

Wissenschafts- und Bildungsministerium der Russischen Föderation
Innovatives Kleinunternehmen OOO¹ „INNODREV“
der Staatlichen Hochschule für Bau und Architektur, St. Petersburg

UDC² 684.4.059.3.001.5

GENEHMIGT
Generaldirektor
Prof. Dr.
A.G. Tschernych

< Stempel der Hochschule > 15.11.2013

BERICHT
ÜBER EINE WISSENSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNG

zum Thema:

**Beeinflussung der Rissbildung
an zylindrisch bearbeiteten Rundhölzern aus Kiefernholz
durch den Einsatz von Öl-Wachs-Kompositionen der Firma „BIOFA“**

(Endfassung)

Betreuerin
Dr. Ph. in Engineering,
Dozentin an der Fakultät
Business and Commerce

S.I. Mironova

St. Petersburg, 2013

¹ russ. GmbH (Anm. d. Übers.)

² Universelle Dezimalklassifikation (Anm. d. Übers.)

LISTE DER VERFASSER

Leiter der Fakultät Business and Commerce

Prof. Dr. Ing.

<Unterschrift>

Tschernych A.G. (Abschnitte 1, 5)

Mitarbeiter::

Dr. Ph. in Engineering, Dozent

<Unterschrift>

Mironova S. I. (Abschnitte 2, 3)

PhD candidate

<Unterschrift>

Koval P.S. (Abschnitt 4)

Normprüfung:

Dozent, PhD in Economics

<Unterschrift>

Mamedov Sch. M.

INHALTSVERZEICHNIS

	EINLEITUNG	4
1.	SCHWINDUNGSSPANNUNGEN IN RUNDHOLZ	5
2.	UNTERSUCHUNGSMETHODEN	7
3.	EIGENSCHAFTEN DER VERWENDETEN ANSTRICHSTOFFE	9
4.	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	13
5.	AUSWERTUNG	15
6.	LITERATUR	16

EINLEITUNG

Seit Jahrhunderten ist Holz als Werkstoff und Baumaterial von zentraler Bedeutung. Ungeachtet der Entwicklung immer neuer Konstruktionsmaterialien aus Kunststoff hat das Holz bis zum heutigen Tage nichts von seiner Bedeutung verloren, verfügt es doch über einzigartige Eigenschaften:

- geringes spezifisches Gewicht und niedrige Wärmeleitfähigkeit;
- hohe Festigkeit und Härte;
- Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien und Strahlung;
- schwingungsdämpfende Wirkung und Fähigkeit zur Absorption von Stoßenergie;
- hoher ästhetischer Wert;
- einfache Verarbeitung und problemloses Verleimen

Voll- und Schichtholz findet breite Verwendung bei der Herstellung verschiedener Baukonstruktionen und Bauteile, beim Streckenausbau im Erzbergbau, bei der Herstellung von Sportgeräten und Möbeln etc. Im Gegensatz zu vielen anderen Baumaterialien verfügt Holz zudem über eine erneuerbare Rohstoffbasis, und seine Gewinnung und Verarbeitung ist im Vergleich zu anderen Materialien viel weniger energieintensiv. Angesichts der Begrenztheit der natürlichen Ressourcen unserer Erde ist daher die Konkurrenzfähigkeit von Holz auch langfristig gesichert.

Neben den erwähnten Vorteilen hat Holz aber auch eine Reihe von Nachteilen: einer davon –und zwar der gravierendste – ist das Auftreten holztypischer Defekte und Schäden in Form von Rissen als Folge der auf das Holz einwirkenden inneren und äußeren Kräfte. Bei der Planung neuer Konstruktionen und Produkte aus Voll- und Schichtholz und deren Auslegung muss diesen Defekten durch erhöhte Festigkeitsreserven Rechnung getragen werden, was wiederum einen erhöhten Materialeinsatz zur Folge hat. Eine der vordringlichsten Aufgaben von Wissenschaft und Forschung besteht deshalb darin, die Gründe für die Rissbildung zu untersuchen, Diagnose- und Prüfverfahren zu entwickeln und Mittel und Wege zu finden, um die Rissbeständigkeit von Erzeugnissen und Konstruktionen aus Voll- und Schichtholz zu erhöhen.

