

Färbung und Farbstabilisierung von Massivholz mit niedrigmolekularen Melamin- und Phenol-Kondensationsharzen

Bodo Caspar Kielmann

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN 

HÖLZ



Färbung und Farbstabilisierung von
Massivholz mit niedrigmolekularen Melamin- und
Phenol-Kondensationsharzen





Färbung und Farbstabilisierung von Massivholz mit niedrigmolekularen Melamin- und Phenol-Kondensationsharzen

Dissertation

zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades
„Doctor rerum naturalium“
der Georg-August-Universität Göttingen

im Promotionsprogramm Wood Biology and Wood Technology
der Georg-August-University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von

Bodo Caspar Kielmann

aus Langenfeld, Rheinland

Göttingen, 2019



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2019

Zugl.: Göttingen, Univ., Diss., 2019

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2019

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2019

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7024-3

eISBN 978-3-7369-6024-4

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



Mitglieder der Prüfungskommission:

Referent: **Prof. Dr. Carsten Mai**

Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Burckhardt-Institut,
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität
Göttingen, Deutschland

Korreferent: **Prof. Dr. Holger Militz**

Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Burckhardt-Institut, Fakultät für
Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen,
Deutschland

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Christian Ammer

Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen, Burckhardt-Institut, Fakultät
für Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen,
Deutschland

PD Dr. habil. Christian Brischke

Abteilung Holzbiologie und Holzprodukte, Burckhardt-Institut, Fakultät für
Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen, Deutschland

Prof. Dr. Alireza Kharazipour

Abteilung Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, AG Chemie und
Verfahrenstechnik von Verbundwerkstoffen, Büsgen-Institut, Fakultät für
Forstwissenschaften und Waldökologie, Georg-August-Universität Göttingen, Deutschland

Prof. Dr. Ursula Kües

Abteilung Molekulare Holzbiotechnologie und Technische Mykologie, Büsgen-Institut,
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie; Georg-August-Universität Göttingen,
Deutschland

Tag der mündlichen Prüfung: 30. April 2019





„Farben sind Taten des Lichts.“
Johann Wolfgang Goethe





Für immer und überall Caspar, Reto, Freya und Toni





Allen, die mich bei dieser Arbeit mit Tat, Rat, Zuversicht und Geduld
unterstützt haben, danke ich sehr herzlich!





Die vorliegende Arbeit wurde als kumulative Dissertation an der forstlichen Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen angefertigt. Sie besteht aus der Einleitung, sieben Publikationen (Artikel I...VII) sowie einer zusammenfassenden bzw. übergreifenden Diskussion.

Um ein einheitliches Literaturverzeichnis anfertigen zu können, wurden der Literaturzitierstil sowie die Nummerierung von Abbildungen und Tabellen innerhalb der Veröffentlichungen angepasst. Die Kapitel 2 bis 8 entsprechen ansonsten dem Wortlaut der bereits publizierten Artikel.

Der Hauptteil der Doktorarbeit ist wie folgt gegliedert: Die Kapitel 2 bis 5 beschreiben die kombinierte Modifizierung von Laubhölzern mit niedrigmolekularem Melamin-Formaldehyd-Harz sowie Metallkomplex-Farbstoffen und analysieren die Chemikalienverteilung sowie die mechanischen Eigenschaften, die Dauerhaftigkeit und das feuchtebedingte Verhalten der auf diese Weise behandelten Laubhölzer.

Kapitel 6 und 7 befassen sich mit der Beschichtbarkeit und dem Bewitterungsverhalten von mit Melamin- und Phenol-Formaldehyd-Harz modifiziertem Holz unter Verwendung von transparenten Acrylatformulierungen in Verbindung mit farbstabilisierenden Lichtschutzmitteln und deren Auswirkungen auf ausgewählte Holzeigenschaften.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit einer neuartigen, patentierten Modifizierung von Holz. Bei dieser Behandlung werden dem Phenol-Formaldehyd-Harz Additive zur Erweiterung des Farbspektrums zugesetzt und anwendungsrelevante Materialeigenschaften untersucht. Schließlich werden in Kapitel 9 die Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln diskutiert.

