

Ergebnisse eines Forschungsvorhabens

FOULPROTECT – zur Problematik des Bewuchses in Meerwasserbauwerken

Cynthia Morales Cruz und Oliver Weichold, Aachen, Hans-Jürgen Kocks, Siegen

Im Rahmen des Verbundprojekts FOULPROTECT „Bewuchsschutz und Vermeidung von Biokorrosion in der Maritimen Technik“ wurde am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen University (ibac) in Zusammenarbeit mit den Firmen Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH (SMLP) und LimnoMar eine mineralische Ummantelung mit erhöhtem mechanischen Widerstand für Stahlkonstruktionen im Meerwasserbereich entwickelt. Die Eignung verschiedener kommerziell verfügbarer Werk trockenmörtel als Schutzschicht wurde am Beispiel von Stahlrohren für Gründungsstrukturen von Offshore-Windkraftanlagen getestet. Dazu wurden die Frisch- und Festmörtelkennwerte bestimmt sowie Dauerhaftigkeitsuntersuchungen in Laborversuchen unter realen Bedingungen (Luft- und Meerwasserlagerung) durchgeführt. Der Aufwuchs (Biofouling) auf der Mörtelumhüllung bei einer Meerwasserlagerung konnte bei keinem der untersuchten Materialien verhindert werden, aber fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen zeigten weder Mikro- noch Makrobesiedlungen unterhalb der Mörteloberfläche. Zwischen den einzelnen Materialien wurden deutliche Unterschiede bei der Rissanzahl der ausgelagerten Proben festgestellt. Unter Berücksichtigung aller Untersuchungen weisen hochfeste Mörtelmischungen das größte Potenzial auf, abrasiven Einwirkungen und inneren Sprengdrücken dauerhaft standzuhalten.

1 Einleitung

Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts FOULPROTECT „Bewuchsschutz und Vermeidung von Biokorrosion in der Maritimen Technik“ ist es, den Bewuchs auf maritimen Strukturen deutlich zu verringern. In einem Teilprojekt entwickelt das ibac mineralische Umhüllungen für die Gründungsstrukturen von Offshore-Windkraftanlagen, die zum Teil in mehr als 25 m Tiefe in der deutschen See liegen.

Diese und ähnliche Konstruktionen insbesondere auf offener See unterliegen nicht nur der korrosiven Beanspruchung der salzhaltigen Umgebung, sondern sind neben Beanspruchungen durch Frost-Tau-Wechsel und dynamischen Belastungen durch Wind und Wellen auch den Angriffen durch Meeresorganismen ausgesetzt. Letzteres wird als Biokorrosion oder „Biofouling“ bezeichnet und beinhaltet das Ansiedeln von z.B. Muscheln, Seepocken und Algen. Die Biokorrosion kann zu einer Reduzierung der Lebensdauer der technischen Anlagen und der verwendeten Materialien führen [1]. Häufig entstehen durch Biokorrosion Kosten für Instandhaltung, Wartungsarbeiten oder gar den Austausch einzelner Teile einer Anlage. Unter diesem Aspekt beschäftigten sich in diesem Teilprojekt insgesamt drei Partner aus Wirtschaft (Firmen SMLP und LimnoMar) und Wissenschaft (ibac) mit der Entwicklung von Verfahren, neuartigen Beschichtungssystemen und -konzepten, die

einen langlebigen Schutz vor Biokorrosion ermöglichen. Im Fokus dieses Vorhabens stand dabei die Entwicklung und Dauerhaftigkeitsuntersuchung einer Faserzementmörtelummantelung (FZM) für konstruktive Stahlrohrelemente.

Die Relevanz dieses Projekts zeigen Zahlen der European Wind Energy Association, die für die deutsche See einen Stahlbedarf von 3,3 bis 5,0 Millionen Tonnen bis 2030 für Offshore-Gründungsstrukturen prognostizieren. Die Entwicklung und Verbesserung der Technologien und Verfahren im Rahmen dieses Projekts hilft dementsprechend der wachsenden volkswirtschaftlichen Bedeutung regenerativer Energiequellen weltweit und besonders in Deutschland gerecht zu werden und maritime Strukturen effektiv zu schützen. Darüber hinaus besitzt dieses Konzept großes Potenzial bei anderen Anwendungen und Märkten wie z.B. bei der Öl- und Gasindustrie.

