

Deutsche Bundesstiftung Umwelt, AZ 26280-23

Entwicklung eines Verfahrens zum Schutz von Holzpfählen gegen *Teredo navalis*

- Zwischenbericht September 2010 -



Antragssteller:

TAI GmbH
Taucher-, Atemschutz- und Industriearbeiten

Am Hünengrab 5
16928 Falkenhagen
Telefon (0333986)28993
info@tai-gmbh.de

Kooperationspartner:

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Institut für Umweltingenieurwesen
Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke

Justus-von-Liebig-Weg 6, LAGII
18059 Rostock
Telefon (0381) 498-3701
Telefax (0381) 498-3702
fokke.saathoff@uni-rostock.de

Henry Behrends
bremenports GmbH & Co. KG

Elbinger Platz 1
27570 Bremerhaven
Telefon (0471) 309 01-100

INSTITUT FÜR UMWELTINGENIEURWESEN (UIW)

Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke | Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff
Universität Rostock | Justus-von-Liebig-Weg 6, Haus LAG II | D 18059 Rostock | www.auf.uni-rostock.de/uiw/iw

Zwischenbericht zum DBU-Projekt

Thema: Entwicklung eines Verfahrens zum Schutz von Holzpfehlen gegen *Teredo navalis*

Aktenzeichen: 26280 -23

Projektlaufzeit: 01.06.2008 - 31.12.2010 (vorläufig)

Ort, Datum: Rostock, 29.09.2010

Bearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

Universität Rostock

Institut für Umweltingenieurwesen

Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke

M.Sc. Maria Spittel

Universität Rostock

Institut für Umweltingenieurwesen

Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke

Dr.-Ing. Christian Dede

Universität Rostock

Institut für Umweltingenieurwesen

Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke

Christian Hinkerohe

TAI GmbH

Taucher-, Atemschutz- und Industrierarbeiten

.....
Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

.....
M.Sc. Maria Spittel

.....
Christian Hinkerohe

INSTITUT FÜR UMWELTINGENIEURWESEN (UIW)

Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke | Prof. Dr.-Ing. Fokke Saathoff

Universität Rostock | Justus-von-Liebig-Weg 6, Haus LAG II | D 18059 Rostock | www.auf.uni-rostock.de/uiw/iw

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
1 Einführung	2
1.1 Problemstellung und Stand der Wissenschaft.....	2
1.2 Projektziel	6
1.3 Projektpartner	7
1.3.1 Antragsteller - TAI GmbH	7
1.3.2 Projektpartner - Universität Rostock	7
1.3.3 Projektpartner - bremenports GmbH & Co. KG	8
2 Schiffsbohrwurm - <i>Teredo navalis</i>	9
2.1 Lebensweise der Holzbohrmuschel	9
3 Untersuchungen und Entwicklungen	11
3.1 Untersuchungsprogramm und Methodik	11
3.2 Durchgeführte Untersuchungen	11
3.3 Unterwasserreinigung - Stand der Technik.....	13
3.4 Konstruktionsideen einer Pfahlreinigungsmaschine.....	15
3.4.1 Hydraulische Verfahren	15
3.4.1.1. Vorversuche im Hafen Hohe Düne	15
3.4.1.2. Hydraulisches Reinigungsgerät.....	15
3.4.1.3. Hochdruckdüsenring (Wasserhochdruck).....	17
3.4.1.3. Reinigung durch Strömung nach dem Mammutpumpenprinzip.....	18
3.4.1.4. Mechanische Reinigungsverfahren	20
3.4.2.1. Bürstenhülse.....	20
3.4.2.2. Rundumlaufende Walzenbürste	21
3.4.2.3. Strumpfschälung.....	22
3.4.2.4. Schälmanschette	23

3.5	Prototyp einer Pfahlreinigungsmaschine.....	25
3.5.1	Prototyp	25
3.5.2	Antriebstechnik	28
	3.5.2.1. <i>Diskutierte Motorentypen</i>	28
	3.5.2.2 <i>Hydraulikantrieb des Prototyps</i>	29
3.6	Wahl des Geotextils	31
3.7	Laboruntersuchungen - Terrafix 609 – 6-17 dtex.....	31
3.7.1	Untersuchungen zur Bewertung der Wirksamkeit.....	31
	3.7.1.1 <i>Flächengewicht nach DIN EN ISO 9864 und Dicke unter 2 kPa nach DIN EN ISO 9863-1 ...</i>	31
	3.7.1.2 <i>Charakteristische Öffnungsweite O_{90} nach DIN EN ISO 12956</i>	32
3.7.2	Untersuchung der Dauerhaftigkeit - Mechanische Kennwerte.....	32
	3.7.2.1 <i>Zugversuch nach DIN EN ISO 10319</i>	33
	3.7.2.2 <i>Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch) nach DIN EN ISO 13433</i>	33
	3.7.2.3 <i>Witterungsbeständigkeit nach DIN EN 12224</i>	33
	3.7.2.4 <i>Wasserdurchlässigkeit normal zur Geotextilebene ohne Auflast DIN EN ISO 11058</i>	35
3.7.3	Untersuchung der ökologischen Unbedenklichkeit.....	35
	3.7.3.1 <i>Umwelttoxikologie</i>	35
3.8	Vorrichtung zur Montage der geotextilen Schutzhülle.....	37
3.8.1	Montagekasten aus Blech	37
3.8.2	Montagekasten aus Blech und Geogittern.....	38
3.8.3	Vliesstoffmontage mit Halteklammern	39
3.8.4	Vliesstoffmontage mit Kassettensegmenten.....	40
3.9	Versuchsfeld Bremerhaven.....	41
4	Zusammenfassung	42
	Literaturverzeichnis	44
	Internetverzeichnis	45

Abbildungsverzeichnis..... 46

Tabellenverzeichnis..... 47

Anhang

Anhang A: Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Anhang B: CAD – Konstruktionszeichnungen

Anhang C: Zeitplan

Abstract

Konstruktionen des Küstenwasserbaus müssen zahlreichen Beanspruchungen widerstehen können: Wasserstandsschwankungen, Wind, Wellen, Strömungen und Eis. Im Fall von Holzkonstruktionen müssen zusätzliche biologische Beanspruchungen berücksichtigt werden. Von besonderer Bedeutung ist die Bohrmuschel *Teredo navalis*, die an wasserbaulichen Holzkonstruktionen in Deutschland jährlich Schäden in Millionenhöhe erzeugt. Weltweit betragen die entsprechenden Schäden viele Milliarden €/a. Bislang erprobte Verfahren zum Schutz der Hölzer sind häufig nur eingeschränkt wirksam, ökologisch bedenklich und mit hohen Kosten verbunden. An der Universität Rostock wurden seit 2000 Untersuchungen durchgeführt, die zur Entwicklung eines wirtschaftlich und ökologisch vorteilhaften Verfahrens zum Schutz von neuinstallierten Holzpfählen im Küstenwasserbau führten.

Im Dezember 2007 wurde bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) dieses Forschungs- und Entwicklungsvorhaben beantragt. Das Vorhaben wurde mit Schreiben vom 15.04.2008 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt bewilligt, die Forschungsarbeiten wurden nach organisatorischem Vorlauf im Juni 2008 aufgenommen. Federführung sowie technische Beratung und Ausführung der Feldarbeiten liegen bei der TAI GmbH (Taucher-, Atemschutz- und Industrierarbeiten). Die wissenschaftliche Leitung liegt beim Projektpartner Universität Rostock, Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke unter Leitung von Prof. Dr. Fokke Saathoff. Als weiterer Projektpartner konnte bremenports GmbH & Co. KG, die als Hafenbehörde stellvertretend für die durch das *Teredo*-Problem betroffenen Verwaltungen stehen, für das Projekt gewonnen werden.

In dem vorliegenden Zwischenbericht wird das FuE-Vorhaben vorgestellt, als dessen Ergebnis auch bereits installierte Pfähle wirksam, umweltfreundlich und kostengünstig geschützt werden können. Die Konstruktionsideen sowie einige Entwürfe bis hin zur Entwicklung des Prototyps einer Pfahlreinigungsmaschine werden im Zwischenbericht detailliert dargelegt. Desweiteren werden ausgewählte Methoden zur Montage des Geotextils am Pfahl vorgestellt. Ausgewählte Laborergebnisse, welche größtenteils im geotechnischen Labor des Lehrstuhls für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke durchgeführt wurden, werden vorgestellt und mit Bezug zum Schutz gegen *Teredo navalis* ausgewertet.

Aufgrund technischer Schwierigkeiten in der Konstruktion und Fertigung der Pfahlreinigungsmaschine konnte das Projekt nicht plangemäß durchgeführt werden. Der derzeitige Entwicklungsstand erfordert eine Verlängerung der Projektlaufzeit, um gegebene technische Fragestellungen zu lösen. In einer möglichen Fortführung des Projektes ist die praxisnahe Erprobung der Pfahlreinigung sowie der Vliesummantelung geplant. Die Fortführung und die damit verbundene Weiterentwicklung des Verfahrens sind seitens der Projektpartner gewünscht.

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Stand der Wissenschaft

Hölzerne Konstruktionen haben im Wasserbau eine lange Tradition. Typische Beispiele sind Dalben, Steganlagen oder Schleusentore. Erfahrungen zeigen, dass Holzkonstruktionen im Vergleich zu Stahl- oder Betonkonstruktionen eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen Sandschliff aufweisen.

Dagegen stellt Schädlingsbefall eine ernsthafte Einschränkung der Verwendung von Holz im Wasserbau dar. An erster Stelle ist hier die Bohrmuschel *Teredo navalis* zu nennen, die ursprünglich aus den Indo-Pazifischen Ozeanen stammt, mittlerweile aber weltweit auftritt.



Das Wasser der westlichen Ostsee hat im Vergleich zu Standard-Ozeanbedingungen eine deutlich reduzierte Salinität (ca. 10 – 15 g/l im Vergleich zu 35 g/l). Unter diesen Bedingungen war *Teredo* nicht fortpflanzungsfähig und das Problem blieb in den vergangenen Jahrhunderten auf gelegentliche Invasionen in Intervallen von einigen Jahrzehnten beschränkt. Seit Beginn der 1990er Jahre hat sich die Muschel jedoch an die Brackwasserbedingungen angepasst.

Abbildung 1: Aktuelle Zerstörungen an hölzernen Pfahlbuhnen an der Ostseeküste in Kühlungsborn (Foto: Ulf Böttcher)

Das Schadenspotential der auch als Schiffsbohrwurm bezeichneten Muschel ist seit dem Altertum bekannt. Auch in der heutigen Zeit werden jedoch enorme Schäden durch *Teredo navalis* verursacht. An den deutschen Küsten werden vor allem Weichholz-Konstruktionen (z.B. Kiefer) befallen und in kurzer Zeit zerstört (Abb. 1). In der letzten Zeit sind jedoch in zunehmendem Maße auch Harthölzer (z.B. Eiche) betroffen.

An Holzpfahlbuhnen an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern wurden z.B. in den letzten Jahren aufgrund solcher Zerstörungen Ersatzbauten in zweistelliger Millionenhöhe erforderlich und dies obwohl *Teredo* in dem brackigen Milieu der Ostsee keine optimalen Lebensbedingungen findet. Ein um ein vielfaches aggressiveres Auftreten der Muschel ist z.B. aus dem Bereich der nördlichen Adria bekannt. Von Schäden an hölzernen Strukturen im Wasserbau wird jedoch auch aus Portugal und den Niederlanden berichtet. In den USA wird der jährlich durch *Teredo* verursachte Schaden auf mehrere Milliarden Dollar geschätzt. In Abhängigkeit von

Temperatur und Salzgehalt entwickeln die Schiffsbohrmuscheln eine hohe Aktivität, sodass z.B. Holzstämmen von 30 cm Durchmesser innerhalb eines Jahres vollständig zerstört werden können.

Aufgrund der hohen Schadenssummen wurden verschiedene Verfahren zur Schadensvermeidung entwickelt und erprobt. Bisher untersuchte und erprobte Verfahren zum Schutz von Holz im Wasserbau konzentrieren sich im Wesentlichen auf folgende Ansätze:

- 1) Der Einsatz von Tropenhölzern stellt den bislang Erfolg versprechendsten Ansatz im Kampf gegen *Teredo* dar. Diese Methode ist grundsätzlich praktikabel, zeichnet sich jedoch durch eine Reihe von Nachteilen aus: Tropenholz ist vergleichsweise teuer, der Preis liegt ca. um den Faktor drei über den sonst meist eingesetzten Kiefernstämmen. Ein weiterer Schwachpunkt liegt in der Problematik der Verwendung von Tropenholz unter ökologischen Gesichtspunkten und dem sich daraus ergebenden Akzeptanzproblem. In Gebieten mit extrem aggressivem Auftreten von *Teredo* erscheinen auch Tropenhölzer nicht zuverlässig bohrmuschelresistent.
- 2) Die Verwendung von Pfählen aus nicht-hölzernen Materialien weist verschiedene Nachteile auf. Stahl und Beton haben im Brandungsbereich erhebliche Nachteile hinsichtlich der Empfindlichkeit gegen Sandschliff. Der Einsatz von Kunststoffpfählen ist bisher über das Versuchsstadium (mit wenig erfolgversprechenden Ergebnissen) nicht entwickelt. Die Kosten für derartige Pfähle liegen im gleichen Bereich wie Tropenholzpfähle. Weiterhin problematisch ist bisher die schlechte Rammpbarkeit des Materials.
- 3) Imprägnierungen mit verschiedenen Chemikalien (organische Verbindungen, Schwermetallverbindungen) weisen entweder nur eine zeitlich beschränkte Wirksamkeit auf (Auslaugung) und/ oder haben ökologisch bedenkliche Nebenwirkungen.

Im Rahmen eines Untersuchungsprogramms des Lehrstuhls für Wasserbau der Universität Rostock wurde deshalb untersucht, inwieweit ein Überzug aus Vliesstoff mit geeigneter Dicke und charakteristischer Öffnungsweite den Zutritt von *Teredo* zu Holzpfählen bereits in seinem pelagischen Larvenstadium unterbinden kann. Zu diesem Zweck musste ein geeigneter Geokunststoff ausgewählt und ein Montageverfahren entwickelt werden. Hohe Anforderungen an die Robustheit des Materials ergaben sich aus den Einbaubeanspruchungen sowie bezüglich der Dauerhaftigkeit unter den Beanspruchungen am Bühnenpfahl (Sandschliff, Eis, brechende Wellen). Erste Vorversuche zur Montage eines derartigen Überzugs wurden bereits auf der Second European Geosynthetic Conference in Bologna (Dede & Kohlhasse, 2000) vorgestellt. Im Rahmen eines Langzeit-Feldversuchs an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns konnte schließlich die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit des erprobten Verfahrens nachgewiesen werden (Dede & Kohlhasse, 2007).

Im Frühjahr 2000 wurde eine größere Zahl von Pfählen in dem am schwersten durch *Teredo* betroffenen

Küstenabschnitt Mecklenburg-Vorpommerns installiert (Kühlungsborn / Heiligendamm). Dieser Küstenabschnitt besteht im Wesentlichen aus halbfestem Geschiebemergel, der Einbau wurde dadurch schwierig, war aber schließlich erfolgreich. Die Pfähle wurden paarweise installiert, jeweils ein Kiefernpfahl nach oben beschriebenen Schema überzogen, sowie ein unbehandelter Referenzpfahl. Die Pfähle wurden in unterschiedliche Wassertiefen eingebaut, zwischen 0,5 m und 3,0 m. Innerhalb einer Zeitspanne von nur wenigen Wochen wurde das Geotextil intensiv durch Pflanzen und Tiere besiedelt (Dede & Kohlhasse, 2007). Nach einigen Monaten konnten die überzogenen Pfähle kaum noch von den unbehandelten Referenzpfählen unterschieden werden (Abb. 2). Diese Beobachtung ist von Relevanz, da Vorbehalte gegen das neue Verfahren wesentlich auf optische Beeinträchtigungen der durch Touristen intensiv genutzten Strandabschnitte abhoben.

Im Herbst 2006 wurden die geotextilen Umhüllungen geöffnet und beprobt. Zunächst wurden der Bewuchs der Pfähle und anschließend die Rinde des unbehandelten Pfahls entfernt und der Befall durch *Teredo* wurde sichtbar. Danach wurde die Schutzhülle aufgeschnitten und die Holzoberfläche mittels Beil freigelegt. Das Kiefernholz war offensichtlich frei von Befall (Abb. 4). Die Fotos belegen deutlich die Wirksamkeit des Konzepts der geotextilen Schutzhülle für Holzkonstruktionen im Wasserbau. Der robuste, mechanisch verfestigte Vliesstoff zeigte keine Anzeichen von mechanischer Zerstörung oder von Verwitterung. Die dicke Bewuchsschicht stellte zusätzlich einen wirksamen Schutz gegen Wellen, Strömungen und Sandschliff dar. Neben der Wirksamkeit und den geringen Kosten des Verfahrens gibt es einen weiteren Aspekt, der für die Anwendung des neuen Konzepts spricht: Während der regelmäßigen Kontrollen sowie der abschließenden Probenahme wurde festgestellt, dass auch die zur Zeit standardmäßig eingebauten Pfähle aus Tropenholz durch *Teredo* befallen waren, wenn auch in geringerem Ausmaß als die ungeschützten Kiefernpfähle (Abb. 5). Dieser Befund bedeutet, dass das Konzept der geotextilen Schutzhülle möglicherweise nicht ein Verfahren, sondern das einzige Verfahren überhaupt darstellt, das *Teredo*-Problem bei vertretbaren Kosten zu bewältigen.

Mechanisch verfestigte Vliesstoffe sind robust, kostengünstig und chemisch weitgehend inert. Die als Rohstoffe der einzusetzenden Geotextilien verwandten Polyolefine sind chemisch außerordentlich widerstandsfähig, was sich z.B. auch im regelmäßigen Einsatz der Produkte im Deponiebau widerspiegelt, wo der Kontakt zu aggressiven Sickerwässern zu den typischen Lastfällen gehört. Die Stoffe sind frei von Nebenwirkungen auf die marine Flora und Fauna, wie auch die folgenden Bilder, die während des Langzeitversuchs nach 5 Jahren aufgenommen wurden, zeigen.

