

NEUE IMPRÄGNIERUNGSMITTEL FÜR DIE BAHNSCHWELLE AUS HOLZ

Im Rahmen des Projektes RAIL-SLEEPER wurden alternative Imprägnierprodukte zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Bahnschwellen aus Holz erforscht. Diese sollen das künftig in diesem Anwendungsbereich ev. nicht mehr einsetzbare Kreosot ersetzen.

Der künftige Einsatz von Kreosot zur Imprägnierung von Bahnschwellen aus Holz ist ungewiss. Im Rahmen des Projektes RAIL-SLEEPER wurden human- und ökotoxikologisch unbedenklichere Ersatzprodukte für Kreosot auf ihre Gebrauchstauglichkeit für die Imprägnierung von Bahnschwellen aus Holz erforscht.

Die geforderten Eigenschaften orientierten sich dabei an den hohen Ansprüchen der Kreosot-imprägnierten Bahnschwelle: gute biologische Wirksamkeit gegen Zerstörungen durch holzerstörende Organismen, möglichst keine korrosive Auswirkung auf die für die Befestigung der Schienen eingesetzten Verbindungsmittel, geringe elektrische Leitfähigkeit sowie hohe Beständigkeit gegenüber chemischen und physikalischen Beanspruchungen.

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen kristallisierten sich potentiell mögliche Alternativen für die Imprägnierung der Bahnschwelle aus Holz heraus. Diese Imprägnierprodukte zeigten in den meisten untersuchten Kriterien eine gute Übereinstimmung mit den Anforderungen. In Rahmen von weiteren Untersuchungen sollte nun die Übertragbarkeit der im Labor ermittelten Ergebnisse auf die Buchschwelle erforscht werden. Dies betrifft insbesondere die Qualität der Imprägnierung bezüglich Eindringung, Durchtränkung und Wirkstoffverteilung.

Facts:

- Laufzeit: 05/2012-04/2013
- Forschungspartner:
Holzforschung Austria
- Projektleitung:
Mag.^a Notburga Pfabigan



ABB 1. Sichere Mobilität erfordert eine zuverlässige Bahninfrastruktur



ABB 2. Bahnschwellen aus Holz, imprägniert mit Kreosot (Foto: Rainer Sturm)

Problem

Seit Jahrzehnten wird Kreosot zur Imprägnierung von Bahnschwellen aus Holz eingesetzt. Diese Anwendung von Kreosot ist aufgrund gesetzlicher Änderungen künftig ev. nicht mehr möglich, weshalb dringender Bedarf an alternativen Imprägnierprodukten zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Bahnschwelle aus Holz besteht.

Gewählte Methodik

Im Rahmen biologischer Versuche wurde die Wirksamkeit alternativer Imprägnierprodukte gegen Braun-, Weiß- und Moderfäulepilze untersucht. Die Verträglichkeit mit Schienenbefestigungsmitteln sowie der Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit wurden unter Berücksichtigung des Feuchteverhaltens der imprägnierten Hölzer untersucht. In diesem Zusammenhang wurde u.a. der Holz-Hydrophobierung Beachtung geschenkt und deren Beständigkeit gegen UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur untersucht.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen kristallisierten sich potentiell mögliche Alternativen für die Imprägnierung der Bahnschwelle aus Holz heraus. Diese Alternativen sollten nun in weiteren Untersuchungen intensiver erforscht werden, insbesondere betreffend Imprägnierqualität wie Eindringung, Durchtränkung und Wirkstoffverteilung in der Buchenschwelle.

English Abstract

In the near future the use of creosote for the impregnation of wooden railway sleepers will possibly be banned. The aim of the project RAIL-SLEEPER was the examination of products with a better human- and ecotoxicological profile than creosote as alternatives for the impregnation of wooden railway sleepers. Possible alternatives were found, showing consent with most of the demanded key properties of creosote: high biological efficacy, no corrosion of metal fixings, low conductivity of impregnated sleepers and high resistance against physical and chemical stress.

Impressum:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits,
Abt. IV/ST 2 Technik und
Verkehrssicherheit
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,
Abt. III/14 Mobilitäts- und
Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmvit.gv.at,
www.bmvit.gv.at

ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM;
Leitung Forschung & Entwicklung
wolfgang.zottl@oebb.at,
www.oebb.at

ASFINAG

DI Eva Hackl,
Manager International Relations
und Innovation
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie,
Internationales und Innovation
rene.moser@asfinag.at,
www.asfinag.at

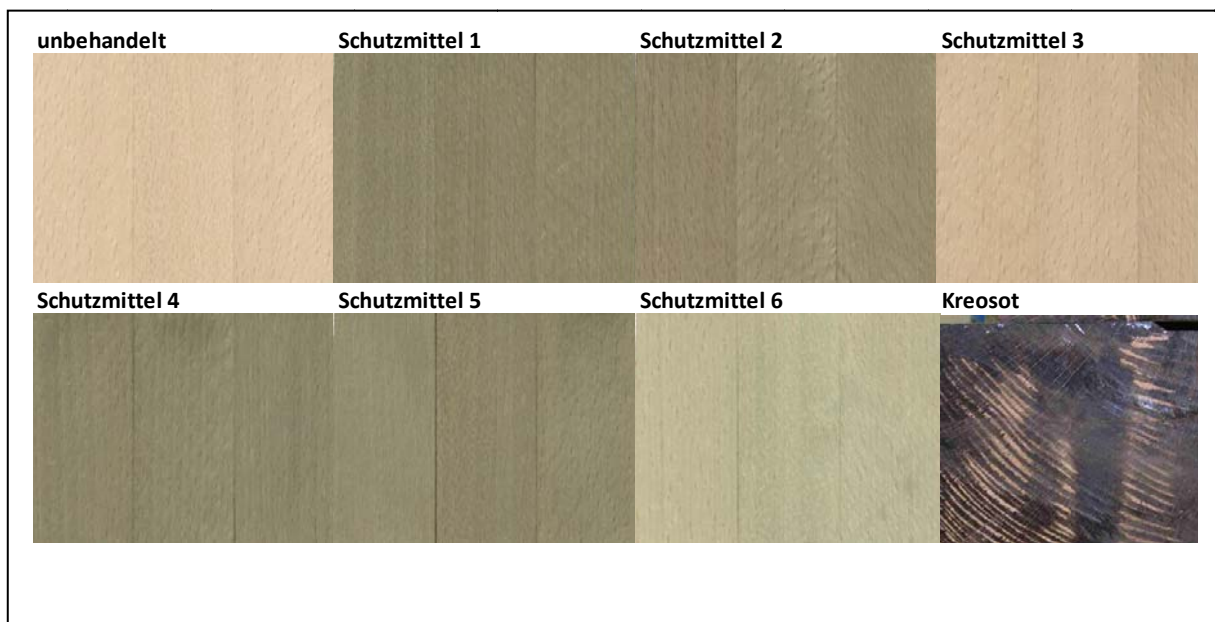
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda,
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at,
www.ffg.at

Neue Imprägnierungsmittel für die Bahnschwelle aus Holz RAIL-SLEEPER

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011
(VIF2011)

April 2013



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Renngasse 5
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:
Holzforschung Austria
Franz Grill Straße 7
1030 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Neue Imprägnierungsmittel für die Bahnschwelle aus Holz RAIL-SLEEPER

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2011)

AutorInnen:

Mag. Notburga PFABIGAN

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Holzforschung Austria – Forschungsinstitut und akkreditierte Prüf- und
Überwachungsstelle der Österreichischen Gesellschaft für Holzforschung

Formale Vorgaben:

Einrichtung der Seite	Abstand in cm
Oben:	3,5
Unten:	3
Links:	3
Rechts:	2,5

Formatvorlage	Schriftart	Schriftgröße
Hauptkapitelüberschriften	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Überschriften	Arial, fett	13pt
Standardtext	Arial, 1,5-zeilig, Blocksatz	11pt
Überschriften von Verzeichnissen	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Inhaltsverzeichnis Abbildungsverzeichnis Tabellenverzeichnis Literaturverzeichnis	Arial	12pt
Fußnotenzeichen	Arial, hochgestellt	10pt
Fußnotentext	Arial	10pt
Untertitel von Tabellen und Abbildungen	Arial, fett	10pt
Quelle von Tabellen und Abbildungen	Arial	8pt
Seitennummerierung	Arial, zentriert, Seitenende	10pt

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	7
2	Material und Methoden	8
2.1	Untersuchte Schutzmittel	8
2.2	Biologische Wirksamkeit	9
2.2.1	Wirksamkeit gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen	9
2.2.2	Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen	12
2.3	Chemische Rückstände im Oberbauschotter.....	14
2.4	Produktstabilität.....	15
2.5	Korrosion und Leitfähigkeit.....	16
2.5.1	Korrosionsversuche	16
2.5.2	Leitfähigkeit	18
2.6	Physikalische und chemische Beanspruchung	19
2.6.1	Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur	19
2.6.2	Beständigkeit gegenüber Schmiermitteln.....	21
2.6.3	Entflammbarkeit	21
3	Ergebnisse.....	23
3.1	Biologische Wirksamkeit	23
3.1.1	Wirksamkeit gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen	23
3.1.2	Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen	25
3.2	Chemische Rückstände	27
3.3	Produktstabilität.....	28
3.4	Korrosion und Leitfähigkeit.....	29
3.4.1	Korrosionsversuche	29
3.4.2	Leitfähigkeit	34
3.5	Physikalische und chemische Beanspruchung	35
3.5.1	Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur	35

3.5.2	Beständigkeit gegenüber Schmiermitteln.....	39
3.5.3	Entflammbarkeit	40
4	Diskussion	41
4.1	Biologische Wirksamkeit	41
4.2	Chemische Rückstände	42
4.3	Produktstabilität.....	42
4.4	Korrosion und Leitfähigkeit.....	43
4.5	Physikalische und chemische Beanspruchung	43
5	Zusammenfassung und Ausblick	45

1 EINLEITUNG

Als Materialien für Bahnschwellen kommen Holz, Beton oder Stahl in Frage. Von der ÖBB-Infrastruktur AG werden nahezu ausschließlich Holz- und Betonschwellen verwendet. Aufgrund der österreichischen Topographie, die streckenweise enge Bogenradien bedingt, ist im Schienenbau nach wie vor der Einsatz von Bahnschwellen aus Holz unbedingt notwendig. Holzschwellen werden auch im Bereich von Weichen und im Verschubbereich eingesetzt, da Holzschwellen für die dort verstärkt auftretenden Vibrationen günstigere Eigenschaften aufweisen als Beton- oder Stahlschwellen. Beton- oder Stahlschwellen bedingen einen höheren Aufbau des Gleis-Unterbaus als Bahnschwellen aus Holz. Dieser höhere Aufbau ist in alten, eher eng gebauten Bahntunneln aus Platzgründen nicht möglich, weshalb auch hier Bahnschwellen aus Holz das Material der Wahl sind.

Für Bahnschwellen aus Holz werden die einheimischen Hölzer Buche oder Eiche eingesetzt, da diese für Bahnschwellen günstige mechanische Eigenschaften aufweisen. Allerdings besitzen die Hölzer Buche und Eiche keine ausreichende Dauerhaftigkeit um als unbehandelte Holzschwelle eine Nutzungsdauer von 30 Jahren oder mehr zu erreichen. Holzschwellen müssen daher mit Holzschutzmitteln imprägniert werden. Zur Imprägnierung von Holzschwellen wurden und werden weltweit beinahe ausschließlich Destillate aus Steinkohleteerölen, als Kreosot bezeichnet, verwendet. Kreosot ist als Karzinogen ohne Schwellenwert und als Karzinogen der Kategorie 1B eingestuft (Verordnung Nr. 1272/2008 EG). Aufgrund dieser Einstufung ist die Aufnahme von Kreosot in den Anhang I der Biozidprodukterichtlinie (Richtlinie 98/8/EG) sehr umstritten. Sollte Kreosot nicht in den Anhang I genannter Richtlinie aufgenommen werden, ist die Anwendung von Kreosot zur Imprägnierung von Bahnschwellen im EU-Raum in Zukunft nicht mehr möglich.

Da die Bahn jedoch, wie zuvor beschrieben, in einigen Einsatzbereichen auf die Bahnschwelle aus Holz angewiesen ist, soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Gebrauchstauglichkeit alternativer Mittel zur Schwellenimprägnierung erforscht werden. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, Imprägnierprodukte zu untersuchen, die sowohl während der Imprägnierung und der Verarbeitung für die arbeitenden Menschen und die Umwelt ein geringeres Risikopotential aufweisen, als auch während des Gebrauchs eine geringere Umweltgefährdung zeigen als das derzeit eingesetzte Kreosot. Als mögliche

Alternative kommt eine Imprägnierung der Bahnschwelle aus Holz mit Holzschutzmitteln mit günstigerem toxikologischen und ökotoxikologischen Profil als Kreosot in Frage. Dabei sind die Anforderungen an Bahnschwellen während des Einsatzes und am Nutzungsende zu berücksichtigen:

- ausreichende Dauerhaftigkeit gegen Zerstörungen durch holzerstörende Organismen (Braun-, Weiß- und Moderfäulepilze),
- Verträglichkeit mit den für die Befestigung der Schienen eingesetzten Metallen bezüglich Korrosion,
- geringe elektrische Leitfähigkeit,
- Beständigkeit gegenüber der Witterung (UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur) und chemischen Substanzen wie Ölen, Schmierstoffen etc.,
- Entflammbarkeit und Brandbeständigkeit,
- Konformität der Imprägniermittel mit den gesetzlichen Regulierungen (BPD, REACH,...),
- Entsorgung (thermische Nutzung) der Holzschwelle am Nutzungsende.

2 MATERIAL UND METHODEN

2.1 Untersuchte Schutzmittel

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden 6 Schutzmittel untersucht. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet. Abgesehen von Schutzmittel 3 sind alle untersuchten Schutzmittel Kupfer-Amin-basierte Produkte. Schutzmittel 3 ist ebenfalls Amin-basiert, jedoch kupferfrei. Schutzmittel 2 ist eine kupfer- und aminreduzierte Variante von Schutzmittel 1. Schutzmittel 5 weist die gleiche Zusammensetzung wie Schutzmittel 4 auf, vor Imprägnierung wurde der Tränklösung jedoch eine zusätzliche, hydrophobierende Komponente zugesetzt. Schutzmittel 6 ist im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Schutzmitteln ein mit öligen Lösemitteln zu verdünnendes Produkt. Alle Schutzmittel enthalten als organische Komponente ein Triazol.