Im Fall der Offshore-Konstruktionen ist bei der Firma SMLP für Stahlrohre ein mehrschichtiges Umhüllungskonzept vorgesehen, das aus der Kombination von Polyethylenumhüllung und faserverstärkter Zementmörtelschicht besteht. Es existieren jahrzehntelange Erfahrungen in der Ummantelung von Stahlrohren mit Zementmörtel [2]. Dabei steht insbesondere die mechanische Schutzwirkung der Zementmörtelummantelung für ein bereits beschichtetes bzw. umhülltes Stahlrohr im Vordergrund. Die Verarbeitung des Mört-

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Cynthia Morales Cruz studierte Bauingenieurwesen mit der Fachrichtung Konstruktiver Ingenieurbau an der RWTH Aachen University. Seit 2012 ist sie Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe Erhaltung und Instandsetzung am Institut für Bauforschung (ibac) Aachen. Ihre Forschungsinteressen liegen im Bereich der Instandsetzung von Bauwerksflächen mit Textilbeton.

Prof. Dr. rer. nat. Oliver Weichold studierte Chemie an der Universität Würzburg. Nach Forschungsaufenthalten in den USA habilitierte er am Institut für Technische und Makromolekulare Chemie der RWTH Aachen University. 2011 wechselte er als Privatdozent an das Institut für Bauforschung (ibac) und wurde 2014 dort auf die neu geschaffene Professur für Strukturelle Polymerkomposite im Bauwesen berufen. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich der polymeren Materialien und der nachwachsenden Rohstoffe.

Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Kocks studierte Chemie an der Ruhruniversität Bochum. Anschließend verfasste er seine Doktorarbeit zur Wirkungsweise von Korrosionsinhibitoren Säureschutzbeschichtungen an der Märkischen Fachhochschule Iserlohn und wurde dann an der RWTH Aachen promoviert. Seit 1992 arbeitet er in der Anwendungstechnik und ist zuständig für Forschung und Entwicklung bei der Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH (ehem. Röhrenwerk Gebr. Fuchs GmbH) in Siegen.

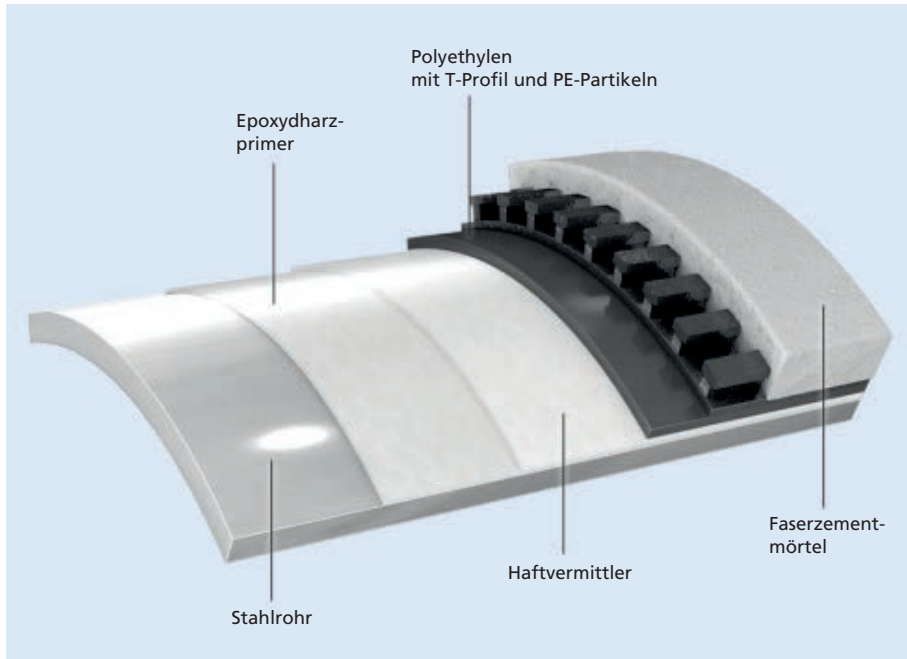


Bild 1: Schematischer Aufbau der Kunststoffumhülle mit der Faserzementmörtelschicht

Quelle: SMLP

tels bedarf einer sorgfältigen Abstimmung der jeweils einzusetzenden Mörtelmischung in der Produktion. Darüber hinaus sollte für den angestrebten Verwendungszweck ein Verbund zwischen dem korrosionsgeschützten Stahlbauteil und der Zementmörtelschicht realisiert werden.