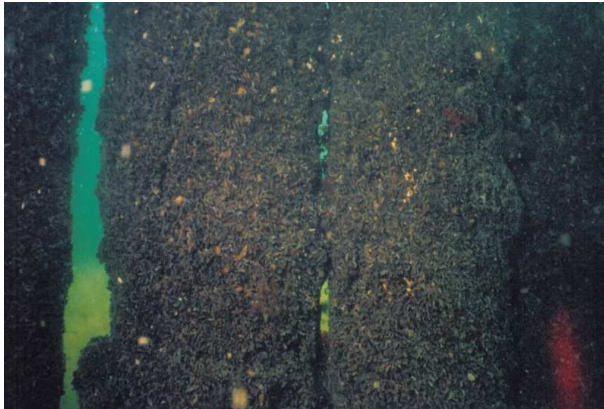


Abbildung 2: Geschützter und ungeschützter Kiefernpfahl 1 Jahr nach Installation



Abbildung 3: Pfähle nach Entfernung des Bewuchses



Abbildung 4: Geschützter Kiefernpfahl



Abbildung 5: Ungeschützter Kiefernpfahl

1.2 Projektziel

Nachdem gezeigt werden konnte, dass eine Umhüllung mit robustem PP-Vliesstoff einen zuverlässigen und dauerhaften Schutz neu installierter Pfähle gegen *Teredo* bieten kann, war Ziel des vorliegenden Projektes ein Verfahren zu entwickeln, das den nachträglichen Schutz von Hölzern in bereits bestehenden Holzkonstruktionen ermöglicht. Im Gegensatz zu Neubauten, wo notfalls auf alternative Baustoffe ausgewichen werden kann (Stahl, Beton, Kunststoff, Tropenhölzer), ist der nachträgliche Schutz von Holzkonstruktionen im Wasserbau bisher extrem aufwändig, wenn nicht unmöglich. Folgende Verfahren wurden bisher versuchsweise oder regelmäßig eingesetzt:

- Rammung einer Stahl-Spundwand vor der betroffenen Holzstruktur, hydraulische Hinterfüllung der Spundwand mit Sand;
- Aus den USA ist ein Verfahren zur Umhüllung bekannt, bei dem robuste Folien (Dicke mehrere mm, vergleichbar mit Kunststoff-Dichtungsbahnen) mit einem Wickelmechanismus um den Pfahl befestigt werden. Das Verfahren ist sehr aufwändig in der Umsetzung und damit extrem teuer.

Der hier vorgesehene Anwendungsfall, der Schutz von bestehenden Pfählen im „großen Wasserbau“, zeichnet sich durch folgende Eckdaten aus, die die Anforderungen an die vorliegende Entwicklung erläutern:

- Große Zahl von Pfählen in engen Pfahlrosten (allein in Bremerhaven stehen 20.000 – 25.000 Pfähle);
- Die Pfähle sind typischerweise mit einem Bewuchs behaftet, der Dicken von 1 – 2 dm erreicht, und vor Anbringen der Schutzhülle entfernt werden muss. Diese Entfernung des Bewuchses erfolgt nach Stand der Technik manuell mit Hochdruckreinigern, ausgeführt je Taucherguppe von 3 - 4 Personen;
- Strömungs- und Seegangseinflüsse machen den Umgang mit größeren Bahnen von Schutzhüllen schwierig und gefährlich. Nach Erfahrungen der TAI GmbH wird die Handhabung bei größeren Abschnitten nahezu unmöglich. Die damit erforderliche Stückelung der Hülle führt zu einer Verschlechterung der Ergebnisse bei gleichzeitig steigendem Montageaufwand;
- Wassertiefen und damit Pfahllängen, die sich aus den Anforderungen der Berufsschifffahrt ergeben (bis ca. 12 m);
- Die Pfahlroste sind häufig durch vorgehängte Holz- oder Stahlwände verkleidet, der Zugang für Unterwasserarbeiten kann nur durch relativ kleine, in diese Wände geschnittene Öffnungen erfolgen;
- Geringe oder keine Sicht bei den Taucherarbeiten.

Die Realisierung des in Abschnitt 3.8 „Vorrichtung zur Montage der geotextilen Schutzhülle“ beschriebenen Konzepts betritt dabei technisches Neuland, die Entwicklung ist technisch anspruchsvoll. Die Handhabung von über

20 m² großen Textilstücken im freien Wasser, bei Strömung, Seegang und geringer bis keiner Sicht, gilt als äußerst schwierig.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei erfolgreicher Entwicklung eines ökonomischen Verfahrens zur Anbringung geotextiler Schutzschichten auf bestehenden Pfahlkonstruktionen ein enormes Marktpotential gegeben ist, das jedoch im Vorfeld nicht unerhebliche technische Probleme zu lösen sind.

1.3 Projektpartner

1.3.1 Antragsteller - TAI GmbH

Die TAI GmbH tritt als ein auf Nischenbereiche spezialisiertes Unternehmen für Standard- und Spezialunterwasserarbeiten auf. Die Firma beschäftigt zwischen 2 und 6 Mitarbeiter in Abhängigkeit von der Auftragslage. Seit Bestehen der Firma konnte eine positive wirtschaftliche Entwicklung verzeichnet werden.

Das Unternehmen ist mit der *Teredo*-Problematik bereits seit seiner Gründung vertraut. Das im Rahmen des beantragten Vorhabens zur Marktreife zu entwickelnde Verfahren wurde in Zusammenarbeit zwischen der TAI GmbH und der Universität Rostock, Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke konzipiert.

Die Herstellung der zu untersuchenden Prototypen sowie deren Erprobung im Labor- / Technikumsmaßstab an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns erfolgt durch die TAI GmbH in Zusammenarbeit mit dem Labor des beantragenden Lehrstuhls. Der Beitrag der Firma TAI GmbH besteht unter anderem in Eigenleistungen in Form von Arbeitszeitaufwendungen und dem Einsatz von Technik (Aggregate, Pumpen, Tauchtechnik, usw.).

1.3.2 Projektpartner - Universität Rostock

Der Lehrstuhl Landeskulturelle Ingenieurbauwerke unter Leitung von Prof. Saathoff übernimmt innerhalb der Projektlaufzeit die koordinativen und administrativen Aufgaben. Darunter zählen folgende Aufgabenbereiche:

- Vertretung des Projektes nach außen (Berichtswesen, Tagungen);
- Zentrale Steuerungs- und Administrationsaufgaben;
- Projekthaushalt und Verwaltung sowie
- Gestaltung und Entwurf von angewandter Technik.

Desweiteren übernimmt der Lehrstuhl die Durchführung und Bewertung der im Projekt geplanten Labor- und Feldversuche. Hauptaufgabe der Universität Rostock liegt hierbei in der wissenschaftlichen Betreuung des Projektes.

Von Projektbeginn bis zum 30.11.2009 wurde das Projekt von Herrn Dr. Christian Dede betreut. Nach einer 2monatigen Projektpause übernahm Frau Maria Spittel, Absolventin des Studiengangs Landeskultur und Umweltschutz, die Koordination und weitere Betreuung des Projektes.

1.3.3 Projektpartner - bremenports GmbH & Co. KG

Bremerhaven als Hafenstandort entwickelte sich gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Als Infrastrukturdienstleister managt bremenports GmbH & Co KG seit Januar 2002 im Auftrag der Freien Hansestadt Bremen (Stadtgemeinde) die Hafengruppe Bremen/ Bremerhaven.

Dem Alter entsprechend ist ein großer Teil der auch heute noch in Betrieb befindlichen Hafenanlagen auf Holzpfähle gegründet. Holzstrukturen im Wasserbau sind grundsätzlich durch Befall durch die Schiffsbohrmuschel gefährdet. Aufgrund des geringen und schwankenden Salzgehaltes des Weserästuars blieb Bremerhaven – im Gegensatz zu etlichen anderen Häfen an der Nordsee – bisher von einem Befall durch *Teredo* verschont. Im Verlauf des letzten Jahrzehnts ist jedoch aus noch nicht vollständig geklärten Gründen ein schleichender Befall eingetreten, der für den Hafen ein erhebliches Risiko darstellen könnte.

Bremenports hat deshalb auch in den letzten Jahren bereits eine Reihe von Untersuchungen finanziell und logistisch unterstützt, die sich mit dem Umfang und der Dynamik des *Teredo*-Befalls in den eigenen Hafenanlagen befassen. Das Problem gewinnt demnach stetig an Gewicht.

Der Beitrag von bremenports besteht bei Bedarf in einem adäquat besetzten Taucherschiff, das während der Projektlaufzeit für insgesamt 9 Wochen für das Vorhaben zur Verfügung steht.

2 Schiffsbohrwurm - *Teredo navalis*

2.1 Lebensweise der Holzbohrmuschel

Teredo navalis aus der Familie der Teredinidae, ist eine wurmförmige marine Molluske, besser bekannt als Bohrmuschel oder Schiffsbohrwurm. Der Lebenszyklus des *Teredo navalis* teilt sich - wie für Muscheln typisch - in eine benthische und eine pelagische Phase. In der benthischen Phase erreicht das in seinem Fraßgang befindliche erwachsene Tier eine Größe von ca. 20 cm und ernährt sich dabei vom abgeraspelten Holz. Die pelagische Phase besteht aus einem planktonischen Larvenstadium, der sog. Veliger-Larve. Die nur ca. 90 µm großen Larven treiben ca. 2 – 3 Wochen frei im Wasser, bis sie ein geeignetes Substrat aus Holz finden. Die Larven haften dann am Holz an und es vollzieht sich die Metamorphose zum wurmförmigen Schiffsbohrwurm, womit sich der Lebenszyklus schließt (Abb. 6). An seiner Vorderseite trägt das Tier ein Paar degenerierter Muschelschalen, die als Bohrwerkzeug dienen. Das adulte Tier erreicht eine Lebenserwartung von 2 – 3 Jahren.

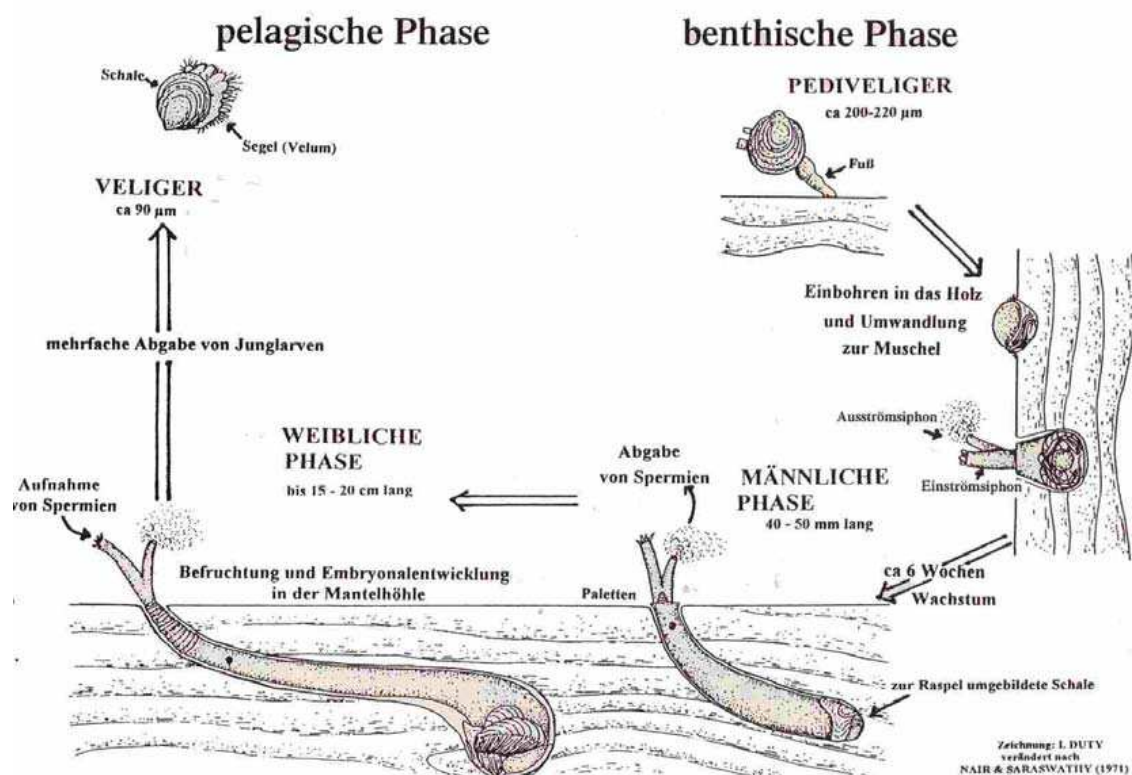


Abbildung 6: Lebenszyklus von *Teredo navalis* (Sordyl, 1998)

Die Umweltbedingungen, die für *Teredo navalis* vorherrschen müssen, sind eine Salinität von minimal 9 PSU bis maximal 35 PSU und eine Wassertemperatur von 5 – 27 °C. Für eine Vermehrung müssen die Minimalwerte jedoch um fünf erhöht werden. Schwankungen beim Sauerstoffgehalt und anderen chemischen Parametern, wie

dem pH-Wert kann *Teredo navalis* ohne größere Schwierigkeiten verkraften. Der Befall findet in der Regel überall am Holz statt. *Teredo* entwickelt eine bemerkenswerte Geschwindigkeit beim Abbau von Holz: Neue Kiefernstämmen von ca. 30 cm Durchmesser wurden innerhalb nur eines Sommers praktisch vollständig zerstört (Abb. 7). Im Bühnenbau wird inzwischen unter anderem auf widerstandfähigere Eukalyptusarten zurück gegriffen. Diese werden jedoch vor dem Befall durch *Teredo navalis* auch nicht verschont (Abb. 8).



Abbildung 7: Durch *Teredo* zerstörter Kiefernspfahl (Weichholz)



Abbildung 8: *Teredo*-Befall von *Eucalyptus rostrata* (Hartholz) (Gercken, 2008)

3 Untersuchungen und Entwicklungen

3.1 Untersuchungsprogramm und Methodik

Das beantragte Vorhaben entwickelt und erprobt eine Technologie, mit deren Hilfe die technisch funktionssichere, für die durchführenden Taucher ungefährliche und für das jeweilige Projekt wirtschaftliche Montage von Geokunststoffen an Holzpfählen ermöglicht wird. Grundlegendes Problem dabei sind die beschränkten Platz- und Sichtverhältnisse. Das bisher entwickelte Verfahren nebst zugehöriger Technologie muss diese Einschränkungen berücksichtigen.

Die Entwicklungsarbeiten waren dabei dreistufig geplant:

- 1) Entwurf und Bemessung erfolgen vorwiegend an der Universität Rostock. Begleitend eingebunden ist die TAI GmbH als Antragssteller und bremenports als weiterer Projektpartner;
- 2) Beim nächsten Schritt, der Konstruktion von Prototypen, ist die TAI GmbH federführend, während die Universität Rostock mit Laborleistungen unterstützend tätig ist. Gleiches gilt für die Erprobung im Technikumsmaßstab, die kostengünstig auf dem Firmengelände der TAI GmbH und an der mecklenburgischen Ostseeküste durchgeführt werden kann. In der beschriebenen Konstellation werden darüber hinaus gegebenenfalls erforderliche Modifikationen erarbeitet;
- 3) Die Erprobung im Feldversuch unter realen Bedingungen liegt vorwiegend in Händen von bremenports GmbH & Co. KG. Die TAI GmbH wird diesen Projektabschnitt einführend und beratend begleiten, die Koordination liegt in Händen der Universität Rostock.

3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Verfahrens zur wirtschaftlichen Umhüllung von bestehenden Holzpfählen im Wasserbau mit einem geotextilen Vliesstoff. Diese Pfähle, die typischerweise Durchmesser von 0,3 – 0,5 m und Längen bis zu 10 m aufweisen, sind durch einen häufig einige Dezimeter dicken Bewuchs gekennzeichnet, der vor Montage einer Schutzhülle entfernt werden muss.

Die antragsgemäß geplanten Entwicklungsleistungen beziehen sich deshalb auf zwei klar getrennte Technologien:

- (1) Ein Reinigungsgerät zur (halb-)automatischen Reinigung der Pfähle von ihrem Bewuchs;
- (2) Ein Montagegerät zum Anbringen der geotextilen Schutzhülle. Dabei ist zu beachten, dass die Geotextilien in Funktion der Abmessung der Pfähle erhebliche Ausmaße annehmen können und unter

den erschwerten Bedingungen eines Hafenbeckens (enge Pfahlabstände, dadurch beengter Arbeitsraum, schlechte bis keine Sicht, Wellen, Strömung) handhabbar sein müssen.

Beide Entwicklungen werden in einem identischen Verfahrensablauf bewältigt, der aus folgenden Schritten besteht:

- (1) Theoretische Vorüberlegungen, Sammlung einsetzbarer Technologien/ Verfahrensweisen
- (2) Test an Pfählen im Yachthafen Hohe Düne
- (3) Aufbau von vereinfachten Prototypen im Labor/ Werkstatt
- (4) Test an Pfählen an Land (Versuchsstand auf dem Grundstück der TAI GmbH)
- (5) Modifikation der Entwicklung
- (6) Modifikation/ Bau eines einsatzfähigen Prototypen
- (7) Erprobung unter realen Bedingungen im Nordhafen Bremerhaven, ggfs. weitere Modifikationen

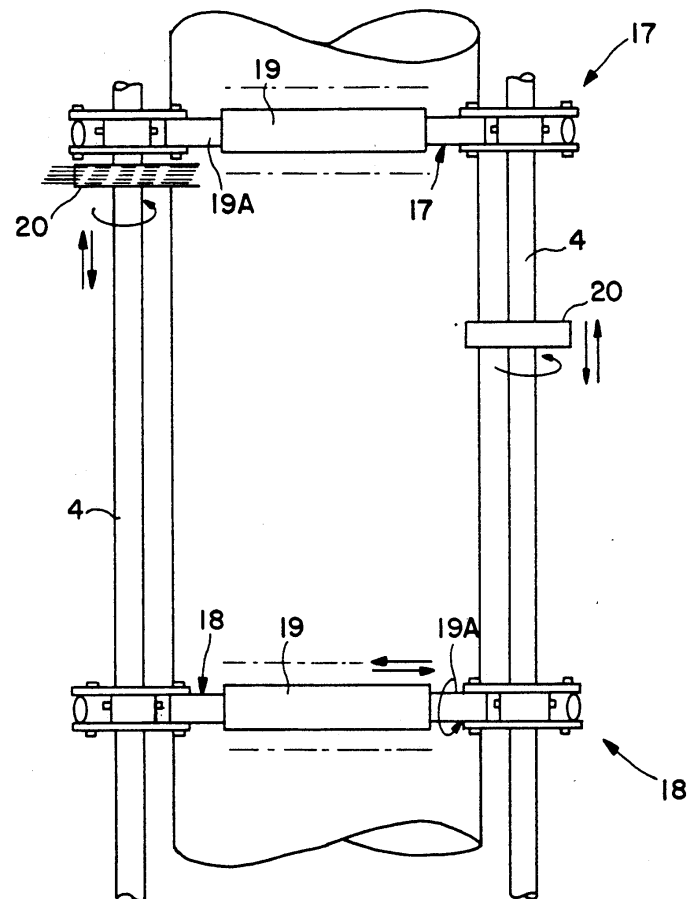
Der aktuelle Projektstand entspricht den Verfahrensschritten 6 für das Reinigungsgerät und 4/ 5 für das Montagegerät. Im Folgenden werden die durchgeführten Entwicklungsleistungen im Einzelnen erläutert.