Zusätzlich werden in dieser Arbeit ausgewählte Ergebnisse vorgestellt, die nicht in den oben genannten Publikationen enthalten sind und im Rahmen der Promotion erzielt wurden.



Zusammenfassung

Diese Dissertation befasst sich mit der chemischen Holzmodifizierung durch Kondensationsharze in Kombination mit farbgebenden Substanzen mit dem Ziel, die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität von Holz zu erhöhen und gleichzeitig eine Durchfärbung und Farbstabilisierung zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Verfahren zur Holzmodifizierung mit niedrigmolekularen Kondensationsharzen und farbgebenden Substanzen entwickelt und optimiert. Zunächst wurden die Hölzer des Bergahorns (*Acer pseudoplatanus* L.), der Buche (*Fagus sylvatica* L.) und der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) verwendet; später wurde der Fokus auf das homogen imprägnier- und färbbare Buchenholz gerichtet.

Im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 2 bis 5) wurden grundlagenorientierte Untersuchungen zur Imprägniermodifizierung der Laubhölzer mit Melamin-Formaldehyd-Harz (NMM-Harz) in verschiedenen Konzentrationen, fallweise unter Zugabe von Metallkomplex- bzw. Säurefarbstoffen, durchgeführt. Die Feststoffgehalte der verwendeten NMM-Harz-Lösungen betragen 10 %, 20 %, 25 % und 30 %. Im zweiten Teil (Kapitel 6 bis 8) wurden zusätzlich niedrigmolekulare Phenolformaldehydharze (PF-Harz) mit einer Lösungskonzentration von 25 % in die Untersuchungen einbezogen, da mit diesen bräunlichen Harzen eine höhere Zellwandbelastung und gleichzeitig eine Farbmodifizierung möglich war. Die Modifizierungen der Hölzer beruhten jeweils auf einer 2-stufigen Behandlung, bei der die wasserbasierten Lösungen mit einer Vakuum-Druck-Imprägnierung in das Holz eingebracht und anschließend in einem kombinierten Aushärtungs- (Curing-) und Trocknungsprozess ausreagiert wurden.

Die Untersuchungsergebnisse in Kapitel 2 zeigten, dass die Imprägniermodifizierung der Laubhölzer mit NMM-Harzen auch in Kombination mit farbgebenden Substanzen verfahrenstechnisch möglich war. Die Lösungsaufnahmen (Solution uptake – SU) und prozentualen Massezunahmen (Weight percent gain – WPG) sowie die veränderten Stickstoffgehalte zeigten, dass die Polykondensationsharze in den Holzkörper eingedrungen waren. Dabei wurde der wasserlösliche Metallkomplex-Farbstoff und das NMM-Harz dauerhaft im Holz fixiert. Das eingefärbte NMM-Harz konnte in der Zellwand und den Zelllumen der Hölzer mit Hilfe von UV-Mikrospektrophotometrie und lichtmikroskopischen Untersuchungen nachgewiesen werden. Darüber hinaus war der Metallkomplex-Farbstoff mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) in der Zellwand detektierbar.

Die Auswirkungen der durchgeführten Modifizierungen auf mechanische Holzeigenschaften wurden in Kapitel 3 thematisiert. Hier zeigte sich, dass die mit NMM-Harz und Farbstoff behandelten Hölzer mit steigendem WPG eine Zunahme des dynamischen und statischen E-Moduls sowie der Biegefestigkeit und Härte aufwiesen. Die erhöhte Steifigkeit bzw. Festigkeit war auf die NMM-Harzeinlagerungen in die poröse Holzmatrix (Lumen, Zellwand) zurückzuführen. Die Bruchschlagarbeit bzw. Bruchdehnung der Hölzer wurde hingegen mit steigendem WPG verringert.

Die Pilzresistenzen der Hölzer gegenüber Braunfäule (*Coniophora puteana*), Weißfäule (*Trametes versicolor*) und Moderfäule wurden sowohl durch das NMM-Harz als auch durch den Metallkomplex-Farbstoff erhöht (Kapitel 4). Hierbei konnte mit steigender



Chemikalienbeladung der Hölzer eine Zunahme der Dauerhaftigkeit erzielt werden. Die Behandlung mit reinem Metallkomplex-Farbstoff zeigte einen bioziden Effekt.