Dieser Verbund wird durch die Profilierung der Polyethylenumhüllung ermöglicht (Bild 1). Vorteilhaft dabei ist, dass diese Profilierung nicht nur Scherkräfte problemlos aufzunehmen vermag, sondern darüber hinaus auch eine Verstärkung darstellt. Zudem ist im Fall einer Rissbildung in der Mörtelschicht eine Rissausbreitung in die Polyethylenumhüllung und damit in den Korrosionsschutz systembedingt ausgeschlossen. Für Offshore-Konstruktionen, die einer dynamischen Beanspruchung unterliegen, ist mit Blick auf eine Rissbildung der Einsatz von Fasern und eine Profilierung der Umhüllung obligatorisch.

2 Ziele des Projekts

Ein Teilziel des Vorhabens FOULPROTECT ist die Entwicklung einer Kombination aus Korrosionsschutz und mechanischem Schutz für Konstruktionselemente aus Stahl (z.B. Rohre oder Verbindungsknoten) für feststehende oder schwimmende Offshore-Gründungen, insbesondere Windenergieanlagen. Mit der im Rahmen dieses Teilprojekts entwickelten Technologie sollen die Rohre und Anbauteile der Gründungsstruktur mit einer Kombination aus thermoplastischer Schutzschicht und Zementmörtelummantelung versehen werden. Die Beständigkeitsanforderungen werden durch die aggressive Umgebung definiert, die ggf. auch zu mikrobiell induzierter Korrosion (MIC) führen kann [1]. Daher steht neben den generellen Prüfungen von Mörtleigenschaften, wie z.B.

Festigkeit und Ansteifverhalten, der Einfluss von Mikroorganismen auf die Zementmörtelummantelung im Vordergrund. Ziel ist es, eine Lebensdauer dieser Stahlkonstruktionen von 25 Jahren bei möglichst geringem Wartungsaufwand zu erreichen. Durch einen effektiven Korrosionsschutz können bisher erforderliche Abrostungsschläge vermieden, erhebliche Mengen Stahl eingespart und Instandhaltungskosten verringert werden.

Die Entwicklung und Festlegung einer optimalen Mörtelzusammensetzung steht im Vordergrund der Arbeiten. Dabei werden auch neue vielversprechende Ansätze aus der Grundlagenforschung erprobt. Dazu gehören Hydrophobierungen (intern oder extern) sowie der Einsatz hochfester und gleichzeitig schwindarmer Mörtelzusammensetzungen. Diese müssen sich nicht nur in praxis-

orientierten Auslagerungsversuchen bewähren, sondern auch den Anforderungen einer industriellen Produktion gerecht werden.

3 Materialien und Herstellung

Zunächst wurde ein systematisches Screening von möglichen Werk trockenmörtelsystemen durchgeführt. Bei der Auswahl wurden neben gängigen Bindemittelsystemen (Kalk und Zement) auch silikatische Mörtel und ein Produkt auf Basis von Tonerdezement berücksichtigt. Als Referenz dient die Stammmischung der Firma SMLP (Abkürzung der Mörtelmischung: „SMLP“). Diese setzt sich aus einem zementösen Bindemittel, Rheinsand und diversen Zusatzstoffen sowie -mitteln, u.a. Kunststofffasern, zusammen. Die Zusammensetzung der SMLP-Mischung wurde in mehreren Varianten (var1 bis var3, Tafel 1) geringfügig verändert, um den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen (s. Tafel 1). Dabei wurden die Sieblinie und das Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis nicht verändert.

Zusätzlich wurden fünf weitere Mörtelmischungen mit zwei verschiedenen Bindemittelsystemen näher untersucht. Diese wurden aufgrund ihres Anwendungsbereichs und Größtkorns bzw. ihrer mechanischen Eigenschaften (z.B. hohe Druckfestigkeiten, geringes Schwindmaß) ausgewählt. Diese kommerziell verfügbaren Mörtelmischungen wurden lediglich hinsichtlich der Konsistenz und der Verarbeitbarkeitsdauer entsprechend den für die Produktionsbedingungen der SMLP definierten Grenzen eingestellt. Tafel 2 gibt einen Überblick der Druckfestigkeiten der SMLP Mischung (Mischung 1) und der fünf weiteren kommerziellen Materialien (Mischung 2 bis Mischung 6).

