

# Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau  
Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase



---

## **Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holz- pfählen im Küstenwasserbau**

**Förderkennzeichen: 03KIS023**

**Schlussbericht  
nach BNBest-BMBF 98**

**Rostock, Dezember 2005**

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase  
Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Dede  
Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt  
Dipl.-Ing. Jörg Radomski

## **INHALT**

### **Teil I: Kurzdarstellungen**

- 1 Aufgabenstellung
- 2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
- 3 Planung und Ablauf des Vorhabens
- 4 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage
- 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

### **Teil II: Eingehende Darstellungen**

#### **Kapitel 1: Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses**

- 1 Einführung, Problemstellung und Ziel
- 2 Forschungsansatz
- 3 Lastfall Seegang
  - 3.1 Einführung und Untersuchungsprogramm
  - 3.2 Durchgeführte Untersuchungen und Teilergebnisse
  - 3.3 Ergebnisse und Zusammenfassung
- 4 Lastfall Eis
  - 4.1 Einführung und Untersuchungsprogramm
  - 4.2 Eisverhältnisse an der mecklenburgischen Ostseeküste
  - 4.3 Vertikale Eiskräfte
  - 4.4 Zusammenfassung und Ergebnisse
- 5 Haltekräfte
  - 5.1 Einführung und Untersuchungsprogramm
  - 5.2 Baugrund – durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse
  - 5.3 Horizontale Haltekräfte
  - 5.4 Vertikale Haltekräfte – durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse
  - 5.5 Beeinflussung der Haltekräfte durch Bodenverflüssigungseffekte
- 6 Zusammenfassung und Ergebnisse
- 7 Schrifttum

#### **Kapitel 2: Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

#### **Kapitel 3: Untersuchungen und Ergebnisse Dritter**

#### **Kapitel 4: Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

#### **Anhang**

### **Teil III: Erfolgskontrollbericht**

- 1 Beitrag des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen
- 2 Wissenschaftlich - technisches Ergebnis des Vorhabens
- 3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse
- 4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben
- 5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer
- 6 Einhaltung der Zeit- und Ausgabenplanung

# Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau  
Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase



---

## **Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holz- pfählen im Küstenwasserbau**

**Förderkennzeichen: 03KIS023**

**Schlussbericht  
nach BNBest-BMBF 98**

**Teil I: Kurzdarstellungen**

**Rostock, Dezember 2005**

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase  
Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Dede  
Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt  
Dipl.-Ing. Jörg Radomski

## Danksagung

Der vorliegende Bericht stellt die im Forschungsvorhaben "Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau" durchgeführten Untersuchungen dar und fasst die Ergebnisse zusammen. Das Vorhaben wurde von 2001 – 2005 in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur am Institut für Wasserbau (IWR) der Universität Rostock durchgeführt und von verschiedenen Seiten unterstützt. Wir wollen an dieser Stelle die Gelegenheit wahrnehmen, den zahlreichen Institutionen und Fachkollegen für die geleistete Unterstützung zu danken.

Das Forschungsprojekt wurde über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen beantragt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03KIS023 gefördert. Der Projektträger Jülich übernahm die Mittelbewirtschaftung und war für organisatorische Fragen verantwortlich. Für die finanzielle Unterstützung, ohne die eine Bearbeitung des Forschungsprojektes nicht möglich gewesen wäre, bedanken wir uns herzlich. Insbesondere durch die Genehmigung der Projektlaufzeitverlängerung konnten aufgetretene Verzögerungen kompensiert und wichtige offene Fragestellungen bearbeitet werden.

Besonderer Dank gilt dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock (StAUN) und dem Land Mecklenburg-Vorpommern. Das Projekt wurde vom StAUN Rostock durch den leider früh verstorbenen Herrn Dr. Weiss angeregt, mitgetragen sowie finanziell, logistisch und personell unterstützt. Die Unterstützung des StAUN Rostock erfolgte durch Übernahme von Kosten für Rammarbeiten, für Vermessungsarbeiten, für die Versorgung mit Elektrizität an den Standorten der Feldversuche und der Kosten für Baugrunduntersuchungen an den Versuchsstandorten. Ohne die Einbindung der Projektaktivitäten in laufende Bauvorhaben der StAUN Rostock und Stralsund wären insbesondere die Versuche in der Natur nicht möglich gewesen. Für die vor und während der Projektlaufzeit geleistete Unterstützung, den fachlichen Rat und die Möglichkeit das Archiv des StAUN Rostock zu nutzen, möchten wir uns herzlich, bei Herrn Dr. Gurwell, Herrn Dipl.-Ing. Jäger, Herrn Dipl.-Ing. Schneider, Frau Schmidt und allen direkt oder indirekt am Vorhaben beteiligten Mitarbeitern des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur bedanken. Unser Dank gilt auch dem Land Mecklenburg-Vorpommern, das die Mittel für die Förderung des Vorhabens bereitstellte.

Das IWR wurde während der Projektlaufzeit durch die KFKI-Beratergruppe insbesondere in fachlichen, aber auch in organisatorischen Fragestellungen unterstützt. Die Beratergruppe wurde durch Herr Dr.-Ing. Eggert geleitet und setzte sich weiterhin aus dem Forschungsleiter Küste Herrn Ltd. BD Petersen bzw. Herrn BD Thorenz, Herrn Prof. Dr.-Ing. Maybaum, Herrn Dr.-Ing. Sparboom und Herrn Riemer zusammen. Auch Herr Dr. Blum als Vertreter des Projektträgers nahm an ausgewählten Projektberatungen teil. Für die intensiven Diskussionen und Anregungen, nicht nur während der Projektgruppensitzungen, bedanken wir uns ausdrücklich.

Herr Prof. Blümel und Herr Dr. Schwarz unterstützten bereits bei Antragstellung als externe Berater das Forschungsvorhaben. Mit Prof. Blümel (Universität Hannover) wurden bodenmechanische Fragestellungen diskutiert. Herr Dr. Schwarz und Herr Dr. Kuehnlein von der Hamburgischen Schiffbau und Versuchsanstalt unterstützten uns bei der Planung und Durchführung der Laborversuche zur Ermittlung von vertikalen Eislasten auf Bühnenpfähle und der Bestimmung der mechanischen Eiseigenschaften. Insbesondere die Beratung von Herrn Dr. Schwarz zu den Eislaborversuchen in Wismar vor Ort war besonders hilfreich.

Bedanken möchten wir uns auch bei Prof. Mainka und seinen Mitarbeitern vom Fachgebiet Baukonstruktion und Bauphysik der Universität Rostock, die uns die Nutzung der Klimakammer ermöglichten, sowie bei Prof. Diederichs und den Labormitarbeitern vom Fachgebiet Baustoffe der Universität Rostock, die uns Prüfgeräte zur Ermittlung von Eisfestigkeiten zur Verfügung stellten und die Arbeiten unterstützten.

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig unterstützte das Vorhaben im Rahmen einer Diplomarbeit mit numerischen Berechnungen zur Extrapolation der im Eislabor gewonnenen Ergebnisse.

Unser Dank gilt auch Frau Dr. Schmelzer und dem leider verstorbenen Herrn Dr. Stigge vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Rostock (BSH), die einen Zugang zu regionalen Wetter- und Eisdaten und zu Veröffentlichungen des BSH ermöglichten.

In Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Niederleithinger und Herrn Dipl.-Ing. Taffe von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig wurden Integritätstests zur Bestimmung der Pfahlänge von bereits eingebauten Holzpfählen durchgeführt.

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund unterstützte das Forschungsvorhaben durch die Bereitstellung des Tonnenlegers "Rosenort" zur Ausbringung der Wellenmessboje (Directional Waverider), die zur Erfassung des Wellenklimas genutzt wurde.

Bei der Planung und Interpretation von Versuchen zur Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen wurde das Vorhaben durch Herrn Prof. Triantafyllidis (Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Universität Bochum) und Herrn Prof. Savidis (Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Berlin) unterstützt. Die technische Ausrüstung der Versuche erfolgte in Zusammenarbeit mit der Solexperts AG aus der Schweiz. Für diese Zusammenarbeit möchten wir uns ebenfalls bedanken.

Auch bei den Tourismusverwaltungen des Ostseebads Nienhagen und der Stadt Bad Doberan sowie der Tourismuszentrale Rostock-Warnemünde möchten wir für die Nutzung von strandnahen DLRG-Gebäuden für die Unterbringung von Messtechnik bedanken.

Im Rahmen laufender Bühnenbaumaßnahmen des StAUN Rostock wurde das Forschungsvorhaben durch viele bauausführenden Unternehmen unterstützt, die hie im Einzelnen nicht genannt werden. Trotz des Termindrucks auf den Baustellen war immer Zeit für den Einbau von Versuchspfählen und einen Erfahrungsaustausch.

Einen wichtigen Anteil am Gelingen des Projektes haben unsere studentischen Mitarbeiter. Insbesondere der Aufbau der Versuchseinrichtungen und die Durchführung von Versuche in der Natur bei allen erdenklichen Wetterlagen wäre ohne ihre tatkräftige Unterstützung nicht möglich gewesen. Unterstützt wurden wir auch bei der Erstellung von Software (GeoCon) zur Erfassung und Darstellung von Baugrunddaten. Allen studentischen Mitarbeitern sei daher herzlich gedankt.

Nicht zuletzt bedanken wir uns bei der Zentralen Verwaltung der Universität Rostock, die uns bei der Mittelbewirtschaftung und in Personalfragen unterstützte, und beim Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Rostock.

Abschließend danken wir allen engagierten Kollegen, die das Projekt direkt oder indirekt im Rahmen von Projektbesprechungen oder Diskussionen am Rande von Tagungen und Konferenzen begleitet sowie Anregungen und wertvolle Hinweise gegeben haben.

## Teil I: Kurzdarstellungen

1	Aufgabenstellung.....	2
2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
3.1	Planung.....	4
3.2	Ablauf.....	5
4	Wissenschaftlich-technische Ausgangslage.....	9
4.1	Lastfall Seegang.....	9
4.2	Lastfall Eis.....	10
4.3	Haltekräfte.....	11
4.4	Schrifttum.....	13
4.5	Informations- und Dokumentationsdienste.....	15
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	16

## 1 Aufgabenstellung

In Mecklenburg-Vorpommern werden Bühnen überwiegend als einreihige Holzpfahlbühnen ausgeführt, die aus einer großen Anzahl von in den Boden eingespannten Holzpfählen bestehen. Die Rammtiefe der Pfähle wird seit etwa 100 Jahren empirisch festgelegt. Nach dem angewandten empirischen Bemessungsverfahren liegt das Verhältnis von Wassertiefe zu Rammtiefe bei nichtbindigem Baugrund bei  $1/3$  zu  $2/3$ , während bei bindigem Baugrund etwa  $3/5$  der Pfahllänge in den Baugrund eingebunden werden. Mögliche Veränderungen der Höhenlage der Schorre werden durch ein festgelegtes Pessimprofil, das aus Vermessungsdaten ermittelt wird, berücksichtigt. Auf Grundlage dieser Bemessung werden an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns Holzpfähle mit Pfahllängen zwischen 3 m und 8 m verwendet.

Vom Landesrechnungshof Mecklenburg-Vorpommerns wurde kritisiert, dass die so ermittelte Einspannlänge möglicherweise überdimensioniert und demnach hinsichtlich der Ramm- und Materialkosten ein Einsparpotential gegeben sei. Eine Begründung des verwendeten rein empirischen Bemessungsverfahrens war nicht möglich. Die für die Bühnenbaumaßnahmen des Landes zuständige Behörde, das Staatliche Amt für Umwelt und Natur regte daraufhin ein Forschungsvorhaben zu diesem Thema an.

Das Institut für Wasserbau der Universität Rostock (IWR – Prof. Kohlhase) und das Staatliche Amt für Umwelt und Natur (StAUN – Dr. Weiss) Rostock beantragten nach Diskussion der Problematik beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein Forschungsvorhaben mit dem Titel "Bühnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau". Das Vorhaben wurde über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) beantragt und unter dem Förderkennzeichen 03KIS023 am 14.05.2001 bewilligt.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Bestimmung der notwendigen Einspannlänge von Bühnenpfählen auf natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlage abhängig von der wirkenden Belastung, vom Standort, den Baugrundeigenschaften, der Wassertiefe und der Position des Pfahls in der Pfahlreihe. Dazu war es notwendig, alle am System Holzpfahl - Baugrund auftretenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen und zu bewerten.

Bühnenpfähle werden in Mecklenburg-Vorpommern im Strandbereich und in der Brandungszone sandiger Küstenabschnitte in Wassertiefen bis zu 3 m eingesetzt. Die Pfähle werden im Wesentlichen durch Seegang, Strömungen und Eiskräfte beansprucht (treibende Kräfte). Die Haltekräfte sind von den Eigenschaften des Bodens, der Art der Beanspruchung (horizontal, vertikal, statisch, dynamisch), den Pfahleigenschaften und natürlich der Einspannlänge im Boden abhängig.

Neben der wissenschaftlichen Zielsetzung war die Erarbeitung eines praktisch anwendbaren Bemessungsansatzes zur Bestimmung der notwendigen Einspannlänge von Bühnenpfählen als Bemessungsempfehlung und Planungshilfe der für den Küstenschutz zuständigen Verwaltung (StAUN) das wichtigste Ziel des Vorhabens. Das zu entwickelnde

Bemessungsverfahren sollte im Interesse der Praxistauglichkeit auf möglichst wenige, bekannte oder unkompliziert zu ermittelnde Parameter vereinfacht werden. Eine Aufnahme des Bemessungsverfahrens in den "Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern", der Planungsgrundlagen und Eingangsdaten zur Ausführung und Bemessung von Küstenschutzbauwerken enthält, ist vorgesehen.

Die Zielsetzungen des Forschungsvorhabens beschränken sich ausschließlich auf konstruktive Gesichtspunkte (Bemessung) des Systems Pfahl – Boden. Funktionelle Fragestellungen, wie z.B. die erforderliche Länge einer Buhne, der Buhnenabstand oder die notwendige Durchlässigkeit von Buhnenbauwerken zur Reduzierung von Lee-Erosion sind nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens.

## 2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsvorhaben "Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau" wurde von 06/2001 bis 06/2005 vom BMBF auf Ausgabenbasis über den Projektträger Jülich gefördert. Projektpartner war das Staatliche Amt für Umwelt und Natur Rostock (StAUN). Das Projekt wurde vom StAUN Rostock mitgetragen und finanziell, logistisch und personell unterstützt. Die Unterstützung des StAUN Rostock erfolgte konkret durch Übernahme der Kosten für Rammarbeiten, für Vermessungsarbeiten, für die Versorgung mit Elektrizität an den Standorten der Feldversuche und der Kosten für Baugrunduntersuchungen an den Versuchsstandorten. Es wurde der Zugriff auf das Archiv des StAUN Rostock ermöglicht. Die Projektaktivitäten wurden in laufende Bauvorhaben des StAUN eingebunden. In regelmäßigen Besprechungsterminen wurden der Projektfortschritt besprochen und Planungen insbesondere der Versuche in der Natur abgestimmt. Es erfolgte ein ständiger Erfahrungsaustausch während des Projektes. Die Projektkoordination auf Seiten des StAUN übernahm Herr Dipl.-Ing Jäger.

Die Federführung des Vorhabens lag in Händen des Instituts für Wasserbau der Universität Rostock unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase. Er wurde dabei durch Dr.-Ing. Peter Fröhle unterstützt.

Aus Projektmitteln wurden die folgenden 3 Mitarbeiter beschäftigt:

Wissenschaftliches Personal:

Dr. rer. nat. Christian Dede	1/2 Stelle
Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt	1/1 Stelle

Technisches Personal:

Dipl.-Ing. Jörg Radomski	1/2 Stelle
--------------------------	------------

Dr. Christian Dede war für die Projektkoordination und geotechnische Fragestellungen, Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt für die wissenschaftliche Bearbeitung, wasserbauliche Fragestellungen und Projekthaushalt und Dipl.-Ing. Jörg Radomski für die Messtechnik im Labor und in der Natur zuständig.

Während der Projektlaufzeit wurden die Projektmitarbeiter durch die KFKI-Beratergruppe insbesondere in fachlichen Fragestellungen unterstützt. Zur Beratergruppe gehörten Herr Ltd. BD Petersen, Herr BD Thorenz, Herr Dr.-Ing. Eggert, Herr Prof. Dr.-Ing. Maybaum, Herr Dr.-Ing. Sparboom, Herr Rieme. Teilweise nahmen auch Vertreter des Projektträgers an Projektberatungen teil (Herr Dr. Blum).

Die Felduntersuchungen zur Beanspruchung von Bühnenpfählen durch Seegang, zu haltenden Kräften und Baugrunduntersuchungen wurden in enger Abstimmung mit dem StAUN Rostock an der Ostseeküste von Mecklenburg-Vorpommern an den Standorten Heiligendamm, Nienhagen, Warnemünde, Markgrafenheide, Graal-Müritz, Wustrow und Zingst (West, Ortslage, Ost) durchgeführt. Die Untersuchungen wurden in laufende Bühnenbaumaßnahmen des StAUN Rostock eingebunden. Somit konnte Gerätetechnik z.B. zum Rammen von Versuchspfählen genutzt werden.

Bei den im Projekt durchgeführten Laborversuchen (Schwingungsversuche, Materialprüfung, Eisversuche, bodenmechanische Kennwerte) wurde das IWR durch Herrn Prof. Diederichs (Fachgebiet Baustoffkunde), Herrn Prof. Mainka (Fachgebiet Baukonstruktion) sowie das Fachgebiet Geotechnik unterstützt. Das IWR hatte insbesondere die Möglichkeit, Prüfmaschinen für Materialuntersuchungen und die Ermittlung bodenmechanischer Kennwerte, die Klimakammer für Eisversuche und Erfahrungen der Mitarbeiter dieser Fachgebiete der Universität Rostock zu nutzen.

Für die Konstruktion, den Bau und die Installation von Versuchseinrichtungen wurde auf Mitarbeiter des IWR-Labors und der Werkstatt des IWR zurückgegriffen (Frau Sturm, Herr Hähn). Für die Durchführung der Materialuntersuchungen an Bühnenpfählen, zur Unterstützung bei den Feldversuchen, die Erfassung von Archivdaten und für Literaturrecherchen wurden studentische Hilfskräfte beschäftigt.

Das Vorhaben wurde logistisch durch die zentrale Infrastruktur der Universität Rostock, wie z.B. die Fahrzeuge der Fahrbereitschaft und das Rechenzentrum sowie durch Mitarbeiter der Universitätsverwaltung unterstützt.

### **3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

#### **3.1 Planung**

Der zeitliche Rahmen für den Ablauf der vorgesehenen Untersuchungen wurde bereits während der Erstellung des Projektantrages geplant. Die Detailplanung der Untersuchungen z.B. Festlegung der Messstandorte in der Natur oder der zeitliche Ablauf der Laboruntersuchungen sowie Detailplanung, Konstruktion und Bau von Versuchseinrichtungen (Zugleinrichtung, Eisversuchsstand) wurde innerhalb der Projektlaufzeit nach Arbeitsfortschritt durchgeführt.

Während der Beantragung des Forschungsprojektes und der späteren Begründung einer Projektlaufzeitverlängerung wurden Projektablaufpläne für die einzelnen geplanten Unter-

suchungen erstellt. Die Ablaufpläne sind in den Anträgen erläutert. Sie werden im Abschnitt 3.2 zum besseren Verständnis nochmals wiedergegeben.

Alle wesentlichen Schritte wurden in regelmäßigen Arbeitsbesprechungen mit dem Projektpartner (StAUN Rostock) abgestimmt. Wichtige Veränderungen innerhalb des Projektablaufs wurden mit der KFKI-Beratergruppe im Detail besprochen.

Von den Beratungen wurden fortlaufend Protokolle gefertigt, die dem Projektpartner, dem Projektträger, den Mitgliedern der KFKI-Beratergruppe und den internen Beratern zugesandt wurden.

### **3.2 Ablauf**

Das Forschungsvorhaben „Beanspruchung und Bemessung im Küstenwasserbau“ wurde am 01.07.2001 begonnen. Der ursprünglich im Projektantrag vorgestellte Projektablaufplan ist in Abb. 1 wiedergegeben und wird im Folgenden kurz kommentiert.

Es wurde wie geplant mit der Auswertung von Informationen zum Bühnenbau allgemein und der Sichtung von Baugrunddaten begonnen.

Vom Projektträger wurde der Nachweis der Funktion des Messverfahrens zur Erfassung seegangsinduzierter Pfahlbewegungen innerhalb einer Vorphase von 9 Monaten der Projektlaufzeit gefordert. Zum Beginn der Projektbearbeitung wurden daher zunächst Vorversuche zur optimalen Messgerätekonfiguration und zur Auswahl von geeigneten Beschleunigungssensoren durchgeführt. Nach umfangreichen Tests wurde die Funktionalität des Messverfahrens nachgewiesen und die erforderliche Messtechnik beschafft. Eine geeignete Technik zur Installation der Sensoren in die Bühnenpfähle wurde entwickelt. Sie ist in Abschnitt II dieses Berichts näher erläutert.

Entsprechend des Arbeitsplanes wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Schwarz (früher Hamburgische Schiffbau Versuchsanstalt - HSVA) der Versuchsaufbau zur Ermittlung von vertikalen Eislasten auf Holzpfähle weiterentwickelt. Vorversuche in der Klimakammer konnten abweichend vom Zeitplan erst ab Mai 2003 beginnen, da die Klimakammer durch andere Forschungsvorhaben genutzt wurde

Auf einem Statusseminar im März 2002 wurde der erreichte Projektfortschritt der KFKI-Beratergruppe vorgestellt. Aufgrund einer positiven Bewertung der Ergebnisse durch die Berater wurden die Projektmittel vom Projektträger bis zum geplanten Ende des Projektes (30.06.2004) freigegeben.

Wie im Ablaufplan des Antrags vorgesehen, wurden während der an die Vorphase anschließenden Projektlaufzeit die Untersuchungen zu den Lastfällen Seegang, Eis und zu haltenden Kräften weitgehend zeitgleich durchgeführt. Parallel zu den Untersuchungen im Feld und im Labor wurden die Messergebnisse ausgewertet. Die Übereinstimmung der Ergebnisse mit bereits vorhandenen Theorien wurde geprüft.





Zwei deutliche Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan waren (1.) auf äußere Einwirkungen und (2.) auf die im Projekt gewonnenen Ergebnisse zurückzuführen, und werden im Folgenden kurz erläutert.

1. Die Untersuchungen am Messstandort Heiligendamm, die für den Winter 2002 / 2003 vorgesehen waren, wurden durch technische Probleme und den Einfluss einer Baustelle im unmittelbaren Untersuchungsbereich verhindert. Es kam zu Zerstörungen an der Messeinrichtung, die während des Baustellenbetriebs nicht behoben werden konnten. Die Feldmessungen zur Erfassung seegangsinduzierter Pfahlschwingungen verzögerten sich dadurch um ein Jahr. Der für das Folgejahr geplante Umzug der Messeinrichtung nach Zingst wurde ebenfalls um ein Jahr verschoben. Eine detaillierte Darstellung der Gründe für die Verzögerung enthält der 2. Zwischenbericht (Januar 2003).
2. Die Ergebnisse der Untersuchungen zu seegangsinduzierten Pfahlschwingungen deuteten auf die Möglichkeit von Bodenverflüssigung im Umfeld der Pfähle hin. Die gemessenen Schwingungsfrequenzen der Pfähle liegen in einem Bereich, in dem Bodenverflüssigungseffekte auftreten können. Schwingungen wurden bei sandigen Baugrundtypen bis in den Boden hinein nachgewiesen. Während der Beantragung des Projekts wurde davon ausgegangen, dass mit den aus den Pfahlbewegungsmessungen gewonnenen Daten (Frequenz und Amplitude des schwingenden Pfahls) auf eine Gefährdung der Pfähle durch Bodenverflüssigung geschlossen werden kann. Während der Bearbeitung dieser Fragestellung wurde Kontakt zu Wissenschaftlern aufgenommen, die sich seit langem mit dieser Fragestellung beschäftigen. Eine weitere wichtige Eingangsgröße zur Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten ist die Porenwasserdruckerhöhung in der direkten Umgebung des schwingenden Pfahls. Es existierte kein Verfahren, diese Größe aus der Pfahlbewegung abzuleiten. Da mögliche Bodenverflüssigungseffekte von erheblicher Bedeutung für die Standsicherheit der Pfähle sind, wurde ein Untersuchungsprogramm zur Erfassung von Porenwasserüberdruck infolge Pfahlschwingungen konzipiert.

Die im Messprogramm zur Erfassung von Pfahlschwingungen aufgetretenen Verzögerungen und das Untersuchungsprogramm zur Erfassung von Porenwasserüberdruck wurden auf der Herbstsitzung 2003 der KFKI-Beratergruppe vorgestellt.

Insbesondere die Verzögerungen der Untersuchungen zu seegangsinduzierten Pfahlschwingungen wurden als kritischer Einschnitt in das ursprünglich geplante Messprogramm gewertet. Ein daraufhin formulierter Verlängerungsantrag wurde durch das KFKI unterstützt. Der Projektträger stimmte einer Verlängerung der Projektlaufzeit um ein Jahr zu und bewilligte zusätzliche finanzielle Mittel in Höhe von 59.543,- €. Aus Restmitteln des Projekthaushaltes (06/2001-06/2004) wurden weitere ca. 60.000,-€ zur Finanzierung der Projektlaufzeitverlängerung verwendet. Der Projektpartner StAUN Rostock beteiligte sich über eine proportionale Fortführung der zugesagten Leistungen hinaus mit ca. 22.000,-€ für die Beschaffung einer Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck. In

Abb. 2 ist der Projektablaufplan für den Zeitraum von Januar 2004 bis zum Projektende (30.06.2005) dargestellt.

Der Zeitplan (Zeitraum 01/2004-06/2005) für die im Projekt geplanten Untersuchungen wurde weitgehend eingehalten. Versuche zur Erfassung von seegangsinduzierten Pfahlschwingungen konnten ohne größere Verzögerungen durchgeführt werden. Abweichungen ergaben sich in folgenden Punkten:

- die Integritätstests wurden erst im September 2004 in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der Bundesagentur für Materialprüfung durchgeführt
- die geplanten Eisversuche wurden bereits im April / Mai 2004 durchgeführt, da die Klimakammer in diesem Zeitraum genutzt werden konnte

Am 30.06.2005 endete das Forschungsvorhaben planmäßig. Alle Messeinrichtungen in der Natur wurden abgebaut. Die Messtechnik wurde gewartet. Sie wird im Fachgebiet Küstenwasserbau (ehem. IWR) des Institutes für Umweltingenieurwesen der Universität Rostock weiter für Forschungszwecke verwendet.

## **4 Wissenschaftlich-technische Ausgangslage**

Buhnenpfähle werden durch Kräfte aus Seegang, Strömungen und Eis belastet. Den Belastungen wirken die Haltekräfte des Systems Pfahl–Boden entgegen. Entsprechend dem Forschungsansatz (vgl. Teil II) wird die wissenschaftlich–technische Ausgangslage getrennt nach den Lastfällen Seegang und Eis sowie den Haltekräften dargestellt.

### **4.1 Lastfall Seegang**

Seegang ist einer der maßgeblichen Belastungen auf Buhnenpfähle. Die zu untersuchende Wirkungskette und damit das Untersuchungsprogramm gliedert sich in folgende Schwerpunkte:

1. Erfassung der Seegangparameter und der Randbedingungen
2. Erfassung der Pfahlbewegungen
3. Ermittlung der Übertragungsfunktion von Seegang und Pfahlbewegung unter Beachtung der Randbedingungen (z.B. Wasserstand)

Während die Erfassung des Seegangs mit Hilfe von Seegangsmessbojen und Druckmessdosen im IWR heute als Standardverfahren bezeichnet werden kann, waren die Erfassung von Pfahlbewegungen mit Beschleunigungssensoren unter den Bedingungen im Projekt im Hinblick auf die einzusetzende Messtechnik sowie deren Installation in technischer Hinsicht Neuland.

Hinsichtlich der Auswirkungen von Seegang auf Pfähle kann auf viele Arbeiten, vor allem die Untersuchungen von BURKHARD (1967) und von SPARBOOM (1986) zurückgegriffen werden. Von SPARBOOM waren die Wellenlasten auf einen vor Norderney installierten

Versuchspfahl im Flachwasserbereich gemessen worden. Weitere Untersuchungen zur Wellenlast auf Stahlpfähle wurden im Großen Wellenkanal Hannover durchgeführt. Ziel der Versuche war es, die Wellenlast auf Pfähle mit Hilfe von Druckmessgebern zu untersuchen. Die Pfahlreaktion wurde dabei nicht beobachtet.

Zur Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Holzpfählen als wesentliche Voraussetzung zur Berechnung von Haltekräften des Pfahls wurde nach theoretischen und praktischen Vorüberlegungen das Beschleunigungsmessprinzip einer direkten Messung vorgezogen. Beschleunigungsmessungen an durch Seegang belasteten Holzpfählen im Flachwasserbereich sind nicht bekannt. Bekannt waren Beschleunigungsmessungen von GERASCH et al. an Holzdalben im Nord-Ostsee-Kanal, die der Bestimmung der Eigenfrequenz der Dalben und der Ermittlung der Wegamplituden aus den Beschleunigungsamplituden dienten. Die Dalben wurden mit Hilfe eines Seils ausgelenkt und ruckartig freigegeben. Danach konnten die Dalben frei ausschlagen.

Die Köpfe der Bühnenpfähle werden im Flachwasserbereich durch Wellenkräfte, insbesondere brechende Wellen, belastet. Letztere führen zu dynamischen Stoßbelastungen. Durch die Belastung kommt es zu Schwingungen des Pfahls. Die Dämpfung des Pfahl-Boden-Systems wirkt der anregenden Wellenkraft entgegen. Einflüsse der hydrodynamischen und der mitschwingenden dynamischen Masse waren weitgehend unbekannt.

Zu technischen Daten und Einsatz von Beschleunigungssensoren in der Industrie insbesondere im Schiffbau gibt es zahlreiche Veröffentlichungen, die zur Auswahl der Beschleunigungssensoren ausgewertet wurden. Die Auswertung zeigte das Erfordernis einer Anpassung der verfügbaren Technik an die besonderen Anforderungen in der Brandungszone.

Für die Auswertung von Bewegungsmessungen war neben der Erfassung des Seegangs auch die Erfassung weiterer Randbedingungen am Pfahl notwendig. Zu diesen zählt insbesondere die Wassertiefe am Pfahl und die freie Pfahllänge über dem Boden. Dazu sind Informationen über den Wasserstand und eventuelle Schorreveränderungen / Kolke notwendig.

Es war geplant Wasserstandsdaten, die von vorhandenen Messstationen des Internen Messnetz Küste des StAUN (IMK) und des BSH geliefert werden, zu nutzen. Schorreveränderungen und Kolke sollten durch regelmäßige tachymetrische Vermessung erfasst werden.

## **4.2 Lastfall Eis**

An Bühnenpfählen können horizontale und vertikale Eiskräfte auftreten. Für die Ermittlung horizontaler Eislasten auf Pfähle sind wissenschaftlich anerkannte Untersuchungen und Berechnungsverfahren (insbesondere SCHWARZ 1971) vorhanden. Entsprechend dem Forschungsantrag werden daher im Vorhaben nur vertikale Eislasten auf Holzpfähle untersucht.

Vertikale Eiskräfte entstehen an Holzpfählen infolge einer an den Pfahl festgefrorenen geschlossenen Eisdecke und nachfolgender Änderung des Wasserstands. Bei fallendem

Wasserstand ist eine Gefährdung von Pfählen unwahrscheinlich, da den Eiskräften die Mantelreibung Pfahl - Boden und der Spitzendruck des Pfahls im Boden entgegenstehen. Bei steigendem Wasserstand müssen die vertikalen Eislasten von der Mantelreibung des Pfahls im Boden aufgenommen werden, um ein Versagen der Konstruktion zu verhindern.

Vertikale Eiskräfte werden in Deutschland üblicherweise nach den „Empfehlungen des Arbeitskreises Ufereinfassungen“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (EAU 1996 / 2004) berechnet. Bereits bei der Planung des Vorhabens waren Zweifel an dem der EAU zugrundeliegenden physikalischen Modell aufgetreten. Das in der ehemaligen DDR zur Berechnung verwendete Verfahren nach KUSNEZOW ergibt bei gleichen Eisverhältnissen deutlich höhere Lasten als der Ansatz der EAU. Die Grundlagen des Verfahrens waren aber nicht mehr zu ermitteln. Von den EAU abweichende Ergebnisse werden auch nach den Bautechnischen Normen und Regeln des MINISTERIUMS RUSSLANDS 1995 errechnet.

Die im Forschungsvorhaben durchgeführten Labor- und Modelluntersuchungen dienten dementsprechend der Überprüfung und Verifikation der verfügbaren Berechnungsansätze. Ziel war die Ermittlung realistischer vertikaler Eislasten auf Holzpfähle. Die Versuchseinrichtung des Vorhabens wurde in Anlehnung an eine Versuchseinrichtung, wie sie von FREDERKING und KARRI 1983 genutzt wurde, geplant und hergestellt. Die Tests von FREDERKING und KARRI dienten hauptsächlich der Ermittlung der Haftungskräfte von Eis an Modellpfählen aus unterschiedlichem Pfahlmaterial (Stahl, Holz, Beton, PVC, PE). Es wurde bei der Entwicklung und Durchführung der eigenen Laborversuche auch auf Erfahrungen der Hamburgischen Schiffbau und Versuchsanstalt (Dr. Schwarz, Dr. Kuehnlein) zurückgegriffen.

### **4.3 Haltekräfte**

Die Haltekräfte des Systems Pfahl-Boden sind von den Haltekräften des Pfahls im Boden und von den Pfahleigenschaften abhängig.

Bei der Ermittlung der Festigkeitseigenschaften (Biegefestigkeit, Zugfestigkeit) der Holzpfähle wurde auf Angaben in der Literatur und in Normen (DIN 1052) zurückgegriffen. Der Nachweis der Querschnitttragfähigkeit erfolgte nach anerkannten Normen des Holzbaus (DIN 1052). Die elastischen Eigenschaften von Holzpfählen, die die Schwingungseigenschaften bestimmen, werden typischerweise von den Holzlieferanten für die verschiedenen Holzarten angegeben. Sie werden im Labor stichprobenartig nach DIN 52186 überprüft.

Die Haltekräfte im Boden können in vertikale Haltekräfte, die durch Mantelreibung des Pfahls im Boden entstehen, und horizontale Haltekräfte durch Erddruck gegliedert werden.

Für die Berechnung horizontaler Haltekräfte wird, wie im Antrag vorgesehen, auf vorhandenen Berechnungsansätze aus der Geotechnik zurückgegriffen.

Bei der Ermittlung der vertikalen Haltekräfte ist das Eigengewicht und der Auftrieb der Holzpfähle zu beachten. Die dafür erforderlichen Materialeigenschaften (Dichte) werden

von den Lieferfirmen der Holzpfähle angegeben. Zur Berechnung von Pfahlhaltekraften im Boden (Mantelreibung oder Bodenkörpermodell) liegt eine große Zahl von Berechnungsverfahren vor, die aber erheblich voneinander abweichende Ergebnisse erzeugen. Durch eine größere Zahl von Zugversuchen an Bühnenpfählen unter verschiedenen Baugrundbedingungen sollte eine Bewertung der Verfahren und die Auswahl praxistauglicher Rechenansätze ermöglicht werden. Die Versuchseinrichtung wurde im IWR konstruiert und von einer Metallbaufirma (Stahlbau Ruhnke) hergestellt. Die Versuche wurden unter Berücksichtigung der Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (DGGT) 1998 durchgeführt.

Einen wichtigen Einfluss haben bodendynamische Effekte. Bei dynamischer Beanspruchung des Bodens kann es zu Bodenverflüssigungseffekten kommen. Die Haltekraften werden stark herabgesetzt. Bei Antragstellung war zunächst die Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten auf Grundlage der erfassten Pfahlschwingungen geplant. Ein aus dem Gebiet der Geotechnik verfügbares Abschätzungsverfahren wurde vorausgesetzt.

Bodenverflüssigungseffekte sind stark von der Entwicklung eines Porenwasserüberdrucks abhängig. Insbesondere die Ermittlung wirksamer Porenwasserdrücke aus Pfahlschwingungen ist Gegenstand der Forschung. Ein Berechnungsverfahren konnte dem Vorhaben nicht zur Verfügung gestellt werden. Der Zusammenhang wurde daher im Zeitraum einer Projektlaufzeitverlängerung untersucht.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung auf Verlängerung der Projektlaufzeit (Frühjahr 2004) war eine Ermittlung des Porenwasserüberdruckes im Umfeld eines schwingenden Pfahles mit bekannter Frequenz und Amplitude nicht möglich, obwohl der Anstieg des Porenwasserüberdruckes und der Effekt der Bodenverflüssigung technisch vielfach genutzt wird (z.B. Einbringung von Spundwänden oder Pfählen mit Vibrationstechnik). Methodisch wurde bei den Untersuchungen im Forschungsvorhaben auf Erfahrungen von TRIANTAFYLLIDIS 1998 zurückgegriffen, der den Porenwasserüberdruck im Umfeld von Stahl-Spundbohlen unter Einfluss von Rammarbeiten in der unmittelbaren Nachbarschaft der Pfähle beobachtete. Die dabei wirksamen Frequenzen, Amplituden und vor allem der Energien sind jedoch mit den Verhältnissen im vorliegenden Projekt nicht vergleichbar.

#### 4.4 Schrifttum

Das folgende Schrifttum wurde im Zuge der Antragstellung verwendet. Während des Forschungsvorhabens wurden weitere Quellen ausgewertet. Eine Aufstellung der während der Projektlaufzeit 2001-2005 verwendeten Quellen ist im Teil II dieses Abschlussberichtes wiedergegeben. Eigene Veröffentlichungen sind ebenfalls im Teil II aufgelistet.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE) (1994): Coastal groins and nearshore breakwaters; Technical Engineering and design guides as adapted from the US Army Corps of Engineers, No. 6.- 87 S., New York

BALTHAUS, H. & KIELBASSA, S. (1991): Theoretische Grundlagen dynamischer Pfahltestverfahren.- Dynamische Pfahltests, Fachseminar 21./22.01.1991, Mtlg. Inst. Grundbau u. Bodenmechanik TU Braunschweig, 38, S. 41 – 72, Braunschweig

BURKHARDT, O. (1967): Über den Wellendruck auf senkrechte Kreiszyylinder.- Mitteilungen des Franzius Instituts, 29, S. 58 - 201, Hannover

BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE, BSH (1991): Beobachtungen des Eisbedeckungsgrades und der Eisdicke an der deutschen Küste zwischen Ems und Trave in den Wintern 1954/55 bis 1986/87.- Meereskundliche Beobachtungen und Ergebnisse, 72, Hamburg

FLEMMING, C.A. (1990): Guide on the use of groynes in coastal engineering.- Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) Report 119, London

DETTE, H.H. & TRAMPENAU, T. (1998): Wirkungsweise von Einbauten in See, Teilprojekt: Hydrologische Untersuchungen.- Forschungsbericht MTK 0546, 84 S., 2 Anlagen, Leichtweiss Institut f. Wasserbau, Braunschweig

EAK (1993): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken - herausgegeben vom Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 541 S., Heide

EAU (1996): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“.- herausgegeben vom Arbeitsausschuß „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 593 S., Berlin

ERTEL, H. (1967): Theorie der Strömung um Seebuhnen.- 8 S., unveröff. Bericht im Archiv des StAUN Rostock, Berlin

FREDERKING, R. & KARRI, J. (1981): Laboratory tests on ice sheet adhesion on piles of different materials.- 96 S., Espoo, Finnland

FRÖHLE, P. (2000): Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus.- Rostocker Berichte aus dem Fach Bauingenieurwesen Heft 2, Rostock

GERASCH, W.; LOGEMANN, M. UND SCHELLING, W. (1991): Großversuch an alten und neuen Holzdalben im Nord-Ostsee-Kanal.- Bautechnik, 68, H. 12, S. 399 – 405, Berlin

GRABE, J.; SCHULER, U. & TRIANTAFYLLIDIS, TH. (1991): Vergleich von dynamischen Pfahlprüfverfahren anhand von dynamischen und statischen Pfahltests.- Dynamische Pfahltests, Fachseminar 21./22.01.1991, Mttlg. Inst. Grundbau u. Bodenmechanik TU Braunschweig, 38, S. 135 - 147, Braunschweig

IAHR (1980): Standardisation of testing methods for Ice properties proposed by the working group of the IAHR Section on Ice-Problems. Journ. of Hydraulic Research 18, No. 2, 1980

HARTUNG, M. (1994): Einflüsse der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit in Sand.- Mittlg. Inst. Grundbau u. Bodenmechanik TU Braunschweig, 170 S. Braunschweig

MINISTERIUM FÜR BAU, LANDESENTWICKLUNG UND UMWELT (Hg) ( 1994): Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Mecklenburg-Vorpommern.- 108 S., 4 Karten, Schwerin

NÖTHEL, H.; SUNDAR, V.; & HOLZ, K.-P. (1992): Statistische Analyse von Meßdaten aus einem Buhnenfeld.- Die Küste, 54, S. 111 - 130, Heide

RAMLOW, J. (1998): Bericht zur Untersuchung aller Buhnensysteme an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns,- StAUN Rostock, unveröffentlicht

RUPERT, D. (1976): Zur Bemessung und Konstruktion von Fendern und Dalben.- Mitteilungen des Franzius Instituts, 44, S. 112 – 288, Hannover

SANDERSON, T. J. O. (1988): Ice Mechanics, Risks of Offshore Structures.- Graham & Trotmann

SEEHYDROGRAPHISCHER DIENST DER DDR (1985): Seehandbuch Ostsee, III. Teil: Von Flensburg bis zur Linie TorHamnsudde – Palanga.- 357 S., Rostock

SCHWARZ, J. (1971): Treibeisdruck auf Pfähle.- Die Küste, 21, S78 – 85, Heide

SCHWARZER, K. & SCHRADER, E. (1998): Wirkungsweise von Einbauten in See, Teilprojekt: Hydrologische Untersuchungen.- Forschungsbericht MTK 0546, 89 S., Anhang, Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum der Christian-Albrechts-Universität, Kiel

SIMMER, K. (1985): Grundbau, Teil 2: Baugruben und Gründungen.- 486 S., Stuttgart

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.- 8 p. Sonderdruck aus Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 42./1998, Heft 4

SPANNRING, M. (1999): Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fließgewässers – Parameterstudie an einem numerischen Modell.- 186 S., München

SPARBOOM, U. (1986): Über die Seegangsbelastung lotrechter zylindrischer Pfähle im Flachwasserbereich.- Mitteilungen aus dem Leichtweiss-Institut, 93, S 1 – 194, Braunschweig

STAHLMANN, J, ET AL. (2004): Pfahltests – modern dynamisch und / oder konservativ statisch.- 4. Kolloq. Bauen in Boden und Fels, Techn. Akademie Esslingen

STRÜBING, K. (1994): Der Eiswinter 1993/94 im deutschen Küstengebiet zwischen Ems und Oder.- Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 46, No. 2, Hamburg und Rostock

STUEMUND (1954, unveröff, im Archiv des StAUN Rostock): Herstellung der einreihigen Pfahlbuhne in offener Bauweise. (Stromdurchlässige Buhnen).- 8 S, 2 Anlagen, Graal-Müritz

WEISS, D. (1991): Einreihige Holzpfahlbuhnen im technischen Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern.- Die Küste, 52, 205 – 224, Heide

WEISS, D. & GÖRICKE, F. (1998): Wirkungsweise von Einbauten in See, Teilprojekt: Morphologie.- Forschungsbericht MTK 0546, 91 S., Anhang, Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock, Abteilung Küste, Rostock

#### 4.5 Informations- und Dokumentationsdienste

Folgende Informations- und Dokumentationsdienste wurden während der Projektlaufzeit zur Recherche themenbezogener Fachliteratur verwendet:

Datenbanken – Bibliothek:

- Regional Katalog Rostock
- Gemeinsamer Verbundkatalog mit Online Contents (GVK-Plus)
- Katalog (OPAC) der TIB / UB Hannover
- KfKI-Bibliothek
- Informationszentrum RAUM und BAU (IRB)

Schriftenreihen:

- Fachgebiet Geotechnik Universität Kassel
- Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik Universität Essen
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig
- Franzius Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover
- Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik Universität Fridericiana Karlsruhe

- Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik Ruhr-Universität Bochum
- Fachbereich Bauingenieurwesen – Bodenmechanik und Grundbau Bergische Universität, Wuppertal
- „Die Küste“ Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee
- Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- Institut für Bauingenieurwesen Universität Rostock

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Prof. Blümel (TU Hannover, Bodenmechanik) und Dr. Schwarz (HSVA / Hamburg, Eisversuche) unterstützten als externe Berater das Forschungsvorhaben. Mit Prof. Blümel wurden bodenmechanische Fragestellungen diskutiert. Herr Dr. Schwarz unterstützte die Projektmitarbeiter bei der Planung der Laborversuche zur Ermittlung von vertikalen Eislasten auf Bühnenpfähle und der Bestimmung der mechanischen Eiseigenschaften.

Frau Dr. Schmelzer und Herr Dr. Stigge vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Rostock (BSH) ermöglichten einen Zugang zu regionalen Wetter- und Eisdaten des BSH.

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig unterstützte das Vorhaben im Rahmen einer Diplomarbeit mit numerischen Berechnungen zur Übertragung der im Eislabor gewonnenen Ergebnisse auf realistische Eisdicken. Vorversuche zur Bestimmung der Pfahllänge durch Integritätsprüfung der Pfähle wurden zusammen mit Herrn Fritsch durchgeführt.

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund unterstützte das Forschungsvorhaben durch die Bereitstellung des Tonnenlegers "Rosenort" zur Ausbringung der Wellenmessboje (Directional Waverider), die zur Erfassung des Wellenklimas genutzt wurde.

Versuche zur Bestimmung der Pfahllänge bereits eingebauter Holzpfähle mit Hilfe von Integritätstests wurden in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abt. IV.4 (Zerstörungsfreie Schadensdiagnose – Herrn Niederleithinger, Herrn Taffe) an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns durchgeführt.

Bei der Planung und Interpretation von Versuchen zur Erfassung von Bodenverflüssigungsphänomenen wurde das Vorhaben durch Herrn Prof. Triantafyllidis (Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Universität Bochum) und Herrn Prof. Savidis (Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Berlin) unterstützt. Die technische Ausrüstung der Versuche erfolgte in Zusammenarbeit mit Fa. Solexperts / Schwerzenbach, Schweiz.

