittsdichte 560 Kg / m³ (Quelle: VTT)

Die Festigkeit der wärmebehandelten Fichte (230°C, 5 Stunden) wurde mit größeren Probestücken entsprechend EN 408 studiert. Vor dem Test wurden die Probestücke bei der relativen Feuchtigkeit 45% und 65% gelagert. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 1-4 gezeigt. Bei den Probestücken mit Ästen sind die Festigkeitswerte für das wärmebehandelte Holz niedriger, als beim unbehandelten Holz. Dieses hängt neben mehreren Faktoren auch damit zusammen, dass die Harze aus dem Holz herausgezogen worden sind.

Tabelle 1-4. Biegefestigkeitsgrenze und Elastizitätsmodul der wärmebehandelten Fichte.

Serie	Breite (mm)	Höhe (mm)	Länge (mm)	Relative Feuchtigkeit (%)	Dichte	Biegefestigkeitsgrenze ¹⁾ N/mm ²	Elastizitätsmodul ¹⁾ N/mm ²	Scheinbarer Elastizitätsmodul ¹⁾ N/mm ²
1	38	100	1800	45	425±45	23.0 ± 11.2	11015 ±3142	9495 ±2823
2	38	100	1800	65	392±40	22.5 ± 9.2	12326 ± 1681	11494 ±1280
3	100	38	1800	45	392±25	19.0 ± 5.4	10486 ±1649	9537 ± 1705
4	100	38	1800	65	397±17	27.9 ± 5.9	11913 ±1422	11230 ± 1224

1) Durchschnittswert und Durchschnittsabweichung

Die Referenzwerte für die unbehandelte Fichte beim Feuchtegehalt 12% beträgt für die Biegefestigkeit 40–50 N/mm² und den Elastizitätsmodul 9700–12000 N/mm².

Bei den Versuchen mit einem Holzstück von schlechter Qualität und Fehlstellen auf einer Länge von 1800mm, das bei 230°C über die Dauer von 4 Stunden (Tabelle 1-4) behandelt worden war, ist die Biegefestigkeit um fast 40% gegenüber den unbehandelten Proben gesunken. Diese ist auf die Schwächungen im Bereich der Fehlstellen zurückzuführen. Die

Veränderung der Biegefestigkeit des ThermoWood , das bei den niedrigeren Temperaturen (etwa 190°C) über 4 Stunden behandelt wurde.

Die Tests wurden in meisten Fällen mit den kleinen fehlerfreien Prüfkörpern durchgeführt. Es sind weiterhin zusätzliche Versuche mit großen Probestücken und unterschiedlicher Menge und Art an Ästen notwendig. Aufgrund unzureichender Kenntnisse wird empfohlen, das ThermoWood nicht für statisch tragende Konstruktionen zu verwenden.

Schraubenverbindungen

Die Forschungsergebnisse vom Institut der Umweltschutztechnologien, die 1999 am ThermoWood durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Ursachen der Veränderung der Schraubenauszugsfestigkeiten zum grössten Teil von der Rohdichteänderung, als vom Wärmebehandlungsprozess selber abhängen.. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Ergebnisse bei den Materialien mit geringerer Dichte besser waren, wenn man vorher vorgebohrt hat.

Die Druckfestigkeit bei der Pressung parallel zur Faserrichtung

Nach den Tests, die das VTT mit Holz, das bei 195°C über 3 Stunden behandelt wurde, durchgeführt hatte, war die Druckfestigkeit bei Pressung parallel zur Faserrichtung des Holzes ungefähr 30% höher, als beim gewöhnlichen, unbehandelten Holz. Die Probestücke waren bei dieser Versuchsreihe vorher in Wasser eingetaucht worden.

Die Druckfestigkeit hängt hauptsächlich von der tatsächlichen Dichte des Holzes ab. Die Tests haben gezeigt, dass der Wärmebehandlungsprozess keine negative Auswirkung auf die Druckfestigkeit hat. Die Ergebnisse der Versuche weisen darauf hin, dass die Druckfestigkeit, sogar bei der Behandlung mit höheren Temperaturen (Abb. 5-4) besser, als beim unbehandelten Holz ist.

FESTIGKEITSGRENZE, FICHTE

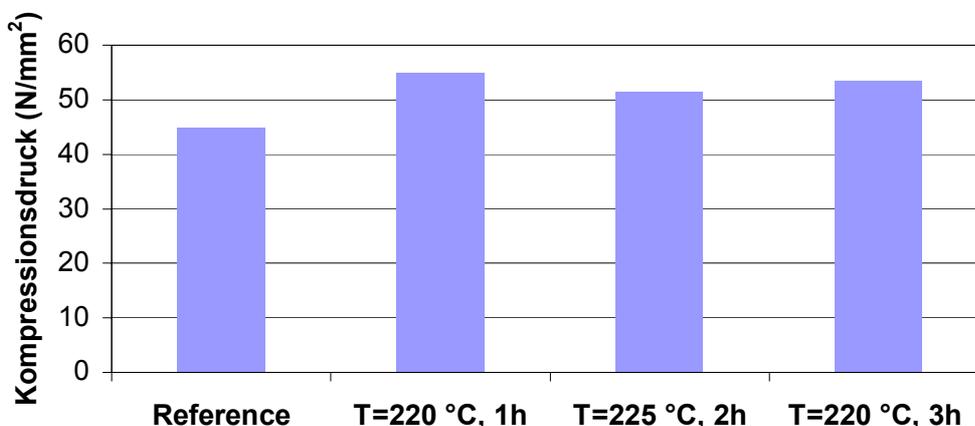


Abb. 5-4. Die Druckfestigkeit (N/mm²) - Fichte. Die Durchschnittsdichte 420 Kilogramm / m³ (Quelle: VTT).

Die Versuche zeigten, dass die Proben beim Erreichen der maximalen Druckbeanspruchung in kleine Teile zerbrachen und nicht wie unbehandeltes, getrocknetes Holz ausbeulten. Es hat deutlich gezeigt, dass das wärmebehandelte Holz nicht so elastisch, wie gewöhnliches Holz ist.

Haltbarkeit gegen Stossbiegung (dynamische Biegung)

Nach den Ergebnissen der Versuche vom CTBA kann man schließen, dass der Wert der Stossbiegefestigkeit für das ThermoWood geringer, als beim herkömmlich getrockneten Holz ist. Die Versuche mit wärmebehandeltem Fichtenholz, behandelt mit 220°C über drei

Stunden, zeigten, dass die Stossbiegefestigkeit auf fast 25% des Ursprungswertes gesunken war.

Scherfestigkeit

Die Versuche wurden beim VTT mittels Messungen in radialer und tangentialer Richtung durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Festigkeitseigenschaften, nach der Behandlung bei den höheren Temperaturen (230°C im Laufe von 4 Stunden), bei den radialen Tests von 1 bis zu 25% und bei den Testen in tangentialer Richtung bis zu 40% herabgesetzt waren. Die Wärmebehandlung, bei den niedrigeren Temperaturen von 190°C, hat eine ganz unbedeutende Auswirkung auf die Kiefer, obwohl die Fichte die Senkung bis 20 % bei beiden Tests gezeigt hat.

Spaltwiderstand

Die Tests des Spaltwiderstandes wurden im Institut der Umweltschutztechnologien mit Fichte, Kiefer und Birke im grossen Bereich der Testtemperaturen durchgeführt. Als Versuchsergebnis kann geschlossen werden, dass der Spaltwiderstand auf 30-40% gesunken war und bei der Behandlungen mit höheren Temperaturen war dieser Wert noch grösser.

4.2.3. Härte

Die Härte nach Brinell wurde laut prEN 1534 festgestellt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Härte je nach Höhe der Behandlungstemperatur zunimmt (Abb. 6-4). Doch sind die relativen Veränderungen unbedeutend und haben praktisch in Praxis keine Auswirkung. Wie auch für alle Holzarten, hängt die Härte nach Brinell im bedeutenden Maß von der Dichte ab.

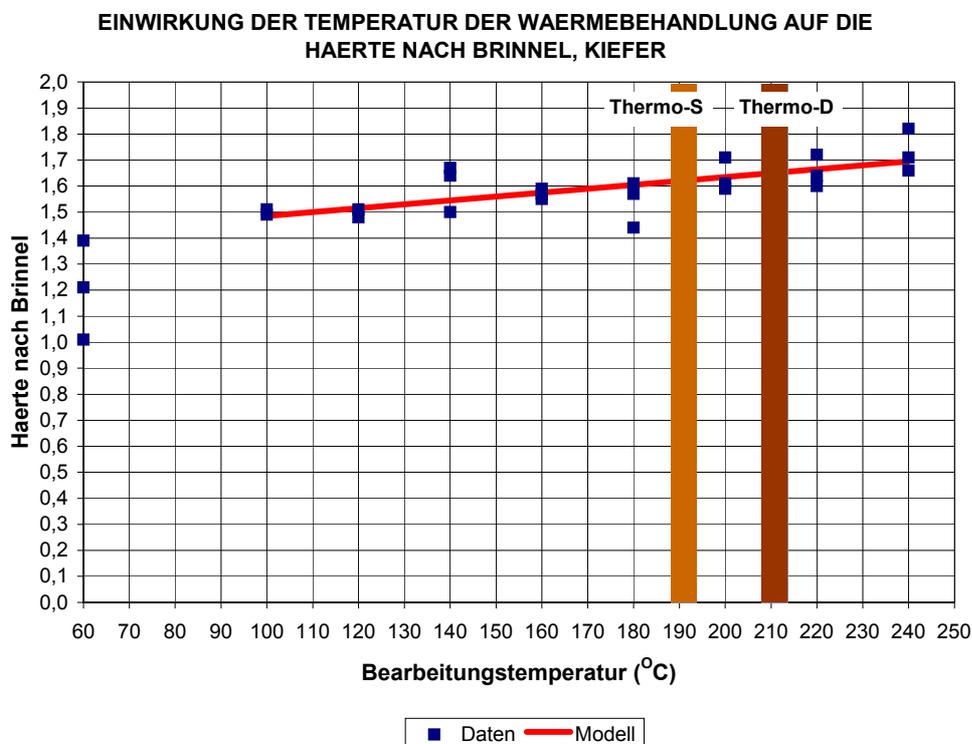


Abb. 6-4. Die Einwirkung der Temperatur der Wärmebehandlung auf die Härte nach Brinell von Kiefer. Die Dauer der Behandlung - 3 Stunden (Quelle: VTT).

4.2.4. Gleichgewichtsfeuchte

Die Wärmebehandlung von Holz verringert die Gleichgewichtsfeuchtigkeit. Es wurde das wärmebehandelte und unbehandelte Holz nach der Wärmebehandlung und das gewöhnliche unbearbeitete Holz bei verschiedenen Bereichen der relativen Feuchtigkeit verglichen.

Die Wärmebehandlung verringert die Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Holzes. Bei hohen Temperaturen (220°C) beträgt die Ausgleichsfeuchte nur etwa eine Hälfte vom entsprechenden Wert des unbehandelten Holzes. Die Differenz der Holzfeuchtigkeitswerte ist höher, wenn die relative Feuchtigkeit höher ist. Die Abbildung 7.4 ist die Einwirkung auf Material, das bei der Temperatur 220 - 225°C über 1 - 3 Stunden und bei verschiedenen Niveaus der relativen Feuchtigkeit bearbeitet wurde.

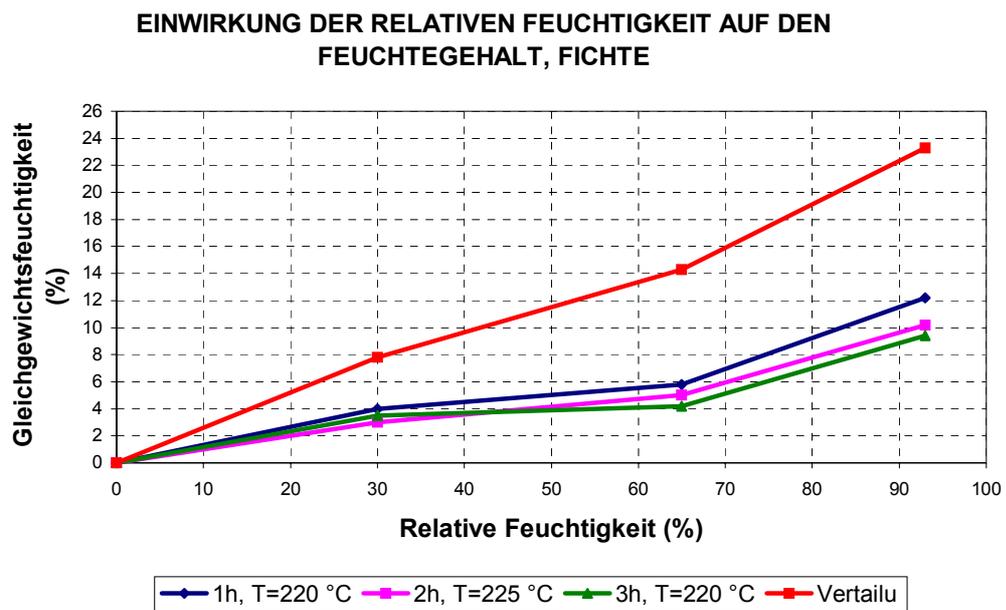


Abb. 7-4. Die Einwirkung der relativen Feuchtigkeit auf den Feuchtegehalt der wärmebehandelten Fichte (Quelle: VTT).

4.2.5. Schwellen und Schwinden wegen Feuchtigkeit

Die Wärmebehandlung verringert das radiale und tangentielle Schwellen (Abb. 8-4 und 9-4) wesentlich.