Die Bedingungen für den Mischprozess, den Auftrag des Mörtels auf das Rohr und die Nachbehandlung wurden von der Firma SMLP vorgegeben. Es galt, für die Mörtelherstellung ein Ausbreitmaß von 160 ± 20 mm und eine Mindestverarbeitbarkeitsdauer von 45 Minuten einzuhalten. Eine

Tafel 1: Druckfestigkeit (Lag. B) der veränderten Rezepturen der SMLP-Mischung nach 7 Tagen

Abk.	Veränderung		Druckfestigkeit, Lag. B, 7d	Probenbezeichnung Auslagerung vor Norderney (Rohrsegmente)
			N/mm²	
1	2		3	4
SMLP	Referenz Mischung		29	R5, R11
SMLP-var1	Bindemittelveränderung	CEM I 42,5 R	29	–
SMLP-var2		CEM-III A 52,5 N	34	–
SMLP-var3		CEM III-A 52,5 R	27	–
SMLP-WMS	interne Hydrophobierung	Momentive Silbock WMS	31	R1 und R3
SMLP-E		Sika Control E-150	41	R2 und R4
SMLP-DM		Sika DM2	25	–
SMLP-DC		DowCorning IE 6692	27	–

Nachbehandlung des ummantelten Rohrs und damit des Mörtels ist nicht vorgesehen. Für die standardisierten Prüfungen, z.B. der Druck- und Biegezugfestigkeit, werden Normprismen im Format 160 mm × 40 mm × 40 mm verwendet. Ausgewählte Mörtel wurden einem chemischen Angriff durch biogene Schwefelsäurekorrosion ausgesetzt (s. Abschnitt 4). Dazu wurden Betonwürfel mit den Abmessungen 20 mm × 20 mm × 13 mm hergestellt. Für die Auslagerungsversuche auf Norderney wurde in enger Absprache mit der Firma Limnomar ein geeignetes Prüfkörperformat von 200 mm × 200 mm × 40 mm festgelegt. Dieses ist an die dortigen Auslagerungsbedingungen (z.B. Maximalformate und -gewichte) angepasst und enthält gleichzeitig genug Material für spätere Laborprüfungen. In den Ecken des Prüfkörpers wurden vier Aussparungen (Durchmesser 10 mm) für die spätere Befestigung vorgesehen. Die Probekörper wurden nach der Herstellung einen Tag ohne Abdeckung in der Schalung belassen, danach ausgeschalt und sechs Tage bei 22 °C und 50 % relativer Feuchte gelagert.

Zur Übertragung der Laborversuche auf die Praxis wurden mit sechs ausgewählten Mörtelmischungen mindestens zwei 12 m lange Rohre bei der Firma SMLP in Siegen beschichtet. Bei der Applikation wurde jedoch festgestellt, dass für die kommerziellen hochfesten Mörtelmischungen (Mischungen 3 bis 6) keine reproduzierbare und fehlerfreie Applikation der Beschichtung möglich war. Infolge des thixotropen Verhaltens und der damit verbundenen hohen Viskosität, lässt sich das Material insbesondere nach Ruhephasen nur schlecht verarbeiten. Das Erscheinungsbild der Ummantelungen wurde sehr ungleichmäßig. Als wesentliche Ursache hierfür wurden die folgenden Parameter identifiziert: die hochfesten Mörtel wurden mit derselben Maschinen- und Fördertechnik verarbeitet, die für die SMLP-Mörtelmischung ausgelegt wurde. Da die Mörtel ein thixotropes Verhalten aufweisen und/oder infolge der

großen Mischmengen (ca. 400 kg Material) viel Wärme abgeben und dies zu einer schnellen Verfestigung führt, müssten für eine produktions sichere Verarbeitung entsprechende Änderungen in der Anlagentechnik vorgenommen werden. Die Firma SMLP prüft aktuell Optionen zur Anpassung der vorhandenen Produktionsanlage an diese Mörtelqualitäten.

Aus den beschichteten Rohren wurden 200 mm lange möglichst homogen ummantelte Segmente herausgeschnitten und vor Norderney ausgelagert. Vor der Auslagerung wurden die Schnittflächen der Rohrsegmente mit einem Grundierungsharz versehen, um einen Eintrag von MIC bzw. eine Beschädigung des Verbundprobekörpers über diese Schnittflächen zu verhindern.