1. SCHWINDUNGSSPANNUNGEN IN RUNDHOLZ

Wie jedes kapillar-poröse Material trocknet Holz von der Oberfläche her. Sinkt die Feuchtigkeit an der Balkenoberfläche unter den Fasersättigungspunkt, so beginnt das Holz an Volumen zu verlieren - es kommt zum Schwinden des Holzes. Doch dem Schwinden an der Balkenoberfläche steht das Balkeninnere entgegen, wo die Feuchtigkeit oberhalb der Fasersättigung liegt und kein Schwinden stattfindet. Dadurch werden an der Balkenoberfläche Zugkräfte wirksam; zugleich wird der innere Teil zusammengedrückt. Das Material erfährt über seinen gesamten Querschnitt eine radiale Kompression. Am Balkenumfang, in tangentialer Richtung, wirken die oben erwähnten Zugspannungen, im Balkeninneren - Kompressionsspannungen. Somit besteht die größte Gefahr der Rissbildung in der Anfangsphase des Trocknungsvorgangs, da in dieser Phase die hygroskopische Feuchtigkeit nur im Oberflächenbereich abnimmt. Wenn die Zugspannungen die Belastungsgrenze erreichen, bildet sich an der Balkenoberfläche ein Netz von Mikrorissen, die rasch größer werden und sich miteinander zu größeren Rissen verbinden, die sich wiederum miteinander verbinden, so dass im Endeffekt ein Makroriss entsteht, der sich weiter ausbreitet und schließlich bis zum Mark reicht. Man kann annehmen, dass ein solcher Riss an einem gleichmäßig trocknenden Balken dazu führt, dass die inneren Schwindungsspannungen schließlich vollständig verschwinden.

Ist der Riss weniger tief – was bei extremen Bedingungen, d.h. bei hoher Temperatur und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit der Fall sein kann - , findet nur ein partieller Spannungsabbau statt. Wenn dann das Holz weiter heruntertrocknet, kommt es zu einem erneuten Anwachsen der Spannungen, und der Riss wird größer. Mit dem Erreichen des hygroskopischen Gleichgewichts über den gesamten Balkenquerschnitt ist der Prozess der Rissbildung aber noch nicht zu Ende. Der Prozess des Spannungsaufbaus und der Verformung im Zeitverlauf entsprechend den rheologischen Gesetzmäßigkeiten (Spannungsrelaxation und Kriechen, soweit es um Verformung geht) setzt sich fort und schwächt sich nur langsam ab. Es dauert sehr lange, bis das Holz allmählich zu einem Material ohne Restspannungen und -verformungen wird.

In dieser Untersuchung geht es um die Anfangsphase des Trocknungsvorgangs und die damit verbundenen Probleme. Wir haben angenommen, dass die Feuchtigkeit in dieser Phase entsprechend einem Paraboloiden sechsten Grades im Holz verteilt ist (Abbildung 1). Dabei stützen wir uns auf die Arbeit von Prof. B.N. Ugolev [1], der bei der Untersuchung von Schnittholz am Anfang des Trocknungsvorgangs ebenfalls von dieser Annahme ausging.

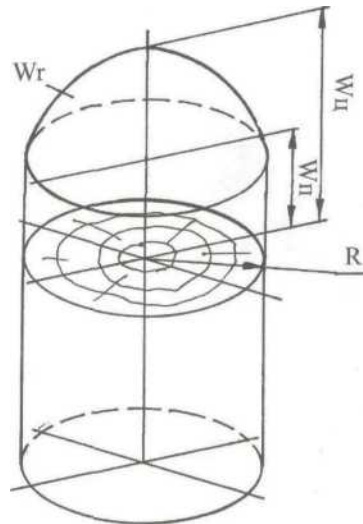


Abbildung 1. Verteilung der hygroskopischen Feuchtigkeit über den Balkenquerschnitt

Die Verteilung der hygroskopischen Feuchtigkeit in der Anfangsphase des Trocknungsvorgangs, in der nur die Oberflächenschicht trocknet, sei

$$W = Ar^6 + B \quad (1)$$

wobei die Koeffizienten A, B nach folgenden Gleichungen bestimmt werden (s. Abbildung 1):

$$1) \ r=0, \ W=W_u [W_{\text{Kern}}]; \ 2) \ r=R, \ W=W_u [W_{\text{Oberfläche}}] \quad (2)$$