3.3 Unterwasserreinigung - Stand der Technik

Ungewünschter Bewuchs an Unterwasserbauwerken ist jeher ein bekanntes Problem, welches zur Einschränkung der Funktionstüchtigkeit sowie zur Zerstörung von Unterwasserkonstruktionen oder -oberflächen führen kann. Es gibt bereits gängige Apparaturen und Entwicklungen zur Beseitigung von marinem Bewuchs an Schiffsrümpfen, Offshore-Windkraftanlagen und Ölplattformen.

Die Entwicklung einer solchen Apparatur zur Bekämpfung von marinem Bewuchs an küstennahen marinen Bauwerken wird in Abbildung 9 dargestellt. Das Verfahren basiert auf der Nutzung der Meereskräfte in Form von Wellenbewegungen, Gezeiten und Strömungen. Die Apparatur ist um das Bauwerk gelegt. Ein installierter büstentragender Reifen oder Ring (17; 18), der aus einer Mehrzahl von gelenkig miteinander verbundenen, den Ring bildenden Bauteilen aufgebaut ist, erzielt durch die Hin- und Herbewegung der Vorrichtung die Beseitigung des marinen Bewuchses an dem Bauwerk. An den Bauteilen ist mindestens eine Walzenbürste (19) installiert, welche um einen Bürstenschaft frei drehbar sowie an ihm entlang frei bewegbar ist.

Abbildung 9: Seitenansicht einer Apparatur zur Beseitigung von marinem Bewuchs (Damansara, 1991)



Dieses Verfahren ähnelt anderen Entwicklungen, die zur Reinigung von Offshore-Bauwerken entwickelt wurden, eignet sich allerdings aufgrund der dauerhaften Installation am Bauwerk nicht für dieses Vorhaben. Desweiteren ist die auf Tidenhub basierte Funktionsweise des Patentes aufgrund fehlender Wasserstandsänderungen nicht an Pfahlkonstruktionen in der Ostsee anwendbar. Ferner würden sie keinen Schutz vor den Befall durch *Teredo navalis* bieten.

Andere in-situ Säuberungsverfahren basieren auf dem Einsatz von handlichen Reinigungsmaschinen unter Einsatz von Tauchern. Ähnlich wie bei dem entwickelten Prototyp zur Pfahlreinigung (siehe 3.5) werden rotierende Bürsten aus Kunststoff oder Stahl hydraulisch angetrieben. Allerdings werden die Maschinen, im Vergleich zum entwickelten Verfahren, manuell gesteuert.

Aufgrund der schwierigen Arbeitsbedingungen soll ein Verfahren entwickelt werden, bei dem auf den Einsatz von Tauchern weitestgehend abgesehen werden kann. Damit verbunden, könnten Kosten und Zeit eingespart sowie das Unfallrisiko beim Einsatz von Tauchern verringert werden. In Abbildung 10 und 11 sind manuell gesteuerte Unterwasser-Reinigungsmaschinen dargestellt.

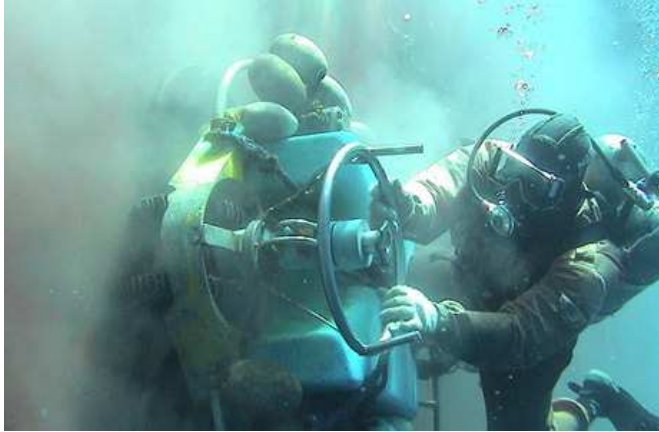


Abbildung 10: Reinigungskart mit hydraulisch angetriebenen Bürsten (AMEinfo, 2010)



Abbildung 11: Bürstenreinigungsgerät - Divex (MarineTalk, 2010)

3.4 Konstruktionsideen einer Pfahlreinigungsmaschine

3.4.1 Hydraulische Verfahren

3.4.1.1. Vorversuche im Hafen Hohe Düne

Im Rahmen von Vorversuchen im Hafen Höhe Düne im Sommer 2008 wurden Versuche zur Reinigung von Pfählen unter anderem mittels Wasserstrahl unternommen. Dabei wurden systematisch Kombinationen von Druck und Volumenstrom untersucht, um zu einer technisch und wirtschaftlich optimalen Auslegung zu kommen. Technisch zum Einsatz kamen dabei folgende Aggregate:

Tabelle 1: Aggregate zur Untersuchung des Druck- und Volumenstroms

Techn. Bezeichnung	Wasserhochdruckaggregat 750	Feuerlöschpumpe
Volumenstrom	1.050 l / h	48.000 l / h
Druck	300 bar	10 bar
Antrieb	Elektromotor 380 V, 5,5 kW	Benzinmotor

Es stellte sich heraus, dass durch Dissipation hohe Drücke sehr schnell wirkungslos werden und dass ein hoher Volumenstrom demgegenüber erheblich wirksamer ist (Abb. 12, 13).



Abbildung 12: Reinigung mit Hochdruckreiniger:
Wirksamkeit nur auf kurze Distanz

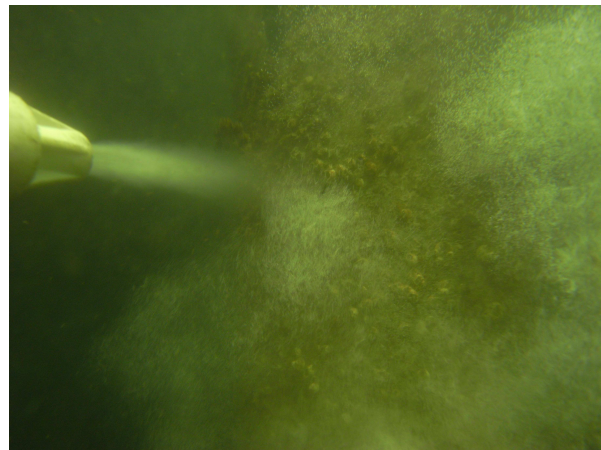


Abbildung 13: Feuerlöschpumpe ermöglicht höhere
Leistungen

3.4.1.2. Hydraulisches Reinigungsgerät

Nach den ermutigenden Ergebnissen der Vorversuche im Hafen Hohe Düne wurde beschlossen, eine automatische Reinigungsmaschine auf Basis einer Feuerlöschpumpe zu entwickeln. Die Maschine sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Automatische Anpassung an unterschiedliche Pfahldurchmesser bzw. sich im Zuge der Reinigung ändernde Pfahldurchmesser;
- Keine weiteren Aggregate erforderlich außer Feuerlöschpumpe, d.h. alle Funktionen der Maschine werden durch Wasserkraft angetrieben.

Die folgende Zeichnung zeigt den Entwurf einer derartigen Maschine. Die Wasserversorgung (Anschluss) der Reinigungsdüse erfolgt durch einen Feuerwehrschauch (A-Schlauch, $\varnothing = 100$ mm), der durch die Pumpe unter Druck gesetzt wird (Abb. 14).

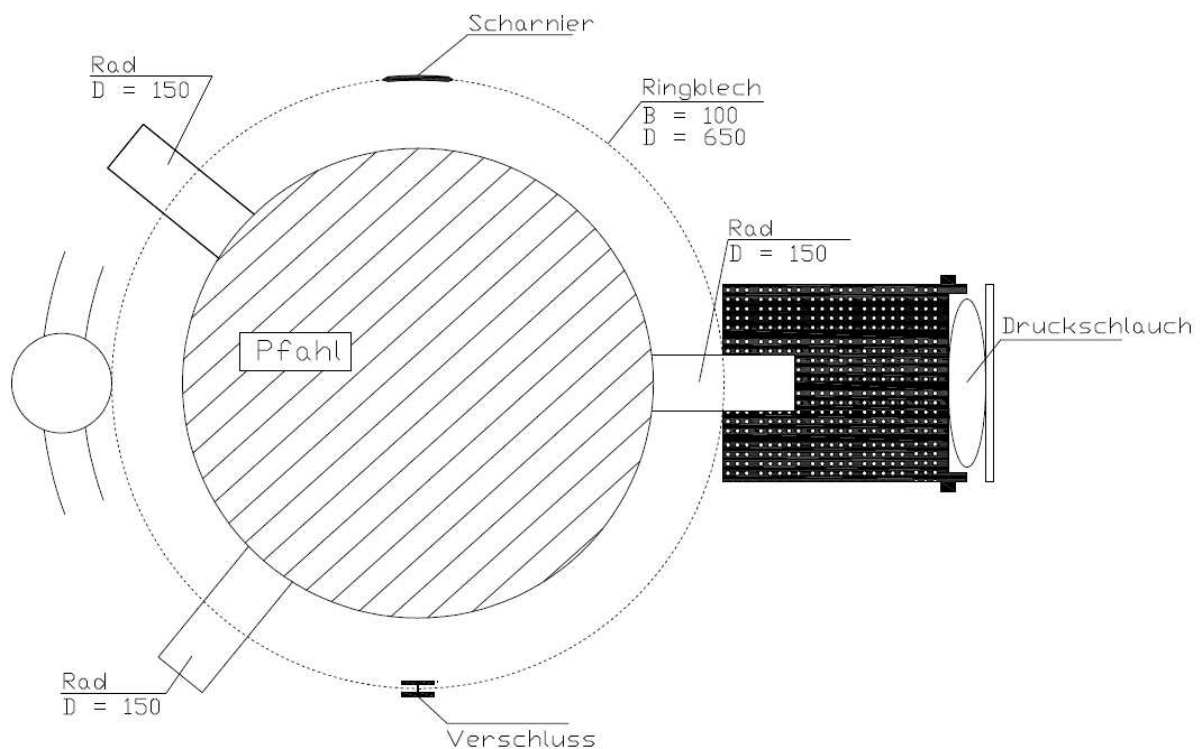


Abbildung 14: Hydraulisches Reinigungsgerät basierend auf der Feuerlöschpumpe - Draufsicht

Das Aggregat wurde letztlich nicht gebaut, da:

- Die Anpassung an unterschiedliche Pfahldurchmesser nicht gegeben ist (Pfähle sind konisch und weisen Unebenheiten wie Astknorren auf);
- Das notwendige Mitführen eines Feuerwehrschauches (C-Schlauch) zu einer aufwendigen Steuerung der horizontalen Verschiebung geführt hätte, um zu verhindern, dass sich der Schlauch um den zu reinigenden Pfahl wickelt;
- Da durch die benötigte Anzahl der Düsen, zu hohe Leistungsverluste entstehen würden;
- Auch mit diesem Ansatz die Freilegung des Pfahls am Grund nicht realisiert werden konnte.

3.4.1.3. Hochdruckdüsenring (Wasserhochdruck)

Der Hochdruckdüsenring beruht auf dem Prinzip der hydraulischen Hochdruckreinigung. Zu diesem Entwurf wurde ein Prototyp erstellt. Vier Rohre von 6,5 cm Durchmesser und werden mit einer Eckschraubverbindung zu einem Quadrat (Seitenlänge = 73 cm) miteinander verbunden sowie von einer Seite mit einem Wasseranschluss versehen (Abb. 15). Drei Innenseiten der Rohre sind mit sechs bis sieben Öffnungen ($\varnothing < 5$ mm) versehen, welche der Hochdruckreinigung dienen sollen. Pilottests ergaben, dass der Wasserdruck, der sich auf den Rohrkranz verteilt, durch zu hohe Druckverluste für eine gewünschte Reinigung der Pfähle nicht ausreichend ist. Desweiteren ist nur auf kurze Distanz ein Reinigungserfolg zu verzeichnen, welcher einen geringen Abstand zwischen Düsen und Pfahl erfordert, allerdings technisch schwer handhabbar ist. Eine weitere Problematik stellt die fehlende Möglichkeit des Freilegens des Pfahles auf eine Tiefe von 20 cm dar. Aus diesen Gründen wurde von einer Weiterentwicklung dieses Prototyps abgesehen.



Abbildung 15: Prototyp - Hochdruckdüsenring

3.4.1.3. Reinigung durch Strömung nach dem Mammutpumpenprinzip

Ein nächster Entwurf, der ebenfalls auf dem Prinzip der hydraulischen Reinigung mit großen Strömungsgeschwindigkeiten / Volumenströmen beruht, wurde theoretisch und technikmäßig untersucht. Das Mammutpumpenprinzip (auch: Injektorverfahren, Lufthebeverfahren, Airliftverfahren) wird bei Unterwasserarbeiten relativ häufig zum Pumpen von Sediment bis hin zur Kiesgröße verwendet. Das Mammutpumpenprinzip beruht auf dem Druckausgleich miteinander verbundener Flüssigkeitssäulen. Durch Einblasen von Luft wird die Flüssigkeitssäule in der Steigleitung (hier: Ringraum zwischen Pfahl und Kunststoffhülle) leichter gemacht, je nach Luftanteil wird die Dichte auf ca. 0,3 reduziert. Die nun relativ schwerere Flüssigkeitssäule im umgebenen freien Wasser mit einer Dichte von ca. 1,0 drückt die durch Luft erleichterte Flüssigkeit in der Steigleitung nach oben, da sie die

Druckdifferenz ausgleichen will. Da ständig Luft zugeführt wird, kommt es zu einer kontinuierlichen Förderung.

Der Vorteil des Verfahrens besteht im Wesentlichen darin, dass unter Wasser keinerlei bewegliche Teile von Nöten sind, und das Verfahren damit technisch sehr robust ist.

Abbildung 16 zeigt einen ersten kleinmaßstäbigen Entwurf eines Reinigungsgerätes auf Basis des Mammutpumpenprinzips. Ein weiter zu entwickelnder Ansatz war, um den Pfahl herum eine Hülle aus HDPE¹ (aus Teilen von Kunststoff-Schuttrutschen, zu öffnen über senkrechte Scharnierbänder) aufzubauen, an deren unterem Ende ein ringförmiger Injektor aus einer Anzahl von Düsen Pressluft einbläst.



Abbildung 16: Entwurf – HDPE-Kunststoffummantelung mit Auftriebskörper

Auch diese Überlegung wurde verworfen. Wesentliche Gründe dafür waren:

- Um eine wirksame Strömungsgeschwindigkeit im Ringraum zu erzielen, die den Verhältnissen der Vorversuche im Yachthafen Hohe Düne entsprechen, ist es zwingend erforderlich, den durchströmten Querschnitt möglichst gering zu halten ($v = Q/A$). Nach Berechnungen der Querschnittsfläche zwischen

¹ HDPE bedeutet High Density Polyethylen also Polyethylen hoher Dichte.

Pfahl und umhüllendem Kunststoffrohr ist bereits eine Ringraumdicke von nur 5 cm als Grenze der Gebrauchstauglichkeit des Verfahrens zu bewerten. Es erschien fraglich bis unmöglich, diese Randbedingung unter den Bedingungen wechselnder Pfahldurchmesser sicher zu stellen.

- Nach Tholen kann der Luftbedarfs beim Lufthebeverfahren nach folgender Nährungsformel errechnet werden:

$$Q_L = 500 \times A, \text{ mit}$$

$$Q_L \text{ in m}^3/\text{min} \text{ und } A \text{ in m}^2$$

Tabelle 2: Luftbedarf bei Ringspaltöffnung von 5 cm, als Funktion des Pfahldurchmessers

Durchmesser Pfahl [m]	Fläche Pfahl [m ²]	Ringfläche 5 cm [m ²]	Luftbedarf [m ³ /min]
0,15	0,018	0,014	6,87
0,2	0,031	0,018	8,84
0,25	0,049	0,022	10,80
0,3	0,071	0,026	12,76
0,35	0,096	0,029	14,73
0,4	0,126	0,033	16,69
0,45	0,159	0,037	18,65
0,5	0,196	0,041	20,62

- Auf Basis dieser Faustformel ergeben sich Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 3 m/s, die für den gewünschten Reinigungseffekt zu niedrig liegen. Trotzdem übersteigt bei den gegebenen Verhältnissen (vgl. Ergebnisse in Tabelle 2) der Luftbedarf das technisch machbare, insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Ringspalt von lediglich 5 cm in der Baustellenpraxis kaum zu realisieren sein wird (konische Pfahlgebung und Pfahlunebenheiten sind zu überwinden);
- Der Einbau der erforderlichen Kunststoffhülle (aufgeschnittene Elemente von Kunststoff-Schuttrutschen) erfordert das Hantieren mit großflächigen Bauelementen (Breite bis zu 0,8 m, Länge bis zu 10 m). Nach Versuchen mit deutlich kleineren Elementen wurde erkannt, dass der Einsatz derartiger Elemente unter den Randbedingungen der geplanten Einsatzorte (begrenzte räumliche Verhältnisse, schlechte oder keine Sicht, Strömungs- und Welleneinfluss) unrealistisch ist.

3.4.1.4. Mechanische Reinigungsverfahren

3.4.2.1. Bürstenhülse

Das Prinzip der Bürstenhülse funktioniert durch Rotation der gesamten Reinigungsmaschine um den Pfahl. Der Klapprahmen besteht diesmal aus zwei mit einem Gelenk verbundenen halbkreisförmigen Stahlträgern, an denen an der Innenseite mehrere Bürstensegmente installiert sind (Abb. 17 und Abb. 18). Die Einteilung in einzeln installierte Reinigungssegmente ermöglicht die separate Auswechslung der Reinigungsbürsten bei Verschleiß.