Kapitel 5 befasste sich mit den feuchtebedingten Eigenschaften von NMM-Harz modifiziertem Buchenholz. Generell zeigte sich in Abhängigkeit vom Beladungsgrad eine Verbesserung der Dimensionsstabilität (ASE). Bei einem WPG von 30 % konnte ein 5 %iges Zellwandbulking (dauerhafte Volumenzunahme) und eine ASE von ca. 30 % erreicht werden. Die Untersuchungen zeigten ferner, dass der eingesetzte Metallkomplex-Farbstoff dauerhaft in der NMM-Harz-Matrix bzw. im Holz fixiert und nicht ausgewaschen wurde. Außerdem stellte sich heraus, dass die NMM-Harz-Behandlungen das Sorptionsverhalten und damit auch die Ausgleichsfeuchten der Hölzer im Bereich zwischen 30 % und 95 % relativer Luftfeuchtigkeit kaum veränderten. Hierbei konnte offenbar das eingelagerte und ausgehärtete Harz trotz seiner hydrophoben Eigenschaften Wasserdampf aufnehmen und somit in Abhängigkeit vom WPG die Ausgleichsfeuchten erhöhen. Darüber hinaus zeigte sich mit zunehmendem Harzbeladungsgrad eine Verringerung der kapillaren Wasseraufnahme. Generell war festzustellen, dass die modifizierten Hölzer eine deutliche Verbesserung der Farb- und Dimensionsstabilität aufwiesen. Außerdem war ein Rückgang der Rissbildung erkennbar.

In weiteren Labor- und Feldtests (Kapitel 6 und 7) wurde NMM- bzw. PF-Harz modifiziertes Buchenholz mit transparenten Acrylatformulierungen in Verbindung mit farbstabilisierenden Lichtschutzmitteln beschichtet, um die Bewitterungseigenschaften und die Farbstabilität zu optimieren. Es stellte sich heraus, dass sich die mit Polykondensationsharz modifizierten Hölzer ohne Schwierigkeiten beschichten ließen, jedoch verlängerten sich die Durchtrocknungszeiten der Acrylatformulierungen aufgrund der reduzierten kapillaren Wasseraufnahme. Im Vergleich zu reinen Polymerdispersionen bzw. Acrylaten zeigten sich die Acrylatformulierungen mit organischen und anorganischen Lichtschutzadditiven (UV-Absorbern – UVA) und Radikalfängern (Hindert amine light stabilizers – HALS) gegenüber künstlicher und natürlicher Bewitterung unempfindlicher. Erwartungsgemäß konnten die Lichtschutzkonzepte mit steigender UVA- und HALS-Konzentration in der Beschichtungsformulierung eine Farbstabilisierung des Holzes und dauerhafte Schutzeffekte gegen die Degradation der Oberflächenbeschichtung erzielen. Hierbei zeigten sich insbesondere auf dem modifizierten Holz weniger Beschichtungsdefekte, während der Holzuntergrund überwiegend riss- und defektfrei blieb. Darüber hinaus wies das modifizierte Holz eine erhöhte Beschichtungshaftfestigkeit auf. Aus den Untersuchungen ging hervor, dass die färbenden Polykondensationsharzmodifizierungen in Verbindung mit transparenten farbstabilisierenden Beschichtungen die optische Erscheinung des Holzes verbessern und diversifizieren konnten. Dennoch veränderten sich während der Wetterexposition die Farben der Hölzer in Abhängigkeit von der Harzlösung. Die mit NMM-Harz behandelten Hölzer wurden tendenziell etwas heller und die mit PF-Harz behandelten dunkler. Hierbei schien das durch UV-Strahlung nachdunkelnde PF-Harz den aufhellenden Effekt durch Abbau- und Auswaschungsprozesse des Lignins während der Bewitterung zu kompensieren.