Für Untersuchungen zur Korrosion und zur Entflammbarkeit (siehe 2.5 und Pkt. 2.6.3) wurden als Referenz Teeröl-imprägnierte Buchenhölzer verwendet. Diese wurden aus einer von der ÖBB Infrastruktur AG zur Verfügung gestellten, unbenutzten, frisch imprägnierten Bahnschwelle geschnitten. Diese wurde lt. Information der ÖBB Infrastruktur AG von der Firma ThyssenKrupp bezogen und ist in Abbildung 1 dargestellt.

	wässrig	ölig	enthält		Anmerkung
			Kupfer	Triazol	
Schutzmittel bzw. Produkt 1	+	-	+	+	
Schutzmittel bzw. Produkt 2	+	-	+	+	Kupfer- / Amin-reduziert
Schutzmittel bzw. Produkt 3	+	-	-	+	
Schutzmittel bzw. Produkt 4	+	-	+	+	+ Hydrophobiermittel
Schutzmittel bzw. Produkt 5	+	-	+	+	
Schutzmittel bzw. Produkt 6	-	+	+	+	

Tabelle 1: Charakterisierung der 6 untersuchten Schutzmittel



Abbildung 1: Teerölschwelle in der Übersicht (links) und querschnitten (rechts)

2.2 Biologische Wirksamkeit

Die Daten zur biologischen Wirksamkeit der in Frage kommenden Imprägnierprodukte gegenüber Braunfäule-, Weißfäule- und Moderfäulepilzen wurden in biologischen Laborversuchen erhoben.

2.2.1 Wirksamkeit gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen

Die Versuche erfolgten entsprechend der in EN 113¹ beschriebenen Methode. Dazu wurden Proben aus Buchenholz (*Fagus sylvatica*) der Größe (50 ± 0,5 mm) x (25 ± 0,5) mm x (15 ± 0,5) mm und einer mittleren Dichte von 0,69 g/cm³ hergestellt. Von jeder

¹ EN 113: Holzschutzmittel – Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzerstörende Basidiomyceten – Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit.

Probe wurde das Darrgewicht ermittelt und die Proben mit jeweils 5 Konzentrationen der in Tabelle 1 aufgelisteten Schutzmittel imprägniert. Pro Konzentration, Schutzmittel und Pilz wurden 4 Parallelproben sowie 4 Proben zur Ermittlung des Korrekturwertes imprägniert. Zur Imprägnierung wurden die darrtrockenen Proben in ein evakuierbares Gefäß eingebracht, ein Vakuum von $(0,7 \pm 0,1)$ kPa hergestellt, dieses 15 Minuten aufrechterhalten und anschließend die Tränklösung in das Vakuumgefäß eingebracht. Nach dem Einleiten von Luft wurden die untergetauchten Proben noch 2 Stunden in der Tränklösung belassen, wobei die Proben ständig mit Flüssigkeit bedeckt blieben. Nach diesem Tränkvorgang wurden die Proben gewogen und die Tränklösungs- sowie die Holzschutzmittelaufnahmen ermittelt. Die mit den wässrigen Schutzmitteln imprägnierten Proben wurden anschließend über 2 Wochen in geschlossenen Gefäßen getrocknet, während der dritten Woche wurde das Gefäß jeden Tag etwas weiter geöffnet, zu Beginn der vierten Woche wurde das Gefäß vollständig geöffnet. Bei den mit den öligen Schutzmitteln imprägnierten Proben wurden die Gefäße bereits nach einer Woche sukzessive geöffnet. Nach 4 Wochen war der Trocknungsvorgang abgeschlossen und es erfolgte eine Auswaschbeanspruchung der Proben nach EN 84².

Für die Auswaschbeanspruchung wurden sämtliche Proben, getrennt nach Imprägniermittel und Konzentration, in Gefäße gelegt, gegen Aufschwimmen beschwert und mit entionisiertem Wasser übergossen, sodass alle Proben während des gesamten Auswaschvorganges von Wasser bedeckt blieben. Dann wurde ein Druck von 4 kPa angelegt, dieser 20 Minuten aufrechterhalten und anschließend der Atmosphärendruck wiederhergestellt. Die Proben blieben 2 Stunden untergetaucht, dann wurde ein Wasserwechsel durchgeführt (5 Volumeneinheiten Wasser auf eine Volumeneinheit Holz). Die Proben blieben 14 Tage bei (20 ± 2) °C im Wasser untergetaucht, wobei das Wasser in Summe 9 x gewechselt wurde, frühestens nach einem Tag, spätestens nach 3 Tagen. Anschließend erfolgte eine 2 wöchige Trocknung der Proben im Klimaraum bei (20 ± 2) °C und (65 ± 5) % rel. LF und dann die Sterilisation der Proben mittels γ -Strahlung.

Für die Pilzversuche wurden Versuchsgefäße mit einem Malz-Agar-Medium (5,0 % Malz, 2,0 % Agar) beschickt und nach dem Erkalten mit den Versuchspilzen beimpft. Zur Untersuchung der Wirksamkeit gegenüber Braunfäulepilzen wurde der Versuchspilz

² EN 84: Holzschutzmittel – Beschleunigte Alterung von behandeltem Holz vor biologischen Prüfungen. Auswaschbeanspruchung.

Coniophora puteana, gegenüber Weißfäulepilzen *Coriolus versicolor* eingesetzt. Sobald die gesamte Oberfläche der Nährmedien vollständig vom Versuchspilz bewachsen war, wurden unter sterilen Bedingungen die sterilisierten Proben eingebracht. In jedes Versuchsgefäß wurde eine imprägnierte Probe sowie eine unbehandelte Kontrollprobe eingebracht. Zusätzlich wurden pro Versuchspilz 10 unbehandelte Virulenzproben dem Pilzangriff ausgesetzt um die Virulenz der Versuchspilze zu ermitteln. Die beschickten Versuchsgefäße wurden 16 Wochen im Brutraum bei $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und $(70 \pm 5) \%$ rel. LF inkubiert. Ein Beispiel eines mit Proben beschickten Versuchsgefäßes ist in Abbildung 2 dargestellt.

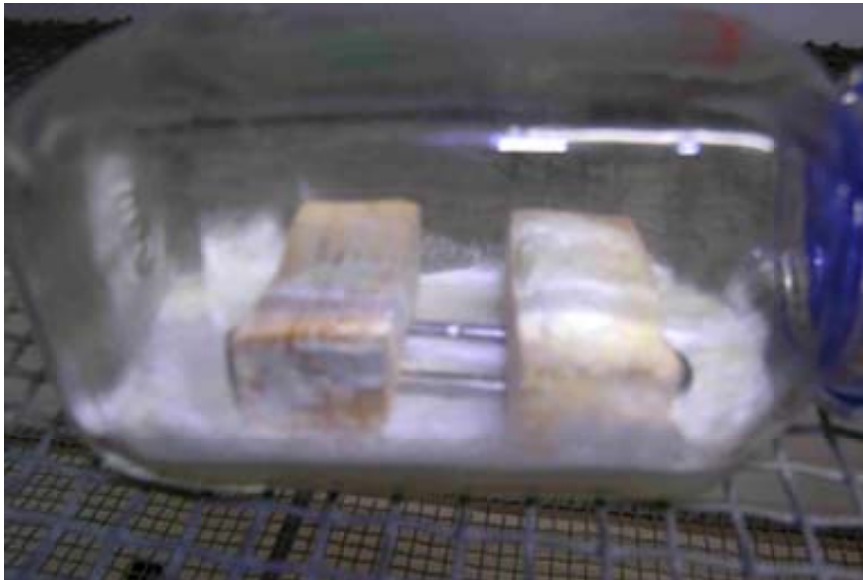


Abbildung 2: Beispiel der Versuchsmethode zur Untersuchung gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen

Nach 16 Wochen wurden sämtliche behandelten und unbehandelten Proben aus den Versuchsgefäßen entnommen, von anhaftendem Myzel befreit, gewogen, bei $103 ^\circ\text{C}$ gedarrt und erneut gewogen. Von jedem Probenkörper wurde der Masseverlust in Prozent der Anfangstrockenmasse, unter Verwendung des entsprechenden Korrekturwertes, errechnet. Proben mit einem Masseverlust von $< 3,0 \%$, die Feuchtegehalte von $< 25 \%$ bzw. $> 80 \%$ aufwiesen, wurden ausgesondert. Von jeder Serie von Parallelen wurde der mittlere korrigierte Masseverlust berechnet. Gültig ist der Versuch, wenn der mittlere Masseverlust der Virulenzproben $> 20 \%$ ist.

Der durch das untersuchte Schutzmittel bei einer bestimmten Konzentration erreichte Schutz des Holzes wird als ausreichend angesehen, wenn:

- der korrigierte mittlere Masseverlust der Proben $< 3,0\%$ der Anfangstrockenmasse beträgt und
- unabhängig von der Anzahl der gültigen Parallelprüfkörper höchstens ein Prüfkörper einen Masseverlust erlitten hat, der $> 3,0\%$ aber $< 5,0\%$ ist.

Die Grenze der Wirksamkeit eines Schutzmittels wird durch folgende 2 Konzentrationen ausgedrückt:

- die niedrigste Konzentration, die als ausreichend für den Schutz des Holzes angesehen wird und
- die nächstniedrigere Konzentration der verwendeten Konzentrationsstufen, bei der das Holz nicht mehr ausreichend geschützt ist.

2.2.2 Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen

Die Versuchsdurchführung erfolgte entsprechend der in ENV 807³ beschriebenen Methode. Dazu wurden Proben aus Buchenholz mit der Größe von $(100 \pm 0,1 \text{ mm}) \times (10 \pm 0,1) \text{ mm} \times (5 \pm 0,1) \text{ mm}$ hergestellt, von jeder Probe das Darrgewicht ermittelt und die Proben mit jeweils 5 Konzentrationen der in Tabelle 1 angeführten Schutzmittel, entsprechend der unter Pkt. 2.2.1 beschriebene Imprägniermethode imprägniert. Im Anschluss an die 4wöchige Trocknung der Proben erfolgte, wie ebenfalls unter Pkt. 2.2.1 beschrieben, eine Auswaschbeanspruchung der Proben nach EN 84.

Als Referenzprodukt wurde ein Kupfer/Chrom haltiges Holzschutzmittel (40 % Chromsäure, 16 % Kupfer-II-Oxid) in den Konzentrationen 1,0 %, 1,6 %, 2,5 % und 4,0 % eingesetzt. Je Schutzmittel, Konzentration und Versuchsdauer wurden 6 Parallelproben imprägniert + 4 Proben zur Ermittlung des Korrekturwertes. Die Versuchsdauer betrug 8, 16, 24 und 32 Wochen. Die an die Auswaschbeanspruchung anschließende Trocknung der Proben wurde beendet, sobald die Proben einen Feuchtegehalt von $(50 \pm 5)\%$ aufwiesen. Dann wurden die Proben in das Versuchssubstrat Erde eingebaut.

³ ENV 807: Holzschutzmittel – Prüfverfahren für die Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit gegen Moderfäule und andere erdbewohnenden Mikroorganismen.

Als Versuchsbehälter wurden Behälter aus Polypropylen der Größe 400 x 335 x 170 mm verwendet. Diese wurden mit einer lehmbasierten Gärtnererde gefüllt, die auf 95 % ihrer Wasserhaltekapazität eingestellt war. Die imprägnierten sowie die unbehandelten Buchenproben wurden senkrecht, mit einem Abstand von mindestens 20 mm voneinander und von den Seiten des Behälters so eingesetzt, dass sie mit 20 mm Länge aus der Oberfläche des Erds substrats herausragten. In jeden Versuchsbehälter wurden zu den imprägnierten Proben 3 unbehandelte Virulenz-Kontrollproben und 3 unbehandelte Feuchte-Überwachungsproben eingesetzt. In jeden Versuchsbehälter wurden derart 111 Proben eingesetzt, die imprägnierten Proben wurden dabei nach Zufallsgesichtspunkten auf die Versuchsbehälter verteilt. Ein Ausschnitt aus einem mit Proben besetzten Versuchsbehälter ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Beispiel der Versuchsmethode zur Untersuchung gegenüber Moderfäulepilzen

Die Substratfeuchte wurde in den ersten Wochen der Versuchsdurchführung über Wiegen der Feuchte-Kontrollen kontrolliert, später über das Gewicht der Versuchsbehälter. Bei Bedarf wurde die Substratfeuchte mittels Wasserzugabe bzw. Lüften nachjustiert. Nach 8, 16, 24 und 32 Wochen wurden jeweils die entsprechenden Proben entnommen, die Virulenz-Kontrollproben wurden nach 16 Wochen entnommen. Die Proben wurden von anhaftender Erde gereinigt, gewogen, bei 103 °C gedarrt und derart die Endfeuchten sowie die Endtrockenmasse ermittelt. Von jedem Probenkörper wurde der Masseverlust in

Prozent der Anfangstrockenmasse, unter Verwendung des entsprechenden Korrekturwertes, errechnet. Proben mit einem Masseverlust von $< 3,0\%$ die Feuchtegehalte von $< 40\%$ bzw. $> 150\%$ aufwiesen wurden ausgesondert. Von jeder Serie von Parallelen wurde der mittlere korrigierte Masseverlust berechnet.

Der Versuch wird als gültig erachtet, wenn der mittlere korrigierte Masseverlust der mit der niedrigsten Konzentration des Referenzproduktes getränkten Proben nach 32 Wochen Versuchsdauer $> 3,0\%$ ist.

Die Leistung des zu untersuchenden Schutzmittels wird bewertet durch Vergleich mit der Leistung der höchsten Konzentration des Referenzproduktes, die nach 32 Wochen Versuchsdauer einen mittleren korrigierten Masseverlust von $> 3,0\%$ aufweist. Die mittlere Aufnahmemenge bei dieser Konzentration des Referenzproduktes ist gleich bedeutend mit der nominalen Aufnahmemenge an Referenzprodukt (n.A.R.). Für jede Konzentration des zu untersuchenden Schutzmittels wurde der mittlere korrigierte Masseverlust der Proben berechnet, der zur gleichen Zeit erreicht worden wäre wie der $3,0\%$ ige Masseverlust, der mit der oben ausgewählten Konzentration des Referenzproduktes getränkten Proben. Aus dem mittleren Masseverlust der getränkten Proben jeder Konzentration des zu untersuchenden Schutzmittels wird die Aufnahmemenge an Holzschutzmittel berechnet, die einem mittleren Masseverlust von $3,0\%$ entsprechen würde. Diese Aufnahmemenge ist gleich bedeutend mit der nominalen Aufnahmemenge an zu untersuchendem Schutzmittel (n.A.S.). Die nominale wirksame Aufnahmemenge (n.w.A.) an zu untersuchendem Schutzmittel wird wie folgt errechnet und auf $0,1 \text{ kg/m}^3$ gerundet angegeben:

$$\text{-----} \times$$

Die Soll-Aufnahmemenge an Referenzprodukt beträgt für Buche 20 kg/m^3 .

