

Geotextil-Ummantelungen im Meerwassereinsatz

Ergebnisse praxisnaher Untersuchungen zum Schutz von Holz im Meerwasser im Zeitraum 2012 bis 2018

Von Johann Müller*, Eckhard Melcher**, Tobias Huckfeldt*** und Johannes Welling**

Die Gefährdung von Holz im Meerwasser kann in zwei praxisrelevante Bereiche unterteilt werden: Unterhalb des Wasserspiegels greifen Holzbohrmuscheln und Bohrasseln das Holz an, oberhalb des Wassers besteht Gefahr durch Holz zerstörende Pilze. In zwei sich ergänzenden, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojekten wurden die Gefährdung des Holzes und mögliche Schutzvarianten im Zeitraum von April 2012 bis Juni 2018 in Freigewässern untersucht. Zudem erfolgten Laborversuche von Oktober 2012 bis Ende September 2013 an der Universität Portsmouth (Großbritannien). In der zweiten Förderperiode vom April 2015 bis Juni 2018 beteiligten sich das Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg, und das Institut für Holzqualität und Holzschäden Dr. Rehbein und Dr. Huckfeldt GbR (IF-Holz), Hamburg, an dem Projekt. Niedersachsenports ermöglichte die Durchführung von Normversuchen an Steganlagen und unterstützte die weiteren Untersuchungen mit Versuchsrämmungen und Arbeitsbootseinsätzen. Die Freiwasserversuche wurden im förderfreien Zeitraum fortgeführt.

Die Ergebnisse tragen zur genaueren Einschätzung der Gefährdung von Holz im Wasserbau bei und zeigen Lösungen für den Einsatz von heimischen Hölzern auf, die längere Standzeiten erwarten lassen. Der dazugehörige Forschungsbericht (Müller et al. 2018) kann auf der Homepage der DBU eingesehen oder auch von dort heruntergeladen werden. In diesem Bericht werden eine Übersicht über die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Vorgeschichte, Zielsetzung und Aufgabenstellung

Nach umfangreichen Praxisbeobachtungen und Recherchen durch das Büro Dr. Johann Müller (Müller 2004, 2010, 2011; Müller und Gercken 2006) wurden im Jahre 2012 Untersuchungen zur Wirksamkeit von Geotextilien als Schutzummantelung gegen Holzschädlinge im Meerwasser begonnen. In den ersten zwei Versuchsjahren konnte die grundsätzliche Eignung von Geotextilien nachgewiesen werden.

Allerdings war aus den Versuchsergebnissen keine abschließende Bewertung zum Langzeitverhalten der Geotextilien im Meerwasser und die damit verbundene Schutzwirkung gegen Holzzerstörer abzuleiten. Aus dem ersten Projekt ergaben sich zudem weitere Fragestellungen, die sowohl Randbedingungen bezüglich eventuell notwendiger Schutzmaßnahmen von Holz oberhalb des Wassers als auch die Optimierung von Pfählen unter Gesichtspunkten des Holzschutzes betrafen. Diese Fragen wurden im zweiten Projekt mit dem Titel „Praxisnahe Untersuchungen zum Schutz von Holz im Meerwasser“ untersucht.

Beschreibung eingesetzter Geotextilien und Holzarten

Geotextilien sind Produkte aus synthetischen oder natürlichen polymeren Materialien, die in Kontakt mit Erde oder Gestein beispielsweise im Straßen- und Deponiebau oder im Küstenschutz verwendet werden. Die wichtigsten Grundklassen der verwendeten Polymere sind Polyethylen, Polypropylen, Polyester und Polyvinylchlorid. Innerhalb der Produktklassen können spezifische Polymertypen und Additive genutzt werden, um gewünschte Produkt-

Norddeich und Hooksiel (Nordsee) sowie in Heilsmünde (Ostsee, Dänemark). An all diesen Standorten waren zuvor Bohrbohrmuscheln nachgewiesen worden. Nach dem Ende des ersten Förderzeitraums wurden die Versuche am Standort Norddeich – ergänzt um die Normproben aus Hooksiel – bis zum Ende des Normversuchs im November 2017 fortgeführt. Zusätzlich erfolgten sogenannte Fangversuche mit ungeschützten Proben in der Ems und der Weser, um hier die Ausbreitung der Holzbohrmuschel flussaufwärts zu erfassen.

Zusätzliche Laborversuche

Die EN 275 sieht bisher keine Laborversuche für den Nachweis der Wirksamkeit eines Holzschutzmittels vor, was sich jedoch bei einer Neufassung der Norm ändern könnte, denn in Hälterungsbecken können optimale Wuchsbedingungen (Temperatur, Salzgehalt, Sauerstoffversorgung) geschaffen werden, womit Versuchsergebnisse in relativ kurzer Zeit erzielbar sind. Aus diesem Grunde wurden Laborversuche am Institut für marine Wissenschaften der Universität Portsmouth ergänzend zu den Normversuchen durchgeführt.

Das Institut verfügt über Hälterungsbecken, in denen die Bohrbohrmuschelart *Lyrodus pedicellatus* gehalten wird; diese Art ist relativ einfach zu hältern und deshalb für Befallsuntersuchungen gut geeignet, während beispielsweise die an den deutschen Küsten vorkommende Holzbohrmuschel *Teredo navalis* zwar in Hälterungsbecken überlebt, jedoch eine Neubesiedlung der freigesetzten Larven auf Holz bisher nicht beobachtet wurde. Bedenken gegen die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen mit *Lyrodus pedicellatus* auf *Teredo navalis* sind nicht bekannt.

Die Untersuchungen zur fungiziden Wirksamkeit von Meersalz erfolgten gemäß EN 113: 1996 mit *Coniophora puteana* (BAM 15, Brauner Kellerschwamm), *Poria placenta* (FPRL 280, Rosafarbener Saftporling) und *Gloeophyllum trabeum* (BAM Ebw. 109, Balkenblättling) an Kiefernholz und an Buchenholz mit *Coriolus versicolor* (CTB 863A, Schmetterlings-Tramete). Je Konzentration und Pilz wurden sechs Prüfkörper mittels Vakuumtränkung imprägniert, wobei sowohl für die Tränklösungen (0,5 %, 1 %, 2 % und



Abbildung 1 Splintfreie Rundhölzer können mit Rundstabfräsmaschinen bis zu einem Durchmesser von etwa 30 cm hergestellt werden. Fotos J. Müller (5)



Abbildung 2 Rammung eines mit Geotextil geschützten Pfahls mit einer Vibrationsramme in Harlesiel.



Abbildung 3 Entnahme eines geotextilgeschützten Pfahls mit Kantholzzuschnitt im oberen Bereich in Bensersiel.

eigenschaften zu erreichen. In den Versuchen wurden Geotextilien aus reinem Polyester sowie einer Mischung aus Polypropylen und Polyester der Firma Naua GmbH & Co. KG, Espelkamp-Fiestel, eingesetzt.