Die Untersuchung der bodenmechanischen Kennwerte in situ mit Hilfe von Drucksondierungen (CPT) erfolgte durch Fa. Fugro / Bremen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Feldversuche an der mecklenburgischen Ostseeküste durchgeführt. Mit dem Ostseebad Nienhagen, der Stadt Bad Doberan und der Tourismuszentrale Rostock-Warnemünde wurden Vereinbarungen zur Nutzung von strandnahen DLRG-Gebäuden für die Unterbringung von Messtechnik geschlossen. Eine kostenfreie Nutzung dieser Gebäude wurde ermöglicht.

Für die Versuche zu seegangsinduzierten Pfahlschwingungen und Porenwasserdruckmessungen in der Natur war es notwendig Versuchspfähle mit schwerer Rammtechnik einzubauen. Im Rahmen laufender Baumaßnahmen des StAUN Rostock wurde das Forschungsvorhaben durch die folgenden bauausführenden Unternehmen unterstützt.

- G. Brännich Bau GmbH, Kühlungsborn
- Reuse W. Tief- und Wasserbau GmbH, Heringsdorf
- Colcrete von Essen GmbH & Co KG, Rastede
- MEB Erdgesellschaft mbH, Breitenfelde
- Strabag AG, Bereich Wasserbau, Stralsund

Zum Teil konnten auch Geräte der Baufirmen genutzt werden (z.B. Spültechnik).

Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden auf Tagungen und Konferenzen im In- und Ausland vorgetragen. Im Rahmen dieser Veranstaltungen wurden zahlreiche Informationen ausgetauscht und Kontakte geknüpft. Dieser Erfahrungsaustausch hat wesentlich zum Gelingen des Vorhabens beigetragen.

# Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau  
Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase



---

## **Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holz- pfählen im Küstenwasserbau**

**Förderkennzeichen: 03KIS023**

**Schlussbericht  
nach BNBest-BMBF 98**

**Teil II: Eingehende Darstellungen**

**Rostock, Dezember 2005**

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase  
Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Dede  
Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt  
Dipl.-Ing. Jörg Radomski

## Danksagung

Der vorliegende Bericht stellt die im Forschungsvorhaben "Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau" durchgeführten Untersuchungen dar und fasst die Ergebnisse zusammen. Das Vorhaben wurde von 2001 – 2005 in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur am Institut für Wasserbau (IWR) der Universität Rostock durchgeführt und von verschiedenen Seiten unterstützt. Wir wollen an dieser Stelle die Gelegenheit wahrnehmen, den zahlreichen Institutionen und Fachkollegen für die geleistete Unterstützung zu danken.

Das Forschungsprojekt wurde über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen beantragt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03KIS023 gefördert. Der Projektträger Jülich übernahm die Mittelbewirtschaftung und war für organisatorische Fragen verantwortlich. Für die finanzielle Unterstützung, ohne die eine Bearbeitung des Forschungsprojektes nicht möglich gewesen wäre, bedanken wir uns herzlich. Insbesondere durch die Genehmigung der Projektlaufzeitverlängerung konnten aufgetretene Verzögerungen kompensiert und wichtige offene Fragestellungen bearbeitet werden.

Besonderer Dank gilt dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock (StAUN) und dem Land Mecklenburg-Vorpommern. Das Projekt wurde vom StAUN Rostock durch den leider früh verstorbenen Herrn Dr. Weiss angeregt, mitgetragen sowie finanziell, logistisch und personell unterstützt. Die Unterstützung des StAUN Rostock erfolgte durch Übernahme von Kosten für Rammarbeiten, für Vermessungsarbeiten, für die Versorgung mit Elektrizität an den Standorten der Feldversuche und der Kosten für Baugrunduntersuchungen an den Versuchsstandorten. Ohne die Einbindung der Projektaktivitäten in laufende Bauvorhaben der StAUN Rostock und Stralsund wären insbesondere die Versuche in der Natur nicht möglich gewesen. Für die vor und während der Projektlaufzeit geleistete Unterstützung, den fachlichen Rat und die Möglichkeit das Archiv des StAUN Rostock zu nutzen, möchten wir uns herzlich, bei Herrn Dr. Gurwell, Herrn Dipl.-Ing. Jäger, Herrn Dipl.-Ing. Schneider, Frau Schmidt und allen direkt oder indirekt am Vorhaben beteiligten Mitarbeitern des Staatlichen Amtes für Umwelt und Natur bedanken. Unser Dank gilt auch dem Land Mecklenburg-Vorpommern, das die Mittel für die Förderung des Vorhabens bereitstellte.

Das IWR wurde während der Projektlaufzeit durch die KFKI-Beratergruppe insbesondere in fachlichen, aber auch in organisatorischen Fragestellungen unterstützt. Die Beratergruppe wurde durch Herr Dr.-Ing. Eggert geleitet und setzte sich weiterhin aus dem Forschungsleiter Küste Herrn Lt. BD Petersen bzw. Herrn BD Thorenz, Herrn Prof. Dr.-Ing. Maybaum, Herrn Dr.-Ing. Sparboom und Herrn Riemer zusammen. Auch Herr Dr. Blum als Vertreter des Projektträgers nahm an ausgewählten Projektberatungen teil. Für

die intensiven Diskussionen und Anregungen, nicht nur während der Projektgruppensitzungen, bedanken wir uns ausdrücklich.

Herr Prof. Blümel und Herr Dr. Schwarz unterstützten bereits bei Antragstellung als externe Berater das Forschungsvorhaben. Mit Prof. Blümel (Universität Hannover) wurden bodenmechanische Fragestellungen diskutiert. Herr Dr. Schwarz und Herr Dr. Kuehnlein von der Hamburgischen Schiffbau und Versuchsanstalt unterstützten uns bei der Planung und Durchführung der Laborversuche zur Ermittlung von vertikalen Eislasten auf Bühnenpfähle und der Bestimmung der mechanischen Eiseigenschaften. Insbesondere die Beratung von Herrn Dr. Schwarz zu den Eislaborversuchen in Wismar vor Ort war besonders hilfreich.

Bedanken möchten wir uns auch bei Prof. Mainka und seinen Mitarbeitern vom Fachgebiet Baukonstruktion und Bauphysik der Universität Rostock, die uns die Nutzung der Klimakammer ermöglichten, sowie bei Prof. Diederichs und den Labormitarbeitern vom Fachgebiet Baustoffe der Universität Rostock, die uns Prüfgeräte zur Ermittlung von Eisfestigkeiten zur Verfügung stellten und die Arbeiten unterstützten.

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig unterstützte das Vorhaben im Rahmen einer Diplomarbeit mit numerischen Berechnungen zur Extrapolation der im Eislabor gewonnenen Ergebnisse.

Unser Dank gilt auch Frau Dr. Schmelzer und dem leider verstorbenen Herrn Dr. Stigge vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie Rostock (BSH), die einen Zugang zu regionalen Wetter- und Eisdaten und zu Veröffentlichungen des BSH ermöglichten.

In Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Niederleithinger und Herrn Dipl.-Ing. Taffe von der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung und dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig wurden Integritätstests zur Bestimmung der Pfahllänge von bereits eingebauten Holzpfählen durchgeführt.

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Stralsund unterstützte das Forschungsvorhaben durch die Bereitstellung des Tonnenlegers "Rosenort" zur Ausbringung der Wellenmessboje (Directional Waverider), die zur Erfassung des Wellenklimas genutzt wurde.

Bei der Planung und Interpretation von Versuchen zur Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen wurde das Vorhaben durch Herrn Prof. Triantafyllidis (Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Universität Bochum) und Herrn Prof. Savidis (Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Berlin) unterstützt. Die technische Ausrüstung der Versuche erfolgte in Zusammenarbeit mit der Solexperts AG aus der Schweiz. Für diese Zusammenarbeit möchten wir uns ebenfalls bedanken.

Auch bei den Tourismusverwaltungen des Ostseebads Nienhagen und der Stadt Bad Doberan sowie der Tourismuszentrale Rostock-Warnemünde möchten wir für die Nutzung von strandnahen DLRG-Gebäuden für die Unterbringung von Messtechnik bedanken.

Im Rahmen laufender Bühnenbaumaßnahmen des StAUN Rostock wurde das Forschungsvorhaben durch viele bauausführenden Unternehmen unterstützt, die hie im Einzelnen nicht genannt werden. Trotz des Termindrucks auf den Baustellen war immer Zeit für den Einbau von Versuchspfählen und einen Erfahrungsaustausch.

Einen wichtigen Anteil am Gelingen des Projektes haben unsere studentischen Mitarbeiter. Insbesondere der Aufbau der Versuchseinrichtungen und die Durchführung von Versuche in der Natur bei allen erdenklichen Wetterlagen wäre ohne ihre tatkräftige Unterstützung nicht möglich gewesen. Unterstützt wurden wir auch bei der Erstellung von Software (GeoCon) zur Erfassung und Darstellung von Baugrunddaten. Allen studentischen Mitarbeitern sei daher herzlich gedankt.

Nicht zuletzt bedanken wir uns bei der Zentralen Verwaltung der Universität Rostock, die uns bei der Mittelbewirtschaftung und in Personalfragen unterstützte, und beim Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Rostock.

Abschließend danken wir allen engagierten Kollegen, die das Projekt direkt oder indirekt im Rahmen von Projektbesprechungen oder Diskussionen am Rande von Tagungen und Konferenzen begleitet sowie Anregungen und wertvolle Hinweise gegeben haben.

## INHALT

### Kapitel 1: Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses

1	Einführung, Problemstellung und Ziel.....	1
2	Forschungsansatz .....	3
3	Lastfall Seegang.....	7
3.1	Einführung und Untersuchungsprogramm .....	7
3.2	Durchgeführte Untersuchungen und Teilergebnisse.....	10
3.2.1	Erfassung der Seegangsbelastung.....	10
3.2.2	Erfassung von Schorreveränderungen und Kolken .....	12
3.2.3	Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen.....	13
3.2.3.1	Vorüberlegungen / Laborversuche.....	13
3.2.3.2	Auswahl der Sensoren.....	17
3.2.3.3	Installation der Beschleunigungssensoren und Datenerfassung .....	18
3.2.3.4	Beschleunigungsmessungen an Bühnenpfählen.....	21
3.2.3.5	Auswertung der Messergebnisse.....	26
3.3	Ergebnisse und Zusammenfassung.....	29
3.3.1	Zusammenhang zwischen Seegang – Wasserstand - Pfahlbewegung .....	29
3.3.2	Maximale Pfahlbeschleunigungen und Pfahlbewegungen.....	33
3.3.3	Seegangsstatistik zum Auftreten seegangsinduzierter Pfahlschwingungen	34
3.3.4	Zusammenfassung.....	36
4	Lastfall Eis .....	38
4.1	Einführung und Untersuchungsprogramm .....	38
4.2	Eisverhältnisse an der mecklenburgischen Ostseeküste .....	41
4.3	Vertikale Eiskräfte .....	43
4.3.1	Grundlagen .....	43
4.3.2	Laborversuche zur Ermittlung vertikaler Eislasten .....	44
4.3.2.1	Versuchsaufbau.....	44
4.3.2.2	Versuchsdurchführung und Teilergebnisse .....	45
4.3.2.3	Untersuchungen zu mechanischen Eiseigenschaften .....	47
4.3.2.4	Numerische Modellierung .....	49
4.4	Zusammenfassung und Ergebnisse.....	50
5	Haltekräfte .....	52
5.1	Einführung und Untersuchungsprogramm .....	52

5.2	Baugrund –durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse .....	53
5.2.1	Auswertung vorhandener Baugrundinformationen.....	53
5.2.1.1	Erfassung von Baugrunddaten .....	53
5.2.1.2	Darstellung und Auswertung der Daten .....	54
5.2.2	Baugrunduntersuchungen.....	56
5.2.2.1	Feldversuche .....	56
5.2.2.1.1	Drucksondierungen (CPT).....	56
5.2.2.2	Rammkernsondierungen.....	58
5.2.2.3	Laborversuche .....	60
5.3	Horizontale Haltekräfte.....	62
5.4	Vertikale Haltekräfte – durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse .....	62
5.4.1	Zugversuche .....	63
5.4.1.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	63
5.4.1.2	Ergebnisse .....	64
5.4.2	Integritätstests.....	67
5.4.2.1	Low-Strain-Verfahren.....	68
5.4.2.2	High-Strain-Verfahren .....	72
5.5	Beeinflussung der Haltekräfte durch Bodenverflüssigungseffekte .....	72
5.5.1	Einführung.....	72
5.5.2	Theoretische Vorüberlegungen.....	73
5.5.3	Porenwasserdruckversuche.....	77
5.5.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	77
5.5.3.2	Ergebnisse .....	82
5.5.4	Bodenverflüssigungseffekte .....	84
6	Zusammenfassung und Ergebnisse .....	86
6.1	Lastfall Seegang.....	86
6.2	Lastfall Eis .....	87
6.3	Haltekräfte .....	88
7	Schrifttum .....	91

**Kapitel 2: Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

**Kapitel 3: Untersuchungen und Ergebnisse Dritter**

**Kapitel 4: Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

**Anhang**

## 1 Einführung, Problemstellung und Ziel

An der Küste Mecklenburg-Vorpommerns werden zur Sicherung von erosiven, sandigen Küstenabschnitten neben aktiven Küstenschutzmaßnahmen vorzugsweise Buhnen als passive Küstenschutzelemente eingesetzt. Die Buhnenbauwerke sollen den küstenparallelen Sedimenttransport verringern und damit zu einer längeren Verweilzeit von Sedimenten an den zu schützenden Küstenabschnitten beitragen. Das Buhnensystem in Mecklenburg-Vorpommern wird ständig erweitert. Derzeit gibt es ca. 1000 Buhnen.

Der Neubau von Buhnen und notwendige Erhaltungsmaßnahmen erfordern jedes Jahr den Einsatz erheblicher finanzieller Mittel. Die Kosten für Buhnenbaumaßnahmen setzen sich aus den Kosten für den Einbau der Pfähle und den Materialkosten für die Holzpfähle zusammen. Aufgrund des Befalls der traditionell eingesetzten Kiefernholzer durch die in den letzten Jahren in der Ostsee heimisch gewordene Bohrmuschel (*Teredo navalis*) werden im westlichen Landesteil Mecklenburg-Vorpommerns bohrmuschelresistente und damit besonders kostenintensive Holzarten eingesetzt.

Die Buhnen werden überwiegend als einreihige Holzpfahlbuhnen ausgeführt und bestehen aus einer großen Anzahl von in den Boden eingespannten Holzpfählen. Die Rammtiefe der Pfähle wird seit etwa 100 Jahren empirisch festgelegt. Nach dem angewandten empirischen Verfahren liegt das Verhältnis von Wassertiefe zu Rammtiefe bei nichtbindigem Baugrund bei 1/3 zu 2/3, während bei bindigem Baugrund etwa 3/5 der Pfahllänge in den Baugrund eingebunden werden. Mögliche Veränderungen der Höhenlage der Schorre werden durch ein Pessimprofil, das aus Vermessungsdaten ermittelt wird, berücksichtigt. Auf Grundlage dieser Bemessung werden an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns Holzpfähle mit Pfahllängen zwischen 3 m und 8 m verwendet.

Vom Landesrechnungshof Mecklenburg-Vorpommerns wurde kritisiert, dass die so ermittelte Einspannlänge möglicherweise überdimensioniert und demnach hinsichtlich der Ramm- und Materialkosten ein Einsparpotential gegeben sei. Eine Begründung des verwendeten rein empirischen Bemessungsverfahrens war nicht möglich. Die für die Buhnenbaumaßnahmen des Landes zuständige Behörde, das Staatliche Amt für Umwelt und Natur, regte daraufhin ein Forschungsvorhaben zu diesem Thema an.

Das Institut für Wasserbau der Universität Rostock (IWR – Prof. Kohlhase) und das Staatliche Amt für Umwelt und Natur (StAUN – Dr. Weiss) Rostock beantragten nach Diskussion der Problematik beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein Forschungsvorhaben mit dem Titel "Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau". Das Vorhaben wurde über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) beantragt und unter dem Förderkennzeichen 03KIS023 am 14.05.2001 bewilligt.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Bestimmung der notwendigen Einspannlänge von Buhnenpfählen auf natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlage abhängig von der wirkenden Belastung, vom Standort, den Baugrundeigenschaften, der Wassertiefe und

der Position des Pfahls in der Pfahlreihe. Dazu war es notwendig, alle am System Holzpfahl - Baugrund auftretenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen und zu bewerten.

In der folgenden Abbildung sind die Beanspruchungen, die Versagensursachen und die haltenden Kräfte des Systems Pfahl – Boden schematisch dargestellt. Das Schema gibt einen Einblick in die Komplexität des zu bearbeitenden Problemfeldes "Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau".

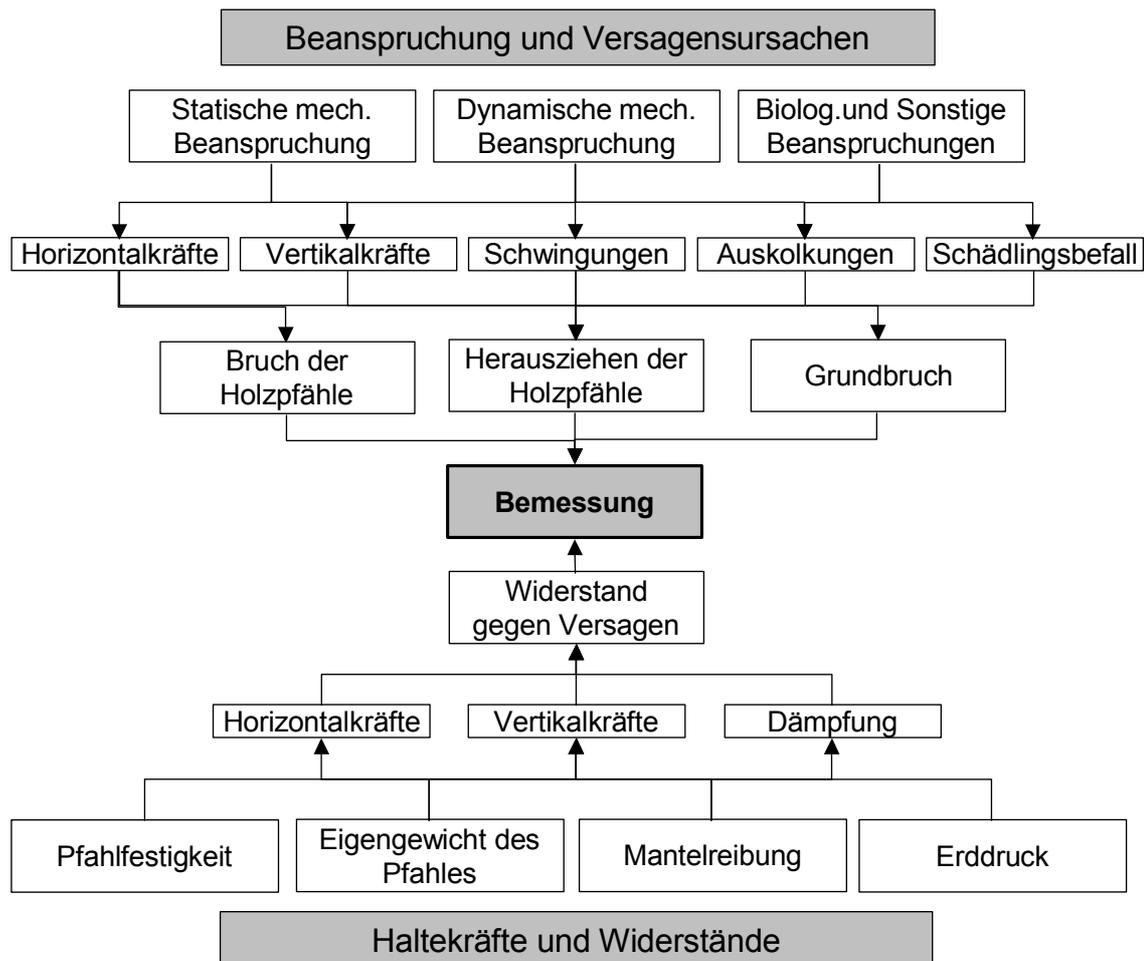


Abb. 1: Einflussfaktoren des Systems Pfahl-Boden

Neben der wissenschaftlichen Zielsetzung war die Erarbeitung eines praktisch anwendbaren Bemessungsansatzes zur Bestimmung der notwendigen Einspannlänge von Bühnenpfählen als Bemessungsempfehlung und Planungshilfe der für den Küstenschutz zuständigen Verwaltung (StAUN) das wichtigste Ziel des Vorhabens. Das zu entwickelnde Bemessungsverfahren sollte im Interesse der Praxistauglichkeit auf möglichst wenige bekannte oder unkompliziert zu ermittelnde Parameter vereinfacht werden. Eine Aufnahme des Bemessungsverfahrens in den "Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz Meck-

lenburg-Vorpommern", der Planungsgrundlagen und Eingangsdaten zur Ausführung und Bemessung von Küstenschutzbauwerken enthält, ist vorgesehen.

Die Zielsetzungen des Forschungsvorhabens beschränken sich ausschließlich auf konstruktive Gesichtspunkte (Bemessung) des Systems Pfahl – Boden. Funktionelle Fragestellungen, wie z.B. die erforderliche Länge einer Buhne, der Buhnenabstand oder die notwendige Durchlässigkeit von Buhnenbauwerken zur Reduzierung von Lee-Erosion sind nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens.

## 2 Forschungsansatz

Zum Erreichen der o.g. Ziele war es erforderlich, alle am System Holzpfahl – Boden angreifenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen, zu bewerten und in ihrer Wirkung zu quantifizieren.

Buhnenpfähle werden in Mecklenburg-Vorpommern im Strandbereich und in der Brandungszone sandiger Küstenabschnitte in Wassertiefen bis zu 3 m eingesetzt. Die Pfähle werden im Wesentlichen durch Seegang, Strömungen und Eiskräfte beansprucht (treibende Kräfte). Die Haltekräfte sind von den Eigenschaften des Bodens, der Art der Beanspruchung (horizontal, vertikal, statisch, dynamisch), den Pfahleigenschaften und der Einspannlänge im Boden abhängig. Im Folgenden werden die wirksamen Beanspruchungen (Lastfall Seegang, Lastfall Eis) und Haltekräfte näher betrachtet. Zum besseren Verständnis der in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse wird zunächst auf die gewählten Lösungsansätze zur Ermittlung unbekannter Größen eingegangen.

Die Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns weist nur einen geringen Tidehub auf. Dennoch sind die Wasserstandschwankungen erheblich. Sie entstehen überwiegend durch Windstaueffekte und Beckenschwingungen der Ostsee. Die aus den Wasserstandschwankungen resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten sind aber gering. Der Einfluss von Strömungskräften auf Buhnenpfähle kann im Vergleich zu dem der Wellen und dem des Eises als gering bezeichnet werden. Er wird im Forschungsvorhaben nicht untersucht.

### **Lastfall Seegang**

Die aus der Einwirkung durch Seegang (Lastfall Seegang) resultierenden Beanspruchungen auf Buhnenpfähle können allgemein in zwei Beanspruchungsarten unterteilt werden. Es ist in eine direkte Beanspruchung der Pfähle durch Wellenkräfte und eine indirekte Beanspruchung des Systems Pfahl - Boden durch seegangsinduzierte Pfahlschwingungen zu unterscheiden.

Zur direkten Wellenbeanspruchung gehören Kräfte, die bei Beanspruchung der Pfähle durch nichtbrechende Wellen und brechende Wellen entstehen. Wellenkräfte, die durch Beschleunigungskräfte und Strömungskräfte des Wasserkörpers einer Welle auf im Wasser stehende Pfähle übertragen werden, können bei bekannten Seegangparametern z.B. durch die MORISON – Gleichung berechnet werden. Auch zur Kraftwirkung von Wellen auf

wandartige Bauwerke gibt es zahlreiche Untersuchungen und unterschiedliche anerkannte Bemessungsansätze.

Eine indirekte Beanspruchung des Systems Pfahl – Boden durch Wellenkräfte entsteht durch die Auslenkung des Pfahlkopfes aus seiner Ruhelage. Der Pfahl beginnt mit einer vom System Pfahl – Boden abhängigen Frequenz zu schwingen. Dabei entstehen Kräfte, die vom System Pfahl – Boden aufgenommen werden müssen. Die Größe der Dämpfung des Systems bestimmt den Schwingungsverlauf. Pfahlschwingungen können, wie bereits im Antrag dargelegt, einen entscheidenden Einfluss auf die Haltekräfte im Boden haben (z.B. durch Bodenverflüssigungseffekte). Frequenz und Amplitude seegangsinduzierter Pfahlschwingungen von Holzpfählen im Brandungsbereich sandiger Küsten waren nicht bekannt und sollten daher im Forschungsvorhaben untersucht werden.

Zum Lastfall Seegang wurde ein Untersuchungsprogramm entwickelt (vgl. Antrag), das die Eingangsdaten (Seegangparameter) für die Ermittlung von horizontalen Lasten auf Bühnenpfähle liefert und seegangsinduzierte Pfahlbewegungen in der Natur erfasst.

Die Versuchsanordnung zur Erfassung von Seegang und seegangsinduzierten Pfahlschwingungen umfasst eine Seegangsmessboje zur Ermittlung der Seegangparameter vor der Küste, eine Druckmessdose am Pfahl zur Erfassung der Seegangparameter direkt an den Bühnen und Beschleunigungssensoren für Bewegungsmessungen von Bühnenpfählen. Durch die zeitgleiche Messung von Beanspruchung und Reaktion kann der Zusammenhang ermittelt werden.

### **Lastfall Eis**

Eis ist neben dem Seegang eine der wesentlichen Beanspruchungen auf Bühnenpfähle. Horizontale Eiskräfte entstehen vor allem durch die horizontale Bewegung von Treibeis (Treibeisdruck). Vertikale Eiskräfte treten durch das Festfrieren einer geschlossenen Eisdecke am Bauwerk und nachfolgende Änderung des Wasserspiegels auf.

Hinsichtlich horizontaler Belastung durch Eis werden die auf SCHWARZ (1971) zurückgehenden Berechnungsansätze in der Fachwelt als ausreichend genau angesehen. Im Wasserbau ist es hinsichtlich der Bemessung auf Treibeisdruck allgemein üblich (EAU 2004), von der Druckfestigkeit des Eises auszugehen, d.h. im kritischen Belastungsfall wird entweder die Festigkeit des Eises überschritten oder das Bauwerk versagt. Bei Bühnenpfählen sind die Haltekräfte durch die Einspannlänge der Pfähle bzw. durch die Biegezugfestigkeit des Holzes begrenzt. Besondere Untersuchungen zum Treibeisdruck auf experimenteller Basis sind nicht erforderlich, weil die Eisfestigkeiten und auch die Festigkeitseigenschaften des Holzes aus dem Schrifttum hinreichend genau ermittelt werden können. Der Lastfall Treibeisdruck wird in der Bemessung von Bühnenpfählen auf Grundlage bekannter Ansätze berücksichtigt.

Nach Untersuchungen von RAMLOW (1998) sowie mündlichen Mitteilungen durch das StAUN Rostock wurde bei Antragstellung davon ausgegangen, dass die Belastung des Pfahls durch eine am Pfahl anhaftende, geschlossene Eisdecke zu den maßgeblichen Belastungen gehört. Zum Lastfall vertikale Eiskräfte sind im Schrifttum theoretische und

empirische Berechnungsansätze vorhanden. Die den verschiedenen theoretischen Ansätzen zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge (Eishub) unterscheiden sich zum Teil grundsätzlich. Nach EAU 2004 ist die Auftriebskraft einer am Pfahl festhaftenden Eiskecke die maßgebende Größe. Nach russischen Normen werden vertikale Eiskräfte durch die Scher- und Biegefestigkeit des Eises begrenzt. Empirische Ansätze kommen zum Teil ohne die Verwendung von Eisfestigkeiten aus. Da die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsansätze stark voneinander abweichen, wurden im Antrag Untersuchungen zu vertikalen Eislasten auf Holzpfähle vorgesehen.

Eine maßgebliche Eisbelastung war an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns im Projektzeitraum nicht zu erwarten. Deshalb wurden zu diesem wichtigen Lastfall systematische Laborversuche im Naturmaßstab in der Klimakammer des Fachbereichs Bauingenieurwesen der Universität Rostock vorgesehen. In dieser Klimakammer sind Temperaturen bis zu  $-25^{\circ}\text{C}$  kontrolliert zu erzeugen und einzuhalten. Um realistische Festigkeiten des Eises in seinem Verbund zum Pfahl sicherzustellen, wurden die Versuche mit einem Modell-Ostseewasser durchgeführt. Die Festigkeiten des Versuchseises wurden im Prüflabor des Fachbereichs Bauingenieurwesen der Universität Rostock untersucht. Alle Untersuchungen erfolgten in enger Abstimmung mit den Eisfachleuten der Hamburger Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) und unter Berücksichtigung vorhandener Normen und Empfehlungen. Die Laborversuche zur Ermittlung vertikaler Eislasten auf Holzpfähle sind im Abschnitt 4 detailliert wiedergegeben.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Eisvorkommen sollte als Eingangsgröße für die Bemessung auf Grundlage von vorhandenen Daten bestimmt werden (SCHMELZER 1994, 2004; KOSLOWSKI & GLASER, 1999).

### **Haltekräfte**

Die haltenden Kräfte wirken den o.g. Beanspruchungen entgegen. Das System ist so zu bemessen, dass die haltenden Kräfte größer als die Beanspruchungen sind.

Die Haltekräfte können in vertikale Haltekräfte, die durch Mantelreibung des Pfahls im Boden entstehen, und horizontale Haltekräfte durch Erddruck gegliedert werden. Bei der Ermittlung der vertikalen Haltekräfte sind Eigengewicht und Auftrieb der Holzpfähle zu beachten. Einen wichtigen Einfluss können bodendynamische Effekte haben. Bei dynamischer Beanspruchung des Bodens kann es zu Bodenverflüssigung kommen. Die Haltekräfte werden stark herabgesetzt.

Voraussetzung zur Ermittlung von Haltekräften im Boden und zur Bewertung von Versuchsergebnissen ist die Kenntnis der bodenmechanischen Kennwerte am jeweiligen Pfahlstandort. Die Schichtenfolge und die Kennwerte wurden durch eine Auswertung von Baugrunduntersuchungen des StAUN Rostock, durch eigene Probenahme und durch Drucksondierungen ermittelt.

Zur vertikalen Haltekraft eines Pfahls im Boden stehen eine Vielzahl von Berechnungsansätzen zur Verfügung, die allerdings stark abweichende Ergebnisse liefern. Die Haltekraft von Pfählen, die in einer Pfahlreihe stehen (Pfahlabstand  $<$  Pfahldurchmesser) kann mit

den Berechnungsverfahren nicht oder nur ungenau erfasst werden. Im Vorhaben wurden daher Zugversuche an Bühnenpfählen in der Natur an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichem Baugrundaufbau durchgeführt. Ziel war es, geeignete Berechnungsansätze für die vertikale Haltekraft von Bühnenpfählen abhängig von den Baugrundeigenschaften zu ermitteln.

Die horizontalen Haltekräfte von Bühnenpfählen wurden nach bekannten Berechnungsverfahren (Erdruckansatz) auf Grundlage der ermittelten Eingangsdaten (bodenmechanische Kennwerte) ermittelt. Die horizontalen Haltekräfte sind nicht Gegenstand eigener Untersuchungen.

Die Abschätzung von bodendynamischen Effekten infolge Pfahlschwingungen, die als Belastungsgröße im Vorhaben ermittelt wurde, sollte dem Antrag entsprechend aus vorhandenen Berechnungsansätzen aus der Geotechnik vorgenommen werden. Im Laufe des Vorhabens wurde festgestellt, dass die Forschung auf dem Gebiet der bodendynamischen Effekte keine ausreichenden Berechnungsverfahren liefern kann. Insbesondere der Zusammenhang Pfahlschwingung – Porenwasserdruck war mit bekannten Verfahren nicht zu ermitteln. Es wurde daraufhin in Abstimmung mit der KFKI-Beratergruppe eine Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck im Umfeld schwingender Pfähle geplant. Ziel war die Ermittlung des Porenwasserdrucks infolge Pfahlschwingungen und letztendlich die Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten, um die notwendige Einbindelänge von Bühnenpfählen bestimmen zu können.

Alle Feldversuche wurden unter verschiedenen im Bereich der deutschen Ostseeküste auftretenden Baugrundverhältnissen durchgeführt. Durch die Beteiligung des StAUN Rostock an den Untersuchungen war es möglich, die Versuche in laufende Bauarbeiten einzubinden.

Nach dem Forschungsantrag beschränkt sich das Vorhaben weitgehend auf die Erforschung quantitativer Zusammenhänge zwischen äußerer Belastung und der Pfahlreaktion und hierbei primär auf den Versagensfall. Im Zuge der Projektbearbeitung wurde es aber anwendungsbezogen erforderlich, auch Fragen anderer Fachdisziplinen in die Untersuchungen einzubeziehen, da aus diesen Gebieten keine hinreichenden Forschungsergebnisse bekannt wurden. Dies betrifft insbesondere bodendynamische Effekte. Eine vollständige Erforschung von Bodenverflüssigungseffekten soll mit dem erarbeiteten Untersuchungsprogramm nicht geleistet werden und ist nicht Ziel der Untersuchungen (vgl. Zielstellung unter 1).

In den folgenden Abschnitten werden die Untersuchungen zu den Beanspruchungen (Lastfall Seegang / Eis) und den haltenden Kräften detailliert beschrieben und erläutert.

### 3 Lastfall Seegang

#### 3.1 Einführung und Untersuchungsprogramm

Buhnen werden in Mecklenburg-Vorpommern zur Sicherung von sandigen Küstenabschnitten eingesetzt. Sie befinden sich im Strandbereich und im küstennahen Bereich in Wassertiefen bis zu 3 m.

Buhnenbauwerke sind als Bauwerke des Küstenwasserbaus in besonderem Maße dem Seegang ausgesetzt. Für Bemessungsaufgaben an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns sind die im unregelmäßigen Seegang auftretenden Wind- und Dünungswellen am wichtigsten. Sehr lange Wellen (Periode  $T > 5$  min) können bei der Beanspruchung von Buhnenpfählen vernachlässigt werden. Sie treten in MV z.B. in Form von Beckenschwingungen der Ostsee als Veränderung des Wasserstandes auf.

Beim Einlaufen der Wellen aus dem tiefen Wasser in flaches Wasser kommt es zu Veränderungen des Seegangs. Die dabei auftretenden physikalischen Vorgänge Refraktion, Shoaling, Wellenbrechen und Einflüsse aus Sohlreibung und Perkolation werden unter dem Begriff Flachwassereffekte zusammengefasst.

Im Bereich von Buhnenbauwerken treten bei entsprechendem Seegang nicht nur Flachwassereffekte auf. Es sind auch bauwerksbedingte Einflüsse (Diffraktion, Reflexion) zu berücksichtigen. Buhnen werden von nichtbrechenden, brechenden und bereits gebrochenen Wellen beansprucht. Abb. 2 zeigt zur Verdeutlichung die Belastung von Buhnenpfählen durch Seegang.



Abb. 2: Belastung von Buhnenpfählen durch Seegang

Die Beanspruchung von Buhnenpfählen durch Seegang kann in direkte Beanspruchung durch Wellenkräfte und indirekte Beanspruchung des Systems Pfahl-Boden durch seegangsinduzierte Pfahlschwingungen unterschieden werden.

Zur Ermittlung der Belastung aus direkter Wellenbeanspruchung stehen anerkannte Be-

rechnungsansätze zur Verfügung. Wellenkräfte, die durch Beschleunigungskräfte und Strömungskräfte des Wasserkörpers einer Welle auf Pfähle übertragen werden, können z.B. mit der MORISON-Gleichung ermittelt werden. Durch die geringen Pfahlabstände innerhalb einer Buhne können auch vorhandene Berechnungsansätze zur Beanspruchung von wandartigen Bauwerken durch Wellenkräfte verwendet werden (z.B. Ansätze nach GODA, HIROI, ITO). Entsprechend dem Forschungsansatz wurden im Forschungsvorhaben keine eigenen Untersuchungen zur Ermittlung der Größe der Beanspruchung von Bühnenpfählen infolge direkter Wellenbeanspruchung durchgeführt. Für den im Vorhaben zu erarbeitenden Bemessungsansatz (Einspannlänge von Bühnenpfählen) wurden für die Ermittlung der direkten Seegangbelastung anerkannte, in Regelwerken (z.B. EAK 2002) enthaltene Berechnungsansätze verwendet. Grundlage zur Berechnung der Wellenbelastung mit bekannten Verfahren ist die Ermittlung der Seegangsparameter (Bemessungsseegang) am Standort des zu bemessenden Pfahls.

Eigene Untersuchungen wurden zur indirekten Belastung von Holzpfählen infolge seegangsinduzierter Pfahlschwingungen durchgeführt. Pfahlschwingungen entstehen nach Auslenkung des Pfahlkopfes durch Wellenkräfte. Der Pfahlkopf wird durch die Krafteinwirkung der Welle aus seiner Ruhelage ausgelenkt und schwingt mit einer Frequenz, die durch die Eigenschaften des Systems Pfahl-Boden (z.B. E-Modul und frei schwingende Länge des Pfahls, Dämpfung des Systems) bestimmt wird, aus. Der Schwingungsverlauf kann durch zusätzlich von außen auf das System wirkende Kräfte beeinflusst werden (Dämpfung oder Beschleunigung).

Ziele der Untersuchungen zum Lastfall Seegang sind die Ermittlung der an Bühnenpfählen auftretenden Schwingungsfrequenzen und –amplituden und des Zusammenhangs zwischen Seegang (Wellenbelastung) und der auftretenden Pfahlreaktion (Pfahlbewegung), abhängig von den Pfahleigenschaften, der Einbindetiefe des Pfahls in den Boden, der Wassertiefe und der Position des Pfahls innerhalb der Buhne. Die Informationen dienen als Eingangsdaten für die Bemessung der notwendigen Einspannlänge von Bühnenpfählen.

Es wurde ein Untersuchungsprogramm entwickelt, das die Belastung (Seegang), die Randbedingungen am Pfahl (Wassertiefe, Schorreveränderungen Kolke) und das Bewegungsverhalten der Pfähle näher untersucht. Abb. 3 stellt die Komponenten des Untersuchungsprogramms und deren Zusammenhang schematisch dar.

Für die Untersuchung von seegangsinduzierten Pfahlbewegungen ist die synchrone Erfassung von Belastung aus Seegang, Reaktion (Pfahlbewegungen) und Randbedingungen am Messstandort (frei schwingende Länge des Versuchspfahles / Wassertiefe) wichtig. Die synchrone Messung des Seegangs (Wellenhöhe und Periode) und der Pfahlbewegungen (Beschleunigungsmessungen) erlaubt Aussagen über den Zusammenhang beider Größen und die Prognose von Pfahlbewegungen unter Extrembelastungen.

Die Bewegungen der Bühnenpfähle wurden, wie im Antrag vorgesehen, indirekt mit Beschleunigungssensoren bis in den Boden hinein erfasst. Um eine Beeinflussung der

Messergebnisse durch die Messgeräte und die Installationstechnik auszuschließen, waren Voruntersuchungen an Bühnenpfählen im Labor notwendig.

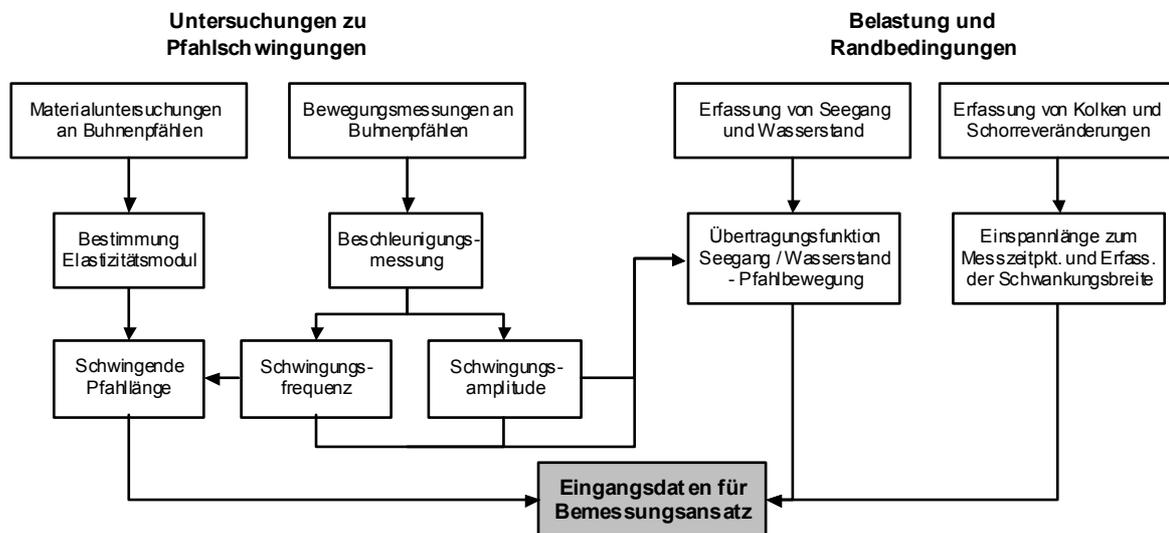


Abb. 3: Untersuchungsprogramm zu Seegangsinduzierten Pfahlschwingungen

Das Wellenklima im Untersuchungsgebiet wurde mit einer Richtungswellenmessboje des Instituts für Wasserbau erfasst. Ferner wurde die Wellenhöhe am Bühnenpfahl mit einer Druckmessdose aufgezeichnet. Die mit der Richtungswellenmessboje ermittelten Seegangparameter werden im Vorhaben nach Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Seegang und Pfahlbewegung auch für eine statistische Auswertung (Häufigkeit des Auftretens von einzelnen Seegangparametern, bei denen Pfahlbewegungen auftreten) verwendet.

Die wirksame Einspannlänge und damit das Schwingungsverhalten des Pfahls wird wesentlich durch die Höhenlage der Schorre beeinflusst. Diese kann sich an sandigen Küsten abhängig von Strömung und Seegang in kurzen Zeiträumen verändern. Durch tachymetrische Vermessung der Schorre können kurzfristige Veränderungen nicht erfasst werden. Auch eine Vermessung bei Seegang ist nicht möglich. Deshalb wurde am Messstandort eine Unterwasser-Videokamera installiert.

In Abb. 4 ist die grundsätzliche Installation der Messgeräte zur Erfassung von Seegang, seegangsinduzierten Pfahlbewegungen und der Einbindetiefe des Versuchspfahles dargestellt. Diese Versuchseinrichtung wurde an 4 Standorten mit unterschiedlichen Baugrundeigenschaften aufgebaut. Es wurden Pfahlbewegungen an Pfählen innerhalb der Bühnenreihe und am Kopf der Bühne (wie in Abb. 4 dargestellt) bei unterschiedlichen Pfahlängen aufgezeichnet. Die Einrichtung war zur kontinuierlichen Erfassung von Messwerten über eine Wintersaison konzipiert.

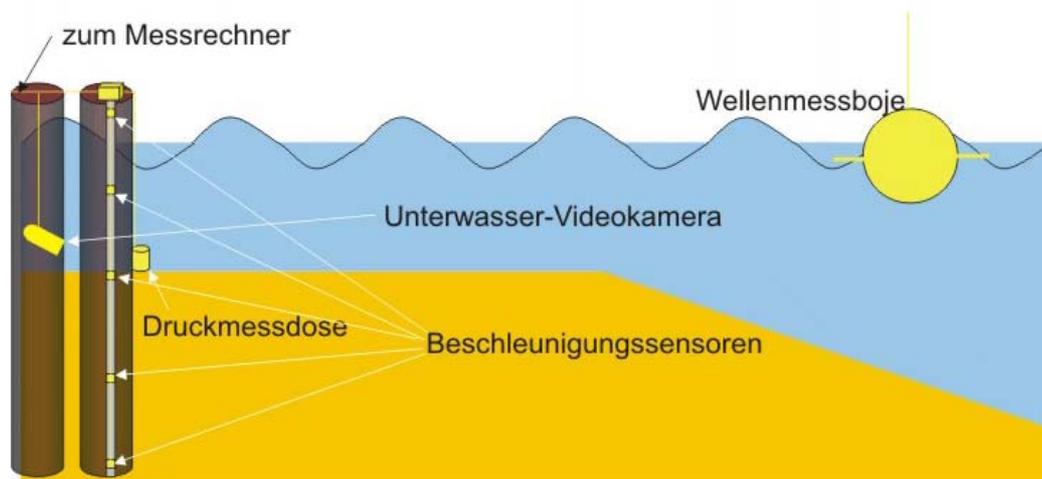


Abb. 4: Messanordnung zur Erfassung von Seegang und Pfahlbewegungen

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten des Untersuchungsprogramms und die erzielten Ergebnisse detailliert dargestellt.

## 3.2 Durchgeführte Untersuchungen und Teilergebnisse

### 3.2.1 Erfassung der Seegangsbelastung

Das großräumige Wellenklima wurde mit einer im IWR vorhandenen Richtungswellenmessboje erfasst, bei der neben der Wellenhöhe und -periode auch die Richtungsinformation gewonnen wird. Die kugelförmige Boje (Abb. 5) mit einem Durchmesser von 0,90 m nimmt die Messsensoren und die Batterien zur Stromversorgung auf. Die Vertäuung besteht aus Grundgewicht, einer Trosse und einer elastischen Gummileine. Die Messboje misst die Wasserspiegelauslenkungen mit drei aufeinander senkrecht stehenden Beschleunigungsaufnehmern.

Die erfassten Messwerte werden in der Boje durch zweifache Integration nach der Zeit in Auslenkungen umgerechnet und mit einem eingebauten Kompass nordreferenziert. Die Daten (Zeitreihen) werden per Funk an eine Landstation übertragen, in der zur Weiterverarbeitung ein Rechner installiert ist. Aus den Zeitreihen der Auslenkungen Hoch, Nord und Ost wird durch Fourieranalysen und Bildung mehrerer Kreuzspektren die Richtungsinformation des Seegangs, die Wellenhöhe und -periode ermittelt. Die Spektren und Zeitreihen werden gespeichert. Nach der Auswertung stehen damit die Frequenzbereichsparameter ( $H_{m0}$ ,  $T_{02}$ ,  $T_{peak}$ ) und die Zeitreihe, aus der Zeitbereichsparameter ( $H_{1/3}$ ,  $T_{H1/3}$ ) gewonnen werden können, sowie das Energiedichtespektrum mit dazugehöriger Richtungsverteilung zur Verfügung.