RADIALES SCHWELLEN, FICHTE

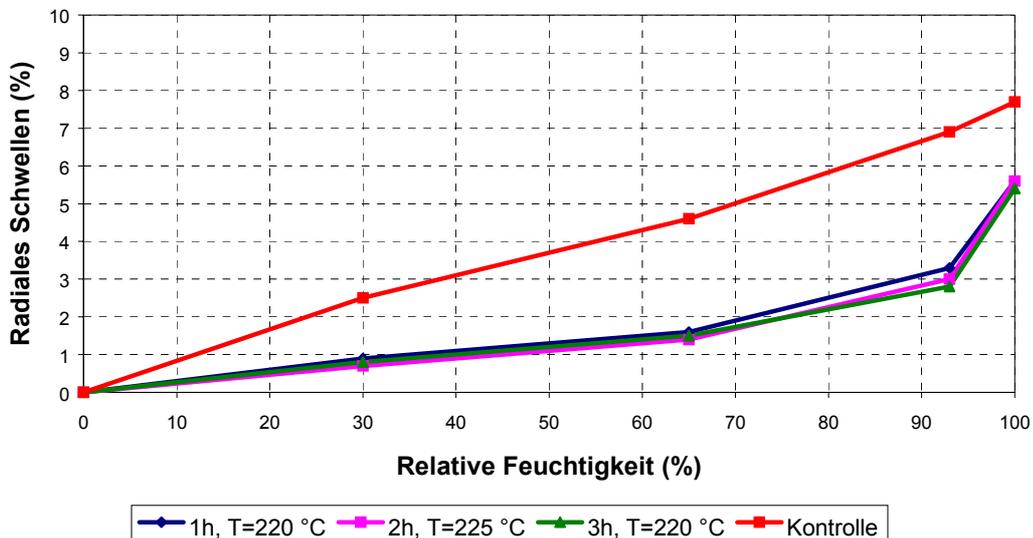


Abb. 8-4. Das radiale Schwellen der Fichte als Funktion der relativen Feuchtigkeit (Quelle: VTT).

TANGENTIALES SCHWELLEN, FICHTE

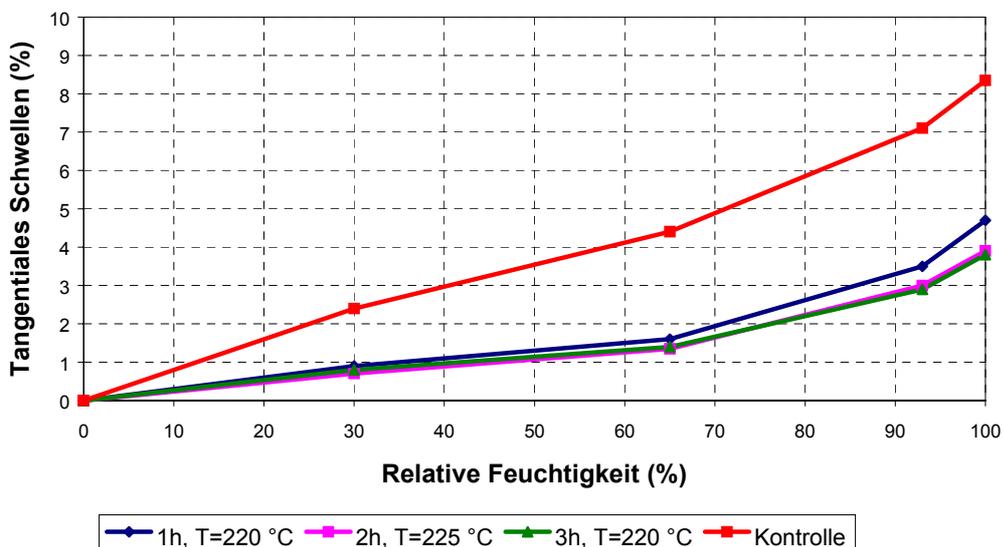


Abb. 9-4. Das tangentielle Schwellen der Fichte als Funktion der relativen Feuchtigkeit (Quelle: VTT).

Die Auswirkung der Wärmebehandlung auf die Reduzierung des Quellen und Schwindens wurde gezeigt. vom Gesichtspunkt der Senkung des Niveaus des Schwellens und der Verdichtung des Holzes ist in Bezug auf die Verwerfung des Finalproduktes deutlich gezeigt. Das wärmebehandelte Holz mit und ohne Beschichtung bewahrte die Form entsprechend

den Testen vom VTT, wobei das CCA behandelte Holz und das unbehandelte Holz hatte bemerkbare Verwerfung.

Zum Unterschied vom Holz insgesamt hat das wärmebehandelte Holz keine Spannungen beim Austrocknen. Es ist ein offensichtlicher Vorteil, bemerkenswert, zum Beispiel, beim Sägen des Materials und bei der Herstellung der Tischlerproduktion. Außerdem sind die Werte des Schwellens und der Verdichtung des Holzes sehr klein.

4.2.6. Durchlaßfähigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit des wärmebehandelten Holzes und das Eindringen vom Wasser in die Holzstruktur ist am CTBA geprüft worden. Diese Eigenschaft ist für die Anwendung als Fenster wichtig. Die Proben sind in demineralisiertes Wasser eingetaucht und anschliessend in einem Raum bei der relativen Feuchtigkeit von 65% und der Temperatur von 20°C gelagert worden. Über 9 Tage wurden die Proben gewogen. Es zeigte sich, dass die Wasserdurchlässigkeit des wärmebehandelten Fichtenholzes etwa 20-30% niedriger war, als die Werte der unbehandelten Fichten Referenzproben.

Das VTT hat die Untersuchungen der Dampfleitfähigkeit des wärmebehandelten Holzes laut EN 927-4 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Abbildung (Abb. 10-4) gezeigt.

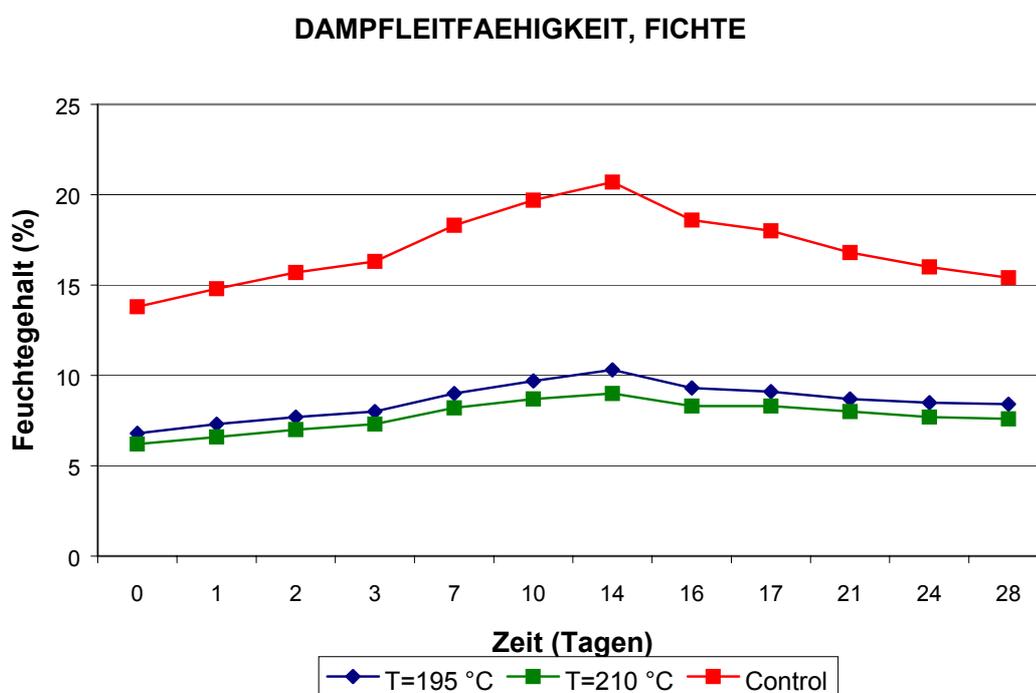


Abb. 10-4. Die Einwirkung der Wärmebehandlung auf die Dampfleitfähigkeit (Quelle: VTT).

Die Wasserdurchlässigkeit wurde auch am VTT gemäss EN 927-5 geprüft. Die Durchlässigkeit wurde nach einer 72 stündigen Wasserlagerung bestimmt. Die Hirnholzflächen waren dabei abgedichtet. Die unbehandelte Fichtenprobe wies eine Holzfeuchte von 22% auf. Im Gegensatz dazu betragen die Holzfeuchten des ThermoWood, die bei 195°C und 210°C behandelt worden waren, ca. 12% und 10%.

4.2.7. Wärmeleitfähigkeit

Die Versuche haben gezeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit des wärmebehandelten Holzes auf 20 - 25% im Vergleich zu den weichen, unbehandelten Holzarten gesunken waren (Tabelle 2-4).

Die Wärmeleitfähigkeit λ_{10} der Klasse Thermo-D beträgt 0.099 W/(mK) laut den Testen von VTT. Der entsprechende Wert des unbehandelten Holzes beträgt entsprechend den Bedingungen und den Absätzen der Abteilung C des finnischen Baugesetzbuches 0.12 W/(mK).

Tabelle 2-4. Wärmeleitfähigkeit

Abmessungen (mm)	Dauer der Behandlung bei 230°C (Stunden)	Einschrumpfen (%)	Dichte (kg/m ³)	Feuchtegehalt (%)	Wärmeleitfähigkeit λ_{10} W/mK
Kiefer					
25 x 125	3	8,7	525	4,5	0,107
25 x 125	5	12,1	474	3,6	0,101
	0		505		0,130
Fichte					
22 x 100	3	5,8	445	5,5	0,097
22 x 100	5	9,3	405	4,4	0,082
	0		432		0,110

4.2.8. Brandsicherheitsmaßnahmen

Die Tests auf Beispiel eines einzelnen brennenden Gegenstandes (EN 13823)

Die Feuerbeständigkeit von Bauholz wurde laut den neuen Euroklassen mittels des Testes auf Beispiel eines einzelnen brennenden Gegenstandes bewertet. Dabei war ein Muster, bestehend aus zwei Brettseiten, die vertikal und senkrecht zu einander ausgerichtet waren, durch die Flammen eines Gasbrenners angegriffen. Die Höhe der Seiten des Probekörpers war 1,5 m, die Breite - 0,5 und 1,0 m. Der Gasbrenner wurde unter dem Stand für den einzelnen brennenden Gegenstand platziert, wobei die thermische Einwirkung ca. 40 KW/m² betragen.

Die Einwirkung der Wärmebehandlung auf die Wärmeabgabegeschwindigkeit ist in der Abbildung 11-4 gezeigt. Das Niveau der Wärmeabgabegeschwindigkeit der wärmebehandelten Kiefer lag fast 10 Kilowatt höher, als bei der unbehandelten Kiefernmuster. Die frühere Vergrößerung der Wärmeabgabegeschwindigkeit zum Ende des Tests, fürs die Muster ohne Wärmebehandlung, durch kleineren Dicke verursacht. Es wurde die Vergrößerung auf, ca., 15% of THR wegen der Wärmebehandlung beobachtet. Die Menge des Rauches war ungefähr doppelt so gross und die Zeit der Entzündung (aufgrund der 5 Kilowatt Vergrößerung der Wärmeabgabegeschwindigkeit) verkleinerte sich auf 30%.

Möglicherweise wird die Feuerfestigkeit des Holzes durch die Wärmebehandlung etwas reduziert. Als mögliche Ursache werden die fehlenden flüchtigen Bestandteile vom Holz aufgeführt, die im Prozess verdampfen. Obwohl sich die Temperatur bei der Wärmebehandlung weit unterhalb des Entzündungspunktes des Holzes befindet, können sich die Bestandteile des Holzes schrittweise zerlegen. Also ändern sich die Eigenschaften des Materials, was zu einer etwas verkleinerten Feuerfestigkeit führt.

Die Menge an gemachten Versuchen mit ThermoWood sind nicht ausreichend, um einen genauen Wert festzulegen. Es kann bestätigt werden, dass bezüglich der Brandverhaltens und der Brandsicherheit keine signifikanten Unterschiede zwischen ThermoWood und unbehandeltem Holz gibt. Demnach wird ThermoWood in die Brandklasse d eingeordnet.

GESCHWINDIGKEIT DER WÄRMEABGABE DER KIEFERMUSTER NACH DER WÄRMEBEHANDLUNG

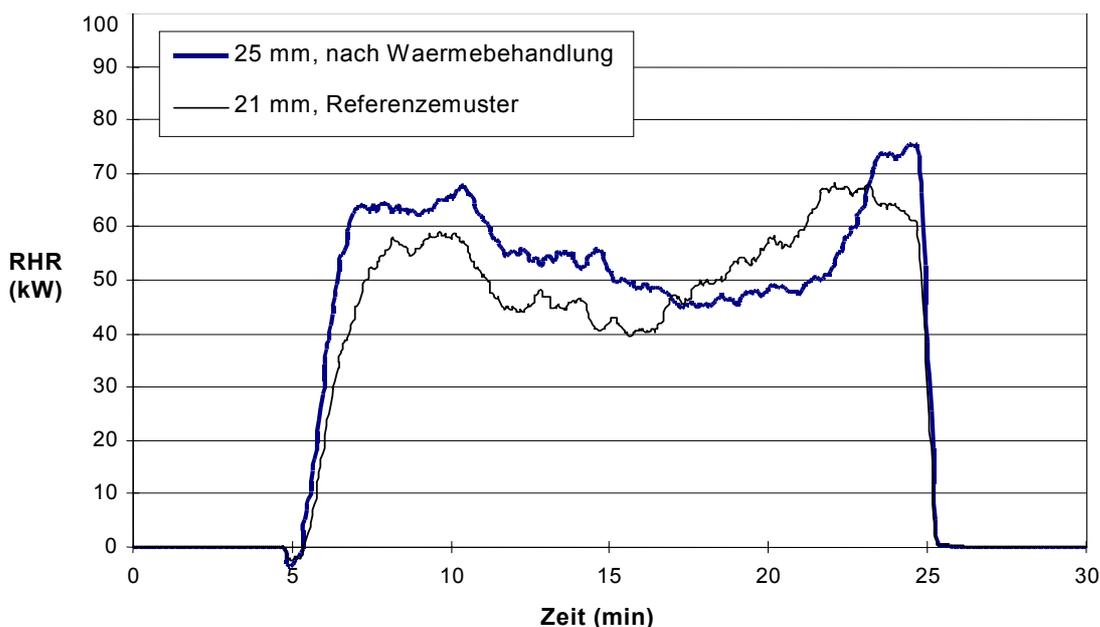


Abb. 11-4. Die Geschwindigkeit der Wärmeabgabe der Kiefernuster nach der Wärmebehandlung (2/1) und ohne (3/1). Die Dicke des Musters war 21 und 25 mm fürs unbearbeitete und bearbeitete Muster, entsprechend.