Die Firma stellte nicht nur das Versuchsmaterial zur Verfügung, sondern untersuchte auch die technischen Eigenschaften der Vliesstoffe nach deren Einsatz. Für die Normproben wurde Kiefern- und Douglasiensplintholz eingesetzt. Feuchteaufnahmeversuche erfolgten an den Holzarten Lärche, Douglasie, Kiefer und Fichte; als Rammfähle kamen Lärchen- und Douglasienshölzer zum Einsatz. Das Holz dazu wurde von den Niedersächsischen Landesforsten zur Verfügung gestellt.

Untersuchungen nach EN 275

Nach EN 275:1992 wäre für die Untersuchung der Wirksamkeit des Verfahrens ein Versuchsgewässer ausreichend. Da der Befallsdruck durch Meerwasserschädlinge von Jahr zu Jahr schwanken kann, wurden ab Frühjahr 2012 zunächst Versuche in drei Hafengewässern durchgeführt, und zwar in



Abbildung 4 Ein Jahrhunderte altes Höft in der Ems ist nun durch die Holzbohrmuschel gefährdet, da der erhöhte Salzgehalt das Überleben der Schädlinge hier ermöglicht.

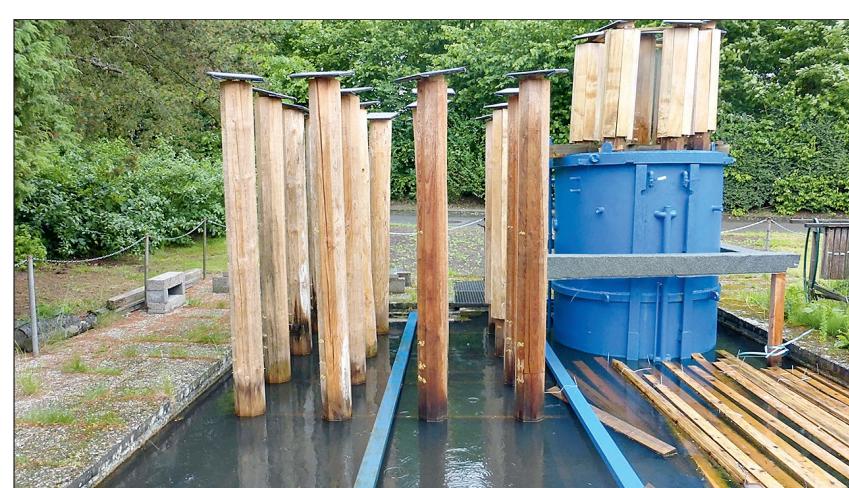


Abbildung 5 Am Thünen-Institut in Hamburg wurden im Süß- und Salzwasser (blauer Tank) eingestellte Hölzer direkt bewittert.

3 % Salzgehalt) als auch für die parallel laufenden Freilandtests des Meersalz „Marsel® 0,2–0,8“ (Salzkontor Kurpfalz GmbH) verwendet wurde, welches fast nur aus Natriumchlorid besteht.

Praktische Versuche

Der vornehmliche Befallsbereich (Höhe zwischen Gewässerboden und Wasseroberfläche) der Schädlinge wurde im Hafen Norddeich im Zeitraum von Mai 2016 bis März 2018 an Kiehnholzern erfasst, die auf Dalben aufgeschraubt wurden und von der Hochwasserlinie bis in den Hafenboden reichten. Die Auswertung erfolgte auch hier in Anlehnung an EN 275.

Weiterhin wurden Praxisversuche mit 16 m langen Rammpfählen in Norddeich (ab Juli 2012) und Bensersiel (ab Juli 2013) durchgeführt sowie ein zusätzlicher Rammversuch im Jahre 2016 in Harlesiel. Hierbei kamen Lärchen- und Douglasiensplinthölzer zum Einsatz. Es wurden sowohl Rammpfähle insgesamt als Rundholz als auch im oberen Bereich zu Kantholzern gesägte Hölzer eingesetzt. Die Versuchshölzer waren mit den Geotextilien im Bereich vom Boden des Hafenbeckens bis über die Hochwasserlinie ummantelt.

Beim Aufbringen des Geotextils wurde zunächst eine Längsseite auf dem Stamm fixiert und anschließend das Material straff bis über die Ausgangsfläche hinweg um den Stamm geschlagen und im Überlappungsbereich mit einer Latte, die wiederum in das Geotextil eingedreht war, auf den Stamm verschraubt. An den beiden Enden des Schutzbereiches wurde die Ummantelung zusätzlich mit einem Stahllochband auf dem Stamm gesichert. So konnte verhindert werden, dass sich das untere Ende des Geotextils beim Eindringen des Rammpfahls in den Boden vom Stamm löste.

Die Rammungen erfolgten sowohl mit einer Schlag- als auch mit einer Vibrationsramme. Nach Ende der jeweiligen Versuchsabschnitte wurde die Festigkeit der eingesetzten Geotextilien mit unbeanspruchten Materialproben verglichen.

Die Gefährdung durch Holz zerstörende Pilze und Bakterien wurde anhand von 140 Proben ermittelt; die Pilzbestimmung erfolgte am IF-Holz. Das Probenmaterial stammte vornehmlich von Dalben aus niedersächsischen Häfen und aus dem Hamburger Hafen sowie von den eigenen Versuchshölzern.

Holzfeuchte, Salzaufnahme und fungizide Wirksamkeit

Am Thünen-Institut für Holzforschung erfolgte eine Erfassung der Holzfeuchteentwicklung an im Salz- und Süßwasser in Außenbecken expanierten Nadelholzern einschließlich der Quantifizierung des Salzgehaltes und dessen Verteilung im Holz nach Meerwasserexposition sowie die Bestimmung der fungiziden Wirksamkeit von Meersalz.

Für die Bestimmung des Glührückstandes wurden die an unterschiedlichen Positionen entnommenen Stammsegmente auf Streichholzgröße zerkleinert und für 24 Stunden bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei 103 °C gedarrest. Die getrockneten Späne wurden in Quarziegel auf 0,001 g genau eingewogen, anschließend mittels Bunsenbrenner unter dem Abzug über offener Flamme „verascht“ und danach im Muffelofen bei 550 °C für vier Stunden nachbehandelt. Nachdem die Tiegel im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt waren, wurden sie abermals auf 0,001 g gewogen. Aus der Differenz der bestimmten Massen wurde der Glühverlust (organischer Anteil) oder

* Dr. Johann Müller, Dörpen, ist Fach- und Wissenschaftsjournalist sowie Sachverständiger für Holz.

** Dr. Eckhard Melcher und Dr. Johannes Welling (Institutsleiter) sind am Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg, tätig.

*** Dr. Tobias Huckfeldt ist Mitinhaber des Instituts für Holzqualität und Holzschäden – Dr. Rehbein und Dr. Huckfeldt GbR, Hamburg.

Geotextil-Ummantelungen im Meerwassereinsatz

Fortsetzung von Seite 237

der Glührückstand (Asche bzw. anorganischer Anteil) errechnet.