Aus der ersten Gleichung ergibt sich: $B = W_u [W_{\text{Kern}}]$,

aus der zweiten Gleichung

$$A = \frac{W_u [W_{\text{Oberfläche}}] - W_u [W_{\text{Kern}}]}{R^6}$$

Für die hygroskopische Feuchtigkeit erhalten wir somit folgende Funktion:

$$W = W_u [W_{\text{Kern}}] - \frac{W_u [W_{\text{Oberfläche}}] - W_u [W_{\text{Kern}}]}{R^6} r^6 \quad (3)$$

wobei $W_u [W_{\text{Kern}}]$, = Feuchtigkeitsgehalt im Holzkern bzw. $W_u [W_{\text{Oberfläche}}]$ = Feuchtigkeitsgehalt an der Holzoberfläche, jeweils in %.

Auf Abbildung 1 ist dargestellt, wie die hygroskopische Feuchtigkeit entsprechend einem Paraboloiden sechsten Grades über den Balkenquerschnitt verteilt ist.

Die inneren Spannungen im Holz sind bedingt durch dieses Feuchtigkeitsgefälle und die Anisotropie der Struktur und der Eigenschaften des Holzes in den verschiedenen anatomischen Richtungen [2].

2. UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Bei unserer Untersuchung haben wir folgende Anstrichstoffe verwendet:

- Spezialgrundierung Nr. 8750
- Holzlasur Nr. 1075
- Holzschutzsystem Nr. 2043

Wir haben unsere Untersuchung an zylindrisch bearbeiteten Rundhölzern aus Kiefernholz mit einem Durchmesser von 260 mm im Zustand natürlicher Holzfeuchte durchgeführt.

Die Untersuchung umfasste folgende Schritte:

1. Inspektion der Musterhölzer, Erfassung sämtlicher Risse mit Hilfe von Fühler, Tiefenmesser und Lineal.
2. Die Musterhölzer Nr.Nr. 1 und 2 haben wir unbehandelt gelassen.
3. Die Musterhölzer Nr.Nr. 3 und 4 haben wir zweimal angestrichen, zuerst mit Spezialgrundierung Nr. 8750, dann mit Holzschutzsystem Nr. 2043.
4. Die Musterhölzer Nr.Nr. 5 und 6 wurden dreimal angestrichen, zuerst mit Spezialgrundierung Nr. 8750, dann mit Holzlasur Nr. 1075 und schließlich mit Holzschutzsystem Nr. 2043.
5. Die Anstrichstoffe wurden mit einem Pinsel aufgetragen; jeder weitere Anstrich erfolgte jeweils 24 h nach dem Auftragen der letzten Schicht.
Bei der Untersuchung wurden 6 je 1-Meter lange Rundhölzer verwendet.
6. Die Stirnflächen der Rundhölzer wurden mit dem Schutzanstrich „ПФ-115“³ versehen, um die Verdunstung über die Stirnseiten möglichst gering zu halten.
7. Alle Rundhölzer wurden unter freiem Himmel – ohne Schutzdach – gelagert.



Abbildung 2: Lagerung der Musterhölzer

³ Alkydharz-Schutzanstrich russischer Produktion (Anm. d. Übers.)

8. Die Hölzer wurden täglich inspiziert und auf neue Risse untersucht.
9. Einmal wöchentlich wurde die Feuchtigkeit der Rundhölzer gemessen. Bei starker Zunahme der Risse wurde die Feuchtigkeit zweimal wöchentlich gemessen.

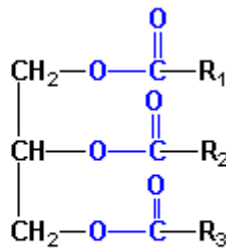
Die Beobachtung der Rissbildung wurde 11 Wochen lang durchgeführt.

3. CHARAKTERISTIK DER VERWENDETEN ANSTRICHSTOFFE

Bei unseren Untersuchungen haben wir Wasserlacke auf Leinölbasis verwendet:

- Spezialgrundierung Nr. 8750 mit folgenden Bestandteilen: Lein- und Holzöl, Sikkativ, aliphatische Kohlenwasserstoffe, Biozidzusätze;
- Holzlasur Nr. 1075 mit folgenden Bestandteilen: Pflanzenöle, Kolophoniumharzester, Fettsäureester, Sikkativ, Zinkoxid, aliphatische Kohlenwasserstoffe;
- Holzschutzsystem Nr. 2043 mit folgenden Bestandteilen: Leinöl, Holzöl, Fettsäureester, Kolophoniumharzester, aliphatische Kohlenwasserstoffe, Sikkativ, Mikrowachs.