2.3 Chemische Rückstände im Oberbauschotter

Diese Untersuchungen dienen der Abschätzung eines möglichen mengenmäßigen Wirkstoffaustrages aus imprägnierten Bahnschwellen und folgendem Stoffeintrages in den Oberbauschotter. Dazu wurden Proben aus Buchenholz der Größe $(50 \pm 0,5 \text{ mm}) \times$

($25 \pm 0,5$) mm x ($15 \pm 0,5$) mm hergestellt und mit den Schutzmitteln entsprechend der unter Pkt. 2.2.1 beschriebenen Imprägniermethode imprägniert. Dabei wurden zur Imprägnierung für jedes Schutzmittel jeweils die höchsten eingesetzten Konzentrationen herangezogen, da davon auszugehen ist, das bei diesen Konzentrationen auch die höchste Auswaschung resultiert. Die imprägnierten, getrockneten Proben wurden anschließend dem unter Pkt. 2.2.1 beschriebenen Auswaschverfahren unterzogen. Sämtliche dabei gewonnenen Auswaschwässer wurden gesammelt, vermengt und anschließend chemisch analytisch auf vorhandenen Wirkstoffgehalt untersucht.

Die Analytik auf Kupfer und Bor erfolgte mittels ICP-OES. Die Analytik auf quartäre Ammoniumverbindungen erfolgte, indem nach der Homogenisierung eine definierte Probenmenge mit Deionat verdünnt und mit 0,1N Salzsäure auf pH 3 eingestellt wurde. Anschließend wurde mit 0,0005 molarer Natriumlaurylsulfat-Lösung bis zum Äquivalenzpunkt titriert. Triazole wurden analysiert, indem die wässrigen Proben vor der Analyse homogenisiert wurden. Definierte Probenmengen wurden mit einem polaren organischen Lösemittel verdünnt und mittels Kapillarsäulen-Gaschromatographie in Kombination mit einem Flammenionisationsdetektor (GC-FID) gemessen. Verwendete Säule: HP-5-19091J-413. Aufgrund der Probenmatrix wurden die Proben im Zuge der Probenvorbereitung einer Festphasenextraktion unterzogen. Die Auswertung erfolgte durch Kalibrierung mit internem Standard. Zur Herstellung der Kalibrierlösung wurden ausschließlich zertifizierte Standards (PESTANAL® und/oder Dr. Ehrenstorfer®) verwendet. Bei sämtlichen Analysen erfolgten jeweils Doppelbestimmungen.

2.4 Produktstabilität

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Stabilität des Imprägnierproduktes mit geringem Gehalt an Formulierungshilfsstoffen zu erforschen. In Absprache mit dem Schutzmittelhersteller wurde eine bestehende Labormethode zur Untersuchung der Produktstabilität adaptiert. Dazu wurden sowohl von Schutzmittel 1 als auch Schutzmittel 2 jeweils 1,0 %ige, 2,0 %ige, 3,0 %ige und 5,0 %ige wässrige Lösungen hergestellt. Diesen Lösungen wurden Buchenholzklotzchen der Größe 10 x 10 x 10 mm zugegeben. Die beschickten Gefäße wurden anschließend bei (22 ± 2) °C geschüttelt. Nach 72 Stunden wurde das Aussehen der Lösungen beurteilt. Blieb die Lösung klar, war die Lösung stabil. Trat eine Eintrübung der Lösung auf, war die Lösung nicht stabil, die Belastung mit Buchenholzinhaltsstoffen war zu groß.

2.5 Korrosion und Leitfähigkeit

2.5.1 Korrosionsversuche

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Interaktion zwischen den Schutzmitteln und den derzeit bei der ÖBB verwendeten Schienenbefestigungsmitteln (Schwellenschrauben + Rippenplatten) sowie diversen anderen Metallen als Verbindungsmittel zu erforschen. Die Versuchsmethode wurde in Anlehnung an Jermer 2005⁴ gewählt. Die Imprägnierung der Versuchshölzer aus Buche (*Fagus sylvatica*) der Dimension von jeweils 1000 x 80 x 55 mm erfolgte mittels Kesseldruckimprägnierung in den Imprägnieranlagen der Schutzmittelhersteller. Produkt 6 konnte nicht in die Untersuchung einbezogen werden, da es dem Schutzmittelhersteller nicht möglich war, Proben der Größe 1000 x 80 x 55 mm zu imprägnieren.

Als Verbindungsmittel wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Schienenbefestigungsmittel bzw. Holzbauschrauben in die Hölzer eingesetzt. Sie wurden zuvor in Isopropanol gewaschen und nach der Trocknung gewogen. Zum Einsetzen wurden die Löcher vorgebohrt um ev. Beschädigungen der Verzinkung bzw. Zink-Nickel-Beschichtung möglichst zu verhindern. Die Holzbauschrauben wurden senkrecht, Kopf nach oben, in die Buchenhölzer eingeschraubt, die Jahrringe bildeten mit der unten liegenden Fläche einen Winkel von $(45 \pm 15)^\circ$. Die Hirnhölzer wurden zuvor mit einem 2-Komponenten-Polyurethanharzlack abgedichtet.

Schwellenschrauben wurden von der ÖBB Infrastruktur AG zur Verfügung gestellt. Die Dimension der Schwellenschrauben war für die Versuchshölzer ungeeignet, größer dimensionierte Buchenhölzer mit den Schutzmitteln zu imprägnieren war jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund wurden die Schwellenschrauben auf 90 mm gekürzt. Als sog. „Rippenplatten“ dienten in der Versuchsanordnung Stahlbleche der Stärke 5 mm aus S235. Diese wurden auf eine Größe von 50 x 50 mm zugeschnitten. Die für die Einbringung der Schwellenschrauben vorgesehenen Löcher in den Buchenhölzern wurden bereits vor Imprägnierung der Hölzer gebohrt.

⁴ Jermer, J, Andersson, B-L, 2005: Corrosion of fasteners in heat-treated wood – progress report after two years' exposure outdoors, IRG/WP 05-40296.

Verbindungsmittel		
Code Nr.	Bezeichnung und Material	Abmessung (mm), Bezeichnung
S	Schwellenschraube S355	90 x 25 (zugeschnitten)
R	Rippenplatte S235	50 x 50 (zugeschnitten)
1	Edelstahl A2	5,5 x 60 Senkkopf
2	feuerverzinkt	6,0 x 50 Senkkopf
3	Zink-Nickel-Beschichtung	8,0 x 60 Senkkopf
4	galvanisch verzinkt, blau chromatiert	8,0 x 60 6kt Kopf mit Torx

Tabelle 2: Verwendete Verbindungsmittel

Die Exposition der beschickten Buchenholzproben erfolgte am Freigelände der Holzforschung Austria. Nach 6 Monaten Exposition wurden alle Verbindungsmittel zur Untersuchung entnommen. Die Bewertung wurde visuell, nach dem in Tabelle 3 angegebenen Schlüssel durchgeführt. Von den „Rippenplatten“ wurde jene Seite bewertet, die dem Holz auflag, von den Schwellenschrauben nur jene Bereiche die mit den imprägnierten Hölzern in Kontakt waren. Zusätzlich wurden die entnommenen Holzbauschrauben von ev. anhaftendem Rost gereinigt und erneut gewogen. Der prozentuelle Materialverlust wurde anhand der gewogenen Masse vor und nach dem Versuch berechnet.

Die Reinigung der Holzbauschrauben von anhaftendem Rost wurde wie folgt durchgeführt:

- 5 Minuten in 5 %iger Essigsäure im Ultraschallbad,
- 2 Minuten in heißem Wasser im Ultraschallbad,
- Reinigung in heißem, fließendem Wasser,
- Trocknung,
- 30 Sekunden Tauchen in 96 %igem Isopropanol und
- erneute Trocknung.

Bewertung	Beschreibung	Definition
0	kein Rost	
1	geringfügig	< 5 % d. Oberfläche angegriffen
2	mittel	5-50 % d. Oberfläche angegriffen
3	stark	51-95 % d. Oberfläche angegriffen
4	sehr stark	> 95 % d. Oberfläche angegriffen

Tabelle 3: Bewertungsschema der Korrosion

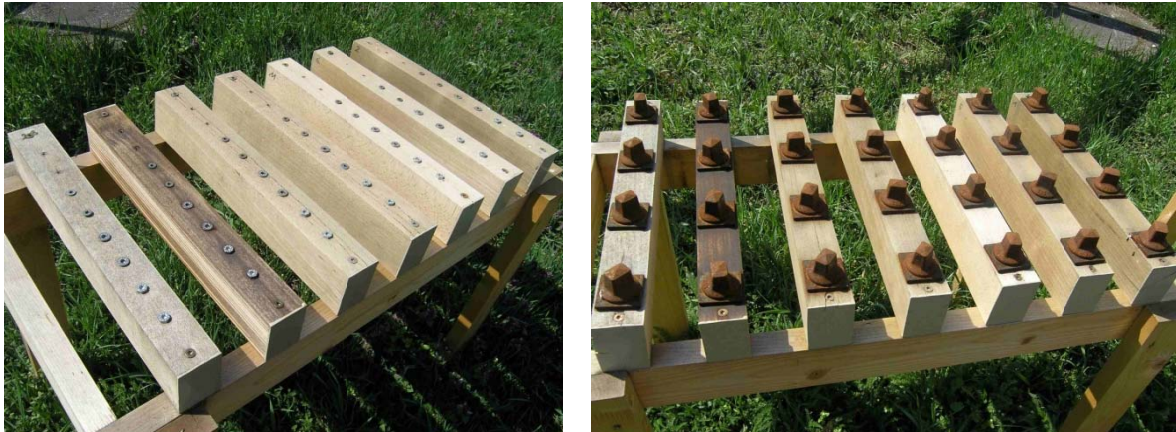


Abbildung 4: Versuchsanordnung der Korrosionsuntersuchung mit Holzbauschrauben (links) und mit Schwellenschrauben + „Rippenplatten“ (rechts)

2.5.2 Leitfähigkeit

Diese Untersuchungen dienen der Abschätzung des Einflusses der alternativen Schutzmittel auf den elektrischen Widerstand bzw. die Leitfähigkeit des Holzes. Je Schutzmittel wurden 10 Proben aus Buchenholz der Dimension 50 x 50 x 20 cm angefertigt und mittels Vakuumimprägnierung wie unter Pkt. 2.2.1 beschrieben imprägniert und anschließend entsprechend über 4 Wochen getrocknet. Zur erneuten Befeuchtung wurden die Proben in wassergefüllte Gefäße eingebracht, über 20 Minuten einem Unterdruck von 4 kPa ausgesetzt und anschließend 2 Stunden im Wasser gelagert. Die derart befeuchteten Proben wurden anschließend in Polyethylenbeutel verpackt und 72 Stunden bei 20 °C gelagert. Als unbehandelte Buchenkontrolle dienen mit Wasser imprägnierte Proben. Als Referenzprodukt dienen Proben der Dimension 50 x 50 x 20 cm die aus einer von der ÖBB Infrastruktur AG zur Verfügung gestellten Bahnschwelle geschnitten wurden (zur Charakterisierung siehe Pkt. 2.1).

Nach 72 Stunden Inkubation bei 20 °C wurde die Holzfeuchtigkeit der durchtränkten Holzproben gravimetrisch ermittelt und die elektrische Spannung mittels MCM-Datenlogger-System (Firma Brookhuis Mikro-Electronics BV; Messbereich von 6,25 mV bis 200 V bzw. 200 Ω bis 20 k Ω) gemessen. Die Proben wurden dann auf Holzfeuchtigkeiten von ca. 80 %, 65 %, 45 %, 22 % sowie 12 % getrocknet. Sobald die

Zielfeuchten erreicht waren, wurden die Proben wieder in Polyethylenbeutel verpackt und nach jeweils mindestens 72 Std. Lagerung bei 20 °C die Holzfeuchtigkeit sowie die elektrische Spannung, wie zuvor beschrieben, bestimmt.

2.6 Physikalische und chemische Beanspruchung

2.6.1 Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur

Die Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur wurde unter Berücksichtigung der Holz-Hydrophobierung untersucht. Buchenholzproben der Größe $(110 \pm 5) \times (40 \pm 5) \times (10 \pm 5)$ mm wurden, wie unter Pkt. 2.2.1 angegeben, mit Schutzmittel 4 und Schutzmittel 5 (mit hydrophobierender Komponente) imprägniert und getrocknet. Von den getrockneten Proben wurde $\frac{1}{4}$ der Proben ungealtert im Klimaraum bei (20 ± 1) °C und (65 ± 1) % rel. LF gelagert. Ein weiteres Viertel der Proben wurde zur Untersuchung der UV-Beständigkeit einer UV-Belastung in einem QUV-Gerät ausgesetzt. Dabei wurde der in Tabelle 4 angeführte Bewitterungszyklus nach EN 152 mit UV- und Wasserbelastung herangezogen (Wellenlänge λ 290 – 400 nm, Hauptwellenlänge λ 340; Wasserfluss 4 Liter/Minute). Die Gesamtzykluslänge betrug 672 Stunden, das entspricht 56 der in Tabelle 4 angeführten UV-Spray Zyklen.

Schritt	Programm	Dauer (h:min)	Gesamtdauer (h:min)
1	Schritt 2 - 8 wird 9 x wiederholt	-	
2	Spray	00:01	
3	Dunkelheit	00:04	
4	Spray	00:01	
5	Dunkelheit	00:04	
6	Spray	00:01	
7	Dunkelheit	00:04	
8	UV	00:30	06:45
9	UV	01:15	
10	Dunkelheit	00:15	
11	UV	01:45	
12	Dunkelheit	00:15	
13	UV	01:30	
14	Dunkelheit	00:15	
15	Letzer Schritt - gehe zu Schritt 1	-	05:15
			12:00

Tabelle 4: Verwendeter UV-Bewitterungszyklus

Zur Untersuchung der Hitze- und Tieftemperaturbeständigkeit wurde jeweils ein weiteres Viertel der Proben über 4 Wochen einer Temperatur von 60 °C bzw. von -18°C ausgesetzt.