Die Probenvorbereitung für die quantitative Bestimmung des Natriumgehalts ähnelt der zuvor beschriebenen; jedoch wurden die grob zerkleinerten Holzspäne zusätzlich in einer IKA-Mühle gemahlen, um das Material zu homogenisieren. Danach wurden jeweils rund 0,5 g (Genaugkeit der Einwaage: 0,001 g) des Mahlgutes in die Aufschlussgefäß überführt und mit 5 ml einer 65 %igen Salpetersäure versetzt. Der Holzaufschluss erfolgte mittels Mikrowellengerät „MLS Mikrowellenofen µPREP-A“ (Firma MLS GmbH) unter Anwendung des von Ahl et al. 2013 beschriebenen Aufschlussprogramms. Danach wurden die abgekühlten Aufschlusslösungen quantitativ in Analyseröhrchen überführt und mit entsalztem Wasser auf ein definiertes Endvolumen aufgefüllt. Die Quantifizierung der Natrium- bzw. Metallgehalte (Probenmaterial aus dem Hafen Bensersiel) erfolgte mittels induktiv gekoppelter plasma-optischer Emissionsspektrometrie (iCAP 6300, Firma Thermo Scientific). Zur Erfassung der zeitlichen Feuchteänderung über Leitfähigkeitsmessungen wurden in die Hölzer in unterschiedlichen Höhen Metallmessstifte eingebracht und – vergleichbar einer Einstelltränkung – ca. 70 cm tief in die beiden Wasserbecken gestellt.

Ergänzend hierzu wurde der Feuchtaufstieg in Rundholz an in Wasser eingestellten, 70 cm langen Rundholzschnitten in einer seitlich offenen Halle gemessen, um den Einfluss aus Niederschlägen auszuschließen. In diesem Versuch waren zudem Hölzer mit einer 3 cm tiefen Ringnut oberhalb der Wasseroberfläche versehen, um zu überprüfen, ob der Feuchttetransport in höhere Stammbereiche damit reduziert werden kann. Eine abschließende Bewertung der Wirkung dieser Nut steht noch aus.

Herstellung splintfreier Hölzer

Als eine mögliche Verbesserung des Schutzes von Holz im Luftbereich (Gebräuchsklasse 3.1 nach DIN 68800-1:2011) erschien der Einsatz von splintfreiem Holz infrage zu kommen. Nahelegend war die Herstellung von Pfahlabschnitten ohne Splintholz mit Rundstabfräsmaschinen, und entsprechende Fräsversuche wurden in der Firma Gerhard Stellmacher in Celle bis zu einem Durchmesser von 30 cm durchgeführt. Um auch Hölzer mit größeren Querschnitten herstellen zu können, bot sich der Zuschnitt des Holzes zum Achteck an. Dies wurde mit einer Stammholzsäge „Wood-Mizer LT 15“ und einer Holzabbandanlage der Firma Hundegger erprobt.

Eignungsprüfung von Geotextilien zum Holzschutz im Meerwasser

Die Prüfungen in Anlehnung an EN 275 ergaben, dass Holz im Meerwasser dauerhaft mit Geotextilien vor Holzschädlingen geschützt werden kann. Alle mit Geotextilien umgebenen Probenhölzer blieben über die Versuchsdauer von fünf Jahren ohne Schädigungsbefall, womit die Vorgaben der Norm erfüllt wurden, da in jedem Jahr Befall durch Holzbohrmuscheln an den Kontrollproben festzustellen war.

Bei den Bewuchsuntersuchungen wurde eine dichte Besiedlung der Geotextilien mit unterschiedlichen Organismen festgestellt. Die Laboruntersuchungen ergaben in allen Fällen eine deutliche Zunahme der Masse (um etwa 200 %, eine Probe jedoch um 550 %) durch wasserseitigen Bewuchs und durch das Einlagern von mineralischen Partikeln; diese Einlagerung dürfte einer Zersetzung der Materialien entgegenwirken. Negative Auswirkungen der Geotextilien auf die aquatische Umwelt wurden nicht wahrgenommen.

Die Festigkeitsuntersuchungen ergaben eine Reduzierung der Höchstzugfestigkeit von weniger als 10 % nach fünfjährigem Einsatz im Meerwasser bei den Produkten aus 100 % Polyester, was unter Praxisgesichtspunkten akzeptabel erscheint.

Haltbarkeit von Geotextilien

Zur Dauerhaftigkeit von Geotextilien lagen aus vorherigen Untersuchungen bereits Feststellungen vor. Versuche zur Montage eines derartigen Überzugs wurden bereits vor etwa 20 Jahren durchgeführt und über mehrere Jahre im Meerwasser beobachtet. Dabei wurden visuell keine Anzeichen von mechanischer Zerstörung oder Verwitterung am Material festgestellt. Die robusten Vliesstoffe erwiesen sich als chemisch weitgehend inert und haben sich auch im Deponiebau in aggressiven Sickerwässern bewährt. Nebenwirkungen auf die marine Flora und Fauna wurden nach den vorliegenden Untersuchungen nicht festgestellt (Saathoff et al. 2010).

Die zunehmende Anwendung von Geotextilien im Wasserbau wird in einem Übersichtsartikel von Müller und Saathoff (2015) beschrieben, und die möglichen Folgen für die Umwelt werden diskutiert. Danach ist davon auszugehen, dass auch Geotextilien alterungsbedingt brüchig werden und reißen, wobei Bestandteile an die Umgebung abgegeben werden können.

Dies ist jedoch nach Ansicht der Autoren in erster Linie kein ökologisches, sondern ein technisches Problem, da durch derartige Degradationsprozesse das Versagen der gesamten Konstruktion eingeleitet werden würde. Folglich sollten Alterungseffekte in Rahmen der Instandhaltung frühzeitig erkannt werden, damit das betroffene Material rechtzeitig entnommen oder ersetzt werden kann.

Neuere Untersuchungen (Müller et al. 2016) geben Auskunft über das Verhalten von Geotextilien im Wasser (Geotextilien aus Polypropylen). Selbst bei Lagerungen bis über 700 Tagen in Wasser bei 80 °C konnte keine Änderung in der Festigkeit der Produkte festgestellt werden. In einem weiteren Projekt werden die Abbauprozesse von Geokunststoffen im Wasserbau untersucht (Simon 2018).

Aktuelle Beobachtungen zeigen allerdings, dass die von den Wissenschaftlern geforderten Instandhaltungsmaßnahmen an vor Jahrzehnten im Wasserbau eingesetzten Geotextilien nicht immer hinreichend erfolgten. So berichtete die Ostfriesenzeitung am 1. Februar 2019, dass Bestandteile von Geotextilien, die in den 1960er- bis 1980er-Jahren im Küstenschutz eingesetzt wurden, nun als Beifang in den Netzen und Reusen von Fischern an der Ems zu finden sind.