Wichtigster filmbildender Bestandteil dieser Produkte der Firma BIOFA ist das Leinöl. Leinöl ist wie alle Pflanzenöle ein komplexes Gemisch, dessen Hauptbestandteile (~ 95 %) voll verestertes Glycerin und voll veresterte, überwiegend ungesättigte Fettsäuren (Triglyceride) sind, mit der allgemeinen Formel:



wobei R_1 , R_2 und R_3 Alkylreste einbasiger Fettsäuren normaler Struktur sind. Leinölmoleküle sind etwa 50 mal kleiner als Kunstharzmoleküle und etwa 10 mal kleiner als die feinsten Holzporen. Deshalb kann Leinöl tief ins Holz eindringen und bis in die feinsten Poren hinein aufgenommen werden. Die bearbeiteten Flächen werden mechanisch und chemisch widerstandsfähiger, da Leinöl zur Gruppe der trocknenden Öle, d.h. der Öle mit sehr guten Trocknungseigenschaften gehört.

Das Trocknungsvermögen (d.h. Filmbildungsvermögen) hängt ab von der Anzahl der Doppelbindungen im Triglyceridmolekül sowie von ihrer Anordnung zueinander. Typisch für trocknende Öle ist, dass die Triglyceride Säurereste mit drei oder zwei Doppelbindungen enthalten (der Gesamtanteil solcher Triglyceride kann bis zu 70% betragen). Zu den wichtigsten, im Leinöltriglycerid enthaltenen Säuren zählen [3]

- Linolensäure $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-COOH}$ (52 %);
- Linolsäure $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-CH=CH-CH}_2\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_n\text{-COOH}$ (16 %);
- Oleinsäure $\text{(CH}_2\text{)}_n\text{-CH=CH-(CH}_2\text{)}_m\text{-COOH}$ (22 %).

Der Vorgang des Aushärtens pflanzenöhlhaltiger Anstrichstoffe beruht auf den zwischenmolekularen Wechselwirkungen zwischen den Doppelbindungen der in den Triglyceriden enthaltenen Fettsäurereste.

Unter dem Einfluss von Sikkativen (= Oxidationspolymerisationsinitiatoren) kommt es zu Kettenpolymerisations- und Oxipolymerisationsprozessen, in deren Ergebnis Raumpolymere mit zwischenmolekularen Bindungen des Typs $-C-C-$ und $-C-O-C-$ entstehen. Doch die Struktur der bei der Filmbildung entstehenden dreidimensionalen Schicht ist unterschiedlich dick, was durch die unterschiedlichen Bedingungen der Filmbildung in den einzelnen Schichten bedingt ist. Die oberen (äußeren) Schichten sind mit einem Netzpolymer angereichert, in dem zwischenmolekulare Bindungen des Typs $-C-O-O-C-$ und $-C-O-C-$ vorherrschen, die inneren Schichten hingegen mit einem Polymer mit zwischenmolekularen Bindungen des Typs $-C-C-$. Durch den Einsatz mineralischer Füllstoffe wird eine Erhöhung der mechanischen Festigkeit des Films erzielt.

Holzflächen, die mit Materialien auf reiner Leinölbasis behandelt werden, sind jedoch sehr verschmutzungsanfällig [4]. Dieser Nachteil lässt sich beseitigen durch die Verwendung von Materialien, die neben Pflanzenölen verschiedene Wachse enthalten; diese bilden auf der Holzoberfläche eine dünne Schicht, die die Verschleißfestigkeit der Holzoberfläche erhöht und sie zugleich schmutz- und wasserabweisend macht. Kompositionen aus Ölen und Wachsen vereinigen in sich die Vorteile beider Komponenten und erhöhen die Lebensdauer der Holzkonstruktionen.

Zu Beginn der Untersuchung wurden die wichtigsten technischen Daten der Musterhölzer und der verwendeten Anstrichstoffe ermittelt. Diese Daten sind in den Tabellen 1, 2, 3 und 4 aufgeführt. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen die Messung des Feuchtigkeitsgehalts der Musterhölzer und der Viskosität der verwendeten Anstrichstoffe.