Tabelle 3-4. Brandsakra Trähus – Fas 2: die Ergebnisse des Testes auf Beispiel eines einzelnen brennenden Gegenstandes für die Holzserzeugnisse

Erzeugnis	Dicke (mm)	FIGRA (W/s)	THR _{600s} (MJ)	SMOGRA (m ² /s ²)	TSP _{600s} (m ³)
Fichte	18	419	18.0	4	36.3
Kiefer (bearbeitet)	25	581	32.8	6	62.5
Fichte	21	321	23.2	3	15.0
Kiefer (mit Höhlung 22 mm)	21	329	22.3	4	35.5
Kiefer	15	361	26.6	4	17.5
Kiefer	45	587	23.9	12	54.4
Fichte (Gratnut und Falz), vertikal	15	452	17.0	3	34.0
Fichte (Gratnut und Falz), horizontal	15	494	18.4	4	50.0
Sperrholz (Fichte)	12	596	15.8	3	45.0
Sperrholz (Oberfläche der Kiefer)	12	437	16.6	1	21.0

Teste ISO 5660

VTT hat die Teste der Feuerbeständigkeitseigenschaften entsprechend den Forderungen ISO 5660 durchgeführt. Die Wärmebehandlung verringert die Zeit der Entzündung der Kiefer- und Fichtenmuster (Tabellen 4-4 und 5-4) um etwa die Hälfte im Vergleich zum unbehandelten Holz. Bei den Teststücken der Kiefer ist die Geschwindigkeit der Wärmeabgabe auf 32% gesunken. Die wärmebehandelten Fichtenmuster haben dieselben Ergebnisse gezeigt. Die Menge des Rauches war bei den Mustern der Kiefer und der Fichte unbedeutend im Vergleich zu den unbearbeiteten Mustern.

Tabelle 4-4. Konischer Kalorimetertest nach ISO 5660, Strahlungsniveau 50 KW/m², Kiefer

Abmessungen (mm)	Dauer der Behandlung bei 230°C (Stunden)	Verlust des Gewichts (%)	Zeit der Entzündung (s)	Wärmeabgabegeschwindigkeit (60 s) (KW/m ²)	Rauch (m ² /Kg)
50 x 150	5	7.2	12	137	180
50 x 150	8	11.8	13	136	47
50 x 150	10	14.4	16	160	120
50 x 150	0		19–25	150–200	25–100 (200)

Tabelle 5-4. Konischer Kalorimetertest nach ISO 5660, Strahlungsniveau 25 KW/m², Fichte.

Abmessungen (mm)	Dauer der Behandlung bei 230°C (Stunden)	Zeit der Entzündung (s)	Wärmeabgabegeschwindigkeit (60 s) (KW/m ²)	Rauch (m ² /Kg)
50 x 150	8	97	112	21
50 x 150	0	193	113	72

Teste entsprechend dem Standard NF B 52501

Die Teste wurden bei CTBA entsprechend dem Standard NF B 52501 durchgeführt. Alle untersuchten Muster können der Klasse M₃ zugeordnet werden. Die Versuche zeigten, dass die Feuerbeständigkeit der Teststücke aus wärmebehandeltem Holz denen des unbehandelten Holzes entspricht.

Tests gemäss dem britischen Standard, die oberflächige Verbreitung der Flamme, BS 476, Teil 7

Eine sehr begrenzte Menge von Kiefer- und Fichtemustern, wärmebehandelt bei 210°C, wurden in Grossbritannien entsprechend dem Standard BS 476, Teil 7, für die Klasse 1 der oberflächigen Verbreitung von Flammen untersucht. Die Ergebnisse haben für beide behandelten Muster die Klasse 4 ergeben. Unbehandeltes Holz gehören zur Klasse 3. Das wärmebehandelte Holz überschritt schon im Laufe der ersten Minute des Testes die Grenzen der Klasse 3.

Wegen der kleinen Menge der verwendeten Probestücke wurde beschlossen, dass diese Ergebnisse noch nicht genügend zuverlässig sind, und dass weitere Tests mit ThermoWood von verschiedenen Behandlungstemperaturen und Feuchtigkeiten notwendig sind. Die Teste entsprechend dem britischen Standard und ihre Ergebnisse konzentrierten sich nur auf die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung, wobei dieses nach der europäischen Normung (EN) nur einen Teile des gesamten Versuchsumfangs darstellt. Wärmebehandeltes Holz hatte offensichtlich eine kürzere Entzündungszeit, aber verhält sich besser als unbehandeltes Holz in Bezug auf die Wärmeabgabe und Rauchentwicklung.

Betriebscharakteristiken von ThermoWood in Bezug auf das finnische Baugesetzbuch

Die Forderungen der Brandsicherheit für die Konstruktionen und für die dort verwendeten Bauelemente sind im Teil E1, Die strukturelle Brandsicherheit in den Gebäuden, 1997, vom nationalen Baugesetzbuches Finnlands bestimmt. Die Bauprojektierung verwirklicht sich entsprechend den Bedingungen und Vorschriften des Teiles B1, Strukturelle Sicherheit und Belastungen, 1998, und auch des Teiles B10, Holzkonstruktionen, 1983, mit den Abänderungen von 1990 des nationalen Baugesetzbuches Finnlands.

Die Methodiken des Testes und die Kriterien der Annahme, die für die Bestimmung der Baumaterialieneigenschaften in Bezug auf die Feuer verwendet werden, strukturellen Elemente und die Einrichtungen sind in "Ymparistöopas 35 1998, Rakennustuotteiden palotekninen hyväksyntä" (Handbuch der Umweltschutzmaßnahmen 35, 1998; brandsicherheitstechnische Annahme der Bauproduktion), die Publikation des Ministeriums vom Umweltschutz aufgeführt.

Die Technologie ist als entsprechende den Forderungen der Feuergefahrklasse 2, die in der genannten Publikation genannt sind, anerkannt.

4.2.9. Biologische Dauerhaftigkeit

Das VTT hat drei Tests mit dem Ziel der Feststellung der biologischen Dauerhaftigkeit von wärmebehandeltem Holz durchgeführt. Die Tests wurden entsprechend dem Standard EN 113 mit einer sechzehn wöchigen Inkubationszeit durchgeführt. Zusätzlich wurde ein EN 113 Test mit einer auf sechs Wochen verkürzten Versuchsdauer durchgeführt. Diese Verkürzung der Versuchsdauer konnte wegen der Verwendung von kleineren Probestücken geschehen. Der dritte Test wurde mit Erdkontakt entsprechend ENV 807 und einer Dauer von 8, 16, 24, und 32 Wochen durchgeführt. Für den Test wurden die Pilze *Coniophora puteana* und *Poria placenta* benutzt, da sie als verbreitetste und problematischste Pilze gelten.

Die Ergebnisse zeigen eine auffallende Dauerhaftigkeit des wärmebehandelten Holzes, gegenüber der Zerstörung durch Braunfäulepilze. In Bezug auf diese zwei Pilze hat das wärmebehandelte Holz verschiedene Ergebnisse gezeigt. Wärmebehandeltes Holz braucht eine höhere Behandlungstemperatur, um maximale Beständigkeit gegenüber *Poria placencia* im Vergleich zu *Coniophora puteana* (Abb. 12-4) zu erreichen.

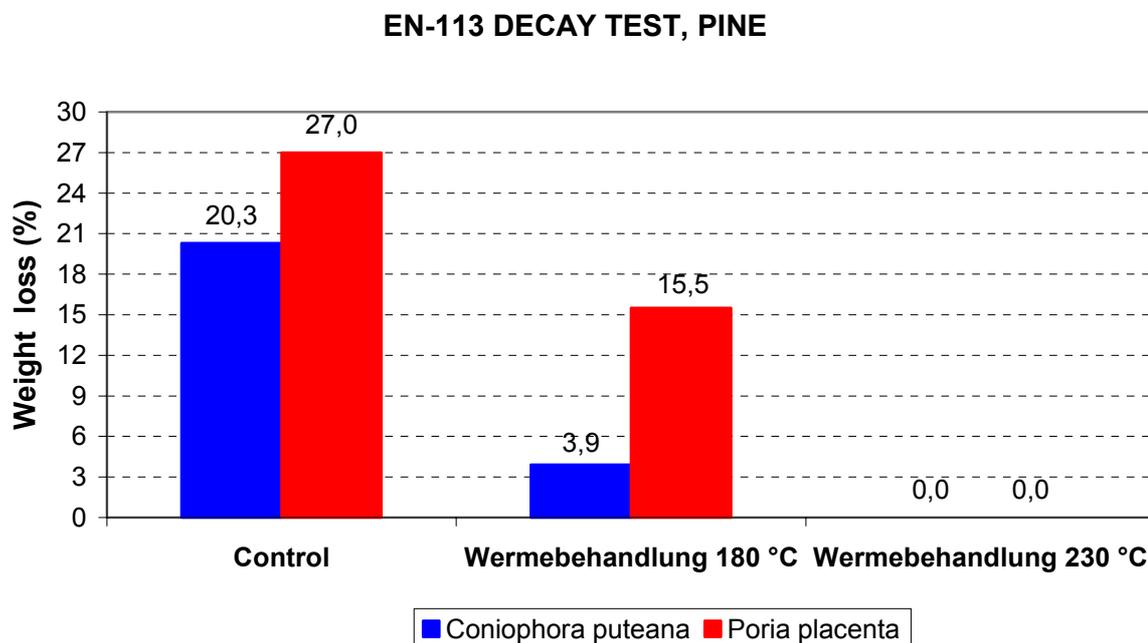


Abb. 12-4. Die Einwirkung der Wärmebehandlung auf die Zerstörung durch die Braunfäule im Laufe des modifizierten Testes EN 113. Kiefer, Dauer der Behandlung – 4 Stunden (Quelle: VTT).

Die Dauerhaftigkeitsversuche nach EN 113 haben einen Zusammenhang zwischen der Dauerhaftigkeit und der Behandlungstemperatur und Behandlungsdauer gezeigt. Um die

Dauerhaftigkeitsklasse 1 zu erreichen, muss eine starke Wärmebehandlung mit einer Mindesttemperatur von 220°C und einer Dauer von länger als 3 Stunden durchgeführt werden. Für die Dauerhaftigkeitsklasse 2 wird die erwünschte Dauerhaftigkeit des Holzes mit einer Temperatur von etwa 210°C (Abb. 13-4) erreicht.

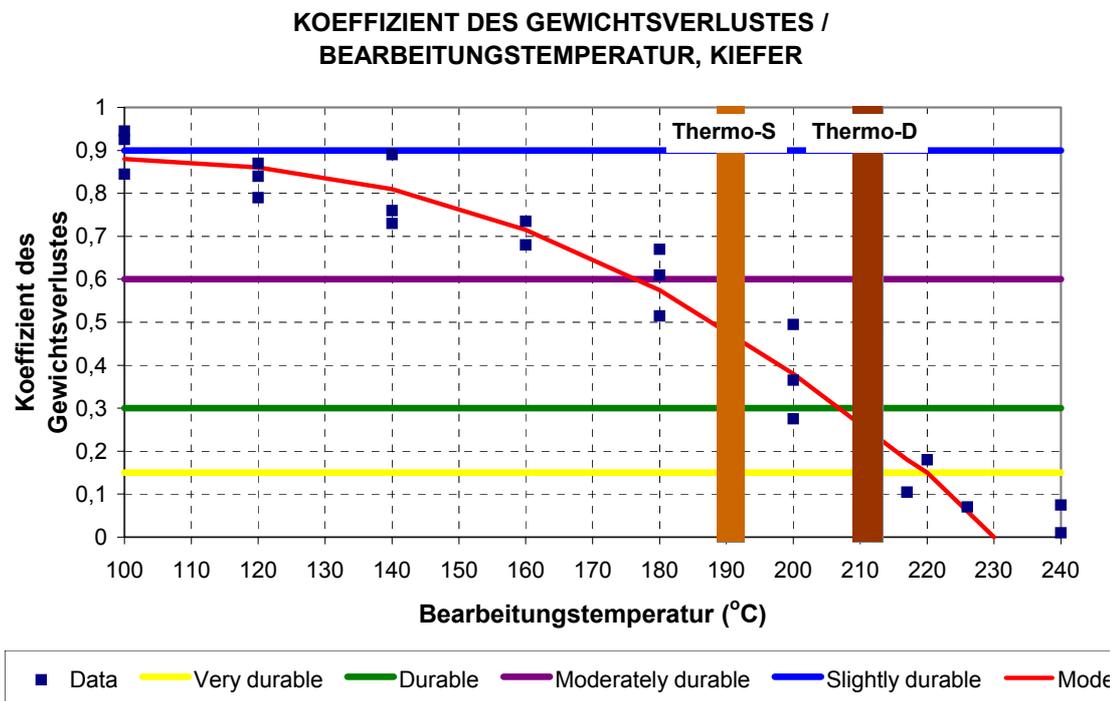


Abb. 13-4. Der Einfluss der Temperatur auf den Koeffizient des Gewichtsverlustes. Kiefer, Behandlungsdauer – 3 Stunden. Standart EN 350-1. Beständigkeit (Quelle: VTT).

Basierend auf den Ergebnissen der Feldversuche (EN 252) **empfehlen wir, ThermoWood nicht für statische Anwendungen mit direktem Erdkontakt zu verwenden**. Es wird angenommen, dass der Festigkeitsverlust durch die Materialfeuchte verursacht wird und nicht von Mikroorganismen. Doch zeigen praktische Erfahrungen, dass bei der Verwendung von Thermo-D in nicht statisch relevanten Konstruktionen mit Erdkontakt, bei denen das Material abtrocknen kann, keine wesentlichen Materialschädigungen auftreten.