4 Laboruntersuchungen

In Laboruntersuchungen wurde die Festigkeit der verschiedenen Mörtelzusammensetzungen an kleineren Ansätzen geprüft. Da die Ummantelungen unter Praxisbedingungen bereits nach 7 Tagen für den Transport vorgesehen sind, wurde insbesondere auch die Druckfestigkeit nach 7 Tagen berücksichtigt. Die Druckfestigkeit nach 7 Tagen der SMLP-Referenzmischung lag bei 29 N/mm², die der modifizierten SMLP-Mischungen (s. Tafel 1) zwischen 25 N/mm² und 41 N/mm². Vergleichbare Werte erreichte auch die Mischung SMLP-var2 mit veränderter Zementart. Durch die Zugabe einer internen Hydrophobierung wurde die Druckfestigkeit der Mischung SMLP-E um ca. 25 % auf 41 N/mm² erhöht. Bei der Mischung SMLP-DM wurden um ca. 10 % niedrigere Festigkeiten bei 25 N/mm² festgestellt. Die untersuchten kommerziellen Mörtelmischungen (Mischung 3 bis Mischung 6) erreichten nach 28 Tagen Druckfestigkeiten zwischen 55 N/mm² und 95 N/mm² (Tafel 2). Eine besonders hohe Festigkeit von 95 N/mm² erreicht die Mischung 4.

Zur Bestimmung des chemischen Angriffs durch biogene Schwefelkorrosion

wurden Prüfkörper in einer wasserdampf-gesättigten H₂S-Atmosphäre bei ca. 28 °C am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) über 47 Tage ausgelagert. Während der ersten drei Wochen wurden einmal wöchentlich schwefelsäurebildende Bakterien (*Thiomonas intermedia*) als Sprühnebel aufgetragen. Zusätzlich wurde einmal wöchentlich eine pH-neutrale Nährstofflösung aufgesprüht und der pH-Wert an der nassen Oberfläche bestimmt.

Nach der Auslagerung wurde an den Würfeln eine kalorimetrische (biologische Stoffwechselwärme) Messung sowie eine Bestimmung der Zellzahl und des Gewichts durchgeführt. An allen Probekörpern wurde eine starke mikrobielle Besiedlung festgestellt, die den pH-Wert des Betons deutlich senkte und i.d.R. zu einer Gewichtsabnahme führte (Ausnahme Mischung 4, s. Tafel 2). Das Ergebnis der Prüfung zeigt, dass die Mischung 4 einem chemischen Angriff besser widerstehen kann als die SMLP-Mischung. Zum Vergleich beträgt die gemessene Bioaktivität 89,1 anstatt 104,9 µW/18,4 cm² und die der schwefeloxidierenden Bakterien (SOB) nur 1,7 im Vergleich zu 2,2 × 10⁸ N/18,4 cm².

5 Versuche unter realen Bedingungen

Das Testen und die Validierung der sechs ausgewählten Mörtelmischungen unter realen Bedingungen, sowohl unter Wasser als auch an Luft, wurden in Zusammenarbeit mit den Firmen SMLP und LimnoMar durchgeführt. Bei den luftgelagerten Proben handelt es sich erneut um ca. 12 m lange, beschichtete Rohre, die über 26 Monate frei bewittert wurden. Aufgrund der Temperaturschwankungen zwischen -18 °C und +36 °C in den letzten zwölf Monaten waren erhöhte thermische Spannungen und daraus resultierend Risse zu erwarten [3]. Zusätzlich wurden Mörtelplatten und Rohrsegmente vor Norderney an zwei verschiedenen Standorten mit insgesamt drei unterschied-

Tafel 2: Druckfestigkeit (Lag. B) der untersuchten Mörtelmischungen nach 28 Tagen

Mischung Nr.	Anwendungs- bereich	Ergebnis – Fraunhofer „UMSICHT“		Druckfestigkeit, Lag. B, 7 d	Druckfestigkeit, Lag. B, 28 d	Binde- mittel	Probenbezeichnung Auslagerung vor Norderney (Platten)	Probenbezeichnung Auslagerung vor Norderney (Rohrsegmente)
		Aktivität	SOB					
		µW/18,4 cm²	x 10 ⁸ N/18,4 cm²	N/mm²				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 (SMLP)	Leitungsrohre Öl & Gas	104,9	2,2	26	29	Zement	1	R5, R11
2 (SMLP-WMS)	Leitungsrohre Öl & Gas	102,7	0,8	31	35		2	R14
3	Trinkwassermörtel	-	–	43	55		3	R12
4	Fugenmörtel	89,1	1,7	90	95		4	R13
5	Industrie Bodenbeschichtung	–	–	16	50	Silikat	5	R16
6	Industrie Bodenbeschichtung	–	–	39	60		6	R15