Feuchtigkeitsgehalt der Musterhölzer nach GOST 16483.7-71*⁴:

Tabelle 1

Musterholz Nr.	Feuchtigkeit, %
1	77
2	75
3	80
4	83
5	76
6	86

⁴ Russischer Standard betr. Feuchtemessung bei Holz (Anm. d. Übers.)



Abbildung 3. Messung des Feuchtigkeitsgehalts der Musterhölzer durch Wiegen

Viskosität der Anstrichstoffe nach GOST 9070-75*⁵ (mit Viskosimeter B3-4⁶):

Tabelle 2

Anstrichstoff	Viskosität, s
Spezialgrundierung Nr. 8750	12
Holzlasur Nr. 1075	28
Holzschutzsystem Nr. 2043	36

⁵ Russ. Standard betr. Ermittlung der Viskosität von Anstrichstoffen (Anm. d. Übers.)

⁶ Messbecher-Viskosimeter (Anm. d. Übers.)



Abbildung 4. Messung der Viskosität⁷ der verwendeten Anstrichstoffe

Trockenrückstand der Anstrichstoffe nach GOST 52487-2005⁸ (B3-4):

Tabelle 3

Anstrichstoff	Trockenrückstand, %
Spezialgrundierung Nr. 8750	26
Holzlasur Nr. 1075	42
Holzschutzsystem Nr. 2043	50

Anstrichstoff-Verbrauch:

Tabelle 4

Anstrichstoff	Verbrauch, g/m ²
Spezialgrundierung Nr. 8750	78
Holzlasur Nr. 1075	82
Holzschutzsystem Nr. 2043	90

⁷ im russischen Text steht an dieser Stelle „Feuchtigkeit“ – offensichtlich ein Schreibfehler (Anm. d. Übers.)

⁸ russ. Standard zur Bestimmung des Gewichtsanteils nichtflüchtiger Bestandteile von Lacken (Anm. d. Übers.)

4. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Der Prozess der Rissbildung ist auf den Abbildungen 5 -7 in Form von Diagrammen dargestellt. Nach Aufbringen eines zweifachen Anstrichs – Spezialgrundierung Nr. 8750 und Holzschutzsystem Nr. 2043 (Musterhölzer Nr. 3 und Nr.4) verläuft die Rissbildung 2 mal langsamer, bei den Hölzern mit dreifachem Anstrich – Spezialgrundierung Nr. 8750, Holzlasur Nr. 1075 und Holzschutzsystem Nr. 2043 (Musterhölzer Nr. 5 und Nr. 6) – 3 mal langsamer [als bei den unbehandelten Hölzern. *Erg. d.Übers.*]. Wobei bei den Hölzern mit Dreifachanstrich die besten Ergebnisse bezüglich Anzahl und Ausmaß (Länge und Breite) der Risse verzeichnet wurden.