Anwendungstechnik für Geotextilien auf Rundhölzern

Die angewendeten Methoden zur Aufbringung und Befestigung der Geotextilien auf der Holzoberfläche mit Latten und Stahlbändern haben sich grundsätzlich als geeignet erwiesen. Nachteilig wirken sich bei Rundholz größere Abweichungen von einer zylindrischen Form, wie Unrundheiten und starke Abholzigkeiten aus. Vorstehende Astansätze, Beulen und Vertiefungen auf der Holzoberfläche sollten vor dem Aufbringen des Geotextils beseitigt werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der Mantel nicht durchgängig aufliegt oder gar beschädigt wird und damit seine Schutzwirkung verliert.

Schäden am Geotextil an jeweils einer Ecke von zwei Normproben lassen den Schluss zu, dass das Material bei zu straffer Befestigung oder Reibekontakt mit anderen, festen Materialien beschädigt werden kann. Dies ist bei einer Anwendung zu bedenken, damit die Schutzfunktion auf Dauer bestehen bleibt.

Befallsgrenze für Bohrmuscheln und Bohrasseln

Die Untersuchung der Befallshöhe an Rammpfählen und Kanthölzern ergab geringen Holzbohrmuschelbefall im unteren Tidenbereich und stärkeren Befall unterhalb der Niedrigwasserlinie – hier vermehrt im bodennahen Bereich. Dies stimmt sowohl mit vorherigen Beobachtungen in deutschen Nordseehäfen,

Probenahme	Natrium (ppm)		Asche (%)
a	92	0,3	
	230		
i	48	0,2	
	26080	4,7	
	14875		
	10790	3,7	
	39435	8,9	
	30640		
	18610	4,0	
	30805	5,8	
	19535		
	12705	3,0	
a	14020	3,5	
	10385		
i	9441	3,0	

Tabelle 1 Mittlere Natriummengen und prozentualer Glührückstand (Asche) in Abhängigkeit von der Lage der Stammscheibenhälfte im Kiefernstamm und der Position der Prüfkörpersegmente im Riegel nach sechs Monaten Exposition in einer etwa 3%igen Meersalzlösung (Müller et al. 2018)

als auch mit umfangreichen niederländischen Untersuchungen im Hafen von Rotterdam überein (Paalvast und van der Velde 2011).

Bei den vorliegenden eigenen Untersuchungen wurde Befall durch Bohrasseln etwa 5 km weiter flussaufwärts als bisher bekannt nachgewiesen. Es ist anzunehmen, dass sich erst mit dem durch Flussvertiefungen verstärkten Salztransport bei auflaufendem Wasser hinreichende Salzkonzentrationen flussaufwärts eingestellt und somit die Voraussetzung für Holzbohrmuscheln verbessert haben.

Diesen Schluss lassen zumindest Untersuchungen des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zu: Danach vergrößerte sich in den letzten Jahrzehnten in Folge der Ausbaumaßnahmen der seewärtige Einfluss auf die Bewegungs- und Transportvorgänge der Unterems. Die-

ses äußert sich in einem Anstieg der Salzgehalte, und zwar besonders des maximalen Salzgehalts zum Ende der Flutstromphase.

Nach 2004 setzte vornehmlich in den Monaten Juni bis Oktober eine starke Zunahme der Salzgehalte in der Unterems ein, was auch mit dem geringen Oberwasserzufluss während dieser Zeit erkläbar ist (Engels 2016). Somit darf angenommen werden, dass zumindest zur Hauptaktivitätszeit der Holzbohrmuscheln verbesserte Lebensbedingungen oberhalb des bisher bekannten Verbreitungsgebiets in der Ems vorherrschen.

Gefährdetes Bodendenkmal

Ein konkretes Beispiel für die aktuelle Gefährdung von Holzkonstruktionen durch die Holzbohrmuschel stellt das Höft bei Pogum an der Ems südlich des Dollarts dar (Abbildung 4). Hierbei handelt es sich um ein Strömungsbauwerk aus Holzpählen und Steinschüttungen, das inzwischen vom Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege als archäologisches Bodendenkmal anerkannt wurde. Das Höft kommt nur bei niedrigem Wasserstand zum Vorschein, wobei allerdings in Vertiefungen an der Konstruktion (geringfügige Auskolkungen) hinreichend Wasser auch bei Ebbe verbleibt und ein Überleben der Holzbohrmuschel ermöglicht.

Salzverteilung und fungizide Wirksamkeit

Aus der Tabelle 1 geht hervor, dass der Natriumgehalt im Außenbereich (a) von Stammscheibe 1.1, welche sich ständig unterhalb des Wasserspiegels befand, nahezu dem Natriumgehalt der Salzwasser-Lösungskonzentration von 14 150 ppm entsprach. Hervorzuheben ist aber auch, dass selbst im inneren Kern (i) mit rund 9440 ppm ein hoher Natriumgehalt bestimmt wurde, obwohl Kiefernkerndholz als „schwer“ bis „sehr schwer tränkbar“ (EN 350:2016) klassifiziert ist.

Bemerkenswert ist, dass sowohl in der äußeren Zone (a) als auch im inneren Bereich (i) von Stammscheibe 1.2,

Fortsetzung auf Seite 239

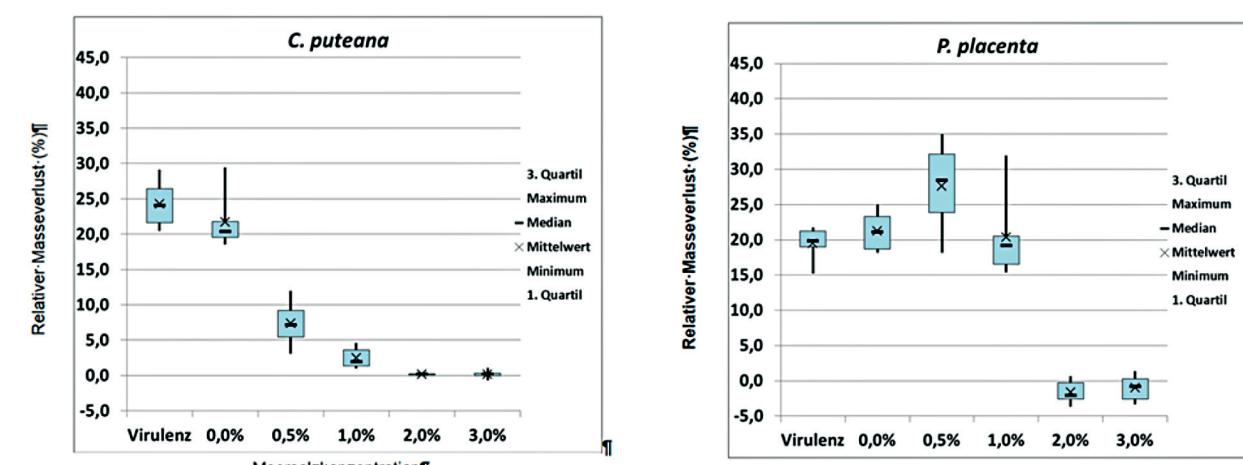


Abbildung 6 Relative Masseverluste von un- und salzbehandelten Prüfkörpern aus Kiefernsplintholz nach 16 Wochen Exposition gegenüber *Coniopteryx puteana* bzw. *Poria placenta* (Müller et al. 2018)