Da jede Messung durch ihre zeitliche Begrenzung nur eine Teilmenge der möglichen Ereignisse wiedergeben kann, sollten die gemessenen Seegangdaten auf statistischem Wege bewertet werden.

Die Einsatzorte der Boje wurden an der 10 m - Tiefenlinie vor Warnemünde (54°12,2'N / 12°04,7'E) und Heiligendamm (54°09,5'N / 11°51,5'E) festgelegt. Die Bojen wurden zeitgleich mit den Pfahlbewegungsmessungen in Markgrafenheide und Heiligendamm betrieben. Die notwendigen schiffahrtpolizeilichen Genehmigungen wurden eingeholt. Beim Ausbringen der Boje wurde das Forschungsvorhaben durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Rostock (Tonnenleger "Rosenort") unterstützt. Die Landstationen für den Rechner der Boje waren in der DLRG-Station Nienhagen und Heiligendamm eingerichtet. Während der Pfahlbewegungsmessungen vor Zingst wurden Messdaten von einer Wellenmessboje des GKSS-Forschungszentrums und vom Internen Messnetz Küste des StAUN (IMK) genutzt.



Abb. 5 :Richtungswellenmessboje Directional Waverider vor Heiligendamm

In Tabelle 1 sind an den Messtandorten gemessene signifikante Wellenhöhen (max.  $H_{m0}$ ) aufgelistet.

Messtandort	Messzeitraum	Wellenhöhe $H_s$ [m]
Heiligendamm / Börgerende	12/2001 – 04/2002	2,85
Heiligendamm /Börgerende	05/2002 – 02/2003	3,10
Heiligendamm /Börgerende	09/2003 – 01/2004	3,09
Warnemünde	01/2002 – 03/2002	2,28

Tabelle 1: Signifikante Wellenhöhen aus Messungen mit Directional Waverider Messbojen

An den Bühnen B 41 in Markgrafenheide, B19 und B33 in Heiligendamm und B 64 in Zingst wurden Druckmessdosen zur Erfassung der Wellenhöhe in direkter Nähe zu den Versuchspfählen der Pfahlbewegungsmessungen (vgl. Abb. 4) installiert, um die an den Versuchspfählen aufgetretene Wellenhöhe zu messen. Mit den Druckmessdosen konnten aber nur die Wellenhöhen von nichtbrechenden Wellen erfasst werden. Bei brechenden Wellen war eine Bestimmung der Wellenhöhe an den Pfählen durch die Lufteinschlüsse innerhalb des Wasserkörpers während des Brechvorgangs nicht möglich.

### 3.2.2 Erfassung von Schorreveränderungen und Kolken

Die wirksame Einspannlänge und damit das Schwingungsverhalten des Pfahls wird stark durch die Höhenlage der Schorre beeinflusst. Während der Installationsarbeiten an den Bühnenpfählen war an einigen Messstandorten aufgefallen, dass die Geländeoberkante erhebliche und in kurzen Zeitabständen reversible Höhenveränderungen aufwies. Durch tachymetrische Vermessung der Schorreveränderungen konnte die Veränderung der Einspannlänge nur ungenügend erfasst werden (vgl. genauer 2. Statusbericht). Insbesondere an den Pfählen auftretende lokale Kolke können sich in Lage und Tiefe innerhalb weniger Stunden verändern.

An den Standorten der Versuchspfähle wurden Schorreveränderungen und Kolke daher mit einer Unterwasser-Videokamera überwacht, um die zum Zeitpunkt der Messungen wirksame Einspannlänge der Pfähle zu ermitteln. Die Kamera zeichnete in regelmäßigen Intervallen (10 min) Bilder der Schorre in der Umgebung der Versuchspfähle (Bewegungsmessungen) auf. Durch die Kamera und die Wellenmessgeräte (Directional-Waverider-Boje, Druckmessdose) wurde die Veränderung der Schorre abhängig von der Seegangsbelastung erfasst. Die Beschleunigungsmessungen an den Pfählen konnten direkt der vorhandenen (veränderlichen) Einspannlänge zugeordnet werden.



Abb. 6: Aufnahme der Schorre durch Unterwasser-Videokamera, Heiligendamm Bühne 33

Auf diese Weise wurden Höhenveränderungen des Untergrundes in Markgrafenheide (Buhne 41, Frühjahr 2003), an der Buhne 33 in Heiligendamm (Wintersaison 2003/2004) und an der Buhne 64 in Zingst (Wintersaison 2004/2005) erfasst. Abb. 6 zeigt beispielhaft eine Aufnahme der Kamera beim Einsatz vor Heiligendamm.

Mit der Kamera wurden innerhalb von 48 h Schorreveränderungen bis zu 30 cm aufgezeichnet. Lokale Kolke konnten während der Kameraaufzeichnungen im Bereich der Versuchspfähle nicht nachgewiesen werden. Das Messsystem fiel leider auch mehrmals durch Beschädigung (Treibgut innerhalb der Brandungszone) und Wassereintritt in das Kameragehäuse aus. Bei starkem Seegang kam es trotz der relativ großen Wassertiefe (2-3 m), in der die Versuchspfähle und das Kamerasystem installiert waren, zu Sichtbehinderung durch Trübung des Wassers. Während starker Seegangsbelastungen eventuell auftretende Kolke konnten daher nicht erfasst werden.

### 3.2.3 Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Zeitgleich zur Erfassung der Seegangsparameter wurden die seegangsinduzierten Pfahlbewegungen indirekt durch die Messung der auftretenden Beschleunigungen am Pfahl ermittelt. Die Beschleunigungen wurden in unterschiedlichen Höhen am Pfahl bis in den Baugrund hinein aufgezeichnet, so dass die Bewegungen des Pfahls sowohl oberhalb der Einspannung als auch im Baugrund erfasst wurden. Die Frequenz und die Amplitude der Pfahlschwingungen erlauben im Zusammenhang mit den durchgeführten Porenwasserdruckmessungen Rückschlüsse auf das Gefährdungspotential hinsichtlich bodendynamischer Effekte (Bodenverflüssigung).

#### 3.2.3.1 Vorüberlegungen / Laborversuche

Aus der Schwingungsfrequenz von Pfähle kann physikalisch auf die schwingende Länge und damit auf den Einspannpunkt, der für die zu bemessende Einspannlänge des Pfahles relevant ist, geschlossen werden. Die frei schwingende Länge des Pfahles kann mit Hilfe der Schwingungsfrequenz am Pfahlkopf berechnet und durch Beschleunigungsmessungen des Pfahls im Boden überprüft werden. Die frei schwingende Pfahllänge wird nach folgendem physikalischen Ansatz ermittelt:

$$\text{Kreisfrequenz } \omega: \quad \omega = \frac{a}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \quad \text{Schwingende Länge } L: \quad L^2 = \frac{a}{\omega} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}}$$

mit:  $a$  = Beiwert zur Eigenform der Schwingung (Grundschiwingung 3,51)

$L$  = schwingende Länge [m]

$E$  = Elastizitätsmodul [kN/m<sup>2</sup>]

$I$  = Flächenmoment [m<sup>4</sup>]

$m$  = Masse je Längeneinheit [t/m]

Für diese Berechnungen ist die Ermittlung von Dichte und E-Modul der unterschiedlichen im Bühnenbau verwendeten Holzsorten im Labor notwendig. Weiterhin sollte durch Laborversuche die Beeinflussung des Schwingungsverhaltens der Holzpfähle durch den geplanten Einbau von Metallkanälen zur Aufnahme der Beschleunigungssensoren (siehe Abschnitt 3.2.3.3) untersucht werden.

Die Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls an Bauholz von Bühnenpfählen in Originalabmessungen erfolgte mit dem Biegeversuch auf Grundlage der DIN 52186. Diese schreibt für die Prüfung von Rundholz eine Versuchsanordnung mit Kraftangriff an zwei Punkten vor.

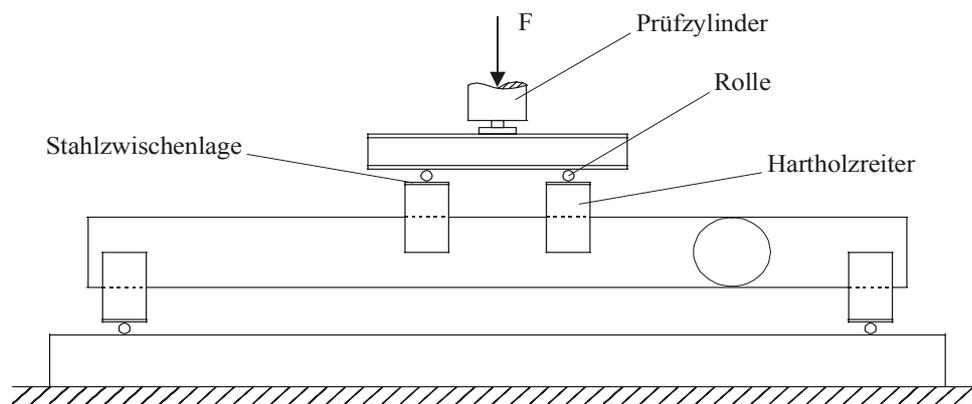


Abb. 7: Versuchsaufbau Biegeversuch nach DIN 52 186

Der Biege-Elastizitätsmodul  $E_B$  ist eine Kenngröße für die Verformungssteifigkeit der Probe im elastischen Bereich. Er wird bestimmt aus der elastischen Durchbiegung der Probe und berechnet sich bei einer Beanspruchung nach Abb. 7 für einen kreisförmigen Probenquerschnitt wie folgt:

$$E_B = \frac{2 \cdot (2 \cdot l^3 - 3 \cdot l \cdot l'^2 + l'^3)}{3 \cdot \pi \cdot d^4} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}$$

mit:  $l$  - Stützweite [mm]

$l'$  - Abstand der Kraftangriffspunkte [mm]

$d$  - Probendurchmesser [mm]

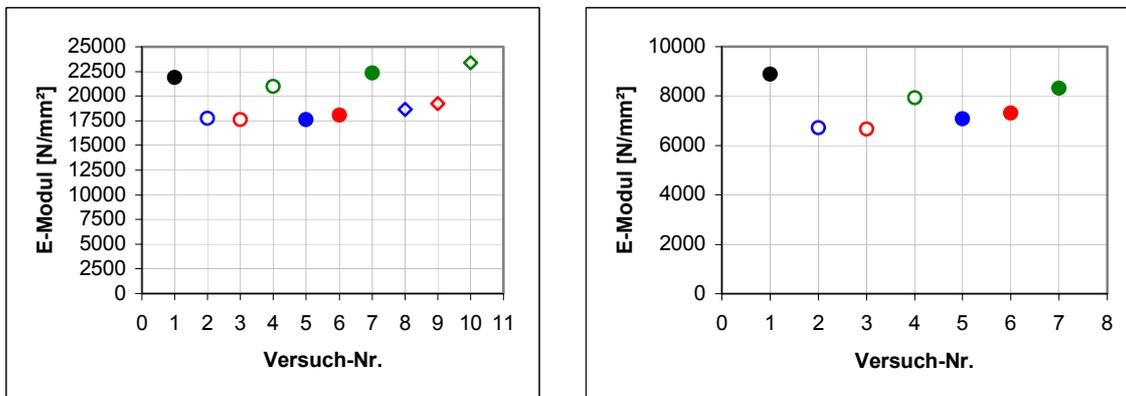
$\Delta F$  - Kraftdifferenz im elastischen Verformungsbereich der Probe [N]

$\Delta f$  - die der Kraftdifferenz  $\Delta F$  entsprechende Durchbiegung in Probenmitte [mm]

Die Ergebnisse der Laborversuche sind in Abb. 8 dargestellt. Erkennlich sind die großen Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften bei dem seit einigen Jahren in Mecklenburg-Vorpommern eingesetzten Tropenholz gegenüber dem traditionell verwendeten Kiefernholz ( $E_{\text{Tropenholz}}/E_{\text{Kiefernholz}} \approx 2,5$ ). Signifikante Unterschiede zwischen unterschiedlichen Tropenholzsorten, die für eine Baumaßnahme des StAUN Rostock verwendet wur-

den, waren dagegen nicht nachweisbar. Die ermittelten Werte für den E-Modul liegen in einem Bereich, der auch von Holzlieferanten für diese Holzarten angegeben wird. Grundsätzlich ist allerdings von sehr unterschiedlichen Werten für den E-Modul auszugehen, da sowohl schnell wachsendes Plantagenholz als auch langsamer wachsende Holzarten aus natürlichem Bestand eingesetzt werden.

Die Veränderung des rechnerischen E-Moduls des Gesamtpfahles vom Ausgangswert durch die Installation der Messeinrichtung (Metallkanal) beträgt unter ungünstigsten Verhältnissen abhängig von Belastungsrichtung ca. 20 % (Abb. 9). Bei einer Abweichung des E-Moduls in dieser Größenordnung ändert sich die errechnete schwingende Länge des Pfahles um ca. 5 %. Im überwiegenden Teil der Messergebnisse sind die Abweichungen geringer. Aufgrund der Vorzüge der Metallkanäle bei der Installation der Sensoren gegenüber anderen Einbaumöglichkeiten wurden diese Abweichungen akzeptiert.



- |                                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| 1 natürliche Pfahleigenschaften | 6 Kabelkanal unten  |
| 2 Nut oben                      | 7 Kabelkanal quer   |
| 3 Nut unten                     | 8 Stahlprofil oben  |
| 4 Nut quer hinten               | 9 Stahlprofil unten |
| 5 Kabelkanal oben               | 10 Stahlprofil quer |

Abb. 8: Elastizitätsmoduln von Tropenholz (links) und Kiefernholz (rechts); Einfluss der für die Sensormontage eingefügten Nuten und Metallkanäle

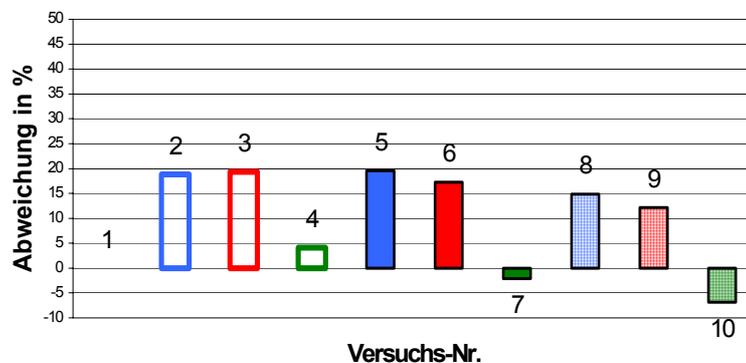


Abb. 9: Abweichung der Elastizitätsmoduln in % von den natürlichen Eigenschaften durch die Installation der Messkanäle (Tropenholz)

Die Ermittlung eines veränderten E-Moduls aufgrund des Einbaus eines Metallkanals ist im wissenschaftlichen Sinne nicht richtig, da sich der E-Modul des Holzes natürlich nicht ändert sondern nur die Biegeeigenschaften des Pfahls, die nach DIN 52 186 als E-Modul eines Holzpfahles interpretiert wird.

Um sicherzustellen, dass die Installation von Metallkanälen die elastischen Eigenschaften des Pfahls nicht verändert, wurden im Labor des Fachbereiches Baustoffe, Prof. Diedrichs, Versuche zum Schwingungsverhalten durchgeführt. Das Schwingungsverhalten eines 2 m langen Tropenholzpfahles wurde unter folgenden Bedingungen untersucht:

- im Ausgangszustand (keine Querschnittsveränderung)
- mit ausgesägter Nut (40X40 mm)
- mit Stahlvierkantrohr (40X40 mm, 2 mm Wandstärke, verschraubt, vergossen)
- mit Kabelkanal (Stahlblech, 40X40 mm, 0,7 mm Wandstärke, verschraubt, vergossen)

Es wurden verschiedene frei schwingende Längen untersucht, die durch Variation der festen Einspannung in einer hydraulischen Presse simuliert wurden. Der Pfahl wurde mit einem Hammer zu Schwingungen angeregt, die Eigenfrequenz mit einem Beschleunigungssensor (ADXL202) aufgezeichnet (Abb. 10) und mit einer Frequenzanalyse (FFT) ausgewertet. Die Schwingungsfrequenz wurde auch in Abhängigkeit von der Lage der Nut / des Installationskanals zur Schwingungsrichtung untersucht.

Durch das Aussägen der Nut kam es zu einer geringen Reduzierung der ursprünglichen Eigenfrequenz des Pfahles. Nach Installation des 2 mm starken Stahlprofilrohres erhöhte sich die Eigenfrequenz um 3 bis 5 Hz. Die Veränderung nach Einbau des Metallkabelkanals (0,7 mm Wandstärke) betrug 0 bis 2 Hz und liegt damit im Streubereich der Messungen. Die Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz von der Lage der Nut / des Installationskanals war ebenfalls gering. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass die Installation eines dünnwandigen Metallkanals mit den Sensoren die elastischen Eigenschaften des Pfahls nur unwesentlich verändert.



Abb. 10: Schwingungsversuche im Labor

Um die Beschleunigungsmessungen an Bühnenpfählen der Brandungszone (Wasser, Sand) bis in den Boden hinein realisieren zu können, mussten geeignete Sensoren und eine geeignete Einbau- und Montagetechnik der Sensoren gefunden werden.

### 3.2.3.2 Auswahl der Sensoren

Zur Auswahl geeigneter Sensoren für die Langzeit-Bewegungsmessungen wurden umfangreiche Recherchen und Vorversuche durchgeführt. Dabei wurden folgende Eigenschaften verschiedener Sensortypen besonders betrachtet:

- Messbereich
- Ansprechempfindlichkeit und Rauschverhalten
- Auflösung
- Übersteuerungsverhalten
- Empfindlichkeit bei Überlastung
- Gehäuseabmessungen und Bauform
- Beständigkeit gegen zu erwartende Umgebungsbedingungen (Seewasserbeständigkeit, Dichtheit des Gehäuses)
- Preis

Um den relevanten Messbereich der Sensoren festlegen zu können, wurde zunächst ein preiswerter Halbleiterbeschleunigungssensor der Firma Analog Devices (ADXL202) mit einem Messbereich von  $\pm 2g$  (2-fache Erdbeschleunigung) beschafft und am Kopfpfahl einer etwa 75m langen Bühne an der Ostseeküste im Ostseebad Nienhagen installiert. Erste Messungen bei Anregung des Pfahls durch unterschiedliche Seegangereignisse und Hammerschläge ergaben Beschleunigungen zwischen 0,2g und 2,0g am Kopf des Pfahls. Da die Auslenkung des Pfahls und damit auch Beschleunigung mit Annäherung an den Einspannpunkt erwartungsgemäß stark abnimmt, ist eine hohe Ansprechempfindlichkeit und Auflösung der Beschleunigungssensoren notwendig.

Auf Grundlage der ersten Messergebnisse wurden ein kapazitiver Standardsensor der Firma Kistler (K-BEAM 8305A2) mit  $\pm 2g$  und ein besonders hochauflösender Servosensor der Firma Jewel (LCA-100-0.5G) mit  $\pm 0,5$  beschafft.

In Zusammenarbeit mit dem StAUN Rostock und der Wasserbaufirma Brännich wurde für die erforderlichen Versuche ein Kiefernpfahl am Strand des Ostseebades Kühlungsborn gerammt. Dieser Testpfahl war ohne Boot zu erreichen und ermöglichte dadurch relativ wetterunabhängige Vorversuche. Alle drei Sensoren wurden an diesem Versuchspfahl installiert und durch Aufbringung von Anregungen unterschiedlicher Intensität parallel auf ihre messtechnische Eignung getestet. Im Wesentlichen waren der Vergleich der Ansprechempfindlichkeit, des Rauschverhaltens, der Auflösung und des Mess- und Aussteuerbereiches der Sensoren Gegenstand der Vorversuche.

Es wurde festgestellt, dass der kapazitive Standardsensor und der Servosensor ein deutlich besseres Rauschverhalten und eine wesentlich höhere Ansprechempfindlichkeit als der preiswerte Halbleitersensor besitzen. Für den kapazitiven Sensor und den Servosensor konnten bei den Vorversuchen gleichwertige messtechnische Eigenschaften ermittelt werden.

Aufgrund seiner günstigen Eigenschaften (Beständigkeit gegen Seewasser, Handhabbarkeit) wurde der kapazitive Sensor 8310A2 der K-BEAM-Reihe der Firma Kistler ausgewählt (Abb. 11). Dieser Sensor eignet sich auch durch seine geringen Abmessungen und seine Unempfindlichkeit gegen Magnetfelder gut für das vorgesehene Einbauverfahren.



Abb. 11: Sensortyp (8310A2 / K-BEAM / Firma Kistler) mit Anschlusskabel

### 3.2.3.3 Installation der Beschleunigungssensoren und Datenerfassung

Bei der Rammung von Bühnenpfählen treten hohe dynamische Belastungen des Bühnenpfahls auf. Bei schlecht rambbarem Untergrund (z.B. steifer Geschiebemergel) kann die Belastung bis zur Spaltung oder zum Bruch der Pfähle führen. Eine Rammung von Pfählen mit bereits am Pfahl montierten Sensoren war wegen der notwendigen Empfindlichkeit der Sensoren nicht möglich. Bei den genannten hohen Belastungen wären die Beschleunigungssensoren zerstört worden. Ein nachträgliches Anbringen der Sensoren von Außen wäre nur im Bereich oberhalb des Bodens möglich gewesen.

Aus o.g. Gründen entschied sich das IWR für einen nachträglichen Einbau der Sensoren in eine Nut, die vertikal in den Pfahl eingelassen ist. In diese Nut wurde ein Kanal aus Metall (40x40 mm) kraftschlüssig eingelassen und mit Bitumenheißkleber vergossen (vgl. Abb. 12). Für die Versuche in Markgrafenheide und Heiligendamm wurden verzinkte Stahlkabelkanäle mit einer Wandstärke von 0,7 mm verwendet. Die Versuchspfähle in Zingst wurden aufgrund von negativen Erfahrungen beim Einbringen der Sensoren (Heiligendamm) mit Stahlkanälen mit 1,0 mm Wandstärke ausgerüstet.

Die ausgewählten Sensoren messen die Beschleunigung in eine Richtung (1-D-Sensor). Zur Erfassung des Bewegungsverhaltens (2-D) wurden daher zwei Sensoren auf einen Aluminiumwürfel montiert, in den ein starker Magnet eingelassen ist (Abb. 13). Durch die Kraftwirkung des Magneten werden die Aluminiumwürfel und somit die Sensoren kraftschlüssig mit dem Metallkanal und damit mit dem Pfahl verbunden.



Abb. 12: In den Pfahl eingelassener Metallkabelkanal und Endzustand mit Verguss

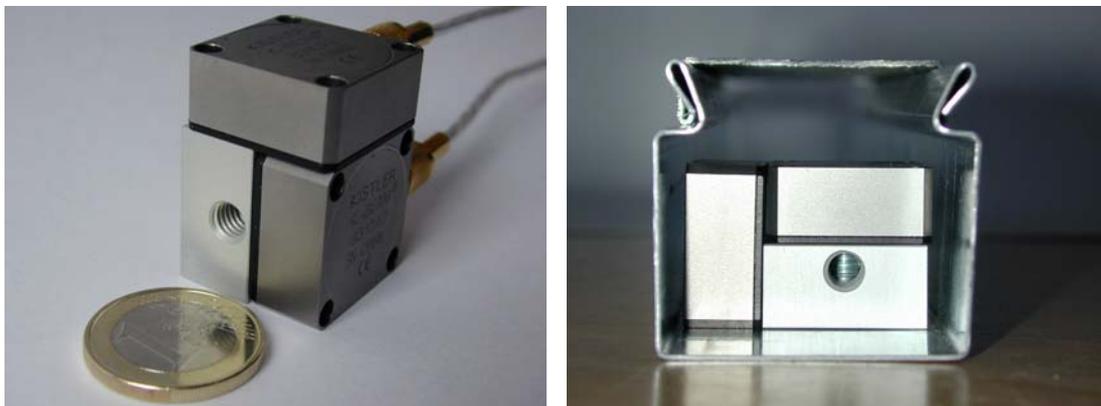


Abb. 13: Anordnung und Verschraubung der Sensoren auf Montagewürfel und Fixierung im Kanal

Die mit Metallkanälen ausgerüsteten Pfähle wurden im Rahmen von Baumaßnahmen des StAUN Rostock in den Boden gerammt. Die Beschleunigungssensoren wurden nachträglich mit einer eigens dafür konstruierten Einrichtung, die aus ineinander schiebbaren Kunststoffrohren besteht, auf ihre Positionen im Kanal bis unter Geländeoberkante heruntergelassen. Diese Arbeiten wurden vom Arbeitsboot des IWR, das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens beschafft wurde, durchgeführt.

Durch das Messprinzip des Sensors sind in dessen Umgebung auftretende Magnetfelder ohne Einfluss auf die Messergebnisse. Alle Aluminiumwürfel wurden mit einem dünnen

Drahtseil gesichert, so dass die Sensoren nach Abschluss der Messungen an einem Standort wiedergewonnen und an anderen Standorten eingesetzt werden konnten.

Die Daten- und Stromversorgungskabel der Sensoren wurden an Sensorterminals am Bühnenkopf angeschlossen und über ein vor Witterungseinflüssen geschütztes Kabel an Land geführt.



Abb. 14: Einbau von Beschleunigungssensoren

Landseitig wurden die Daten in einem Multichannel-Datalogger der Firma IMC ( $\mu$ -Musycs) erfasst und von einem Messrechner gespeichert. Mit dem Datalogger war eine zeitgleiche Erfassung von 32 Messkanälen mit einer Abtastrate von 1kHz möglich. Eine in den Messverstärker integrierte Datenvorverarbeitung mit einem Signalprozessor erlaubt bereits bei der Datenerfassung durch Filterung und Bewertung eine Verdichtung der Daten, so dass nur bei relevanten Belastungsfällen Daten gespeichert wurden. Dadurch wurde trotz der anfallenden großen Datenmengen der automatische Messbetrieb über längere Zeiträume ohne hohen Betreuungsaufwand möglich. Per Fernwartungssoftware und GSM-Modem erfolgte die Fernüberwachung des laufenden Messbetriebs. Die Messdaten wurden in regelmäßigen Zeitabständen vom Messrechner auf einen Datenträger überspielt.

Für die Unterbringung der Messgeräte wurden DLRG-Unterkünfte in Nienhagen, Markgrafenheide und Heiligendamm Buhne 19 genutzt. An der Buhne 33 in Heiligendamm wurde ein modifizierter Baucontainer eingesetzt. In Zingst wurden die Messgeräte in einem Messcontainer des StAUN Rostock (Internes Messnetz Küste) untergebracht.

#### 3.2.3.4 Beschleunigungsmessungen an Bühnenpfählen

Zur Erfassung seegangsinduzierter Pfahlschwingungen wurden, wie im Untersuchungsprogramm vorgesehen, umfangreiche in situ Versuche durchgeführt. Es wurden mit der beschriebenen Messtechnik Bewegungsmessungen an Pfählen unter Variation der folgenden maßgeblichen Einflussgrößen durchgeführt:

- Einspannlänge des Pfahls
- Position des Pfahl in der Buhne (Bühnenkopf / Bühnenreihe)
- Baugrundverhältnisse (Standort)
- Belastung (Standort, Wassertiefe)

Die seegangsinduzierten Bewegungen der Versuchspfähle wurden indirekt durch Messung der auftretenden Beschleunigungen am Pfahl ermittelt. Die Beschleunigungen wurden in unterschiedlichen Höhen am Pfahl bis in den Baugrund hinein aufgezeichnet. Bewegungen des Pfahls konnten dadurch sowohl oberhalb des Bodens als auch im Baugrund erfasst werden.

Das IWR entwickelte einen Musterversuchsaufbau (Abb. 16) zur Anordnung der Versuchspfähle. Dabei wurden der Kopfpfahl einer Buhne und zwei Pfähle gleicher Länge (Tropenholz, Kiefernholz) innerhalb der Buhne mit Metallkanälen ausgerüstet. Daran schloss sich in Richtung Land eine Abstufung der Versuchspfahllänge bis zum Verhältnis 1:1 (Wassertiefe : Einbindetiefe im Baugrund) an. Zwischen den mit Kanälen bestückten Pfählen befand sich jeweils ein Pfahl mit voller Planungslänge des StAUN Rostock. Somit war bei einem eventuellen Verlust von Pfählen mit zu geringen Einspannlängen die Funktion der Buhne nur geringfügig eingeschränkt.



Abb. 15: Lageplan der Versuchsstandorte an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

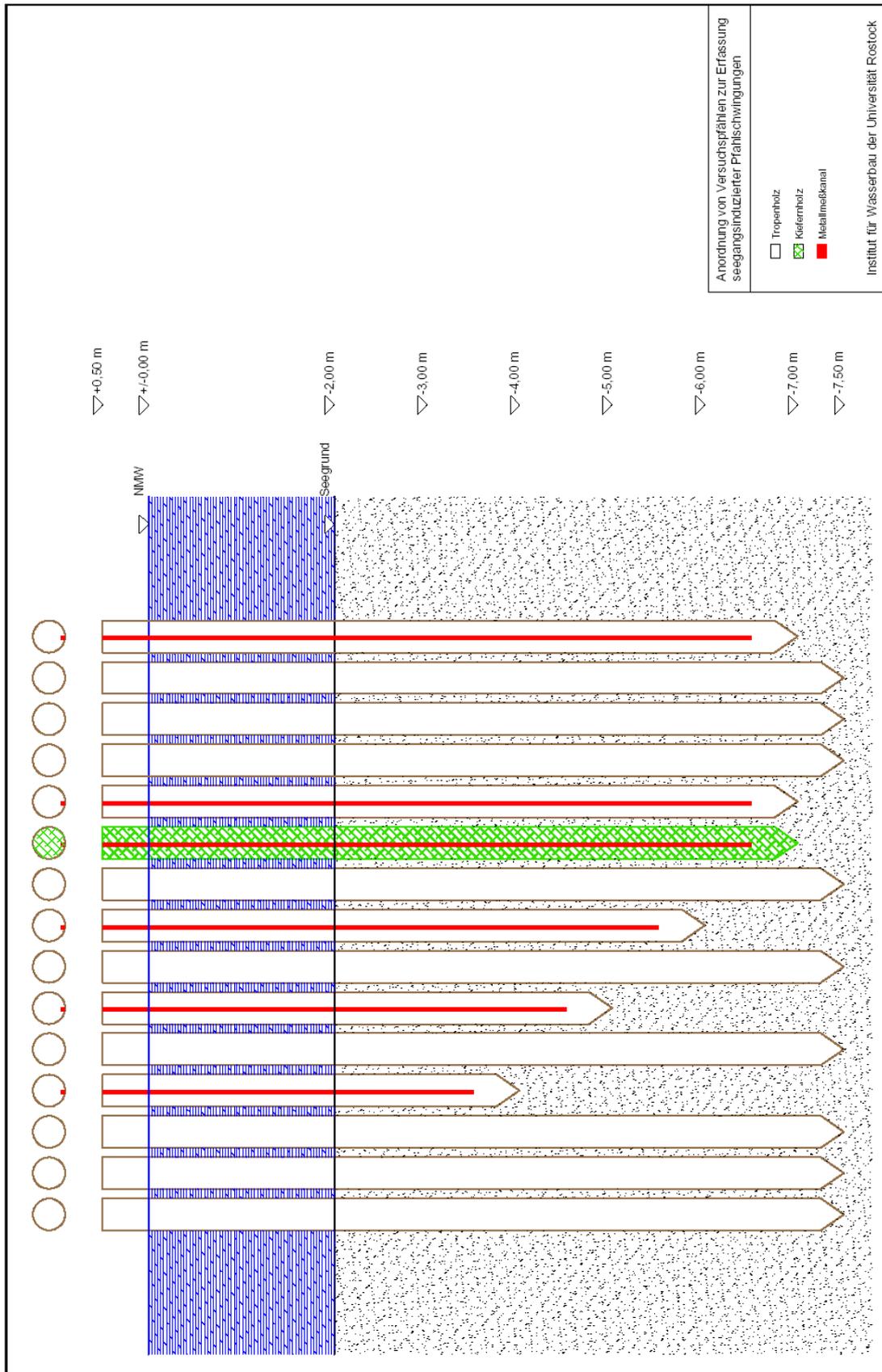


Abb. 16: Anordnung von Versuchspfählen zur Erfassung von Pfahlbewegungen

An der Küste Mecklenburg-Vorpommerns wurden mit Kanälen bestückte Pfähle in der beschriebenen Musteranordnung und Abwandlungen (z.T. geringere Anzahl von Versuchspfählen) in den Boden eingebracht. Die Standorte der Versuchspfähle mit installierten Metallkanälen sind in Tab. 1 mit Angaben über den anstehenden Baugrund und die mittlere Wassertiefe an den Versuchspfählen aufgelistet. Abb. 15 gibt einen Überblick über die geographische Lage der Versuchsstandorte.

Standort / Buhnennr.	Baugrund	Wassertiefe	Pfahlanzahl
<b>Ostseebad Kühlungsborn</b>	Sand auf Geschiebemergel	0,00 m	1 Vorversuche
<b>Ostseebad Heiligendamm B19</b>	Sand auf Geschiebemergel	1,20 m	5
<b>Ostseebad Heiligendamm B33</b>	Sand auf Mudde/Schluff auf Feinsand	2,0 m	6
<b>Nienhagen B4</b>	Geschiebemergel	2,50 m	2 Vorversuche
<b>Markgrafenheide B41</b>	Sand auf Geschiebemergel	2,50 m	5
<b>Zingst Ost B45</b>	Sand	2,50 m	6
<b>Zingst West B64</b>	Sand	2,80 m	5

Tab. 1: Versuchstandorte und Randbedingungen der Beschleunigungsmessungen

An den Standorten Kühlungsborn und Nienhagen wurden zum Beginn des Vorhabens Vorversuche zur Erfassung von Pfahlbewegungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 3.2.3.2).

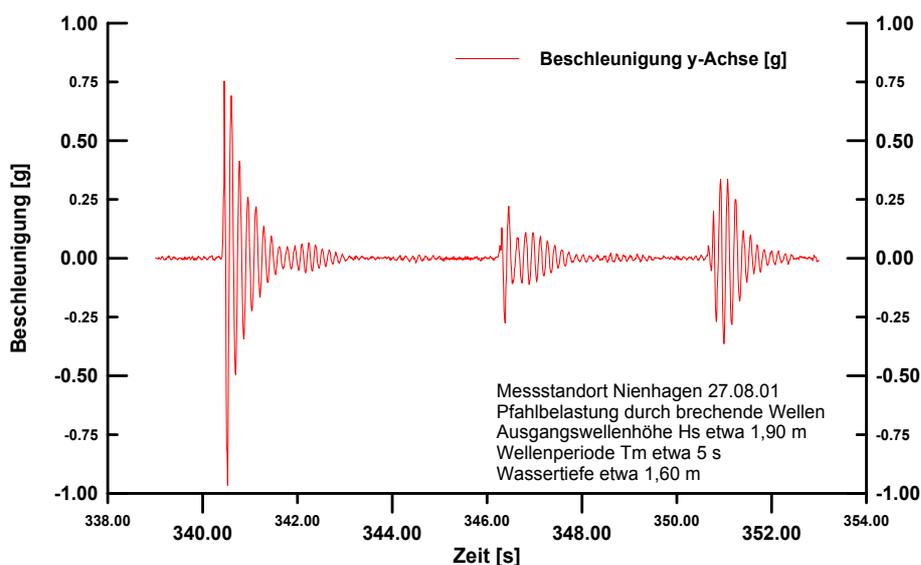


Abb. 17: Beschleunigungszeitreihe des Versuchspfahles vor Nienhagen

2001 wurden erste Beschleunigungsmessungen bei Wellenbelastung an einem Bühnenpfahl (Kiefer) vorgenommen. Es wurden Pfahlschwingungen bis zu 1 g mit einer Schwingungsfrequenz von 6 – 7,5 Hz, die durch brechende Wellen am Pfahl hervorgerufen wurden, aufgezeichnet. Nach Untersuchungen des StAUN war der mit der Messeinrichtung ausgerüstete Pfahl nicht durch die Bohrmuschel (*Teredo navalis*) geschädigt. In Abb. 17 ist beispielhaft ein Teil der aufgezeichneten Beschleunigungszeitreihe dargestellt. Mit den Voruntersuchungen konnte die grundsätzliche Eignung des gewählten Messverfahrens gezeigt werden (Forderung des Projektträgers).

Kontinuierliche Bewegungsmessungen mit Erfassung der Seegangbelastung und der Randbedingungen wurden grundsätzlich während der Wintersaison von September bis April durchgeführt, da in diesem Zeitraum stärkere Seegangereignisse zu erwarten sind und eine Störung der touristischen Nutzung des Strandes zu vermeiden war.

An den nachfolgend angegebenen Standorten wurden kontinuierliche Bewegungsmessungen in den angegebenen Zeiträumen durchgeführt. Eine gleichzeitige Datenerfassung an allen Standorten war nicht möglich, da aufgrund der Kosten nur ein Mess- und Datenverarbeitungssystem zur Verfügung stand.

Wintersaison 2001/2002	Markgrafenheide (Buhne B41)
Wintersaison 2003/2004	Heiligendamm (Buhne B19 und B33)
Wintersaison 2004/2005	Zingst West (Buhne B64)

Relevante Pfahlbewegungen (Schwingungen) wurden nur bei Einwirkung brechender Wellen auf den Pfahl gemessen. Nur wenn eine Stoßbelastung infolge brechender Wellen auf den Pfahl einwirkt, wird der Pfahlkopf weit genug ausgelenkt. Durch die elastischen Eigenschaften des Systems (Rückstellkräfte) entsteht dann eine Schwingung. Zunächst unerwartet wurden bei extremen Sturmereignissen mit erhöhtem Wasserstand nur geringe Pfahlbewegungen registriert. Die Ursache ist, dass die brechenden Wellen die Pfahlköpfe bei hohen Wasserständen nicht erreichen.

An den verschiedenen Messstandorten wurden Schwingungsfrequenzen zwischen 6 und 14 Hz abhängig von Pfahllänge, Baugrundeigenschaften und Belastung gemessen. Die Schwingungsfrequenzen liegen damit in einem Bereich, in dem Bodenverflüssigungseffekte infolge zyklischer Belastung des Baugrunds auftreten können.

Die Schwingungsfrequenzen sind, wie erwartet, grundsätzlich von der Länge des Versuchspfahles aber auch von der horizontalen Belastung abhängig. Bei stärkerer Krafteinwirkung (größere Auslenkung und Beschleunigung des Pfahls) verlangsamt sich insbesondere in sandigem Baugrund die Schwingungsfrequenz, da die schwingende Pfahllänge zunimmt. Der Pfahl bewegt sich bis in den Boden hinein. Die Bewegungsmessungen im Boden ergaben unterschiedliche Ergebnisse entsprechend den verschiedenen Messstandorten. In Markgrafenheide und Zingst konnten Pfahlbewegungen bis in den sandigen Baugrund nachgewiesen werden. In Heiligendamm B19 wurden bei Pfahlbe-

lastung durch brechende Wellen nur Schwingungen oberhalb des Bodens gemessen. Die durch den Aufprall der Welle auf den Pfahl erzeugte Schallwelle (Körperschall mit hoher Frequenz) ist auch am Pfahlfuß nachweisbar.

An dem gleichen Versuchspfahl wurden unterschiedliche zeitliche Verläufe von Schwingungen gemessen. Es treten gedämpfte Schwingungen (Anregung durch brechende Welle, gedämpftes Ausschwingen) und Schwingungen aus Überlagerung mehrerer Schwingungen (Veränderung der Pfahlbeschleunigung) auf.

Im ersten Fall kommt es bei Belastung des Pfahlkopfes zu einer kurzzeitigen Kraffteinwirkung und dadurch zu einer Auslenkung des Pfahlkopfes aus seiner Ruhelage. Es entsteht eine gedämpfte Schwingung (Abb. 18), die im Idealfall mit konstanter Frequenz und Dämpfung ausschwingt. Die Beschleunigungsamplituden nehmen mit fortschreitender Schwingungsdauer kontinuierlich ab. Die Schwingungsdauer ist vergleichsweise kurz.

Bei einem Teil der erfassten Schwingungen kommt es während der Schwingungsdauer zu Veränderungen der Frequenz und des Dämpfungswertes. Die Beschleunigungsamplituden verändern sich (Abb. 18). Die Schwingungsdauer erhöht sich deutlich. Diese Effekte treten durch zusätzliche Beschleunigung / Dämpfung des Pfahles durch Wellen- und Strömungskräfte und durch die Überlagerung der Schwingung des Versuchspfahles mit den Schwingungen der Nachbarpfähle auf.

Die Veränderung der Beschleunigung des Versuchspfahles durch die Schwingungen der Nachbarpfähle lässt sich mit der Schwingungsausbreitung über den Boden erklären. Beim Auftreffen der Welle wird der Bühnenpfahl in Schwingung versetzt und die Schwingung wird in den Boden übertragen. Noch bevor die Wasserwelle den nächsten Pfahl erreicht und diesen zu einer Schwingung anregen kann, wird die Schwingung über den Boden auf den Pfahl übertragen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Boden beträgt ein Vielfaches der Wasserwellenfortschrittsgeschwindigkeit (ca. 200 m/s für Sand). Durch Überlagerungseffekte können die Schwingungsdauer erhöht sowie Amplitude und Frequenz verändert werden.

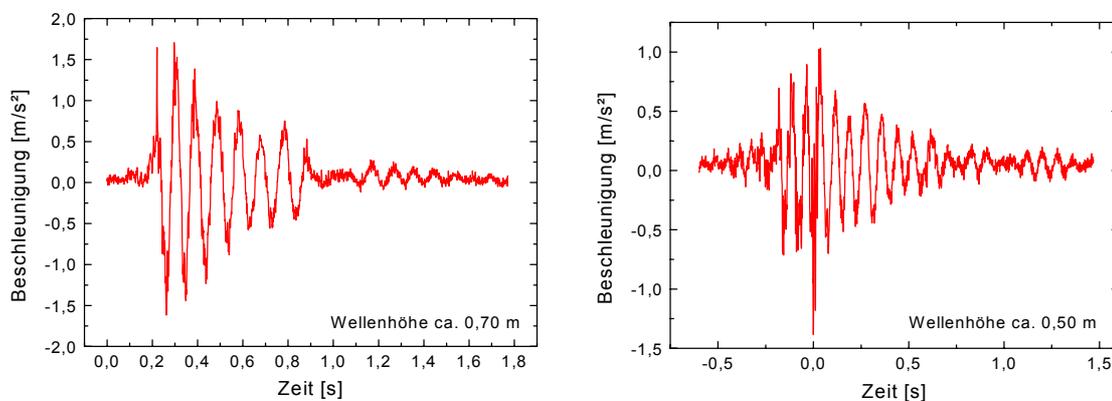


Abb. 18: Gedämpfte Pfahlschwingung und überlagerte Pfahlschwingung in Markgrafeneide B41

Zur Übertragung der Schwingungen der Nachbarpfähle auf den Versuchspfahl wurden in Heiligendamm an der Buhne 19 und 33 Feldversuche durchgeführt. Hierfür wurden Pfähle mit einem Hammer zu Schwingungen angeregt. Es konnte gezeigt werden, dass Schwingungen von bis zu 1,5 m entfernten Bühnenpfählen über den Boden- und Wasserkörper auf den Versuchspfahl übertragen werden. Der Versuchspfahl wird zu einer eigenen Schwingung angeregt. Da die Eigenfrequenz von benachbarten Holzpfählen mit gleicher Holzart, Einspannlänge, ähnlichen Pfahldurchmessern und Baugrundeigenschaften nahezu identisch sind, kann es neben Überlagerungen der Schwingungen zu Resonanzeffekten kommen.

Eine wichtige Einflussgröße für das Abklingen und damit der Dauer und Amplitude der Schwingungen ist die Dämpfung  $\delta$  des Systems Pfahl-Boden. Die Dämpfung ist abhängig von der freien Pfahllänge ( $L_f$ ), dem E-Modul und Querschnitt des Pfahls und der Dämpfung durch den anstehenden Boden. Die ermittelten Dämpfungskonstanten  $\delta$  des Systems Pfahl-Boden reichen von  $\delta=3,2$  in Markgrafenheide ( $L_f=2,80$  m) bis ca.  $\delta=10$  am Standort Heiligendamm Buhne 19 ( $L_f=2,40$  m). Die E-Moduln und Pfahldurchmesser der Versuchspfähle an den Standorten können als annähernd identisch angenommen werden. Die Unterschiede in der freien Pfahllänge über GOK begründen keinen so großen Unterschied in den Dämpfungseigenschaften. Der deutliche Unterschied in den Dämpfungseigenschaften ist auf die bodenmechanischen Kennwerte des anstehenden Baugrunds zurückzuführen. Schwingungsdauer und Amplitude verringern sich dadurch stark.

### 3.2.3.5 Auswertung der Messergebnisse

Für die Bemessung von Bühnenpfählen ist neben Frequenz und Schwingungsdauer die Amplitude der Pfahlschwingungen als Eingangsgröße notwendig. Die eingesetzten Sensoren liefern zunächst nur die Beschleunigung des Messpfahls. Die dazugehörige Auslenkung wird durch zweifache Integration aus der Beschleunigungsfunktion nach folgendem Ansatz für gedämpfte Schwingungen errechnet:

$$\text{Beschleunigung: } \frac{\partial^2}{\partial t^2} y = \delta^2 \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0) - \omega_d^2 \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0) + 2\delta\omega_d \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \sin(\omega_d t + \phi_0)$$

$$\text{Geschwindigkeit: } \frac{\partial}{\partial t} y = -\delta \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0) - \omega_d \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \sin(\omega_d t + \phi_0)$$

$$\text{Amplitude: } y = y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0)$$

Durch eine Parameterstudie der Variablen werden geeignete Funktionen für die aufgezeichneten Beschleunigungen ermittelt und die dazugehörigen Auslenkungen des Pfahls an der Position des Beschleunigungssensors berechnet. Durch Interpolation zwischen

den Berechnungspunkten kann die Verformung des Pfahls über die gesamte Länge eingeschätzt werden (Vorraussetzung mehrere Beschleunigungsmesspositionen).

Der Auswertungsalgorithmus zur Ermittlung der Auslenkung aus den gemessenen Beschleunigungen wurde im Labor überprüft. Dazu wurden 2 Beschleunigungssensoren (X-, Y-Richtung) an einem fest eingespannten Holzstab befestigt und an die Messgeräte zur Datenerfassung angeschlossen. In Höhe der Beschleunigungssensoren wurde ein Tintenschreiber so am Holzstab befestigt, dass die Bewegungen des Stabes in X-Richtung auf eine Platte mit Millimeterpapier aufgezeichnet wurden. Abb. 19 zeigt den Versuchsaufbau.