4.2.10. Widerstandsfähigkeit gegen die Insekten

Diese Tests wurden von CTBA in Frankreich durchgeführt. Der Bockkäfer lebt im Splintholz der weichen Holzarten. Der gewöhnliche Nagekäfer (*Anobium punctatum*) bevorzugt die harten Holzarten. In einigen harten Holzarten lebt auch *Lyctus Bruneus*. Die Tests haben gezeigt, dass wärmebehandeltes Holz dauerhaft gegenüber allen drei Insekten ist. Auch die Tests, die an der Universität von Kuopio durchgeführt wurden, bestätigen eine gute Widerstandsfähigkeit des wärmebehandelten Holzes gegenüber Bockkäfern. Der Versuchsbericht zeigt, dass die Käfer anhand der Terpenemmission der Kiefer die geeignete Legestelle für ihre Eier finden. Da sich die Terpenentwicklung des wärmebehandelten Holzes im Vergleich zu dem gewöhnlichen Holz stark verringert (siehe die Abschnitt 4.2.13), kann man erwarten, dass die Käfer das unbehandelte Holz dem behandelten Holz vorziehen. Laut dem Versuchsbericht könnte das gleiche Phänomen auch für die Termiten gelten. Doch müssen hierfür noch Versuche gemacht werden.



Abb. 14-4. Der Bockkäfer und die Larve im untersuchten Muster des wärmebehandelten Holzes (Foto von Jarmo Holopainen, Universität Kuopio).

Das Problem mit Termiten hat auf der südlichen Halbkugel eine grössere Bedeutung, wobei Termiten auch in Frankreich in nördlicheren Bereichen in Europa gefunden wurden. Die Termiten greifen die Gebäude von der Erde an und meidend nach Möglichkeit direkte Sonnenstrahlen. Momentane Versuchsergebnisse deuten darauf hin, dass das ThermoWood nicht gegen Termiten resistent ist.

4.2.11. Dauerhaftigkeit gegenüber Witterung

Regen

Basierend auf Freilandversuchen zeigte sich, dass ThermoWood mit einer Behandlungstemperatur von 225°C, behandelt über 6 Stunden, nur die Hälfte der Holzfeuchte von unbehandeltem Holz aufwies. Dieses Ergebnis wurde auch nach fünf Jahren bestätigt. Die Abbildung 15-4. zeigt die Änderung des Feuchtigkeitsgehalts unter natürlicher Bewitterung für unbehandeltes Holz, CCA imprägniertes Holz und ThermoWood.

FEUCHTIGKEITSGEHALT DER GEHOBELTEN KIEFERPANEELLE UNTER DER EINWIRKUNG DER NATÜRLICHEN ATMOSPHERISCHEN BEDINGUNGEN

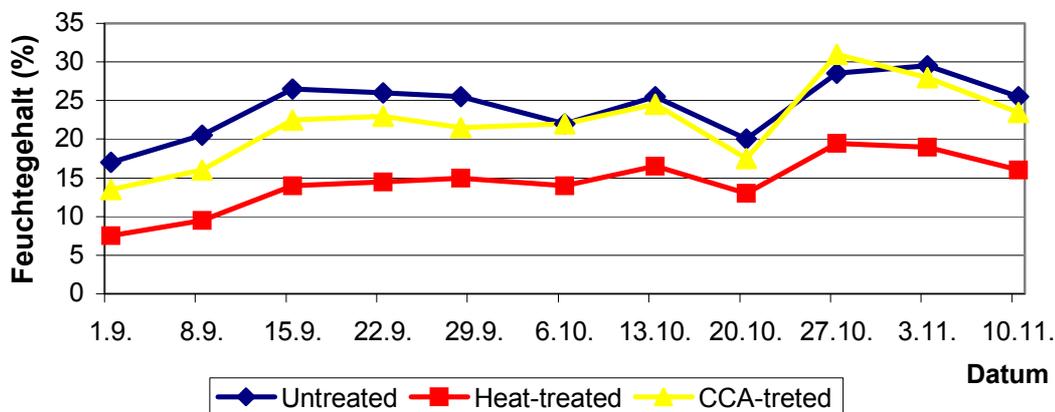


Abb. 15-4. Der Feuchtigkeitsgehalt der gehobelten Kieferpaneele unter der Einwirkung der natürlichen atmosphärischen Bedingungen, 1994 (Quelle: VTT).

Unter entsprechenden Bedingungen kann auch auf ThermoWood Schimmel wachsen. Der Schimmel kann in den meisten Fällen von der Oberfläche weggewischt werden.

Sonnenstrahlung

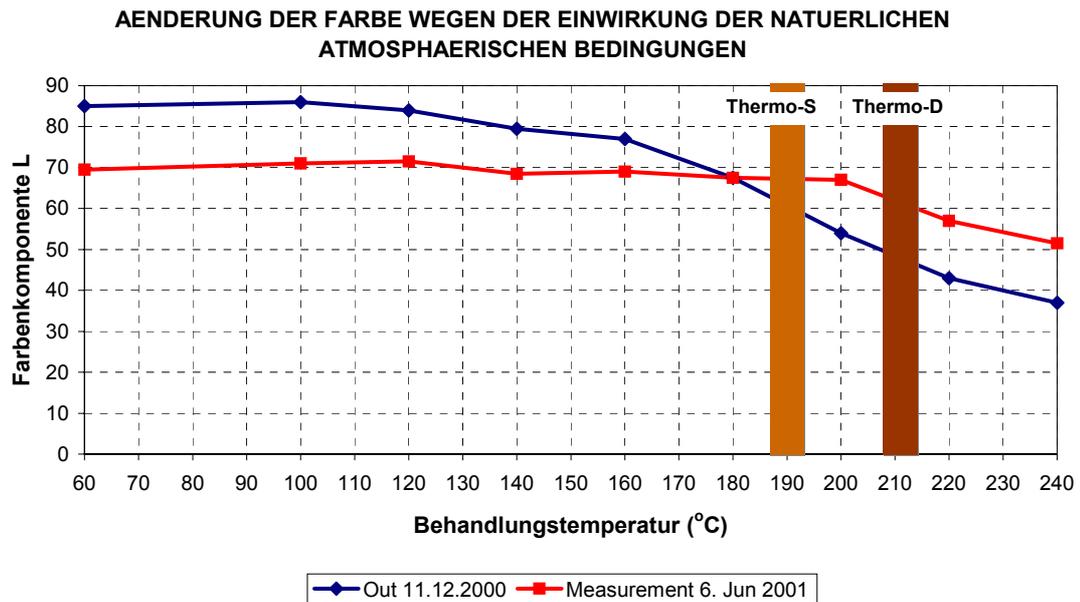


Abb. 16-4. Der Einfluss der Wärmebehandlungstemperatur auf die Änderung der Farbe unter der Einwirkung der natürlichen atmosphärischen Bedingungen. Kiefer, Behandlungsdauer 3 Stunden (Quelle: VTT).

Die Freilandtests wurden unter den Bedingungen, die für die Messung der Beständigkeit des wärmebehandelten Holzes unter Einwirkung der Sonnenstrahlung (Ultraviolettstrahlung) durchgeführt. Entsprechend dem Witterungsverhalten der meisten natürlichen Materialien, wird auch ThermoWood von der Ultraviolettstrahlung beeinflusst. Durch direkte Sonnenstrahlen ändert sich die Oberflächenfarbe nach einiger Zeit von dem ursprünglich braunen Farbton bis zum grauen Farbton. Die Abbildung 16-4. zeigt die Veränderung der Farbenkomponente L im Laufe von sechs Monaten.

Die ursprüngliche ThermoWood Farbe kann durch eine geeignet pigmentierte Beschichtung erhalten werden.

Obwohl der Feuchtigkeitsgehalt und das Quellen und Schwinden beim ThermoWood bedeutend herabgesetzt sind, ruft die Ultraviolettstrahlung kleine Risse auf der Oberfläche der unbeschichteten Paneele hervor. Die Menge der Oberflächenrisse im ThermoWood weisen erst bei höheren Temperaturen eine Verbesserung gegenüber unbehandeltem Holz auf (Abb. 17-4).

Der Einfluss des Wärmebehandlungsprozesses auf das Bewachsen der Oberfläche durch Pilze. Die Risse wurden auf folgende Weise eingestuft:

Größe (0 – 5):

- 0 ohne Risse
- 1 die Risse, die mit Hilfe einer Lupe mit der 10-fachen Vergrößerung zu unterscheiden sind
- 2 die Risse, die ohne Lupe zu sehen sind
- 3 deutlich sichtbare Risse
- 4 die Risse mit der Breite weniger als 1 mm
- 5 große Risse mit der Breite mehr als 1 mm

Dichte (0 - 5):

- 1 ein Riss
- 5 die ganze Oberfläche ist von den Rissen bedeckt

DER EINFLUSS DER TEMPERATUR DER WÄRMEBEHANDLUNG AUF DAS AUFREISSEN DER OBERFLÄCHE UND WACHSTUM DES PILZES

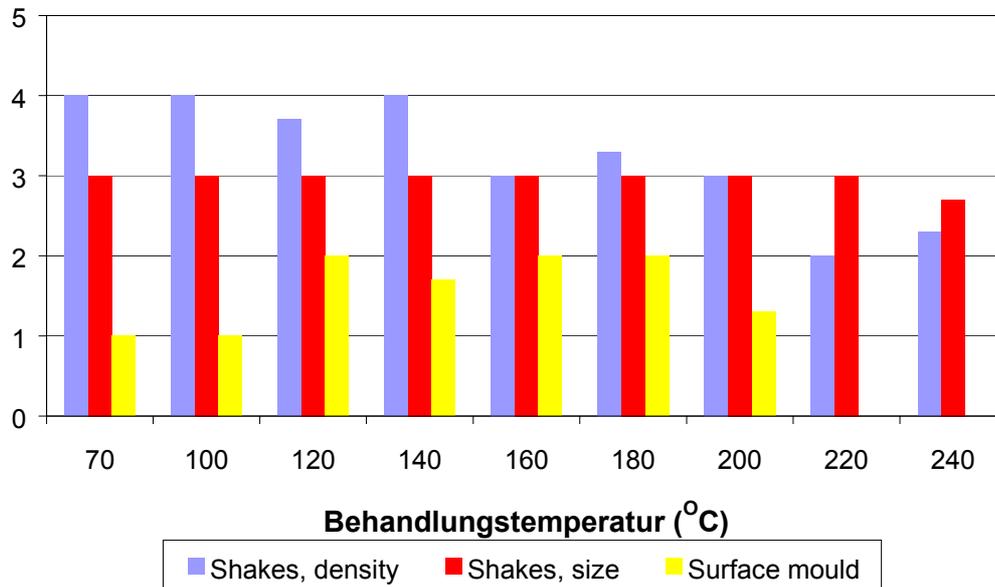


Abb. 17-4. Der Einfluss der Temperatur der Wärmebehandlung aufs Ausreißen der Oberfläche und Wachstum des Pilzes auf den Kieferpaneelen. Die Dauer der Wärmebehandlung ist 3 Stunden. Die Dauer der Einwirkung der natürlichen atmosphärischen Bedingungen - 6 Monate (Quelle: VTT).

Nach dem Einfluss der Sonnenstrahlung (Ultraviolettstrahlung) kann man schließen, dass die Anwendung von pigmenthaltigen Beschichtungen die Rissbildung in der Oberfläche des ThermoWood verringern. Deswegen wird eine Oberflächenbeschichtung dringend empfohlen.

Wetterbeständigkeit von beschichtetem ThermoWood

Über eine Dauer von fünf Jahre wurden Freibewitterungsversuche vom VTT durchgeführt, um das Verhalten von beschichtetem ThermoWood zu studieren und mit unbehandeltem Holz zu vergleichen. Die Paneele wurden während der Bewitterung entsprechend ISO 4628 visuell begutachtet.

Es wurde festgestellt, dass der Feuchtigkeitsgehalt im ThermoWood nur halb so hoch ist, wie die Feuchte im unbehandelten Holz. Unpigmentierte Beizmittel oder Ölfarben schützen weder wärmebehandeltes, noch unbearbeitetes Holz. Diese Beschichtungen werden abgebaut und die Jahresringe beginnen, ebenso, wie bei den Paneelen ohne Beschichtung, sich zu lösen. Paneele mit einer unpigmentierten Beschichtung haben eine starke Tendenz zum Aufreißen gezeigt.

Der Einfluss von ThermoWood auf die Beschichtung wurde bei Freibewitterung über eine Zeit von fünf Jahren beobachtet. Das Verhalten von Acrylfarben mit Säureerhärtung und der Acrylfarben auf Wasserbasis war auf den wärmebehandelten Paneelen besser, als auf unbehandeltem Holz. Die ThermoWood Paneele, die mit diesen Farben beschichtet waren, zeigten kein Abblättern (Abb. 18-4).

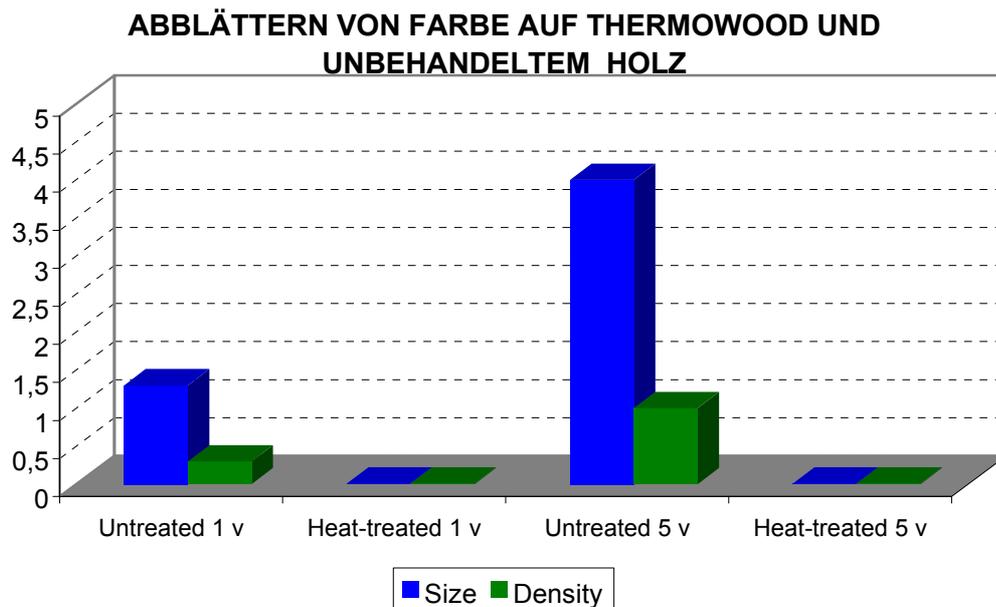


Abb. 18-4. Einfluss von wasserbasierenden Farben auf Kiefer (Quelle: VTT)

Bei der Verwendung von Farben für den Aussenbereich wurden keine wesentlichen Unterschiede auf ThermoWood und unbehandeltem Holz festgestellt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die optimalen Beschichtungssysteme für ThermoWood aus einer ölbasierend Grundierung und einer weiteren Beschichtung als Alkydschicht auf Lösmittelbasis, oder einer wasserbasierenden Akrylschicht bestehen.