Nach Abschluss der Beanspruchungsmethoden wurden alle Proben im Klimaraum bei (20 ± 1) °C und (65 ± 1) % rel. LF konditioniert. Die Proben wurden dann für die stationären Wasserlagerungs- und Rücktrochnungsversuche bzw. die Kontaktwinkelmessung herangezogen.

2.6.1.1 Stationärer Wasserlagerungs- und Rücktrochnungsversuch

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an EN 927-5⁵. Sämtliche Probenoberflächen, mit Ausnahme der markfernen 110 x 40 mm großen Oberfläche, wurden mit einem 2-Komponenten-Polyurethanharzlack versiegelt und bis zur Gewichtskonstanz (Masseänderung zwischen 2 Messungen < 0,3 %) im Klimaraum bei (20 ± 1) °C und (65 ± 1) % rel. LF konditioniert. Dann wurden die Proben einer Wasserlagerung über 72 Stunden und anschließender 144 Stunden Rücktrochnung unterzogen. Der Versuch wurde je Variante (Schutzmittel und Beanspruchungsmethode) mit 5 Proben durchgeführt, die Wasseraufnahme wurde nach 6, 24 und 72 Stunden, die Rücktrochnung nach 144, 244 und 408 Stunden (bezogen auf den Beginn der Wasserlagerung) gravimetrisch bestimmt.

2.6.1.2 Kontaktwinkelmessung

Vor der Messung des Kontaktwinkels wurden die Proben bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert. Die Bestimmung des Kontaktwinkels erfolgte mittels des Messgerätes „Digidrop“ der Fa. GBX Instruments quer zur Faserrichtung nach der Methode der statischen Kontaktwinkelmessung. Die Messung des Kontaktwinkels wurde in Anlehnung an die DIN 55660-2:2011-12⁶ durchgeführt. Abweichend von der Norm

⁵ EN 927-5: Beschichtungsstoffe – Beschichtungsstoffe und Beschichtungssysteme für Holz im Außenbereich – Teil 5: Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit.

⁶ DIN 55660-2: Beschichtungsstoffe - Benetzbarkeit - Teil 2: Bestimmung der freien Oberflächenenergie fester Oberflächen durch Messung des Kontaktwinkels.

wurde lediglich eine Prüfflüssigkeit (Wasser) verwendet und der Kontaktwinkel der Prüfflüssigkeit an der Holzoberfläche unmittelbar nach Abreißen des Tropfens manuell bestimmt. Gemessen wurden je 5 Proben, an jeder Probe wurden jeweils 3 Messungen durchgeführt.

2.6.2 Beständigkeit gegenüber Schmiermitteln

Die Beständigkeit gegen Öle und Schmiermittel wurde in einer Labor-Versuchsreihe untersucht. Dazu wurden Buchenholzproben der Größe $(110 \pm 5) \times (40 \pm 5) \times (10 \pm 5)$ mm, wie unter Pkt. 2.2.1 angegeben, mit den in Tabelle 1 angeführten Schutzmitteln imprägniert. Die getrockneten Proben wurden mit den in Tabelle 5 angeführten, von der ÖBB Infrastruktur AG zur Verfügung gestellten, Schmierstoffen oberflächlich beschichtet. Nach 4 Wochen Inkubation im Klimaraum bei $(20 \pm 1) \text{ °C}$ und $(65 \pm 1) \%$ rel. LF wurden die Proben quer zur Faserrichtung schräg angeschnitten und mikroskopisch auf Eindringtiefe in das Holz untersucht. Anhand der Eindringtiefe wird eine Auswirkung der Schmiermittel auf die imprägnierten Hölzer beurteilt. Eine rein oberflächliche Einwirkung hat keine Auswirkung auf die biologische Wirksamkeit einer durchimprägnierten Holzschwelle.

Schmiermittel		
Code Nr.	Bezeichnung lt. ÖBB	Verwendung des Stoffes lt. SDB
1	Sintono Terra HLK	Schmierstoff
2	LC 002 TS	Schienenschmierfett
3	Tramlub F 234 G	Schienenschmierstoff (Fließfett)
4	Keltrack Portec	Flüssiger Reibungsmodifizierer

Tabelle 5: Untersuchte Schmiermittel

2.6.3 Entflammbarkeit

Die Entflammbarkeit und Brandbeständigkeit der mit den alternativen Schutzmitteln imprägnierten Buchenhölzer wurde vergleichend mit unbehandelter Buche und mit Kreosot-imprägnierter Buche untersucht. Die Untersuchungen dienen der Orientierung, ob zwischen Kreosot-imprägnierten Hölzern bzw. den mit den alternativen Schutzmitteln imprägnierten Hölzern große Unterschiede bezüglich Entflammbarkeit und

Brandbeständigkeit herrschen. Die Imprägnierung der Buchenhölzer (*Fagus sylvatica*) der Größe 1000 x 80 x 55 mm erfolgte mittels Kesseldruckimprägnierung in den Imprägnieranlagen der Schutzmittelhersteller. Aus den imprägnierten Buchenhölzern wurden Proben der Größe 200 x 80 x 55 mm geschnitten. Kreosot-imprägnierte Proben, die als Referenz dienten, wurden aus der von der ÖBB Infrastruktur AG zur Verfügung gestellten Bahnschwelle geschnitten (zur Charakterisierung siehe Pkt. 2.1). Sämtliche Proben wurden der Flamme eines Bunsenbrenners ausgesetzt und die Zeit von Versuchsbeginn (Einbringen der Probe in die Bunsenbrennerflamme) bis Versuchsende (Auftreten der ersten orangefarbenen Flammen aus der Holzprobe) gemessen.

Die Entfernung der Holzprobe vom Fuß des Bunsenbrenners betrug ca. 24 cm. Dies entsprach in etwa jener Entfernung, bei der die auf die Probe auftreffende Bunsenbrennerflamme zu Versuchsbeginn eine Temperatur von $(510 \pm 10)^\circ\text{C}$ aufwies. Die Temperatur der Bunsenbrennerflamme bei diesem Punkt wurde mittels Thermoelement gemessen. Sobald die gemessene Temperatur $(510 \pm 10)^\circ\text{C}$ erreichte, wurden die Versuchsproben in die Bunsenbrennerflamme geschoben. Nach dem Auftreten der ersten orangefarbenen Flammen aus der Holzprobe wurde die Zeitmessung beendet und die Holzprobe aus der Bunsenbrennerflamme gezogen. Das weitere Verhalten der Flammen und des Holzes wurde beobachtet. Pro Schutzmittel wurden 6 Parallelproben gemessen. Schutzmittel 6 konnte nicht in die Untersuchung einbezogen werden, da es dem Schutzmittelhersteller nicht möglich war, Proben der Größe 1000 x 80 x 55 mm zu imprägnieren. In Abbildung 5 ist die Versuchsmethode, in Abbildung 6 die Temperaturmessung und das Auftreten von ersten, orangefarbenen Flammen dargestellt.



Abbildung 5: Versuchsaufbau mit Bunsenbrenner

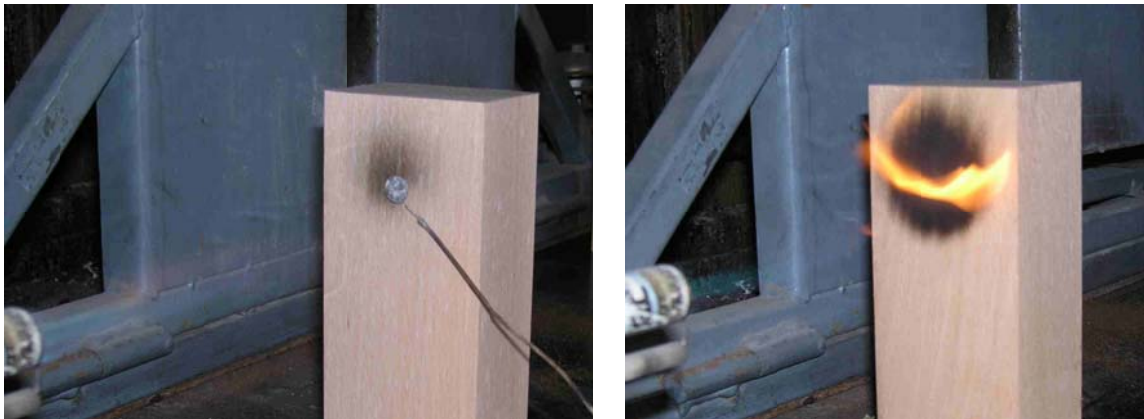


Abbildung 6: Temperaturmessung mittels Thermoelement (links); erste, orangefarbene Flammen züngeln aus einer unbehandelten Kontrollprobe (rechts)

3 ERGEBNISSE

3.1 Biologische Wirksamkeit

3.1.1 Wirksamkeit gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen

Die Ergebnisse der Untersuchung der Wirksamkeit der Schutzmittel gegenüber Braun- und Weißfäulepilze sind in Tabelle 7, die Masseverluste der unbehandelten Kontroll- und Virulenzproben sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Wie in Tabelle 6 zu sehen ist, sind die Masseverluste sämtlicher Virulenz-Proben > 20,0 %, d.h. die eingesetzten Versuchspilze wiesen eine ausreichende Aggressivität gegenüber Buchenholz auf. Die durchgeführten Versuche sind somit als gültig zu erachten. Die Masseverluste aller in die Versuchsgefäße eingebrachten, unbehandelten Kontrollproben (Einbau 1:1 mit den imprägnierten Proben) lagen ebenfalls > 20 %, d.h. sämtliche imprägnierten Proben konnten in die Auswertung einbezogen werden.

Art der Kontrollen	Versuchspilz	Masseverlust (%)		
		MW	Max	Min
Kontrollproben (1:1 Einbau mit imprägnierten Proben)	<i>Coniophora puteana</i>	43,07	58,12	34,65
	<i>Coriolus versicolor</i>	30,57	54,01	22,12
Virulenzproben	<i>Coniophora puteana</i>	40,74	43,82	37,95
	<i>Coriolus versicolor</i>	28,53	35,07	24,56

Tabelle 6: Mittlere Masseverluste (MW) der Kontroll- und Virulenzproben sowie Maximal- (Max) und Minimalwerte (Min)

Wie in Tabelle 7 zu sehen ist, sind von den Produkten 1, 2, 3 und 6 zur ausreichend vorbeugenden Wirkung gegenüber dem Braunfäulepilz *Coniophora puteana* jeweils höhere Schutzmittelmengen notwendig, als gegenüber dem Weißfäulepilz *Coriolus versicolor*. Die Schutzmittelkonzentration bei der Grenze der Wirksamkeit liegt bei Produkt 1 gegenüber *Coniophora puteana* bei 1,9-2,6 %, gegenüber *Coriolus versicolor* bei < 0,8 %. Bei der kupfer- und aminreduzierten Variante Produkt 2 liegt die notwendige Schutzmittelkonzentration bei der Grenze der Wirksamkeit gegenüber *Coniophora puteana* ebenfalls bei 1,9-2,6 %, gegenüber *Coriolus versicolor* mit 1,3-1,9 % etwas höher. Mit Produkt 3 (kupferfreie Schutzmittelvariante) wurde eine Konzentration gegenüber *Coniophora puteana* von 1,3-1,9 %, gegenüber *Coriolus versicolor* von < 0,8 % bestimmt. Mit Produkt 6 wurde gegenüber *Coniophora puteana* keine Grenze der Wirksamkeit ermittelt, da selbst die höchste getestete Schutzmittelkonzentration keinen ausreichenden Schutz gegenüber diesen Versuchspilz zeigte, gegenüber *Coriolus versicolor* liegt sie bei 3,0-4,0 %.

Von den Produkten 4 und 5 (Variante mit hydrophobierender Komponente) sind zur ausreichend vorbeugenden Wirkung gegenüber dem Braunfäulepilz *Coniophora puteana* und dem Weißfäulepilz *Coriolus versicolor* jeweils gleich hohe Schutzmittelmengen notwendig. Die Schutzmittelkonzentration bei der Grenze der Wirksamkeit liegt bei Produkt 4 gegenüber beiden Pilzen bei 0,82-1,02 %, bei Produkt 5 jeweils bei 0,65-0,82 %.

Schutzmittel	Versuchspilz	Grenze der Wirksamkeit		
		mittlerer korrigierter Masseverlust für die höchste Konzentration ohne Schutzwirkung (%)	mittlere Schutzmittelaufnahme (kg/m ³)	Konzentration der Tränklösung (%)
Produkt 1	<i>Coniophora puteana</i>	14,01	12,18 – 16,91	1,9 – 2,6
	<i>Coriolus versicolor</i>	- *	< 5,23	< 0,8
Produkt 2	<i>Coniophora puteana</i>	12,58	11,99 – 16,46	1,9 – 2,6
	<i>Coriolus versicolor</i>	18,66	8,54 – 12,45	1,3 – 1,9
Produkt 3	<i>Coniophora puteana</i>	4,28	8,17 – 11,83	1,3 - 1,9
	<i>Coriolus versicolor</i>	- *	< 5,10	< 0,8
Produkt 4	<i>Coniophora puteana</i>	4,48	5,25 – 6,58	0,82 – 1,02
	<i>Coriolus versicolor</i>	3,48	5,28 – 6,54	0,82 – 1,02
Produkt 5	<i>Coniophora puteana</i>	- *	4,21 – 5,31	0,65 – 0,82
	<i>Coriolus versicolor</i>	3,96	4,20 – 5,26	0,65 – 0,82
Produkt 6	<i>Coniophora puteana</i>	- **	- **	- **
	<i>Coriolus versicolor</i>	10,08	12,74 - 16,26	3,0 – 4,0

* Der mittlere korrigierte Masseverlust für die höchste Konzentration ohne Schutzwirkung wurde nicht erfasst, da bereits die niedrigste Konzentration eine Schutzwirkung bewirkte.

** Die Grenze der Wirksamkeit wurde nicht ermittelt, da selbst die höchste untersuchte Konzentration noch einen Masseverlust > 3,0 % aufwies.