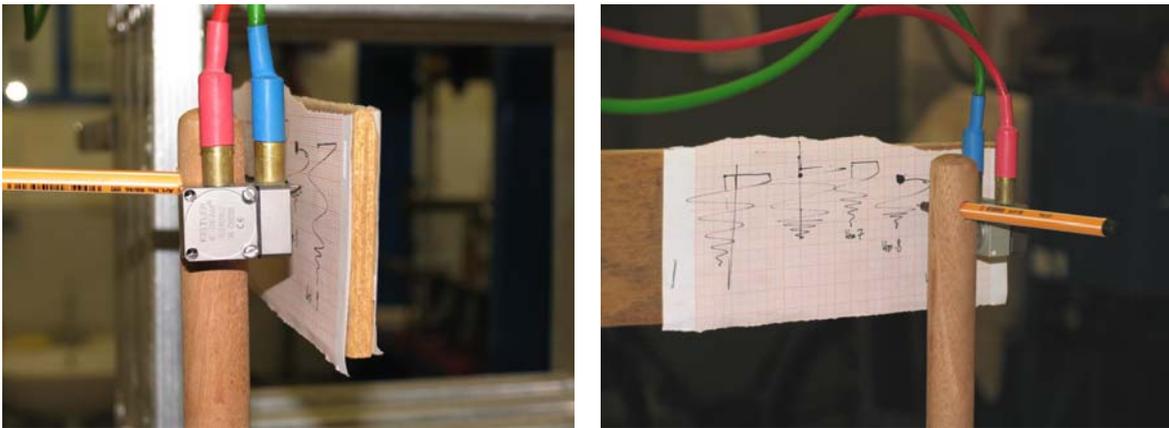


Abb. 19: Laborversuche - Holzstab mit Beschleunigungssensoren und Auslenkungsschreiber

Der Holzstab wurde mechanisch aus der Ruhelage ausgelenkt und begann bei Freigabe des Pfahls durch die Rückstellkräfte des Systems zu schwingen. Die Beschleunigungen wurden erfasst und der zurückgelegte Weg des Pfahls in Höhe der Sensoren (Tintenschreiber) auf dem Millimeterpapier aufgezeichnet. Die Platte mit dem Millimeterpapier wurde während des Schwingvorganges vertikal bewegt, um die Zeichnung auswerten zu können.

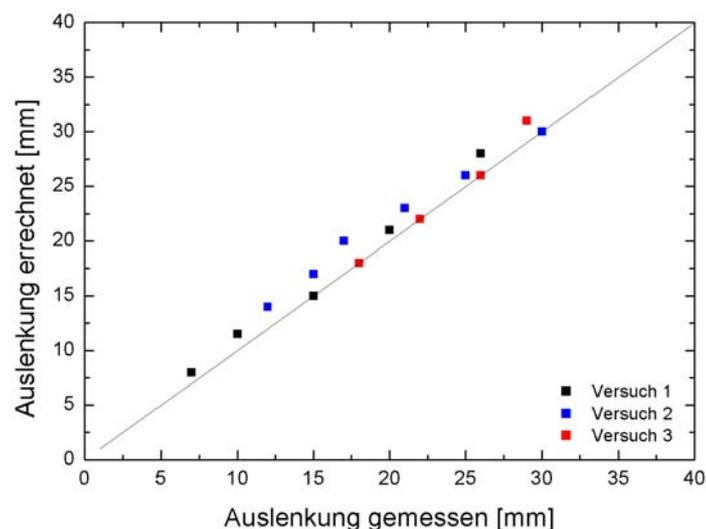


Abb. 20: Vergleich von errechneten und gemessenen Holzstabauslenkungen

Die Auslenkung des Holzstabes wurde mit dem oben beschriebenen Auswertalgorithmus aus der Beschleunigung errechnet und mit den gemessenen Werten (Millimeterpapier) verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem gewählten Auswertverfahren aus den erfassten Beschleunigungen die dazugehörigen Auslenkungen ermittelt werden können. In Abb. 20 sind die errechneten und die gemessenen Werte für verschiedene Versuche vergleichsweise dargestellt.

Dieses Auswertverfahren wurde zur Ermittlung der Pfahlauslenkungen der Versuchspfähle in der Natur angewendet. Die Ermittlung der Beschleunigungsfunktion für einfach gedämpfte Schwingungen mit einer Parametervariation zur Datenanpassung bereitete keine Probleme. Für überlagerte Schwingungen (Veränderung von Frequenz und Amplitude), ist die Datenanpassung z. T. schwierig. Die Beschleunigungsfunktion kann jedoch auch dort für definierte Zeitfenster der Schwingung berechnet werden (vgl. Abb. 21).

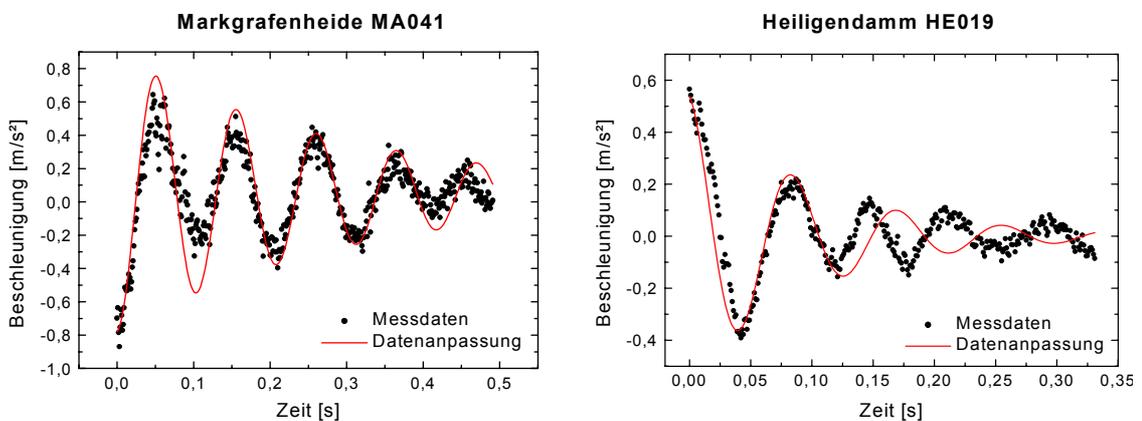


Abb. 21: Datenanpassung für gemessene Ereignisse in Markgrafeneide und Heiligendamm (Bsp.)

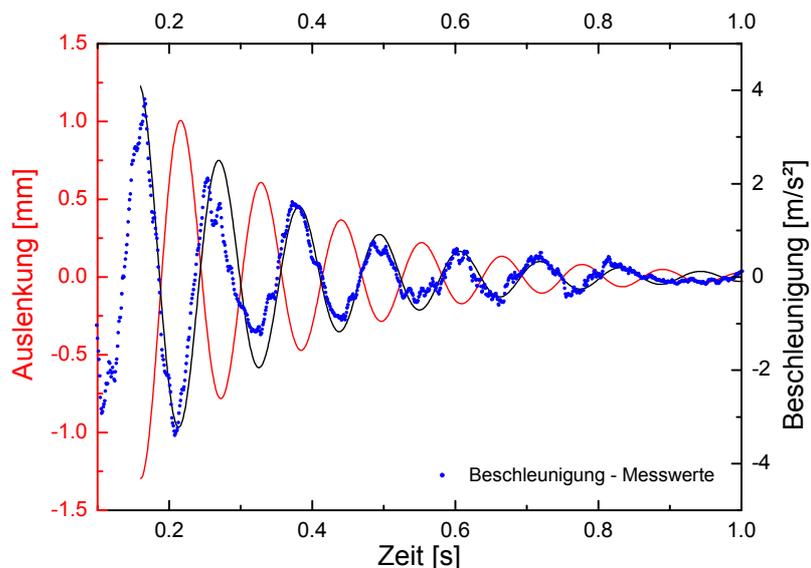


Abb. 22: Beschleunigungs- und Auslenkungswerte Kopfpfahl Buhne 19 Heiligendamm

Für die spätere Abschätzung von Haltekräften im Boden sind die maximal auftretenden Auslenkungen von Bedeutung. Abb. 22 stellt beispielhaft die gemessenen

Beschleunigungen, die ermittelte Beschleunigungsfunktion und die errechneten Auslenkungen für eine ausgewählte Schwingung des Kopfpfahles der Buhne 19 in Heiligendamm dar.

### **3.3 Ergebnisse und Zusammenfassung**

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf die Erfassung von Seegang, seegangsinduzierten Pfahlbewegungen und der Randbedingungen an den Versuchspfählen eingegangen. Die Messergebnisse und deren Auswertung wurden vorgestellt. Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Zusammenhang zwischen Seegang, Wasserstand und seegangsinduzierten Pfahlbeschleunigungen dargestellt. Es wird eine Übersicht über maximal gemessene Pfahlbeschleunigungen und daraus errechnete Pfahlschwingungsamplituden gegeben und eine statistische Betrachtung zur Häufigkeit des Auftretens von seegangsinduzierten Pfahlschwingungen durchgeführt. Danach werden die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchungen zum Lastfall Seegang (Seegang und seeganginduzierte Pfahlbewegungen) noch einmal zusammengefasst.

#### **3.3.1 Zusammenhang zwischen Seegang – Wasserstand - Pfahlbewegung**

Wie bereits beschrieben treten "relevante" Pfahlbeschleunigungen nur bei Belastung der Bühnenpfähle durch brechende Wellen auf. Als "Relevante" Pfahlbeschleunigungen werden im Folgenden Pfahlbeschleunigungen bezeichnet, die Werte über  $a=100$  mg aufweisen. Bei Beschleunigungen unter  $a=100$  mg sind die Auslenkungen sehr gering und die Schwingungsdauern sehr kurz.

Die Höhe des Wasserstandes ist neben der Wellenbelastung ein wichtiger Parameter, der das Auftreten und die Höhe von Pfahlbeschleunigungen beeinflusst. In Abb. 23 sind Wellenhöhen  $H_{1/3}$  (Messdaten der Waverider-Boje), Wasserstände (Internes Messnetz Küste des StAUN) eines Pegels in der Nähe der Versuchseinrichtung und gemessene Pfahlbeschleunigungen für einen ausgewählten Zeitraum von 12 Tagen dargestellt. Die kreisrunden Symbole stellen die Beschleunigungen eines Pfahls innerhalb der Bühnenreihe, die dreieckigen Symbole die Beschleunigungswerte des Kopfpfahles dar. Die Symbole geben jeweils die maximal aufgetretene Beschleunigung eines Ereignisses, d.h. einer Schwingung, wieder.

Bei Betrachtung der Abbildung fällt die Häufung der gemessenen Beschleunigungsereignisse zu bestimmten Zeitpunkten auf. Relevante Pfahlbeschleunigungen treten nur bei Überschreiten einer bestimmten Wellenhöhe und Unterschreiten eines bestimmten Wertes für den Wasserstand auf. Abb. 24 und Abb. 25 zeigen einen Ausschnitt aus der Zeitreihe und stellen nur Pfahlbeschleunigungen des Versuchspfahles innerhalb der Bühnenreihe dar. Im Zeitraum vom 04.12. – 09.12.2003 (Abb. 24) beginnt das Auftreten von Beschleunigungsereignissen bei einer Wellenhöhe von  $H_{1/3}=0,75$  m und einem Wasserstand  $WST<0,07$  m (Abweichung von Normalmittelwasser  $NMW=0,00$  m). Sobald der Wasser-

stand über diesen Wert hinaus steigt, treten keine Beschleunigungsereignisse auf, obwohl die Wellenhöhe weiter zunimmt.

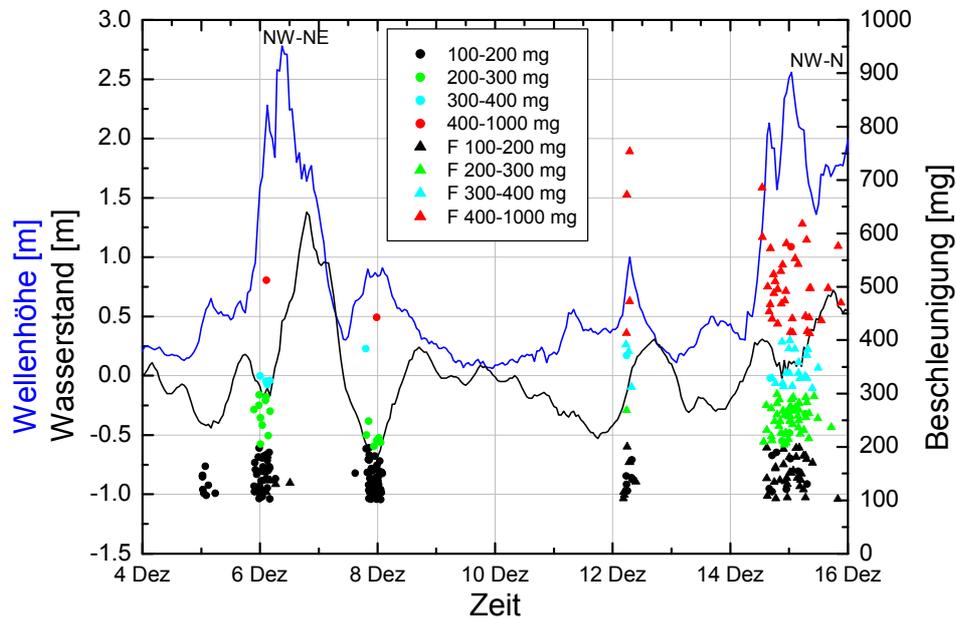


Abb. 23: Wellenhöhe  $H_{1/3}$ , Wasserstand und Pfahlbeschleunigungsereignisse Heiligendamm B19, 04.12.-16.12.2003

Ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Wellenhöhe und Wasserstand tritt auch im Zeitraum vom 12.12.-18.12.2003 auf. Pfahlbeschleunigungsereignisse  $a > 100$  mg treten bei einer Wellenhöhe  $H_{1/3} > 1,5$  m und einem Wasserstand  $< 0,25$  m auf (vgl. Abb. 25). Sobald der Wasserstand mehr als 0,25 m über NMW steigt sind in diesem Zeitraum keine relevanten Pfahlbeschleunigungen mehr nachweisbar, obwohl die signifikante Wellenhöhe über  $H_{1/3} = 1,5$  m liegt und somit brechende Wellen im Bereich der Buhne zu erwarten sind.

Für diese Beobachtung gibt es 2 Erklärungen:

- Der Wasserstand steigt soweit an, dass die brechenden Wellen die Pfahlköpfe nicht mehr erreichen. Eine stoßartige Belastung der Pfähle, die zu relevanten Pfahlbeschleunigungen führt, tritt nicht auf.
- Durch Änderungen des Wasserstandes verändert sich die Wassertiefe im Bereich der Versuchspfähle. Der Bereich, in dem Wellen mit einer bestimmten Wellenhöhe infolge Flachwassereinfluss (Wellenbrechkriterium) brechen, verschiebt sich senkrecht zur Küstenlinie. Die Brecherzone befindet sich nicht mehr im Bereich der Versuchspfähle, eine Belastung der Pfähle durch brechende Wellen tritt nicht auf, und es werden demzufolge auch keine Pfahlbeschleunigungen aufgezeichnet.

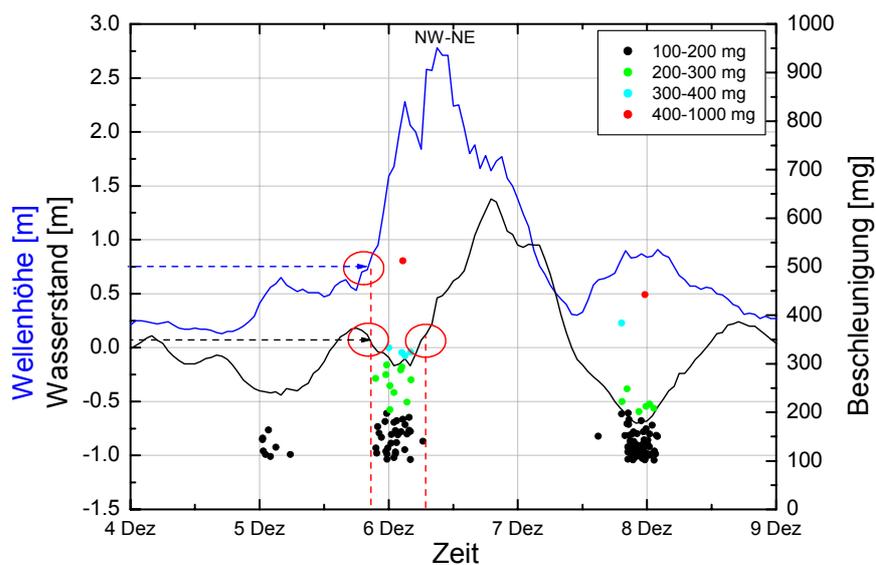


Abb. 24: Wellenhöhe  $H_{1/3}$ , Wasserstand und Pfahlbeschleunigungsereignisse, Heiligendamm B19, 04.12.-09.12.2003

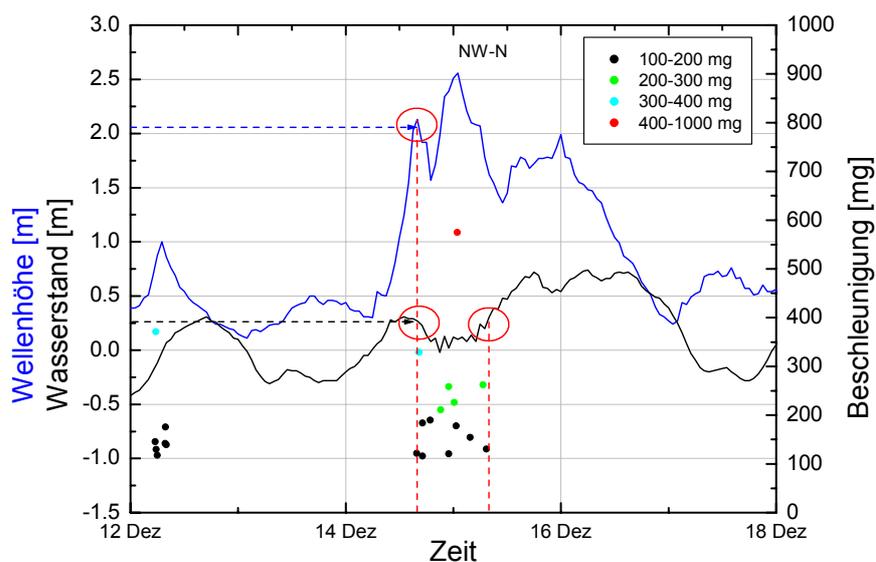


Abb. 25: Wellenhöhe  $H_{1/3}$ , Wasserstand und Pfahlbeschleunigungsereignisse, Heiligendamm B19, 12.12.-18.12.2003

Vergleicht man das Auftreten der Beschleunigungen von Pfählen am Kopf einer Buhne mit den Beschleunigungen von Pfählen innerhalb Buhnenreihe unter nahezu gleichen Randbedingungen (Wassertiefe, Wellenhöhe Wasserstand) fallen deutliche Unterschiede auf. In Abb. 26 sind die Beschleunigungen eines Pfahls der Buhne 19 in Heiligendamm (Buhnenreihe) dargestellt. In Abb. 27 sind zusätzlich die Beschleunigungen des Kopfpfahles derselben Buhne, der nur wenige Meter vom Versuchspfahl in der Pfahlreihe entfernt ist, eingetragen (gleicher Zeitabschnitt).

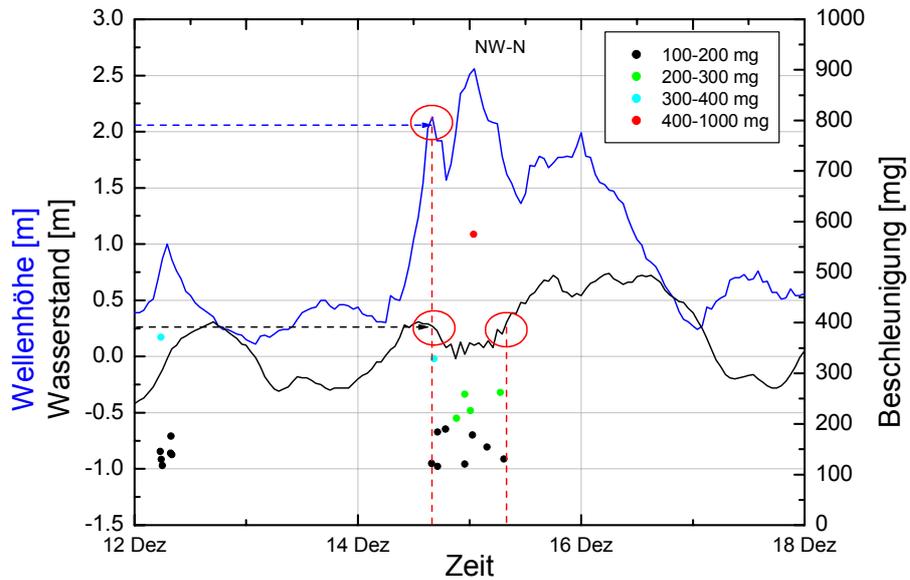


Abb. 26: Pfahlbeschleunigungen Reihenpfahl, Heiligendamm B19, 12.12.-18.12.2003

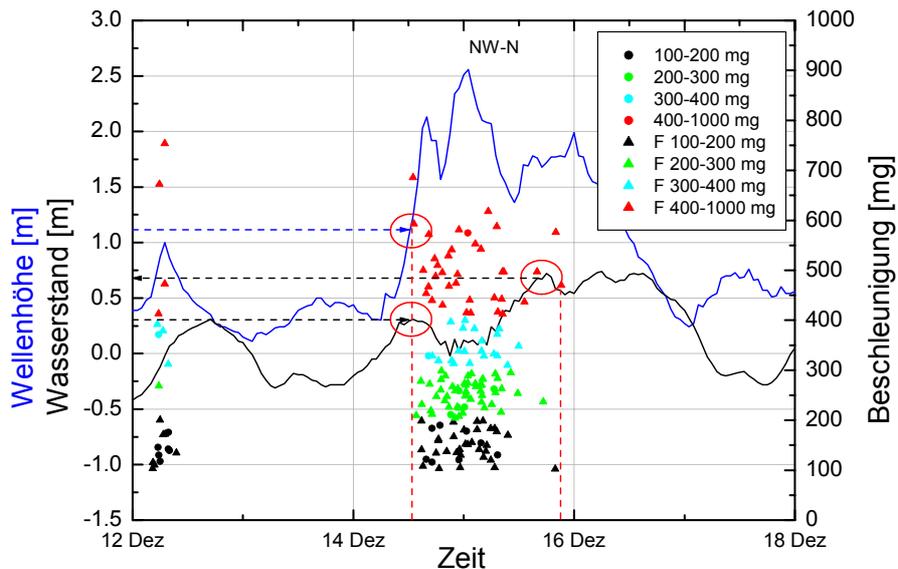


Abb. 27: Pfahlbeschleunigungen Reihenpfahl – Kopfpfahl B19, Heiligendamm B19,  
 12.12.-18.12.2003

Die grundsätzliche Abhängigkeit zwischen Wellenhöhe, Wasserstand und dem Auftreten von Pfahlbeschleunigungen ist auch am Kopfpfahl erkennbar. Die Pfahlbeschleunigungsereignisse treten am Kopf der Buhne allerdings in einem größeren Zeitraum und auch bei Wasserstandserhöhungen über 0,25 m auf. Im dargestellten Beispiel wurden Ereignisse bis zu einer maximalen Wasserstandserhöhung von 0,70 m gemessen.

Die gemessenen Beschleunigungen am Kopf der Buhne können durch die exponierte Position des Kopfpfahles (kein Schutz durch die Nachbarpfähle) höhere Beschleuni-

gungswerte als die Versuchspfähle innerhalb der Pfahlreihe erreichen.

Im Anhang ist eine Auswahl an Diagrammen (Wellenhöhe - Wasserstand - Pfahlbeschleunigung) für die verschiedenen Messstandorte wiedergegeben. Nach Analyse aller gemessenen Ereignisse wurde der Zusammenhang zwischen Wellenhöhe – Wasserstand – Pfahlbeschleunigung ermittelt. Das Auftreten von relevanten Pfahlbeschleunigungen in Abhängigkeit von Wellenhöhe und Wasserstand kann mit dem in Abb. 28 dargestellten Diagramm abgeschätzt werden. Eine genaue Vorhersage der Größe der zu erwartenden Pfahlbeschleunigung ist nicht möglich.

Der dargestellte Zusammenhang (Abb. 28) ist für Bühnenpfähle innerhalb der Bühnenreihe und Kopfpfähle gültig.

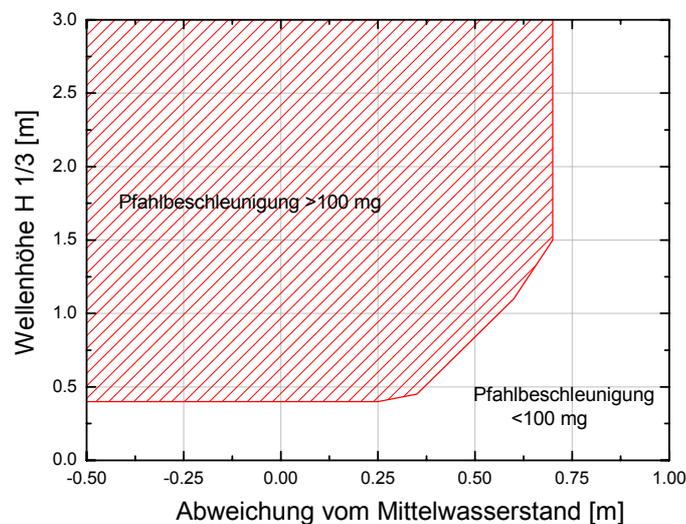


Abb. 28: Zusammenhang Wellenhöhe - Wasserstand - Pfahlbeschleunigung (Reihenpfahl)

### 3.3.2 Maximale Pfahlbeschleunigungen und Pfahlbewegungen

Wie schon im Abschnitt 3.2.3.4 dargestellt wurden an 4 Standorten an der Küste seegangsinduzierte Pfahlbewegungen kontinuierlich erfasst. Tab. 2 gibt einen Überblick über die Größe der Pfahlbeschleunigungen an den Messstandorten. Die an den Kopfpfählen gemessenen Pfahlbeschleunigungen weisen bei ähnlicher Seegangsbeanspruchung höhere Werte auf, da ein Schutz durch benachbarte Pfähle nicht gegeben ist (vgl. auch Abb. 26; Abb. 27). Es wurden an den Versuchsstandorten auch wesentlich höhere Beschleunigungswerte, als in Tab. 2 dargestellt, gemessen. Diese hohen Beschleunigungswerte treten beim Aufprall von Wellen oder von Nachbarpfählen auf den Versuchspfahl in Form von Körperschall mit hoher Frequenz auf. In diesen Fällen werden nur geringe Pfahlbewegungen verursacht.

Aus den gemessenen Pfahlbeschleunigungen lassen sich nach dem in Abschnitt 3.2.3.5 dargestellten Verfahren die Pfahlschwingungsamplituden errechnen. Tab. 3 gibt eine

Übersicht über die an den Versuchstandorten ermittelten maximalen Pfahlbewegungsamplituden am Pfahlkopf.

Messstandort	max. gemessene Beschleunigung [mg]	
	Kopfpfahl	Reihenfahl
Heiligendamm B19	910	850
Heiligendamm B33	keine Daten	390
Markgrafenheide B41	keine Daten	741
Zingst B 64	1060	635

Tab. 2: Max. Beschleunigungswerte der Versuchspfähle

Messstandort	max. Amplitude [mm] (Weg)	
	Kopfpfahl	Reihenfahl
Heiligendamm B19	2,3	2,0
Heiligendamm B33	keine Daten	1,0
Markgrafenheide B41	keine Daten	1,5
Zingst B 64	3,0	3,5

Tab. 3: Max. Wegamplituden der Versuchspfähle

### 3.3.3 Seegangstatistik zum Auftreten seegangsinduzierter Pfahlschwingungen

Wie bereits dargestellt, wurde das Wellenklima im Untersuchungsgebiet mit einer Wellenmessboje (Directional Waverider) erfasst. Im Untersuchungszeitraum wurden signifikante Wellenhöhen bis zu  $H_{m0}=3,10$  m gemessen (vgl. Abschnitt 3.2.1). Nach der auf die Arbeiten von LONGUET-HIGGINS (1952) zurückgehenden Rayleigh-Verteilung der Wellenhöhen im Zeitbereich sind zu diesem Ereignis zugehörige maximale Wellenhöhen von rd.  $H_{m0}=5,75$  m ( $n=1000$  Wellen) zu erwarten.

Buhnenpfähle werden in Mecklenburg-Vorpommern planmäßig nur in Bereichen mit Wassertiefen bis zu  $d=3$  m bezogen auf den mittleren Wasserstand eingesetzt (vgl. Abschnitt 2). In diesen küstennahen Bereichen sind die Wellenhöhen auch bei erhöhten Wasserständen als Folge der beschränkten Wassertiefe begrenzt. Wellen, deren Höhe die Wassertiefe im Bereich der Buhnenpfähle überschreiten, brechen bereits bevor sie die Buhnenpfähle erreichen. Während des Brechvorgangs kommt es zur Energiedissipation.

Im den Abschnitten 3.2.3.4 und 3.3.1 wurde dargestellt, dass seegangsinduzierte Pfahlschwingungen, bei denen Pfahlbeschleunigungen von  $a>100$  mg entstehen, ausschließlich als Folge dynamischer Beanspruchungen durch brechende oder bereits gebrochene

Wellen im Bereich der Bühnenpfähle auftreten. Die größten Beanspruchungen sind durch Druckschläge von direkt an den Bühnenpfählen brechenden Wellen zu erwarten.

Im Antrag zum Forschungsvorhaben war vorgesehen, die Abschätzung extremer Belastungen der Bühnenpfähle auf der Grundlage einer möglichst langen Zeitserie aus gemessenen Seegangseignissen in Kombination mit Seegangseignissen aus Wind-Wellen-Korrelationsrechnungen durchzuführen. Es war geplant, diese Zeitserie extremwertstatistisch zu analysieren und extreme Belastungen abzuschätzen. Die Untersuchungen im Feld haben gezeigt, dass maximale Belastungen der Bühnenpfähle nicht allein aus maximalen örtlichen Wellenhöhen resultieren, sondern dass diese vielmehr aus einer Kombination von mäßig hohen Wellen mit niedrigen Wasserständen resultieren. Die maximale Beschleunigung der Pfähle wurde im Untersuchungszeitraum bei einem Wasserstand von 0,40 m über NMW und einer signifikanten Wellenhöhe von  $H_{m0}=1,10\text{m}$  gemessen.

Die Ermittlung extremer Seegangparameter im Untersuchungsgebiet durch Extrapolation von gemessenen oder errechneten Seegangseignissen, wie im Antrag vorgesehen, ist für die Ermittlung von extremen Belastungen aus Seegang auf Bühnenpfähle deshalb nicht erforderlich. Es muss nach den Untersuchungsergebnissen vielmehr davon ausgegangen werden, dass die Kombination von Wellen und Wasserständen, die zu extremen Beschleunigungen an den Bühnenpfählen führen, im Bereich der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns vergleichsweise häufig auftreten. Im Folgenden wird auf die statistische Häufigkeit dieser Ereignisse eingegangen.

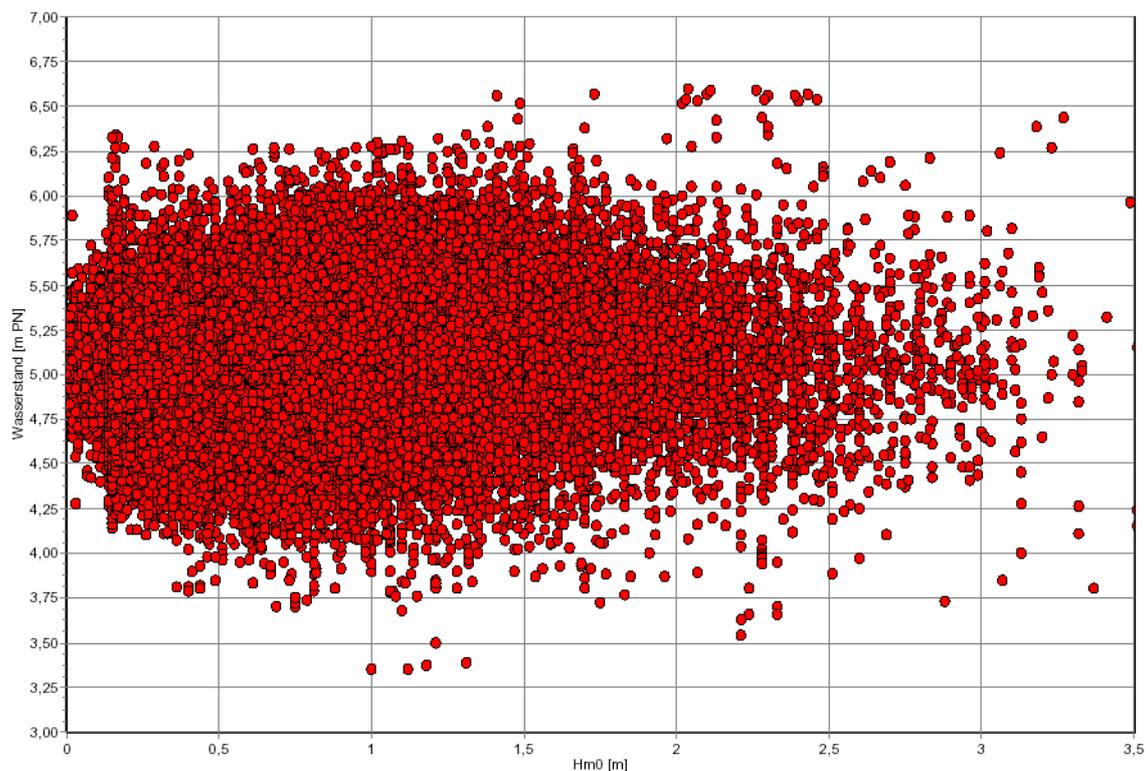


Abb. 29: Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe und Wasserstand in Warnemünde

Abb. 29 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen Wasserstand und Wellenhöhe für das Seegebiet vor Warnemünde. Der Standort Warnemünde wurde für die Untersuchungen gewählt, da hier eine lange Zeitreihe (1975-2003) mit exakten Welleninformationen (Wind-Wellen Korrelation) und Wasserstandinformationen im IWR vorliegen. Vergleiche auf der Grundlage von Messungen haben gezeigt, dass sich die Seegangparameter vor Warnemünde nur geringfügig von den Seegangsparemtern vor Heiligendamm / Börgerende unterscheiden. Diese Unterschiede werden für die vorliegenden Fragestellungen als vernachlässigbar angesehen. Abb. 29 zeigt, dass hohe Wellenhöhen unabhängig vom Wasserstand auftreten.

Im Untersuchungsgebiet treten erhöhte Wasserstände nur bei bestimmten Windrichtungen durch Windstaueffekte oder durch Beckenschwingungen der Ostsee auf und sind vom Verlauf der Küstenlinie sowie weiteren lokalen Effekten (z.B. Buchtenstau) abhängig. Hohe Wellen können in MV dagegen bei einer Vielzahl von Windrichtungen (West-Nordwest-Nord-Nordost) an der Küste und somit im Bereich von Bühnenpfählen auftreten. Küstennah ist die Wellenhöhe, wie bereits erwähnt, durch Wellenbrechen begrenzt.

Aus der Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen Wellenhöhen und zugehöriger Wasserstände kann die mittlere Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Ereignisse ermittelt werden. Im Abschnitt 3.3.1 wurde der Zusammenhang zwischen signifikanter Wellenhöhe und Wasserstand und dem Auftreten von relevanten Pfahlschwingungen dargestellt. Relevante Pfahlbewegungen treten bei Ausgangswellen  $H_{1/3} > 0,40$  m und Wasserständen  $WST < 0,70$  m über NMW auf. Die mittlere Häufigkeit der hydrodynamischen Bedingungen für das Eintreten relevanter Pfahlbewegungen wurde aus der Häufigkeitsverteilung der Wellenhöhen in Kombination mit den Wasserständen zu  $P=44,8\%$  bestimmt. Relevante Pfahlbewegungen mit  $a > 100$  mg treten also sehr häufig auf. Errechnet man die mittlere Häufigkeit der hydrodynamischen Bedingungen für das Eintreten von besonders hohen Pfahlbeschleunigungen von  $a > 500$  mg ( $WST < 0,00$  m und  $H_s > 0,65$  m oder  $0,00 < WST < 0,7$  und  $H_s > 0,95$  m) ergibt sich ein Wert von  $P=17,15\%$ .

Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen, die infolge der dynamischen Beanspruchung des Bodens zu Bodenverflüssigungseffekten führen können, treten wie gezeigt häufig auf und sind bei der Bemessung von Bühnenpfählen einzubeziehen.

### 3.3.4 Zusammenfassung

Im Untersuchungsprogramm zum Lastfall Seegang wurden Seegang, seegangsinduzierte Pfahlbewegungen von Bühnenpfählen und die Randbedingungen an den Versuchspfählen erfasst. Es wurden zunächst Vorversuche im Labor und in der Natur zur Auswahl einer geeigneten Mess- und Installationstechnik durchgeführt. An 4 Standorten mit unterschiedlichen Baugrundeigenschaften an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns wurden mit dieser Technik Seegangparameter, Pfahlbeschleunigungen und die Wassertiefe an den Versuchspfählen kontinuierlich erfasst. Die Einbindelänge, Wassertiefe und Position der

Versuchspfähle in der Bühnenreihe wurde variiert. Durch die zeitgleiche Messung von Belastung (Seegang) und Pfahlreaktion (Beschleunigung) konnte auf den Zusammenhang zwischen Belastung und Pfahlreaktion geschlossen werden. Die wichtigsten Erkenntnisse werden im Folgenden stichpunktartig dargelegt:

- Pfahlschwingungen in nennenswerter Größe treten nur bei Belastung durch brechende Wellen auf.
- Relevante Pfahlschwingungen ( $a > 100$  mg) treten nur bei bestimmten Kombinationen von Wellenhöhe und Wasserstand auf. Der Zusammenhang zwischen diesen Größen wurde durch die Untersuchungen geklärt und kann durch ein Diagramm abgeschätzt werden.
- Die gemessenen Schwingungsfrequenzen liegen in einem Bereich, in dem Bodenverflüssigungseffekte infolge zyklischer Belastung des Baugrunds auftreten können.
- In sandigem Baugrund wurden die Pfahlschwingungen bis in den Boden hinein nachgewiesen.
- Die Schwingungsdauer kann sich durch Übertragung der Schwingungen der Nachbarpfähle auf den betrachteten Pfahl deutlich verlängern.
- die max. gemessenen Beschleunigungswerte liegen für Pfähle innerhalb der Bühnenreihe bei 1060 mg und für Kopfpfähle bei ca. 850 mg
- die errechneten Bewegungsamplituden betragen am Pfahlkopf einige Millimeter und im Boden einige Zehntelmillimeter

Nach Abschluss der Untersuchungen im Vorhaben zum Lastfall Seegang stehen Seegangparameter sowie Schwingfrequenz, -dauer und Bewegungsamplitude von Bühnenpfählen als Eingangsdaten für die Bemessung, insbesondere zur Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten, zur Verfügung.

## 4 Lastfall Eis

### 4.1 Einführung und Untersuchungsprogramm

Wie im Abschnitt 2 (Forschungsansatz) dargelegt, werden im Forschungsvorhaben nur zu vertikalen Eislasten eigene Untersuchungen durchgeführt. Die horizontalen Eislasten auf Pfähle werden mit anerkannten Berechnungsansätzen (z.B. EAU 2004) bestimmt und als Eingangsdaten für die Bemessung der Einbindelänge von Bühnenpfählen verwendet.

Vertikale Eiskräfte auf Pfähle entstehen durch Festfrieren einer geschlossenen Eisdecke am Pfahl und nachfolgender Änderung des Wasserstandes. Bei steigenden Wasserständen entstehen aufwärts gerichtete Vertikalkräfte (Eishub – Abb. 30), bei sinkenden Wasserständen entstehen abwärts gerichtete Vertikalkräfte. Aufwärts gerichtete Kräfte müssen allein von der Gewichtskraft und der Mantelreibung des Pfahls im Boden aufgenommen werden. Den am Pfahl angreifenden abwärts gerichteten Kräften wirken der Auftrieb, die Mantelreibung des Pfahls im Boden und der Spitzendruck des Pfahls entgegen. Abwärts gerichtete Eiskräfte verursachen durch die sehr hohen Kräfte aus Spitzendruck und Mantelreibung kein Versagen des Systems Pfahl-Boden.

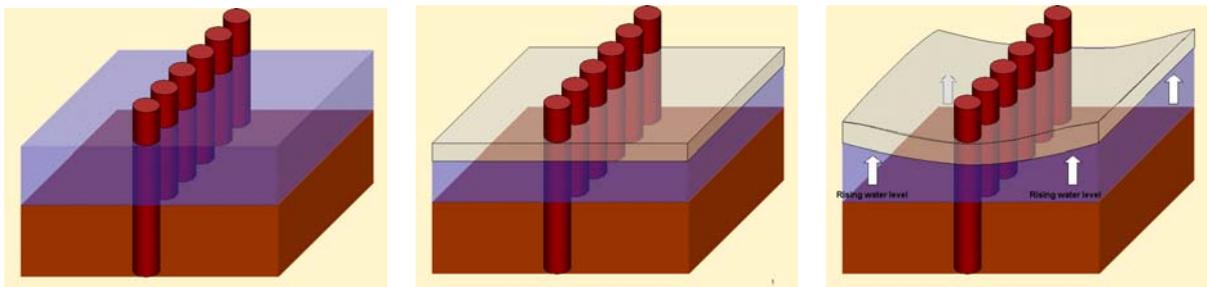


Abb. 30: Belastung von Bühnenpfählen durch eine festgefrorene Eisdecke bei steigendem Wasserpiegel

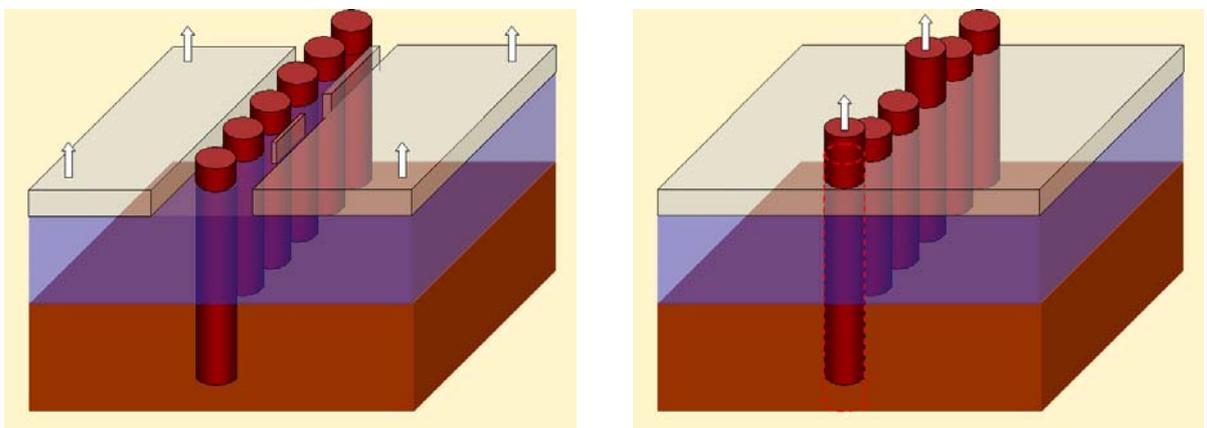


Abb. 31a: Die Überschreitung der Eisfestigkeit limitiert die übertragbaren Kräfte

Abb. 31b: Bei Versagen des Verbundes zwischen Pfahl und Boden kommt es zu einer Heraushebung des Pfahls

Bei Belastung von Pfählen durch aufwärts gerichtete Eiskräfte können bei ungenügender Einspannlänge der Pfähle (Überschreitung der Mantelreibung) einzelne Pfähle aus dem Baugrund gezogen werden (sog. ice-jacking – Abb. 31b).



Abb. 32: : Durch Eishub aus dem Boden gezogener Pfahl. Die verminderte Einspannlänge reichte nicht aus, um die Standsicherheit zu gewährleisten, und führte zu einer Schrägstellung (Usedom)

Dieser Vorgang an Pfählen kann sich im Verlaufe eines Eiswinters mehrmals wiederholen und ist an Pfahlbauwerken in Häfen häufig zu beobachten. Ist die Einspannlänge der Pfähle ausreichend bemessen, versagt die Eisdecke. Die beiden Versagensmechanismen sind in Abb. 31 gegenübergestellt.

Vorhandene Berechnungsansätze zu vertikalen Eislasten auf Einzelpfähle zeigen große Unterschiede. In Abb. 33 sind Ergebnisse nach dem Berechnungsansatz aus den Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (EAU 1996), dem Berechnungsansatz nach Kusnezow, der in der ehemaligen DDR für Bemessungsaufgaben angewendet wurde, und dem Berechnungsansatz des Ministeriums Russlands (Bau-technische Normen und Regeln) miteinander verglichen. Die Belastung wurde für einen Holzpfahl mit 0,25 m Durchmesser und den für die Ostsee typischen mechanischen Eiseigenschaften ( $1,7 \text{ MN/m}^2$  Druckfestigkeit) ermittelt.

Den Berechnungsansätzen liegen unterschiedliche physikalische Annahmen zugrunde. In den EAU 1996 wird von einer an den Pfahl angefrorenen Eisplatte mit einem Durchmesser von 5 m ausgegangen, die durch die Auftriebskraft des Eises vertikale Hubkräfte erzeugt. Diese Kräfte sind vergleichsweise gering. In den russischen Normen wird die Bie-

gezugfestigkeit des Eises als Eingangsgröße für die Ermittlung von vertikalen Eislasten verwendet. Kusnezow verwendet einen empirischen Ansatz. Aus Abb. 33 wird deutlich, dass die Abweichungen zwischen den Berechnungsansätzen insbesondere bei größeren Eisdicken erheblich sind.