4.2.12. Farbe

Die Farbe des Holzes ThermoWood beeinflusst die Temperatur und die Dauer der Wärmebehandlung. Je höher die Temperatur ist, desto dunkler wird das Holz. Die Farbe hängt, wie bei allen weichen Holzarten, auch von den Änderungen der Dichte und von dem Früh- oder Spätholz ab. Im Prinzip, kann man die Färbung im Laufe der Behandlung gut wiederholen. Die Farbe wird mit Hilfe der Komponente L gemessen. Die Möglichkeiten, die Messung vom Wert der Komponente L als Kriterium der Qualitätsüberwachung des Prozesses zu verwenden, wird zurzeit überprüft.

EINFLUSS DER TEMPERATUR DER WAERMEBEHANDLUNG AUF DIE FARBENKOMPONENTE L

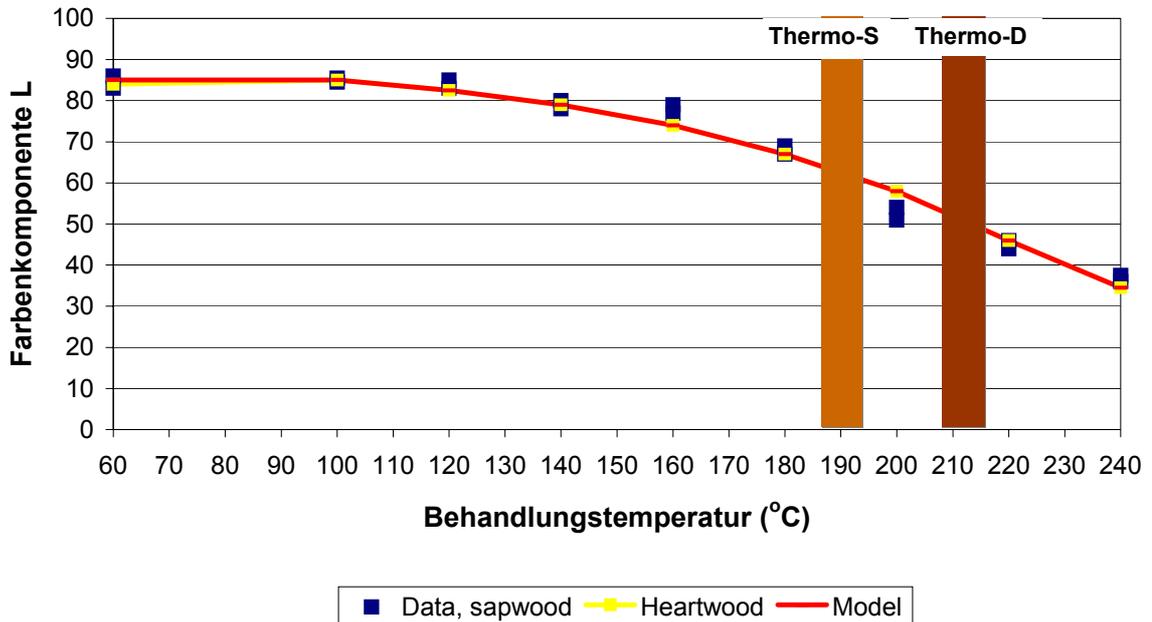


Abb. 19-4. Einfluss der Temperatur der Wärmebehandlung auf die Farbenkomponente L. Kiefer, Dauer der Behandlung 3 Stunden (Quelle: VTT).

Die unten aufgeführte Abbildung zeigt die Farbe der Kieferbretter, die bei verschiedenen Temperaturen behandelt worden sind.



Abb. 20-4. Die Farbe der wärmebehandelten Kiefer. Die Temperaturen der Bearbeitung - von 120 bis zu 220°C, Schritt - 20°C. Bearbeitungsdauer (Photo von VTT).

4.2.13. Stoffemission

Die Stoffemission wurde an wärmebehandelten Kieferbrettern gemessen. Die Muster wurden bei der Temperatur 180°C und 230°C über 4 Stunden wärmebehandelt. Die Tests wurden 7 Wochen (180°C) und 8 Wochen (230°C) nach der Behandlung durchgeführt.

Die Stoffemissionmessungen wurden in der Abteilung der chemischen Technologien von VTT entsprechend der Methodik der Tests KET 3300495 durchgeführt. Die unbehandelte Kiefer weist die grösste Menge der flüchtigen organischen Mischungen, 1486 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \times \text{Stunde}$, auf. Der Hauptteil bestand aus Terpene und es wurde auch eine bedeutende Menge von Alpha - Pinene, Kamphene und Limonene gefunden. Die unbehandelte Kiefer enthielt Hexanal und eine kleine Menge von Furfural- und Essigsäuren.

Das Gesamtvolumen der freigesetzten Emissionen für die wärmebehandelte Kiefer, die nach der Technologie ThermoWood bei der Temperatur 180°C behandelt wurde, beträgt 828 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \times \text{Stunde}$. Das Muster enthielt Terpene, Furfurale, Hexanal und Essigsäure. Das Gesamtvolumen der freigesetzten Emissionen für die wärmebehandelte Kiefer, die nach der Technologie ThermoWood bei der Temperatur 230°C behandelt wurde, betragen nur 235 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \times \text{Stunde}$. Die Emissionen bestanden hauptsächlich aus Essigsäure (110 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \times \text{Stunde}$). Dieses Muster hatte eine unbedeutende Menge von Terpenen. Die Emissionen sind auf Abb. 21-4 gezeigt.

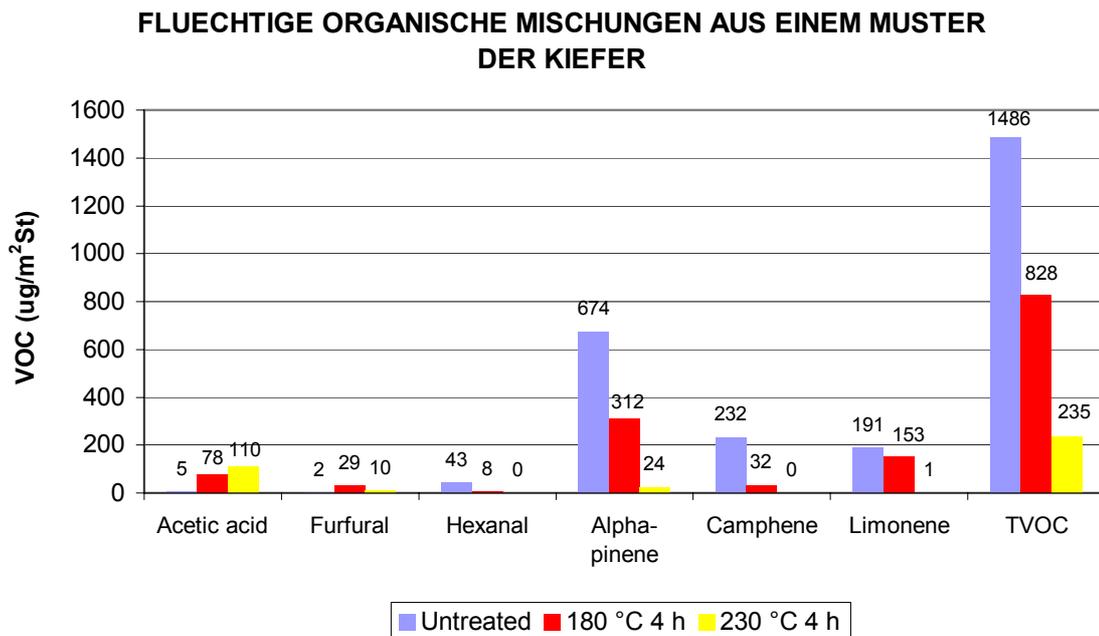


Abb. 21-4. Flüchtige organische *Emissionen* aus einem Muster der Kiefer, das Alter ist 2 Monate (Quelle: VTT).

Der rauchige Geruch vom wärmebehandelten Holz stammt hauptsächlich vom Furfural. Es wurde festgestellt, dass der Geruch nach einiger Zeit verschwindet. Dieser Geruch verschwindet auch bei einer Beschichtung der Oberfläche.

5. Industrielle Bearbeitung von ThermoWood

5.1. Allgemein

Bei der Arbeit mit dem wärmebehandelten Holz sollte, verglichen mit normal getrocknetem Holz, etwas vorsichtiger mit dem Material umgegangen werden, denn es ist anfälliger für mechanische Beschädigungen. Generell wird eine vergleichbare Handhabung, wie mit Harthölzern empfohlen. Es sollten scharfe Werkzeuge benutzt werden. Wie auch bei anderen Holzprodukten sollte das Material entsprechend der späteren Verwendung konditioniert werden.

5.2. Das Sägen

Der innere Druck des Holzes wird bei der Wärmebehandlung abgebaut und so erfolgt nach der Teilung der Holzstücke keine Deformation.

Durch die Wärmebehandlung werden dem Holz die Harze entzogen, sodass die Schneidflächen weniger beansprucht wird und die Strandzeiten sich erhöhen.

Das Sägen von ThermoWood und unbehandeltem Holz verhält sich gleich. An den Aststellen ist kein Ausreissen der Fasern erkennbar, wie es bei gewöhnlichem Holz vorkommt. Weil das Holz nach der Wärmebehandlung sehr trocken ist, stellt der sich verbreitende, feine Staub eine kleinere Schwierigkeit dar.

Aus den genannten Gründen sollte besondere Aufmerksamkeit der Abluftanlage widmen. Das System soll luftdicht und genügend wirksam sein.

Es wird empfohlen feingezähnte Sägeblätter zu verwenden, denn eine zu grobe Zahnung kann ein Ausreissen an der Schnittkante im ThermoWood verursachen. Hartmetallschneiden oder die ähnlichen Schneiden vergrössern die Schleif- und Wartungsintervalle.

5.3. Das Hobeln

Bei dem ThermoWood kann ein Schüsseln auftreten, obwohl im Kapitel über das Quellen und Schwinden eine Verformung nach der Wärmebehandlung nur sehr gering ist. Es ist empfehlenswert beim Hobeln von ThermoWood, das vorher nicht aufgetrennt wurde, die Vorschubrolle durch andere, mit zwei engen Räder, zu ersetzen., So berühren die Vorschubrollen nur das Brett im Kantenbereich der konvexen Oberfläche (siehe Abbildung 1-5.). Es kann auch nur ein enges Rad verwendet und das Holz mit der konvexen Oberfläche nach unten gerichtet werden. Beide Methoden tragen zur Bildung einer flachen Oberfläche beim Hobeln bei. Zusätzlich verringert sich das Risiko des Aufreißens des Materials und der Druck der Vorschubrollen erhöht sich.

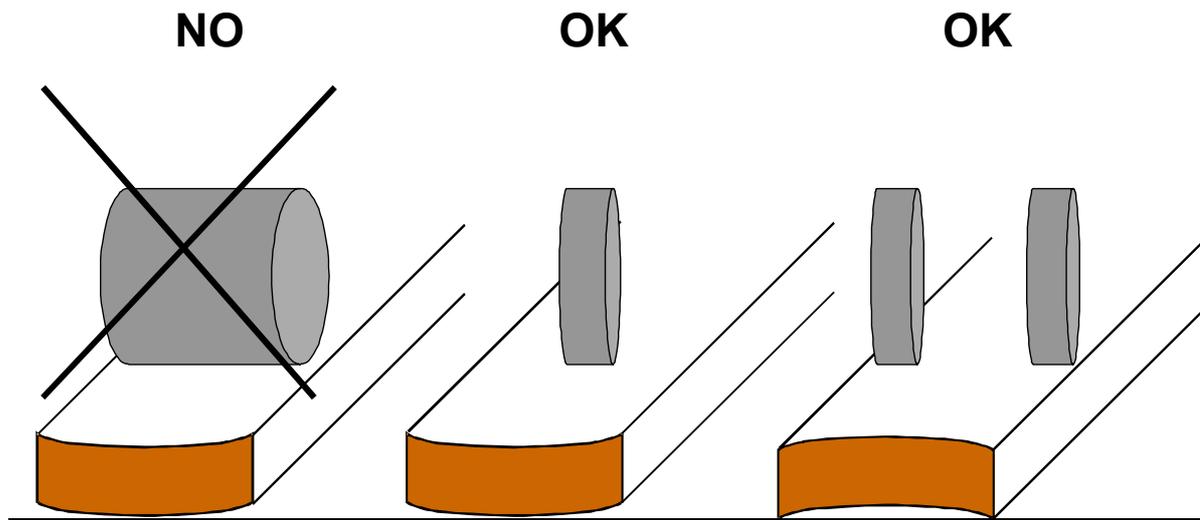


Abb. 1-5. Die empfohlenen Vorschubrollen – zur Vermeidung des Ausreißens der Bretter.

Zur Vermeidung von Rissen wird empfohlen, die Brettoberfläche durch ein vorheriges Auftrennen mit der Bandsäge, oder durch Abrichten zu begradigen. Seinäjoki Polytechnic hat Hobelversuche mit ThermoWood durchgeführt. Es wurden verschiedene Schnittwinkel getestet. Bei diesen Versuchen ergaben alle Schnittwinkel eine gute Oberflächenqualität. Die besten Ergebnisse wurden mit Hartmetallschneiden erzielt, die auch bei der Bearbeitung von harten Holzarten verwendet werden.