Tabelle 7 Ergebnisse der Untersuchung der Wirksamkeit gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen

3.1.2 Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen

Die Ergebnisse der Untersuchung der Wirksamkeit der Schutzmittel gegenüber Moderfäulepilzen sind in Tabelle 8, die Ergebnisse des CK-Referenzproduktes sind in Tabelle 9, die Masseverluste der unbehandelten Kontroll- und Virulenzproben sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Wie in Tabelle 10 zu sehen ist, lagen die mittleren Masseverluste sämtlicher Virulenzproben aller Versuchsbehälter nach 16 Wochen Versuchszeitraum bei 36,96 %, mit einem minimalen Wert von 29,77 % d.h. die eingesetzte Erde wies eine ausreichende Aggressivität gegenüber Buchenholz auf. Die durchgeführten Untersuchungen sind als gültig zu erachten, da der mittlere korrigierte Masseverlust der mit der niedrigsten Konzentration des CK-Referenzproduktes getränkten Proben nach 32 Wochen Versuchsdauer > 3,0 % ist (siehe Tabelle 9).

	Schutzmittel					
	1	2	3	4	5	6
nominale wirksame Aufnahme- menge (n.w.A.) an Schutzmittel (kg/m³)	24,8	-*	-*	36,5	38,0	-*

* Die Berechnung der nominal wirksamen Aufnahmemenge an Schutzmittel war nicht möglich, da alle, für die Bestimmung der nominalen Aufnahmemenge an zu untersuchendem Schutzmittel notwendigen Konzentrationen der Tränklösung des zu untersuchenden Schutzmittels, Werte > 3,0 % ergaben.

Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchung der Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen mit den 6 untersuchten Schutzmitteln

Schutz- mittel	Schutzmittel- konzentration % (m/m)	mittlere Schutz- mittelaufnahme (kg/m ³)	mittlerer korrigierter Masseverlust (%) nach x Wochen			
			8	16	24	32
CK- Referenz- produkt	0	0	17,10	32,72	45,07	46,64
	1,00	6,53	1,96	4,37	8,34	12,13
	1,60	9,7	0,19	3,20	4,64	5,03
	2,50	16,44	0,44	1,00	1,21	2,11
	4,00	26,80	0,07	0,31	0,21	0,11

Tabelle 9: Ergebnisse der Untersuchung der Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen mit dem CK-Referenzprodukt

Art der Kontrollen	Versuchszeitraum (Wochen)	mittlerer Masseverlust (%)		
		MW	Max	Min
Kontrollproben	8	17,58	21,21	13,59
	16	33,58	43,43	25,79
	24	44,77	54,75	33,56
	32	45,23	58,03	34,22
Virulenzproben	16	36,96	42,05	29,77

Tabelle 10: Mittlere Masseverluste (MW) der Kontroll- und Virulenzproben sowie Maximal- (Max) und Minimalwerte (Min)

3.2 Chemische Rückstände

Die Ergebnisse der Untersuchung der chemischen Rückstände im Oberbauschotter sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Aus Tabelle 11 ist ersichtlich, dass abgesehen von Schutzmittel 1 jeweils um die 35 mg Kupfer ausgewaschen wurden. Aus Schutzmittel 1 wurden 120 mg Kupfer ausgewaschen. Aus Schutzmittel 1 wurden 7,8 mg Bor, aus Schutzmittel 2 wurden 14,5 und aus Schutzmittel 3 wurden 35 mg Bor ausgewaschen. Quartäre Ammoniumverbindungen waren in keiner Probe nachweisbar. Aus den Schutzmitteln 1 und 2 wurden 2,58 bzw. 2,04 mg Triazol ausgewaschen, aus Schutzmittel 3 wurden 1,05 mg, aus den Schutzmitteln 4, 5 und 6 wurden jeweils < 1,0 mg Triazol ausgewaschen (0,22, 0,89 bzw. 0,13 mg).

Zu beachten ist, dass die Auswaschungen mit jeweils 12 imprägnierten Buchenproben der Größe 50 x 25 x 15 mm durchgeführt wurden. Das entspricht einem Probenvolumen von 12 x 18,75 cm³ bzw. einer Probenoberfläche von 12 x 47,5 cm² bzw. einem Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche von 1 : 2,5. Eine Bahnschwelle mit einer Größe von 260 x 25 x 15 cm weist hingegen ein Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche von 1 : 0,22 auf. Dies ist bei einer Hochrechnung der ermittelten Ergebnisse zu beachten, da das Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche die Menge an ausgewaschenen Wirkstoffen durchaus beeinflussen kann.

Schutzmittel	Nachgewiesener Wirkstoff (mg)			
	Kupfer	Bor	Quat	Triazol
1	119,1	7,8	< BG	2,58
2	35,9	14,5	< BG	2,04
3	-	35,0	< BG	1,05
4	37,8	-	< BG	0,22
5	36,7	-	< BG	0,89
6	34,5	-	< BG	0,13

Tabelle 11: Wirkstoffauswaschung (mg) aus imprägnierten Buchenhölzern nach EN 84 (< BG = unter der Bestimmungsgrenze von 6,15 mg/l)

3.3 Produktstabilität

Alle untersuchten Konzentrationen von Schutzmittel 1 und Schutzmittel 2 wiesen bei Beendigung des Versuchs jeweils klare Lösungen auf. Bei keiner untersuchten Konzentration war eine Trübung der Lösung zu erkennen. Ein Beispiel der Lösungen mit Schutzmittel 1 bei Versuchsansatz und nach Beendigung des Versuchs ist in Abbildung 7 zu sehen.

Schutzmittel 1

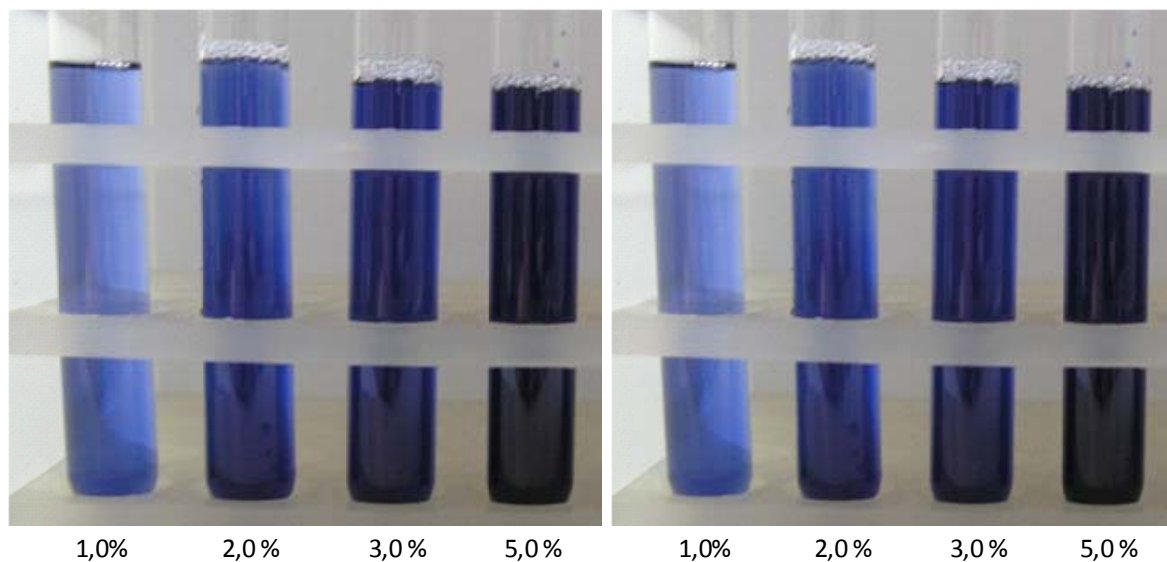


Abbildung 7: Beispiel der klaren Lösungen von Schutzmittel 1 bei Versuchsansatz (links) und nach Beendigung des Versuchs (rechts)

3.4 Korrosion und Leitfähigkeit

3.4.1 Korrosionsversuche

Die visuelle Bewertung und der prozentuelle Masseverlust der nach 6 Monaten Exposition entnommenen Verbindungsmittel sind in Tabelle 12 aufgelistet. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der visuellen Bewertung grafisch dargestellt, in Abbildung 9 die prozentuellen Masseverluste der untersuchten Holzbauschrauben. In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Holzbauschrauben sowie die Schwellenschrauben und „Rippenplatten“ nach 6 Monaten Freilandexposition und Kontakt mit den jeweiligen Hölzern (unbehandelte Kontrolle bzw. imprägniert) abgebildet.

Aus Tabelle 12 ist ersichtlich, dass die mit Kreosot (Teeröl) imprägnierten Hölzer die geringste korrosive Wirkung auf die untersuchten Verbindungsmittel haben. Lediglich die Schwellenschrauben wiesen nach 6 Monaten in Kreosot-imprägnierten Proben geringfügige Korrosion auf (< 5 % der Oberfläche). In der unbehandelten Buchenkontrolle sowie in den mit Schutzmitteln 1 – 5 imprägnierten Hölzern wiesen die Schwellenschrauben starke Korrosion (51 – 95 % der Oberfläche) auf. Die „Rippenplatten“ wiesen, abgesehen vom Kontakt mit den Kreosot-imprägnierten Proben, im Kontakt mit allen anderen Proben eine mittlere Korrosion von 5 – 50 % der Oberfläche auf. Schutzmittel 3 weist offensichtlich eine geringe Korrosionswirkung auf, alle untersuchten Holzbauschrauben waren nach 6 Monaten frei von Korrosion.

Die Holzbauschrauben aus Edelstahl A2 (Code Nr. 1) sind mit allen Hölzern gut verträglich. Die feuerverzinkten Holzbauschrauben (Code Nr. 2) wiesen im Kontakt mit allen Hölzern zumindest geringfügige Korrosion auf, in Verbindung mit Schutzmittel 1 starke Korrosion. Die Zink-Nickel-beschichteten Holzbauschrauben (Code Nr. 3) wiesen in Kontakt mit den Schutzmitteln 1 und 2 sehr starke, mit Schutzmittel 4 starke und mit Schutzmittel 5 mittlere Korrosion auf. Die galvanisch verzinkten, blau chromatierten Holzbauschrauben wiesen, abhängig von der jeweiligen Schutzmittelimprägnierung keine (mit Schutzmittel 5) bis sehr starke (Schutzmittel 1) Korrosion auf.

+

Verbindungs- mittel Code Nr.	visuelle Bewertung mit Schutzmittel							Masseverlust (%) mit Schutzmittel						
	K	T	Pr 1	Pr 2	Pr 3	Pr 4	Pr 5	K	T	Pr 1	Pr 2	Pr 3	Pr 4	Pr 5
S	3	1	3	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-
R	2	0	2	2	1,5	2	2	-	-	-	-	-	-	-
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	3	1	0	1	1	0,24	0,32	2,03	1,11	0,32	0,32	0,47
3	1	0	4	4	0	3	2	0,11	0,11	1,00	0,45	0,19	0,52	0,26
4	0	0	4	3	0	2	0	0,10	0,03	1,10	0,66	0,10	0,43	0,17

Tabelle 12: Ergebnisse der visuellen Bewertung der Korrosion und der ermittelten Masseverluste (%) der verschiedenen Schraubenarten in der unbehandelten Buchenkontrolle (K), der mit Kreosot (T) sowie der mit den 5 Schutzmitteln (Pr 1 – Pr 5) imprägnierten Proben

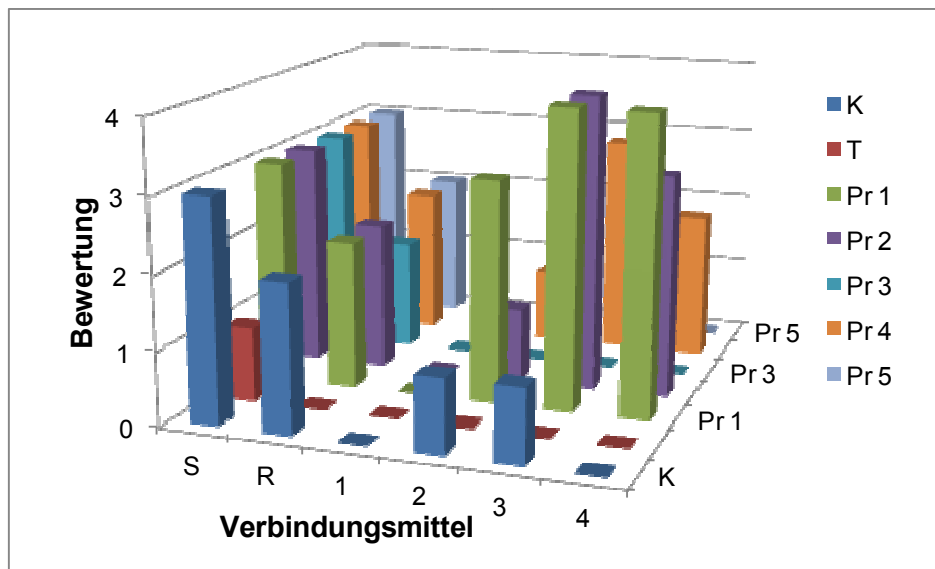


Abbildung 8: Ergebnisse der visuellen Bewertung der Korrosion der verschiedenen Verbindungsmittel in der unbehandelten Buchenkontrolle (K), der mit Kreosot (T) sowie der mit den 5 Schutzmitteln (Pr 1 – Pr 5) imprägnierten Proben