Die Unterschiede im Pfahldurchmesser sowie die Freilegung des Pfahles am Grund auf eine Tiefe von 20 cm können durch diesen Entwurf nicht realisiert werden.

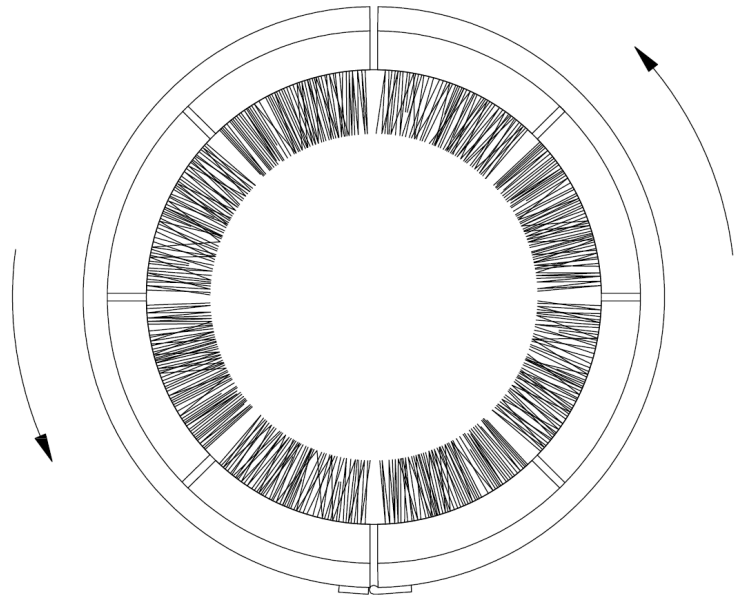


Abbildung 17: Bürstenhülse - Draufsicht

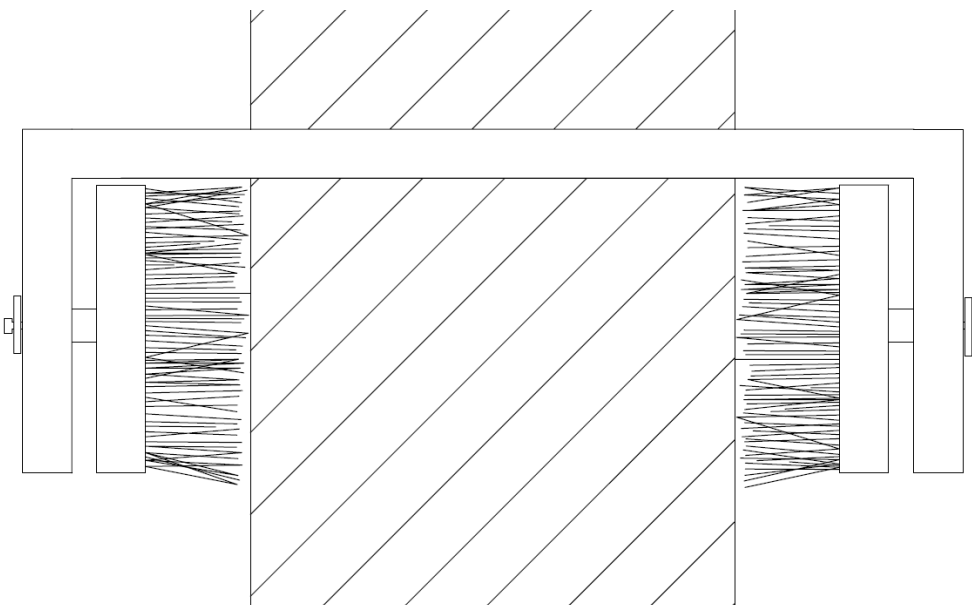
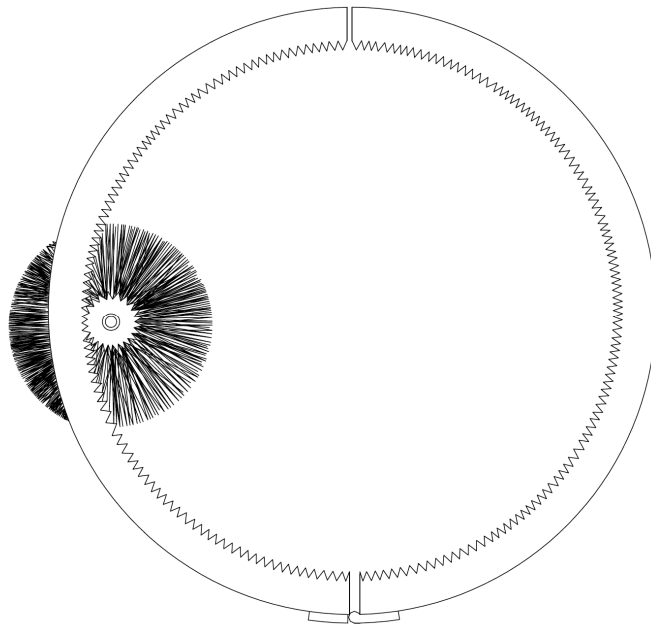


Abbildung 18: Bürstenhülse – Seitenansicht

3.4.2.2. Rundumlaufende Walzenbürste

Die rundumlaufende Walzenbürste ist zu vergleichen mit einer vertikalen Bürstenwäsche in einer Autowaschstraße. Als Klapprahmen dient, wie bei der Bürstenhülse, ein Stahlring an dessen Innenseite die Walzenbürste installiert ist (Abb. 19 und Abb. 20). Der Antrieb der Walzenbürste erfolgt hydraulisch über die Zahnräder. Somit kann



die Bürste um den Stahlring auf den Zahnrädern rotieren und den Pfahl von unerwünschten Bewuchs und Verunreinigungen befreien. Die Walzenbürste kann je nach Durchmesser und Verschmutzungsgrads des Pfahls demontiert und ausgetauscht werden. Denkbar wäre ein Sortiment an verschiedenen Bürstendurchmessern, -materialien und -härtegraden bereitzustellen, um sich auf die lokalen Arbeitsbedingungen anzupassen.

Abbildung 19: Rundumlaufende Walzenbürste - Draufsicht

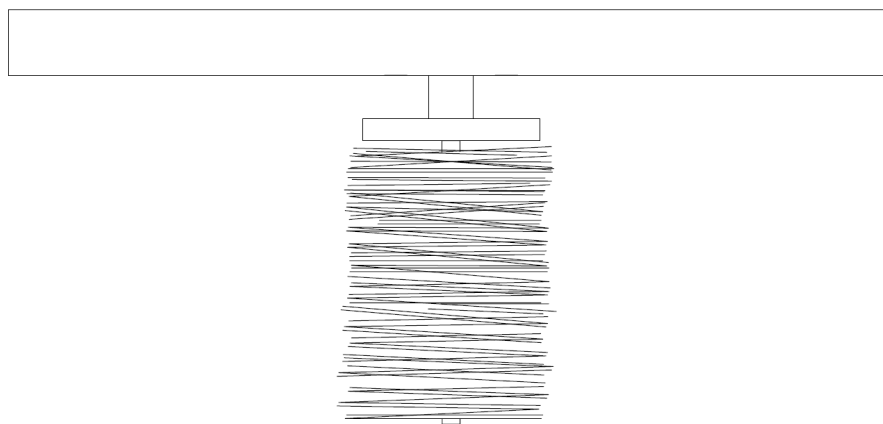


Abbildung 20: Rundumlaufende Walzenbürste - Seitenansicht

Die rundumlaufende Walzenbürste wirft die Problematik auf, dass das Gerät nicht an einen sich ändernden Pfahldurchmesser (konische Formgebung) angepasst und der benötigte Anpressdruck der Walze nicht realisiert werden kann. Hinzu kommt, dass wie schon bei den anderen Entwürfen die Freilegung des Pfahles am Grund von 20 cm mit dieser Konstruktion nicht umgesetzt werden kann. Da auch für diese technischen Infragestellungen bisher keine Lösung gefunden werden konnte, die wirtschaftlich realisierbar ist, wurde auch das Prinzip der rundumlaufenden Walzenbürste verworfen.

3.4.2.3. Strumpfschälung

Anstelle von Reinigungsbürsten wird hier das Prinzip der Schälung verfolgt. Diese Idee der Pfahlreinigung beruht auf einem Strumpf aus beispielsweise Stahlseilen, welcher um den Pfahl gelegt werden kann. Hierzu ist es erforderlich, dass das Stahlgeflecht zu einer Seite geöffnet werden kann. Der Reinigungsstrumpf ist so aufgebaut, dass die Stahlseile an einem oberen Führungsrahmen in das Wasser gelassen werden. Die Stahlseile sind außerdem mit einem oberen und unteren starren Ring verbunden. Der untere Ring ist mit Gewichten beschwert, damit der Abtrieb des Stahlgeflechtes gewährleistet ist. Das Stahlgeflecht ist vor der Montage geöffnet und wird nach herum legen um den Pfahl, mit Hilfe von einem Hülsenverschluss verriegelt. Die Stahlseile führen dann über Hülsen zu einem starren Ring und anschließend zum Führungsrahmen (Abb. 21).

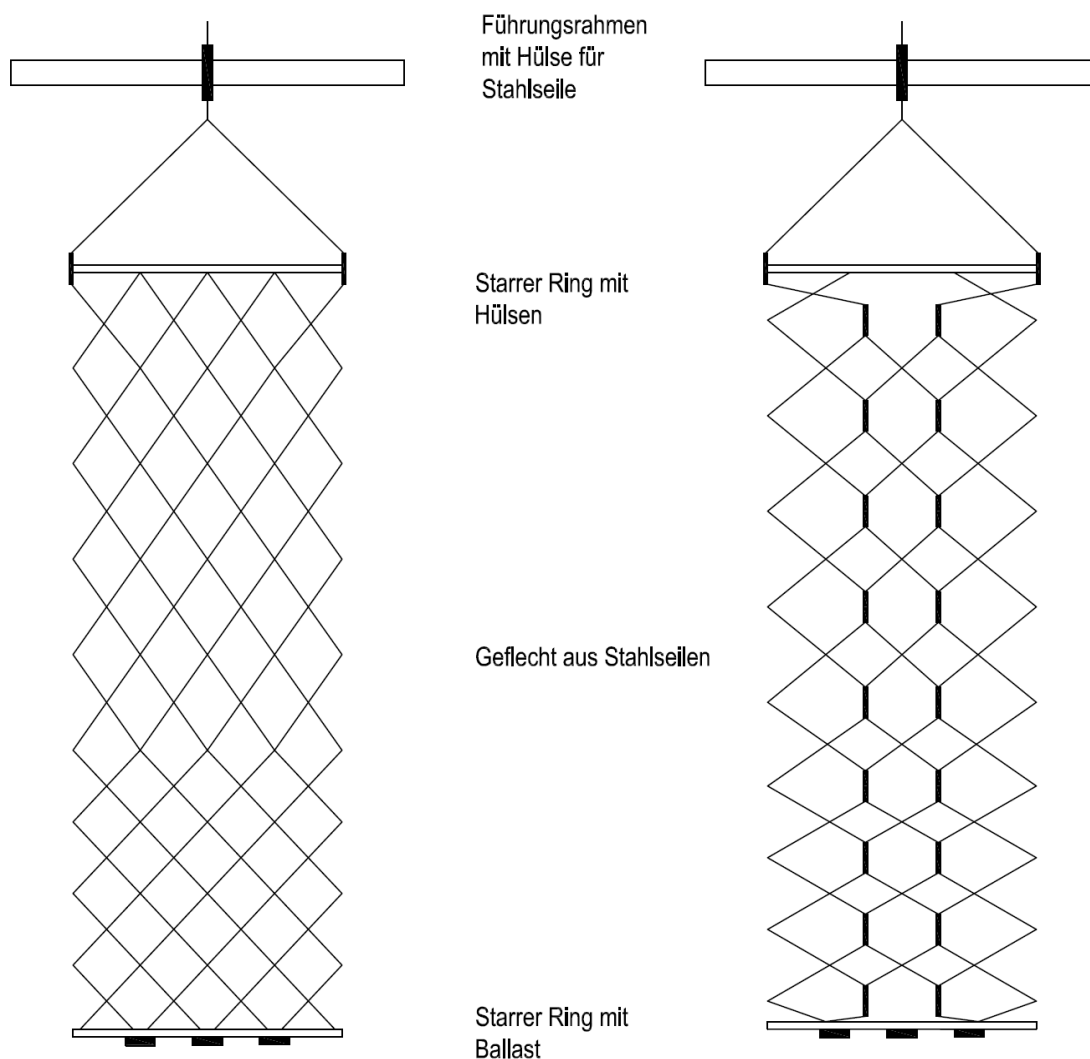


Abbildung 21: Strumpfschälung; li: Stahlgeflecht der geschlossenen Seite; re: Stahlgeflecht mit Hülsenverschluss - Seitenansicht

Vom Boot werden die Stahlseile über eine Winde hydraulisch angetrieben und das Stahlgeflecht damit zusammengezogen. Hierbei soll durch die Verengung des Geflechtes der Effekt der Schälung und der damit verbundenen Säuberung des Pfahls auftreten. Problem dieses Entwurfes ist die sehr zeitintensive Unterwasser Montage sowie das Verfangen der Stahlseile an Astknorren sowie Unebenheiten des Pfahles.

3.4.2.4. Schälmanschette

Die Schälmanschette verfolgt weiterhin das Reinigungsprinzip der Schälung. Hierbei wird der ringförmige Rahmen unten am Pfahl angelegt und an Stahlseilen, welche zum Boot oder an Land führen, am Pfahl nach oben gezogen. Der Reinigungseffekt wird durch den natürlich erzeugten Anpressdruck der Gummimanschetten am Pfahl erzeugt. Am unteren Rand der Manschetten sorgt eine Hartgummi- oder Stahlrippe für das Abschneiden der Verunreinigungen am Pfahl (Abb. 22).

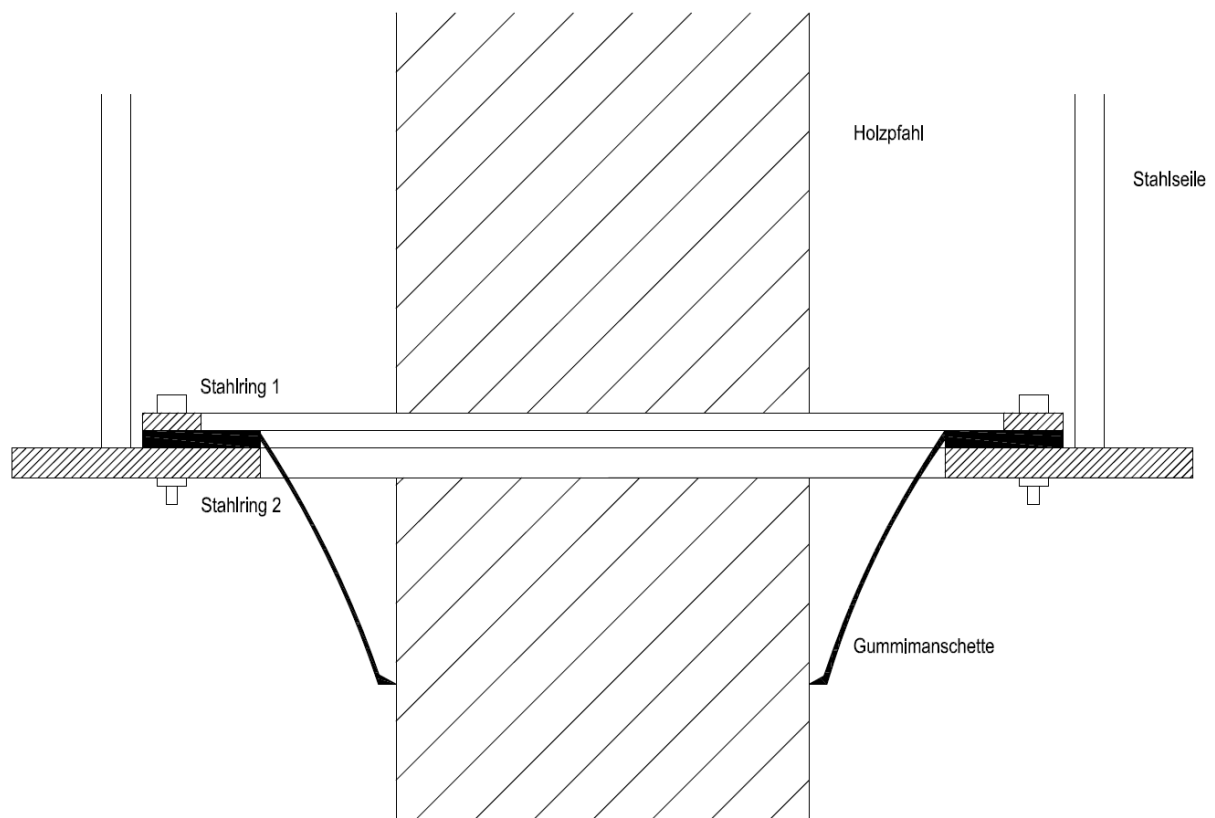


Abbildung 22: Schälmanschette - Seitenansicht

Die Gummimanschetten werden mit Stahlringen am Rahmen fixiert. Die Manschetten sind im spannungsfreien Zustand überlappend montiert, sodass bei steigendem Pfahldurchmesser und damit verbundenem steigendem Druck auf die Manschetten trotzdem eine vollständige Reinigung des gesamten Pfahls erfolgt.

Mit steigendem Pfahldurchmesser liegen die Manschetten der Ringsegmente nur noch zu den Schnittkanten hin an (Radius Segment kleiner als der des Pfahls). Durch hohen Anpressdruck gibt der Gummi jedoch nach, die Enden biegen sich und so liegt die Manschette wieder über den gesamten Teilkreis an.

Astknorren sowie starke Unebenheiten an den Pfählen machen die Anwendung dieses Entwurfes jedoch problematisch. Verkantet sich das Gerät aufgrund der Unebenheiten müsste der gesamte Rahmen unter Wasser von Tauchern demontiert werden. Da der Aufwand in diesem zu berücksichtigenden Fall aufwändig und zeitintensiv ist, wurde das Prinzip der Schälung durch Manschetten ebenfalls verworfen.