Die Versuche zeigten auch, dass ThermoWood beim Hobeln eine kleinere Reibung beim Vorschub verursacht und so zu einem ruhigeren Abhobelungsprozess führt. Dieses hängt mit der geringeren Harzmenge im Holz zusammen. Andererseits sollte wegen der verminderten Festigkeit des Materials der Anpressdruck der Vorschubrollen abgemindert werden, damit die Bretter nicht aufreißen. Gute Ergebnisse wurden mit der in Abbildung 1-5 gezeigten Platzierung der Rollen erzielt. Bei einigen Hobellinien müssen die Vorschubgeschwindigkeiten von beispielsweise 80 m/Min auf 60 m/Min und von 100 m/Min auf 80 m/Min reduziert werden. Bei der Senkung der Vorschubgeschwindigkeit sollte die Drehgeschwindigkeit der Messer entsprechend angepasst werden. Ist das Verhältnis zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der Schneidgeschwindigkeit der Messer zu gross, kann die Oberfläche des Holzes sich Entzündung.

Der Druck der Rollen, die Geschwindigkeit und die übrigen Parameter hängen von der entsprechenden Hobellinie und den Maschinen ab, sodass keine allgemeingültigen Kennwerte eingeführt werden können. Beim Hobeln von ThermoWood sollten die Parameter für jede Hobelmaschine gesondert ermittelt werden.

Es wird berichtet, dass die Maschinen nach der Arbeit mit ThermoWood wenig verschmutzt waren. Dieses hängt mit dem geringen Harzanteil zusammen. Mit Hilfe von ThermoWood kann sogar das Harz, das von vorherigen Hobelungen mit normalem Holz stammt, von den Maschinen entfernt werden.

Um die besten Ergebnisse zu bekommen und das Lösen von Jahresringen zu vermeiden, wird empfohlen das Material faserparallel zu schneiden. Außerdem sollte zur Verbesserung des Hobelergebnisses, die bessere Sichtseite verwendet werden. Es existiert ein enger Zusammenhang zwischen den Typen der Vorschubrollen und dem Druck, der Richtung der Faser, der Verwerfung, der Schärfe der Messer und der Produktivität. Bei einer sorgfältigen Anpassung dieser Parameter kann man das beste Ergebnis bekommen.

5.4. Fräsen

Die entsprechenden Tests wurden vom VTT mit einer CNC-Maschine durchgeführt. Um beim Fräsen eine gute Oberflächenqualität zu bekommen, sollen die Messer gut geschliffen sein. Es entstehen andernfalls Walzgrate. Eine grössere Anzahl von Walzgraten wurde bei der Bearbeitung des Holzes quer zur Faserrichtung beobachtet. Die Hauptprobleme mit den Walzgraten entstanden beim Anfang und Ende des Fräsen, wenn das Messer ins Holz eintaucht und heraustritt. Das Fräsen von wärmebehandeltem Holz ist ähnlich dem von harten und brüchigen Holzarten.

Es wurde festgestellt, dass die Ordnung der Arbeit die Ergebnisse des Holzes beeinflusst. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn hinter dem Fräskopf genügend Material übrig bleibt. Daher sollte eine sorgfältige Arbeitsvorbereitung durchgeführt werden.

Die Schneiden der Fräser werden im Vergleich zum gewöhnlichen Holz langsamer abgenutzt.

5.5. Schleifen

Das Schleifen von ThermoWood entspricht dem Schleifen von unbehandeltem Holz. Für viele Anwendungen ist das Schleifen von ThermoWood nicht notwendig, denn die Oberflächenqualität nach dem Hobeln und Fräsen ist bereits sehr hochwertig.

Der entstehende Schleifstaub hat sehr kleine Teilchen, dass man bei der Einrichtung der Absauganlage berücksichtigen muss. Andererseits ist der Staub leicht und trocken und stellt keine besonderen Forderungen an die Absauganlage. Wie auch bei Staubentwicklung von anderen Hölzern, besteht die Gefahr einer Staubexplosion.

5.6. Verkleben und Verbinden

Verkleben

Beim Verkleben von ThermoWood müssen die entsprechenden Anweisungen der Klebstoffhersteller befolgt werden. In der Anlage 1 sind Empfehlungen von einem der Hersteller gegeben.

Das VTT hat die Verklebbarkeit des wärmebehandelten Holzes mit 1- und 2-komponentigen Zusammensetzungen wie, Polyvinylacetat, Polyvinylalkohol, Resorzinformaldehydharz und Dispersionspolymerisozyanat, untersucht. Die Tests wurden entsprechend DIN 68603 durchgeführt. Die Leimfugenfestigkeit bestimmte man entsprechend EN 392 (Scherversuch). Die Feuchtigkeitsbeständigkeit wurde entsprechend dem Test auf die Schichtenbildung nach EN 302-2 geprüft. Das Eindringen des Klebstoffes in das ThermoWood wurde mit einem Mikroskop untersucht.

Die Verklebbarkeit des Materials hängt von der Wärmebehandlungsklasse ab. Die Schubfestigkeit der Leimfugen wurde durch die Zunahme der Wärmebehandlungstemperatur herabgesetzt. Dieses wird durch die Festigkeitsabnahme des ThermoWood verursacht. Dieser Sachverhalt erklärt den hohen Prozentsatz an Holzbruchanteil (90 - 100 %), wobei die Klebefuge nicht versagt hat.

Das Eindringen des Klebstoffes aus Dispersionspolymerisozyanat ins ThermoWood war hoch, was auf die Werte der Festigkeit einwirken konnte. Die Dispersionspolymerisozyanate gehören zu den schwachbasischen Klebstoffen. Eine lange Presszeit von einigen Stunden in einer kalten Umgebung kann zum besseren Eindringen des Klebstoffes beitragen.

Die Versuche mit wärmebehandeltem Kiefernholz Brettschichtholz herzustellen waren erfolgreich. Sowohl Melamin-Formaldehydharzleim, als auch Resorzinformaldehydharz ergaben gute Resultate. Es wurden die gewöhnlichen Produktionsparameter (Presszeit, Druck usw) benutzt. Die Keilzinkung wurde mit Klebstoff auf der Basis von Melamin-Formaldehydpolymer verklebt.

Die Verleimbarkeit war mit ThermoWood von geringer Behandlungstemperatur besser. Bei der Arbeit mit den Polyvinylazetatklebstoffen soll der Gehalt vom Wasser im Klebstoff auf ein Minimum gebracht werden. Durch die Wärmebehandlung wird die Wasseraufnahmefähigkeit des Holzes gesenkt und so wird auch die Wasseraufnahme aus dem Klebstoff verlangsamt.

Bei einigen Polyvinylazetatklebstoffen können Komplikationen auftreten, da die Wasseraufnahme des ThermoWood verringert worden ist und so die Trockenzeit deutlich verlängert wird. Die Klebstoffe mit chemischem Härter haben eine gewöhnliche Trocknungsdauer.

Alle Tests, die mit Polyurethanklebstoffe durchgeführt wurden, waren erfolgreich. Es sollte aber berücksichtigt werden, dass für die Aushärtung von Polyurethan Wasser vorhanden sein muss. Dieses Wasser kann entweder aus dem Holz, oder aus der Luft absorbiert werden. Die geforderte Feuchtigkeitsmenge hängt vom Klebstoff ab, aber wenn sowohl das Holz, als auch die Luft trocken sind, könnte die Verklebung ungenügend sein.

Beim Verkleben von ThermoWood sollten die Verklebungshinweise, wie Temperatur, Holzfeuchte und Oberflächenanforderungen beachtet werden.

Keilzinkung

Das Institut der Technologien von Seinäjoki hat die Keilzinkenversuche durchgeführt:

- mit vier unterschiedlichen Klebstoffen: Melamin-Formaldehydharzleim, Polyvinylazetat, 2 Arten von Polyurethan
- mit drei Offenzeiten: 15 s, 30 s und 60 s;
- mit sechs Drücken von 1.3 bis 7.8 N/mm² (es entspricht dem Druck in der Klebfuge 0.2–1.2 MPa).

Die Verbindung blieb fest bei allen erprobten Parametern. Nach den Daten dieser Tests betrug der maximale Druck 22 N/mm², was der zehnfache Wert einer normalen Verklebung darstellt.

Für die mechanische Bearbeitung der in solchen Verbindungen verwendeten Keilzinken ist es empfehlenswert, Hartmetallwerkzeuge zu verwenden. Für die Gewährleistung einer festen Klebeverbindung, sollte der Klebstoff auf beide Keilzinkenenden aufgetragen werden.

Da die Arbeit mit stumpfen Schneidwerkzeugen zu Ausbrüchen in der Keilzinkung führt, wird eine besondere Bedeutung der Schärfe der Schneiden zugeschrieben. Es wurde auch festgestellt, dass die niedrigeren Umdrehungen der Schneidköpfe das Risiko einer schlechten Keilzinkung minimiert.

Mehrere Keilzinkungen wurden erfolgreich getestet.

Die industriellen Versuche haben gezeigt, dass das vorhergehende Abhobeln des Materials vor der Herstellung der Keilzinkenverbindung die Produktivität verbessert. Dieses hängt mit dem Verdrehen der Rohware zusammen. Weiterhin verbessert das Hobeln die videogesteuerte Zuschnittsoptimierung.

Mechanische Verbindungsmittel

Das Spalten oder Ausreißen des Materials kann man durch die Verwendung von vorbohrenden Schrauben und Schrauben mit Senkköpfen, oder durch vorbohren verhindern.



Abb. 2-5. Selbstschneidende Schraube.

Die Schrauben werden entsprechend der Anwendung gewählt. Für Aussenanwendungen sollten Schrauben aus rostfreiem Edelstahl gewählt werden.

Die guten Ergebnisse wurden auch mit Druckluftnagelgeräten erzielt. Besonders sorgfältig sollte der Luftdruck und die Einschlagtiefe geregelt werden.

Die reduzierte Spaltfestigkeit und Biegefestigkeit von ThermoWood, sollten bei der Gestaltung der Verbindung berücksichtigt werden. Bei schwierigen Verbindungen sollten diese Bereiche vorab geprüft werden. Grosse Äste (es ist besonders wichtig in Bezug auf den Querschnitt) sind immer ein Risikofaktor für ThermoWood, da diese sehr wenig Harz beinhalten, welches im gewöhnlichen Holz eine Bindung zwischen Ast und den umgebenden Holzfasern herstellt.

Das bessere Stehvermögen von ThermoWood erlaubt Verbindungen mit kleineren Toleranzen, als im gewöhnlichen Holz, zu entwickeln.

5.7. Industrielle Oberflächenbehandlung

ThermoWood weist vergleichbare Fähigkeiten wie unbehandeltes Holz, als Trägermaterial für Beschichtungen auf. Da die Harze aus dem ThermoWood entzogen sind, ist das Risiko des Ausharzens im Astbereich bedeutend herabgesetzt. Deshalb ist eine entsprechende Absperrung der Äste vor der weiteren Bearbeitung der Oberfläche nicht nötig.

Bei der Oberflächenbehandlung sollten die Herstellerangaben berücksichtigt werden. Die Empfehlungen der Hersteller sind in der Anlage 2 aufgeführt.

Die beste Adhäsion für ThermoWood ist auf einer glatten, gehobelten Oberfläche. Die Oberflächen sollen, wie auch bei anderen Materialien, sauber sein.

Ölbasierende Beschichtungen verhalten sich auf ThermoWood, wie auf unbehandeltem Holz. Bei der Verwendung von wasserbasierenden Systemen, muss die verminderte Wasseraufnahmefähigkeit von ThermoWood berücksichtigt werden. Es wurden aber keine Probleme beobachtet. Die wasserbasierenden Systeme weisen ein gutes Ergebnis auf, wenn eine ausreichende Trocknungszeit berücksichtigt wurde. Beschichtungen, die unter der Einwirkung der Ultraviolettstrahlung erhärten, haben gute Ergebnisse neben den Öl- und Wachsstoffen gezeigt.

Es wurden unterschiedliche industrielle Beschichtungssysteme einer Freibewitterung ausgesetzt, wobei die Ergebnisse noch nicht vorliegen.

Versuche haben gezeigt, dass für den Grundieranstrich ein erhöhter Materialaufwand zu berücksichtigen ist. Die Lack- und Farbstoffe, die für die Anwendung mit ThermoWood empfohlen sind, sind in den Anlagen aufgezählt.

5.8. Praktische Erfahrung der finnischen Holzbearbeitungsgesellschaft

Im Folgenden sind die Kommentare zu den Ergebnissen eines technischen Spezialisten der entsprechenden finnischen Gesellschaft angeführt. Die Gesellschaft arbeitet erfolgreich seit einigen Jahren mit ThermoWood.

Rohstoff

Die Gesellschaft arbeitete mit der wärmebehandelten Kiefer, Fichte, Espe und Birke.

- Espe: die Ergebnisse sind gut, aber die Menge von Espe ist sehr begrenzt
- Birke: gute Ergebnisse und bessere Verfügbarkeit als bei der Espe
- Kiefer und Fichte: Holz mit kleinen frischen Äste ist gut; die größeren trocknen Äste beinhalten ein Problem; gute Verfügbarkeit
- Meistens kaufte man das Holz mit Übermaß ein. Durch die Wärmebehandlung deformiert sich der Brettquerschnitt, was berücksichtigt werden muss.

Sägen

- Gewöhnliche Maschinen / Werkzeuge, sollten gut geschliffen sein.
- Keine Probleme mit Längs- oder Quersägen
- Innere Spannungen im wärmebehandelten Holz fehlen
- Struktur des Holzes ist der Struktur der harten Holzarten ähnlich, das Werkzeug wird entsprechend abgenutzt.

Abhobeln

- Die Gesellschaft verwendete gewöhnlichen Maschinen / Schneiden
- Die Maschinen und Schneiden müssen in einem guten technischen Zustand und gut geschliffen sein.
- Die Schneidetechnik beeinflusst die Ergebnisse der Arbeit
- Die Schneiden werden ebenso, wie bei der Arbeit mit harten Holzarten abgenutzt
- Espe, Birke und Kiefer sind die besten Materialien für diese Arbeit
- Fichte fordert etwas mehr Aufmerksamkeit

Fräsen

- Die Schneidgeschwindigkeit, Schneidwinkel und Schärfe beeinflussen stark das Ergebnis.

Bearbeitung mit Schleifpapier

- Die Nutzung der Schleifwerkzeuge ruft keine wesentlichen Probleme hervor.
- Das Schleifpapier wird mit der gleichen Geschwindigkeit, wie auch bei der Bearbeitung von harten Holzarten abgenutzt.