Faxantwort an: 061 23 / 92 38-244

oder per Post an Anschrift:

Abo-Service
Fachzeitschrift beton
Große Hub 10

65344 Eltville

**Gleich
Bestellkarte
ausfüllen!**

Fachzeitschrift beton:

Informiert über die Gebiete
der Betonherstellung und
Betonverwendung

Liefert Erkenntnisse aus
Forschung und Baubetrieb

Setzt Impulse
für neue Bauverfahren
und wirtschaftliche
Anwendungstechniken

„JA, ICH WILL DAS JAHRES-ABO!“



Mein Jahresabonnement kostet 378,00 € inkl. MwSt. und Versand (Ausland 388,00 €) und verlängert sich jeweils um ein weiteres Jahr, wenn es nicht spätestens 6 Wochen vor Ablauf der Bezugszeit schriftlich gekündigt wird.

Firma

Name, Vorname

Straße, Nr.

PLZ, Ort

Telefon, Fax-Nr.

E-Mail

Meine Vorteile:

- » Über 11 % Preisvorteil gegenüber der Einzelheftbestellung
- » Lieferung frei Haus
- » Jederzeit kündbar (Mindestbezug: 1 Jahr)
- » 20 % Rabatt auf alle Bücher der „edition beton“

Datum, 1. Unterschrift für das Jahresabo

Datum, 2. Unterschrift für die Kenntnisnahme
des Widerrufsrechts

Mir ist bekannt, dass ich das Recht habe, den Abschluss meines Vertrags innerhalb von 2 Wochen beim Leserservice, Fachzeitschrift beton, Große Hub 10, 65344 Eltville, zu widerrufen. Zur Wahrung der Frist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs.

VERLAG  **BAU+TECHNIK**



Bild 2: Im Hafen von Norderney zwischen April 2014 und Januar 2017 ausgelagerte Rohre

Links: SMLP Mischung; rechts: SMLP-WMS Mischung

lichen Belastungen (Salzluft, im Wasser am Hafen sowie im Offshore-Bereich) neun Monate (April 2016 bis Januar 2017) ausgelagert. Die Proben wurden anschließend hinsichtlich struktureller Schädigungen untersucht. Zudem wurden vier Rohrsegmente, die bereits im Rahmen von Voruntersuchungen in 2014 bzw. 2015 im Hafen-Bereich ausgelagert wurden, bei der Auswertung berücksichtigt. Die Entnahme erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma LimnoMar, die eine taxonomische Analyse und Bildokumentation vor der Reinigung des Bewuchses durchgeführt hat. Darüber hinaus wurde die Masse des anhaftenden Bewuchses auf der Außenseite an allen Rohren bestimmt. Zurzeit sind noch weitere Platten und Rohrsegmente ausgelagert. Diese werden mit Ende der Bewuchsperiode bzw. vor dem Winter von den Auslagerungsständen entfernt und am ibac untersucht.

6 Ergebnis der Versuche unter realen Bedingungen

Die bei der Firma SMLP freibewitterten Rohre wurden nach 28-monatiger Aus-

lagerung auf Risse und Abplatzungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Ausnahme des mit der Mörtelmischung 4 beschichteten Rohrs – eine Vielzahl an Rissen mit Rissbreiten $> 0,1$ mm entstanden ist.

Aus den o.g. ausgelagerten Rohrsegmenten wurden einzelne Probekörper senkrecht zur Oberfläche herausgeschnitten. An diesen wurden fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen durchgeführt, die zeigten, dass in keinem Fall das Porensystem mikro- oder makrobakteriell besiedelt wurde.

Im Rahmen der Auslagerungsversuche sowohl im Hafen als auch im Offshore-Bereich vor Norderney wurde, wie in Bild 2 zu sehen ist, festgestellt, dass die Bewuchsmasse stark davon abhängt, ob sich auf dem Rohr Miesmuscheln ansiedeln. Dabei zeigt sich, dass trotz gleicher Mörtelzusammensetzungen deutliche Unterschiede beim Bewuchs zu verzeichnen sind (Bild 3). Um den Zusammenhang zwischen Bewuchsmasse und Mörtelrezeptur herzustellen, müsste daher auch die Position bzw. Lage der Rohre berücksichtigt werden.