Konzentration	Pilz	Min	Aufnahme Lösung	Max	Min	Aufnahme Meersalz	Max	Min	Ausbaufeuchte	Max
0%	<i>P. placenta</i> (Pp)	727	739	768	0,0	0,0	0,0	60	81	102
	<i>G. trabeum</i> (Gt)	695	728	766	0,0	0,0	0,0	52	55	59
	<i>C. versicolor</i> (Cv)	724	756	800	0,0	0,0	0,0	49	59	71
	<i>C. puteana</i> (Cp)	711	740	800	0,0	0,0	0,0	46	50	59
0,5%	Pp	719	740	794	3,6	3,7	4,0	66	79	98
	Gt	715	742	775	3,6	3,7	3,9	76	93	108
	Cv	715	743	798	3,6	3,7	4,0	93	125	174
	Cp	719	739	808	3,6	3,7	4,0	78	94	141
1%	Pp	724	744	813	7,2	7,4	8,1	75	98	147
	Gt	731	749	799	7,3	7,5	8,0	131	154	188
	Cv	698	738	798	7,0	7,4	8,0	134	161	204
	Cp	707	739	818	7,1	7,4	8,2	112	143	202
2%	Pp	732	754	807	14,6	15,1	16,1	128	145	172
	Gt	738	757	801	14,8	15,1	16,0	140	155	192
	Cv	710	752	816	14,2	15,0	16,3	133	153	200
	Cp	705	744	797	14,1	14,9	15,9	125	143	167
3%	Pp	723	748	801	21,7	22,5	24,0	107	128	164
	Gt	729	761	824	21,9	22,8	24,7	137	147	178
	Cv	730	761	824	21,9	22,8	24,7	125	144	176
	Cp	740	753	765	22,2	22,6	22,9	116	130	141

Tabelle 2 Zusammenstellung der erzielten Aufnahmen an Tränklösung (l/m³) und Meersalz (kg/m³) sowie

Geotextil-Ummantelungen im Meerwassereinsatz

Fortsetzung von Seite 238

welche sich etwa auf dem Niveau des Wasserspiegels befand, eine Verdopplung des Natriumgehaltes auf rund 31 000 ppm gegenüber Stammscheibe 1.1 ermittelt wurde. Der höchste Natriumgehalt und Glührückstand wurde in allen Bereichen der Kiefernstscheibenhälfte 1.3 (etwa 25 cm oberhalb des Wasserspiegels) nachgewiesen.

Dies ist ein eindeutiger Beleg für den Salzwasserstieg einschließlich einer nachfolgenden Salzanreicherung, welche nicht nur in vertikaler, sondern auch in radialer Richtung stattgefunden hat. Selbst 50 cm oberhalb des Wasserspiegels wurden in den Proben noch Natriummengen bestimmt, die etwa doppelt so hoch waren wie die Natriummengen des im permanent unter Wasser befindlichen Stammscheibensegmentes 1.1.

Untersuchung der fungiziden Wirksamkeit von Kochsalz

Allseits bekannt ist die Aussage von Paracelsus wonach „Alles ist das mit gift ist? Alle ding sind/u. nichts ohn gift / Allein die dosis macht das ein ding kein gift ist.“ (Römpf 1995). Insofern wird auch Meersalz oder Natriumchlorid ab einer bestimmten Einbringmenge wirkungsgleich gegenüber Holz zerstörenden Pilzen sein. Durch biologische Prüfungen gemäß EN 113:1996 sollte deshalb festgestellt werden, ob eine Schutzwirkung gegenüber Basidiomyceten erzielt wird, wenn die Prüfkörper mit Meersalzlösungen getränkt werden. Dabei wurde die maximale Tränklösungskonzentration mit 3 % etwas geringer gewählt als der mit 3,5 % durchschnittliche Meerwasseralzgehalt (<http://www.salzkontor.de/wie-wiel-salz-ist-im-meerwasser.php>).

Tabelle 2 verdeutlicht, dass die Prüfkörper nach EN 113:1996 durchschnittlich etwa 750 l/m³ Tränkmittel aufnahmen, wodurch sich Einbringmengen von 3,7 kg/m³ bis 22,8 kg/m³ oder 7 700 bis 47 500 mg Meersalz je kg Holz bei einer angenommenen Darrdichte von 480 kg/m³ ergeben.

Zu beachten ist, dass die mittleren Holzfeuchten für alle mit Meersalz imprägnierten Prüfkörper – bis auf zwei Ausnahmen – nach 16 Wochen Exposition weit über 130 % lagen. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung, da nach EN 113: 1996, Ab-

schnitt 8.6.3, „jeder behandelte Prüfkörper mit einem Masseverlust von weniger als 3 % ausgesondert wird, sofern dieser in Bezug auf die Feuchte abnormal erscheint, d. h. dieser eine End-Feuchte von mehr als 80 % ...“ aufweist.

Allerdings berichten Huckfeldt und Schmidt (2015), dass der optimale Feuchtbereich für den Abbau von Kiefernholz für *C. puteana* zwischen 36 % bis 208 % und für *G. trabeum* zwischen 46 % bis 179 % liegt. Hier-



Abbildung 7 Zustand der mit Geotextil ummantelten (linkes Bild) und der nicht ummantelten Stammscheibe Nr. 5 (rechtes Bild) nach fünf Jahren Exposition in Norddeich

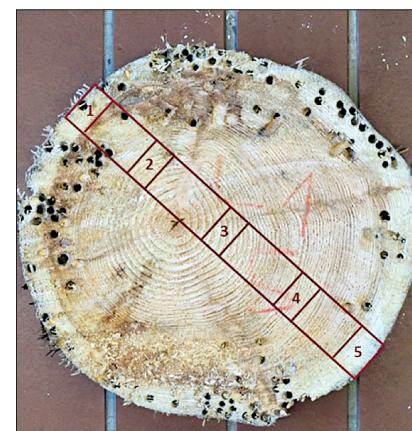
nach würden sowohl die mittleren als auch die maximalen Ausbaufeuchten für *C. puteana* im optimalen Feuchtbereich liegen. Gleiches gilt zumindest auch für die mittleren Ausbaufeuchten, die für *G. trabeum* bestimmt wurden.

Grundsätzlich gilt festzustellen, dass die biologischen Prüfungen gültig sind, da die vorgeschriebenen Mindestabbauraten der Virulenzproben gemäß EN 113:1996 erreicht wurden (Abbildung 6).

Abbildung 6 zeigt, dass *Coniophora puteana* relativ empfindlich auf das verwendete Meersalz (fast reines Natriumchlorid) reagiert, da bereits bei der geringsten Einbringmenge von etwa 4 kg/m³ (Meersalzkonzentration 0,5 %) ein Masseverlust kleiner 10 % bestimmt wurde.

Demgegenüber scheinen Einbringmengen an Natriumchlorid von etwa 4 kg/m³ die Aktivität von *Poria placenta* sogar zu stimulieren, da die mittlere Abbaurate mit knapp 30 % deutlich oberhalb der Virulenzproben (rund 20 %) oder der mit Wasser imprägnierten Prüfkörper (rund 22 %) lag.