Nagel- und Schraubenverbindungen

- Mit einem pneumatischen Nagelhammer werden gute Ergebnisse erzielt.
- Es wird empfohlen die Nägel bei konventioneller Nagelung zu stauchen, oder vorzubohren.
- Für Schrauben solle vorgebohrt werden.

Verkleben

- Die Presszeit und Aushärtungszeit ist deutlich länger als bei gewöhnlichem Holz.
- Die Trockenzeit kann man bei höheren Temperaturen verringert werden.

Beschichtungen

- Die gewöhnlich Beschichtungssysteme sind anwendbar
- Unbeschichtete Oberflächen vergrauen

- Wasserbasierende Systeme können verwendet werden.

Lagerung des Materials

- Das ThermoWood sollte trocken und geschützt gelagert werden.

5.9. Gesundheitsschutz und Arbeitssicherheit

Zwischen ThermoWood und gewöhnlichem Holz gibt es keine wesentlichen Unterschiede in Bezug auf den Gesundheitsschutz und die Arbeitssicherheit.

Das ThermoWood hat einen rauchigen Geruch, der wahrscheinlich von dem Furfural stammt. Wie im Abschnitt 4.2.13 gezeigt wurde, sind die flüchtigen organischen Verbindungen vom ThermoWood nur ein Teil der Komponenten der gewöhnlichen Kiefer.

Giftige oder schädliche Komponenten sind im ThermoWood nicht gefunden worden. Ein solches Holz wurde sogar schon als Knochensersatz erprobt.

Die Technische Universität von Tampere hat zusammen mit dem regionalen Institut für Arbeitshygiene von Lappeenranta den Einfluss von ThermoWood auf die Gesundheit untersucht. Die Teilchen vom ThermoWood-Staub sind feiner als der Staub von unbehandeltem Holz. Es sind keine krebserregenden Verbindungen festgestellt worden.

Es sollte auf eine ausreichende Abluftanlage /Absaugung geachtet werden.

Personen, die täglich mit dem Staub in Kontakt kommen, sollten eine geeignete Schutzmaßnahme treffen.

6. Anwendung von ThermoWood®

6.1. Arbeiten mit ThermoWood

Das Sägen von ThermoWood verhält sich wie das Sägen von unbehandeltem Holz. Es wurde keine besondere Rissebildung um die Äste, im Vergleich zu einem gewöhnlichen Holz gefunden.

Die Arbeit mit üblichem Handwerkzeug - zum Beispiel, Sägen, Bohren und Fräsen - ist leicht. Die Bearbeitung mit Schleifpapier gibt ausgezeichnete Ergebnisse. Das Bohren ist sogar in Astbereichen leicht.

Das ThermoWood hat eine erhöhte Brüchigkeit. Deswegen sollte das Holz vorsichtig behandelt werden... Lange Bretter sollten stets an beiden Enden angehoben werden.

Durch die Bearbeitung von ThermoWood entsteht oft feiner und trockener Sägestaub, der sich leicht verteilt. Daher wird die Verwendung eines geeigneten Atemschutzes empfohlen.

6.2. Verbindungsmittel

Nagelverbindungen

Für das Nageln in ThermoWood kann man ein automatisches Nagelgerät verwendet werden. Die Einschlagtiefe sollte so gewählt werden, dass der Nagel im Brett leicht versenkt wird (Abb. 1-6.).

Mit einem gewöhnlichen Hammer erhöht sich das Risiko, die Ware zu beschädigen. Daher sollte für die letzten 2-3mm ein Körner verwendet werden.

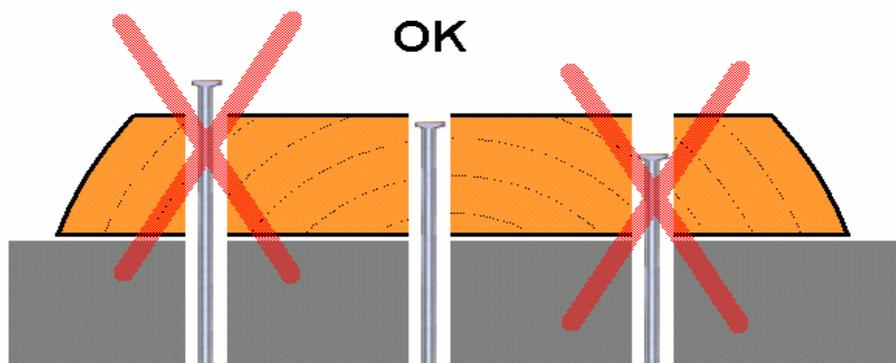


Abb. 1-6. Die Zeichnung, die die richtige Tiefe des Eindringens eines Nagels zeigt. Die richtige Tiefe des Eindringens beträgt ca. 1 mm unter der Oberfläche des Materials.

Die Typen der Nägel

Es sollten stets Nägel aus nichtrostendem Edelstahl verwendet werden. Bei der Verwendung von automatischen Nagelgräten können auch galvanisierte Nägel verwendet werden, besonders wenn anschließend eine Oberflächenbeschichtung folgt. Am besten für die Verhinderung des Aufspaltens passen Nägel mit einem kleinen sphärischen Kopf.

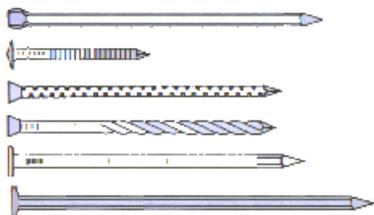


Abb. 2-6. Einige der passenden Typen der Nägel; dabei am meisten empfohlen sind die Nägel mit einem kleinen sphärischen Kopf, die oben gezeigt sind.

Schraubenverbindung

Am Brettende sollte stets vorgebohrt und gesenkt werden, ähnlich wie es bei anderen spröden Materialien gemacht wird. Die Schrauben aus rostfreiem Stahl mit den Senkköpfen eignen sich besonders für die Befestigung im Aussenbereich und in feuchten Umgebungen. Durch die Verwendung von selbstbohrenden Schrauben kann auf das Vorbohren verzichtet werden.



Abb. 3-6. Selbstschneidende Schraube.

6.3. Verkleben unter Werkstattbedingungen

Beim Zusammenkleben von ThermoWood sollten die entsprechenden Betriebsanweisungen der Hersteller der Klebstoffe befolgt werden. In der Anlage 1 sind die Empfehlungen von einem der Hersteller aufgeführt.

Die Verklebung von ThermoWood mit niedriger Behandlungstemperatur wiesen bessere Ergebnisse auf, als bei höheren Behandlungstemperaturen.

Bei der Verwendung von wasserbasierenden Klebstoffen (z.B. Polyvinylacetatklebstoff) kann das ThermoWood das Wasser nur weniger und langsam aufnehmen, sodass mit einer verlängerten Presszeit gerechnet werden sollte. Bei der Arbeit mit den Polyvinylacetatklebstoffen soll der Wassergehalt im Klebstoff minimiert werden.

Nach den existierenden Daten funktionieren die Polyurethankleber mit Holz ThermoWood gut. Alle Tests, die mit Polyurethanklebern durchgeführt worden sind, waren erfolgreich. Es muss berücksichtigt werden, dass zum Aushärten des Klebers Wasser benötigt wird. Dieses Wasser kann entweder aus dem Holz, oder aus der Luft aufgenommen werden. Die notwendige Menge der Feuchtigkeit hängt vom Kleber ab, aber wenn sowohl die Luft, als auch das Holz sehr trocken sind, werden schlechte Klebeverbindungen entstehen.

Die Klebstoffe mit chemischem Härter, wie, zum Beispiel, Melamin-Formaldehydharzklebstoff, oder Resorzinformaldehydharz, haben eine konstante Trocknungsdauer und Parameter des Zusammenklebens.

6.4. Oberflächenbearbeitung

In der Regel, ist das ThermoWood als Grundlage für eine Oberflächenbearbeitung dem unbehandelten Holz gleich zu setzen. Doch beeinflusst der Prozess ThermoWood® einige Eigenschaften, die sich auf die Bearbeitung der Oberfläche beziehen. Die herabgesetzte Gleichgewichtsfeuchtigkeit des Holzes verbessert seine Stabilität und das verringert das Risiko des Aufreißens und des Abblätterns der Schicht an der Oberfläche. Die wasserbasierenden Beschichtungssysteme brauchen mehr Zeit für die Trocknung, weil die Fähigkeit vom ThermoWood zur Wasseraufnahme neben dem Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt herabgesetzt wird. Da die hohe Temperatur der Bearbeitung die Harze aus dem Holz treibt, bedürfen die Äste keiner besonderen Bearbeitung.

Unter der Einwirkung der Ultraviolettstrahlung entfärbt sich die Oberfläche, es entstehen mikroskopische Risse, die Oberfläche nimmt ein gealtertes Aussehen an. Zum Erhalt der ursprünglichen Holzfarbe und der Oberflächenqualität wird eine Beschichtung empfohlen. Wenn das Grundierungsmittel manuell aufgetragen wird, ergeben sich die besten Ergebnisse der Bearbeitung der Oberfläche bei der Benutzung von Ölfarben. Wenn das Material mit einem schon aufgetragenen Grundierungsmittel geliefert wird, kann man die passende öl-/wasserbasierende Beschichtung auftragen.

Die Beschichtung sollte zur Verhinderung des Vergrauungsprozesses mit Pigmenten ausgestattet sein. Häufig wird die Oberflächenbeschichtung mit einem transparenten System durchgeführt, das dem Farbton von ThermoWood entspricht. Verschiedene Arten der Beschichtung haben unterschiedliche Wartungsintervalle.

Das ThermoWood sollte vor der Montage allseitig beschichtet werden. Der Schlussanstrich kann dann nach der Montage auf der Sichtseite erfolgen. Wenn die Beschichtung aus pflanzlichen Ölen hergestellt ist, sollte ein Antimykotika hinzugefügt werden.

6.5. Anwendung vom ThermoWood für die Saunen

Wegen der hohen Hygieneigenschaften, der Farbe und der verkleinerten Wärmeleitfähigkeit passt ThermoWood® ausgezeichnet für Saunen. Doch die schnellen Zyklen der Befeuchtung und des Austrocknens können in einer Hochtemperaturumgebung zum Aufreißen der Bänke auf den Stirnseiten führen. Zur Vermeidung ist empfohlen, die Stirnseiten mit Öl, Wachs oder Lack zu schützen.

6.6. Wartung

Verschiedene Arten der Oberflächenbeschichtung haben verschiedene Wartungsintervalle. Je höher der Pigmentanteil ist, desto länger ist das Intervall.

Die Einwirkung der Umwelt und das Klima leisten den entscheidenden Einfluss auf die Haltbarkeit der Beschichtung. Die Sonnenstrahlung und die Feuchtigkeit sind die Hauptprobleme für die Beschichtung. Diese Faktoren bedeuten zum Beispiel, dass die südliche Seite des Gebäudes grössere Pflege, als nördliche Seite fordert. Außerdem sind die Beschichtungen an Gebäuden im kontinentalen Klima dauerhafter, als im Meerklima.

6.7. Gesundheitsschutz und Arbeitssicherheit

Es gibt keine wesentlichen Unterschiede für den Gesundheitsschutz und den Arbeitssicherheit zwischen ThermoWood und einem gewöhnlichen Holz.

Das ThermoWood hat den Geruch des Rauches, der, wahrscheinlich, von den chemischen Komponenten, die Furfural genannt werden, stammt. Obwohl der Geruch leicht zu riechen ist und stärker als beim unbehandelten Holz zu sein scheint, betragen die flüchtigen organischen Verbindungen vom ThermoWood nur ein Teil der Komponenten der gewöhnlichen Kiefer.

Giftige oder schädliche Komponenten sind im ThermoWood nicht gefunden worden. Ein solches Holz wurde sogar als Knochensersatz erprobt. Bei Splintern sollten diese so schnell wie möglich aus dem Körperteil entfernt werden.

Der Staub von ThermoWood hat deutlich kleinere Partikel, als der Staub von unbehandeltem Holz. Dieser feine Staub kann für Asthmatiker Probleme erzeugen.

7. Bearbeitung und Lagerung

7.1. Allgemein

Das ThermoWood sollte trocken und abgedeckt eingelagert werden. Es sind keine besonderen Temperaturen für die Lagerung vorgeschrieben.

Die Pakete sollten waagrecht auf ausreichend Unterstützungen gelagert werden. Dabei ist der direkte Erdkontakt zu vermeiden.

Vor der Verwendung sollte das ThermoWood an die geforderten Standortbedingungen angepasst werden.

Die Verpackung soll nur unmittelbar vor der Anwendung der Produktion geöffnet werden.

7.2. Reste und Abfall

Das ThermoWood ist ein natürliches Produkt ohne jegliche chemischen Zusätze. Wenn das Material unbehandelt ist, also ohne Klebstoff oder Beschichtung vorliegt, kann es wie herkömmliches, natürliches Holz entsorgt werden.

Bei der thermischen Verwertung entstehen ca. 30% weniger Energie, als beim unbehandelten Holz, da ein grosser Teil der energiereichen Bestandteile in der Wärmebehandlung entzogen wurden. Beim Verbrennen von ThermoWood ist die Flamme kleiner und es entstehen weniger Rauch und schädlichen Gase. Die Entflammbarkeit ist wegen der geringeren Holzfeuchte niedriger. Es gibt keinen wesentlichen Unterschied in der Zusammensetzung des Rauches beim Verbrennen vom ThermoWood und gewöhnlichem Holz.

Es ist möglich durch Beimischung von normalen Sägespänen aus ThermoWood Pellets herzustellen. Die Sägespäne von den normalen weichen Holzarten sind nötig, um das Granulat zusammenzuhalten.