In den Arbeiten zu Kapitel 8 wurde die Absicht verfolgt, weitere praktisch umsetzbare und kostengünstige Modifizierungen zu entwickeln, die das Farbspektrum erweitern und die Lichtstabilität des Holzes erhöhen. Hierzu wurden dem PF-Harz farbgebende Additive wie Eisensalze und Tannine zugesetzt. Die Herausforderung bestand darin, Farbgebung und Farbstabilisierung sowie die feuchterelevanten Holzeigenschaften zu optimieren. Die relativ



hohen Beladungsgrade der modifizierten Hölzer zeigten, dass die verschiedenen PF-Harzlösungen in den Holzkörper eindringen konnten und dort fixiert wurden. Außerdem konnte die Dimensionsstabilität (ASE) um bis zu 65 % erhöht und ein Zellwandbulking von etwa 12 % der entsprechenden Holzproben erreicht und die Maximalquellung (SW_{\max}) verringert werden. Die Behandlungsmethoden führten insbesondere bei hohen relativen Luftfeuchtigkeiten zu einer verlangsamten Feuchtigkeitsaufnahme und einer um bis zu 40 % verringerten Ausgleichsfeuchte. Die Ergebnisse unterschieden sich nur geringfügig zwischen den untersuchten eingefärbten Imprägnierlösungen, sodass die verbesserten Holzeigenschaften in erster Linie den PF-Harzen zuzuschreiben waren. Das mit PF-Harz behandelte Holz brachte eine rötlichbraune Holzfärbung hervor, die sich durch die Zugabe von Eisen und Tannin in optisch ansprechende dunkel- bzw. schwarzbraune Farbtöne verändern ließ. Die Kolorierungen dunkelten während der Curing- und Trocknungsprozesse sowie unter Einfluss von UV-Strahlung nach. Ausnahmslos war zu beobachten, dass es bei den mit PF-Harz vergüteten Hölzern zu einer erheblich höheren Farbstabilität und einem deutlichen Rückgang der Rissbildung kam.

Insgesamt konnten die farbigen Polykondensationsharzmodifizierungen im Sinne der Zielsetzung die Dauerhaftigkeit und Dimensionsstabilität von Massivhölzern erhöhen und gleichzeitig eine gleichmäßige Durchfärbung und Farbstabilisierung erreichen. Die Effektivität der farblichen Modifizierung zeigte hierbei eine deutliche Abhängigkeit von der Tränkbarkeit der Holzart und insbesondere vom verwendeten Harztyp und Farbmittel. Die erreichten Holzeigenschaften hingen hierbei von den Prozessparametern und der daraus resultierenden makroskopischen und mikroskopischen Verteilung der Modifizierungschemikalien ab. Dabei zeigten besonders das Buchenholz, die PF-Harze und die eingesetzten Metallkomplex- bzw. Säurefarbstoffe ihre Vorteile und ihr anwendungsbezogenes Potenzial. Schlussendlich erzielten die PF-Harzmodifizierungen in Verbindung mit farbstabilisierenden Lichtschutzkonzepten die besten Ergebnisse.



Abstract

This dissertation deals with chemical modification of wood using polycondensation resins in combination with colouring substances to increase durability and dimensional stability of the modified wood while achieving colouration and colour stabilization. To this end, an innovative modification process using low molecular weight condensation resins, dyes and colouring agents was developed and optimized. To start with, sycamore (maple) (*Acer pseudoplatanus* L.), beech (*Fagus sylvatica* L.) and European ash (*Fraxinus excelsior* L.) wood species were chosen. Later, focus shifted to find particularly suitable beech wood.

In the first part of the thesis (chapter 2 to 5), the wood modifications using N-methylolated melamine-formaldehyde resin (NMM) in different concentrations and occasionally with metal complex dyes were investigated. The solid contents of the NMM solutions were 10 %, 20 %, 25 % and 30 %, respectively. In the second part (chapter 6 to 8), low molecular phenol-formaldehyde resins (PF-resins) with a solution concentration of 25 % were included in the modifications because a higher cell wall penetration and colour modification were possible, due in part to the brownish colour of the resin. The wood modifications using different solution concentrations were based on a 2-step treatment. The first step consisted of vacuum-pressure-impregnation of the wood with the water-based solutions (also in combination with colouring agents), while the second step consisted of polymerization, curing, and drying.