Die Untersuchungsergebnisse lassen den Schluss zu, dass unabhängig vom eingesetzten Pilz das imprägnierte Holz bei Einbringmengen von mindestens 15 kg Meersalz je m³ (Tabelle 2) geschützt ist, da nach 16 Wochen Exposition nahezu kein Masseverlust ermittelt wurde. Ob die Schutzwirkung tatsächlich auf Natriumchlorid oder die hohen Holzfeuchten zurückzuführen ist, muss noch eingehender untersucht werden. Unter praktischen Gesichtspunkten ist der Wirkmechanismus jedoch von sekundärer Natur, entscheidend ist die sich durch eine Salzaufnahme einstellende Schutzwirkung.



chensegment visuell keine Anzeichen eines Befalls festzustellen sind, wurde innerhalb von nur 5 Jahren sowohl das Splint- als auch das Kernholz des Referenzpfahles stark durch die Holzbohrmuschel angegriffen.

Im Gegensatz zu den Freilanduntersuchungen unter Verwendung von künstlichem Meerwasser wurden in dem Norddeicher Rammpfahl deutlich geringere Natriumgehalte ermittelt, was primär auf das eingesetzte, schwer tränkbare Lärchenholz zurückzuführen sein sollte.

Die höchsten Metallionen-Gehalte wurden im Splint der Stammscheibe Nr. 4 (rund 50 cm unterhalb des mittleren Niedrigwassers) nachgewiesen, wobei jeweils etwa 1/4 davon auf Kalzium-, Natrium- und Magnesium-Ionen entfallen (Tabelle 3). Wenn auch hier nicht gezeigt, wurde ein analoges Ergebnis für den mit Geotextil ummantelten Rammpfahl erhalten (Müller et al. 2018). Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Salzverteilung sowohl innerhalb des nicht ummantelten als auch des ummantelten Stammes mit denen von im künstlichen Meerwasser expozierten Rundhölzern vergleichbar ist.

Gefährdung durch Pilze oberhalb der Wasserlinie und Schutzmöglichkeiten

Ein Pilzbefall am oberen Ende der im Rahmen der Untersuchungen ausgebrachten Rundholzpfähle war nach vorherigen Praxisbeobachtungen zwar erwartet worden, überrascht jedoch bezüglich des Ausmaßes und des zeitigen Auftretens. So wurde bis einen Meter unterhalb des (nicht abgedeckten) Hirnholzendes eines Lärchenstamms (Rundholz) im inneren Kernholzbereich bereits nach fünf Jahren ein Blattlingsbefall (roter Pfeil, Abbildung 8) gefunden. Dies unterstreicht, dass ein Pfahlkopf-Schutz gegen Bewitterung dringend geboten ist.

Die Pilzdiagnostik ergab im Tidenbereich mit ständigen Wasserwechseln neben Bakterien ausnahmslos Moderfäulepilze. Diese Pilze wurden an allen Untersuchungspunkten nachgewiesen und haben ihre Bedeutung im Bereich sehr hoher Holzfeuchten, d. h. im Bereich des Tidenhubes. Hingegen wurden Basidiomyceten erst oberhalb der Tidenhubgrenze nachgewiesen. Das geringe Basidiomycetenvorkommen im Tidenbereich der Hölzer dürfte insbesondere Folge einer hohen Holzfeuchte sein. Zusätzlich sollten durch die permanente Umspülung der Holzoberfläche leicht lösliche Bestandteile – z. B. Zucker – aus dem Holz herausgelöst werden, wodurch diese Nährstoffe für die erste Phase der Pilzentwicklung nicht bzw. nur in geringem Maß zu Verfügung stehen.

Zudem könnte auch der etwas erhöhte Salzgehalt sich hemmend auf die Keimfähigkeit der Pilzsporen auswirken, da dieser im Vergleich zum nicht mit dem Meerwasser in Kontakt kommenden Holz um mehr als das Dreifache erhöht ist (Tabelle 3).

Einsatz von Kanthölzern

Der Zuschnitt des Bereiches oberhalb der Wasserfläche zum Kantholz reduziert offenbar die Gefahr durch Pilzbefall. Gründe hierfür dürften der geringere Splintholzanteil und der geringere Querschnitt an sich sein, weil hierdurch die Feuchteaufnahme insgesamt reduziert wird. Obwohl der Pilzbefall am oberen Ende dieser Pfähle gering war, wird jedoch auch für Kantholzpfähle ein Schutz der Hirnholzenden gegen Niederschläge empfohlen.

Die Herstellung von normgemäßem splintholzfreiem Holz kann nach den eigenen Versuchen bis zu einem Durchmesser von 30 cm mit Rundstabfräsmaschinen erfolgen. Konstruiert wurden jedoch bereits Maschinen, die einen Fertigdurchmesser von 35 cm ermöglichen. Damit wären Rundhölzer zumindest mit Holzdurchmessern möglich, wie sie in Sportbootanlagen oder für Seezeichen üblich sind.

Die im Projekt entwickelte Methode zur Herstellung von Achteck-Hölzern erlaubt die Herstellung von stärkeren Hölzern ohne Splint mit Stammholzsägen und Abbundanlagen, wobei allerdings die Länge des Holzes entspre-

chend der Anlagenlänge begrenzt ist. Einige Modelle von Kleinsägewerken, wie das in den Versuchen eingesetzte „Wood-Mizer LT 15“-System, sind zwar verlängerbar, aber in der Praxis ist die Länge der Maschinen in der Regel auf weniger als 10 m begrenzt. Praktisch ist es jedoch auch möglich, das obere Ende eines längeren Rammpfahls auf das Sägebett zu legen und das dünnere Ende über die Säge ragen zu lassen. So kann das obere Ende, das im Einsatz durch Pilzbefall bedroht wäre, splittfrei gesägt werden, während der weitere Stammabschnitt, der später im Wasser sein wird, als Rundholz verbleibt.

Die Längenbeschränkungen könnten jedoch umgangen werden, indem kürzere Holzabschnitte mit Längsverbindungen auf die gewünschte Länge verbunden werden; damit würde auch der aufwendige Langholztransport entfallen.



Abbildung 8 Mycel des Zaunblattlings (*Gloeophyllum sepiarium*) im inneren Kernholz einer Dalsbenschibe (Lärche, *Larix spp.*) Foto: K. Robbers

len. Außerdem könnten kürzere Abschnitte von Holzarten mit gezielt ausgewählten Eigenschaften – z. B. erhöhte Dauerhaftigkeit gegen Pilze oberhalb der Wasserfläche oder bohrmuschelresistente Holzarten gegen Holzschädlinge unterhalb des (Meer-)Wasserspiegels – miteinander verbunden werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten Versuche zur Längsverbindung von Holzabschnitten ergaben gute Festigkeitswerte und zeigen interessante Lösungswege für weitere Entwicklungen auf. Sollen dabei jedoch – wie in den durchgeföhrten Versuchen – geklebte Verbindungen zum Einsatz kommen, sind geeignete, feuchteverträgliche Kleber einzusetzen (Guyer 2018).