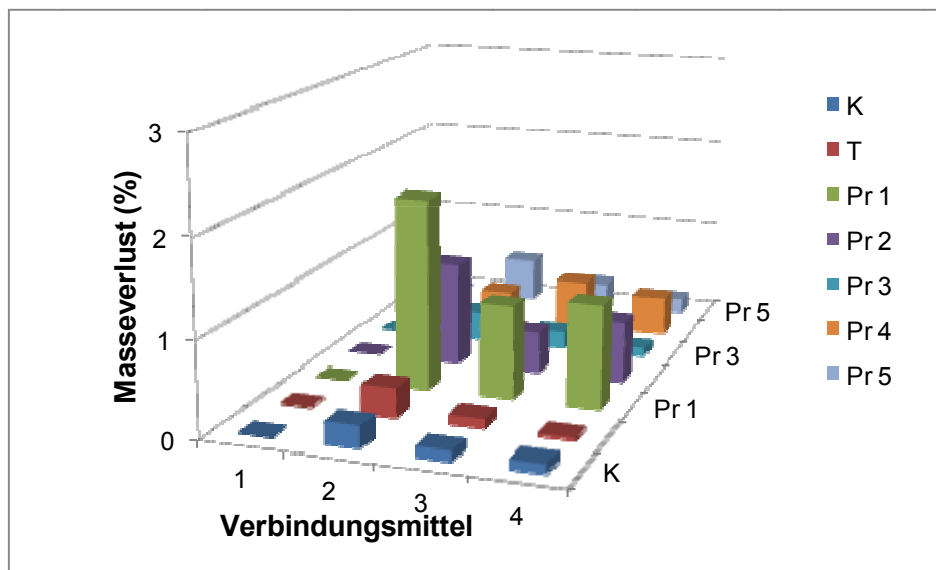


Abbildung 9: Ergebnisse der ermittelten Masseverluste (%) der verschiedenen Verbindungsmittel in der unbehandelten Buchenkontrolle (K), der mit Kreosot (T) sowie der mit den 5 Schutzmitteln (Pr 1 – Pr 5) imprägnierten Proben

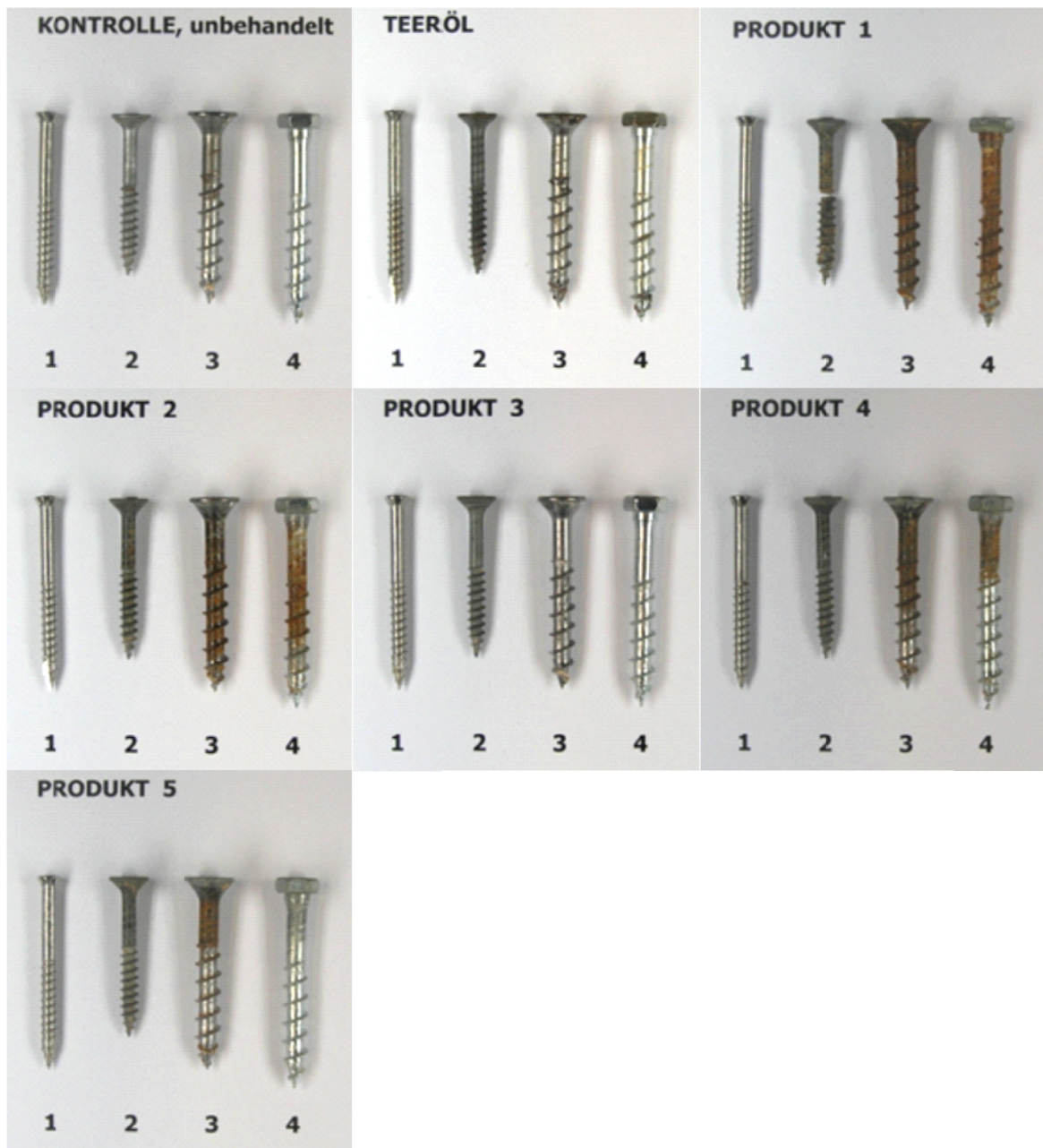


Abbildung 10: Holzbauschrauben Nr. 1 – 4 nach 6 Monaten Freilandexposition



Abbildung 11: Schwellenschrauben und „Rippenplatten“ nach 6 Monaten Freilandexposition

3.4.2 Leitfähigkeit

Die Ergebnisse der Untersuchung der Leitfähigkeit der mit unterschiedlichen Schutzmitteln imprägnierten Buchenhölzer sind in Abbildung 12 grafisch dargestellt.

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass die verschiedenen, untersuchten Schutzmittel den elektrischen Widerstand des Holzes nur sehr geringfügig beeinflussen. Die elektrische Leitfähigkeit des Holzes ist hauptsächlich abhängig von der vorliegenden Holzfeuchte. Je geringer die Holzfeuchte, desto höher ist der elektrische Widerstand im Holz. Ab Fasersättigung des Holzes (bei ca. 25 - 30 % Holzfeuchte) ändert sich der elektrische Widerstand kaum noch. Dies gilt für unbehandeltes Buchenholz, für Kreosot-imprägniertes Holz sowie für alle mit den Schutzmitteln 1 - 5 imprägnierten Hölzer.

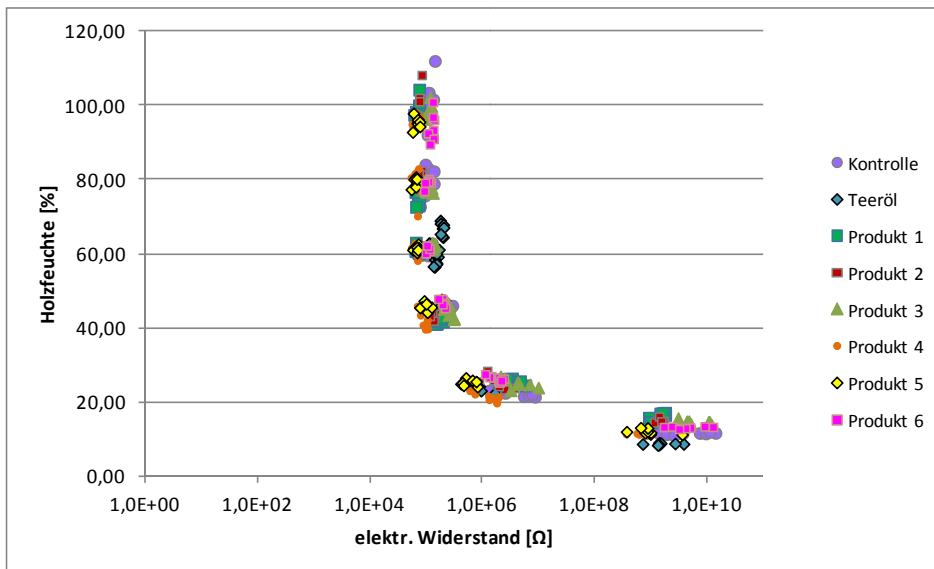


Abbildung 12: Elektrischer Widerstand (Ω) unterschiedlich imprägnierter Buchenhölzer bei gegebener Holzfeuchte (%)

3.5 Physikalische und chemische Beanspruchung

In Abbildung 13 sind beispielhaft jeweils Holzoberflächen von 3 Buchenproben die mit den jeweiligen Schutzmitteln imprägniert wurden dargestellt.

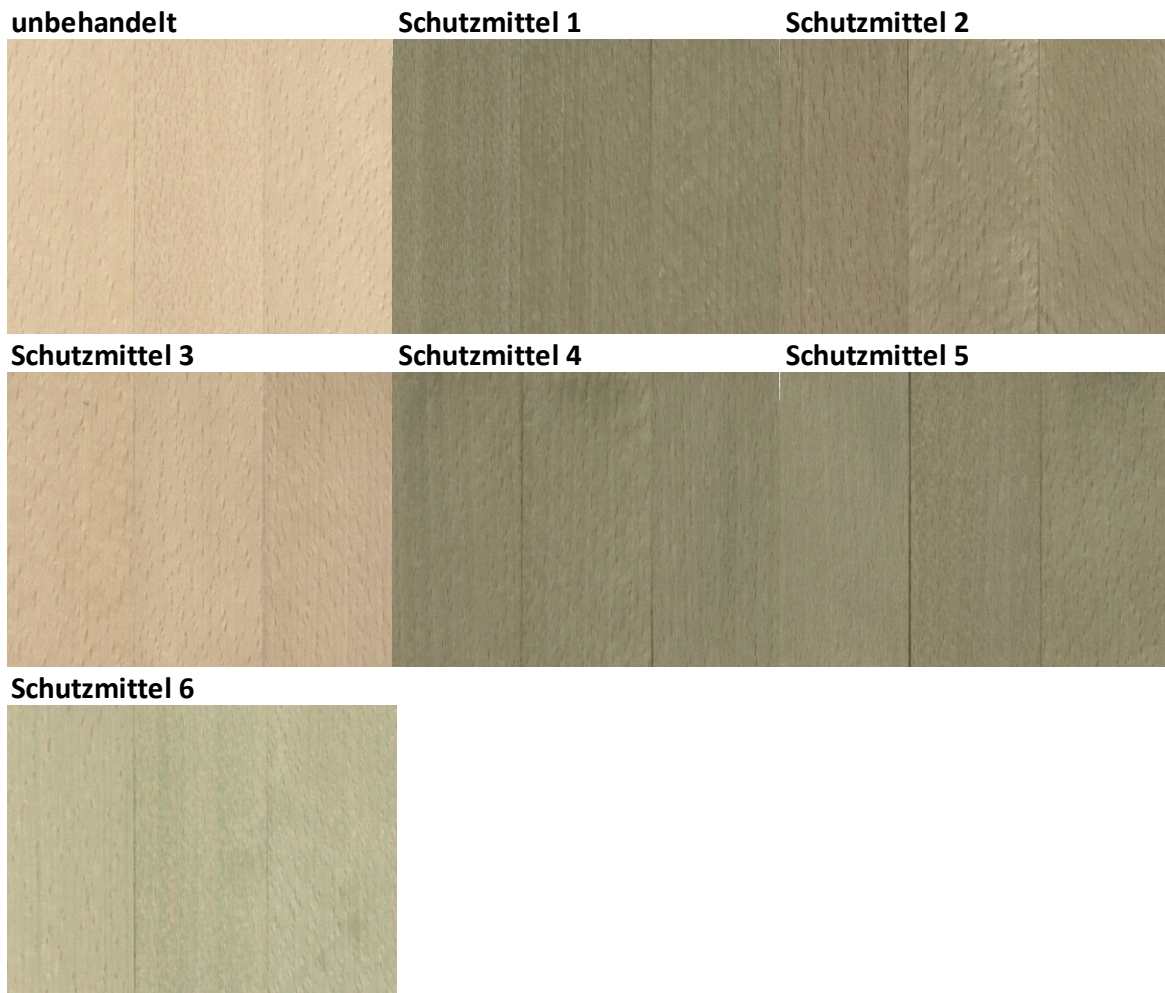


Abbildung 13: Holzoberflächen der mit den jeweiligen Schutzmitteln imprägnierten Buchenproben nach Trocknung

3.5.1 Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung, Hitze und Tieftemperatur

3.5.1.1 Stationärer Wasserlagerungs- und Rücktrocknungsversuch

Die Ergebnisse der stationären Wasserlagerungs- und Rücktrocknungsversuche sind in Tabelle 13 aufgelistet und in Abbildung 14 grafisch dargestellt.

Tabelle 13 und Abbildung 14 ist zu entnehmen, dass ohne Beanspruchung die mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben (mit hydrophobierender Komponente) weniger Wasser aufnahmen als die mit Schutzmittel 4 imprägnierten bzw. die unbehandelten Kontrollen. Dieses Wasseraufnahmeverhalten der mit Schutzmittel 4 bzw. 5 imprägnierten Proben, sowie der unbehandelten Kontrollen blieb nach einer Tieftemperatur-Beanspruchung fast unverändert erhalten. Die Hitze-Beanspruchung änderte das Wasseraufnahmeverhalten der unbehandelten Kontrolle sowie der mit Schutzmittel 4 imprägnierten Proben nicht, die mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben hingegen nahmen nach der Hitze-Beanspruchung mehr Wasser auf als vergleichbare Proben ohne Beanspruchung. Die Rücktrocknung aller genannter Proben verlief sehr ähnlich, die hydrophobierende Komponente der mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben erschwerte die Rücktrocknung aufgenommenen Wassers ganz offensichtlich nicht. In allen genannten Fällen wiesen die unbehandelten Kontrollen nach 240 sowie 408 Stunden Rücktrocknung die höchsten Wassergehalte auf.

Wurden unbehandelte Kontrollen sowie mit Schutzmittel 4 bzw. 5 imprägnierte Proben einer UV-Beanspruchung ausgesetzt, veränderte dies das Wasseraufnahmeverhalten deutlich. Alle Proben nahmen im Zeitverlauf deutlich höhere Mengen Wasser auf, als vergleichbare Proben die keiner Beanspruchung ausgesetzt waren. Sehr ausgeprägt war dieser Effekt bei der unbehandelten Kontrolle. Die mit Schutzmittel 4 und Schutzmittel 5 imprägnierten Proben wiesen ein sehr ähnliches Wasseraufnahmeverhalten auf, mit Schutzmittel 5 imprägnierte Proben nahmen sogar etwas mehr Wasser auf als mit Schutzmittel 4 imprägnierte Proben. Daraus ist zu schließen, dass die Hydrophobierung durch die UV-Belastung abnahm. Alle UV-beanspruchten Proben gaben während der Rücktrocknung rascher Wasser ab als vergleichbare, nicht beanspruchte Proben.