3.5 Prototyp einer Pfahlreinigungsmaschine

3.5.1 Prototyp

Die Entwicklung des hier vorgestellten Prototyps einer Reinigungsmaschine baut auf einem langen Prozess vieler Konstruktionsideen verschiedener Ansätze auf. Auf Grundlage von Erfahrungswerten, Versuchen und Recherchen wurde in enger Kooperation zwischen der TAI GmbH und der Universität Rostock eine überzeugende Reinigungsmaschine entworfen und konstruiert (CAD-Konstruktionszeichnungen; Abb. 23 und Abb. 24).

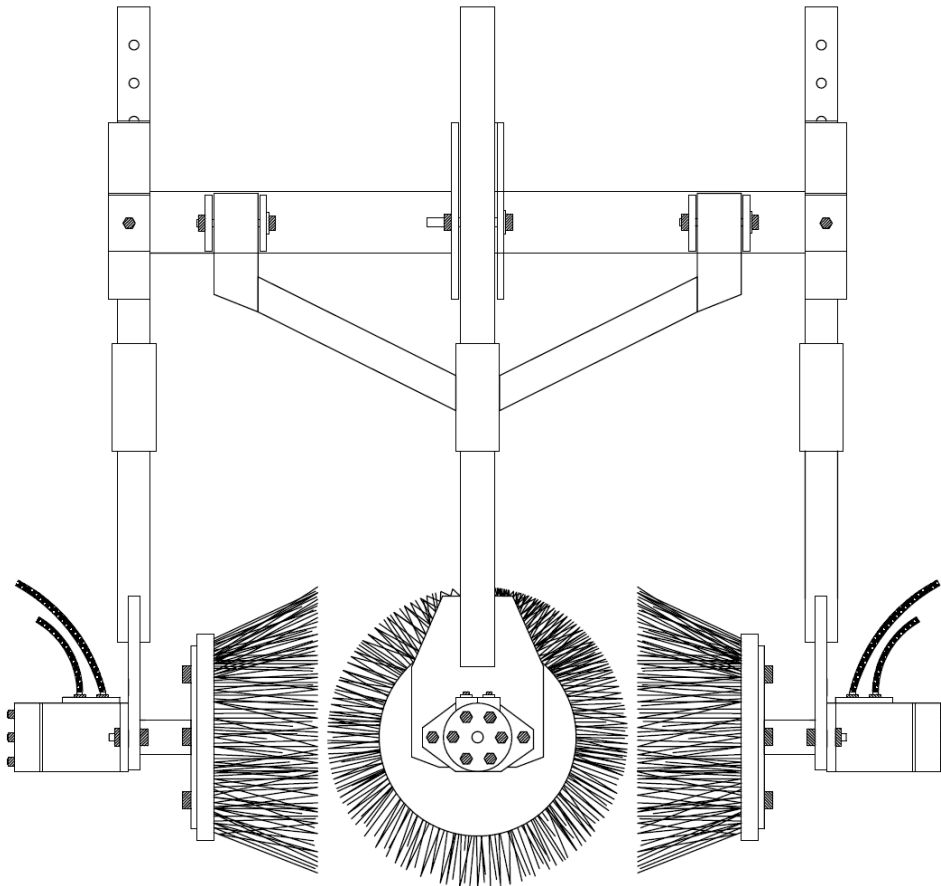


Abbildung 23: Prototyp – Seitenansicht (schematische Zeichnung)

Der Prototyp der Reinigungsmaschine liegt aktuell vor und befindet sich im Erprobungs- und Optimierungsstadium. Die gegenwärtig entwickelte Technik ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Die Maschine arbeitet nach Ansatz am Pfahl ohne Zutun eines Tauchers;
- Die tatsächlich realisierte Bauart der Reinigungsmaschine verwendet rotierende Borsten (Borstenlänge 20,00-22,00 cm), die über einen Hydraulikmotor angetrieben werden;

- Sämtliche Maschinenteile befinden sich an einem zweigeschossig aufgebauten Klapprahmen (Abb. 26). Dieser Klapprahmen wird in aufgeklapptem Zustand mit Auftriebskörpern eingeschwommen und danach um den zu reinigenden Pfahl geklappt.

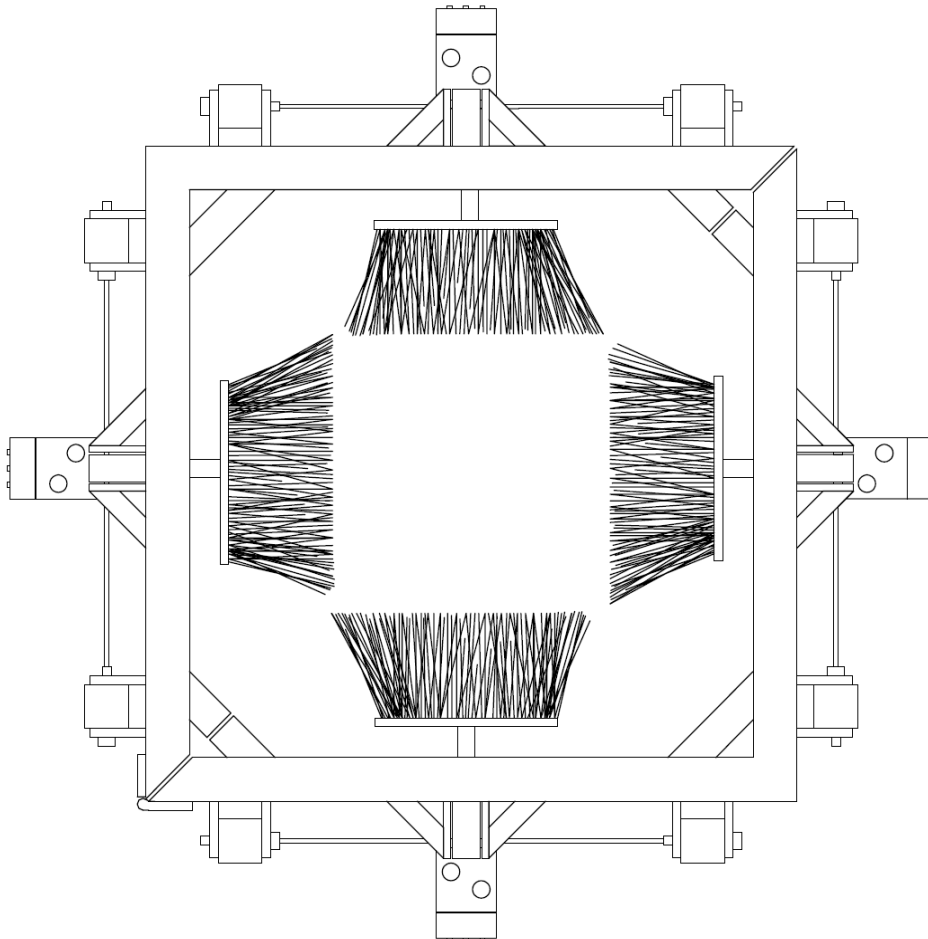


Abbildung 24: Prototyp – Draufsicht (schematische Zeichnung)

Der Prototyp zeichnet sich durch folgende wesentliche Vorteile gegenüber anderen Verfahren aus:

- Der richtungsgesteuerte Antrieb der Maschine (Links- oder Rechtslauf der Bürsten sowie vertikaler Vor- und Rücktrieb) ermöglicht eine zielgenaue und gesteuerte Reinigung des Pfahls;
- Die Bürsten können in Hinblick auf den Durchmesser des Bürstentellers, der Borstenlänge und Formgebung sowie des Borstenmaterials in verschiedenen Härtegraden in Anpassung an den Pfahldurchmesser und Verschmutzungsgrades variiert werden. Die Bürstenköpfe sind bei Verschleiß komplett austauschbar;

- Die Bürstenarme sind höhenverstellbar und beweglich gelagert. Durch diese flexible Lagerung am Pfahl können unterschiedliche Pfahldurchmesser und Unebenheiten wie Astknorren problemlos ausgeglichen werden;
- Der Anpressdruck der Bürsten ist über Gewichtsarme, welche am oberen Ende der Bürstenarme nach Montage der Maschine am Pfahl problemlos angebracht werden können. Der Anpressdruck ist darüber hinaus durch Wahl der Ballasthöhe und verstellbarer Hebelarmlänge variabel;
- Durch die Anordnung der vier Reinigungsbürsten und ihrer Gegenläufigkeit bleibt das Gerät in seiner Lage stabil, da sich die Rotationskräfte gegenseitig aufheben;
- Die Bürsten können aufgrund ihrer Formgebung bis zu 20 cm in den Grund eindringen und den Pfahl freilegen.

Die Reinigungsmaschine wurde im August 2010 an einem auf dem Gelände der TAI GmbH aufgestellten Probestpfahl montiert sowie auf seine Funktionsfähigkeit getestet (Abb. 25 und Abb. 26).

Die folgenden Zeichnungen veranschaulichen den Aufbau und die Funktionsweise der Maschine im derzeitigen Entwicklungsstand. Im Anhang B sind die Zeichnungen mit Bemaßung versehen.



Abbildung 25: Einfacher Klapprahmen am Pfahl montiert



Abbildung 26: Doppelter Klapprahmen; 2 Bürsten und Antrieb zum vertikalen Vortrieb nicht montiert

3.5.2 Antriebstechnik

3.5.2.1. Diskutierte Motorentypen

Zum einen wurde der Einsatz von Elektromotoren diskutiert. Elektromotoren sind umweltfreundlich und leistungsstark. Die Nutzung von Elektromotoren beim möglichen Einsatz von Tauchern birgt jedoch Risiken, die zu berücksichtigen sind. Kleinste technische Defekte könnten aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit von Meerwasser eine Gefährdung für den Taucher darstellen. Desweiteren sind elektrische Einheiten wartungsintensiv, Reparaturen schlecht vor Ort möglich und Voraussetzung für die Anwendung ist eine entsprechende Stromquelle. Hinzu kommt, dass die Anschaffung elektrischer Einheiten kostenintensiver als Hydraulikantriebe ist. Ein weiteres Problem bei der Anwendung von Elektromotoren ergibt sich durch die aufwändige wasserdichte Dichtung der Motoreinheit. Ein weiterer Nachteil ist, dass nur durch hohen Aufwand Drehrichtung und Leistung gesteuert werden können (aufwändiges Getriebe). Aus diesen Gründen wird von der Nutzung des elektrischen Antriebes abgesehen.

Eine weitere diskutierte Option stellt der pneumatisch angetriebene Motor dar. Diese Idee wurde aufgrund der im Arbeitsbereich an Unterwasserpfählen auftretenden Druckdifferenzen und der damit verbundenen Leistungsminde rung bzw. eingeschränkten Funktionsfähigkeit des Motors wieder verworfen. In einem realistischen Arbeitsfeld von 5 – 10 m Wassersäule würde das eine Druckdifferenz von 0,5 – 1 bar bedeuten. Des Weiteren müsste der Motor schon vor Einsatz im Wasser drehen, damit der Druck im Motor höher als in der Umgebung ist und das Eindringen von Wasser und Partikeln in die Motorteile sowie die Emission von Schmieröl vermieden wird. Darüber hinaus verursachen pneumatisch betriebene Motoren Lärm und starke Verwirbelungen im Wasser.

Hydraulikmotoren arbeiten in einem geschlossenen System, sind wasserdicht gekapselt und somit unbedenklich für den Einsatz unter Wasser. Sie nutzen Druck und Strömung einer Hydraulikflüssigkeit als hydraulische Energie und wandeln diese in mechanische Energie in Form von Drehbewegungen um. Bei ökologisch sensiblen Einsätzen von Hydraulikmotoren kommen heutzutage biologisch abbaubare Hydrauliköle zur Anwendung. Hinsichtlich der erforderlichen Leistungen stehen am Markt Motoren mit einem ausreichend breiten Spektrum an Leistungsdaten zur Verfügung. Bei kleiner Bauweise erreichen diese Motoren hohe Leistungen. Darüber hinaus ist die über eine weite Spanne von Lastanforderungen gleichbleibende Drehzahl des Motors ein wesentlicher Vorteil eines hydraulischen Antriebes. Im Folgenden werden technische Details sowie Vorteile des hydraulischen Antriebes der Reinigungsmaschine dargelegt (siehe Kap. 3.5.2.2).

3.5.2.2 Hydraulikantrieb des Prototyps

Die Maschine ist hydraulisch angetrieben, das antreibende Hydraulikaggregat befindet sich an Land oder an Bord eines Arbeitsfahrzeuges und ist über Schläuche mit der Maschine verbunden. Die Inbetriebnahme des entwickelten Prototyps erfordert zum derzeitigen Entwicklungsstand die Installation von zwei unabhängig voneinander zu steuernden Antrieben. Ein Antrieb dient zum Verfahren der Reinigungsmaschine in vertikaler Richtung am Pfahl (Abb. 27). Ein zweiter Kreislauf dient dem Rotationsantrieb der vier installierten Reinigungsbürsten (Abb. 28).



Abbildung 27: Antriebseinheit zum vertikalen Vortrieb

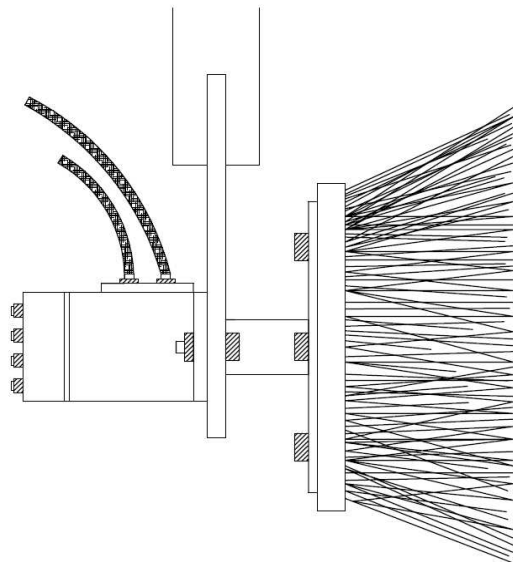


Abbildung 28: Antrieb der Reinigungsbürsten

Der Hydraulikantrieb der Reinigungsmaschine kennzeichnet sich durch folgende Vorteile:

- Hydraulikantriebe sind im Vergleich zu elektrischen Einheiten kleiner, robust und leistungsstark sowie wasserdicht gekapselt;
- Hydraulikaggregat bestehend aus Verbrennungsmotor und Hydraulikpumpe stehen an Land. Der Platzbedarf ist verhältnismäßig gering;
- Sie sind kaum störungsanfällig. Die Reparatur vor Ort stellt bei kleineren Defekten kein Problem dar;
- Die Drehrichtung und Drehzahl lassen sich einfach steuern;

- Die Motoren beider Antriebskreisläufe sind gleich und somit austauschbar;
- Durch Wahl unterschiedlicher Durchmesser der Zahnräder und der Distanz untereinander, kann die gleiche Antriebseinheit für stark variierende Pfahldurchmesser angepasst werden.

Ein Grundgerät ist somit an eine Vielzahl von Reinigungsobjekten anpassbar. Der aktuelle Projektstand sieht nun vor, die bestehende Antriebseinheit und den bestehenden Prototypen auf einander abzustimmen und miteinander zu verbinden. Eine diskutierte Lösung ist, die Antriebseinheit sowie das gegenüberliegende Widerlager (Doppelzahnrad ohne Hydraulikeinheit) an dem Doppelrahmen zu montieren, sodass der Antrieb mittig zwischen beiden Rahmen und oberhalb der Bürstenarme liegt. Am Rahmen angebrachte Rollen könnten der zusätzlichen Stabilisierung und Führung der Maschine dienen.

3.6 Wahl des Geotextils

Für das beschriebene Vorhaben wurden verschiedene Vliesstoffe zur Ummantelung von Holzkonstruktionen im Wasserbau in Betracht gezogen. Zwei wesentliche Parameter zur Wahl des Vlieses für ein solches Vorhaben sind das Flächengewicht sowie die Faserfeinheit. Die Faserfeinheit gibt allgemein das Verhältnis zwischen Gewicht und Länge an. Nach Prüfung der Faserfeinheit verschiedener Geotextilien wird für die Art Vorhaben eine Mischung aus 6 dtex und 17 dtex empfohlen. Weiterhin ergaben Versuchsreihen, dass ein Flächengewicht von etwa 600 g/m² optimal ist. Als besonders geeignet erwies sich der folgende genannte Vliesstoff Terrafix 609, welcher in einem an die Ansprüche angepassten Versuchsprogramm auf verschiedene Parameter untersucht wurde (siehe Kapitel 3.7). Der Universität Rostock wurde für das Projekt durch die Fa. Naue GmbH & Co. KG eine größere Menge dieses Spezialtyps für Laboruntersuchungen zur Verfügung gestellt (ca. 60 m²).

3.7 Laboruntersuchungen - Terrafix 609 – 6-17 dtex

Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wurde ein umfangreiches Programm mit Laboruntersuchungen an dem ausgewählten geotextilen Vliesstoff Terrafix 609 konzipiert und durchgeführt. Die durchgeführten Untersuchungen hatten dabei drei Zielrichtungen:

- (1) Nachweis der Wirksamkeit des eingesetzten Geotextils als Barriere gegen *Teredo navalis*
- (2) Nachweis der Dauerhaftigkeit des eingesetzten Geotextils
- (3) Nachweis der ökologischen Unbedenklichkeit des eingesetzten Geotextils

Im Folgenden werden die Versuche beschrieben sowie die Ergebnisse vorgestellt und bewertet. Die dazu gehörigen Messdaten sind in Anlage A dokumentiert.

3.7.1 Untersuchungen zur Bewertung der Wirksamkeit

Die spezifische Lebensweise von *Teredo* erlaubt es, das Holz durch einen Überzug aus Vliesstoff wirksam zu schützen. Maßgebliche Parameter sind dabei die charakteristische Öffnungsweite und die Dicke bzw. das Flächengewicht des Vliesstoffs.

3.7.1.1 Flächengewicht nach DIN EN ISO 9864 und Dicke unter 2 kPa nach DIN EN ISO 9863-1

Ein maßgeblicher Parameter ist als Ergebnis dieser Überlegungen die Dicke des Vliesstoffs. Die bei der Dicke gemäß DIN EN ISO 9863-1 aufbrachte Normalspannung von 2 kN/m² ist auf die typischen Geokunststoff-Anwendungen in der Geotechnik abgestellt und kann im Rahmen der hier wirksamen Belastungen als

konservative Randbedingung angesehen werden.