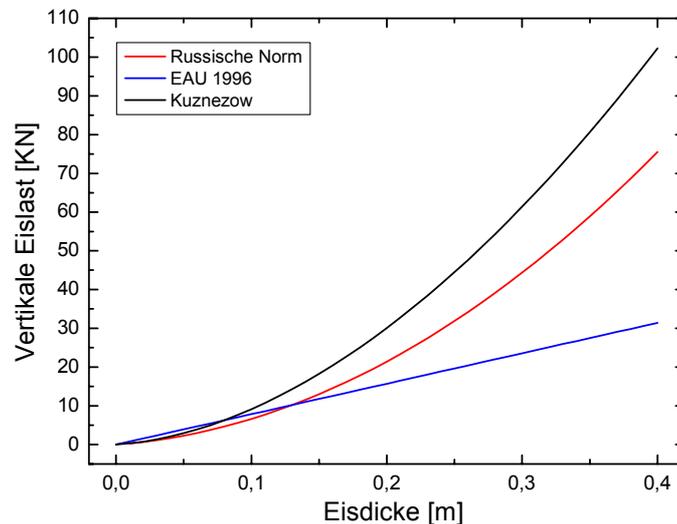


Abb. 33: Berechnungsansätze für vertikale Eislasten

Da zur Bestimmung der Einspannlänge von Bühnenpfählen die Kenntnis vertikaler Eislasten auf Bühnenpfähle als Belastungsgröße notwendig ist, wurde ein Untersuchungsprogramm zu deren Ermittlung entwickelt.

Eiswinter treten an der deutschen Ostseeküste nicht jedes Jahr auf und sind nicht vorhersehbar. Deshalb wurde die Belastung von Holzpfählen durch vertikale Eiskräfte im Labor untersucht. Vom IWR wurde in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Schwarz und Herrn Dr. Kühnlein (beide HSVA, Hamburg) ein Versuchsaufbau zur Ermittlung der Lastübertragung zwischen Eis und Pfahl entwickelt. Die Versuche wurden in der Klimakammer des Fachgebiets Baukonstruktionen und Bauphysik (Prof. Mainka) durchgeführt.

Zur Bestimmung der maßgeblichen Eisbelastung gehörte weiterhin eine Recherche zu auftretenden Eisdicken und -häufigkeiten an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns.

Die haltenden Kräfte (Mantelreibung) wurden u.a. durch in situ Zugversuche an Bühnenpfählen in der Natur untersucht. Diese Untersuchungen gehören zum Untersuchungsprogramm "Haltende Kräfte" und sind im Abschnitt 5.4.1 dargestellt.

## 4.2 Eisverhältnisse an der mecklenburgischen Ostseeküste

SCHMELZER (2004) untersuchte Eisbeobachtungen aus den vergangenen 100 Jahren. Dabei wurde deutlich, dass die „Eisbedingungen zwischen einzelnen Wintern erheblich variieren“. Auch für mittlere Zeitabschnitte ergibt sich ein uneinheitliches Bild: Im zwanzigsten Jahrhundert sind unregelmäßig verteilt kältere und wärmere Dekaden festzustellen (kälter: 1900 – 1930, 1940er und 1980er Jahre; wärmer: 1930er, 1970er, 1990er Jahre)

Generell ist nach SCHMELZER eine Abnahme der Vereisungsdauer und der auftretenden Eisdicken zu beobachten. Bei Betrachtung der Gesamtentwicklung ist festzustellen, dass die jährliche Vereisungsdauer in der westlichen Ostsee im letzten Jahrhundert um ca. 10 Tage abgenommen hat.

Werden die letzten hundert Jahre nach KOSLOWSKI (1989) hinsichtlich der flächenbezogenen Eisvolumensumme kategorisiert (5 Kategorien: schwache bis extrem starke Eiswinter), so hat sich der Anteil schwacher Winter im Verlauf des 20. Jahrhunderts von ca. 15 % auf aktuell 60 % erhöht (SCHMELZER 2004).

Diese Beobachtungen bestätigen andernorts gemachte Beobachtungen über eine globale Erwärmung (Abnahme der Schneehöhen in den deutschen Mittelgebirgen, weltweit Rückzug von Gletschern, etc.).

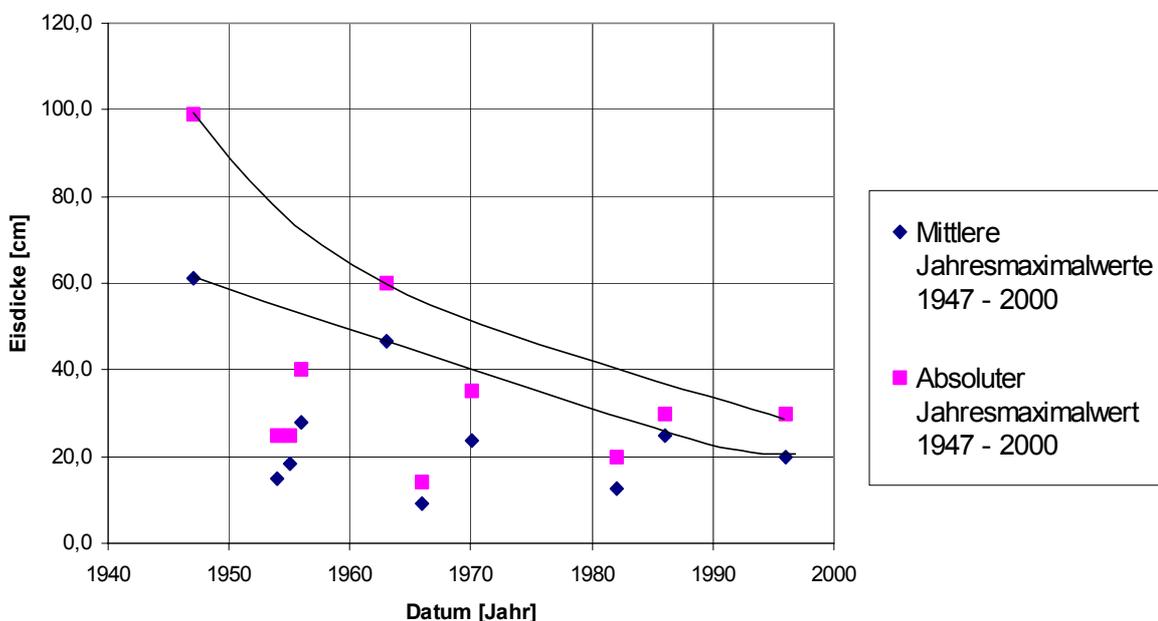


Abb. 34: Mittlere und absolute Jahresmaximalwerte

Zur Beurteilung der Eisverhältnisse an der mecklenburgischen Ostseeküste und zur Festlegung von Bemessungseisdicken wurden Zeitreihen von insgesamt 7 Stationen

untersucht (Boltenhagen, Koserow, Kühlungsborn, Neuendorf, Sassnitz, Warnemünde, Zingst). Der durch Daten gut belegte und hier betrachtete Zeitraum umfasst die Jahre 1946 – 2004. Abb. 34 zeigt die in allen untersuchten Stationen festgestellten jährlichen Maximalisdicken, sowie den Mittelwert der Maximalwerte der einzelnen Stationen. Die Abweichung zwischen beiden Werten zeigt die regionale Streuung der Eisdicken.

Die Maximalwerte für die einzelnen Stationen sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Dargestellt sind nur Jahre, in denen von wenigstens vier Stationen Beobachtungen vorlagen.

Jahr	Boltenhagen	Koserow	Kühlungsborn	Neuendorf	Sassnitz	Warnemünde	Zingst	Mittelwert	Maximalwert
1947	60	99			25			61,3	99
1954	5	15			25			15,0	25
1955	12	25						18,5	25
1956	28	40			20	24		28,0	40
1963		49	50	50	40	60	30	46,5	60
1966		14	10	10	5	7	10	9,3	14
1970		35		5	30	25		23,8	35
1982		20	10	20	8	4	14	12,7	20
1986		28		30	20	20	26	24,8	30
1996		20		20	30	25	5	20,0	30

Tabelle 2: Maximale Eisdicken der Jahre 1947 – 1996

Werden die Maximalwerte miteinander verglichen und auf die Station mit der stärksten Eisbedeckung (Koserow) normiert, so lassen sich folgende Abstufungen darstellen:

Koserow	Neuendorf	Kühlungsborn	Zingst	Warnemünde	Boltenhagen	Sassnitz
1,00	0,92	(0,73)*	0,70	0,58	0,55	0,50

\* Wert aufgrund schmaler Datenbasis unsicher

Tabelle 3: Normierte maximale Eisdicken

Zur Bemessung auf Eislasten werden nach den o.g. Ergebnissen folgende Empfehlungen gegeben:

- Als im Untersuchungsgebiet auftretende maximale Bemessungseisdicke wird für den Bereich östlich von Rügen ein Wert von 0,4 m angenommen
- Für einen Übergangsbereich von Warnemünde bis Sassnitz wird dieser Wert auf 70 % abgemindert, entsprechend einer Bemessungseisdicke von 0,3 m.
- Für den Bereich westlich von Warnemünde wird der o.g. Wert auf 60 % abgemindert, entsprechend einer Bemessungseisdicke von 0,25 m.

Diese Werte gelten für die offene Außenküste. Bodden und geschützte Buchten erfordern gesonderte Untersuchungen.

### **4.3 Vertikale Eiskräfte**

#### **4.3.1 Grundlagen**

Durch die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurde erkundet, welche vertikalen Kräfte auf eingefrorene Holzpfähle und Holzpfahlreihen im Fall steigender Wasserstände übertragen werden können.

Die Sichtung des verfügbaren Schrifttums führte zu dem Ergebnis, dass die dort vorgeschlagenen Berechnungsverfahren zur Bestimmung der durch Eishub auf Pfähle zu erwartenden Kräfte widersprüchliche Ergebnisse liefern und bestätigte insofern den geplanten experimentellen Ansatz. Weiterhin konnten, auch als Ergebnis von Besprechungen mit Herrn Dr. Schwarz, folgende Aussagen als Ausgangssituation festgehalten werden:

- Ein Versagen der Einheit Pfahl - Eis tritt im Fall steigender Wasserstände nicht zwischen Holzoberfläche und Eis statt, die maximal übertragbare Kraft ist vielmehr durch die Eisfestigkeit begrenzt.
- Durch die Bildung einer Eisverdickung am Pfahl (Eiskragen bis zu 150 mm) versagt das Eis nicht direkt am Pfahl, sondern in einiger Entfernung vom Pfahl.
- Für das Versagen der Eisstruktur sind die Scherfestigkeit und die Biegezugfestigkeit des Eises maßgebend.
- Die übertragbaren Kräfte sind stark von der Belastungsgeschwindigkeit (Wasserspiegeländerung) abhängig. Für die deutsche Ostseeküste sind Wasserspiegeländerungen von bis zu 0,5 m/h realistisch.

- Die Gruppenwirkung von Pfählen hat einen starken Einfluss auf die Belastung jedes einzelnen Pfahles durch Eiskräfte. Eine Pfahlreihe ist für den Lastfall Eis als Wand anzunehmen, auch wenn zwischen den Pfählen Abstände von bis zu einem Pfahldurchmesser auftreten können. Die stärkste Belastung wirkt dabei auf den Endpfahl.
- Die Eisfestigkeit ist stark von der Rissbildung im Eis abhängig. Für die durchzuführenden Untersuchungen wird der (eher theoretische) Fall ohne Risse angenommen, um eine maximale Belastung zu simulieren.
- Die Übereinanderschichtung von Eisschollen im Strandbereich ist für die Ermittlung vertikaler Zuglasten auf den Pfahl nicht von Bedeutung und wird deshalb aus den Betrachtungen ausgeschlossen.

Für die Ermittlung horizontaler Eislasten auf Pfähle stehen Berechnungsverfahren zur Verfügung. Daher werden, wie bereits erläutert, keine zusätzlichen Untersuchungen zu horizontalen Eisbelastungen auf Pfähle durchgeführt.

#### **4.3.2 Laborversuche zur Ermittlung vertikaler Eislasten**

##### **4.3.2.1 Versuchsaufbau**

Die Versuche wurden wie erwähnt in der Klimakammer des Fachgebietes Baukonstruktionen und Bauphysik durchgeführt, in der definierte Temperaturen (bis  $-25^{\circ}\text{C}$ ) erreicht und kontrolliert aufrechterhalten werden können. In einem mit Wasser gefüllten Kreisbecken ( $\varnothing$  2,5 m, Wassertiefe 1,0 m) wurde ein Pfahlabschnitt in das Eis eingefroren (Abb. 35).

Das für die Versuche erforderliche Kreisbecken wurde beschafft, die Statik der Einrichtung zur Übertragung der aufgebrachten Kräfte wurde unter Mithilfe des Fachgebietes Stahlbau entwickelt. Sensoren zur Erfassung der vertikalen Bewegung des Pfahls und der Verformung der Eisdecke konnten in den Fachgebieten Baukonstruktionen und Massivbau ausgeliehen werden. Temperaturmessdraht zur Überwachung des Temperaturprofils im Eistank und in der Eisdecke wurde gemeinsam mit dem Fachgebiet Baukonstruktionen beschafft.

Im Eis waren Temperaturfühler T100 über die gesamte Dicke des Eises mit eingefroren, um ein Temperaturprofil über das Eis aufzunehmen. Für die verschiedenen Versuche musste die Eisbildung reproduzierbar sein, um den Einfluss wechselnder Eiseigenschaften gering zu halten. Das Wasser wurde dazu unter ständigem Rühren bis auf  $4^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Mit diesem Verfahren war eine stabile Temperaturverteilung gewährleistet.

Nach dem Einfrieren der Pfahlabschnitte (schwimmend ohne Auftrieb) drückt eine Hydraulik den Pfahl durch die Eisdecke. Die auftretenden Deformationen (bis zum Bruch) wurden durch Weg- und Kraftaufnehmer erfasst. Mit diesem Verfahren wurden die Lasten, die bei steigendem Wasserspiegel bei festgefrorener Eisdecke an einem Einzelpfahl wirken, simuliert.

#### 4.3.2.2 Versuchsdurchführung und Teilergebnisse

Die Eisversuche wurden in den Sommern 2003 und 2004 durchgeführt. Während der Versuche wurde jeweils ein in die Eisdecke eingefrorener Pfahl hydraulisch bis zum Versagen des Systems Pfahl-Eis durch das Eis gepresst. Die Bewegung des Pfahls, die Verformung der Eisdecke und die notwendige Kraft bis zum Versagen wurden messtechnisch erfasst. Das Versagen findet, wie erwartet, nicht direkt am Pfahl sondern in der Eisdecke statt. Der Versagensfall tritt bei Überschreitung der Biegezugfestigkeit der Eisschicht auf. Die Versuche wurden mit Eisdicken zwischen  $h=30$  mm und  $h=100$  mm durchgeführt. Bei größeren Eisdicken lassen Verspannungen keine Verformung der Eisdecke im Versuchsbecken ( $\varnothing$  2,5 m) zu. In diesen Fällen versagte die Verbindung Pfahl-Eis direkt an der Pfahloberfläche. Solche Vorgänge sind nicht relevant, da sie in der Natur an Bühnenpfählen nicht auftreten.



Abb. 35: Versuchsanlage zur Bestimmung vertikaler Eislasten

Die Messergebnisse zeigen, dass die durch Eis auf Pfähle übertragbaren Kräfte deutlich über den nach in Deutschland üblichen Rechenverfahren (z.B. EAU 2004) berechneten Eiskräften liegen. Dieser Umstand ist vermutlich auf das der EAU-Formel zugrundeliegende physikalische Modell zurückzuführen: Während in den EAU ausschließlich Auftriebskräfte als wirksam angenommen werden, muss nach den Ergebnissen der Laborversuche das hydraulische Potential der Wasserspiegeländerung als Rechengrundlage verwendet werden. Bereits bei geringen Eisdicken wurden Kräfte gemessen, die deutlich über den nach der EAU-Formel für Bemessungseisdicken zu erwartenden Kräften liegen (Abb. 36). Die maximalen Belastungen die während der Versuche vom Pfahl auf das Eis übertragen werden konnten, lagen zwischen 4,5 kN und 15,5 kN bei Eisdicken zwischen 40 und 100 mm.

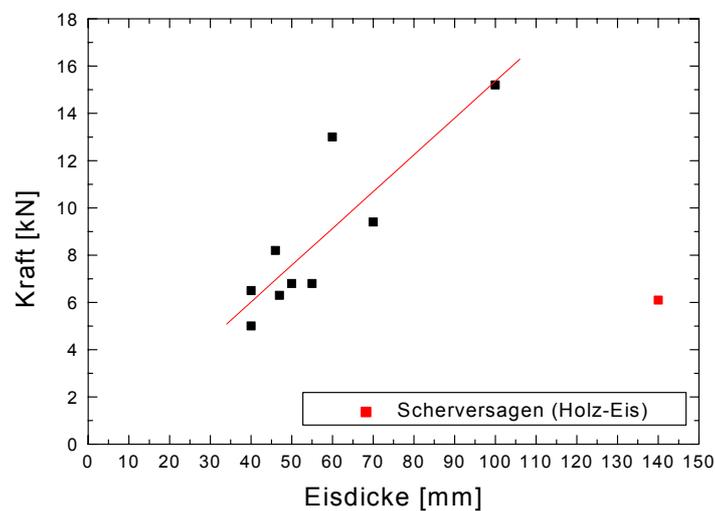


Abb. 36: Gemessene Vertikalkräfte als Funktion der Eisdicke

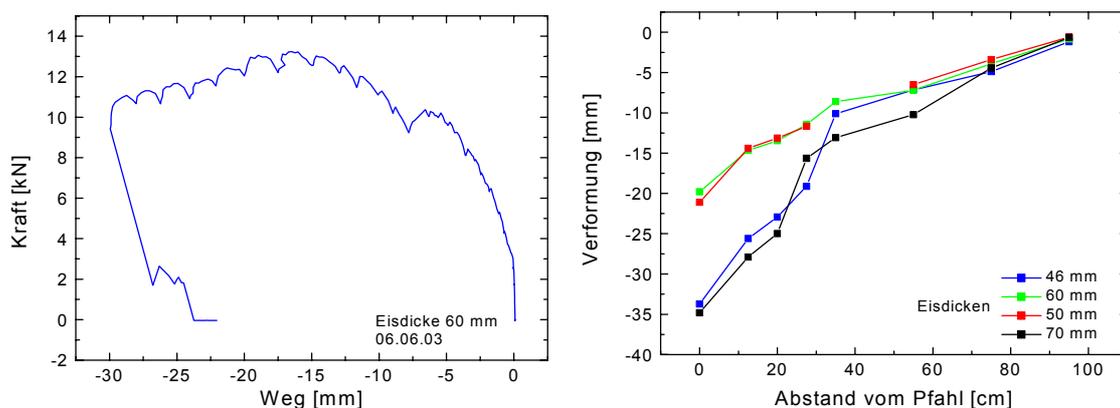


Abb. 37: Verformung der Eisdecke und typisches Kraft-Weg-Diagramm eines Versuchs

Während der Experimente wurde beobachtet, dass bei zunehmender Belastung der Eisdecke zuerst radiale Risse und später konzentrische Risse im Eis auftraten. In Abb. 37 ist

ein Belastungs-Verformungs-Diagramm für einen Versuch mit 6 cm Eisdicke beispielhaft dargestellt. Der ungleichförmige Verlauf der Kurve ist zum einen auf die Art der Krafterzeugung zurückzuführen (Hydraulik-Handpumpe), zum anderen beeinflusst die Rissentstehung den zeitlichen Verlauf der Kraft.

Die Biegekurve weist den bereits erwarteten Verlauf auf, mit einem ersten Krümmungsmaximum in einer Entfernung von ca. 20 cm vom Pfahl (Abb. 37).

#### 4.3.2.3 Untersuchungen zu mechanischen Eiseigenschaften

Die Eigenschaften des Eismaterials wurden parallel zu den Versuchen zur Ermittlung vertikaler Eislasten auf Pfähle durch Biegezugfestigkeitstests und Druckfestigkeitstests untersucht. Ziel der Untersuchungen waren Aussagen über die Vergleichbarkeit der im Labor gemessenen Kräfte mit Verhältnissen an der mecklenburgischen Ostseeküste. Weiterhin wurden eismechanische Kennwerte als Eingangsgrößen für das in Abschnitt 4.3.2.4 beschriebene numerische Modell benötigt.



Abb. 38: Entnahme von Eisproben (Balken) für Biegezugfestigkeit nach DIN 53452 (Bruchspannung aus einer Biegeprüfung mit 3 und 4-Punkt-Auflage)

Da das Versagen des Eises im Laborversuch auf das Überschreiten der Biegezugfestigkeit des Eises zurückzuführen ist, wurden zunächst Biegeversuche nach DIN 53452 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche streuten jedoch stark, was auf Schwierigkeiten bei der Entnahme von Proben aus dem Versuchsbecken zurückzuführen war (vgl. Abb. 38). Das Aussägen der Proben erzeugte unvermeidbar Störstellen im Eis, die im

Versuch zu einem vorzeitigen Bruch der Probekörper führten. Nach der ersten Versuchsreihe wurde dieses Verfahren deshalb nicht mehr angewandt.

Bessere Ergebnisse erbrachte die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften des Eises durch Druckfestigkeitstests an Eiszylindern aus der Eisdecke des Versuchseises. Dazu wurden aufrecht schwimmende PE-Rohre im Tank installiert, aus denen die Eiszylinder für die Druckfestigkeitsuntersuchungen ohne Schäden entnommen werden konnten.



Abb. 39: Eisprobe nach Versuchsdurchführung, Geotextil und Stahlplatten gewährleisteten einen gleichmäßigen Eintrag der Kraft in die Stirnflächen des Probezylinders

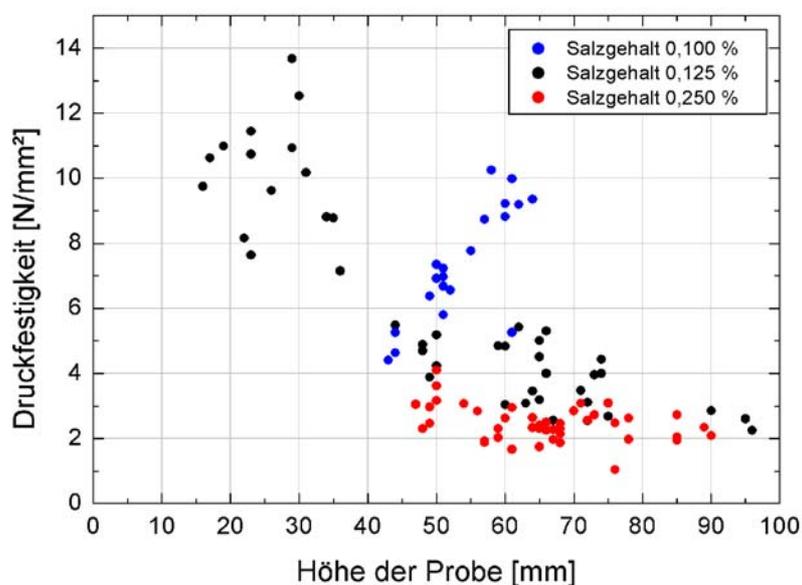


Abb. 40: Druckfestigkeit zylindrischer Probekörper bei unterschiedlichem Salzgehalt

Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei der Ankoppelung der Eisproben an die Druckflächen der Prüfmaschine gewidmet, wozu durch Dr. Schwarz wertvolle Hinweise gegeben wurden. Zur Vermeidung einer Bildung von Rissen im Probekörper aufgrund von Erhebungen in der Oberfläche der Probe (Punktbelastung mit entsprechenden Lastspitzen) wurde zwischen Prüfmaschine und Probe ein ausgleichendes Stück Geotextil (PP-Vliesstoff) angeordnet (Abb. 39)

Ein naturnahes mechanisches Verhalten des Laboreises wurde durch Wahl eines geeigneten Salzgehaltes erreicht. Hierfür wurden ebenfalls Erfahrungen der HSVA (Dr. Schwarz) genutzt, die die unterschiedliche Eisbildung im Labor und in der Natur berücksichtigen. (Salzgehalt im Wasser zwischen 0,1 % und 0,25 %, vgl. Abb. 40).

#### 4.3.2.4 Numerische Modellierung

Da aufgrund der geometrischen Randbedingungen die Laborversuche nur mit geringen Eisdicken durchgeführt werden konnten, wurde versucht, eine Ausweitung auf naturnahe Eisdicken durch numerisches Modellieren zu erreichen. Das Modell wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (Dipl.-Ing. M. Fritsch) entwickelt, als Simulator wurde das Finite-Elemente-Programmsystem ANSYS genutzt.

Zur Kalibrierung des Modells wurden die Laborversuche verwendet. Von besonderem Interesse war der Einfluss der temperaturabhängigen Festigkeitsanisotropie innerhalb der Eisdicke. Die Eisdecke wurde dazu im Modell in 6 horizontale Schichten unterteilt, mit von oben nach unten abnehmender Eisfestigkeit (Tabelle 4).

Material Temp.: 0-(-15) °C	$E_m$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Wichte $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Kohäsion $c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Querdehnzahl $\mu$ [-]	Reib. $\phi$	Dila. $\psi$
Eisschicht 2	4000000	8.90	1250	0.33	0	0.001
Eisschicht 3	5000000	8.95	1250	0.33	0	0.001
Eisschicht 4	6000000	9.00	1250	0.33	0	0.001
Eisschicht 5	7000000	9.05	1250	0.33	0	0.001
Eisschicht 6	8000000	9.10	1250	0.33	0	0.001

Tabelle 4: Eigenschaften des Eises im numerischen Modell.

Zur Kalibrierung des Modells wurden die Verformungsfigur und die gemessenen Kräfte der Laborversuche genutzt. Wie Abb. 41 zeigt, konnte die Verformung der Eisdecke gut nachgebildet werden. Ungleichmäßigkeiten im Verlauf der Laborergebnisse (Abb. 41) werden auf Messungenauigkeiten im Eislabor zurückgeführt.

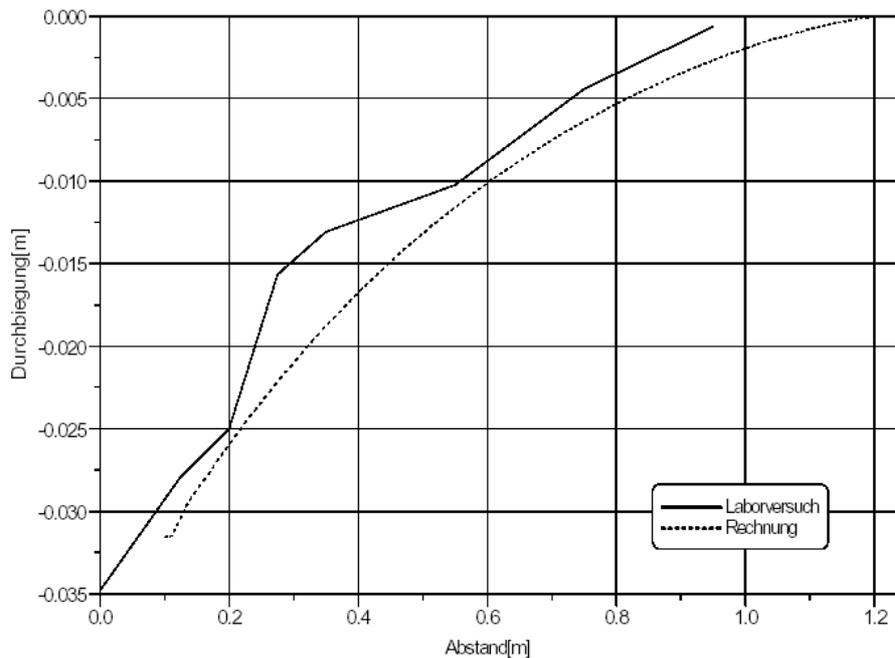


Abb. 41: Biegelinie der Eisdecke im Labor und im numerischen Modell

Die mit dem Modell errechneten vertikalen Eiskräfte weisen folgende Eigenschaften auf:

- Für geringe Eisdicken liegen die Ergebnisse im Bereich der im Labor gemessenen Werte. Dieser Befund war zu erwarten, da die Laborwerte zur Kalibrierung des Modells genutzt wurden.
- Für größere Eisdicken wachsen die Kräfte mit der Dicke, der Zuwachs erfolgt annähernd linear. Unter den angenommenen physikalischen Voraussetzungen hängt der eisdickenabhängige Zuwachs der Eiskräfte aber von wenigstens zwei Faktoren (Eisdicke / Umfang der Bruchzone) ab, die jeweils linear mit der Eisdicke verknüpft sind, und die als Produkt einen überlinearen Zuwachs aufweisen sollten. Für die modellgestützte Prognose vertikaler Eislasten auf Pfähle sind weitere Untersuchungen notwendig.

#### 4.4 Zusammenfassung und Ergebnisse

Die im Labor gemessenen Vertikalkräfte, die von einer geschlossenen Eisdecke auf einen Versuchspfahl übertragen wurden, sind insbesondere bei größerer Eisdicke höher als die nach EAU ermittelten Eiskräfte. Die den Berechnungen der EAU 2004 zu Grunde liegende physikalische Annahme, dass der Auftrieb einer festgefrorenen Eisplatte die Ursache der wahrnehmbaren Zugkräfte am Pfahl darstellt, kann lediglich als Grundlage für die Berechnung von Eiskräften aus einer gebrochenen Eisdecke, von der Teile an Pfählen festgefroren sind, verwendet werden. Derartige Belastungen sind jedoch für eine Bemessung von Holzpfählen in Küstenabschnitten, in denen geschlossene Eisdecken auftreten können, nicht maßgebend. Ein Versagen des Systems Holzpfahl-Eisdecke trat im Labor

unter Einwirkung des hydraulischen Potentials des ansteigenden Wasserspiegels durch Überschreitung der Biegefestigkeit des Eises außerhalb der Kontaktfläche Pfahl – Es auf.

Abb. 42 zeigt abhängig von der Eisdicke im Labor ermittelte vertikale Eislasten auf einen Holzpfahl im Vergleich mit den Berechnungsansätzen nach EAU, nach russischen Normen (Ministerium Russlands 1995) und dem empirischen Ansatz nach Kusnezow.

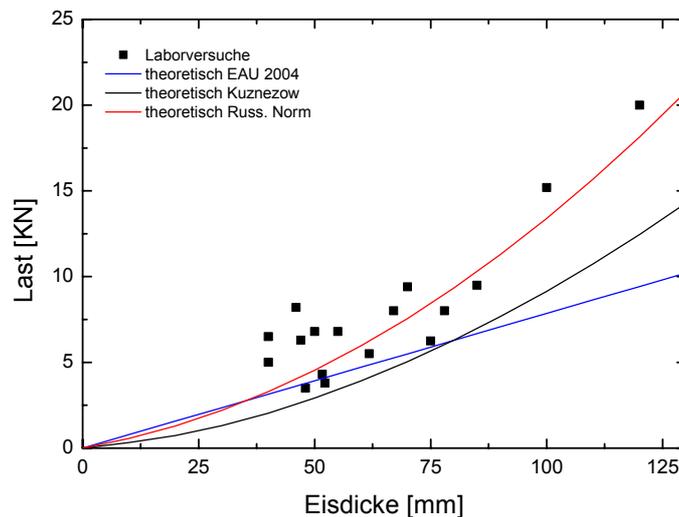


Abb. 42: Vertikale Eislasten: Vergleich von Laborergebnissen und Berechnungsansätzen

Nach Abschluss der Versuche im Labor wurden, wie bereits dargestellt, Eisproben aus dem Versuchseis entnommen und die Druckfestigkeit des Versuchseises bestimmt. Der theoretische Ansatz nach russischen Normen verwendet als Eingangsgröße die Biegezugfestigkeit, die sich näherungsweise aus der Druckfestigkeit bestimmen lässt. Die Ergebnisse der Laborversuche (vertikale Eislasten) lassen sich bei Verwendung der entsprechenden Biegefestigkeit mit dem Ansatz nach russischen Normen abbilden.

In Abb. 42 wurde die vertikale Eisbelastung mit einer mittleren Biegefestigkeit von  $1,4 \text{ MN/m}^2$  (Druckfestigkeit  $3,5 \text{ MN/m}^2$ ) ermittelt. Für geringere Druckfestigkeits- / Biegefestigkeitswerte ergibt der Berechnungsansatz der russischen Normen ähnliche Ergebnisse wie der Ansatz nach Kusnezow. Ergebnisse, die der Berechnungsansatz nach EAU liefert, konnten durch die Laborversuche nicht bestätigt werden.

Der Versuch der Extrapolation der Laboruntersuchungen auf Natur-Eisdicken mit Hilfe eines numerischen Modells ergab keine befriedigenden Ergebnisse.

## 5 Haltekräfte

### 5.1 Einführung und Untersuchungsprogramm

Buhnenpfähle werden durch vertikale und horizontale Kräfte infolge Seegang, Eis und Strömung beansprucht. Um ein Versagen des Systems Pfahl-Boden zu vermeiden, müssen die Belastungen durch die haltenden Kräfte kompensiert werden. Das System ist so zu bemessen, dass die haltenden Kräfte größer als die Beanspruchungen sind. Zu unterscheiden ist grundsätzlich zwischen vertikalen Haltekräften und horizontalen Haltekräften sowie zwischen der Haltekraft des Pfahls im Boden und der Haltekraft des Pfahls selbst, die durch seine Bruchfestigkeit bestimmt ist. Eine Besonderheit bei der Ermittlung von Haltekräften an Buhnenpfählen gegenüber üblichen Anwendungen im Ingenieurbau sind bodendynamische Effekte, die durch dynamische Belastungen auftreten.

Die Haltekräfte des Pfahls sind von den Pfahleigenschaften abhängig. Bei der Ermittlung der Festigkeitseigenschaften (Biegefestigkeit, Zugfestigkeit) wurde auf Angaben in der Literatur und in Normen (DIN 1052) zurückgegriffen. Der Nachweis der Querschnittstragfähigkeit erfolgte nach anerkannten Normen des Holzbaus (DIN 1052). Die Nachweise werden für Standsicherheitsnachweise des Systems Pfahl-Boden benötigt und sind Bestandteil des Bemessungsverfahrens für Buhnenpfähle. Im Forschungsvorhaben wurden keine eigenen Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt.

Für die Berechnung horizontaler Haltekräfte wird, wie im Antrag vorgesehen, auf vorhandene Berechnungsansätze aus der Geotechnik zurückgegriffen.

Bei der Ermittlung der vertikalen Haltekräfte ist das Eigengewicht und der Auftrieb der Holzpfähle zu beachten. Die dafür erforderlichen Materialeigenschaften (Dichte) werden von den Lieferfirmen der Holzpfähle angegeben.

Zur Berechnung von vertikalen Pfahlhaltekräften im Boden (Mantelreibung oder Bodenkörpermodell) liegt eine große Zahl von Berechnungsverfahren vor, die aber erheblich voneinander abweichende Ergebnisse liefern. Die Haltekraft von Pfählen, die in einer Pfahlreihe stehen (Pfahlabstand < Pfahldurchmesser) kann mit den Berechnungsverfahren nicht oder nur ungenau erfasst werden. Ziel der Untersuchungen im Vorhaben war es, geeignete Berechnungsansätze für die vertikale Haltekraft von Buhnenpfählen abhängig von den Baugrundeigenschaften zu ermitteln.

Einen nicht zu vernachlässigenden Effekt haben bodendynamische Effekte, die in wassergesättigten nichtbindigen Böden auftreten können. Bei dynamischer Beanspruchung des Bodens (z.B. durch Pfahlschwingungen) kann es zu Bodenverflüssigungseffekten kommen. Die Haltekräfte werden dann stark herabgesetzt. Bei Antragstellung war zunächst die Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten auf Grundlage der erfassten Pfahlschwingungen (vgl. Abschnitt 3.2.3.4) geplant. Ein aus dem Gebiet der Geotechnik verfügbares Abschätzungsverfahren wurde vorausgesetzt. Bodenverflüssigungseffekte sind stark von der Entwicklung eines Porenwasserüberdrucks abhängig. Insbesondere die

Entstehung wirksamer Porenwasserdrücke infolge Bauwerksbewegungen ist Gegenstand der Forschung. Entgegen der Erwartungen bei Antragstellung konnte dem Vorhaben ein anwendbares Bemessungsverfahren nicht zur Verfügung gestellt werden. Der Zusammenhang wurde daher im Zeitraum einer Projektlaufzeitverlängerung untersucht.

Voraussetzung zur Ermittlung von Haltekräften im Boden und zur Bewertung von Versuchsergebnissen ist die Kenntnis der bodenmechanischen Kennwerte am jeweiligen Pfahlstandort.

Im Rahmen des Vorhabens wurden zu den o.g. offenen Fragestellungen eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die in ihrem Zusammenwirken Pfahl-Haltekräfte in Abhängigkeit vom lokalen Baugrundaufbau am Pfahlstandort, der Einbindetiefe und dem Durchmesser des Pfahls liefern. Die geplanten Untersuchungen sind im Folgenden mit den jeweiligen Teilzielen zusammengestellt:

- Die Erstellung eines Werkzeugs zur halbautomatischen Auswertung vorhandener Baugrundinformation liefert die lokal anstehende Schichtenfolge sowie deren räumliche Verteilung.
- Die Erfassung bodenmechanischer Kennwerte durch Feldversuche erlaubt die Zuordnung von Bodenart und bodenmechanischem Verhalten und liefert so die Grundlage für bodenmechanische Berechnungen.
- Durch Zugversuche werden die unter bekanntem Baugrundaufbau und Einbindetiefe durch den Pfahl aufnehmbaren vertikalen Kräfte ermittelt. Die Ergebnisse dienen der Bewertung der zur Verfügung stehenden Berechnungsansätze.
- Integritätstests sichern die Ergebnisse der Zugversuche hinsichtlich der als Berechnungsgrundlage dienenden Pfahllänge ab.
- Messungen des Porenwasserdrucks erlauben die Abschätzung des Einflusses seegangsbedingter Pfahlschwingungen auf die Standsicherheit der Pfähle (Bodenverflüssigungseffekte).

In den folgenden Abschnitten werden die Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse dargestellt.

## **5.2 Baugrund – durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse**

### **5.2.1 Auswertung vorhandener Baugrundinformationen**

#### 5.2.1.1 Erfassung von Baugrunddaten

Durch die mit dem Bühnenbau befassten Staatlichen Ämter in MV werden im Vorfeld von Bühnenbaumaßnahmen regelmäßig Baugrunduntersuchungen veranlasst. Diese Untersuchungen basieren auf einem Bohrraster, bei dem pro Bühne zwei Rammkernsondierungen, je eine an der Bühnenwurzel und am Bühnenkopf, durchgeführt werden. Die angetroffenen Bodenschichten werden vor Ort angesprochen, bodenmechanische Kenn-

werte werden aus (selteneren) Rammsondierungen (meist DPH) und Analysen der Korngrößenverteilung abgeleitet. Eine Auswertung hinsichtlich der Schichtenfolge erfolgt über Profilschnitte, die jedoch, bedingt durch die Anordnung des Bohrrasters, nur begrenzte Aussagekraft haben, da die Bohrungen überwiegend küstenparallel angeordnet sind. Die maßgeblichen Veränderungen in der Schichtenfolge treten überwiegend senkrecht zur Küstenlinie auf.

In einem ersten Arbeitsschwerpunkt wurden die verfügbaren Baugrundinformationen, die in einer großen Zahl von Baugrundgutachten im Archiv des StAUN vorliegen, systematisch erfasst. Ziel war eine möglichst lückenlose Erfassung des Baugrundes über die Tiefe für die Küstenabschnitte Mecklenburg-Vorpommerns, an denen Bühnen eingesetzt werden. Die Erfassung erfolgte mit dem GeoDIN Modul „GeoDIN Shuttle“, das kostenlos aus dem Internet bezogen werden kann. In Verbindung mit dem durch das StAUN Rostock zur Verfügung gestellten „Aufschlusstyp Mecklenburg-Vorpommern“, die die für die regionale Praxis überbemessene Zahl an Eingabemöglichkeiten des Programms auf relevante Optionen beschränkt, liegt ein einfach zu handhabendes und effizientes Werkzeug zur Erfassung von Bohrdaten vor.

Es wird empfohlen, bei der zukünftigen Vergabe von Aufträgen zur Baugrunderkundung von den ausführenden Firmen eine Erfassung und Übergabe der Bohrergebnisse im GeoDIN-Shuttle-Format / Aufschlusstyp Mecklenburg-Vorpommern zu fordern.

#### 5.2.1.2 Darstellung und Auswertung der Daten

Die vorliegenden Baugrunddaten sollten aus der erstellten Datenbank heraus für eine Nutzung bei der Bemessung von Bühnenpfählen zugänglich gemacht werden.

Die Zielstellung sah eine rechnergestützte Anzeige von Einzelprofilen sowie die Erstellung von Profilschnitten über die senkrecht zur Küstenlinie vorliegenden Bohrungen (i.d.R. zwei Sondierungen) vor. Die benötigte Software sollte einfach bedienbar sein, die Ergebnisse übersichtlich aufbereiten, die speziellen Eigenschaften des Aufschlussformates für Mecklenburg-Vorpommern berücksichtigen (6 Grad Gauß-Krüger-Koordinatensystem) und einfach um weitere Funktionen erweiterbar sein.

Da eine Software mit diesen Eigenschaften nicht verfügbar war, bestand die Notwendigkeit, ein eigenes Programmpaket zu entwickeln. Als Ergebnis entstand die Software GeoCon im Forschungsvorhaben. Die Software wurde im Wesentlichen durch einen studentischen Mitarbeiter erstellt.

Mit GeoCon ist es möglich, Bohrdaten des Aufschlusstyp des Geologischen Landesamtes Mecklenburg-Vorpommern (SSGMVPST) zu laden und übersichtlich anzuzeigen. Die Daten werden in Form von Access-Datenbanken (.mdb) importiert und intern über eine SQL-Schnittstelle verarbeitet und aufbereitet. Die Verwendung einer SQL-Schnittstelle

ermöglicht es, bei Bedarf Schnittstellen zu weiteren Datenformaten zur Verfügung zu stellen.

Die ausgelesenen Bohrungen werden anhand ihrer Gauß-Krüger-Koordinaten auf einer Übersichtskarte angezeigt. Die Karte verwendet eine Ebenen-Technik (Layer), d.h. die Daten werden in verschiedenen Ebenen geladen und können individuell ein- und ausgeblendet werden. Die Anzeige ist maßstabsgetreu, verfügt über ein automatisches Kartenraster, eine eingeblendete Maßstabsanzeige sowie ein Kilometerlineal. Der Maßstab der Anzeige kann beliebig geändert werden, die Koordinaten können als Gauß-Krüger-/ sowie als GPS-Koordinaten abgelesen werden.

Um eine durchgehende Darstellung der Bohrungen über die Meridianstreifen 2 und 3 des Gauß-Krüger-Koordinatensystems zu ermöglichen, verfügt das Programm über eine Koordinatentransformation, die Koordinaten des Streifens 2 werden hierbei auf den Streifen 3 umgerechnet. Diese Transformation funktioniert nicht nur für Bohrkoordinaten, sondern auch für alle geladenen ArcView-Shape-Dateien. Hierdurch kann der gesamte Küstenbereich von Mecklenburg-Vorpommern lückenlos dargestellt werden.

Zusätzlich zur Anzeige der Position der Bohrungen können aus der Datenbank jederzeit die zugehörigen Tiefeninformationen und Bodendaten geladen werden. Die Darstellung des Bohrprofils erfolgt in einem separaten Fenster, ist zoombar und entspricht der Druckausgabe. Die Farbdarstellung und das Höhenlineal sind ein- und ausblendbar. Alle im Formulkopf eingegebenen Daten werden für jeden Nutzer separat abgespeichert und dadurch sich wiederholende Eingaben minimiert. Die Bohrprofilardarstellung kann sowohl ausgedruckt als auch als Bild (Bitmap, JPEG) exportiert werden.

Als Erweiterung der Profildatenerstellung verfügt das Programm über eine halbautomatische Profilschnitterstellung.

Der Algorithmus der Software generiert automatisch einen Profilschnitt, die Berechnung kann über den einstellbaren Parameter Multirange gesteuert werden. Der Vorschlag für den Profilschnitt kann über einen Edit-Modus, der einem einfachen Zeichenprogramm entspricht, korrigiert und bearbeitet werden. Zur einfacheren Bearbeitung des Schnitts werden dem Nutzer Hilfspunkte vorgeschlagen, so dass der Zeitaufwand für eine Korrektur gering ist.

Der Aufbau und die Funktionalität der Anzeige des Profilschnitts entsprechen der Schichtdarstellung, d.h. es können auch hier die Maßstäbe eingeblendet werden, der Formulkopf wird zwischengespeichert usw.

Eine vollständige Auflistung aller Merkmale der Software GeoCon sind in der Programmbeschreibung enthalten, die als Anhang beigefügt ist.

## 5.2.2 Baugrunduntersuchungen

Die in der Baugrund-Datenbank repräsentierten Informationen haben eher qualitativen Charakter. Sie geben Aufschluss über den grundsätzlichen Aufbau des Baugrundes, enthalten jedoch zu bodenmechanischen Kennwerten höchstens grobe Einschätzungen des jeweiligen Bohrbetreibers. Nur in wenigen Fällen werden Lagerungsdichten oder Konsistenzen über Rammsondierungen quantitativ beurteilt.

Für einzelne Fragestellungen im Vorhaben (Interpretation der Zugversuche, Entwicklung des Porenwasserdrucks ...) waren detaillierte Daten über Aufbau und Eigenschaften des Baugrunds erforderlich, zu deren Erhebung die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen durchgeführt wurden.

### 5.2.2.1 Feldversuche

#### 5.2.2.1.1 Drucksondierungen (CPT)

Anstelle der ursprünglich geplanten Laborversuche wurden Drucksondierungen durchgeführt, wodurch sowohl die anstehende Schichtenfolge als auch deren bodenmechanische Kennwerte in situ bestimmt wurden.

Beim elektrischen Drucksondieren wird eine zylindrische Messspitze über ein Hohlgestänge kontinuierlich in den Boden gedrückt (Abb. 43, Abb. 44). Dabei wird mit einem mit Dehnungsmessstreifen bestückten Messkörper in der Sondierspitze der Bodenwiderstand vor der Spitze gemessen (Spitzendruck). Ein weiterer Messkörper nimmt gleichzeitig die auf eine Reibungshülse wirkende örtliche Mantelreibung auf.