Probenart	Beanspruchung	Wasseraufnahme				Rücktrocknung		
		Masse (g) nach x Stunden				Masse (g) nach x Stunden		
		0	6	24	72	144	240	408
Kontrolle	ohne	0	1,9	3,5	6,7	2,5	1,7	1,4
Schutzmittel 4	ohne	0	1,9	3,6	6,6	2,4	1,3	0,9
Schutzmittel 5	ohne	0	1,3	2,6	5,6	2,1	1,4	1,1
Kontrolle	UV	0	3,3	5,3	9,2	2,7	1,2	0,7
Schutzmittel 4	UV	0	2,6	4,3	7,0	2,2	1,1	0,7
Schutzmittel 5	UV	0	3,1	4,9	7,5	2,3	1,2	0,7
Kontrolle	Hitze	0	2,1	3,7	6,9	2,7	1,8	1,4
Schutzmittel 4	Hitze	0	1,8	3,3	6,7	2,4	1,4	1,1
Schutzmittel 5	Hitze	0	2,3	4,1	7,2	2,5	1,5	1,1
Kontrolle	Tieftemperatur	0	1,7	3,3	6,3	2,3	1,6	1,3
Schutzmittel 4	Tieftemperatur	0	1,8	3,6	6,7	2,4	1,2	0,8
Schutzmittel 5	Tieftemperatur	0	1,3	2,7	5,5	2,0	1,2	0,9

Tabelle 13: Mittelwerte (n=5) der Wasseraufnahme nach 6, 24 und 72 Stunden und Rücktrocknung nach 144, 240 und 408 Stunden ohne bzw. nach UV-, Hitze- oder Tieftemperatur Beanspruchung

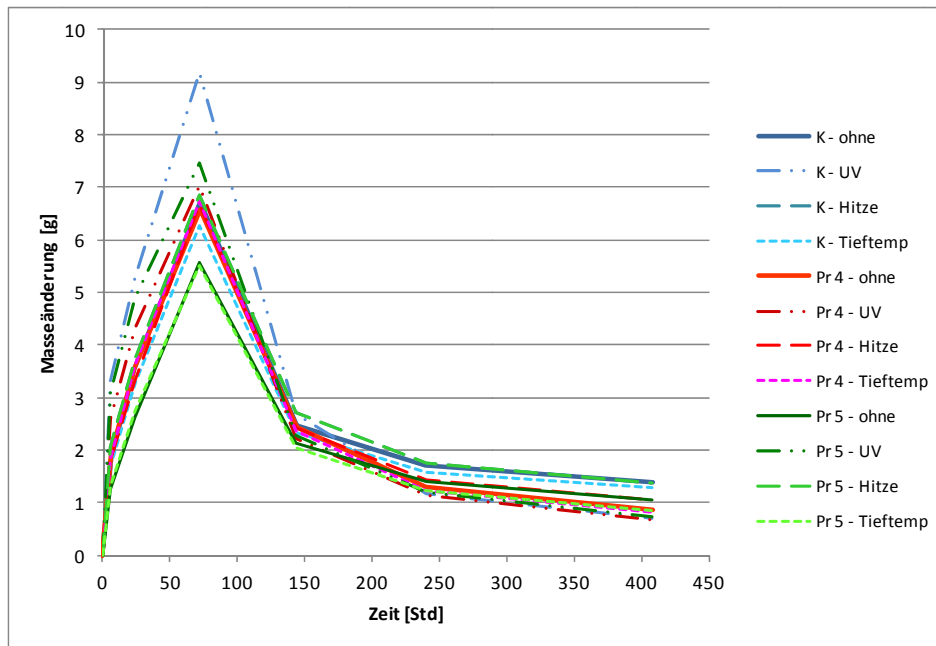


Abbildung 14: Wasseraufnahme nach 6, 24 und 72 Stunden und Rücktrocknung nach 144, 240 und 408 Stunden ohne bzw. nach UV-, Hitze- oder Tieftemperatur Beanspruchung

3.5.1.2 Kontaktwinkelmessung

Die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung sind in Tabelle 14 aufgelistet und in Abbildung 15 grafisch dargestellt.

Wie in Tabelle 14 bzw. Abbildung 15 zu sehen ist, weisen unbehandelte Kontrollen sowie die mit Schutzmittel 4 imprägnierten Proben ähnliche Kontaktwinkel auf. Die mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben weisen einen höheren Kontaktwinkel auf, d.h. sie zeigen ein hydrophoberes Verhalten als die zuvor genannten Proben. Die Hitze- und Tieftemperaturbeanspruchung zeigte keinen signifikanten Effekt auf die wasserabweisenden Eigenschaften der Holzoberflächen der unbehandelten Kontrollen sowie der mit Schutzmittel 4 oder 5 imprägnierten Proben. Jedoch wurde die wasserabweisende Eigenschaft der Holzoberflächen der mit Schutzmittel 4 imprägnierten Proben durch die Hitzebehandlung geringfügig erhöht, durch die Tieftemperaturbeanspruchung geringfügig vermindert.

Deutlich Veränderungen der wasserabweisenden Eigenschaft der Holzoberflächen bewirkte die UV-Beanspruchung. Diese führte bei der unbehandelten Kontrolle sowie der mit Schutzmittel 4 imprägnierten Oberfläche zu einer vollständigen Spreitung des Wassertropfens an der Holzoberfläche. Bei den mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben hingegen zeigte sich eine geringfügig verminderte Hydrophobie durch die UV-Beanspruchung. Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass die hydrophoben Eigenschaften der mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben auch nach der UV-Beanspruchung, im Vergleich zum Ausgangszustand, beinahe vollständig erhalten blieben.

Produktart	mittlerer Kontaktwinkel (°)			
	ohne	UV	Hitze	Tieftemperatur
Kontrolle	86,1	0	88,8	82,6
Schutzmittel 4	84,6	0	95,7	74,6
Schutzmittel 5	100,5	81,6	104,3	102,0

Tabelle 14: Mittlere Kontaktwinkel ohne bzw. nach UV-, Hitze- oder Tieftemperatur-Beanspruchung

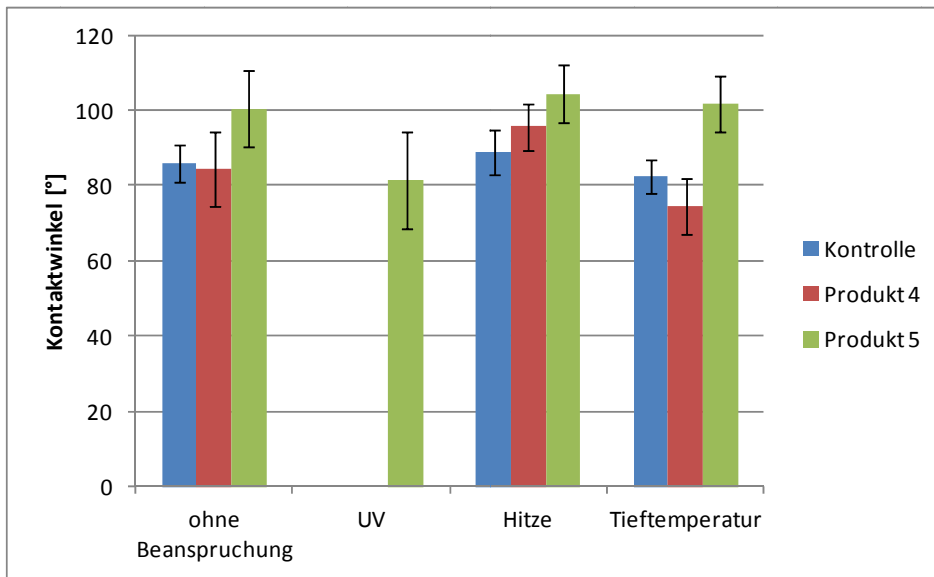


Abbildung 15: Mittlere Kontaktwinkel ohne bzw. nach UV-, Hitze- oder Tieftemperatur-Beanspruchung

3.5.2 Beständigkeit gegenüber Schmiermitteln

Beispielhaft sind in Abbildung 16 mikroskopische Aufnahmen von Querschnitten von mit Schmiermittel 1, 2, 3 und 4 behandelten Buchenhölzern abgebildet.

Die mikroskopische Untersuchung sämtlicher Proben ergab, dass alle 4 untersuchten Schmiermittel, bei allen Proben, oberflächlich auf den imprägnierten Buchenhölzern verblieben und nicht in das Holz eindringen. Lediglich oberflächlich angeschnittene Holzzellen wurden von den Schmiermitteln ausgefüllt. Anzumerken ist, dass in den 4 Wochen Inkubation im Klimaraum Schmiermittel 1, 2 und 3 nicht aushärteten. Schmiermittel 4 zeigte nach diesem Zeitraum eine feste, trockene Konsistenz auf den Holzoberflächen. Ein Einfluss der Schmiermittel auf die Wirksamkeit durchimprägnierter Bahnschwellen ist auszuschließen.

Schmiermittel 1

Schmiermittel 2

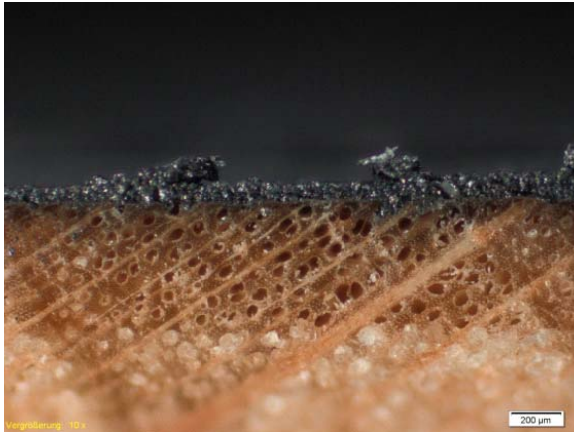
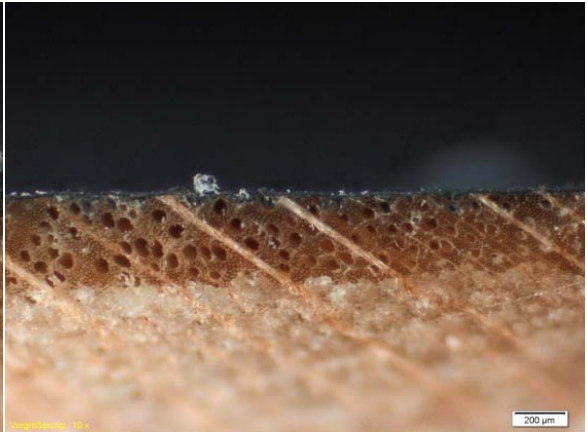
Schmiermittel 3

Schmiermittel 4


Abbildung 16: Mikroskopische Aufnahmen von Querschnitten von Buchenhölzern, beschichtet mit den untersuchten Schmiermitteln 1, 2, 3 und 4

3.5.3 Entflammbarkeit

Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchung der Entflammbarkeit und Brandbeständigkeit sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Wie aus Tabelle 15 ersichtlich ist, waren aus den unbehandelten Buchenkontrollen die ersten, orangefarbenen Flammen im Mittel nach 20 Sekunden zu beobachten, aus den Kreosot-imprägnierten Proben im Mittel bereits nach 16 Sekunden. Aus den mit den 5 untersuchten Schutzmitteln imprägnierten Proben waren im Mittel nach 18 bis 22 Sekunden die ersten Flammen sichtbar. Die Flammen sämtlicher Proben verlöschten nach dem Herausziehen der Proben aus der Bunsenbrennerflamme von selbst. Deutlich zu beobachten war, dass die Kreosot-imprägnierten Proben ein anderes Verhalten der

Entflammung aufweisen als sämtliche anderen untersuchten Proben. Aus den Kreosot-imprägnierten Proben züngelten sehr rasch und intensiv erste, orangefarbene Flammen in der Art sog. „Sprühkerzen“, aus denen Funken sprühen. Aus allen anderen Proben, inklusive der unbehandelten Kontrollen, züngelten die ersten, orangefarbenen Flammen im Mittel etwas später, weniger intensiv und bei keiner Probe in der Art sog. „Sprühkerzen“.

		Probenart						
		unbehandelte Kontrolle	Kreosot	Schutzmittel Nr.				
				1	2	3	4	5
Zeit (Sekunden)	MW	20	16	18	22	21	18	20
	Median	18,5	15	18	21	22	18	19
	Min	18	14	16	21	15	17	19
	Max	29	22	18	25	26	18	24

Tabelle 15: Ergebnisse der vergleichenden Untersuchung der Entflammbarkeit und Brandbeständigkeit

4 DISKUSSION

4.1 Biologische Wirksamkeit

Die Untersuchungen zur Wirksamkeit gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen wurden in Laborversuchen unter sterilen Bedingungen, mit definierten Pilzstämmen durchgeführt. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnten die notwendigen Einbringmengen der jeweiligen Schutzmittel, bei der Grenze der Wirksamkeit, bestimmt werden. Lediglich mit Schutzmittel 6 gegenüber Braunfäulepilzen konnte diese nicht bestimmt werden, da selbst die höchste untersuchte Konzentration keine ausreichende Wirksamkeit aufwies. Hier sollten noch weitere, höhere Einbringmengen auf ihre Wirksamkeit gegenüber Braunfäulepilzen untersucht werden. Sowohl die kupfer- und aminreduzierte Variante (Schutzmittel 2) als auch die kupferfreie Variante (Schutzmittel 3) sind gegenüber den untersuchten Zielorganismen wirksam. Schutzmittel 4 (ohne Hydrophobierung) und Schutzmittel 5 (mit Hydrophobierung) zeigten eine vergleichend gute Wirksamkeit, wobei bei Zugabe der hydrophobierenden Komponente, sowohl gegenüber Braun- als auch Weißfäule, jeweils eine um eine Konzentrationsstufe niedrigere Einbringmenge einen

ausreichenden Schutz bewirkte. Die hydrophobierende Komponente bewirkt offenkundig einen positiven Effekt auf die Schutzwirkung gegenüber Braun- und Weißfäulepilzen.