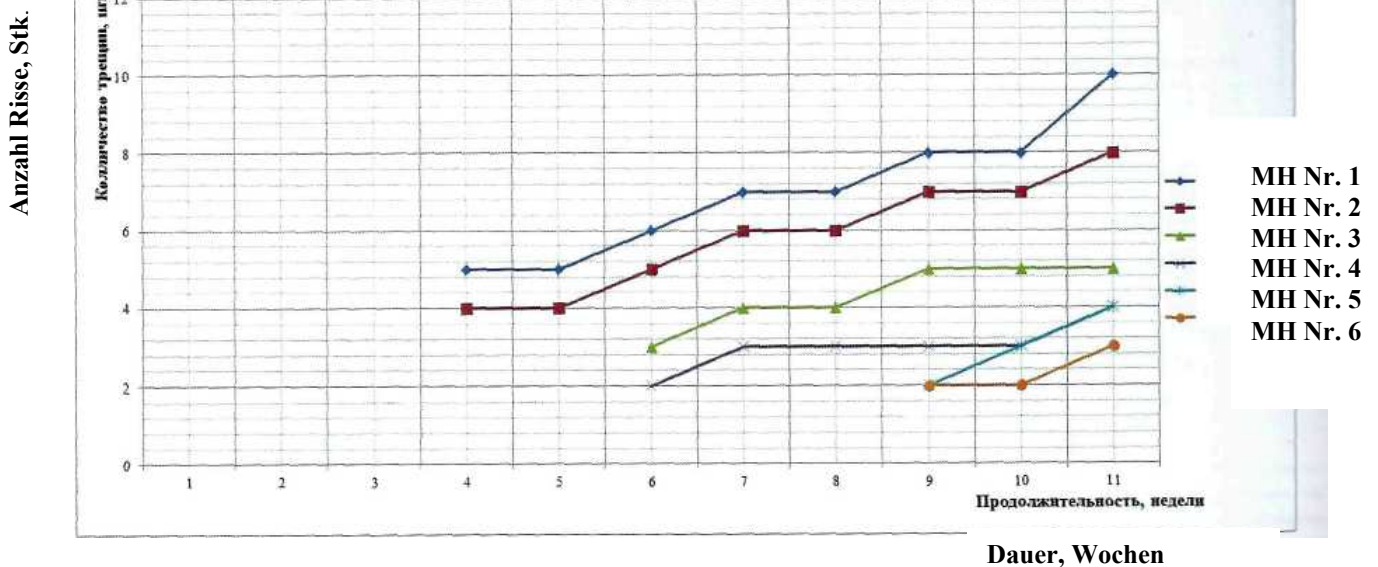


Abbildung 5. Prozess der Rissbildung an zylindrisch bearbeiteten Musterhölzern (MH)