Abb. 43 Drucksondierungsfahrzeug



Abb. 44: Sondenspitze mit Gestänge

Aus den Parametern "Spitzendruck" und "Mantelreibung" lassen sich die folgenden Baugrundeigenschaften ableiten:

- Stratigraphie (Schichtenfolge)
- Lagerungsdichte
- Anfangsscherfestigkeit
- Reibungswinkel
- Verformungsmodul

Als nachteilig bei diesem technologisch aufwändigen Verfahren sind die relativ hohen Mobilisierungskosten zu werten. Sind diese jedoch geleistet, so kann mit Hilfe von Drucksondierungen innerhalb kurzer Zeit eine große Zahl von Ansatzpunkten bei geringen Kosten untersucht werden.

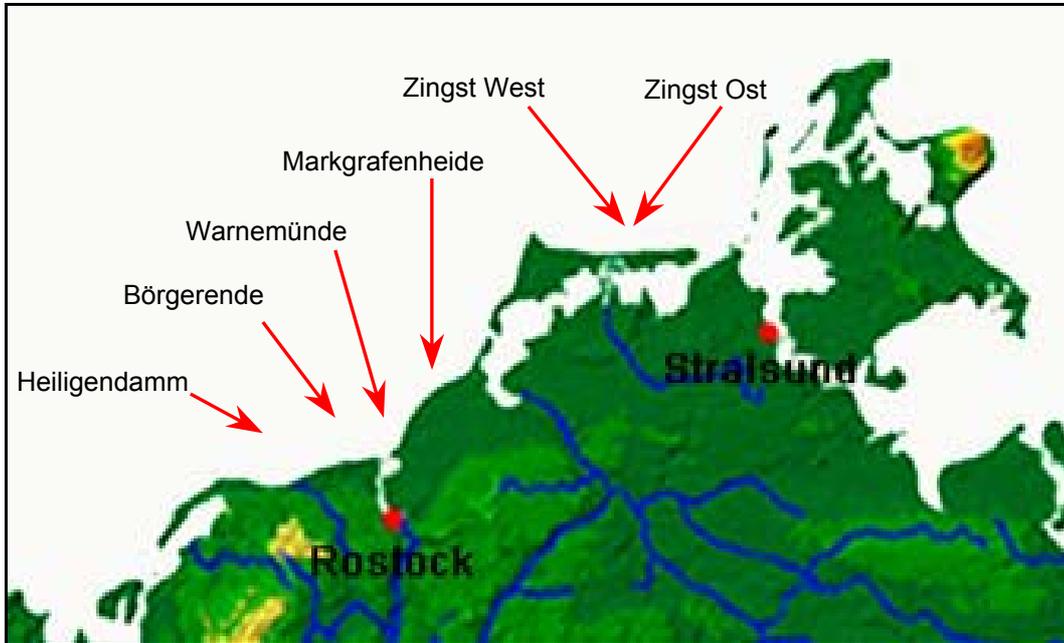


Abb. 45: Standorte der durchgeführten Drucksondierungen

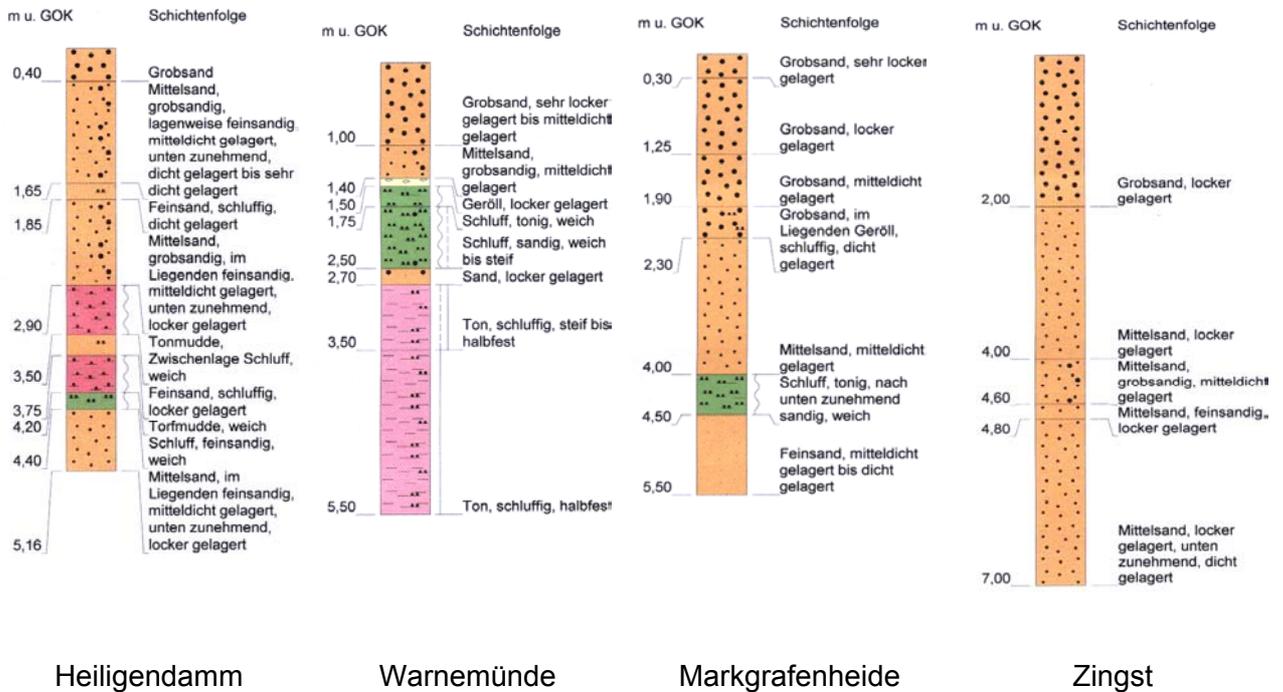


Abb. 46: Typische Schichtenfolgen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns

Abb. 45 zeigt die im Rahmen des Vorhabens untersuchten Standorte. Ziel der Untersuchungen war es, bodenmechanische Kennwerte zur Interpretation der Zugversuche zu gewinnen, die Ansatzpunkte wurden deshalb analog zu den Standorten der Zugversuche gewählt.

Abb. 46 verdeutlicht mit typischen Profilen die im Untersuchungsgebiet auftretende Spannweite von Schichtenfolgen.

Die Standorte repräsentieren damit, wie bereits oben dargelegt, die gesamte Spannweite in der Region verbreiteter glazigener Schichtenfolgen: bindige Sedimente, nichtbindige Sedimente, organische Sedimente sowie Kombinationen aus diesen.

Durch empirisch-statistische Auswertung der Messwerte lassen sich den Schichten außerdem bodenmechanische Kennwerte zuordnen (Abb. 47)

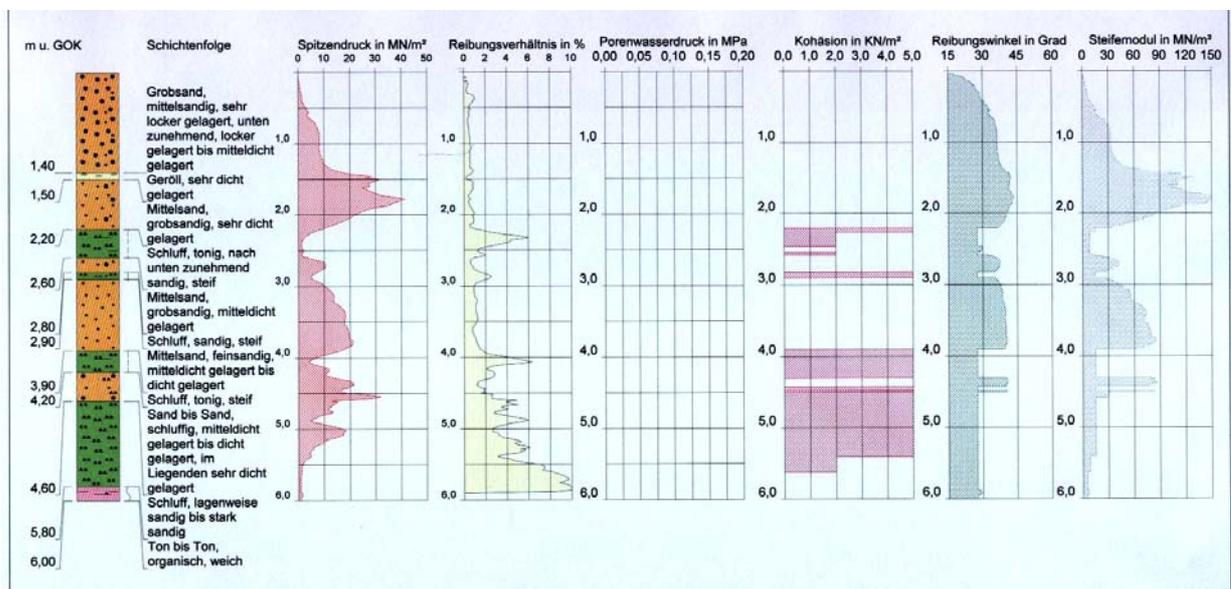


Abb. 47: Schichtenfolge und bodenmechanische Kennwerte als Ergebnis von Drucksondierungen

Die ermittelten bodenmechanischen Werte dienen als Eingangswerte für die verschiedenen, aus der Literatur bekannten Berechnungsansätze zur Bestimmung der Haltekraft von Buhnenpfählen (vgl. Abschnitt 5.4.1.2).

#### 5.2.2.2 Rammkernsondierungen

Im Rahmen der Untersuchungen zum Risiko von Bodenverflüssigung wurden aus dem Bereich der Feldversuche am Strand von Zingst Informationen über den Baugrundaufbau und die schichtspezifischen geohydraulischen Kennwerte (Durchlässigkeitsbeiwert,  $k_f$ -Wert) benötigt. Zur Erkundung der Schichtenfolge sowie zur Entnahme von gestörten Proben für die Siebanalysen wurden im Herbst 2004 an den geplanten Versuchsstandorten am Strand von Zingst zwei Rammkernsondierungen bis 5,0 m unter Geländeober-

kante (GOK) durchgeführt (Abb. 48). Die erkundete Schichtenfolge ist in Abb. 49 dargestellt. Es handelt sich bei dem erbohrten Profil um Sande wechselnder Körnungen, in die im Bereich zwischen 1,5 und 2,0 m unter GOK Muddebänder eingelagert sind.



Abb. 48: Rammkernsondierung am Strand von Zingst

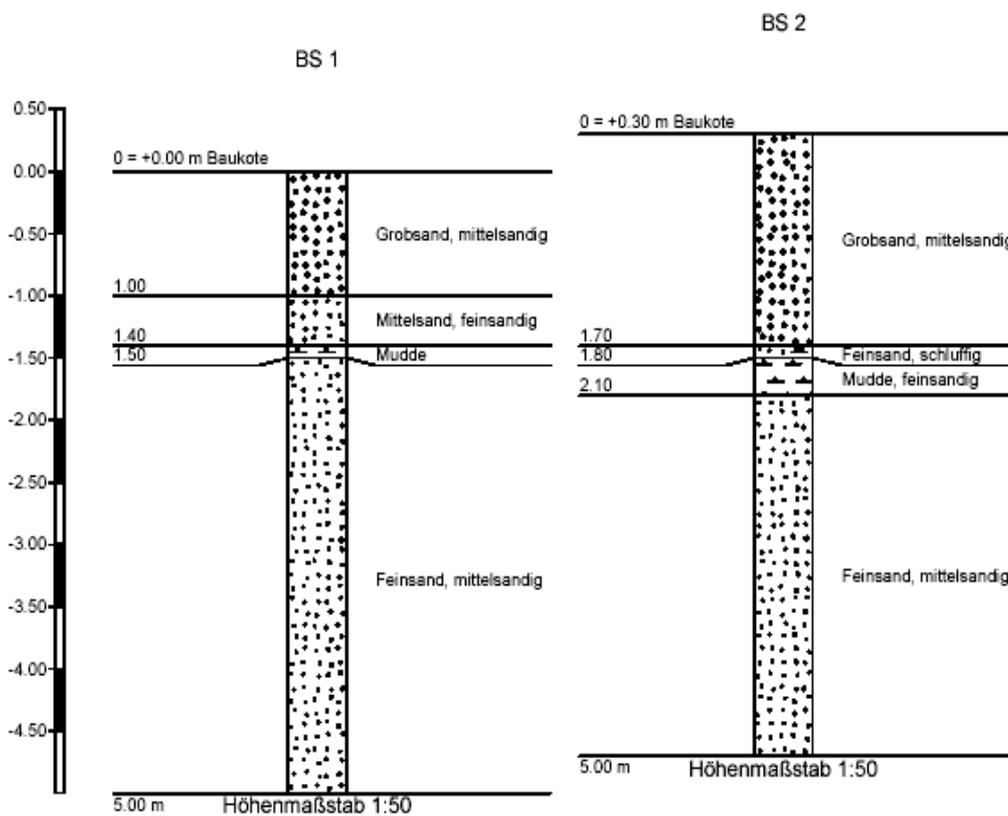


Abb. 49: Erkundete Schichtenfolge der Sondierungen am Strand von Zingst

Die generell gröberen Sande im oberen Bereich des Profils sind auf eine unmittelbar vor der Durchführung der Untersuchungen durchgeführte Strandersatzmaßnahme (Sandaufspülung) zurückzuführen.

Das dabei eingesetzte Sandmaterial wird durch Saugbagger vor der Küste aufgenommen. Es weist generell größere Korndurchmesser auf als die geogenen Strandsande. Auch ein auffällig hoher Anteil an Schill (Muschelbruch) in den oberen Sanden verweist auf diese Herkunft.

#### 5.2.2.3 Laborversuche

Durch gezielte Probenahme und Laboruntersuchungen auf Basis der Erkenntnisse der erfassten Archivdaten war geplant, den einzelnen Lockergesteinen regional bodenmechanische Kennwerte zuzuordnen. Hierzu war eine Zusammenarbeit des IWR mit dem Fachgebiet Geotechnik des Fachbereiches Bauingenieurwesen der Universität Rostock vorgesehen. Dieser Teil des Untersuchungsprogramms wurde aber bereits im Anfangsstadium der Untersuchungen aufgegeben, weil insbesondere die für die geplanten Laborversuche erforderliche Entnahme von hochwertigen Proben (ungestörte Proben) sich mit den vorhandenen finanziellen und technischen Ressourcen nicht realisieren ließ.

Anstelle der Laboruntersuchungen wurden die unter Abschnitt 5.2.2.1.1 beschriebenen Drucksondierungen (CPT) zur bodenmechanischen Beschreibung der anstehenden Schichten genutzt.

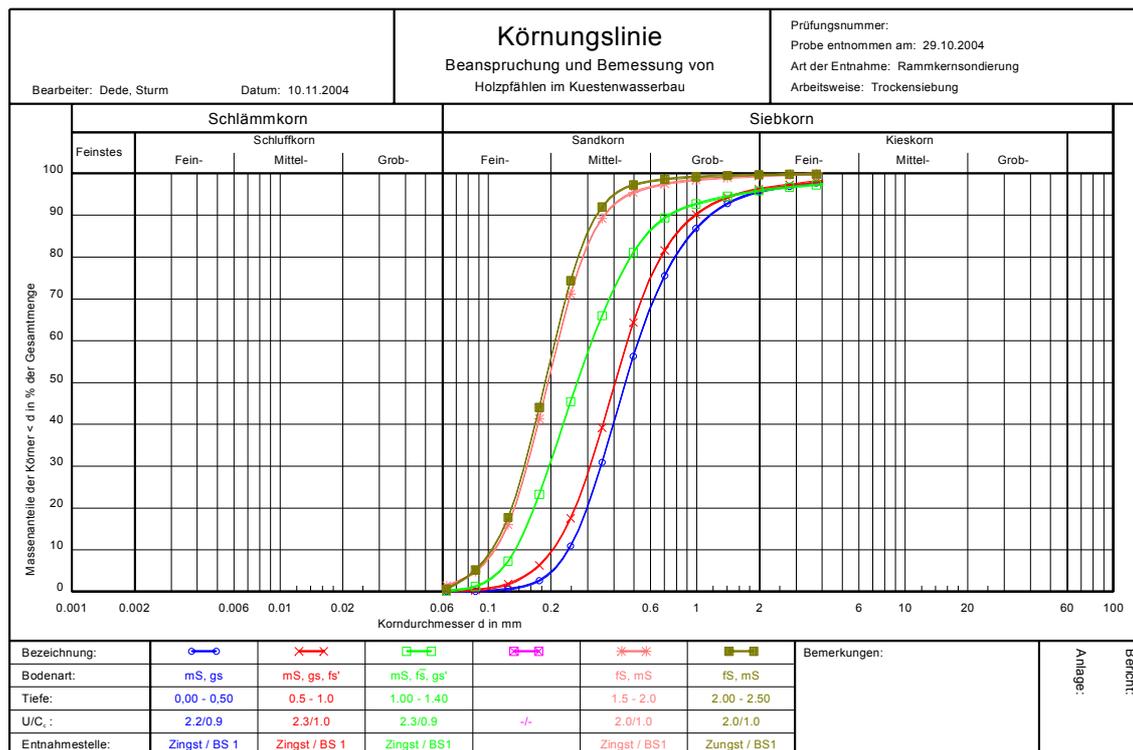


Abb. 50: Kornsummenkurven der durchgeführten Siebanalysen (Auswahl)

Als Eingangsdaten für die Abschätzung von Bodenverflüssigung auf Basis des Porenwasserdrucks sind Informationen über die Durchlässigkeit der wassererfüllten Schichten notwendig. Zu diesem Zweck wurden die im Rahmen der Rammkernsondierungen (vgl. Abschnitt 5.2.2.2) gewonnenen Proben Siebanalysen nach DIN 18123 unterworfen. Die resultierenden Kornsummenkurven sind in Abb. 50 wiedergegeben, Abb. 51 zeigt Tiefenprofile des Durchlässigkeitsbeiwerts an den beiden Sondieransatzpunkten.

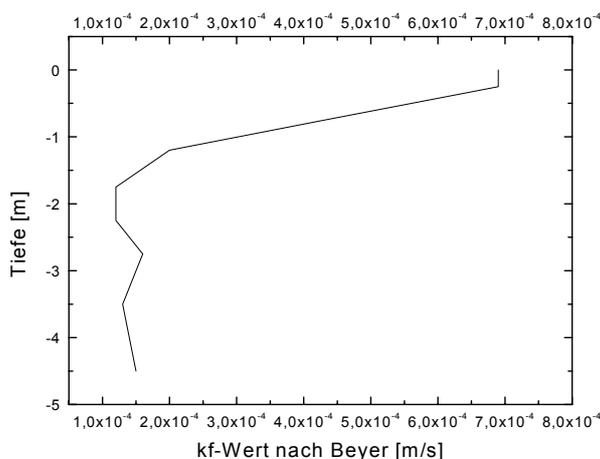


Abb. 51a: Durchlässigkeitsprofil am Standort Sondierung 1

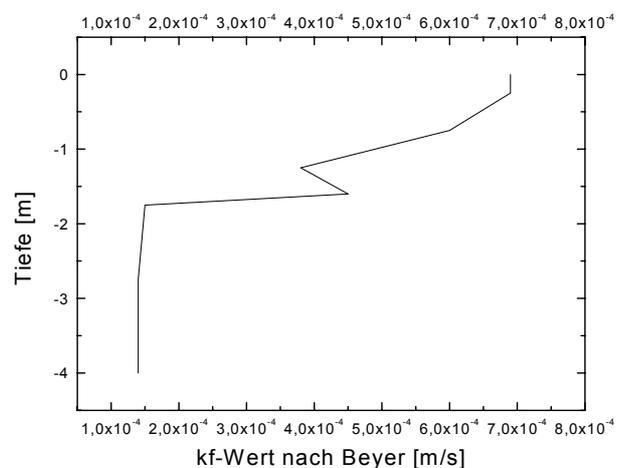


Abb. 51b: Durchlässigkeitsprofil am Standort Sondierung 2

Die Durchlässigkeiten reflektieren die unterschiedliche Genese der beprobten Sande. Das Ergebnis ist für die parallel durchgeführten Untersuchungen zum Risiko von Bodenverflüssigung als eher ungünstig zu werten, da in dem besonders durch Schwingungen beanspruchten oberflächennahen Bereich relativ hohe Durchlässigkeiten zu verzeichnen sind. Diese hohen Durchlässigkeiten bewirken eine schnelle Dissipation des durch die Schwingungen erzeugten Porenwasserdrucks. Die Chance, im Experiment einen kumulativen Anstieg des Porenwasserdrucks zu beobachten und damit das Risiko für Bodenverflüssigung ist demnach in diesem Bereich materialbedingt eher gering (vgl. Abschnitt 5.5.3.2).

### **5.3 Horizontale Haltekräfte**

Wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, wurden direkte horizontale Belastungen durch Wellen im Vorhaben nicht untersucht. Die Größe solcher Belastungen kann mit in der Geotechnik üblichen Berechnungsansätzen ermittelt werden.

Gleiches gilt für die bei diesem Lastfall wirksamen haltenden Kräften, zu deren Berechnung zahlreiche Ansätze in der Literatur zu finden sind (z.B. BLUM 1932, KEMPFERT 1989, SMOLTCZYK 2001). Entsprechend dem Forschungsansatz werden deshalb im Forschungsvorhaben keine eigenen Untersuchungen zur Ermittlung horizontal wirksamer haltender Kräfte durchgeführt. Für die Bemessung der Einbindelänge von Bühnenpfählen werden die horizontalen Haltekräfte mit vorhandenen Berechnungsansätzen ermittelt.

### **5.4 Vertikale Haltekräfte – durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse**

Vertikale Haltekräfte wirken den vor allem durch vertikale Eislasten entstehenden Beanspruchungen entgegen. Ein Absenken eines Pfahls infolge vertikaler Eislasten (bei sinkendem Wasserstand) ist aufgrund des entgegenwirkenden Spitzendrucks unwahrscheinlich. Sollte der Spitzendruck aufgrund der Baugrundeigenschaften (z.B. weiche Mudde) sehr gering sein, wird dies beim Einbringen der Bühnenpfähle (typischerweise Rammen) bereits bemerkt. Möglich ist das Herausziehen von Bühnenpfählen infolge vertikaler Eislasten (Eishub) durch die Überschreitung der wirksamen Mantelreibung des Pfahls, die von den bodenmechanischen Eigenschaften des Bodens, der Rauheit der Pfahloberfläche und der Einbindetiefe des Pfahls in den Boden abhängt. Die Untersuchungen zu vertikalen Haltekräften beschränken sich daher auf die Mantelreibungskräfte, die aufwärts gerichteten vertikalen Eiskräften entgegenwirken.

### 5.4.1 Zugversuche

Durch eine größere Zahl von Zugversuchen an Bühnenpfählen unter verschiedenen Bau-  
grundbedingungen sollte eine Bewertung der vorhandenen Berechnungsansätze zur Er-  
mittlung vertikaler Haltekräfte und die Auswahl praxistauglicher Rechenansätze ermög-  
licht werden. In Zugversuchen wurde von Pfählen mit bekannten Einbindetiefen, Bau-  
grundaufbau und Einbauzeitpunkt die aufnehmbare Zugkraft gemessen.

#### 5.4.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuchseinrichtung wurde im IWR konstruiert und von einer Metallbaufirma (Stahl-  
bau Ruhnke GmbH) hergestellt. Die Versuchseinrichtung besteht aus 2 Stützen, die durch  
ein Zugband miteinander verbunden sind und die auf 2 Füßen zur besseren Lastvertei-  
lung aufgelagert sind. Die Konstruktion besteht aus Aluminiumeinzelteilen, um einen  
Transport der Zugeinrichtung am Strand zu ermöglichen (Gewicht). Der Versuchsaufbau  
ist in Abb. 52 - Abb. 54 dargestellt. Die Zugkraft wurde über einen Hydraulikzylinder durch  
eine handbetriebene Hydraulikpumpe auf den Pfahl aufgebracht. Die Erfassung von Kraft  
und Weg während des Zugversuches erfolgte durch elektronische Wegaufnehmer und  
Kraftmessdosen, die Aufzeichnung der Daten über einen tragbaren Computer. Die maxi-  
male Belastung der Zugeinrichtung war konstruktionsbedingt auf 120 kN begrenzt. Nach  
Hinweisen aus der projektbegleitenden Beratergruppe wurde die Zugeinrichtung im Früh-  
sommer 2003 im Detail optimiert.



Abb. 52: Zugmaschine zur Messung von Pfahl-Haltekräften



Abb. 53 Schelle zur Kraftübertragung  
zwischen Pfahl und Zugeinrichtung



Abb. 54: Detail Zugeinrichtung (Zugzylinder,  
Wegsensor)

Die Zugbelastung der Pfähle wurde in Abstimmung mit dem StAUN Rostock jeweils bis zum Versagen der Verbindung Baugrund - Pfahl erhöht. Dieses erforderte ein Anheben des Pfahls um nur wenige Zentimeter, so dass die untersuchten Pfähle in ihrer Funktion nicht beeinträchtigt wurden. Die Versuche wurden unter Berücksichtigung der Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (DGGT) 1998 durchgeführt. Die Belastung wurde stufenweise auf den Pfahl aufgebracht.

#### 5.4.1.2 Ergebnisse

Vom IWR wurden - teilweise im Rahmen von Diplomarbeiten - Zugversuche an Pfählen, die in unterschiedlichen Baugründen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns eingebaut waren, durchgeführt. Es liegen Messdaten von 50 Zugversuchen an 27 Pfählen vor (Abb. 55). Die Zugbelastung bis zum Versagen der Haltekräfte zwischen Baugrund und Pfahl variierte abhängig vom Baugrund und der Pfahllänge im Boden zwischen  $F=31$  kN und  $F>100$  kN.

Versuche im Rahmen einer Diplomarbeit zeigten, dass der zeitliche Verlauf der aufgetragenen Belastung von entscheidender Bedeutung ist. Der zeitliche Belastungsverlauf wurde in den Zugversuchen verändert.

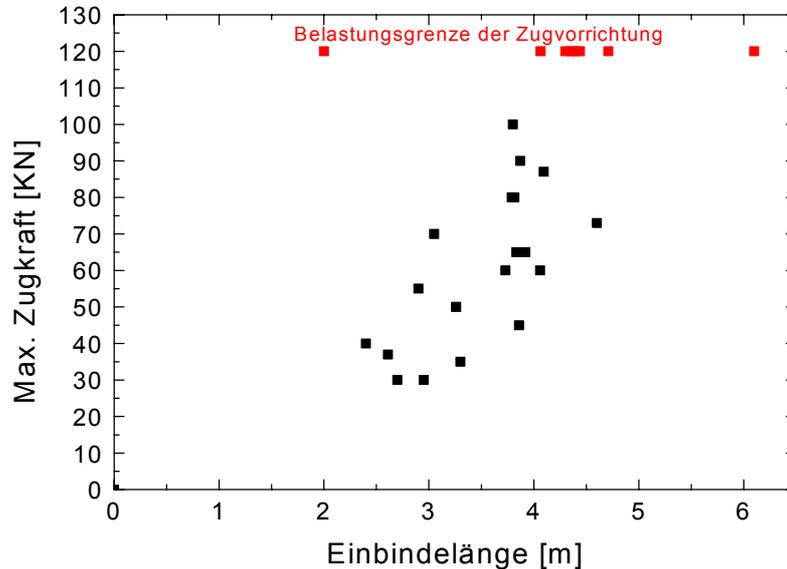


Abb. 55: Pfahlwiderstand als Funktion der Einbindelänge, aus Zugversuchen

Abb. 56 zeigt die Ergebnisse eines typischen Zugversuches im Sand (oben), bei dem die Zugbelastung schrittweise bis zum Versagen der Verbindung zwischen Pfahl und Boden erhöht wurde, sowie die Abhängigkeit von der Zugdynamik (Mitte und unten) bei zwei Zugversuchen an demselben Pfahl. Bei länger andauernder Belastung waren geringere Kräfte erforderlich, um den Pfahl aus dem Boden zu ziehen (unten), als bei einer relativ kurzzeitigen Belastung (Mitte, keine Pfahlbewegung).

Durch Auswertung umfangreicher Datenbestände aus dem Archiv des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) Rostock im Rahmen der o.g. Diplomarbeit konnten Aussagen zu realistischen Geschwindigkeiten des Wasserstandsanstiegs unter geschlossenen Eisdecken getroffen werden (0,5 m/h).

Die für die Zugversuche ausgewählten 27 Probepfähle befanden sich an Standorten mit unterschiedlichen Baugrundverhältnissen. Durch die Versuche konnte festgestellt werden, dass die größten Haltekräfte erwartungsgemäß in steifen bis festen bindigen Böden und sehr dicht gelagerten Sanden auftreten. Die geringsten Zugbelastungen können von den untersuchten Baugründen durch Bühnenpfähle in weichen bindigen Böden und sehr locker gelagerten Sanden aufgenommen werden.

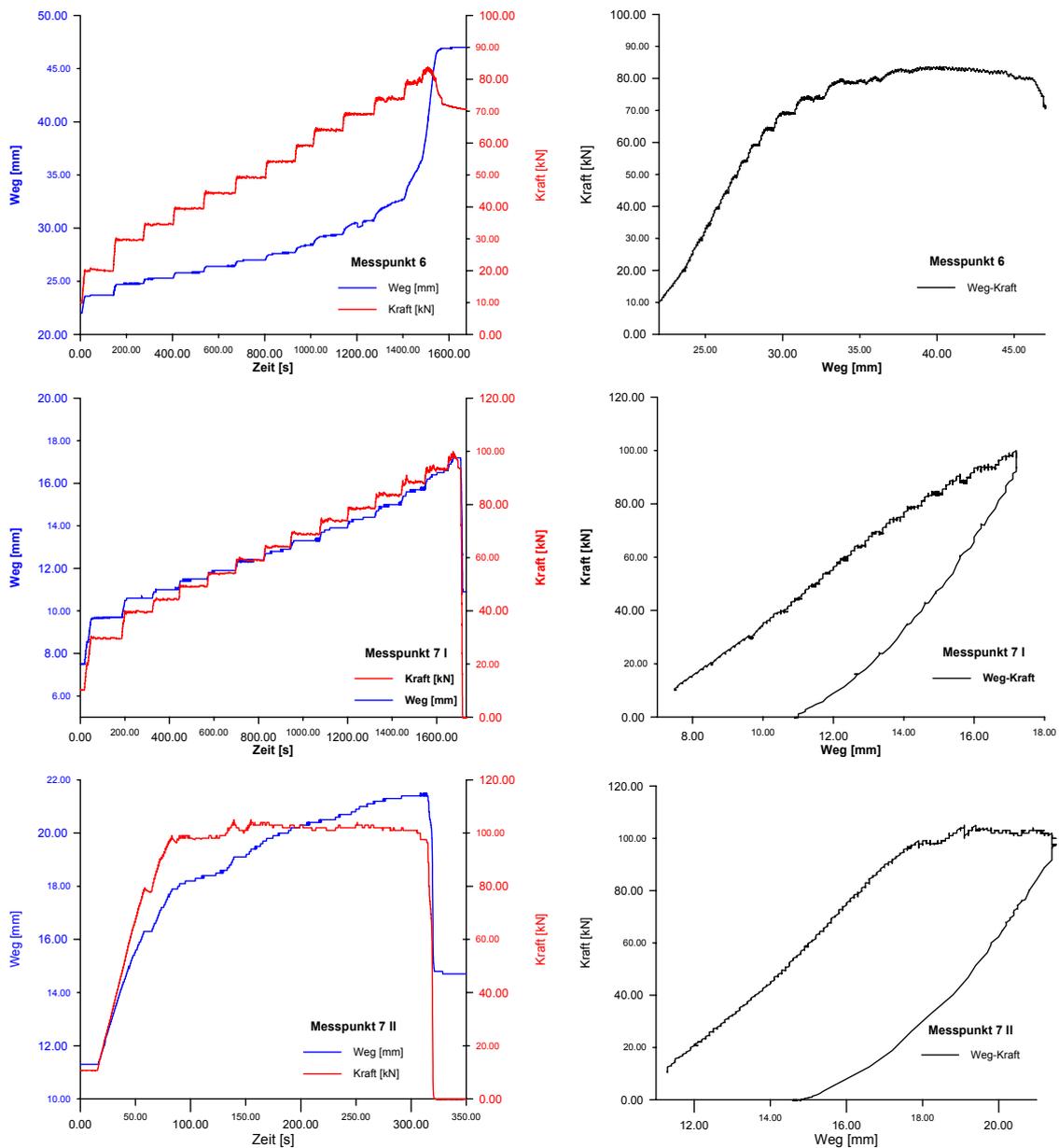


Abb. 56: Weg und Kraft-Kurven von Zugversuchen (links), Weg-Kraft-Hysteresekurven (rechts).

Um die Aussagefähigkeit von Berechnungsverfahren zur Haltekraft von Zugpfählen einschätzen zu können, wurden die in den Zugversuchen bestimmte Pfahlwiderstände von Bühnenpfähle den Ergebnissen von Berechnungen nach ausgewählten Verfahren gegenübergestellt.

Abb. 57 zeigt, dass nur wenige Rechenansätze Ergebnisse erzeugen, die durch die Feldmessungen bestätigt werden.

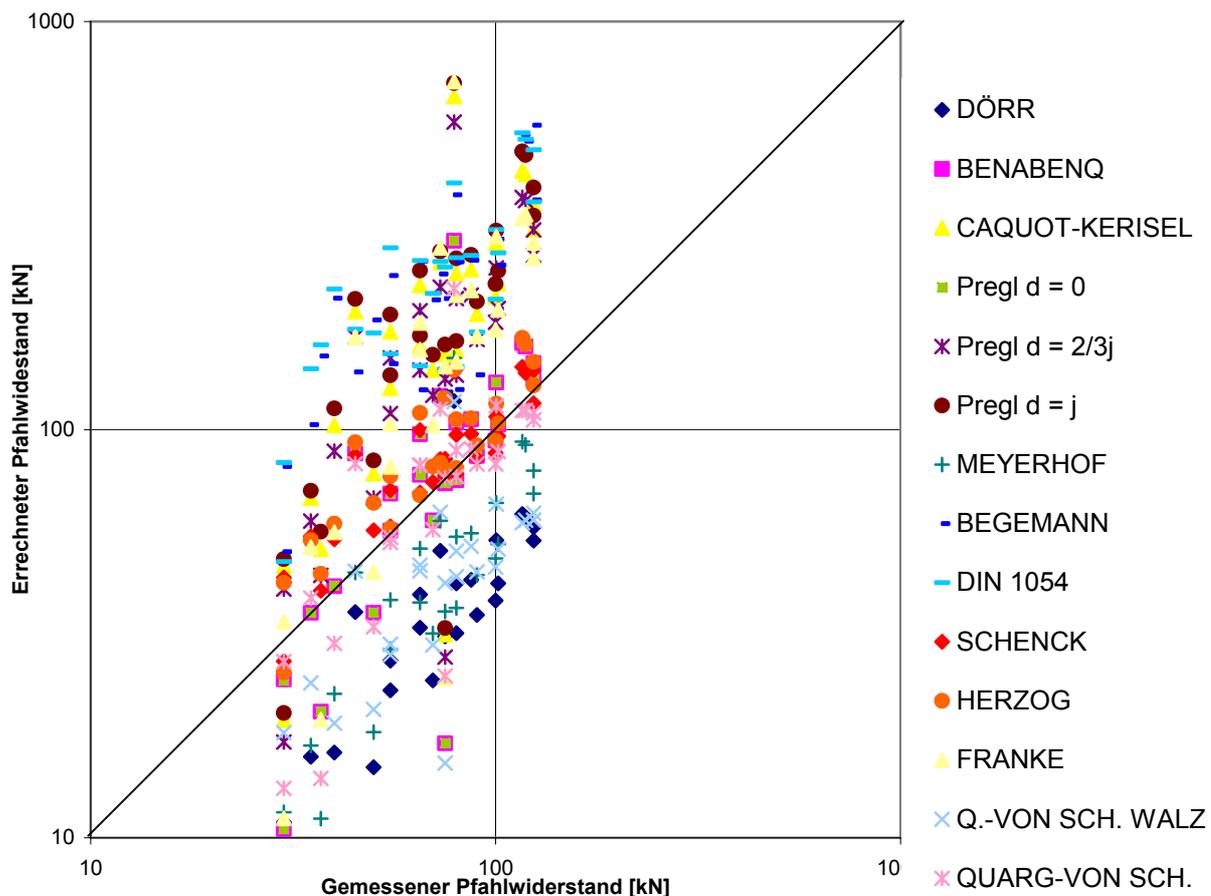


Abb. 57: Gegenüberstellung der Ergebnisse von ausgewählten Berechnungsverfahren und gemessener Pfahlwiderstände

Für Sandböden aller Lagerungsdichten erweisen sich die erdstatischen Verfahren nach BENABENQ und PREGL bis 4,5 m Einbindetiefe und die empirischen Ansätze nach SCHENCK und HERZOG als geeignet, die Tragfähigkeiten von Bühnenpfählen abzuschätzen. Die Methode nach QUARG-VONSCHEIDT ergibt in sandigem Baugrund mit mitteldichter Lagerung akzeptable Werte. Für Böden mit stärkeren bindigen Anteilen können nur die Verfahren nach SCHENCK und HERZOG herangezogen werden.

#### 5.4.2 Integritätstests

Integritätstests sind als Verfahren zur schnellen und kostengünstigen Pfahlprüfung in der Baupraxis seit langem eingeführt. Das Messprinzip beruht grundsätzlich auf der Einleitung eines Impulses in den Pfahlkopf, die Systemantwort wird über Beschleunigungsaufnehmer (z.T. auch über Dehnungsmessstreifen) beobachtet (STAHLMANN, 2004).

#### 5.4.2.1 Low-Strain-Verfahren

Bei der Durchführung der Zugversuche wie auch bei der Auswertung der Rammprotokolle waren z.T. schwer erklärbare Streuungen der Ergebnisse aufgetreten. Als Grund für die schwankenden Messergebnisse wurden unterschiedliche Einspannlängen (Fehler beim Einbau) angenommen. Gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachgruppe IV.4 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ wurde deshalb ein Untersuchungsprogramm zur Erfassung der Pfahlänge mit Hilfe von Integritätsmessungen im sogenannten „Low-Strain“-Verfahren entwickelt.

Bei Low-strain-tests wird die innere Unversehrtheit des Pfahls durch einen Schlag geringer Intensität geprüft. Das erzeugte Schallsignal läuft vom Kopf zum Fuß des Pfahls, wird dort reflektiert und schließlich am Pfahlkopf gemessen. Durch Auswertung der Laufzeit des Signals kann bei bekannter Schallgeschwindigkeit auf die Pfahlänge geschlossen werden.

Da die Ergebnisse von Integritätstests von der Schallgeschwindigkeit und damit vom E-Modul des Pfahls abhängig sind, können schwankende E-Moduln leicht zu falschen Ergebnissen führen. Es wurden deshalb Vorversuche an Pfählen bekannter Länge durchgeführt, um die Sensitivität des Verfahrens zu testen (Abb. 58, Abb. 59).



Abb. 58: Mitarbeiter der BAM bei der Durchführung von Low-Strain-Integritätstests an Holzpfählen auf dem Gelände der Fa. Brännich / Kühlungsborn.

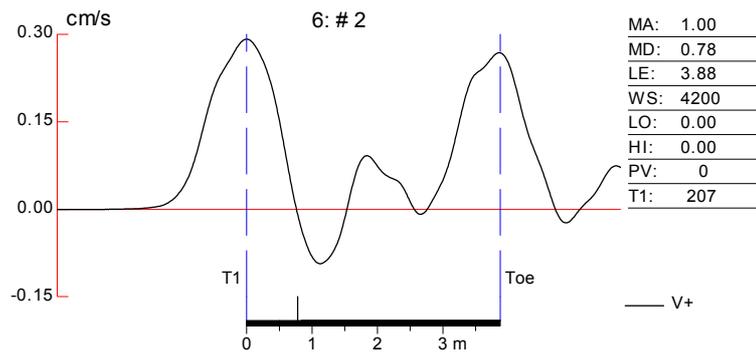


Abb. 59: Durchführung von Low-Strain-Versuchen an Bühnenpfählen vor Warnemünde.

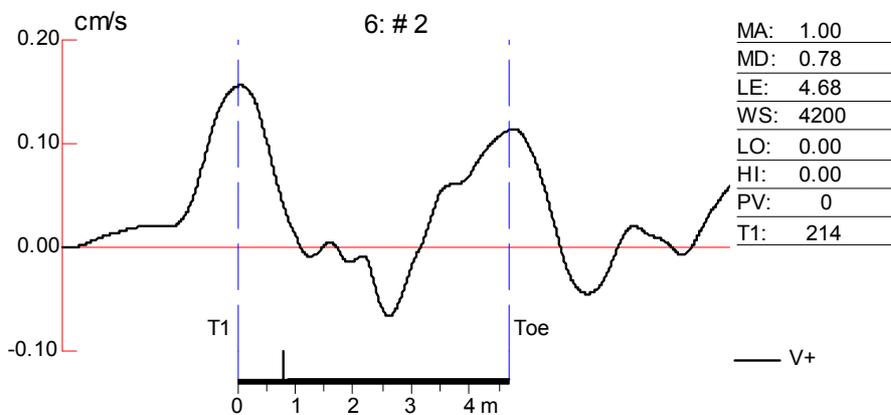
Die Grafiken der Abb. 60 zeigen typische Messergebnisse an Pfählen an Land und im Einbauzustand.

Aus den durchgeführten Versuchen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

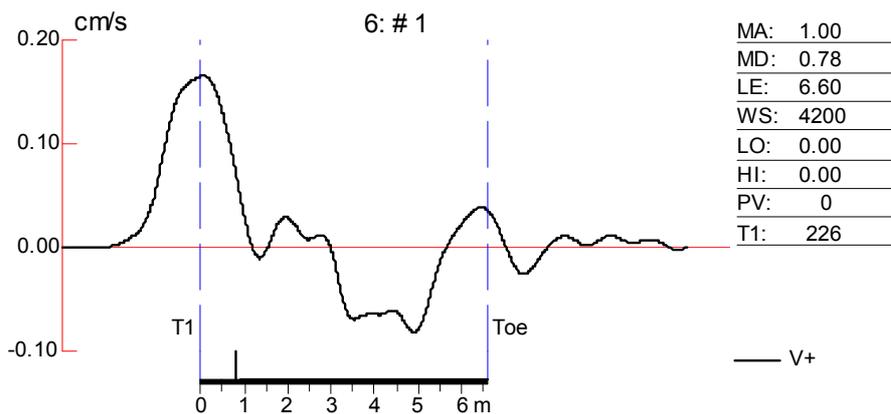
- Die Dämpfung des seismischen Signals in Holzstämmen ist geringer als angenommen, ein Fußsignal ist in ausreichender Intensität messbar. Bei eingebauten Pfählen ist die Dämpfung stärker, der Effekt wird mit einem teilweisen Übergang von Signalintensität in das umgebende Erdreich erklärt.
- Die Schallgeschwindigkeit in nassen Pfählen schwankt offensichtlich in einem Ausmaß, das einen Einsatz des Verfahrens zur Kontrolle der Länge von eingebauten Holzpfählen zweifelhaft werden lässt. Abhilfe kann durch eine Anordnung von zwei Sensoren mit bekanntem Abstand am zugänglichen Kopf des Pfahls geschaffen werden. Im vorliegenden Fall scheiterte eine derartige Vorgehensweise an der Erfordernis zeitlich hoch auflösender Messtechnik. Bei der relativ kurzen, am Pfahlkopf zugänglichen Messstrecke (ca. 0,30 m) ist für eine klare Identifizierung von Peaks eine hohe zeitliche Auflösung erforderlich, die mit dem eingesetzten Standardgerät nicht möglich war.



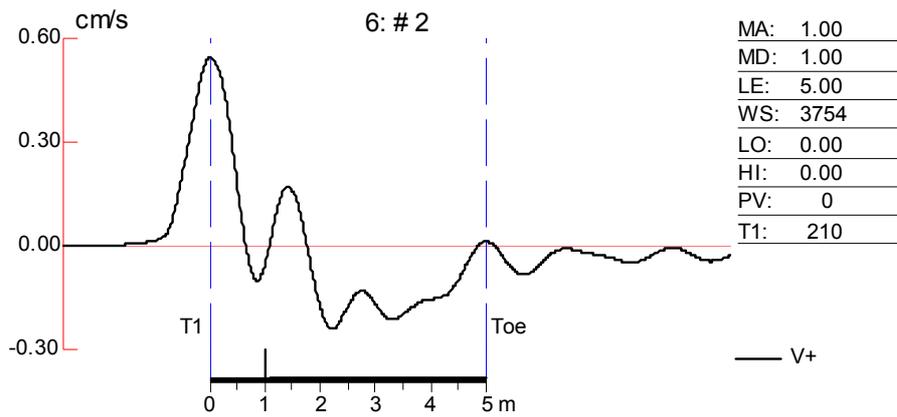
Pfahl 1, Bauhof, trockenes Tropenholz



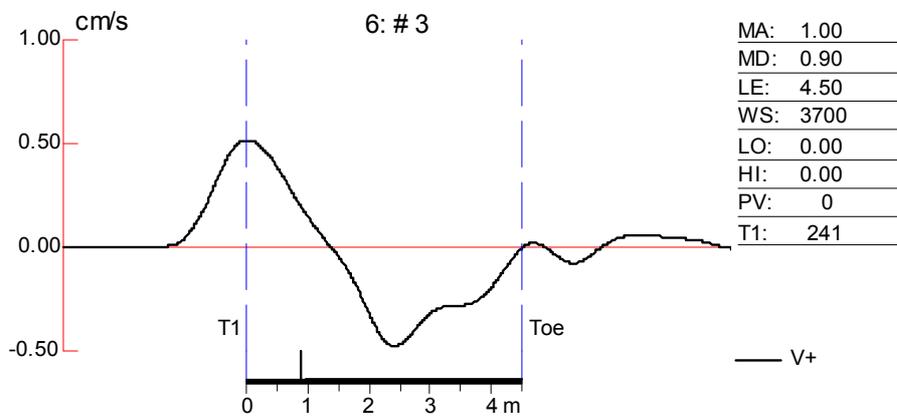
Pfahl 5, Bauhof, trockenes Tropenholz



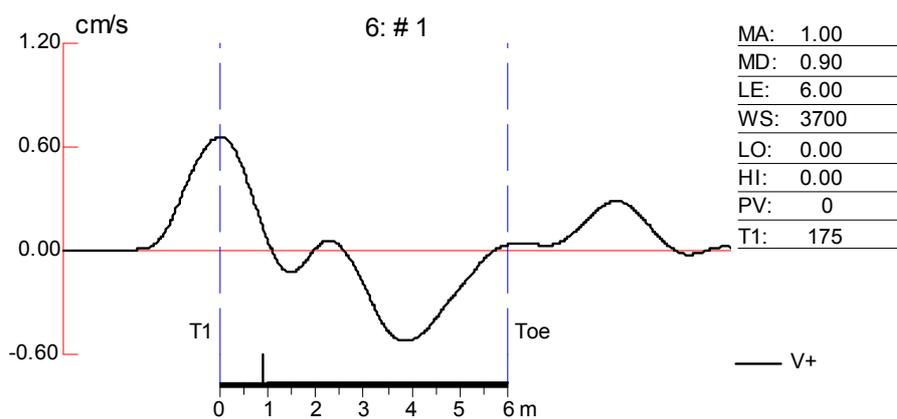
Pfahl 7, Bauhof, trockenes Tropenholz



Pfahl 18 aus Tropenholz (Länge bekannt)



Pfahl 14 mit an Pfahl 18 ermittelter Geschwindigkeit für nasses Tropenholz



Pfahl 15 mit an Pfahl 18 ermittelter Geschwindigkeit für nasses Tropenholz

Abb. 60: Ergebnisse der Low-Strain-Integritätstests an Pfählen an Land und in Buhnen

#### 5.4.2.2 High-Strain-Verfahren

Ein weiteres Problem ist die Übertragung von Berechnungsmodellen für Einzelpfähle auf Pfahlreihen. Mögliche Unterschiede in Haltekräften von Einzelpfählen und Pfählen innerhalb der Reihe sollten durch dynamische Pfahltests (High-strain-Verfahren) ermittelt werden.