Auch an den im Offshore-Bereich ausgelagerten Rohrsegmenten wurden trotz gleicher Mörtelmischungen signifikante Unterschiede in Bezug auf die Bewuchsmasse festgestellt. Das lässt vermuten, dass die Unterschiede insbesondere auf die Einbaulage mit unterschiedlicher Sonneneinstrahlung und Benetzungsdauer, ggf. sogar Vogelfraß zurückzuführen sind. Eine sichere Aussage über die Besiedlungsdichte der Mörtel ist sowohl bei den im Hafen- als auch bei den im Offshore-Bereich ausgelagerten Rohren nicht möglich.

Im Rahmen der mechanischen Untersuchungen der vor Norderney ausgelagerten Platten wurde die Haftzugfestigkeit wie auch die Schädigungstiefe ermittelt. Für die Bestimmung der Haftzugfestigkeit wurden aus den Platten 4 (Hafen-Platten) bzw. 5 (Offshore-Platten) Zylinder mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von ca. 40 mm gebohrt. Für die Zugfestigkeitsprüfung in Anlehnung an DIN EN 1542:1999 wurden sowohl die Oberfläche als auch die untere Seite des Bohrkerns händisch mittels Winkelschleifer plan geschliffen und Stahlstempel ($\varnothing 50$ mm) auf beide Enden mit einem hochviskosen 2-komponentigen Klebstoff zur Lasteinleitung geklebt. Das Ergebnis der tiefengestaffelten Haftzugfestigkeit an den im Hafen ausgelagerten Platten ist in Bild 4 zusammengestellt. Mit Ausnahme der Proben aus der Mischung 5, die alle ein Kleberversagen erfuhr, wurde ein mittlerer Bruch des Bohrkerns festgestellt ($h \sim 20$ mm). Die Prüfwerte liegen auf einem sehr hohen Niveau ($> 1,5$ N/mm²). Insbesondere die Mischung 4 (4,8 N/mm²) und Mischung 5 ($> 6,8$ N/mm²) weisen hohe Werte auf.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Keine der getesteten Mischungen kann einen Bewuchs während einer Meerwasseranlagerung verhindern.

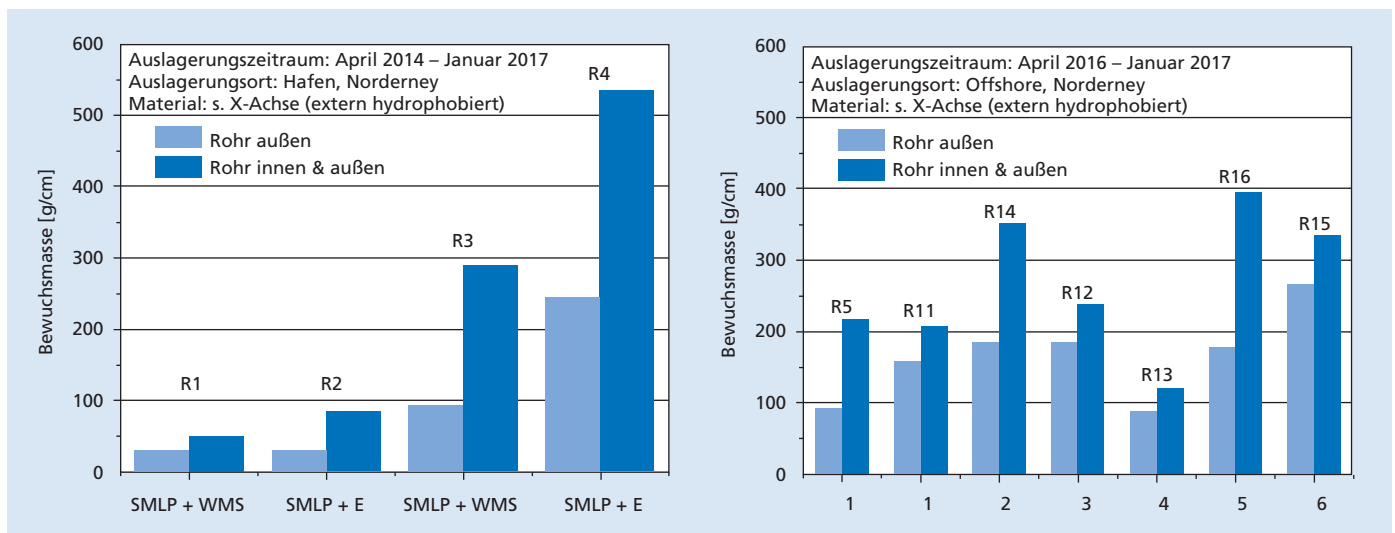


Bild 3: Bewuchsmasse der ausgelagerten Rohre. Links: Hafen-Bereich; rechts: Offshore-Bereich