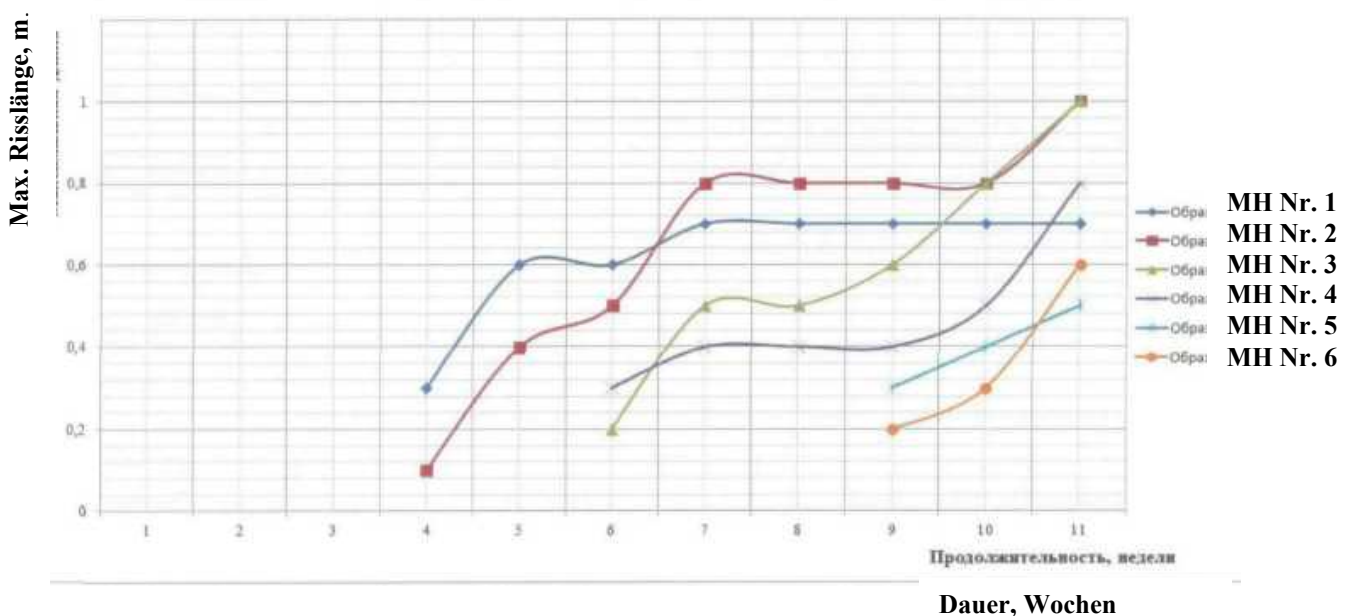


Abbildung 6. Entwicklung der Risslänge

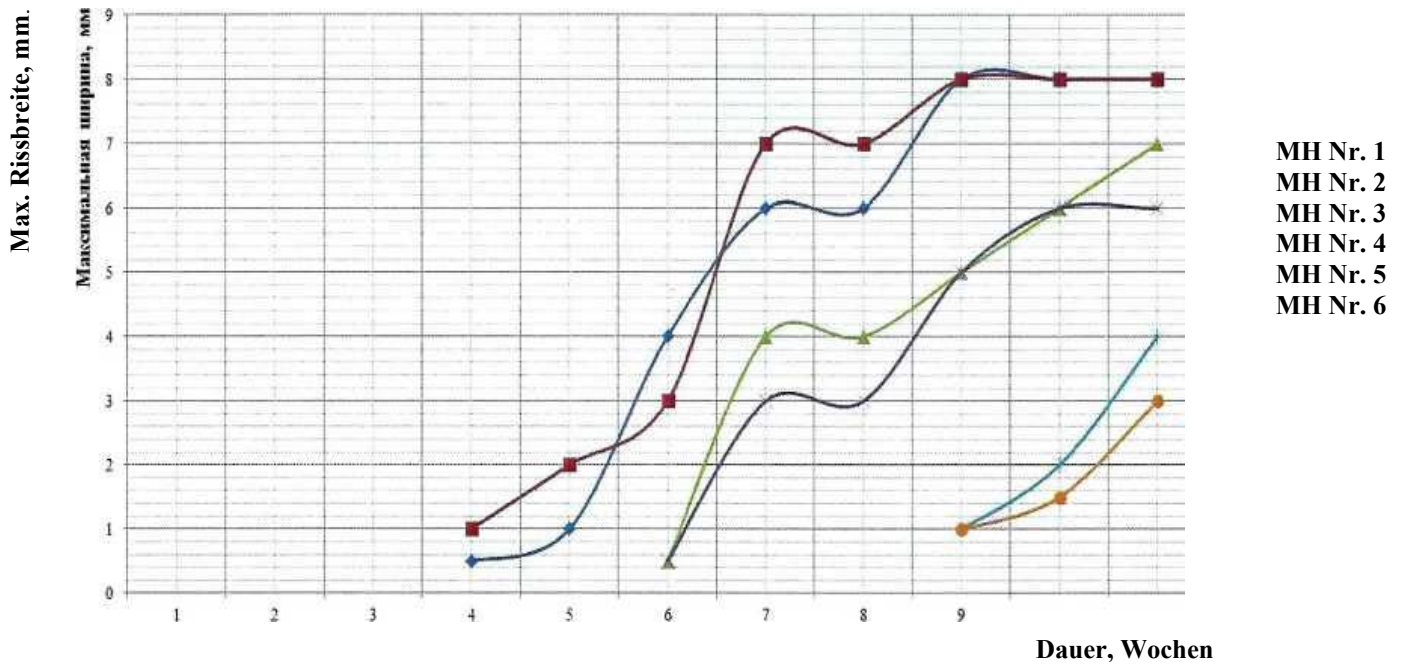


Abbildung 7 Entwicklung der Rissbreite

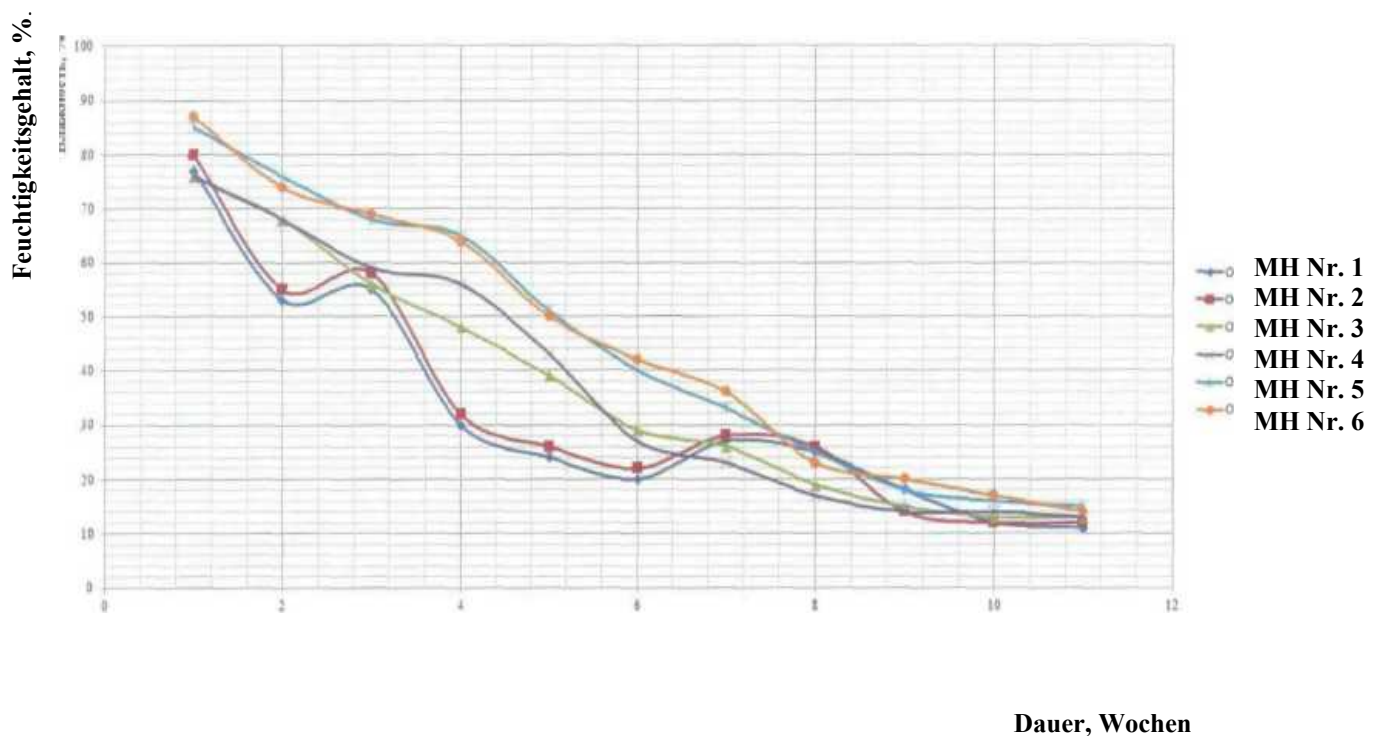


Abbildung 8 Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts der Musterhölzer

5. AUSWERTUNG

Unsere Analyse der Untersuchungsergebnisse ergab folgendes:

1. Die Anstrichstoffe – Spezialgrundierung Nr. 8750, Holzlasur Nr. 1075 und Holzschutzsystem Nr. 2043 der Firma BIOFA, Deutschland, können zur Riss-Prophylaxe eingesetzt werden.



Abbildung 9. Zustand der Musterhölzer nach der Untersuchung (von links nach rechts: unbearbeitetes Muster, Muster mit 2-fachem Anstrich, Muster mit 3-fachem Anstrich)

2. Die geringste Rissbildung wurde bei dem Muster mit Dreifachanstrich (Grundierung Nr. 8750, Holzlasur Nr. 1075 und Holzschutzsystem Nr. 2043) verzeichnet.
3. Die Anzahl der Risse auf den Hölzern mit zweifachem Anstrich (Grundierung Nr. 8750, Holzlasur Nr. 1075) war im Vergleich zu den unbehandelten Hölzern zweimal geringer.