Beim High-Strain-Test wird der Pfahl durch einen Schlag hoher Energie (Ramme) beansprucht. Das reflektierte Signal wird nach Beschleunigung und Verformung ausgewertet. Das Verfahren untersucht die tatsächlich wirksame Mantelreibung und den Spitzendruck am Pfahl und erlaubt somit Rückschlüsse auf das Tragverhalten.

Diese dynamischen Pfahltests sollten in Zusammenarbeit mit dem Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig durchgeführt werden. Als Standort für die Untersuchungen wurde in Absprache mit dem StAUN Rostock Graal-Müritz festgelegt. Hier wurden im Rahmen einer laufenden Bühnenbaumaßnahme für die Messungen vorbereitete Pfähle innerhalb der Bühne und einzeln stehend im Bühnenfeld eingebaut, um den Einfluß der Position in der Bühne (Einzelpfahl, Kopfpfahl, Pfahl in der Bühne) zu untersuchen. Es standen insgesamt 6 Versuchspfähle zur Verfügung.

Durch unvorhergesehen hohen Arbeitsanfall am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig stand die Messausrüstung im vorgesehenen Zeitraum leider nicht zur Verfügung. Als schließlich die Messtechnik wieder verfügbar war, war die Baumaßnahme am Untersuchungsstandort abgeschlossen, und die für die Einleitung der Impulse in die Versuchspfähle erforderliche Ramme befand sich nicht mehr vor Ort. Auf die Durchführung von High-Strain-Tests musste deshalb verzichtet werden.

### **5.5 Beeinflussung der Haltekräfte durch Bodenverflüssigungseffekte**

#### **5.5.1 Einführung**

Für die Bemessung der Einbindelänge von Bühnenpfählen ist die genaue Kenntnis der haltenden Kräfte notwendig. Diese können durch bodendynamische Effekte infolge dynamischer Beanspruchung plötzlich verringert werden (vgl. Abschnitt 2). Im Forschungsvorhaben wurden deshalb Untersuchungen zu Bodenverflüssigungseffekten des Bodens infolge Pfahlschwingungen durchgeführt.

Bei Belastung von zylindrischen Pfählen durch Wellen treten hohe Kraftwirkungen auf. Bei brechenden Wellen sind die dynamischen Lasten besonders hoch. Die Krafteinwirkung besteht aus einem quasistatischen Anteil entsprechend der Wasserspiegelauslenkung und einem dynamischen Kraftanteil (Stoßkraft).

Der im Baugrund eingespannte Pfahl wird durch die Stoßkraft am Kopf ausgelenkt und beginnt zu schwingen (vgl. Abb. 61). Die Schwingungen werden in den Baugrund übertragen und können bei wassergesättigtem sandigen bis schluffigen Baugrund zu Bodenverflüssigungseffekten führen. Dadurch wird die Haltekraft des Pfahles im Baugrund herabgesetzt. Dies kann zu einem Versagen des Systems Pfahl-Boden und somit zum Verlust von Pfählen führen. Die gewünschte Wirkung von Bühnen auf den Sedimenttransport wird durch Lücken in der Pfahlreihe herabgesetzt. Größere Schäden müssen durch aufwändige Ersatzrammungen behoben werden.

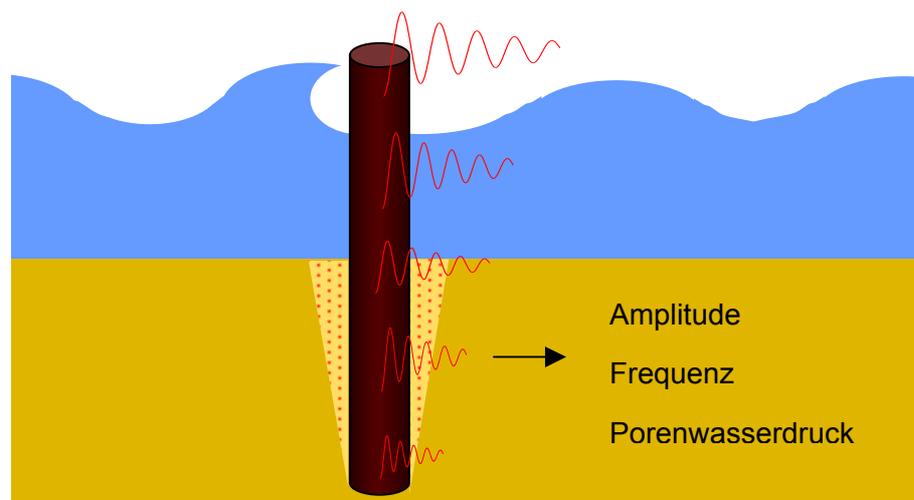


Abb. 61: Eintrag von seegangsinduzierten Schwingungen in den Baugrund

### 5.5.2 Theoretische Vorüberlegungen

Bodenverflüssigung (engl. liquefaction) ist hauptsächlich aus dem Erdbeben-Ingenieurwesen im Zusammenhang mit dem Versagen von Bauwerksgründungen infolge Erdbeebeinwirkung bekannt. Vom Committee on Soil Dynamics of the Geotechnical Engineering Division ASCE (1978) wurde der Begriff wie folgt definiert: "Verwandlung einer festen Substanz in eine Flüssigkeit". Für nichtbindige bis schwach bindige Lockergesteine bedeutet dies die Überführung aus dem festen Zustand in einen flüssigen Zustand als Konsequenz von erhöhtem Porenwasserdruck und dadurch reduzierten effektiven Spannungen im Korngerüst. Ursache von Verflüssigung können nach STUDER, KOLLER 1997 statische Last, Vibration, Wellenschlag, Grundwasserströmung und Stoßbelastung sein. Obwohl der Effekt der Bodenverflüssigung seit langem untersucht wird, sind die zugrundeliegenden Vorgänge z.T. noch unklar und Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte.

Der Effekt der Bodenverflüssigung, der mit Kornumlagerungen einhergeht, ist vom Aufbau des Bodens abhängig. Der Bodenkörper besteht aus Korngerüst und Porenraum, der mit Wasser und Luft gefüllt ist.

Eine wichtige Eingangsgröße zur Berechnung von Bodenverflüssigungseffekten ist der Porenwasserüberdruck im Boden. Durch eine Erhöhung des Porenwasserdruckes wird die Grenzscherdehnung, bei deren Überschreitung es zu Kornumlagerungen im Boden kommt, herabgesetzt.

Die Scherfestigkeit  $\tau$  eines Bodens ist von der effektiven Spannung  $\sigma'$  und dem Reibungswinkel  $\phi$  des Bodens abhängig. Die effektive Spannung  $\sigma'$  errechnet sich aus der Normalspannung  $\sigma$ , dem statischen Porenwasserdruck  $u$  (tiefenabhängig) und der Veränderung des Porenwasserdruckes infolge zyklischer Belastung  $\Delta u$ .

$$\tau = \sigma' \cdot \tan \phi$$

$$\tau = (\sigma - u - \Delta u) \cdot \tan \phi$$

Die Erhöhung des Porenwasserdruckes infolge zyklischer Belastung  $\Delta u$  wird als Porenwasserüberdruck bezeichnet. Zum Anstieg von Porenwasserdruck kann es bei einer Volumenverringerng von gesättigten Böden durch Vibration, Stoß oder statische Last kommen. Durch Pfahlbewegungen infolge Seegang kommt es zur Volumenverringerng des Bodens in direkter Pfahlnähe.

Voraussetzung für die Entwicklung eines wirksamen Porenwasserüberdrucks (Druckerhöhung im Boden) ist, dass der Porenwasserüberdruck nicht durch Abströmen des Porenwassers abgebaut werden kann. Grobkörnige, gut durchlässige Böden und stark kohäsive Böden, in denen das Wasser gebunden ist, sind nicht von Bodenverflüssigungseffekten betroffen.

Zur Verdeutlichung der Vorgänge kann man sich des Modells einer Quarzkugelpackung mit bekannten Kontakt- und Materialeigenschaften zwischen den Kugeln bedienen (Abb. 62).

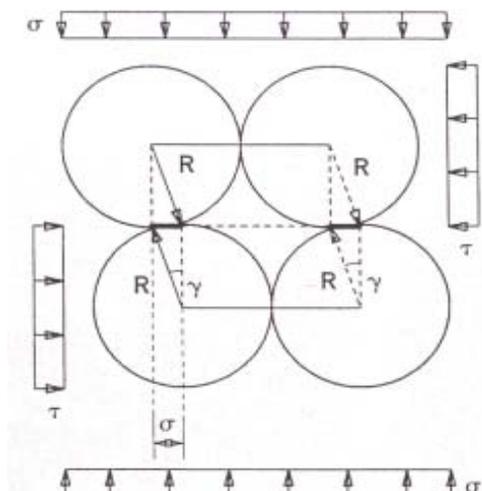


Abb. 62: Modell der Quarzkugelpackung (TRIANTAFYLLIDIS 1998)

Die Kugeln sind durch die Normalspannung und zyklischen Schubspannungen (Scherdehnung aus Schwingungen) belastet. Die Scherdehnungen  $\gamma$  werden aus der Partikelgeschwindigkeit  $v$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Scherwellen im Boden abgeschätzt. Für Sand wird nach TRIANTAFYLLIDIS eine Scherwellenausbreitungsgeschwindigkeit von 200 m/s angenommen.

$$\gamma = \frac{v}{c} \quad (1)$$

Bei Überschreiten der Grenzscherdehnung  $\gamma_t$  kommt es zu einer Verschiebung der Kugeln untereinander, also zu Kornumlagerungen. Die Grenzscherdehnung kann abhängig von den Materialeigenschaften und der Normalspannung  $\sigma$  auf das Korngerüst nach folgendem Ansatz bestimmt werden Triantafyllidis (1998):

$$\gamma_t = 3^{2/3} \frac{(2-\nu)(1+\nu)}{(1-\nu^2)^{1/3}} \cdot f \cdot \frac{\sigma^{2/3}}{E^{2/3}} \quad (2)$$

$\nu$  = Poissonzahl des Quarzes (0,31)

$f$  = Reibungsbeiwert zwischen den Kugeln (0,50)

$E$  = Elastizitätsmodul des Quarzes ( $7,6 \cdot 10^7$  KN/m<sup>2</sup>)

Für Quarzkugeln erhält man so:

$$\gamma_t = 1,33 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{2/3} \quad (3)$$

Diese Gleichung berücksichtigt einen möglichen Porenwasseranstieg nicht. Bei einer Volumenverringerng von z.B. gesättigten Sandböden durch Vibration, Stoß oder eine statische Last kommt es zum Anstieg des Porenwasserdrucks, wenn das Porenwasser nicht schnell genug abfließen kann (s.o.). Bei zyklischen Belastungen steigt der Porenwasserdruck weiter an und vermindert die effektiven Spannungen im Korngerüst. Die Grenzscherdehnung ist somit auch vom Porenwasserüberdruck abhängig. Die Gleichung zur Ermittlung der Grenzscherdehnung, die einen Porenwasserüberdruck berücksichtigt, lautet somit (TRIANAFYLLIDIS 1998):

$$\gamma_{t\bar{u}} = 1,33 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{2/3} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{\sigma_0}\right)^{2/3} \quad (4)$$

$\sigma_0$  = allseitiger effektiver Druck

Der Porenwasserüberdruck vermindert nach Gleichung (4) die Grenzscherdehnung. Bei einer dynamischen Belastung des Korngerüsts, die einen Anstieg des Porenwasserdruckes verursacht, können Kornumlagerungen schon bei geringeren Scherdehnungen auftreten.

Übertragen auf das Problemfeld schwingender Pfähle in wassergesättigtem Baugrund ist folgender Versagensmechanismus möglich: Eine brechende Welle belastet einen Buh-

nenpfahl stoßartig (Extremfall Druckschlag). Der eingespannte Pfahl wird am Kopf ausgelenkt und beginnt mit seiner Eigenfrequenz zu schwingen. Die Eigenfrequenz ist von der frei schwingenden Länge des Pfahles und somit vom Einspannpunkt im Boden abhängig. Dieser Einspannpunkt kann sich je nach Stärke der Kraffteinleitung in der Tiefe verändern. Die Schwingung wird durch Reibungsverluste gedämpft und an den umgebenden Baugrund übertragen. Im Umfeld des Pfahles treten Scherdehnungen auf, durch die dynamische Kompression des Bodens kann eine Erhöhung des Porenwasserdruckes auftreten, der die Grenzscherdehnung reduziert. Sobald die auftretenden Scherdehnungen die Grenzscherdehnung überschreiten, kommt es zu Kornumlagerungen, die den Porenwasserdruck weiter erhöhen können. Die Scherfestigkeit des den Buhnenpfahl umgebenden Boden wird stark reduziert. Eine weitere Belastung des Pfahles z.B. durch eine Welle kann zu einem Versagen des Systems Pfahl-Boden führen. Der Pfahl beginnt seine Lage zu verändern und geht schließlich aus der Buhnenreihe verloren (Abb. 63).

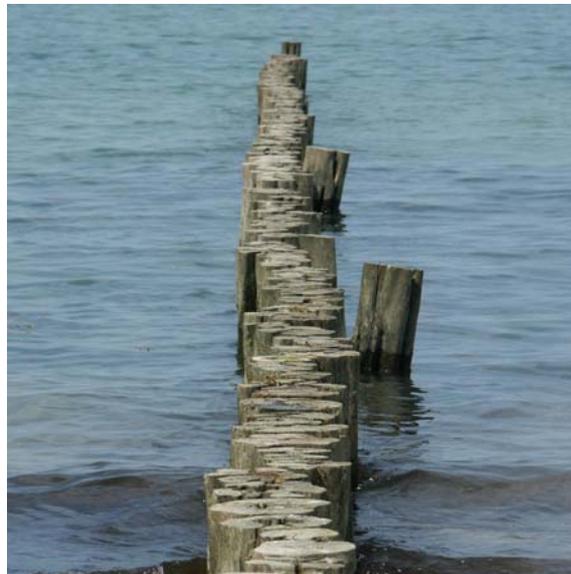


Abb. 63: Schäden an einer Buhne in Warnemünde

Um das Verflüssigungspotential von unterschiedlichen Baugründen infolge Pfahlschwingungen bestimmen zu können, ist es notwendig, das Bewegungsverhalten von Buhnenpfählen im Seegang und den infolge der zyklischen Belastung (Pfahlschwingung) auftretenden Porenwasserüberdruck zu untersuchen. Von besonderer Bedeutung ist die Pfahlbewegung (Frequenz, Amplitude) innerhalb des Bodens in Abhängigkeit von der Belastung und der Zusammenhang zwischen Pfahlbewegung im Boden und Porenwasserdruck.

Das Bewegungsverhalten von Holzpfählen in der Brandungszone in Abhängigkeit von der Belastung (Seegang, Strömung) und den Randbedingungen (Pfahllänge, Einspannlänge, Baugrund, Wasserstand) wurde durch die in Abschnitt 3 beschriebenen Untersuchungen geklärt.

Es wurde - wie im Antrag zur Projektlaufzeitverlängerung vorgesehen - ein Messprogramm zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Pfahlbewegung und Porenwasserdruck entwickelt. Das Messprogramm und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden erläutert.

### 5.5.3 Porenwasserdruckversuche

Die genauen Vorgänge während des Auftretens von Bodenverflüssigung infolge zyklischer Bauwerksbewegungen sind derzeit noch nicht vollständig erforscht. Da aus dem Schrifttum keine Verfahren zur Abschätzung des Porenwasserdruckes infolge zyklischer Pfahlbewegungen abhängig von den bodenmechanischen Eigenschaften des Bodens bekannt waren, wurden im Forschungsvorhaben Porenwasserdruckmessungen in direkter Nähe von schwingenden Buhnenpfählen durchgeführt. Die Versuchseinrichtung wurde am Strand zwischen Prerow und Zingst (Halbinsel Darß) aufgebaut, an dem gut sortierte wassergesättigte Sande unterschiedlicher Lagerungsdichte angetroffen werden. Ziel der Untersuchungen war die gleichzeitige Erfassung von Pfahlbewegung und Porenwasserdruck und die Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen beiden Größen.

#### 5.5.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuchseinrichtung besteht aus Buhnenpfählen aus Tropenholz und Messrohren, die in der Umgebung der Versuchspfähle in unterschiedlichen Tiefen und Abständen von den Versuchspfählen installiert wurden. An den Versuchspfählen wurden - über die gesamte Pfahllänge verteilt - Beschleunigungssensoren befestigt, um nach Berechnung der Pfahlauslenkungen eine Übertragungsfunktion zwischen Pfahlbewegung und Porenwasserdruckanstieg ermitteln zu können. Die Messrohre sind im Fußbereich verfiltert. Pfähle und Messrohre wurden im Rahmen einer Buhnenbaumaßnahme des StAUN am Strand von Zingst in der Nähe der Uferlinie in den Boden gerammt.

Der Porenwasserdruck wurde mit Drucksensoren (Druckbereich 1 bar) gemessen, die nachträglich in die Messrohre eingebaut wurden. Die Drucksensoren mussten vor Einbau gesättigt (entlüftet) werden. Dazu wurde der Sensor mit Parafinöl gefüllt, und die Öffnungen wurden mit Vaseline verschlossen. Danach konnten die Sensoren in das mit Wasser gefüllte Messrohr heruntergelassen werden.

Um ein Entweichen des Wasserdrucks nach oben zu verhindern, wurden die Messrohre oberhalb der Filterstrecke mit mechanischen Gummipackern ausgerüstet. Die Packer wurden mit einer speziellen Gewindestange gespannt. In Abb. 64 ist ein Porenwasserdrucksensor mit Gummipacker (orange) abgebildet.

Die Erfassung der Messdaten erfolgte mit einem Datalogger der Firma IMC ( $\mu$ -Musyocs) und einem tragbaren Computer. Mit diesen Messgeräten konnten die Daten der 20

Drucksensoren und die Pfahlbeschleunigungen zeitgleich erfasst werden. Es wurde eine Abtastrate von 1kHz gewählt.

Die Versuchspfähle wurden mit einem Hammer oder mit einem pneumatischen Kolbenvibrator zu Schwingungen angeregt. Der Kolbenvibrator wurde über eine Holzschraube M16 direkt mit dem Versuchspfahl verbunden. Der Kolbenvibrator wurde über einen Kompressor (Strom über Benzinegenerator) angetrieben. Frequenz und Amplitude der Pfahlschwingungen konnten mit dem Kolbenvibrator über die Luftzufuhr, ein Ablassventil und über unterschiedlich schwere Gewichte, die am Kolbenvibrator befestigt werden konnten, gesteuert werden. Um die Mechanik des Kolbenvibrators zu schützen, musste das Gewicht des Kolbenvibrators und der Zusatzgewichte mit Hilfe einer Aufhängung getragen werden. Die Aufhängung in Form eines "Galgens" wurde in der Werkstatt des IWR hergestellt. In Abb. 64 ist der Kolbenvibrator mit der Aufhängung und der angeschlossenen Druckluftleitung dargestellt.



Abb. 64: Drucksensor mit Gummipacker und Anschlusskabel / Pneumatischer Kolbenvibrator

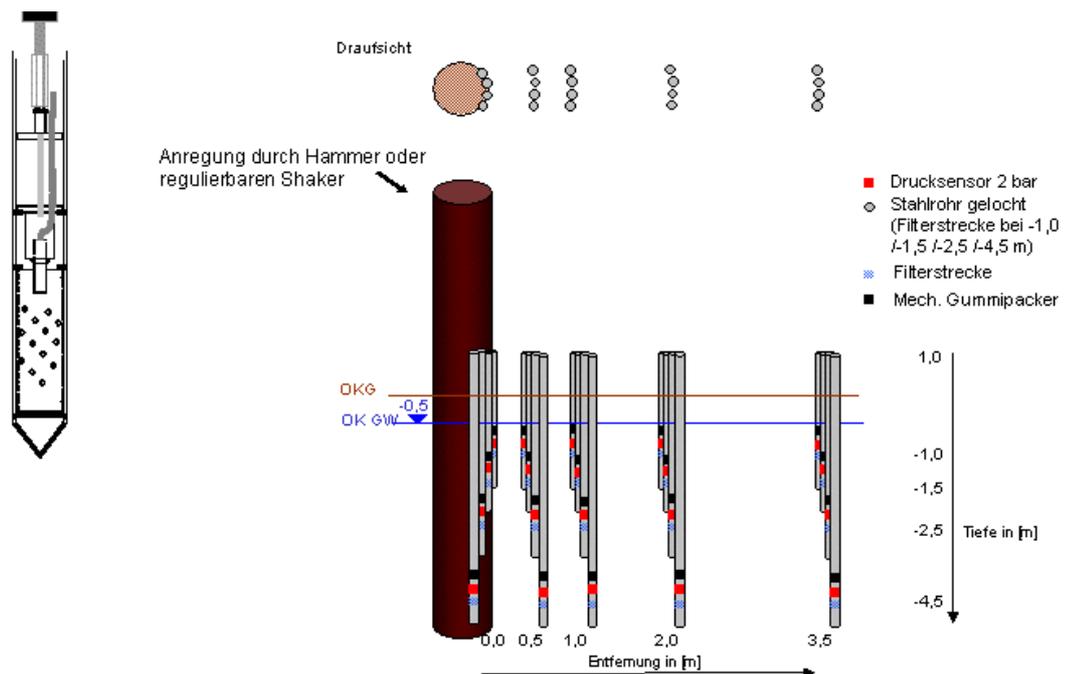


Abb. 65: Schnitt Messrohr und Versuchseinrichtung Phase I

Die Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck wurde in 3 verschiedenen Varianten aufgebaut. In einer ersten Phase bestand die Versuchseinrichtung aus einem 8 m langen Buhnenpfahl aus Tropenholz und 20 Messrohren aus Stahl (40 mm Innendurchmesser) zur Aufnahme der Drucksensoren. Die Stahlrohre waren im Fußbereich gelocht und mit einem Sinterpor – Fluid - Filter zur Vermeidung von Sandeintrag ausgerüstet. Die Messpositionen wurden direkt am Pfahl und im Abstand von 0,5 m; 1,0 m; 2,0 m und 3,5 m in den Tiefen -1,0 m; -1,5 m; -2,5 m und -4,5 m festgelegt. Abb. 65 verdeutlicht den Versuchsaufbau (Phase I) und zeigt im linken Teil einen Schnitt durch ein Messrohr mit Drucksensor und Installationsgewindestange.

Bei Beginn der Messungen konnten nicht an allen Messpositionen sinnvolle Messwerte erfasst werden. Nur einzelne Sensoren lieferten glaubhafte Daten. Nach einer aufwändigen Fehleranalyse und dem Ausbau einzelner Drucksensoren und Messrohre wurde festgestellt, dass die gelochten Stahlrohre und die Sinterpor-Filter sich mit organischem Material zugesetzt hatten. Ein schneller Wasser- und Druckaustausch zwischen umgebendem Boden und Sensor war nicht mehr möglich. Trotzdem konnten hinsichtlich des Versuchsaufbaus einige Erkenntnisse gesammelt werden. Die horizontalen Abstände der Messpositionen erwiesen sich als zu groß. An den weit entfernten Messpunkten konnten keine Porenwasserdruckerhöhungen durch Bewegungen des Versuchspfahles festgestellt werden. Die zyklische Belastung des Pfahles bewirkte eine Verdichtung des Bodens direkter Nähe des schwingenden Pfahles. Dies lässt auf Kornumlagerungen im Bodengerüst schließen.

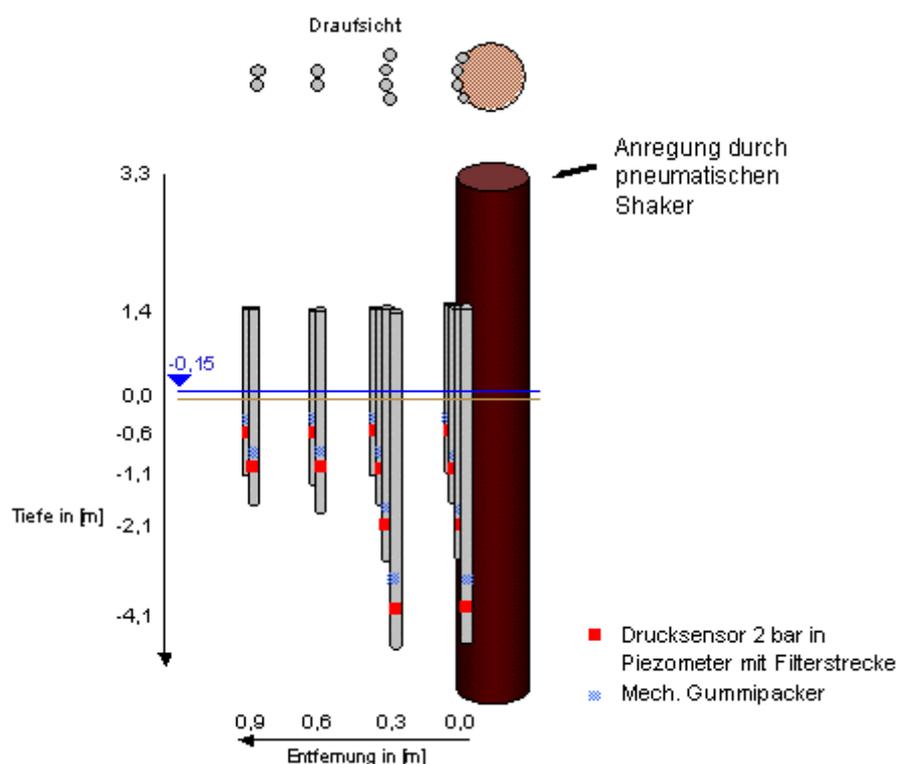


Abb. 66: Versuchseinrichtung Phase II

In einer zweiten Phase wurden anstatt der gelochten Stahlrohre mit Sinterfiltern HDPE-Filterrohre (Schlitzfilter; 0,3mm Öffnungsweite) als Messrohre zur Aufnahme der Drucksensoren verwendet (Abb. 67). Die Messrohre wurden gegenüber dem Versuchsaufbau in Phase II in einem geringeren Abstand zum Versuchspfahl installiert. Die Anzahl der Messpositionen wurde auf 12 reduziert. Es wurde der gleiche Versuchspfahl (8 m Tropenholz) verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 66 dargestellt. Die Versuche wurden teilweise mit einem Wasserstand über GOK durchgeführt.



Abb. 67: HDPE Schlitzfilter

Mit der Versuchseinrichtung der Phase II konnte die dynamische Änderung des Porenwasserdruckes infolge Pfahlschwingungen wie geplant erfasst werden. Auf Grundlage der Messergebnisse in der Versuchphase II wurde die Versuchseinrichtung nochmals verändert (Phase III), um den Unterschied in der Porenwasserdruckentwicklung bei der Schwingung von verhältnismäßig langen und kurzen Pfählen untersuchen zu können. Hierfür wurde im Abstand von 0,65 m zusätzlich ein 4 m langer Tropenholzpfahl im Boden installiert. Abb. 68 zeigt den Versuchsaufbau der Phase III. Abb. 69 gibt einen Eindruck der Versuchseinrichtung vor Ort.

Es konnte bei Schwingung des kürzeren Pfahles ein deutlicher Unterschied in der Porenwasserdruckentwicklung gegenüber der Porenwasserdruckentwicklung beim langen Versuchspfahl nachgewiesen werden. Aufgrund der höheren Schwingungsfrequenz (20 Hz gegenüber bis zu 10 Hz beim langen Pfahl) konnte der durch die Schwingungen erzeugte Porenwasserüberdruck zwischen den einzelnen Schwingungszyklen nicht abgebaut werden. Eine Porenwasserdruckerhöhung, die nur langsam mit Abnahme der Schwingungsamplitude des Pfahls abnahm, war die Folge.

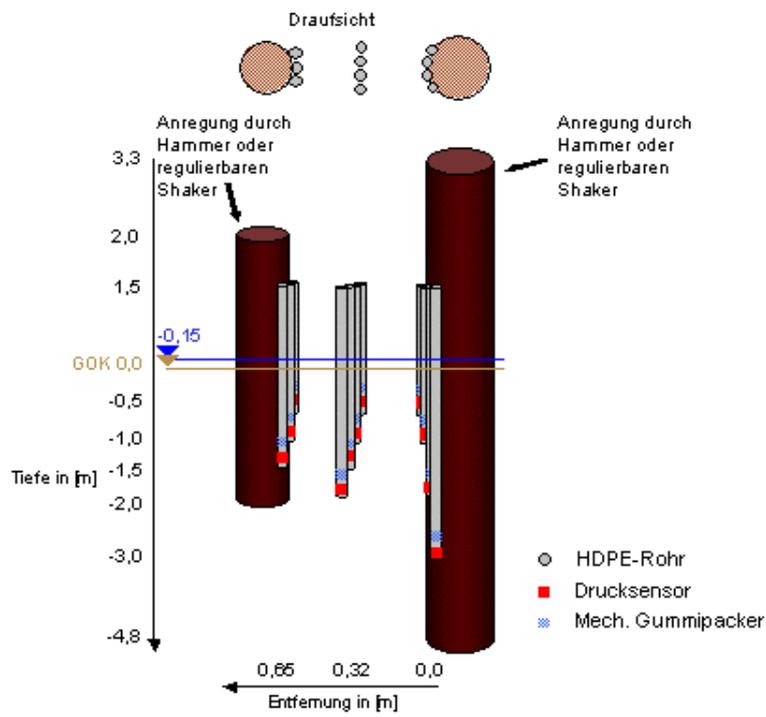


Abb. 68: Versuchseinrichtung Phase III



Abb. 69: Versuchseinrichtung Phase III am Strand von Zingst

### 5.5.3.2 Ergebnisse

Mit der Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen wurde in Phase II und III die dynamische Änderung des Porenwasserdrucks im Umfeld schwingender Pfähle messtechnisch erfasst.

Bei Schwingungen des 8 m langen Pfahles kam es zur Schwingung des Porenwasserdrucks im Boden mit gleicher Frequenz (Frequenzbereich bis 10 Hz). Eine Akkumulation des Porenwasserüberdrucks (Anstieg mit jeder weiteren Schwingung) trat nicht auf, da das Porenwasser offensichtlich bei den erzeugten Schwingungsfrequenzen (bis 10 Hz) schnell genug abfließen kann. Abb. 70 zeigt die gemessene Pfahlbeschleunigung und die durch die Pfahlschwingung (Bodenkompression) erzeugte Porenwasserdruckschwingung. In einem Abstand von 0,90 m vom schwingenden Pfahl konnten keine Porenwasserdruckerhöhungen mehr nachgewiesen werden.

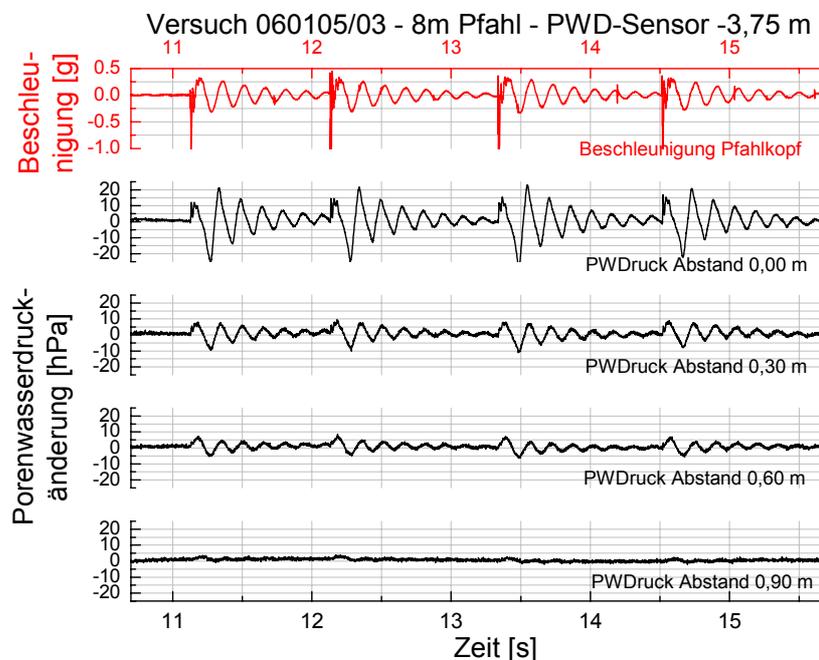


Abb. 70: Pfahlbeschleunigung und Porenwasserdruckschwingung eines 8 m Pfahls

Bei höheren Schwingungsfrequenzen (ca. 20 Hz), die an einem 4 m langen Versuchspfahl erzeugt werden konnten, traten keine Porenwasserdruckschwingungen mit der Schwingungsfrequenz des Pfahls auf. Der Porenwasserdruck erhöhte sich und fiel mit Abnahme der erregenden Schwingung. Es konnte trotz kurzer Abstände der Belastungseinwirkung auf den Pfahl nur eine geringe Akkumulation von Porenwasserdruck gemessen werden. Abb. 71 zeigt die Pfahlbeschleunigungen am Pfahlkopf und den durch die Schwingung erzeugten Porenwasserdruck des 4 m langen Versuchspfahles in unterschiedlichen Abständen vom Versuchspfahl. Abb. stellt die unterschiedliche Porenwasserdruckentwicklung abhängig von der Frequenz der Belastung im Detail dar.

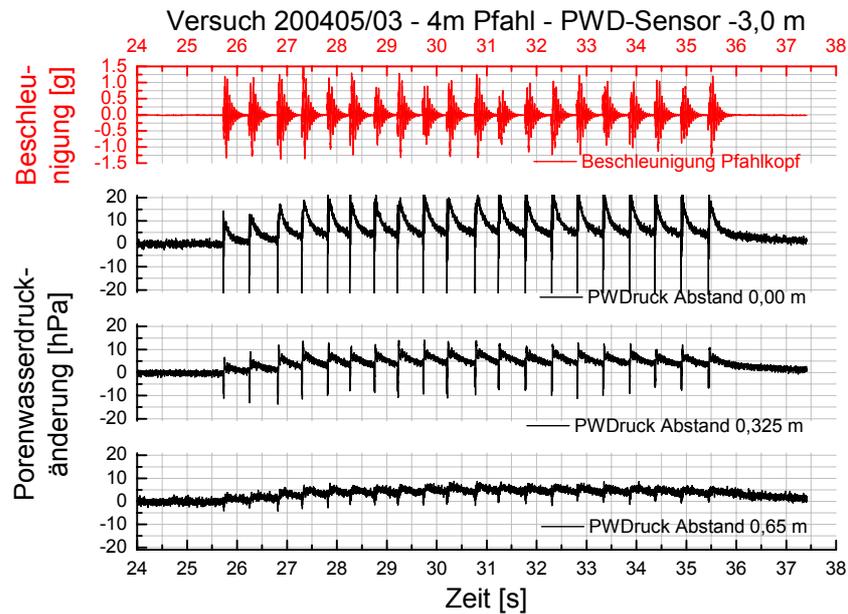


Abb. 71: Pfahlbeschleunigung und Porenwasserdruckschwingung eines 4 m Pfahls

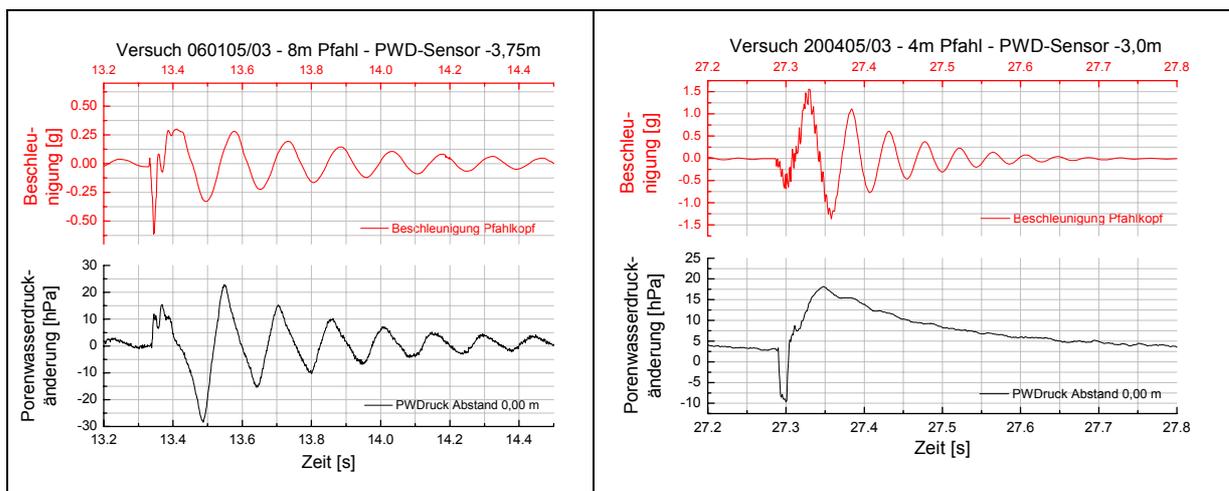


Abb. 72: Vergleich von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingung bei unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen (links ca. 7 Hz, recht ca. 20 Hz)

Für die Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen Pfahlbewegung und Porenwasserdruck wichtig. Die in der Natur auftretenden Pfahlbewegungen wurden im Forschungsvorhaben durch Messungen von Pfahlbeschleunigungen an Bühnenpfählen untersucht. Die Untersuchungen sind in Abschnitt 3.2.3.4 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen Pfahlbewegung und den durch die Kompression des Bodens erzeugten Porenwasserüberdruck wurde beispielhaft mit der Versuchsanlage zur Erfassung von Porenwasserdruck ermittelt. Aus den gemessenen Pfahlbeschleunigungen wurden über das im Abschnitt 3.2.3.5 dargestellte Auswerteverfahren Pfahlbewegungen

ermittelt. Die Pfahlbewegung konnte an jedem Punkt des Pfahls bestimmt werden. Die Pfahlauslenkungen wurden den erzeugten Porenwasserdruckerhöhungen zugeordnet. Abb. 73 zeigt den Zusammenhang zwischen Pfahlbewegungen am Pfahlkopf und dem durch die Kompression des Bodens erzeugten Porenwasserüberdruck im Boden (GOK - 1,0 m).

Die gesamte Kette von Belastung (Seegang) und Wirkung am Pfahl (Pfahlbeschleunigung) und im Boden (Porenwasserdruckerhöhung) wurde exemplarisch untersucht und kann somit beschrieben werden, d.h. Bodenverflüssigungseffekte infolge seegangsinduzierter Pfahlschwingungen können dem Forschungsziel entsprechend in die Bemessung der Einspannlänge von Bühnenpfählen einbezogen werden.

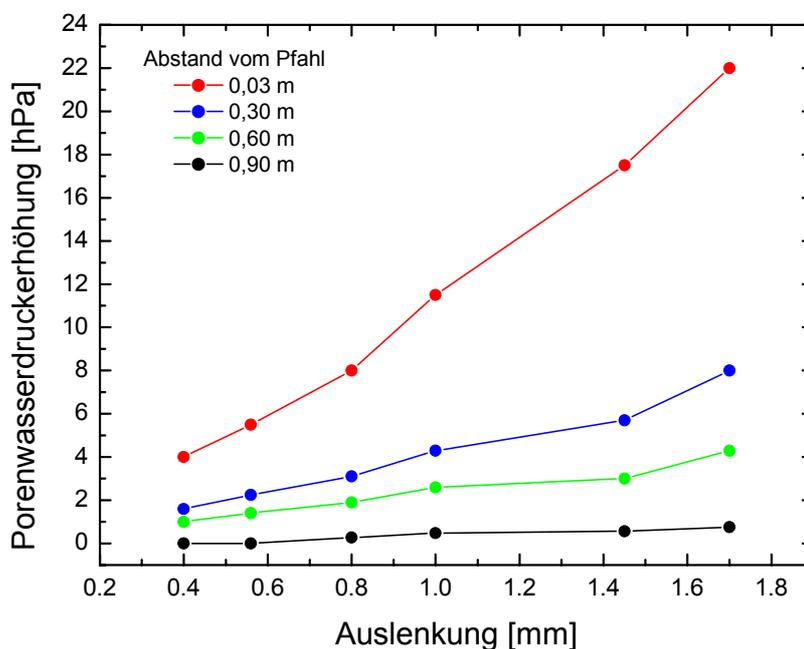


Abb. 73: Zusammenhang Pfahlbewegung (Kopf) - Porenwasserdruck

Da die Untersuchungen aufgrund zeitlicher und finanzieller Beschränkungen nur an einem einzigen Standort mit spezifischen Baugrundeigenschaften durchgeführt wurden, sind weitere Untersuchungen an Orten mit anderen Baugrundverhältnissen wünschenswert.

#### 5.5.4 Bodenverflüssigungseffekte

Wie bereits in den theoretischen Vorüberlegungen (Abschnitt 5.5.2) dargestellt, ist der wirksame Porenwasserüberdruck für die Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten besonders wichtig. Sobald der Porenwasserüberdruck  $\Delta u$  größer wird als die Normalspannung  $\sigma$  unter Berücksichtigung des statischen Porenwasserdruckes  $u$ , kommt

es zum Zusammenbruch der Scherfestigkeit  $\tau$  des Bodens (vgl. Berechnungsformel für  $\tau$ ).

$$\tau = (\sigma - u - \Delta u) \cdot \tan \phi$$

Die Reibungskräfte zwischen den Bodenteilchen werden aufgehoben, Scherbeanspruchungen können vom Bodenkörper nicht mehr aufgenommen werden. In diesem Fall ist der Begriff Bodenverflüssigung gerechtfertigt.

In Abb. 74 sind die Normalspannung und die in den Porenwasserdruckversuchen max. gemessenen Porenwasserdruckerhöhungen über die Tiefe dargestellt. Zu beachten ist die logarithmische Einteilung auf der Druckachse. Wie bekannt nimmt die Normalspannung mit zunehmender Tiefe linear zu. Der Porenwasserüberdruck nimmt dagegen mit der Tiefe stark ab, da die Erregung (Pfahlbewegung) ebenfalls stark mit der Tiefe abnimmt (bis zum Einspannpunkt des Pfahls). Bodenverflüssigungseffekte mit vollständigem Zusammenbruch der Scherfestigkeit des Bodens sind nur bis zu einer Tiefe von 0,5 m unter Geländeroberkante (Schorre) zu erwarten, wie Abb. 74 verdeutlicht.

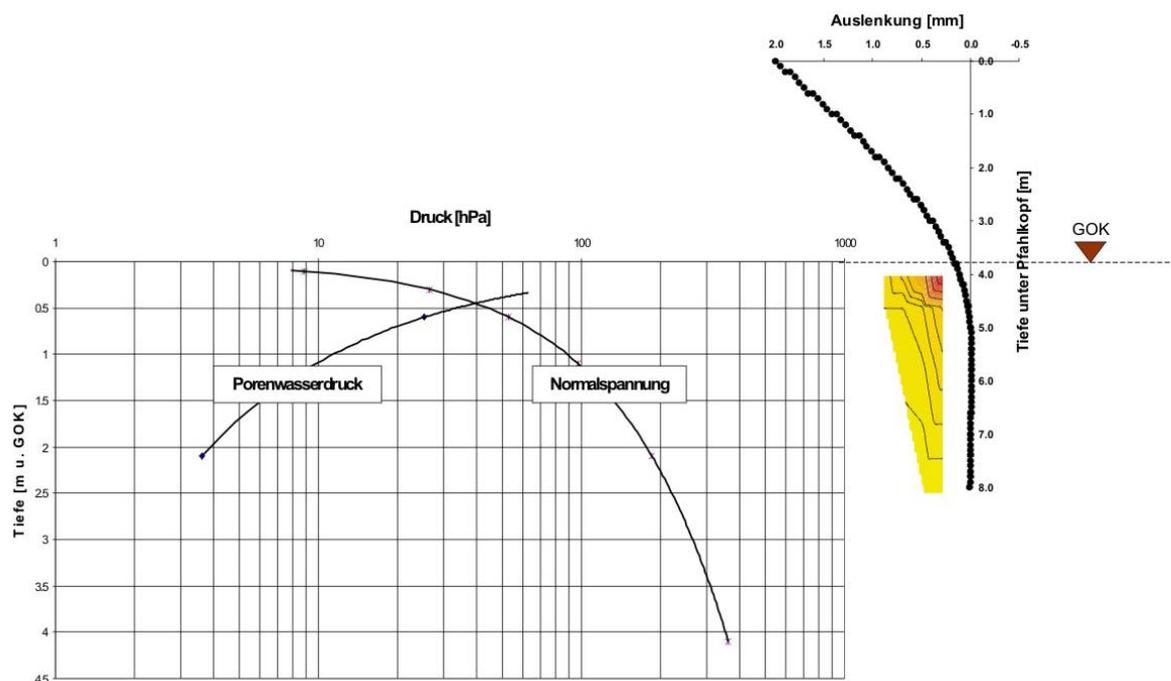


Abb. 74: Normalspannung, Porenwasserüberdruck und Pfahlbewegung am Versuchsstandort Zingst

Unterhalb des Schnittpunktes der Funktionen von Normalspannung und Porenwasserüberdruck kommt es zu einer Reduzierung der Scherfestigkeit durch erhöhten Porenwasserdruck. Diese Effekte können durch den zyklischen Spannungsansatz nach SEED, den zyklischen Dehnungsansatz nach DOBRY oder durch empirische Ansätze untersucht werden.