Reduzierung der Steighöhe im Pfahl und des Eindringens von Wasser über die Stirnseite

Für ein Pilzwachstum sind Holzfeuchten oberhalb von 25 % erforderlich. Bei Holzpfählen, die im Wasser stehen, ist davon auszugehen, dass diese Bedingungen unterhalb der Wasserlinie sowie 10 cm bis 50 cm darüber gegeben sind. Versuche mit unterschiedlichen Holzarten und Splintanteilen ergaben erwartungsgemäß, dass das Wasser bei Pfählen mit Splintholz deutlich weiter nach oben steigen kann als bei Pfählen, die ausschließlich aus Kernholz bestehen. Auch wenn ein Pilzbefall im Verlaufe von mehreren Jahren nicht ausgeschlossen werden kann, so darf doch beispielweise an senkrechten Kernholzpfählen aus Lärche ein deutlich späterer Schadenseintritt angenommen werden.

Oberhalb des Spritzwasserbereiches kann die Holzfeuchte über baulich vorbeugende Maßnahmen reduziert werden. Bauliche Maßnahmen nach DIN 68 800-2:2012, wie beispielsweise staubwasserfreie Anschlüsse, Abdeckung von Hirnholz und die direkte Abführung von Niederschlagswasser vermindern die Feuchteaufnahme. Zudem kann der Einsatz von Farbkernholz natürlich dauerhafter Holzarten bestimmter Dauerhaftigkeitsklassen dazu beitragen, die Gefährdung der Konstruktion zu reduzieren.

Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Geotextilien können aus technischer Sicht zum Schutz von Holz im Meer-

Stamm	Scheibe	Position	Ca	K	Mg	Na	Na - Anteil an den bestimmten Mineralstoffen [%]
L1 ND	5	Splint	824	467	1226	916	25,5
		Kern außen	464	248	349	361	23,6
		Kern innen	261	280	61	49	6,5
		Kern außen	390	197	132	153	16,3
		Splint	679	323	952	601	22,7
L1 ND	4	Splint	1902	678	2167	1254	20,0
		Kern außen	304	209	66	83	10,7
		Kern innen	281	267	60	30	4,0
		Kern außen	187	183	40	87	15,6
		Splint	422	214	482	365	24,3
L1 ND	3	Splint	736	252	1033	339	12,6
		Kern außen	259	234	55	62	8,7
		Kern innen	343	298	73	27	3,0
		Kern außen	220	169	45	80	13,8
		Splint	700	291	1062	560	20,6
L1 ND	2	Splint	349	116	408	140	12,7
		Kern außen	271	206	56	2,8	0,4
		Kern innen	319	226	67	2,2	0,3
		Kern außen	215	175	48	1,5	0,3
		Splint	556	202	200	106	8,4
L1 ND	1	Splint	448	172	103	6,0	0,6
		Kern außen	183	115	38	1,4	0,3
		Kern innen	270	176	52	1,8	0,3
		Kern außen	218	130	46	1,5	0,3
		Splint	656	290	127	11,2	0,8

Tabelle 3 Exemplarische Zusammenstellung ausgewählter Metallgehalte (ppm, gerundet) und dem daraus abgeleiteten prozentualen Natriumanteil in Abhängigkeit von der Lage der Stammscheibe im nicht-ummantelten Lärchenstamm und der Position der Prüfkörpersegmente im Riegel nach 5 Jahren Exposition (Müller et al. 2018)

Holzfenster als Nachhaltigkeitsmerkmal gefordert

Bei Neubau der Erste Group in Wien schützt äußere Glasfassade die Holzfenster vor Witterungseinflüssen

Wichtiges Gestaltungsmerkmal eines neuen Bürogebäudekomplexes in Wien sind die geschwungenen Glasfassaden ohne außen sichtbare Rahmen. Die Konstruktion ist eine Doppelfassade, bei der die äußere Glasfassade die Holzfenster mit dem davor montierten Verschattungssystem vor Witterungseinflüssen schützt. Die Nürnberg-Messe weist mit dem Bericht über dieses Projekt darauf hin, dass auf der „Fensterbau/Frontale“, die im nächsten Jahr vom 18. bis 21. März auf ihrem Messegelände stattfindet, auch solche modernen Holzfenster-Themen vertreten sein werden.

Der Neubau der Erste Group in Wien, auf dem Gelände des ehemaligen Südbahnhofs von Henke-Schreieck-Architekten geplant, ist ein spektakulärer Gebäudekomplex. Vier Baukörper mit geschwungenen Glasfassaden und bis zu zehn Stockwerken umschließen lichtdurchflutete Innenräume und öffentliche Flächen. Von der Österreichischen Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI) erhielt das Projekt das Platin-Zertifikat. Wegen der Nachhaltigkeits-Zertifizierung waren vom Bauherren Holzfenster als ökologische Komponente gefordert, ebenso die kontrollierte Lüftung und die Möblierung aus Holz für die 4500 Mitarbeiter.

Nach Auskunft des Fensterherstellers Katzbeck aus Rudersdorf (Österreich) waren von Henke-Schreieck-Architekten speziell für dieses Objekt konstruierte Holzfenster gefordert, die in diversen Prüfungen auf Luftdurchlässigkeit, Schallschutz und Wärmedämmung getestet wurden. Ein Partner des Herstellers dafür war die Holzforschung Austria (HFA) in Wien.

Die insgesamt 7321 Fensterrahmen mit Höhen von 2,40 m bis 3,40 m, hergestellt aus Lärchenholz, geölt, wurden

nach Baufortschritt geliefert. Die Verglasung wurde vor Ort von einem Stahlbauunternehmen in die Rahmen montiert und diese dann in die Gebäude. Aufgrund der gekrümmten Fassadenform wiesen fast alle Fenster unterschiedliche Abmessungen auf. Jeder Büroraum verfügt über steuerbare und raumhohe Lüftungsöffnungen.

Ungewöhnliche Montage

„Anfangs war eine Aluminiumfassade geplant“, war von Peter Schober, Leiter der Abteilung Bautechnik und des Fachbereichs Fenster der HFA, zu erfahren. Doch andere Argumente setzten sich durch:

- ◆ Aufgrund der Zertifizierungs-Anforderungen stand Holz im Vordergrund.
 - ◆ Die Bauherrschaft hatte anfänglich Bedenken in Sachen Brandschutz und Dauerhaftigkeit von Holz.
- Diese Skepsis konnte schnell entkräftet werden – letztendlich konnte ein gemeinsam besuchtes Bankgebäude in Rosenheim, das eine Holzfassade aufweist, alle Beteiligten überzeugen.