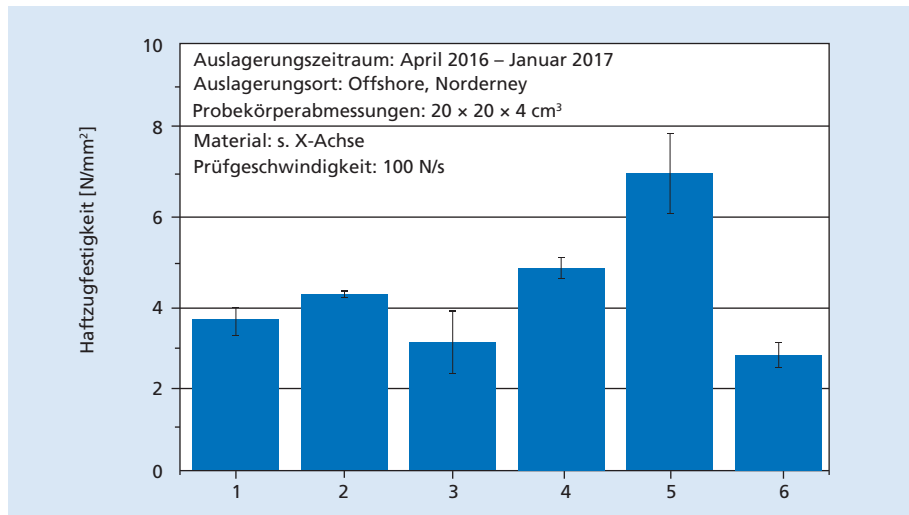


Bild 4: Zusammenstellung der Ergebnisse des tiefengestaffelten Haftzugs an Platten, die über 9 Monate am Hafen auf Norderney ausgelagert wurden

- Die Bewuchsmenge kann selbst für qualitative Aussagen nicht herangezogen werden, da Faktoren wie Sonneneinstrahlung, Wasserstand sowie Vogelfraß zu große Unwägbarkeiten einbringen.
- Alle Mörtelmischungen weisen nach einer Auslagerung im Offshore-Bereich ausreichende Haftzugfestigkeiten (> 1,5 N/mm²) auf und zeigen keine Beschädigung der Oberfläche.
- Mischung 4 ist sowohl im Labor als auch bei der Auslagerung unter realen Bedingungen am besten für die Anwendung geeignet. In Bezug auf die Rissbildung setzt sich dieses Material positiv von den anderen ab.

Im nächsten Untersuchungsabschnitt werden noch weitere ausgelagerte Probekörper untersucht. Es gilt hier, ggf. zeitliche Veränderungen der Mörtleigenschaften sowie der Matrix- und Grenzschichtintegrität zu untersuchen, um nach längerer Auslagerung aussagekräftigere Ergebnisse zu ermöglichen.

Danksagung

Dieser Beitrag ist Teil des wissenschaftlichen Ergebnisses des Forschungsvorhabens FOULPROTECT „Bewuchsschutz und Vermeidung von Biokorrosion in der Maritimen Technik“ (Förderkennzeichen: 03SX370), das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wurde. Die Autoren bedanken sich insbesondere bei der Firma Limnomar und den weiteren Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit.

Literatur

- [1] Watermann, B.; Daehne, D.; Förle, C.; Thomsen, A.: Sicherung der Verlässlichkeit der Antifouling-Expositionsschätzung im Rahmen des EU-Biozid-Zulassungsverfahrens auf Basis der aktuellen Situation in deutschen Binnengewässern für die Verwendungsphase im Bereich Sportboothäfen. Texte UBA 68/2015, S. 135
- [2] Kocks H.-J.; Joens, C. Reekers: Ummantelungen aus Faser-Zement-Mörtel. bbr 48 (1997) H. 8, S. 32–38
- [3] <http://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Siegen/Klima/> abgerufen am 24.08.2017

BAUSTOFF LEBEN

Weil uns die Begeisterung und Leidenschaft für unsere Produkte Zement und Beton antreibt.

SCHWENK Zement KG | Hindenburgring 15 | 89077 Ulm | www.schwenk.de

 **SCHWENK**