Die gemessene Dicke von 5,45 mm (vgl. Tabelle A 1) liegt demnach für die vorliegenden Einsatzbedingungen „auf der sicheren Seite“. Selbst bei dieser durch die Auflast künstlich reduzierten Dicke bedeutet das Ergebnis, dass die Veliger-Larve mit einer Größe von maximal 90 µm das 60-fache ihrer eigenen Körpergröße durch einen dichten Wald von Fasern zurücklegen müsste, um an das hinter dem Vliesstoff befindliche Holz zu gelangen. Angesichts der praktisch nicht vorhandenen autonomen Bewegungsfähigkeit der Larve (Plankton) erscheint dieses Szenario extrem unwahrscheinlich. Das gemessene Flächengewicht von 654 g/m² (Tabelle A 2) korrespondiert mit der festgestellten Dicke des Vliesstoffes. Als Maß zur Charakterisierung der Dicke - quasi als „Filtrationslänge“ - kann der oben genannte Faktor 60 als Quotient von Dicke und 90 µm gewertet werden.

3.7.1.2 Charakteristische Öffnungsweite O_{90} nach DIN EN ISO 12956

Der Versuch zur Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite O_{90} untersucht das Rückhaltevermögen von Geotextilien anhand eines beaufschlagten Korngemisches. Die zu 90% zurückgehaltene Korngröße wird als charakteristische Öffnungsweite O_{90} bezeichnet.

Die spezifische Lebensweise von *Teredo* erlaubt es, das Holz durch einen Überzug aus Vliesstoff wirksam zu schützen. Selbst wenn eine Larve kleiner sein sollte als die charakteristische Öffnungsweite, ist es nicht sehr wahrscheinlich, dass sie ihren Weg durch einen dichten Wald aus Fasern finden wird, der eine Dicke von ca. 60-mal ihrer Körpergröße hat.

Der festgestellte Wert von 84 µm (vgl. Tabelle A 3) erlaubt theoretisch kleineren Veliger-Larven (Maximalgröße 90 µm) die Passage durch das Textil. Angesichts der im Vergleich zur Körpergröße riesigen Schichtdicke und der überwiegend oder ausschließlich passiven Fortbewegung der Larven kann jedoch aus der festgestellten Öffnungsweite in Kombination mit der Dicke auf eine praktisch vollständige Schutzwirkung des gewählten Vliesstoffes geschlossen werden.

3.7.2 Untersuchung der Dauerhaftigkeit - Mechanische Kennwerte

Neben der Wirksamkeit der Maßnahme ist auch die erforderliche Dauerhaftigkeit der Struktur zu berücksichtigen. Holzkonstruktionen im Küstenwasserbau werden üblicherweise für eine Lebensdauer von > 30 Jahren bemessen. Wenn der neu entwickelte geotextile Überzug einen wirksamen Schutz gegen *Teredo* bieten soll, muss er mindestens eine ähnliche Lebensdauer aufweisen. Die maßgebenden Beanspruchungen auf Pfähle sind Wellen, Abrasion durch den hohen Sandgehalt des Wassers in der turbulenten Zone und Eis. Korrespondierend wurden Versuche zur Untersuchung der Zugfestigkeit und des Durchschlagverhaltens durchgeführt.

Aufgrund der bekannten Empfindlichkeit von Polyolefinen gegen UV-Beanspruchung wurde außerdem die Witterungsbeständigkeit berücksichtigt.

3.7.2.1 Zugversuch nach DIN EN ISO 10319

Vliesstoffe weisen bei Zugbelastung ein ausgeprägtes Dehnungsverhalten auf. Während diese Dehnbarkeit bei den typischen geotechnischen Beanspruchungen vorteilhaft ist (flexible Reaktion auf Lasten, Vermeidung von Bruch), bedeutet Dehnung im vorliegenden Beanspruchungsfall, dass der eingesetzte Vliesstoff nicht mehr dicht am zu schützenden Pfahl anliegt und somit durch Seegang hin- und hergeworfen werden kann. Es ist davon auszugehen, dass der Vliesstoff derartigen Belastungen nur kurzfristig gewachsen ist. Dem Kriterium der Zugfestigkeit und den unter Zugbelastung auftretenden Dehnungen kommt deshalb bei dem geplanten Einsatz entscheidende Bedeutung zu.

Nach Ergebnissen von Zitscher (1989) sollte die Zugfestigkeit für geotechnische Anwendungen mindestens 5 kN/m betragen. Angesichts der oben erwähnten Wichtigkeit geringer Dehnungsbeträge wurde innerhalb der Arbeitsgruppe festgelegt, diese Anforderung auf 10 kN/m zu verdoppeln. Wie die Versuchsergebnisse (vgl. Tabelle A 4) zeigen, wird auch diese Anforderung erfüllt, und zwar sowohl in Produktionsrichtung (18,86 kN/m) als auch quer zur Produktionsrichtung (41,96 kN/m).

3.7.2.2 Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch) nach DIN EN ISO 13433

Der dynamische Durchschlagversuch untersucht die Empfindlichkeit des Vliesstoffes gegen Aufritzen – im vorliegenden Fall z.B. an Ästen oder Nägeln – und gegen Weiterreißen bestehender Verletzungen.

Erfahrungsgemäß ist diese Anforderung erfüllt, wenn im Versuch ein Eindringen des Fallkegels von < 5 mm eingehalten wird. Die Anforderung wird nach den Ergebnissen der durchgeführten Versuche (vgl. Tabelle A 5) erfüllt.

Die Gefahr des Weiterreißen von Verletzungen im Betriebszustand wird aufgrund des intensiven Bewuchses als vernachlässigbar eingestuft. Das Risiko von Verletzungen während der Einbauphase ist mit dem konventionellen Einbau von Vliesstoff in der Geotechnik vergleichbar. Die Eignung des eingesetzten Materials gegen die dabei auftretenden Lasten ist durch die durchgeführten Untersuchungen belegt.

3.7.2.3 Witterungsbeständigkeit nach DIN EN 12224

UV-Einwirkung stellt die häufig die maßgebliche Belastung von Polymeren hinsichtlich ihrer Langlebigkeit dar. Delmas et al. (1994) stellten bei ungeschützten PES-Vliesen eine erhebliche Abnahme der Zugfestigkeit fest (ca. 50 % nach 6 Jahren). Schröder (1988) erklärt dazu, dass eine beobachtete Abnahme der Zugfestigkeit von PES-

Geotextilien keineswegs ausschließlich auf die eingesetzte UV-Bestrahlung zurückzuführen sein muss, sondern dass daneben und überlagernd auch Hydrolyse-Effekte eine Rolle spielen. Nach Schröder (1992) wird die Hydrolyse von PES durch einwirkende UV-Strahlung beschleunigt.

Da die genannten Untersuchungen im Hinblick auf das im vorliegenden Vorhaben eingesetzte Material keine quantitativen Aussagen zulassen, wurde der eingesetzte Vliesstoff Terrafix 609 – 6-17 dtex nach DIN EN 12224 hinsichtlich seiner Empfindlichkeit gegen UV-Strahlen untersucht. Diese Orientierungsprüfung zur Beständigkeit dient dazu, festzulegen, ob die Produkte in natürlichen Böden bei Temperaturen bis 25°C einer Nutzungsdauer von bis zu 25 Jahren standhalten können. Das Geotechniklabor des Lehrstuhls für Landeskulturelle Ingenieurbawerke ist zur Untersuchung der Witterungsbeständigkeit nach DIN EN 12224 nicht ausgestattet. Die Laborergebnisse wurden für das Projekt von dem Institut für textile Bau- und Umwelttechnik GmbH (Kiwa TBU GmbH) zur Verfügung gestellt.

Bei dem Prüfverfahren wird eine Geotextilprobe über einen längeren Zeitraum (hier: 424 Stunden) UV-Strahlen ausgesetzt und der unter Einfluss dieser Strahlung auftretende Verlust an Zugfestigkeit und Bruchdehnung gemessen. Die Versuche wurden jeweils an 5 Proben in Produktionsrichtung und quer zur Produktionsrichtung durchgeführt. Die Randbedingungen und die im Labor gemessenen Daten sind im Anhang in Tabelle A 6 dokumentiert.

Tabelle 3: Ergebnisse zur Bestimmung der Witterungsbeständigkeit

Prüfung	Prüfrichtung	Mittelwert [%] aus 5 Prüfungen
Restfestigkeit	Produktionsrichtung	65,9
Restdehnung	Produktionsrichtung	88,7
Restfestigkeit	Quer zur Produktionsrichtung	77,1
Restdehnung	Quer zur Produktionsrichtung	86,0

Die Orientierungsprüfung weist die Gebrauchstauglichkeit des Geotextils vor dem Hintergrund eines UV-exponierten Einsatzes nach 25 Jahren nach. Die dabei simulierten Beanspruchungen übersteigen die im vorliegenden Vorhaben zu erwartenden Lasten deutlich. Wie in Langzeitversuchen gezeigt werden konnte, wird der Vliesstoff im geplanten Einsatz nach kurzer Zeit durch Bewuchs bedeckt, sodass die Belastung durch UV-Strahlen im Langzeiteinsatz als vernachlässigbar angenommen werden kann.

Zusammenfassen kann festgestellt werden, dass die Versuchsergebnisse die getroffene Materialwahl bestätigen.

3.7.2.4 Wasserdurchlässigkeit normal zur Geotextilebene ohne Auflast DIN EN ISO 11058

Der Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke hat dieses Forschungsvorhaben zum Anlass genommen, aus Berufungsmitteln das neue Gerät nach oben genannter DIN zu beschaffen.

Versuche zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit wurden an stichpunktartig gewonnenen Proben durchgeführt, um die Streuung dieses Parameters, der für eine kontinuierliche Umspülung der Holzpfähle wichtig ist, zu untersuchen.

Wie angenommen weist der Parameter eine erhebliche Streuung auf, die Ergebnisse (vgl. Tabelle A 7) liegen trotzdem im Bereich hoher Durchlässigkeit (zwischen $2,8 \cdot 10^{-2}$ m/s und $8,7 \cdot 10^{-2}$ m/s). Eine Behinderung der Umströmung des Pfahls ist demnach von Seiten des eingesetzten Geotextils ausgeschlossen.

3.7.3 Untersuchung der ökologischen Unbedenklichkeit

Die Prüfung der Umwelttoxikologie des Geotextils zählt aufgrund des langjährigen Einsatzes der Vliesstoffe unter Wasser zu einem wichtigen Parameter zur Untersuchung der ökologischen Unbedenklichkeit.

3.7.3.1 Umwelttoxikologie

Der vorgesehene dauerhafte Einsatz des Vliesstoffs im Wasser erforderte Untersuchungen hinsichtlich der chemischen und hygienischen Unbedenklichkeit. Diese Untersuchungen sollten den Nachweis bringen, dass durch den Einbau von Kunststoffen (Polyester, Polypropylen und Polyamid) keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt zu befürchten sind, dies insbesondere vor dem Hintergrund der Festlegungen des HELCOM-Abkommens (Verbot des Einsatzes von Kunststoffen im Wasserbau) (HELCOM, 2010).

Da der Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke über keine chemische Laborausüstung verfügt, wurde zur Beurteilung der Unbedenklichkeit auf externes Fachwissen zurück gegriffen. Von Seiten des Lieferanten des eingesetzten Geokunststoffs (Fa. Naue GmbH & Co KG) wurde ein Bericht über Untersuchungen zur Unbedenklichkeit beim Einsatz im Grundwasser zur Verfügung gestellt (durchgeführt vom Hygiene-Institut Gelsenkirchen, 1992). Die erzielten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind im Anhang in Tabelle A 8 dokumentiert.

Die Untersuchungen wurden in Anlehnung an die von der Arbeitsgruppe "Trinkwasserbelange" der Kunststoff-Kommission des Bundesgesundheitsamtes veröffentlichte Prüfmethode (Trogmethode; vgl. Bundesgesundheitsblatt 20. Jahrgang, 1977, S. 124 ff.) durchgeführt. Da die Strömungsgeschwindigkeiten im Grundwasser um etliche Größenordnungen niedriger liegen als im freien Wasser, und dem entsprechend auch Verdünnungseffekte

erheblich weniger wirksam sind, sind die Ergebnisse der Untersuchungen im Hinblick auf die hier geplante Anwendung als deutlich „auf der sicheren Seite“ zu werten.

Folgende Ergebnisse im Hinblick auf den geplanten Einsatz können zusammengefasst werden:

- Der Gehalt der Prüfwässer an organischen Substanzen, bestimmt als organisch gebundener Kohlenstoff von 0,6 mg/l bewegt sich in einem Bereich, der für Trinkwasser üblich ist.
- Vergleichbares gilt auch für den biochemischen Sauerstoffbedarf. Der Gehalt der Prüfwässer an nichtionischen Tensiden (BIAS) liegt mit 0,26 mg/l nur geringfügig über dem Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 0,2 mg/l.
- Die Untersuchung der Dehydrogenasenaktivität zeigt keine Hemmung durch das Prüfwasser; vielmehr erhöht sich die Dehydrogenasenaktivität gegenüber dem Blindwert bei einer Zugabe von 400 ml/l um etwa 100 %. Von den Prüfwässern gehen somit keine toxischen Wirkungen auf Mikroorganismen aus.

Das Hygiene-Institut fasst zusammen: „Die für die Fasern verwendeten Polymere Polypropylen, Polyester und Polyamid sind auch im Lebensmittelverkehr und als Kunststoffe im Trinkwasserbereich zugelassen (siehe KTW-Empfehlung Teil 1.3.3 Polypropylen, VII. Empfehlung der Kunststoff-Kommission "Polypropylen" , X. Empfehlung "Polyamide", XII. Empfehlung "Polyester"), sodass ein Einsatz als Geotextil aus toxikologischer Sicht als unbedenklich zu bewerten ist.“

Auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich des geplanten Einsatzes im freien Wasser wurde bereits oben verwiesen.

3.8 Vorrichtung zur Montage der geotextilen Schutzhülle

3.8.1 Montagekasten aus Blech

Antragsgemäß sollte das zu montierende Geotextil (Abmessung bis zu ca. 2,0 m x 12,0 m) in einem nach oben offenen, faltbaren Metallkasten (Länge entsprechend der Geotextilbreite, Breite wenige dm) ziehharmonikaartig eingelegt werden. Am Boden des Kastens sollte das Geotextil lösbar befestigt sein (Abb. 29).

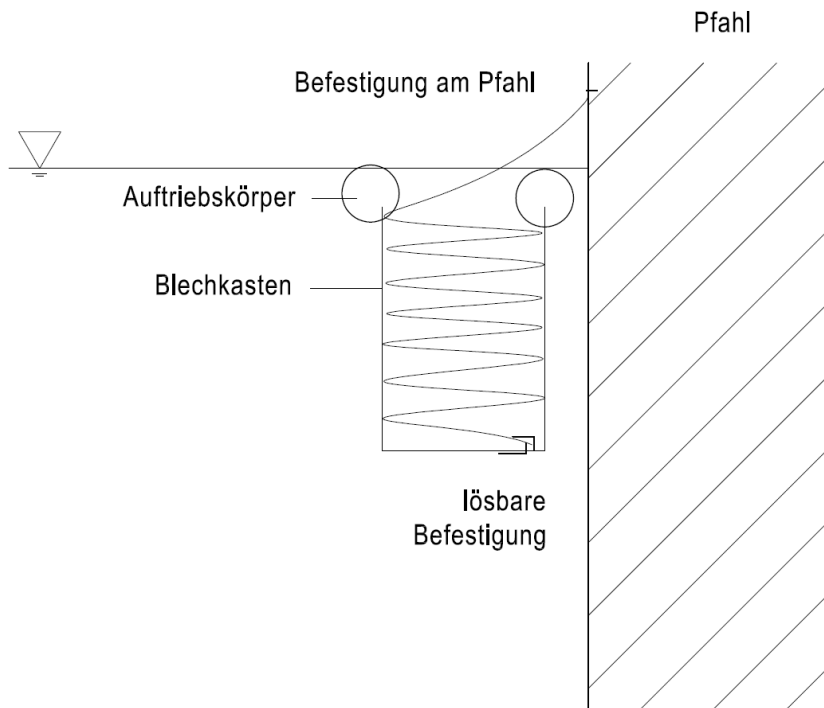


Abbildung 29: Montagekasten aus Blech, absenkbar durch Entlüften der Auftriebskörper

Der Kasten könnte dann, mit geeigneten Auftriebskörpern versehen, eingeschwommen und um den Pfahl herum geschlossen werden. Die Oberkante des Textils wird am Pfahl befestigt. Nach Entlüftung der Auftriebskörper wird das Geotextil um den Pfahl geschlungen, nach unten gezogen und im weiteren Verlauf durch einen Taucher sukzessive am Pfahl befestigt.

Diese Variante wurde nicht weiter verfolgt, da bereits bei ersten Versuchen sich zwei wesentliche Probleme herausstellten. Die horizontale Faltung des Vliesstoffes geht mit einer großen Volumenzunahme einher. Ein hierfür benötigter Blechkasten wäre überdimensioniert für diese Anwendung. Desweiteren ergibt sich ein erhöhter Aufwand bei der Bergung des Blechkastens.

3.8.2 Montagekasten aus Blech und Geogittern

Ein zweiter Entwurf ging davon aus, den Kasten an seinem Einschwimmort an der Oberfläche zu belassen, zu öffnen und das Geotextil von dort aus ohne Kasten absinken zu lassen. Zur Ballastierung des Vliesstoffes ist ein mit zum Beispiel Sand gefüllter Saum am Fuß des Geotextils vorgesehen (Abb. 30).

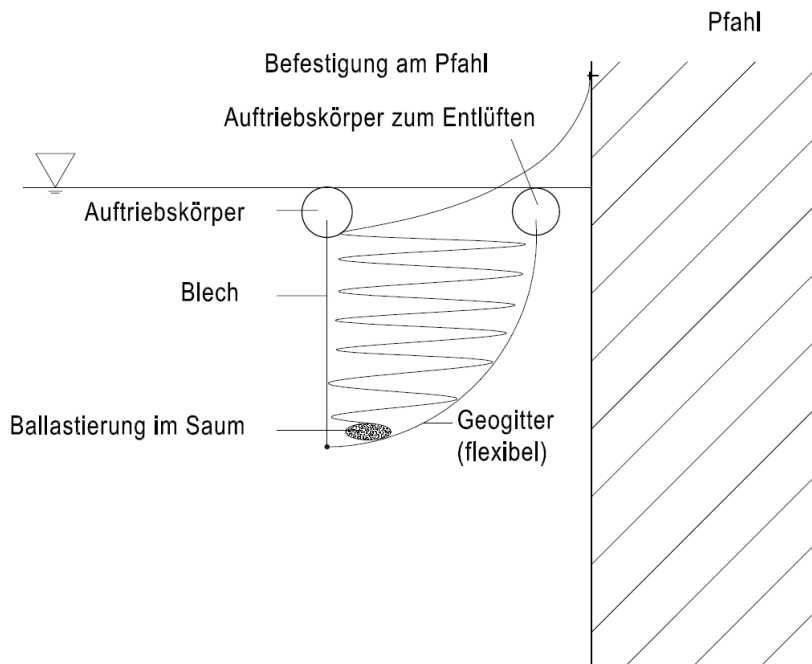


Abbildung 30: Befüllter Montagekasten aus Blech und Geogittern

Versuche den Vliesstoff mehrfach zu falten, ergaben, dass sich die relativ große Materialdicke (vgl. Anhang 1a) bei Befüllen des Kastens als Hindernis erweist. Der horizontal gefaltete Vliesstoff lässt sich in dieser Form schlecht um den Pfahl herum legen.