Speziell ist aber die Position der Glasfassade, die zu einem Einbau der Fenster außerhalb des Üblichen führte. Dazu Schober: „Im Zuge der Montage gab es die Diskussion, dass bei Metall-Fassaden als Doppelfassade die inneren Metallfenster zuerst montiert werden sollten und dann die äußeren Glaselemente. Das hätte für die Holzfenster aber zeitweise eine direkte Bewitterung bedeutet, für die sie nicht konzipiert waren. Dafür musste der Montageablauf der Fassade umgedreht werden: erst die Außenscheiben, dann die Montage der Innenfenster. Durch die Änderung der Reihenfolge ergab sich eine wirtschaftliche Montage der Fenster. Die Fenster wurden geschossweise mit Kran geliefert und gelagert. Anschlie-



Beim Neubau der Erste Group in Wien sollten Holzfenster eingesetzt werden. Das Projekt erforderte zudem eine besondere Art der Montage.
Fotos: Henke-Schreieck-Architekten, Wien

rend wurden die Prallscheibe und dann erst die Fenster von innen montiert.“

Muster bewahrt vor Fehlern

Dabei war die HFA für ein Ausführungsdetail verantwortlich, das letztendlich die luftdichte Montage der Fenster erst ermöglichte. Da jedes Fenster Anschlüsse oben und unten sowie seitliche Koppelungen aufweist, er-

schien dem Hersteller eine luftdichte Montage anfangs als schwer möglich. Eine Feuchtebildung war unter diesen Umständen nicht auszuschließen. Ein 1:1-Muster zeigte im Rahmen der HFA-Tests mit dem vom Architekten vorgegebenen Klima tatsächlich Kondenswasser und eine Durchfeuchtung der Bauanschlussdämmung. Durch eine geänderte Montage mit einer Art Hinterlüftung konnte die Feuchtebildung je-

doch unterbunden werden, was sich in der Baupraxis bewährt hat.

„Unser Beitrag war es, das Projekt in der Umsetzung zu unterstützen, bzw. die Umsetzbarkeit nachzuweisen und zusammen mit dem Hersteller die Konstruktion zu optimieren, auch wirtschaftlich. Wir konnten damit auch die Montagetechnik so gestalten, dass die Montage mängelfrei übergeben werden konnte“, resümiert Schober.



Durch die gebogene Gebäudeform sind die Scheibenmaße sehr unterschiedlich.



Die Rahmen aus Lärchenholz werden durch die Doppelfassade vom Glas geschützt.

Geotextil-Ummantelungen im Meerwassereinsatz

Fortsetzung von Seite 239

wasser eingesetzt werden. Eine abschließende ökologische Bewertung für dieses Anwendungsgebiet steht jedoch noch aus. Hilfreich wäre eine Methode zur Bewertung der Festigkeit im Einsatz, um frühzeitig den Austausch nicht mehr funktionsfähiger Materialien einzuleiten zu können.

Zielführend gegen Holzsäädlinge im Meerwasser scheint eine Geotextil-Ummantelung des Holzes bis zur Niedrigwasserlinie. Die hätte den Vorteil, dass das Geotextil ständig feucht bliebe und nicht direkt dem Sonnenlicht ausgesetzt wäre.

Ein geringerer Befall durch Bohrasseln im Tidenbereich kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dürfte aber nach den vorliegenden Erkenntnissen keine nennenswerte Reduzierung der Standzeit bewirken und sollte somit hinnehmbar sein.

Literatur

- Ahl, H., Fromm, J., Melcher, E. 2013: Microwave assisted digestion as a preliminary method for the chemical analysis of inorganic wood preservative components, European Journal of Wood and Wood Products. 71(4), 533-535.
- DIN 68800-1:2011 Holzschutz - Teil 1: Allgemeines. Beuth Verlag Berlin.
- DIN 68800-2:2012 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth Verlag Berlin.
- EN 113:1996 Holzschutzmittel - Prüfverfahren zur Bestimmung der vorbeugenden Wirksamkeit gegen holzzerstörende Basidionyceten - Bestimmung der Grenze der Wirksamkeit. Deutsche Fassung EN 113: 1996. Beuth Verlag Berlin.
- EN 275: 1992 Holzschutzmittel - Prüfverfahren zur Bestimmung der Schutzwirkung eines Holzschutzmittels gegenüber marin Organismen. Deutsche Fassung EN 275: 1992. Beuth Verlag Berlin.
- EN 350:2016 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff. Deutsche Fassung EN 350:2016. Beuth Verlag Berlin.
- Engels, A. 2016: Veränderungen der Gewässer in der Unterems - Masterplan Ems
2050. Nachrichten des Marschenrates zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee, Heft 53 / 2016, Herausgeber: Marschenrat zur Förderung der Forschung im Küstengebiet der Nordsee e.V., Wilhelmshaven, 62-104.
- Guyer, H. 2018: Mechanische Längsverbindungen von hölzernen Rammpfählen, Masterarbeit am Institut für Bauphysik, Leibniz Universität Hannover.
- Huckfeldt, T., Schmidt, O. 2015: Hausfäule- und Bauholzpilze. Diagnose und Sanierung. 2. Auflage. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & KG, Köln.
- Müller, J. 2004: Bohrmuschel verhindert Holzeinsatz im Küstenschutz. Holz-Zentralblatt 9, 111.
- Müller, J. 2010: Holzarten im historischen Schiffbau und ihre Gefährdung durch Terediniden. Skyllis - Zeitschrift für Unterwasserarchäologie 10 (1) 90-94.
- Müller, J.; Gercken, J. 2006: Auch Tropenholz-Buhnen teilweise mit Teredo-Befall. Holz-Zentralblatt 5, 135.
- Müller, J., Melcher, E., Welling, J., Huckfeldt, T. 2018: Praxisnahe Untersuchungen zum Schutz von Holz im Meerwasser. DBU Abschlussbericht, 190 S., Aktenzeichen: 32571/01-32, https://www.dbu.de/projekt_32571/01_db_2848.html.
- Müller, W. W.; Saathoff, F. 2015: Geosynthetics in geoenvironmental engineering. Sci. Technol. Adv. Mater. 16 034605.
- Müller, W. W.; Jakob, I., Tatzky-Gerth, R.; Wöhlecke, A. 2016: A Study on Antioxidant Depletion and Degradation in Polyolefin-Based Geosynthetics: Sacrificial Versus Regenerative Stabilization. polym. eng. sci., 56:129-142.
- Paalvast, P., Velde, G. van der, 2011: Distribution, settlement, and growth of first-year individuals of the shipworm *Teredo navalis* L. (Bivalvia: Teredinidae) in the Port of Rotterdam area, the Netherlands. International Biodeterioration & Biodegradation 65, 379-388.
- Römpf Chemielexikon Band Cm-G, 1995, Thieme Verlag, S. 1565.
- Saathoff, F., Spittel, M., Hinkerohe, C. 2010: Entwicklung eines Verfahrens zum Schutz von Holzpfählen gegen *Teredo navalis* - Zwischenbericht September 2010 - AZ 26280-23, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Simon, F.-G., Chubarenko, B., Purina, I. 2018: Approach for analysis of environmental impact of geosynthetics in aquatic systems by example of the Baltic Sea. Poster 7th IEEE/OES Baltic Symposium, Clean and Safe Baltic Sea and Energy Security for the Baltic countries, Klaipeda, Litauen, 12.-15.06.2018.