The results of paper 1 (chapter 2) show that the modification of the selected wood species with condensation resins, including those mixed with colouring substances, was technically possible. The solution uptake (SU) and weight percent gain (WPG) of the modified wood and the changes in nitrogen content of the NMM-resin show that the solutions penetrated and were fixed in the wood. The water-soluble metal-complex-dye fixated thanks to the NMM-resin. The coloured NMM-resin was detected in the wood cell wall and cell lumen using UV micro-spectrophotometry and light microscopy. Furthermore, it was possible to detect the metal-complex-dye in the wood cell wall with energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX).

In chapter 3, the effects of the modifications to the wood and its mechanical properties were discussed. It was found that the wood species treated with NMM-resin and dye showed an increase in dynamic and static modulus of elasticity, as well as an increase in bending strength and hardness with increasing resin concentration (WPG). The increased hardness was due to the resin deposits in the porous wood matrix and the resulting increase in density. In contrast, the impact bending strength of the modified woods was reduced with increasing WPG.

The modified wood's resistance to degradation by brown rot (*Coniophora puteana*), white rot (*Trametes versicolor*) and soft rot, was increased by both the NMM-resin and the metal-complex-dye (chapter 4). An increase in durability was achieved by increasing the chemical concentration used in the modification of the wood specimens. Subsequently, sole treatment with a metal-complex-dye also showed a biocidal effect.

In chapter 5, the moisture-dependent behavior of beech wood modified with aqueous NMM-resin solutions was investigated. Depending on the resin concentration; 30 % WPG showed approximately 5 % cell wall bulking effect and an improvement in the "anti-shrinking efficiency" (ASE) by approximately 30 %. The investigations also showed that the metal-complex-dye used was permanently fixed in the NMM-resin matrix in the beech wood and did



not leach out. In addition, it was found that the NMM-resin treatments barely changed the sorption behavior and thus equilibrium moisture content (EMC, EMC_R) of the wood in the range between 30 % and 95 % relative humidity. The cured resin in the cell lumen, despite its hydrophobic properties, could also absorb water vapour and thus increase the equilibrium moisture content as a function of the resin content (WPG). As the NMM-resin content increased, there was a marked reduction in capillary water absorption. In conclusion, the modified wood showed a significant improvement in colour and dimensional stability. Additionally, there is a decrease in crack formation and detecting of UV-degradation was possible.

In further laboratory and field-tests (chapter 6 and 7), NMM- and PF-resin-modified beech wood was coated with transparent acrylate formulations in combination with colour-stabilizing sunscreens to improve weathering properties and colour stability. It turned out that the modified wood could be coated without difficulty; however, the drying times of the coatings increased because of the reduced capillary water absorption of the resin-modified wood. Compared to pure acrylate polymers, the acrylate coatings with organic and inorganic UV-absorbers (UVA) and radical scavengers (HALS) were less sensitive to artificial and natural weathering. As expected, the transparent sunscreens with increasing UVA and HALS concentration were able to achieve colour stabilization of the wood substrate and a lasting protective effect against degradation of the coating. The resin-modified wood showed less coating defects such as flaking, blisters and cracking, while the wood remained predominantly free of cracks and defects. In addition, the modified wood had increased coating adhesion. The investigation showed that the combined colour-polycondensation-resin modifications, in combination with transparent colour-stabilizing coatings, could improve and diversify the visual appearance of wood. Nevertheless, during weather exposure, the colours of the reference woods changed depending on the resin used. The woods treated with NMM-resin tended to become lighter, and those treated with PF-resin darker. Here, the UV-darkening PF-resin appeared to compensate for the lightening effect of lignin degradation and leaching during weathering.

Chapter 8 intends to develop practical and economically viable alternatives to modifications that expand the colour spectrum and the light stability of the selected wood species. For this purpose, colorant additives such as iron salts and tannins were added to PF-resins. The challenge was to optimize the stabilization of the colour and the hygroscopic properties of the wood. The relatively high WPG values of the modified wood indicate that the PF-resin solutions were able to penetrate into the cell wall and the lumen and were fixed there. As a result, the dimensional stability (ASE) was increased up to 65 % and cell wall bulking of about 12 % was achieved in the corresponding modified wood specimens. In this way, the maximum swelling (SW_{max}) of the beech wood was reduced. The treatment methods resulted in a slower absorption of moisture and a reduction of equilibrium moisture content of up to 40 %, especially at high relative humidity values. The results show only slight differences between the studied impregnation solutions, so that the improved wood properties are primarily attributed to the PF-resins. Usually the PF-resin treated wood is a reddish-brown colour, but that can be changed through the addition of iron and tannins to a more appealing black-brown colour. The colouration darkens during the curing and drying process, as well as from the influence of the UV radiation. It was invariably observed that the wood modified with PF-resins showed significantly improved colour stability and crack reduction.