Das Verfahren wurde deshalb hinsichtlich der Faltenrichtung modifiziert, sodass die Falten nunmehr hängend, (vertikal) angeordnet sind: Dabei kann ohne Rücksicht auf die beengten Platzverhältnisse zwischen den Pfählen die Faltenlänge größer gewählt werden, sodass die Horizontalausdehnung des gefalteten Pakets gering gehalten werden kann (siehe Kap. 3.8.3).

3.8.3 Vliesstoffmontage mit Halteklammern

Ein aktuell favorisiertes Montageverfahren verzichtet auf einen Kasten. Das Handling des Geotextils im gefalteten Zustand erfolgt durch eine Reihe mit Auftriebskörpern versehenen Klammern. An diesen Klammern hängend wird das Geotextil-Paket an seinen Einsatzort geschwommen, um den Pfahl geschlungen und an dem oberen Ende oberhalb der Wasserlinie fixiert (Abb. 31).

Die Halteklammern werden durch den Druck eines Pressluftpolsters geschlossen gehalten. Die Pressluftpolster der einzelnen Klammern sind durch einen Schlauch miteinander verbunden und können durch Öffnen eines Ventils entlastet werden. Die Klammern öffnen daraufhin und das Geotextil gleitet am Pfahl herab. Die folgende Abbildung zeigt die Klammern, Auftriebskörper und die Pressluft-Druckkissen.

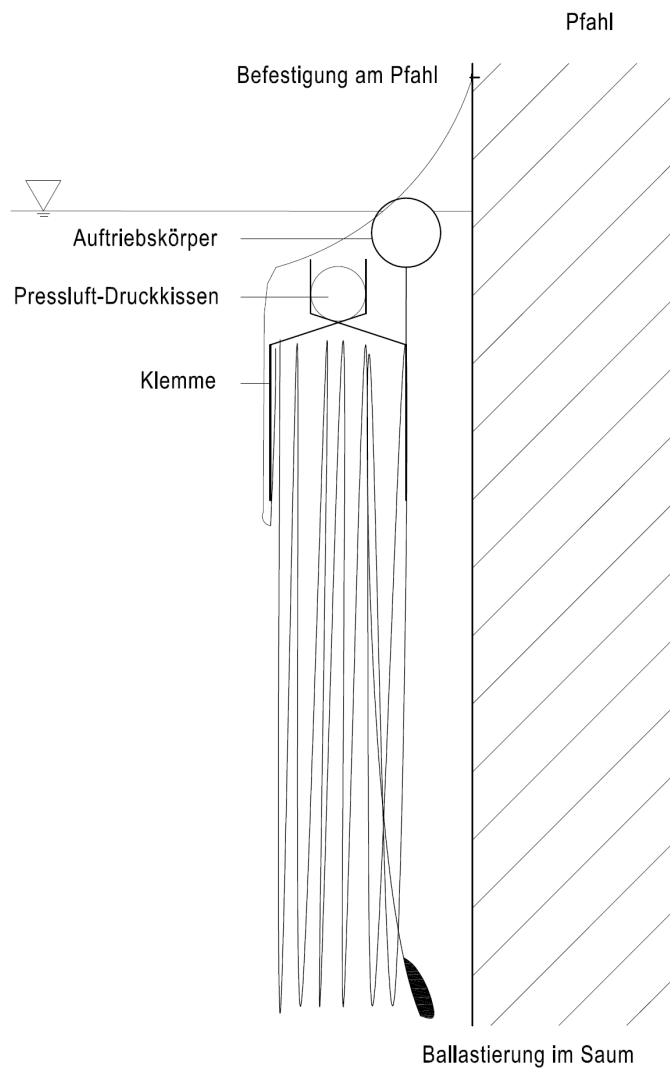


Abbildung 31: Montagekonzept mit Halteklammern

3.8.4 Vliesstoffmontage mit Kassettensegmenten

Eine weitere favorisierte Montageidee besteht darin, den vertikal angeordneten Vliesstoff in einer aus mehreren Segmenten befindlichen Kassette zu legen, welche durch bewegliche Zwischenlager um den Pfahl herum gelegt werden kann (Abb. 32). Ist die Kassette um den Pfahl gelegt, wird die Fixierung gelöst und die geotextile Schutz- hülle kann nach unten herab gelassen werden. Die Kassettensegmente werden vorkonfektioniert an den Einsatz- ort gebracht. In Abhängigkeit von der Vliesstofflänge und Pfahldurchmesser, können die Segmente in ihrer Größe und Anzahl beliebig ausgetauscht werden. Der Saum der geotextilen Schutzhülle ist beispielsweise mit einer Sandfüllung ballastiert.

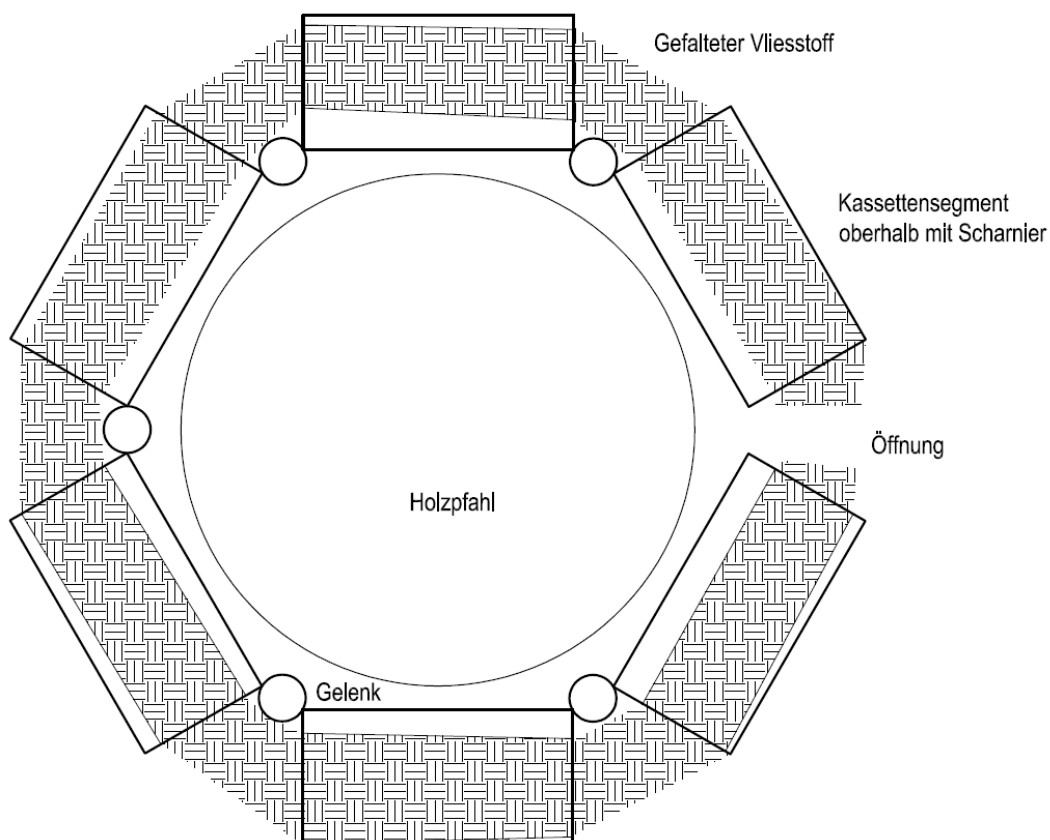


Abbildung 32: Kassettensreihe zur Montage des Vliesstoffes

Entwurf und Bemessung der Montagekonzepte sind hiermit mit den vorgestellten Entwürfen vorerst abgeschlossen. In einer Fortführung des Projektes ist die Montagevorrichtung zu konstruieren und in Technikumsversuchen zu testen und ggf. zu modifizieren.

3.9 Versuchsfeld Bremerhaven

Nach Angaben der bremenports GmbH & Co. KG sind entsprechend des Alters ein großer Teil der auch heute noch in Betrieb befindlichen Hafenanlagen auf Holzpfähle gegründet. In Bremen und Bremerhaven sind das zusammengefasst etwa 33,9 km Kajen, 250 km Gleise der Hafenbahn, 56 Brücken sowie 5 Schleusen. Aufgrund der geringen und stark schwankenden Salinität des Weserästuars sind die Holzkonstruktionen in Bremerhaven bisher größtenteils nicht befallen worden. In den letzten zehn Jahren nahm der Befall durch die Holzbohrmuschel *Teredo navalis* jedoch schleichend zu. Mit dem Interesse die Holzkonstruktionen nachhaltig vor einem Befall zu schützen, stellt die Hafengesellschaft bremenports ein Versuchsfeld zur Verfügung, um die entwickelten Prototypen zu testen.

Im Herbst 2008 wurde mit dem Kooperationspartner bremenports eine erste Befahrung mit dem Taucherschiff unternommen, um einen geeigneten Platz für die Feldversuche auszuwählen. Ein geeigneter Platz wurde am Nordende des Fischereihafens II gefunden (Abb. 33 und Abb. 34). Die Position weist folgende Vorteile auf:

- Problemloser Zugang auch mit Kraftfahrzeugen;
- Lagerort eines Schwimmpontons, mit dadurch abgesenkter Höhe zur Wasseroberfläche;
- Freier Zugang zu den Tragpfählen der Hafenkonstruktion.

Die folgenden Fotos geben einen Eindruck von der gewählten Örtlichkeit.



Abbildung 33: Blick über das Hafenbecken des Fischereihafens II



Abbildung 34: Ansicht der Kaikante am vorgesehenen Arbeitsort

4 Zusammenfassung

Nach knapp über zwei Jahren Projektlaufzeit kann auf eine Reihe von nennenswerten Konstruktionsideen und umgesetzten Entwicklungen zurück geblickt werden. Hauptaugenmerk der engen Zusammenarbeit zwischen der TAI GmbH und dem Lehrstuhl für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke lag auf der Entwicklung einer Pfahlreinigungsmaschine, welche kostengünstig und ohne aufwendigen Tauchereinsatz betrieben werden kann. Ergebnis der Zusammenarbeit ist ein aus einem doppelten, um den Pfahl klappbaren Stahlrahmen realisierter Prototyp. An den vier Seiten des Rahmens sind Stahlarme montiert, an denen die Bürstenköpfe mit dem hydraulischen Antrieb installiert sind. Ein zweiter hydraulischer Antrieb dient dem vertikalen Vortrieb der gesamten Reinigungsmaschine und wird über zwei gegenüberliegende Doppelzahnräder mit einem Außendurchmesser von 400 mm und einer Materialstärke von 8 mm (eins davon hydraulisch angetrieben) realisiert. Die Zahnräder sind austauschbar und können so an den Pfahldurchmesser angepasst werden. Das nicht angetriebene Zahnrad dient als Widerlager und sorgt für die notwendige Stabilität der Maschine beim Vortrieb. Bisher konnte keine technische Lösung gefunden werden, wo der Antrieb am besten montiert wird, um ein Verkanten der Maschine im Betrieb zu verhindern. Desweiteren ist der Prototyp mit einem ungefähren Gewicht von 200 kg schwer zu händeln. In einer Projektfortführung ist der Prototyp im Hinblick auf technische Details und Handling zu verfeinern.

Die Vliesstoffummantelung befindet sich noch im Erprobungszustand. Mehrere theoretische Lösungsansätze wurden in der Werkhalle des Lehrstuhls für Landeskulturelle Ingenieurbauwerke sowie auf dem Gelände der TAI GmbH getestet. Die Montage der geotextilen Schutzhülle mit Hilfe eines Blechkastens erwies sich auf Grund der starken Volumenzunahme bei horizontalem Falten des Vliesstoffes in der Praxis als eher ungeeignet. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, entstand die Idee den Vliesstoff hängend, am Fuß ballastiert, mit Hilfe von Halteklammern ins Wasser zu lassen und anschließend um den Pfahl zu legen. Ein weiterer Ansatz ist die Einlage des Vliesstoffes in vorkonfektionierten Kassetten, welche im Wasser um den Pfahl herum gelegt werden können. Durch Öffnen der Kassettenböden kann sich der Vliesstoff am Pfahl nach unten entfalten und anschließend befestigt werden. Die Entwürfe der Vliesstoffmontagekonzepte sind in einer Fortführung des Projektes zu konstruieren und zu testen. Nach weiteren Feldversuchen können die Prototypen für den alltäglichen Gebrauch modifiziert werden.

Aufgrund dargelegter technischer Schwierigkeiten in der Entwurfsplanung der Reinigungsmaschine und des Montagegerätes, sowie der sehr zeitaufwendigen Konstruktion und Erprobung des Prototyps kann das Projekt bedauerlicherweise nicht planmäßig bis zum 31.12.2010 beendet werden. Der überarbeitete Zeitplan (Anhang C) veranschaulicht die sehr zeitintensive Planung und Konstruktion der Reinigungsmaschine. Der Zwischenbericht soll einen umfassenden Überblick über die bisherigen erfolgsversprechenden Projektergebnisse geben. Aufgrund der Aktualität der Thematik, Holzkonstruktionen nachhaltig gegen die Holzbohrmuschel *Teredo navalis* schützen

zu müssen, sowie das Bedürfnis die Entwicklungen bis auf Marktreife weiter zu entwickeln und zu modifizieren, wird seitens der Projektpartner eine Fortführung des Projektes angestrebt.

Nach übereinkommender Auffassung aller Beteiligten werden folgende Punkte für eine Fortführung des Projektes angestrebt:

- (1) Weiterentwicklung, Konstruktion und Modifikation des Montagegerätes;
- (2) Modifikation des Reinigungsgerätes und Durchführung weiterer Tests;
- (3) Durchführung von Feldversuchen sowie weiteren Laboruntersuchungen (Geotextil) zur Erprobung von Handling und Funktionalität der Entwicklungen.

Um die oben genannten Punkte zielgemäß umzusetzen, ist schätzungsweise eine Laufzeitverlängerung des Projektes von etwa einem Jahr erforderlich.

Weitere Projektunterlagen und Dokumente (wie zum Beispiel: CAD-Zeichnungen, Bilddokumente, weitere Ergebnisse von Geotextiluntersuchungen, Messprotokolle etc.) stellen wir Ihnen auf Anfrage gern zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

DAMANSARA, C. (1991): Apparatus for the combating of marine growth on offshore structures. United States Patent. Patent Number: 5,026,212.

DEDE, C.; KOHLHASE, S. (2000): Protection of Groyne Piles against Attack of *Teredo navalis* by Means of Geotextiles, Proc. Second European Geosynthetic Conference, Bologna.

DEDE, C.; KOHLHASE, S.; WEICHBRODT, F. (2002): Research on Wooden Pile Constructions, Proc. First German-Chinese Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering (Joint 2002), University of Rostock.

DEDE, C; KOHLHASE, S. (2007): Schutz von Holzkonstruktionen im Küstenwasserbau gegen *Teredo navalis* - Ergebnisse eines Feldversuchs in der Ostsee. 10. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik München, Februar 2007. Geotechnik, Sonderheft, S. 49-53, 2007.

DELMAS, PH.; FAURE, Y.H.; FARKOUH, B.; NANCEY, A. (1994): Long Term Behaviour of a Geotextile as a Filter in a 24 - Year old Earth Dam: Valcros.- Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5. - 9. September 1994, pp. 1199 – 1202.

GERCKEN, J. (2008): Monitoring zum Befall der Buhnsysteme an der Küste von Mecklenburg-Vorpommern durch den Schiffsbohrwurm *Teredo navalis* L. Institut für Angewandte Ökologie Forschungsgesellschaft mbh. Broderstorf bei Rostock.

HYGIENE-INSTITUT DES RUHRGEBIETS, GELSENKIRCHEN (1996): Untersuchung des Nadelvliesstoffs Terrafix 609 aus Grundwasserhygienischer Sicht.- 6 Seiten.

SAATHOFF, F., BRÄU, G. (2009): *Geokunststoffe in der Geotechnik und im Wasserbau. In: Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren.* 2. Berlin : Verlag Ernst und Sohn Berlin, 2009. - ISBN 978-3-433-01845-3

SCHRÖDER, H. (1988): Untersuchung der Wetterbeständigkeit von Geotextilien.- 1. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik K-Geo '88, pp. 107 - 118, Hamburg.

SCHRÖDER, H. (1992): Grundsätzliches zur Untersuchung der chemischen Beständigkeit von Geotextilien.- 2. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik K-Geo '92, pp. 229 - 241, Luzern.

SORDYL, H.; BÖNSCH, R.; GERCKEN, J.; GOSELCK, F.; KREUZBERG, M.; SCHULZE, H. (1998): Verbreitung und Reproduktion des Schiffsbohrwurms *Teredo navalis* L. an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns, Sonderdruck aus Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 42./1998, Heft 4, 8 p.

THOLEN, M.: Das Mammutpumpenprinzip. <http://brunnen-tholen.com/content/pdf/mammutpumpenprinzip.pdf>.

ZITSCHER, F. F. (1989): Anwendung und Prüfung von Kunststoffen im Erdbau und Wasserbau. Empfehlung des Arbeitskreises 14 der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., 2.Auflage, Schriftenreihe des DVWK. Herausgeber F. F. Zitscher. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin, 1989.