4. Bei den behandelten Hölzern nahm der Feuchtigkeitsgehalt langsamer ab als bei den unbehandelten. Auch eine Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts infolge von Regen wurde bei den behandelten Hölzern – im Unterschied zu den unbehandelten Nr. 1 und 2 - nicht beobachtet.
5. Die Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts müssen noch genauer untersucht werden.
6. Auch die Risstiefe muss Gegenstand einer detaillierteren Untersuchung sein.

LITERATUR

1. *Ugolev B.N.* Formveränderungen und Spannungen beim Trocknen von Holz. In: „Holzindustrie“, 1971 // B.N.Ugolev, Moskau 1971, 174 S.
2. *Gluchych V.N.* Die Anisotropie des Holzes als qualitätssteigernder Faktor beim Trocknen von Schnittholz. St. Petersburg: Universitätsverlag St. Petersburg, 2007 // W.N.Gluchych, St. Petersburg. 163 S.
3. *M.F.Sorokin, S.A.Kotschnova, L.G. Schode.* Chemie und Technologie filmbildender Stoffe. Moskau: Chemie, 1989 // M.F. Sorokin, S.A.Kotschnova, L.G. Schode. 1989. 480 S.
4. *Jorge Prieto, Jürgen Kiene.* Holzbeschichtung. Moskau, Paint-Media, 2008 // Jorge Prieto, Jürgen Keine, Moskau 2008 – 392 S.