Overall, the coloured polycondensation resin modification delivers an increase in durability and dimensional stability, while achieving colouration and colour stabilization. In this case, the effectiveness of the colour modification showed a significant dependence on the impregnability of the wood species and in particular on the resin type and colourant used. The extent of the improvements in wood properties were largely determined by the macro- and microscopic distribution of the impregnation chemicals resulting from the various process conditions.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	XIII
Abstract.....	XVII
Inhaltsverzeichnis	XXI
Abkürzungsverzeichnis	XXVII
Kapitel 1 – Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund.....	1
1.2 Holz.....	3
1.3 Holzaufkommen und -auswahl.....	6
1.4 Holzmodifizierung	10
1.5 Holzmodifizierung mit Polykondensationsharzen.....	14
1.5.1 Melamin-Formaldehydharz	14
1.5.2 Phenol-Formaldehydharz.....	20
1.6 Verwitterung und Färbung von Holz	27
1.6.1 Azo- und Säurefarbstoffe.....	29
1.6.2 Eisen-Tannin-Verbindungen.....	31
1.7 Farbstabilisierung durch transparente Beschichtungen.....	35
1.8 Zielsetzung und Fragestellung.....	39
1.9 Publikationsliste.....	40
Kapitel 2 – Modification of three hardwoods with an N-methylol melamine compound and a metal-complex dye	41
2.1 Abstract	43
2.2 Introduction	43
2.3 Materials and methods	44
2.3.1 Wood and chemicals	44
2.3.2 NMM-dye treatment.....	45
2.3.3 Fixation of the dye	45
2.3.4 Colour measurements and nitrogen analysis	45
2.3.5 Light microscopy and SEM-EDX analysis	45
2.3.6 UV micro-spectrophotometry (UMSP).....	46
2.4 Results and discussion	46
2.4.1 Solution uptake and weight percent gain.....	46
2.4.2 Penetration of NMM-dye (BS) into the wood.....	47
2.4.3 Distribution of the dye in the cell wall	48
2.4.4 Topochemistry of NMM-dye-treated wood.....	48



2.5 Conclusion.....	53
Kapitel 3 – Strength changes in ash, beech and maple wood modified with a N-methylol melamine compound and a metal-complex dye.....	55
3.1 Abstract.....	57
3.2 Introduction.....	57
3.3 Materials and methods.....	58
3.3.1 Wood and chemicals.....	58
3.3.2 Wood Treatment.....	58
3.3.3 Mechanical properties.....	58
3.4 Results and discussion.....	59
3.5 Conclusions.....	62
Kapitel 4 – Decay resistance of ash, beech and maple wood modified with N-methylol melamine and a metal-complex dye.....	65
4.1 Abstract.....	67
4.2 Introduction.....	67
4.3 Materials and Methods.....	68
4.3.1 Wood and chemicals.....	68
4.3.2 Micro-organisms.....	69
4.3.3 NMM-dye treatment.....	69
4.3.4 White and brown rot testing.....	69
4.3.5 Soft rot testing.....	70
4.4 Results and discussion.....	70
4.4.1 White and brown rot decay.....	70
4.4.2 Soft rot decay.....	72
4.5 Conclusions.....	73
Kapitel 5 – The effect of combined melamine-resin- colouring-agent modification on water related properties of beech-wood.....	75
5.1 Abstract.....	77
5.2 Introduction.....	77
5.3 Material and Methods.....	78
5.3.1 Wood and chemicals.....	78
5.3.2 NMM resin and NMM resin-dye treatment.....	78
5.3.3 Fixation of chemical.....	79
5.3.4 Bulking, anti-shrink efficiency, maximum swelling.....	79
5.3.5 Equilibrium moisture content (EMC).....	79
5.3.6 Capillary water uptake.....	80
5.3.7 Micro-computed tomography.....	80