Internetverzeichnis

AMEINFO (2010): <http://www.ameinfo.com/202742-large.html>

MARINETALK (2010): <http://www.marinetalk.com/articles-marine-companies/art/Marine-Growth-Removal-15140T.html>

HELCOM (2010): http://www.helcom.fi/publications/en_GB/publications/

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aktuelle Zerstörungen an hölzernen Pfahlbuhnen an der Ostseeküste in Kühlungsborn (Foto: Ulf Böttcher).....	2
Abbildung 2: Geschützter und ungeschützter Kiefernpfahl 1 Jahr nach Installation	5
Abbildung 3: Pfähle nach Entfernung des Bewuchses.....	5
Abbildung 4: Geschützter Kiefernpfahl.....	5
Abbildung 5: Ungeschützter Kiefernpfahl.....	5
Abbildung 6: Lebenszyklus von <i>Teredo navalis</i> (Sordyl, 1998).....	9
Abbildung 7: Durch <i>Teredo</i> zerstörter Kiefernpfahl (Weichholz).....	10
Abbildung 8: <i>Teredo</i> -Befall von <i>Eucalyptus rostrata</i> (Hartholz) (Gercken, 2008).....	10
Abbildung 9: Seitenansicht einer Apparatur zur Beseitigung von marinem Bewuchs (Damansara, 1991)	13
Abbildung 10: Reinigungskart mit hydraulisch angetriebenen Bürsten (AMEinfo, 2010)	14
Abbildung 11: Bürstenreinigungsgerät - Divex (MarineTalk, 2010).....	14
Abbildung 12: Reinigung mit Hochdruckreiniger: Wirksamkeit nur auf kurze Distanz.....	15
Abbildung 13: Feuerlöschpumpe ermöglicht höhere Leistungen	15
Abbildung 14: Hydraulisches Reinigungsgerät basierend auf der Feuerlöschpumpe - Draufsicht.....	16
Abbildung 15: Hochdruckdüsenring	17
Abbildung 16: Entwurf – HDPE-Kunststoffummantelung mit Auftriebskörper	18
Abbildung 17: Bürstenhülse - Draufsicht.....	20
Abbildung 18: Bürstenhülse – Seitenansicht.....	20
Abbildung 19: Rundumlaufende Walzenbürste - Draufsicht.....	21
Abbildung 20: Rundumlaufende Walzenbürste - Seitenansicht	21
Abbildung 21: Strumpfschälung; li: Stahlgeflecht der geschlossenen Seite; re: Stahlgeflecht mit Hülsenverschluss - Seitenansicht	22

Abbildung 22: Schälmanschette - Seitenansicht	23
Abbildung 23: Prototyp – Seitenansicht (schematische Zeichnung)	25
Abbildung 24: Prototyp – Draufsicht (schematische Zeichnung).....	26
Abbildung 25: Einfacher Klapprahmen am Pfahl montiert.....	27
Abbildung 26: Doppelter Klapprahmen; 2 Bürsten und Antrieb zum vertikalen Vortrieb nicht montiert.....	27
Abbildung 27: Antriebseinheit zum vertikalen Vortrieb.....	29
Abbildung 28: Antrieb der Reinigungsbürsten.....	29
Abbildung 29: Montagekasten aus Blech, absenkbar durch Entlüften der Auftriebskörper.....	37
Abbildung 30: Befüllter Montagekasten aus Blech und Geogittern	38
Abbildung 31: Montagekonzept mit Halteklammern.....	39
Abbildung 32: Kassettenreihe zur Montage des Vliesstoffes	40
Abbildung 33: Blick über das Hafenbecken des Fischereihafen II	41
Abbildung 34: Ansicht der Kaikante am vorgesehenen Arbeitsort	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aggregate zur Untersuchung des Druck- und Volumenstroms	15
Tabelle 2: Luftbedarf bei Ringspaltöffnung von 5 cm, als Funktion des Pfahldurchmessers	19
Tabelle 3: Ergebnisse zur Bestimmung der Witterungsbeständigkeit.....	34

Anhang

Anhang A: Ergebnisse der Laboruntersuchungen

(hier exemplarisch dargestellt am Beispiel Terrafix 609 – 6-17dtex)

Tabelle A 1: Dicke bei 2 kPa nach DIN EN ISO 9863-1

Probe Nr.	Gemessene Dicke [mm]
1	5,52
2	5,50
3	5,78
4	5,43
5	5,03
Mittelwert [mm]	5,45
Standardabweichung [mm]	0,27
Variationskoeffizient [%]	4,96

Tabelle A 2: Flächengewicht nach DIN EN ISO 9864

Probe Nr.	Flächengewicht [g/m ²]
1	634,00
2	707,00
3	610,00
4	642,00
5	677,00
Mittelwert [g/m ²]	654,00
Standardabweichung [g/m ²]	38,14
Variationskoeffizient [%]	5,83

Tabelle A 3: Charakteristische Öffnungsweite O₉₀ nach DIN EN ISO 12956

Probe Nr.	O ₉₀ [mm]
1	0,086
2	0,083
3	0,079
4	0,088
5	0,082
Mittelwert [mm]	0,084
Standardabweichung [mm]	0,004
Variationskoeffizient [%]	4,20

Tabelle A 4: Zugversuch nach DIN EN ISO 10319

Versuchs Nr.	in Längsrichtung (MD)		in Querrichtung (CD)	
	Dehnung bei Höchstzugkraft	Zugfestigkeit	Dehnung bei Höchstzugkraft	Zugfestigkeit
	[%]	[kN/m]	[%]	[kN/m]
1	101,86	19,68	56,25	43,66
2	100,57	19,63	54,26	40,45
3	95,26	20,21	55,70	44,96
4	97,44	19,04	52,18	45,30
5	103,95	19,86	51,36	43,72
6	110,02	19,12	62,10	39,90
7	130,57	14,47	53,00	35,74
Mittelwert x	105,67	18,86	54,98	41,96
Standardabweichung	11,07	1,83	3,34	3,19
Variationskoeffizient [%]	11,96	1,98	3,61	3,45

Tabelle A 5: Dynamischer Durchschlagversuch (Kegelfallversuch) nach DIN EN ISO 13433

Versuch Nr.	Gemessene Eindringtiefe [mm]
1	5,10
2	4,74
3	4,92
4	4,90
5	5,03
Mittelwert [mm]	4,94
Standardabweichung [mm]	0,14
Variationskoeffizient [%]	2,79

Tabelle A 6: Bestimmung der Witterungsbeständigkeit nach DIN EN 12224

Untersuchungsbedingungen:

Prüfeinrichtung: UV-Tester, Type QUV / SPRAY

Lichtintensität: 50MJ/m²

Prüfzyklus: 5 h Trockenzyklus (50 ± 3 °C); 1 h Nasszyklus (25 ± 3 °C)

Anzahl Prüfzyklen: 71

Prüfung in Maschinenrichtung verlaufende MD-Fäden

Probe Nr.	Zugfestigkeit [N]		Bruchdehnung [%]	
	Referenzprobe	Untersuchte Probe	Referenzprobe	Untersuchte Probe
1	755	408	122,1	103,6
2	670	451	128,6	102,2
3	663	499	113	113,5
4	712	420	117,8	103,4
5	659	500	123,4	113,8
Mittelwert x	692	455	121	107,3
Standardabweichung s	41,2	43	5,89	5,82
Variationskoeffizient v	6,00%	9,40%	4,90%	5,40%
Restzugfestigkeit / - bruchdehnung [%]	65,9		88,7	

Prüfung quer zur Maschinenrichtung verlaufende CMD-Fäden

Probe Nr.	Zugfestigkeit [N]		Bruchdehnung [%]	
	Referenzprobe	Untersuchte Probe	Referenzprobe	Untersuchte Probe
1	1795	1337	53,6	44,2
2	1964	1438	53,3	42,6
3	1780	1437	51	47
4	1817	1436	57,2	51,1
5	1709	1340	53,3	45,9
Mittelwert x	1813	1397	53,7	46,2
Standardabweichung s	93,8	53,8	2,23	3,23
Variationskoeffizient v	5,20%	3,80%	4,20%	7,00%
Restzugfestigkeit / - bruchdehnung [%]	77,1		86,0	

Tabelle A 7: Wasserdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 11058

Versuch Nr.	k_f [m/s]
1	4,00E-02
2	5,00E-02
3	3,70E-02
4	8,70E-02
5	1,50E-02
6	2,80E-02
Mittelwert [m/s]	4,28E-02
Standardabweichung [m/s]	2,47E-02
Variationskoeffizient [%]	57,56

Tabelle A 8: Umwelttoxikologie

Untersuchungsbedingungen:

Prüfkörper: Prüfplatte der Abmessungen 203 mm x 204 mm x 5 mm

Eingesetzter Vliesstoff: Terrafix 609, Standardtype

Prüfwassermenge: 3,3 l

Versuchsstufe	Prüfwasser			Ausgangswasser (entmin. Wasser)
	1. - 3. Tag 20.11.1992	4. - 6. Tag 23.11.1992	7. - 9. Tag 26.11.1992	
Prüfwasser vom:				
Farbe	farblos	farblos	farblos	ohne
Trübung	klar	klar	klar	klar
Geruch	ohne	ohne	schwach dumpfig	ohne
Neigung zur Schaumbildung	stark	schwach	schwach	ohne
org. gebundener Kohlenstoff (TOC) mg/l	4	2	0,6	< 1
chem. Sauerstoffbedarf (CSB) mg/l O ₂	15	< 15	< 15	< 15
biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB ₅) mg/l O ₂	2,6	2,2	1,4	< 1
nichtionische Tenside (BIAS) mg/l	0,65	0,37	0,26	< 0,03

*Die Analysewerte sind Mittelwerte aus 2 Parallelversuchen

Anhang B: CAD – Konstruktionszeichnungen

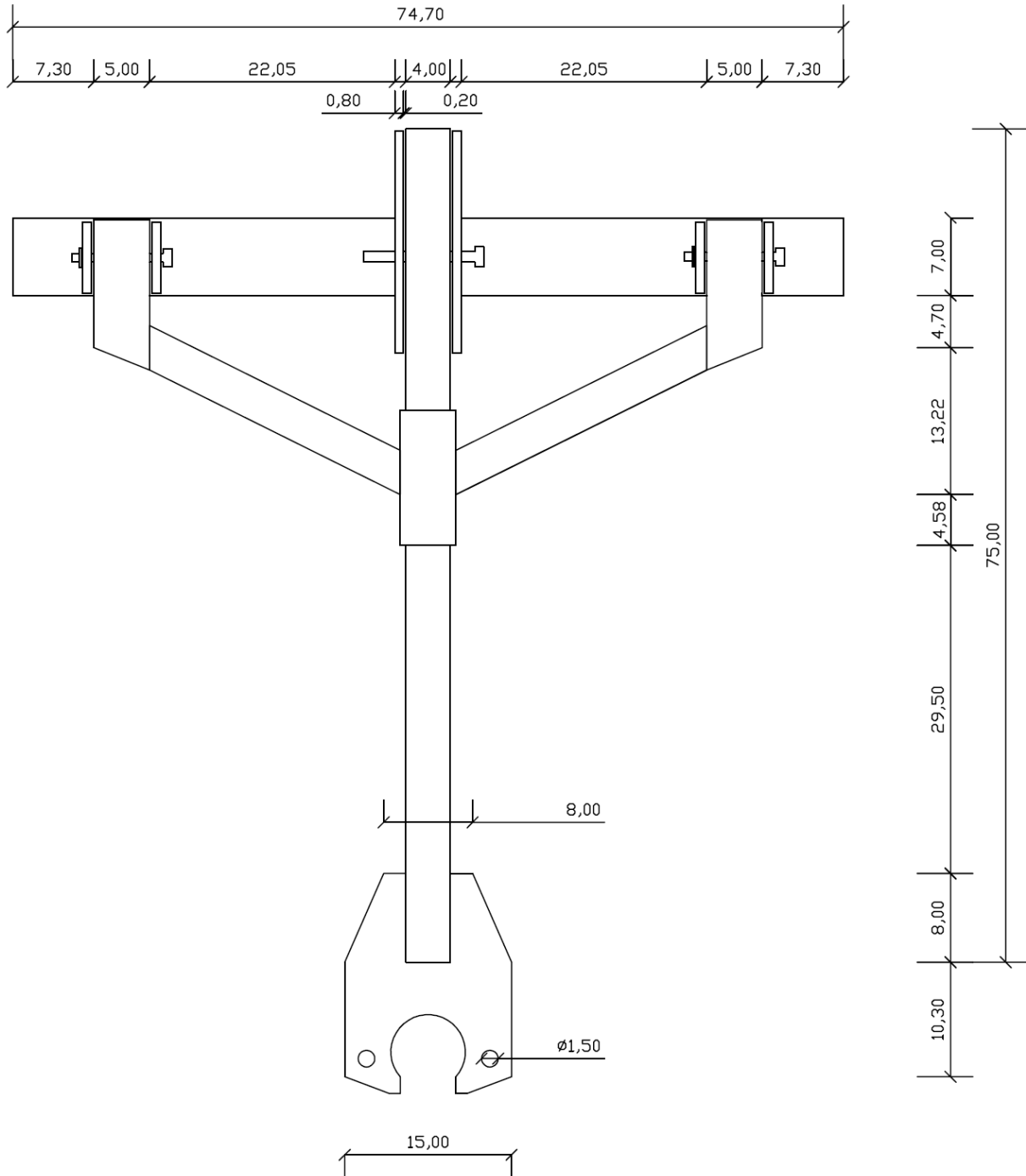


Abbildung A 1: Prototyp Seitenansicht ohne Bürstenmontage (schematische Zeichnung)

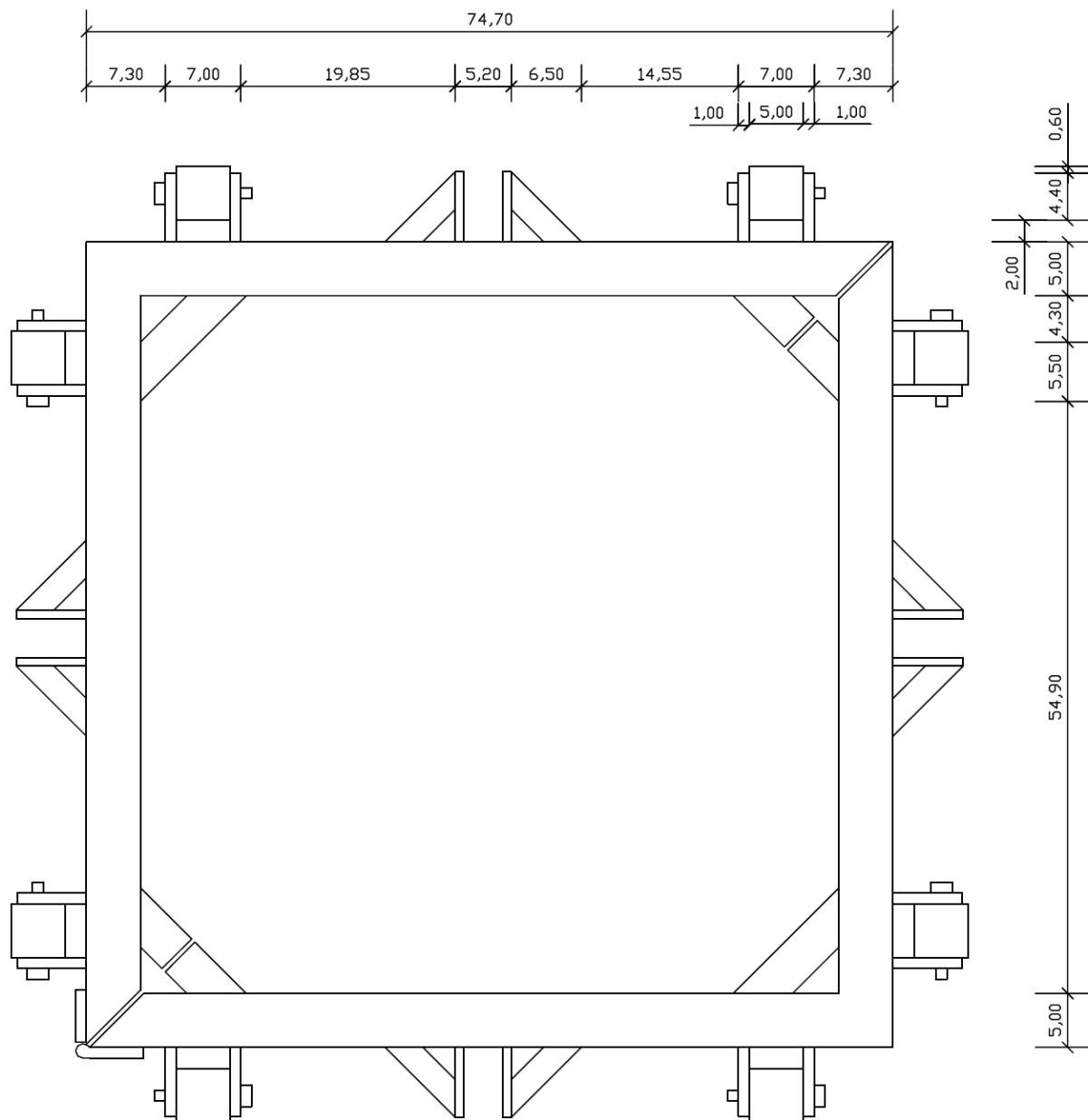


Abbildung A 2: Prototyp einer Pfahlreinigungsmaschine – Draufsicht Stahlrahmen (schematische Zeichnung)

Jahr	2008							2009												2010												
	Monat nach Projektbeginn	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Konstruktion & Technikum Vlies-Montage																																
Entwurf und Bemessung Montagegerät																																
Tests zur Vliesstoffmontage an Land																																
Konstruktion Prototyp Montagegerät																																
Technikumsversuche Montagegerät																																
Überarbeitung Montagegerät																																
Feldversuche Bremerhaven																																
Besprechung/ Begehung Bremenports																																
Baustelleneinrichtung und Vorbereitung																																
Gemeinsame Versuche Reinigungsgerät																																
Überarbeitung Reinigungsgerät																																
Versuche Reinigungsgerät bremenports																																
Gemeinsame Versuche Montagegerät																																
Überarbeitung Montagegerät																																
Versuche Montagegerät bremenports																																
Versuche zum Gesamtverfahren																																
Laboruntersuchungen																																
Versuchsvorbereitungen																																
Voruntersuchungen - Geotextilwahl																																
Flächengewicht nach DIN EN ISO 9864																																
Char. Öffnungsweite nach DIN EN ISO 12956																																
Zugversuch nach DIN EN ISO 10319																																
Dyn. Durchschlagversuch nach DIN EN ISO 13433																																
Wasserdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 11058																																