8. Oft gestellte Fragen und die Antworten

1. **Ist es möglich verschiedene Holzarten der Wärmebehandlung unterziehen?**
Die Wärmebehandlung von verschiedenen Holzarten, wie Kiefer, Fichte, Birke und Espe, ergaben sehr positive Ergebnisse.
2. **Wie lange wirkt der Effekt der Wärmebehandlung ThermoWood?**
Obwohl noch keine Langzeiterfahrungen vorliegen, haben Versuche gezeigt, dass die Dauerhaftigkeit von ThermoWood gegenüber holzerstörenden Pilzen deutlich besser ist als die der unbehandelten Holzart und ähnlich der Dauerhaftigkeit von Tropenhölzern wird. Neben der Dauerhaftigkeit beeinflussen weitere Faktoren wie Wartung und Pflege die Lebensdauer von Holz.
3. **Warum hat ThermoWood so große Lebensdauer, obwohl die Harze und Inhaltsstoffe fehlen?**
Die Lebensdauer vom ThermoWood hängt mit der Modifikation der Holzstruktur zusammen. Die Hemizellulose werden zerstört und den Pilzen wird so der Nährboden entzogen.
4. **Werden beim Behandlungsprozess Chemikalien zugesetzt?**
Die Wärmebehandlung wird ausschließlich mit Wärme und Wasserdampf durchgeführt.
6. **Kann ThermoWood im Erdkontakt verwendet werden?**
Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass ThermoWood sogar im Erdkontakt nicht verfault. Es werden nur die Festigkeitseigenschaften beim ständigen Kontakt mit Wasser oder mit sehr feuchter Erde reduziert. Der genaue Mechanismus ist noch nicht geklärt. Deswegen ist es empfehlenswert, das ThermoWood nicht mit direktem Erdkontakt zu verwenden.
7. **Welche Oberflächenbehandlung ist für Aussenanwendungen ?**
Das ThermoWood kann ohne Beschichtung aussen verwendet werden. Dabei vergraut das ThermoWood genauso wie unbehandeltes Holz. Der Beschichtungstyp sollte je nach Verwendungszweck gewählt werden. Nur durch eine pigmentierte Beschichtung kann der Vergrauungsprozess verlangsamt werden.
8. **Ist der Geruch vom ThermoWood schädlich?**
Die Tests haben gezeigt, dass keine schädlichen Stoffe vom ThermoWood entstehen.
9. **Hält der Geruch an?**
Der Geruch verschwindet völlig durch eine Oberflächenbeschichtung. Falls ThermoWood ohne Beschichtung verwendet wird, nimmt der Geruch langsam ab, bis er kaum noch wahrnehmbar ist.
10. **Ob man ThermoWood kleben darf?**
Die praktischen Erfahrungen haben gezeigt, dass ThermoWood mit unterschiedlichen Klebstoffen verklebt werden kann. Bei der Verwendung eines wasserbasierenden Leims (zum Beispiel PVA), sollte die herabgesetzte Fähigkeit der Wasseraufnahme bei der Trockenzeit berücksichtigt werden.
11. **Darf ThermoWood für die tragenden Konstruktionen verwendet werden?**
Weil das genaue Verhalten von ThermoWood bei statischer Beanspruchung nicht bekannt ist und zu wenig Versuchsergebnisse vorliegen, darf ThermoWood nicht für tragende Konstruktionen verwendet werden.

Bibliografie

Alén, R., Puun rakenne ja kemiallinen koostumus, luentomuistiinpanot luentosarjasta, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Soveltava kemia, Jyväskylä, 1998.

Brunow, G., Lundquist, K. ja Gellerstedt, G., Ligniini. Kirjassa: Sjöström, E. ja Alén, R., (toim.), Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking, Springer-Verlag, Berliini, Saksa, 1999, s. 77-92.

Fengel, D. ja Wegener, G., Wood - Chemistry, Ultrastructure, Reactions, Walter de Gruyter, Berliini, Saksa, 1989, s. 26-344.

Funaoka, M., Kako, T. ja Abe, I., Condensation of lignin during heating of wood, Wood Sci. Technol., 24(1990)277-288.

Hietala, S., Maunu, S.L., Sundholm, F., Jämsä, S. and Viitaniemi, P. Structure of Thermally Modified Wood Studied by Liquid State NMR Measurements. *Holzforschung*, submitted, 2001.

Iivessalo-Pfäffli, M.-S., Puun rakenne, kirjassa: Puukemia (toim. W.Jensen), Teknillisten Tieteiden Akatemia, suomi, 1977, s. 7-81.

Juppi, T., Työilman puupölypitoisuus lämpökäsiteltyä ja muulla tavalla kuivattua puuta hiottaessa, Projekti- ja seminaarityö, Mikkelin ammattikorkeakoulu, 1999, 24 s.

Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. 2000. Long-term natural weathering of coated ThermoWood. *Pigment & Resin Technology* . Vol. 29 (2000) No: 2, 68 - 74.

Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. 1999. Performance of coated heat-treated wood. *Surface Coatings International JOCCA Journal of the oil & colour chemists' association*. Vol. 82 (1999) No: 6, 297 - 300.

Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. 1988. Moisture behaviour of coated thermowood. 5th Conference on Wood - Coatings - Moisture. VTT, Espoo, 20 march, 1998.

Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. 1988. Performance of the coated Thermowood. *Advances in exterior wood coatings and CEN standardisation*. Brussels, BE, 19 - 21 Oct. 1998. Paint Research Association, Teddington. 9 p. Paper : 22.

Jämsä, S., Viitaniemi, P. 1998. Heat treatment of wood. Better durability without chemicals *Nordiske Trebeskyttelsesdager*. Lofoten, NO, 13 - 16 Aug. 1998. *Nordiske Trebeskyttelseråd* (1998), p. 47 - 51.

Kotilainen, R., Chemical changes in wood during heating at 150-260 °C, Väitöskirja, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Soveltava kemia, Jyväskylä, 2000.

Kotilainen, R., Alén, R., Puhakka, I. ja Peltola, P., A rapid spectrometric /PLS method for evaluating rotting test results from heat-treated wood products, poster, CAC-2000, 7th International Conference on chemometrics in Analytical chemistry, Antwerpen, Belgia, 16.-20.10. 2000.

Kärkkäinen, T., Männyn lämpökäsittelyssä haihtuvien reaktiotuotteiden koostumus ja niiden poistaminen kondenssivesistä, Erikoistyö, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Soveltava kemia, Jyväskylä, 2000.

Liitiä, T., Maunu, S.-L. ja Hortling, B., Solid-state NMR studies of residual lignin and its association with carbohydrates, *J. Pulp Paper Sci.*, 16(2000)323-330.

Mali, J., Koskela, K. ja Kainulainen, K., Stellac® Wood- prosessilla lämpökäsitellyn puun ominaisuudet, Tutkimusraportti, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennustekniikka, Puutekniikka, Espoo, 2000.

Marttinen, J., Lämpökäsitellyn puun laadunvalvontajärjestelmän jatkokehittäminen, insinööriyö, Mikkelin ammattikorkeakoulu, Tekniikan koulutusyksikkö, metsätalouden ja puutekniikan koulutusohjelma, puutuotetekniikan suuntautumisvaihtoehto, Mikkeli, 2001.

Mikkola, E. ja Hakkarainen, T., Effect of thermal treatment on reaction to fire classification of wood, Tutkimusraportti RTE896/01, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Rakennustekniikka, Espoo, 2001.

Myllynen, T., Lämpökäsitellyn puun höyläystesti, tutkimusseloste, Ympäristötekniikan instituutti, Mikkeli, 2000.

Möller, K. ja Otranen L., Puun lämpökäsittely, Ympäristötekniikan instituutin julkaisuja 4, Ympäristötekniikan instituutti, Mikkeli, 1999.

Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jämsä, S., Viitaniemi, P. Effects of heat treatment on the behaviour of extractives in softwood. *Wood Science and Technology*, submitted 2001.

Peltomäki, J., Lämpökäsitellyn puun ulkokenttätestaus eri maalisysteemeillä, tutkimusseloste, Teknos Winter Oy, 1998.

Pouru, M., Peräkorpi, K. ja Lehtonen, J., Testausseleste 00/16, Mikkelin ammattikorkeakoulu, ympäristölaboratorio, Mikkeli, 2000.

Puhakka, I., Sulfaattimassan jäännösligniinin kemiallinen rakenne, Pro gradu, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Soveltava kemia, Jyväskylä, 2001.

Puhakka, I. ja Peltola, P., Spektroskopisten mittausten ja kaasunläpäisyn soveltuvuus lämpökäsitellyn puun laadunvalvontaan ja prosessinohjaukseen, Erikoistyö, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos, Soveltavan kemian osasto, Jyväskylä, 2000.

Rusche, H., Die Thermisch Zersetzung von Holz bei Temperaturen bis 200 °C- Erste Mitteilung: Festigkeitseigenschaften von Trockenem Holz Nach Thermischer Behandlung, *Holz Roh Werkst*, 31(1973)273-281.

Sailer, M., Rapp, A.O. ja Leithoff, H., Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment, 31st Annual Meeting of the international research group on wood preservation, Kona, Hawaii, USA, 14.-19.2000, IRG/WP 00-40162, s. 3-17.

Sakakibara, A., Chemistry of lignin. Kirjassa: Hon, D.N.-S. ja Shiraishi, N., (toim.), *Wood and Cellulosic Chemistry*, Marcel Dekker, New York, USA, 1991, s. 113-120.

Shafizadeh, F., The chemistry of pyrolysis and combustion. Kirjassa: Comstock, M.J., (toim.), *Chemistry of solid wood*, American chemical society, Washington D.C., USA, 1984, s. 489-529.

Sivonen, H., Maunu, S.L., Sundholm, F., Jämsä, S. and Viitaniemi, P. Magnetic Resonance Studies of Thermally Modified Wood. *Holzforschung*, submitted 2001.

Sjöström, E., Wood Chemistry- Fundamentals and Applications, 2. painos, Academic Press, San Diego, USA, 1993, 293 s.

Syrjänen, T. ja Kangas, E., Heat treated timber in Finland, 31st Annual Meeting of the international research group on wood preservation, Kona, Hawaii, USA, 14.-19.2000, IRG/WP 00-40158, s. 2-10.

Tarvainen, V., Forsén, H. ja Hukka, A., Männyn ja kuusen kuumakuivauskaavojen kehittäminen ja kuivatun sahatavaran ominaisuudet, VTT julkaisuja 812, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1996, 99 s.

Torniainen, P., Lämpökäsittelyn vaikutus koivun kovuuteen, Ympäristötekniikan instituutin julkaisu, Ympäristötekniikan instituutti, Mikkeli, 2000.

Up-grading of non durable wood species by appropriate pyrolysis treatment (PYROW). Confidential, a brief summary of the results is published at Up-grading of non durable wood species by appropriate pyrolysis thermal treatment. EU Brite-Euram III-program, project BRE-CT-5006. 30.3.1998.

Viitanen, H., Jämsä, S., Paajanen, L., Viitaniemi, P. 1994. The effect of heat treatment on the properties of spruce. Preliminary report. Paper prepared for the 25th Annual Meeting, Bali, Indonesia May 29 - June 3. 1994.

Viitaniemi, P. ja Jämsä, S., Heat treatment of wood, esitelmä Puu ja Metsä 2001-messujen yhteydessä järjestetyssä seminaarissa 6.9.2001.

Viitaniemi, P. ja Jämsä, S., Puun modifiointi lämpökäsittelyllä, VTT julkaisuja 814, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 1996.

Viitaniemi, P., Jämsä, S., Paajanen, L. Modifioidun puun reaktiomekanismit. Metsäalan tutkimusohjelma Wood Wisdom. Vuosikirja 1999. Raportti 2. Paavilainen, L. (toim). Metsäalan tutkimusohjelma. Helsinki (2000), s.121 - 125 ISBN952-9621-88-4.

Viitaniemi, P., Jämsä, S., Paajanen, L. Modifioidun puun reaktiomekanismit. Metsäalan tutkimusohjelma Wood Wisdom. Vuosikirja 1998. Raportti 1/1999. Paavilainen, L. (toim). Metsäalan tutkimusohjelma. Helsinki (1999), s.103 - 105 ISBN 951-53-1434-8.

Viitaniemi, P., Jämsä, S., Vuorinen, T., Sundholm, F., Maunu, S.-L., Paakkari, T. Modifioidun puun reaktiomekanismit, hanke-esittely. Wood Wisdom Metsäalan tutkimusohjelman tiedotuslehti (1999) No: 2, 3 - 5.

Patent application FI 20000101.2000. Menetelmä lämpömodifioidun puun modifiointiasteen toteamiseksi. VTT, Finland, (Viitaniemi, P., Jämsä, S. ja Sundholm, F.).Appl.. 20000101, 18.1.2000. 13 p.

Pat. FI 104285 1999. Menetelmä selluloosapohjaisten tuotteiden biohajoamiskestävyyden ja mittapysyvyyden parantamiseksi. VTT (Viitaniemi, Pertti; Jämsä, S.; Ek, Pentti; Viitanen, Hannu). Hakemusnumero 955391, hakemispäivä 09.11.95. Julkaisupäivä 15.12.99. 17 s. + liitteet 12 s.

Pat.US-5678324, 1997. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products. VTT (Viitaniemi, P., Jämsä, S., Ek, P. and Viitanen H.) Appl.545791, 13.5.1994. Publ. 21.10.1997. 18 p.

Pat. EP 0695408 (BE,DE,FR,ES,IT,AT,GR,PT,NL,IE,GB,CH), 2001. Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products. VTT (Viitaniemi, P., Jämsä, S., Ek, P. and Viitanen H.). Appl. 94915166.6, 13.5.1994. Publ. 10.1.2001.

Pat. FI 104286. 1999. Menetelmä puun sisähalkeamien estämiseksi. VTT (Viitaniemi, Pertti; Jämsä, Saila; Ek, Pentti ja Ranta-Maunus Alpo). Hakemusnumero 942209, 11.05.94. Julkaisupäivä 15.12.99. 6 s. + liitt. 4 s.

Pat. FI 103834, 1999. Menetelmä puun kuivaamiseksi. VTT (Viitaniemi, Pertti; Jämsä, Saila; Ek, Pentti). Hakemusnumero 942210, hakemispäivä 11.05.1994. Julk. 30.09.99. 6 s. + liitt. 4 s.

Pat. EP-0759137 (SE, DK, NL, GB, FR, DE), 1998. Method for processing of wood at elevated temperatures. VTT (Viitaniemi, P., Ranta-Maunus, A., Jämsä, S. and Ek, P). Appl. EP95918005, 11.5.1995. Publ.4.2.1998. 10 p.