Für die Untersuchung der Beständigkeit gegenüber Moderfäulepilzen wurden die mit dem jeweiligen Schutzmittel imprägnierten Buchenhölzer in Versuchsreihen in unsterile Erde eingebracht. Mit Hilfe der Versuche konnten von 3 Schutzmitteln die nominal wirksamen Aufnahmemengen an Schutzmittel bestimmt werden. Dies wurde mit Schutzmittel 1, Schutzmittel 4 und Schutzmittel 5 erzielt. Die kupfer- und aminreduzierte Variante (Schutzmittel 2) zeigte in den untersuchten Konzentrationen keine ausreichende Schutzwirkung gegenüber Moderfäulepilzen. Dies gilt auch für die kupferfreie Variante (Schutzmittel 3) und für das ölige Schutzmittel 6. Hier bestätigt sich, dass für einen ausreichenden Schutz gegenüber Moderfäulepilzen die anorganische Wirkstoffkomponente Kupfer in ausreichender Menge vorhanden sein muss, da Moderfäulepilze durch die heutzutage im Holzschutz einsetzbaren organischen Wirkstoffe nicht ausreichend unterdrückt werden können.

4.2 Chemische Rückstände

Aus mit den jeweiligen Schutzmitteln imprägnierten Buchenproben wurden, abhängig vom jeweiligen Schutzmittel, zwischen 35 - 120 mg Kupfer ausgewaschen, 7,8 – 35 mg Bor und 0,13 – 2,58 mg Triazol. Quartäre Ammoniumverbindungen waren in keiner Probe nachweisbar. Diese Ergebnisse könnten nun hochgerechnet werden und entsprechen der Einbringmenge der ausgewaschenen Wirkstoffkomponenten in den Oberbauschotter. Diese Ergebnisse wurden mit Auswaschungen mit Buchenproben der Größe 50 x 25 x 15 mm durchgeführt. Das Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche betrug dabei 1 : 2,5. Eine Bahnschwelle weist hingegen ein Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche von 1 : 0,22 auf. Dies ist bei einer Hochrechnung der ermittelten Ergebnisse zu beachten, da das Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche die Menge an ausgewaschenen Wirkstoffen durchaus beeinflussen kann.

4.3 Produktstabilität

Auf Basis der ermittelten Ergebnisse ist davon auszugehen, dass die kupfer- und aminreduzierte Schutzmittelvariante Schutzmittel 2 in großtechnischen Imprägnierversuchen

stabil bleibt. Allerdings dürfte es sich bei Schutzmittel 2 zur Imprägnierung der Bahnschwelle aus Holz um kein geeignetes Schutzmittel handeln, da die kupferreduzierte Variante keine ausreichende Schutzwirkung gegen Moderfäulepilze aufweist (siehe Pkt. 4.1).

4.4 Korrosion und Leitfähigkeit

Die Untersuchungen zur Korrosion ergaben, dass die mit Kreosot imprägnierten Hölzer die geringste korrosive Wirkung auf die untersuchten Verbindungsmittel haben. Abgesehen von geringfügiger Korrosion an den Schwellenschrauben, waren sämtliche anderen in Kreosot-imprägnierte Proben eingebrachten Verbindungsmittel nach 6 Monaten frei von Korrosion. Alle anderen Schutzmittelimprägnierungen weisen ein größeres korrosives Potential gegenüber den untersuchten Verbindungsmitteln auf. Dieses ist unterschiedlich, abhängig von Verbindungsmittel und Schutzmittel. Ein ebenfalls geringeres Korrosionspotential geht offensichtlich von Schutzmittel 3 (kupferfrei) aus. Wie unter 4.1 diskutiert, ist dieses Schutzmittel jedoch für den Einsatz für die Bahnschwelle aufgrund unzureichender Wirksamkeit gegenüber Moderfäulepilzen nicht geeignet. Mit allen untersuchten Schutzmitteln gut verträglich sind Holzbauschrauben aus Edelstahl A2.

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchten Schutzmittel beeinflussen den elektrischen Widerstand des Holzes nur sehr geringfügig. Die elektrische Leitfähigkeit des Holzes ist hauptsächlich abhängig von der vorliegenden Holzfeuchte. Je geringer die Holzfeuchte, desto höher ist der elektrische Widerstand im Holz. Ab Fasersättigung des Holzes (bei ca. 25 - 30 % Holzfeuchte) ändert sich der elektrische Widerstand kaum noch. Dies gilt für unbehandeltes Buchenholz, für Kreosot-imprägniertes Holz sowie für alle hier untersuchten, mit den verschiedenen Schutzmitteln imprägnierten, Hölzer. Der Einfluss der Schutzmittel auf die Leitfähigkeit des Holzes ist zu vernachlässigen.

4.5 Physikalische und chemische Beanspruchung

Die Untersuchungen zur Beständigkeit gegen UV, Hitze und Tieftemperatur wurden unter Berücksichtigung der Holz-Hydrophobierung mittels stationärer Wasserlagerungs- und Rücktrocknungsversuche sowie Kontaktwinkelmessungen durchgeführt. Die Hitze- und Tieftemperaturbehandlungen zeigten mit beiden Untersuchungsmethoden keinen

signifikanten Effekt auf die wasserabweisenden Eigenschaften der behandelten und unbehandelten Holzoberflächen. Der hydrophobe Effekt von Schutzmittel 5 blieb nach einer Tieftemperatur-Beanspruchung erhalten, die Hitze-Beanspruchung bewirkte jedoch eine Reduktion der Hydrophobierung. Die Rücktrocknung aufgenommenen Wassers wurde durch die hydrophobierende Komponente der mit Schutzmittel 5 imprägnierten Proben offensichtlich nicht erschwert.

Deutliche Veränderungen des Wasseraufnahmeverhaltens wurden nach einer UV-Beanspruchung festgestellt. Alle UV-beanspruchten Proben nahmen im Zeitverlauf deutlich höhere Mengen Wasser auf, als vergleichbare Proben die keiner Beanspruchung ausgesetzt waren, so auch mit Schutzmittel 5 imprägnierte Proben. Daraus ist zu schließen, dass die Hydrophobie durch die UV-Belastung vermindert wurde. Alle UV-beanspruchten Proben gaben während der Rücktrocknung rascher Wasser ab als vergleichbare, nicht beanspruchte Proben.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Belichtung von Holzoberflächen zu einer Photooxidation der Holzkomponenten, insbesondere des Lignins führt (Fengel und Wegener 1983⁷, Andrady et al 1998⁸). Dies bewirkt eine Erhöhung der Hydrophilie und damit eine bessere Benetzbarkeit der Holzoberfläche mit Wasser (Kalnins und Feist, 1993⁹). Dies war auch an den Ergebnissen der stationären Wasserlagerungs- und Rücktrocknungsversuche sowie an denen der Kontaktwinkelmessung an den bewitterten Kontrollproben zu sehen. Bei letzterer führte die Bewitterung zu einer vollständigen Spreitung des Wassertropfens an der Holzoberfläche. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei den mit Schutzmittel 4 imprägnierten Proben erhalten. Die Anwendung des Schutzmittels 5 hingegen zeigte anhand der Kontaktwinkelmessung, zum einen im Ausgangszustand eine geringfügig erhöhte Hydrophobie. Zum anderen blieben durch dieses Schutzmittel die hydrophoben Eigenschaften der behandelten Proben auch nach der Bewitterung beinahe vollständig erhalten. Jedoch ist durch die UV-Beanspruchung offensichtlich insofern eine Beeinträchtigung der Hydrophobie eingetreten, dass bei

⁷ Fengel, D. and Wegener, G. (1989) Wood. Paperb. ed.de GruyterBerlin.

⁸ Andrady, A. L, Hamid, S. H, Hu, X., Torikai, A. (1998/10) Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 46:96–103.

⁹ Kalnins, M. A and Feist, W. C (1997) Increase in wettability of wood with weathering. Forest Products Journal, 43:55–57.

vollflächigem Kontakt, wie bei der Wasserlagerung, eine erhöhte Wasseraufnahme möglich ist.

Bei den durchgeführten Untersuchungen zur Entflammbarkeit und Brandbeständigkeit bestand die Schwierigkeit darin, mit dem verwendeten Bunsenbrenner eine stabile, gleichmäßige und somit reproduzierbare Flamme zu erhalten, die eine Vergleichbarkeit des Verhaltens der einzelnen Proben gewährleistet. Aus den Ergebnissen ist der Schluss zu ziehen, dass sich die mit den unterschiedlichen Schutzmitteln imprägnierten Proben bezüglich Entflammbarkeit gleich verhalten wie unbehandelte Kontrollproben. Kreosot-imprägnierte Proben weisen hingegen ein anderes Verhalten bezüglich Entflammbarkeit auf. Aus den Kreosot-imprägnierten Proben züngelten sehr rasch und intensiv erste, orangefarbene Flammen in der Art sog. „Sprühkerzen“, aus denen Funken sprühen. Dieses Verhalten war bei allen anderen untersuchten Proben nicht zu beobachten. Bei allen untersuchten Proben, auch bei den Kreosot-imprägnierten Proben, verlöschten die Flammen nach dem Herausziehen der Proben aus der Bunsenbrennerflamme von selbst. Es wird empfohlen, mit den in Frage kommenden alternativen Schutzmitteln standardisierte Prüfungen zum Brandverhalten durchzuführen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden 5 Kupfer-Amin-basierte Schutzmittel und ein kupferfreies Schutzmittel auf ihre Gebrauchstauglichkeit für die Imprägnierung von Buchenschwellen erforscht. Untersucht wurden dabei die von einem derartigen Schutzmittel geforderten Eigenschaften, die sich an den Ansprüchen der Kreosot-imprägnierten Bahnschwelle orientieren: gute biologische Wirksamkeit, keine Korrosionswirkung, geringe elektrische Leitfähigkeit sowie hohe Beständigkeit gegenüber physikalischen und chemischen Belastungen.

Alle untersuchten Schutzmittel, mit Ausnahme von Schutzmittel 6, zeigten eine gute Wirksamkeit gegen Braun- und Weißfäulepilze. Die Untersuchung gegen Moderfäulepilze ergab, dass mit Schutzmittel 1, 4 und 5 die nominal wirksamen Aufnahmemengen bestimmt werden konnten. Die anderen Schutzmittel zeigten in den gewählten Einsatzkonzentrationen keine ausreichende Schutzwirkung gegenüber Moderfäulepilzen.

Abhängig vom jeweiligen Schutzmittel wurden in den angewandten Eluierungsversuchen 35 – 120 mg Kupfer, 7,8 – 35 mg Bor und 0,13 – 2,59 mg Triazol ausgewaschen. Die Mengen ausgewaschener Quartärer Ammoniumverbindungen lagen jeweils unter der Bestimmungsgrenze. Die nachgewiesenen Wirkstoffgehalte in den Eluatens dienen als erste Abschätzung der möglichen chemischen Rückstände im Oberbauschotter. Die in den Versuchen nachgewiesenen Wirkstoffgehalte können allerdings nicht 1:1 auf eine imprägnierte Bahnschwelle hochgerechnet werden, da das Verhältnis von Probenvolumen : Probenoberfläche bei einer Bahnschwelle anders ist und diesem Verhältnis bei allen Eluierungen große Bedeutung zukommt.

Sämtliche untersuchten, alternativen Schutzmittel weisen ein größeres korrosives Potential gegenüber den von der ÖBB Infrastruktur AG eingesetzten Schwellenschrauben und Rippenplatten auf als mit Kreosot imprägnierte Hölzer. Dies gilt auch für feuerverzinkte, Zink-Nickel- beschichtete und galvanisch verzinkte, blau chromatierte Verbindungsmittel. Einzig Verbindungsmittel aus Edelstahl A2 sind mit allen untersuchten Schutzmitteln gut verträglich. Der elektrische Widerstand des Holzes wird durch die unterschiedlichen Schutzmittel-Imprägnierungen nur sehr geringfügig beeinflusst. Der elektrische Widerstand und damit die elektrische Leitfähigkeit sind in erster Linie von der Holzfeuchte abhängig.

Bezüglich der Beständigkeit der Holz-Hydrophobierung gegen UV, Hitze und Tieftemperatur zeigten sowohl die Hitze- als auch die UV-Beanspruchung Auswirkungen auf die Hydrophobie der Oberflächen. Anhand von Kontaktwinkelmessungen wurde gezeigt, dass die Hydrophobie der mit Schutzmittel 5 imprägnierten Oberfläche auch durch UV-Beanspruchung fast vollständig erhalten blieb. Die Wasserlagerungsversuche hingegen legten dar, dass bei vollflächigem Kontakt eine erhöhte Wasseraufnahme (gegenüber dem Ausgangszustand) erfolgt, die UV-Beanspruchung somit offensichtlich eine Beeinträchtigung der Hydrophobie bewirkte.

Ein Einfluss der von der ÖBB Infrastruktur AG eingesetzten Schmiermittel auf die Wirksamkeit durchimprägnierter Bahnschwellen ist auszuschließen. Sämtliche untersuchten Schmiermittel verblieben rein oberflächlich auf dem Holz und drangen nicht in das Holz ein. Lediglich oberflächlich angeschnittene Holzzellen wurden von den Schmiermitteln ausgefüllt.

Bezüglich Entflammbarkeit verhalten sich die mit den unterschiedlichen Schutzmitteln imprägnierten Proben gleich wie unbehandelte Kontrollproben. Kreosot-imprägnierte Proben weisen hingegen ein anderes Verhalten auf: aus den Kreosot-imprägnierten Proben züngelten sehr rasch und intensiv Flammen in der Art sog. „Sprühkerzen“, aus denen Funken sprühen. Dieses Verhalten war bei allen anderen untersuchten Proben nicht zu beobachten.

Von den untersuchten Schutzmitteln stellen sich 2 Schutzmittel als potentiell mögliche Alternativen für die Imprägnierung der Bahnschwelle dar: Schutzmittel 1 und Schutzmittel 4 sowie das mit Schutzmittel 5 (=Schutzmittel 4 + hydrophobierende Komponente) eingesetzte Hydrophobierungsmittel. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollten diese Schutzmittel und das Hydrophobiermittel detaillierter erforscht werden, so dass die Gebrauchsdauer der mit den jeweiligen Schutzmittel imprägnierten Hölzer im praktischen Einsatz der ÖBB Infrastruktur AG sichergestellt werden kann. Das betrifft einerseits Freilandversuche zur biologischen Wirksamkeit und zum Wirkstoffaustrag, als auch Untersuchungen betreffend die Imprägnierung, Wirkstoffverteilung, Eindringung und Durchtränkung der Buchenschwelle.