Da die Normalspannung mit der Tiefe zunimmt und den Porenwasserüberdruck schnell weit übersteigt, wird im Rahmen dieses praxisorientierten Forschungsvorhabens auf eine

Berechnung dieser Effekte (reduzierte Scherfestigkeit) verzichtet. Das Auftreten von Bodenverflüssigungseffekten wird über einen Sicherheitszuschlag für die Einbindelänge des Pfahls bei der Bemessung der notwendigen Einbindetiefe von Bühnenpfählen berücksichtigt.

## **6 Zusammenfassung und Ergebnisse**

Ziel des Forschungsvorhabens war die Bestimmung der notwendigen Einspannlänge von Bühnenpfählen auf natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlage. Zum Erreichen des Ziels war es erforderlich, alle am System Holzpfehl – Boden angreifenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen, zu bewerten und in ihrer Wirkung zu quantifizieren.

Die Pfähle werden im Wesentlichen durch Seegang, Strömungen und Eiskräfte beansprucht (treibende Kräfte). Die Haltekräfte sind von den Eigenschaften des Bodens, der Art der Beanspruchung (horizontal, vertikal, statisch, dynamisch), den Pfahleigenschaften und der Einspannlänge im Boden abhängig. Die wirksamen Beanspruchungen (Lastfall Seegang, Lastfall Eis) und Haltekräfte wurden im Forschungsvorhaben theoretisch und experimentell untersucht.

Die einzelnen Untersuchungsschwerpunkte des Vorhabens sowie die darin erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

### **6.1 Lastfall Seegang**

Im Untersuchungsprogramm zum Lastfall Seegang wurden Seegang, seegangsinduzierte Pfehlbewegungen von Bühnenpfählen und die Randbedingungen an den Versuchspfählen erfasst. Es wurden Vorversuche im Labor und in der Natur zur Auswahl einer geeigneten Mess- und Installationstechnik durchgeführt. An 4 Standorten mit unterschiedlichen Baugrundeigenschaften an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns wurden Seegangparameter, Pfehlbeschleunigungen und Randbedingungen kontinuierlich erfasst. Die Einbindelänge, Wassertiefe und Position der Versuchspfähle in der Bühnenreihe wurde variiert. Durch die zeitgleiche Messung von Belastung (Seegang) und Pfehlreaktion (Beschleunigung) konnte unter Berücksichtigung der Randbedingung auf den Zusammenhang zwischen Belastung und Pfehlreaktion geschlossen werden. Die wichtigsten Erkenntnisse werden im Folgenden stichpunktartig dargelegt:

- Pfehlschwingungen treten nur bei Belastung durch brechende Wellen auf
- Relevante Pfehlschwingungen treten nur bei bestimmten Kombinationen von Wellenhöhe und Wasserstand auf
- Schwingungsfrequenzen liegen in einem Bereich, in dem Bodenverflüssigungseffekte infolge dynamischer Belastung des Baugrunds auftreten können

- in sandigem Baugrund wurden die Pfahlschwingungen bis in den Boden hinein nachgewiesen
- die Schwingungsdauer kann sich durch Übertragung der Schwingungen der Nachbarpfähle auf den betrachteten Pfahl deutlich verlängern
- die max. gemessenen Beschleunigungswerte liegen für Pfähle innerhalb der Bühnenreihe bei 850 mg und für Kopfpfähle bei 1060 mg
- die ermittelten Bewegungsamplituden betragen am Pfahlkopf einige Millimeter und im Boden einige Zehntelmillimeter

Nach Abschluss der Untersuchungen im Vorhaben zum Lastfall Seegang stehen Seegangparameter sowie Schwingfrequenz, -dauer und Bewegungsamplitude von Bühnenpfählen als Eingangsdaten für die Bemessung, insbesondere zur Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten zur Verfügung.

## **6.2 Lastfall Eis**

Vertikale Eiskräfte auf Pfähle entstehen durch Festfrieren einer geschlossenen Eisdecke am Pfahl und nachfolgender Änderung des Wasserstandes. Bei steigenden Wasserständen entstehen aufwärts gerichtete Vertikalkräfte. Verfügbare Berechnungsansätze ergeben insbesondere bei größeren Eisdicken stark abweichende Ergebnisse. Da zur Bestimmung der Einspannlänge von Bühnenpfählen die Bestimmung vertikaler Eislasten auf Bühnenpfähle als Belastungsgröße notwendig ist, wurde ein Untersuchungsprogramm zur Ermittlung vertikaler Eislasten auf Holzpfähle entwickelt. Eiswinter treten an der deutschen Ostseeküste nicht jedes Jahr auf und sind nicht vorhersagbar. Deshalb wurde die Belastung von Holzpfählen durch vertikale Eiskräfte im Labor untersucht.

Die im Labor gemessenen Vertikalkräfte, die von einer geschlossenen Eisdecke auf einen Versuchspfahl übertragen wurden, sind insbesondere bei größerer Eisdicke höher als die nach EAU ermittelten Eiskräfte. Die den Berechnungen der EAU 2004 zu Grunde liegende physikalische Annahme, dass der Auftrieb einer festgefrorenen Eisplatte die Ursache der wahrnehmbaren Zugkräfte am Pfahl darstellt, kann lediglich als Grundlage für die Berechnung von Eiskräften aus einer gebrochenen Eisdecke, von der Teile an Pfählen festgefroren sind, verwendet werden. Derartige Belastungen sind jedoch für eine Bemessung von Holzpfählen in Küstenabschnitten, in denen geschlossene Eisdecken auftreten können, nicht maßgebend. Ein Versagen des Systems Holzpfahl-Eisdecke trat im Labor unter Einwirkung des hydraulischen Potentials des ansteigenden Wasserspiegels immer durch Überschreitung der Biegefestigkeit des Eises außerhalb der Kontaktfläche Pfahl – Eis auf.

Die abhängig von der Eisdicke im Labor ermittelten vertikale Eislasten wurden mit Ergebnissen von Berechnungsansätzen nach EAU, nach russischen Normen (Ministerium Russlands 1995) und dem empirischen Ansatz nach Kusnezow verglichen.

Nach Abschluss der Versuche im Labor wurden Eisproben aus dem Versuchseis entnommen und die Druckfestigkeit des Versuchseises bestimmt. Der theoretische Ansatz nach russischen Normen verwendet als Eingangsgröße die Biegezugfestigkeit des Eises, die sich aus der Druckfestigkeit bestimmen lässt. Die Ergebnisse der Laborversuche lassen sich bei Verwendung der entsprechenden Biegefestigkeit mit dem Ansatz nach russischen Normen abbilden.

Für praktische Anwendungen wird der Berechnungsansatz nach russischen Normen empfohlen. Als Eingangsgrößen dienen dabei in der Natur vorkommende Eisfestigkeiten, die aus dem Schrifttum (z.B. EAU) entnommen werden können. Der Berechnungsansatz wird detailliert in den Empfehlungen zur Bemessung von Bühnenpfählen dargestellt.

Nach statistischer Auswertung von Eisdaten aus dem BSH können regional differenzierte Bemessungseisdicken für die mecklenburgische Küste angegeben werden. Die Kombination von regionalen Bemessungseisdicken einerseits und vertikalen Eiskräften als Funktion der Eisdicke andererseits erlaubt die Berechnung von örtlichen Eishubkräften als Eingangsgröße für die Bemessung von Holzpfählen gegen Eishub.

Der Versuch der Extrapolation der Laboruntersuchungen auf Natur-Eisdicken mit Hilfe eines numerischen Modells ergab keine befriedigenden Ergebnisse.

### **6.3 Haltekräfte**

Um ein Versagen des Systems Pfahl-Boden zu vermeiden, müssen die Belastungen infolge von Seegang, Eis und Strömung durch die haltenden Kräfte kompensiert werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die in ihrem Zusammenwirken Pfahl-Haltekräfte in Abhängigkeit vom lokalen Baugrundaufbau am Pfahlstandort, der Einbindetiefe und dem Durchmesser des Pfahls liefern. Die durchgeführten Untersuchungen sind im Folgenden zusammengestellt:

In einem ersten Schritt wurde die im Archiv des StAUN vorliegende Baugrundinformation digitalisiert. Die dann folgende Erstellung eines Computerprogramms zur halbautomatischen Auswertung der erfassten Daten ermöglicht die Analyse der lokal anstehenden Schichtenfolge sowie deren räumlicher Verteilung.

Entgegen der ursprünglichen Planung wurden regionale bodenmechanische Kennwerte durch Drucksondierungen (CPT) in situ erfasst. Diese Feldversuche erlauben die Zuordnung von Bodenart und bodenmechanischem Verhalten und liefern so die Grundlage für bodenmechanische Berechnungen.

Durch Zugversuche wurden die unter bekanntem Baugrundaufbau und Einbindetiefe durch den Pfahl aufnehmbaren vertikalen Kräfte ermittelt. Die Ergebnisse dienen der Bewertung der zur Verfügung stehenden Berechnungsansätze. Für Sandböden aller Lagerungsdichten erweisen sich die erdstatischen Verfahren nach BENABENQ und PREGL

bis 4,5 m Einbindetiefe und die empirischen Ansätze nach SCHENCK und HERZOG als geeignet, die Tragfähigkeiten von Buhnenpfählen abzuschätzen. Für Böden mit stärkeren bindigen Anteilen können nur die Verfahren nach SCHENCK und HERZOG herangezogen werden.

Versuche, Integritätstests zur Sicherung der Ergebnisse der Zugversuche hinsichtlich der als Berechnungsgrundlage dienenden Pfahllänge zu nutzen, erbrachten vielversprechende Ergebnisse. Vor einer regelmäßigen Nutzung dieses Verfahrens ist jedoch eine Weiterentwicklung der eingesetzten Messtechnik erforderlich.

Für die Berechnung horizontaler Haltekkräfte wird, wie im Antrag vorgesehen, auf vorhandene Berechnungsansätze aus der Geotechnik zurückgegriffen.

Zur Abschätzung des Einflusses seegangsbedingter Pfahlschwingungen auf die Standsicherheit der Pfähle (Bodenverflüssigungseffekte) wurden Messungen des Porenwasserdrucks durchgeführt. Die Klärung des Zusammenhangs zwischen der durch die Seegangsbeanspruchung des Pfahls hervorgerufenen dynamischen Anregung des Baugrunds und dem dadurch hervorgerufenen Anstieg des Porenwasserdrucks erlaubt Aussagen über die Herabsetzung der effektiven Spannungen. Diese Herabsetzung bewirkt eine Reduzierung der Scherfestigkeit des Bodens, die im Extremfall bis zur vollständigen Verflüssigung des Bodens führt. Für den untersuchten Standort Zingst konnte bei Anregung des Versuchspfahls durch die in der Natur gemessenen Pfahlschwingungen eine vollständige Aufhebung der effektiven Spannungen bis in eine Tiefe von ca. 0,5 m unter Geländeoberkante nachgewiesen werden.

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen liegt ein ingenieurpraktisch anwendbarer Bemessungsansatz für die konstruktive Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau vor. Handlungsempfehlungen werden dem Staatlichen Amt Rostock, auf dessen Anregung die Untersuchungen durchgeführt wurden, unmittelbar gegeben. Der Ansatz soll auch in das entsprechende Schrifttum mit empfehlendem Charakter eingeführt werden.

Darüber hinaus liefern die Untersuchungen grundsätzliche Ergebnisse hinsichtlich der konstruktiven Bemessung von Pfählen und Pfahlreihen. Diese sind in allen Bereichen des Küstenwasserbaus, in denen Holzpfähle angewendet werden, nutzbar und umfassen beispielsweise hafenbauliche Fragestellungen ebenso wie Fragen des Küsten- und Hochwasserschutzes.

Die Ergebnisse des Vorhabens werden einer breiten Fachöffentlichkeit durch ein ergänzendes Dokument zum Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz bekannt gemacht. Daneben werden die Ergebnisse auch in die Arbeit der für die Bemessung von Bauwerken im Küstenwasserbau zuständigen Arbeitskreise wie z.B. dem Ausschuß für Küstenschutzwerke oder dem Arbeitsausschuß "Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) einfließen, in

denen Mitglieder der projektbearbeitenden Gruppe direkt bzw. beratend mitarbeiten. Die entsprechende praktische Verwertung der gewonnenen Ergebnisse ist somit gesichert.

Wirtschaftliche Effekte des Vorhabens ergeben sich aus der Möglichkeit, auf Basis der gewonnenen Ergebnisse zu einer im Vergleich mit der bisherige Vorgehensweise effizienteren Bemessung zu gelangen. Insbesondere im strandfernen Bereich kommt es nach den vorliegenden Ergebnissen zu einer Verkürzung der Pfähle, so dass durch Einsparungen bei Material- und Installationskosten ein Rückfluss von Geldern möglich wird.

Von besonderem Interesse sind die in Abschnitt 5.5 beschriebenen Untersuchungen zu schwingungsinduzierten Schwankungen des Porenwasserdrucks. Es wurden hier erstmals quantitative Beziehungen zwischen seegangserzeugten Bewegungen der untersuchten Struktur und dem Porenwasserdruck erarbeitet, die Aussagen über das schwingungsbedingte Risiko von Bodenverflüssigung ermöglichen. Hier eröffnet sich nach Auffassung der Bearbeiter ein vielversprechendes Feld für weitergehende Untersuchungen, da nach einer erfolgreichen Vertiefung der vorläufig nur ansatzweisen Erkenntnisse ein kostengünstiges Instrument zur Abschätzung des Risikos von Bodenverflüssigung vorläge.

## 7 Schrifttum

Blum, H. (1932): Wirtschaftliche Dalbenform und deren Berechnung.- Bautechnik 10

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (1998): Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen, Verlag Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

Deutsches Institut für Normung: DIN 52186: Prüfung von Holz, Biegeversuch, Ausgabe 1978 - 06

Frederking, R.; Karry, J. (1983): Effects of pile material and loading state on adhesive strength of pile in ice, Canadian Geotechnical Journal Vol. 20, S. 673-680

Gerasch, W.; Logemann, M; Schelling, W.( 1991): Großversuch an alten und neuen Holzdalben in Nord-Ostsee-Kanal, Bautechnik 68, Ernst und Sohn Verlag Berlin

Kempfert, H.-G. (1989): Dimensionierung kurzer, horizontal belasteter Pfähle.- Bauingenieur 64, 201 – 207

Köhler, H. J. (1996): Porenwasserdruckausbreitung im Boden – Messverfahren und Berechnungsansätze, Messen in der Geotechnik 1996, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

Koslowski, G. and Glaser, R. (1999): Variations in reconstructed ice winter severity in the western Baltic from 1501 to 1995, and their implications for the north atlantic oscillation.- Climatic Change 41, 175 – 191

Longuet-Higgins, M.S. (1952): On the statistical distribution of Heights of Sea Waves.- Journal of Marine Research, Vol. 11, No. 3, 1952

Ministerium Russlands (1995): Bautechnische Normen und Regeln – Belastung und Einflüsse aus Wellen, Eis und von Schiffen auf hydrotechnische Anlagen, übersetzt, Moskau

Perau, E.; Potthoff, S. (2002): Das Messen von Fluiddrücken in gesättigten und teilgesättigten Böden, Messen in der Geotechnik 2002, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, S. 383-398

Schmelzer, N. (1994): Die Eisverhältnisse in den Küstengebieten von Mecklenburg-Vorpommern.- Die Küste, 56/1994, 61 – 65, Heide i. Holstein

Schmelzer, N. (2004): 100 years of ice observations on the german baltic sea coast.- Proc. 17<sup>th</sup> Int. Symp. on Ice, Volume 2, 24 - 32, St. Petersburg, Russia, 21. – 25 June 2004

Smoltczyk, U. (ed.) (2001): Grundbautaschenbuch, Teil 3: Gründungen.- 733 S., Berlin

Studer, J. A.; Koller, M. G. (1997): Bodendynamik, Springer Verlag, Berlin

Triantafyllidis, T. (1998): Neue Erkenntnisse aus Messungen an tiefen Baugruben am Potsdamer Platz Berlin, Bautechnik 75, Ernst und Sohn Verlag Berlin

Triantafyllidis, T. (2003): Bodenverflüssigung infolge zyklischer Belastung, GeoLex 2.03, Koneon Verlag Bad Salzuflen

Weissenbach, A. (1962): Der Erdwiderstand vor schmalen Druckflächen.- Die Bautechnik, Heft 6 / 1962

Wienke, Jan (2001): Druckschlagbelastung auf schlanke zylindrische Bauwerke durch brechende Wellen, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

## **Kapitel 2: Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Im Projekt wurden direkt Fragestellungen aus der küstenwasserbaulichen Praxis aufgegriffen. Ziel des Vorhabens war es, die Dimensionierung von Holzpfählen im Küstenwasserbau von der Anwendung rein empirischer Faustformeln auf eine natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlage zu stellen. Dies war insbesondere deswegen erforderlich, um eine unwirtschaftliche Bemessung von Pfählen zu vermeiden. Als Ergebnis liegt ein ingenieurpraktisch anwendbarer Bemessungsansatz für die konstruktive Bemessung von Holzpfählen vor. Handlungsempfehlungen werden dem Staatlichen Amt Rostock, auf dessen Anregung die Untersuchungen durchgeführt wurden, unmittelbar gegeben. Der Ansatz soll auch in das entsprechende Schrifttum mit empfehlendem Charakter eingeführt werden.

Darüber hinaus liefern die Untersuchungen grundsätzliche Ergebnisse hinsichtlich der konstruktiven Bemessung von Pfählen und Pfahlreihen. Diese sind in allen Bereichen des Küstenwasserbaus, in denen Holzpfähle angewendet werden, nutzbar und umfassen beispielsweise hafengebäudebauliche Fragestellungen ebenso wie Fragen des Küsten- und Hochwasserschutzes.

Das Interesse der für den Küstenschutz zuständigen Verwaltung an den durchgeführten Untersuchungen wurde durch eine erhebliche finanzielle und logistische Unterstützung belegt. Das Land erhält aus dem Vorhaben direkte Antworten auf konkrete Fragestellungen, in Form eines ingenieurpraktischen Bemessungsansatzes insbesondere bezüglich der konstruktiven Bemessung von Pfahlreihen und Bühnen.

Die Ergebnisse des Vorhabens werden einer breiten Fachöffentlichkeit durch ein ergänzendes Dokument zum Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz bekannt gemacht. Daneben werden die Ergebnisse auch in die Arbeit der für die Bemessung von Bauwerken im Küstenwasserbau zuständigen Arbeitskreise wie z.B. dem Ausschuss für Küstenschutzwerke oder dem Arbeitsausschuss "Ufereinfassungen" der Hafentechnischen Gesellschaft (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) einfließen, in denen Mitglieder der projektbearbeitenden Gruppe direkt bzw. beratend mitarbeiten. Die entsprechende praktische Verwertung der gewonnenen Ergebnisse ist somit gesichert.

Wirtschaftliche Effekte des Vorhabens ergeben sich aus der Möglichkeit, auf Basis der gewonnenen Ergebnisse zu einer im Vergleich mit der bisherigen Vorgehensweise effizienteren Bemessung zu gelangen. Insbesondere im strandfernen Bereich kommt es nach den vorliegenden Ergebnissen zu einer Verkürzung der Pfähle, so dass durch Einsparungen bei Material- und Installationskosten ein Rückfluss von Geldern möglich wird.

Eine direkte Beurteilung der wirtschaftlichen Effekte wird z.Zt. exemplarisch bei einer Vergleichsbemessung des Bühnenbauprojekts Wustrow (Fischland) nach herkömmlichem und neu entwickeltem Verfahren durchgeführt. Nach Abschluß dieser Arbeiten im Frühjahr 2006 sind konkrete Aussagen zu der durch das Vorhaben bewirkten Effizienzsteigerung zu erwarten.

### **Kapitel 3: Untersuchungen und Ergebnisse Dritter**

Die durchgeführten Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit fortlaufend auf nationalen und internationalen Fachkonferenzen vorgestellt (vgl. Abschnitt II.4). Dabei wurden auch die Ergebnisse Dritter mit Interesse verfolgt, eigene und fremde Arbeiten und Ergebnisse wurden intensiv diskutiert.

Den Bearbeitern sind während der genannten Diskussionen und bei der Auswertung der verfügbaren Literatur in den Jahren 2001 – 2005 keine Untersuchungen zu Kenntnis gelangt, die sich mit der Frage der konstruktiven Bemessung von Holzpfahl-Bauwerken im Küstenwasserbau beschäftigen.

Untersuchungen zu Teilaspekten des Vorhabens (z.B. Wellenlasten auf Pfähle, Verhalten des Baugrundes unter zyklischer oder dynamischer Belastung) werden z.Zt., insbesondere unter Eindruck der geplanten Offshore-Nutzung von Windenergie und den damit verbundenen Problemen von Lasten und Haltekraften, an zahlreichen Instituten durchgeführt. Innerhalb Deutschlands sind dies z.B.:

- Arbeitsbereich Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg-Harburg
- Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen
- Franzius Institut für Wasserbau, Universität Hannover
- Großer Wellenkanal, Forschungszentrum Küste, Hannover
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig
- Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr Universität Bochum
- Leichtweiß Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig

## Kapitel 4: Erfolge und geplante Veröffentlichungen

### Erfolgte Veröffentlichungen

- WEICHBRODT, F., **Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau**  
DEDE, C.,  
RADOMSKI, J., „KFKI-aktuell“ - Mitteilungen des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen, Hamburg, 2005  
KOHLHASE, S.
- WEICHBRODT, F., **Untersuchungen zu Bodenverflüssigungseffekten infolge seegangsinduzierter Pfahlschwingungen**  
DEDE, C.,  
RADOMSKI, J., Tagungsband HTG-Kongress 2005, Bremen  
KOHLHASE, S.
- WEICHBRODT, F. **Ermittlung von Eingangsdaten zur Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau**  
Wettbewerbsbeitrag „Friedrich-Böck-Förderpreis“ der Stiftung Deutscher Küstenschutz / Der Beitrag wurde 2004 mit dem Förderpreis ausgezeichnet und ist auf der Internet-Seite der SDK veröffentlicht.
- WEICHBRODT, F. **Untersuchungen zur Bodenverflüssigung im Umfeld seegangsbelasteter Bühnenpfähle**  
DEDE, C.  
RADOMSKI, J. Rostocker Berichte aus dem Institut für Bauingenieurwesen, Heft 13, Rostock, Oktober 2004  
KOHLHASE, S.
- WEICHBRODT, F. **Investigation of Input Data for the Dimensioning of Groyne Piles**  
DEDE, C.  
RADOMSKI, J. 29th International Conference On Coastal Engineering, Lissabon, Portugal, 19.24. September 2004  
KOHLHASE, S.
- WEICHBRODT, F. **Experimental Investigations of Vertical Ice Loads on Piles**  
DEDE, C. Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Symposium on Ice, IAHR, Saint Petersburg, Russia, 21.-25. Juni 2004  
RADOMSKI, J.  
KOHLHASE, S.
- DEDE, C. **Dimensioning Wooden Piles in Coastal Engineering Referring to Wave-Induced Pile Movements and Ice-Jacking**  
WEICHBRODT, F.  
RADOMSKI, J. Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries – COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, 2003.  
KOHLASE, S.
- DEDE, C. **Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau**  
KOHLHASE, S.  
WEICHBRODT, C. 14. Tagung für Ingenieurgeologie, Kiel 2003

DEDE, C.	<b>Research on Wooden Pile Constructions</b>
KOHLHASE, S.	Proc. First German-Chinese Joint Seminar on Coastal and Ocean Engineering, Rostock 2002.
WEICHBRODT, F.	
KOHLHASE, S.	<b>Buhnen zum Schutz von Erosionsküsten</b>
	Traditio et Innovatio, Heft 2, Rostock 2001

### Geplante Veröffentlichungen

Für die näheren Zukunft ist die Veröffentlichung einer Zusammenfassung der erzielten Projektergebnisse in "Die Küste" Archiv für Forschung und Technik an der Nord- und Ostsee vorgesehen. Ausgewählte Fragestellungen werden im Rahmen einer Dissertation vertieft behandelt.

### Besuchte Konferenzen

- First German-Chinese Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, April 10th to 19<sup>th</sup> 2002, Universität Rostock, Institut für Wasserbau
- Die Bohrmuschel im Hafenbetrieb und Küstenschutz, - Schäden, Nachweis, Prävention -Mittwoch, 24.04.2002 Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven
- Kolloquium des Institutes für Maritime Systeme und Strömungstechnik, 24.10.2002, Universität Rostock
- Pfahlsymposium 2003, 20./21. Februar 2003, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig
- 14. Tagung für Ingenieurgeologie, 26. bis 29. März 2003, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, 15<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup> September 2003, Colombo, Sri Lanka
- International Conference on cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena, 31 March – 02 April 2004, Bochum
- 17<sup>th</sup> International Symposium on Ice, 21 to 25 June 2004, St. Petersburg, Russia
- 29th International Conference on Coastal Engineering, 19. – 24 September 2004, Lissabon, Portugal
- Pfahlsymposium 2005, 24./25. Februar 2005, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

## **Forschungsvorhaben**

### **"Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau"**

<b>Projektlaufzeit:</b>	<b>Juli 2001 – Juni 2005</b>
<b>gefördert durch:</b>	<b>Bundesministerium für Bildung und Forschung</b>
<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>03KIS023</b>
<b>Projektträger:</b>	<b>Forschungszentrum Jülich GmbH Projektträger Jülich</b>
<b>Projektpartner:</b>	<b>Staatliches Amt für Umwelt und Natur Rostock</b>
<b>Projektdurchführung:</b>	<b>Universität Rostock Fachbereich Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau</b>

**Rostock, Dezember 2005**

Prof. Dr.-Ing. habil. Sören Kohlhase

Dr. rer. nat. Christian Dede

Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt

# Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau  
Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhasse



---

## **Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holz- pfählen im Küstenwasserbau**

**Förderkennzeichen: 03KIS023**

**Schlussbericht, Teil II  
nach BNBest-BMBF 98**

**ANHANG**

**Rostock, Dezember 2005**

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhasse  
Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Dede  
Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt  
Dipl.-Ing. Jörg Radomski

## **ANHANG**

Anhang 1 : GeoCon - Programmbeschreibung

Anhang 2 : Pfahlbewegungen als Funktion von Wellenhöhen und Wasserständen

## **ANHANG 1: GeoCon - Programmbeschreibung**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde nach einer Möglichkeit gesucht, die ermittelten Bohrdaten zu laden und übersichtlich anzeigen zu können. Da eine Software mit diesen Eigenschaften nicht verfügbar war, bestand die Notwendigkeit, ein eigenes Programmpaket zu entwickeln. Als Ergebnis entstand die Software GeoCon. Ergänzend zu den im Bericht genannten Programmeigenschaften werden im folgenden die Möglichkeiten der entwickelten Software aufgeführt.

Mit GeoCon ist möglich, Bohrdaten des Aufschlusses GLA Mecklenburg-Vorpommern (SSGMVPST) zu laden und zu übersichtlich anzuzeigen. Die Daten werden in Form von Access-Datenbanken (.mdb) importiert und intern über eine SQL-Schnittstelle verarbeitet und aufbereitet. Die Verwendung einer SQL-Schnittstelle ermöglicht es ferner, bei Bedarf Schnittstellen zu weiteren Datenformaten zur Verfügung zu stellen.

Die ausgelesenen Bohrungen werden anhand ihrer Gauß-Krüger-Koordinaten auf einer Übersichtskarte angezeigt. Die Karte verwendet eine Ebenen-Technik (Layer), d.h. die Daten werden in verschiedenen Ebenen geladen und können individuell ein und ausgeblendet werden. Die Anzeige ist maßstabsgetreu, verfügt über ein automatisches Kartenraster, eine eingeblendete Maßstabsanzeige sowie ein Kilometerlineal. Der Maßstab der Anzeige kann weiterhin beliebig geändert werden, die Koordinaten können jederzeit als Gauß-Krüger-/ sowie als GPS-Koordinaten abgelesen werden.

Um eine durchgehende Darstellung der Bohrungen über die Meridianstreifen 2 und 3 des Gauß-Krüger-Koordinatensystems zu ermöglichen, verfügt das Programm weiterhin über eine Koordinatentransformation, die Koordinaten des Streifens 2 werden hierbei auf den Streifen 3 umgerechnet.

Diese Transformation funktioniert nicht nur für Bohrkoordinaten, sondern auch gleichzeitig für alle geladenen ArcView-Shape-Dateien. Hierdurch kann z.B. der gesamte Küstenbereich von Mecklenburg-Vorpommern lückenlos dargestellt werden.

Zusätzlich zur Anzeige der Position der Bohrungen können aus der Datenbank jederzeit die zugehörigen Tiefeninformationen und Bodendaten geladen werden. Die Darstellung des Bohrprofils erfolgt in einem separaten Fenster, ist vollständig zoombar und entspricht direkt der Druckausgabe.

Die Farbdarstellung und das Höhenlineal sind ein- und ausblendbar. Alle im Formulkopf eingegebenen Daten werden für jeden Nutzer separat abgespeichert und dadurch sich wiederholende Eingaben minimiert.

Die Bohrprofilardarstellung kann sowohl ausgedruckt als auch als Bild (Bitmap, JPEG) exportiert werden.

Als Erweiterung der Profildatenerstellung verfügt das Programm über eine halbautomatische Profilschnitterstellung.

Der Algorithmus der Software generiert automatisch einen Profilschnitt, die Berechnung kann über den einstellbaren Parameter Multirange gesteuert werden. Der Vorschlag für den Profilschnitt kann über einen Edit-Modus, der einem einfachen Zeichenprogramm entspricht, korrigiert und bearbeitet werden. Zur einfacheren Bearbeitung des Schnitts werden dem Nutzer Hilfspunkte vorgeschlagen, so dass der Zeitaufwand für eine Korrektur minimal ist. Der Aufbau und die Funktionalität der Anzeige des Profilschnitts entsprechen der Schichtdarstellung, d.h. es können auch hier die Maßstäbe eingeblendet werden, der Formulkopf wird zwischengespeichert usw.

Eine vollständige Auflistung aller Features der Software GeoCon ist nachfolgend aufgeführt.

#### **GeoCon Programmfeatures:**

- Laden und Auswertung von Bohrdaten des Aufschlusstyps SSGMVPST (Aufschluss GLA Mecklenburg-Vorpommern, SEP3) in Form von Access-Datenbanken (.mdb)
- Integrierte Bohrprofil-Erstellung (durch Doppelklick in Karte)
- Integrierte Profilschnitterstellung (durch Verbinden von 2 Bohrungen in der Karte)
- Einfaches und intuitives Programmlayout (Drag-n-Drop, direkte Kartenbearbeitung)
- Maßstabsgetreue Anzeige der Bohrdaten mit automatisches Kartenraster und farblicher Hervorhebung der Meridianstreifen
- Möglichkeit der automatischen Anpassung der Bohrkoordinaten und Wechseln des Meridianstreifens (ermöglicht die durchgehende Anzeige von Bohrungen im Meridian 2 und 3 des Gauß-Krüger-Koordinatensystems, 6 Grad Meridianstreifenbreite)
- Anzeige der Kartenkoordinaten in Gauß-Krüger-Koordinaten als auch in GPS-Koordinaten (Abweichung +/- 1m)
- Laden und Anzeige von ArcView-Shape-Dateien (Punkte/Arcus/Polygone)
- Export der optimierten Bohrdaten (Auswahl der für eine Anzeige notwendigen Daten) ins dBase- Format (dieses kann dann direkt in ArcView geladen werden)
- Layer-Technik (Ein-/ und ausblendbare Ebenen)
- Vollständig Zoom und Scrollbare Anzeige für Bohrdaten und Shapes
- Direkt-Zoom auf Bohrdaten
- Anzeige des Kartenmaßstabs sowie automatisches Kilometerlineal (ausblendbar)
- Alle Übersichten druckbar

- IntelliShapeColor - Farben der Shapes werden anhand des Dateinamens für jeden User separat gespeichert (d.h. das Programm merkt sich die Farbeinstellung für jeden Shape)
- Möglichkeit zur Zentrierung der Anzeige auf Koordinaten/Name der Bohrung/ID der Bohrung
- Anzeige der Häufigkeit des Vorkommens verschiedener Schichten

#### **Integrierte Bohrprofil-Erstellung:**

- Vollautomatische Erstellung des Bohrprofils und Anzeige in separaten Fenster
- Anzeige des Formulars entspricht Druckausgabe (WYSIWYG)
- Vollständig zoombare Darstellung
- Ein-/ausschaltbare Farbdarstellung
- Ein-/ausblendbare Maßstabsanzeige
- Automatisches Eintragen von Datum und Maßstab in das Formular (abschaltbar)
- Daten des Formulkopfs werden separat für jeden User abgespeichert (keine ständige Neueingabe erforderlich)

#### **Integrierte Profilschnitterstellung:**

- Halbautomatische Profilschnitterstellung (Anpassung über Parameter) mit manueller Korrekturmöglichkeit
- Edit-Modus zur Korrektur des Profilschnitts (Einzeichnen und Entfernen von Verbindungen)
- Anzeige des Formulars entspricht Druckausgabe (WYSIWYG)
- Hervorhebung der Verbindungslinien zur einfachen Bearbeitung
- Ein-/ausschaltbare Farbdarstellung
- Ein-/ausblendbare Maßstabsanzeige
- Anzeige des Höhenmaßstabs/ Höhenlineal
- Anzeige des Entfernung zwischen den Bohrungen
- Automatisches Eintragen von Datum und Maßstab in das Formular (abschaltbar)
- Daten des Formulkopfs werden separat für jeden Nutzer abgespeichert (keine ständige Neueingabe erforderlich)

## ANHANG 2: Pfahlbewegungen als Funktion von Wellenhöhen und Wasserständen

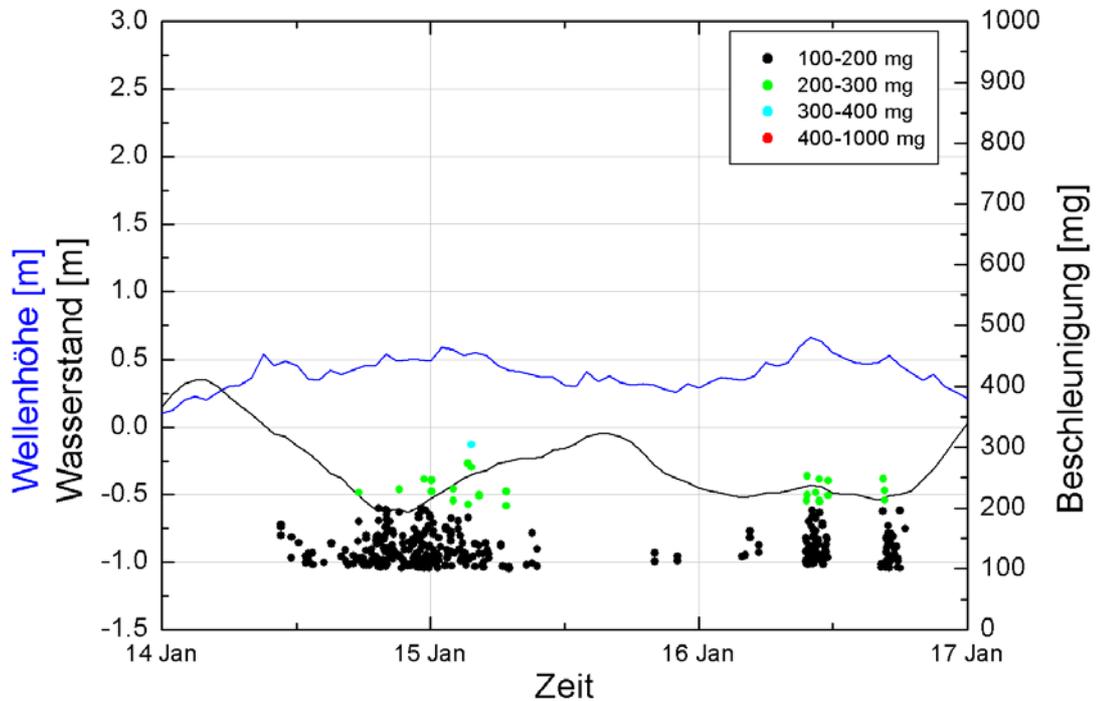


Abbildung 1: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 41 in Markgrafenheide, Januar 2003

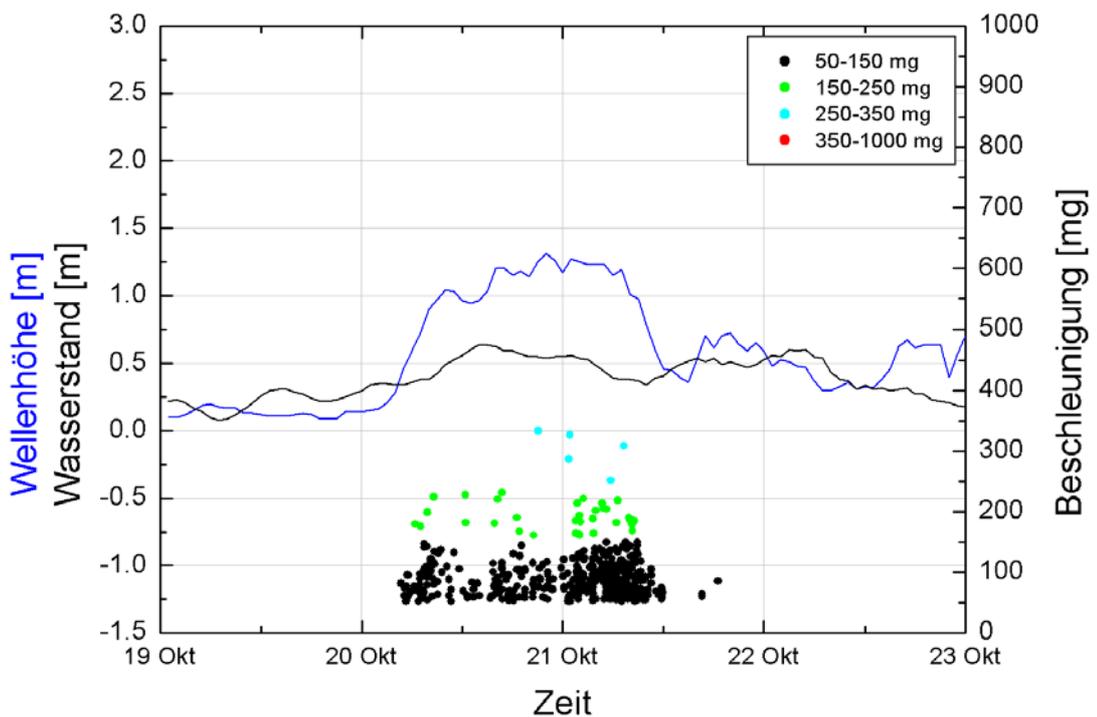


Abbildung 2: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 19 in Heiligendam, Oktober 2003

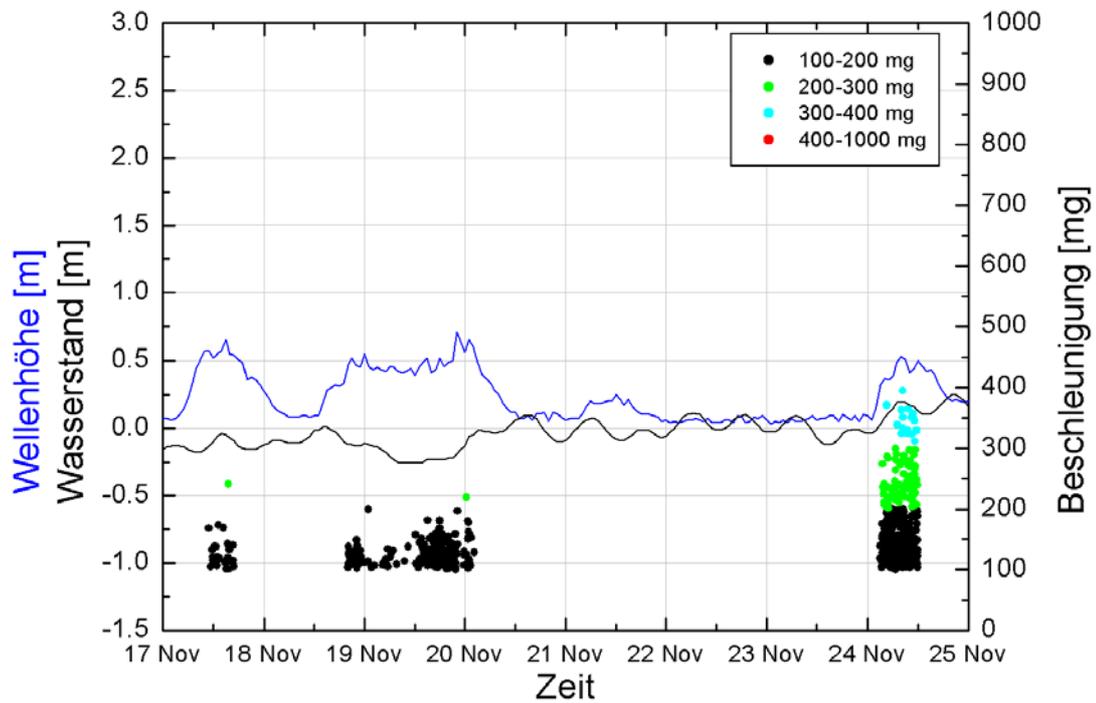


Abbildung 3: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 33 in Heiligendamm, November 2003

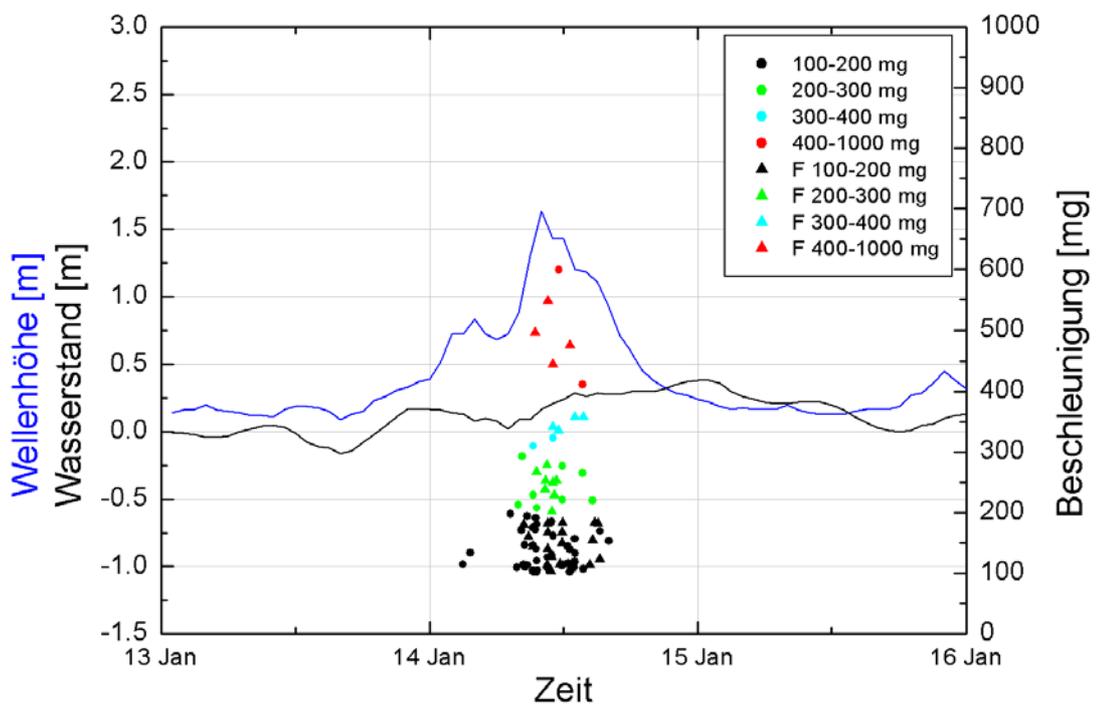


Abbildung 4: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 19 in Heiligendamm, Januar 2004

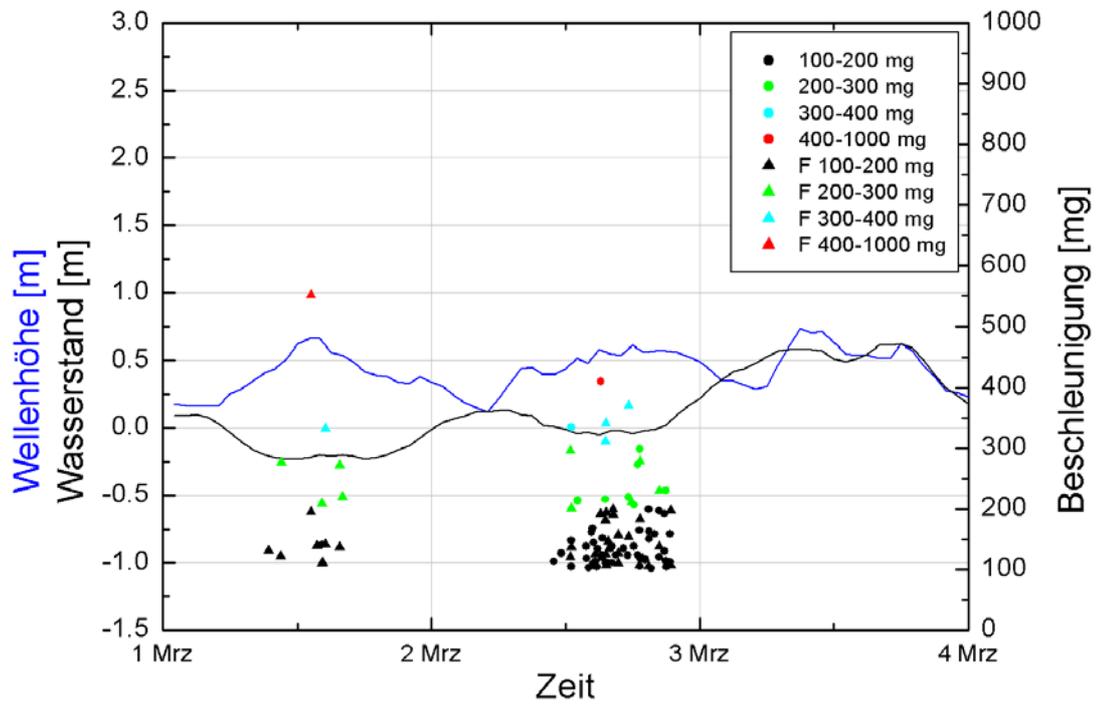


Abbildung 5: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 19 in Heiligendamm, März 2004

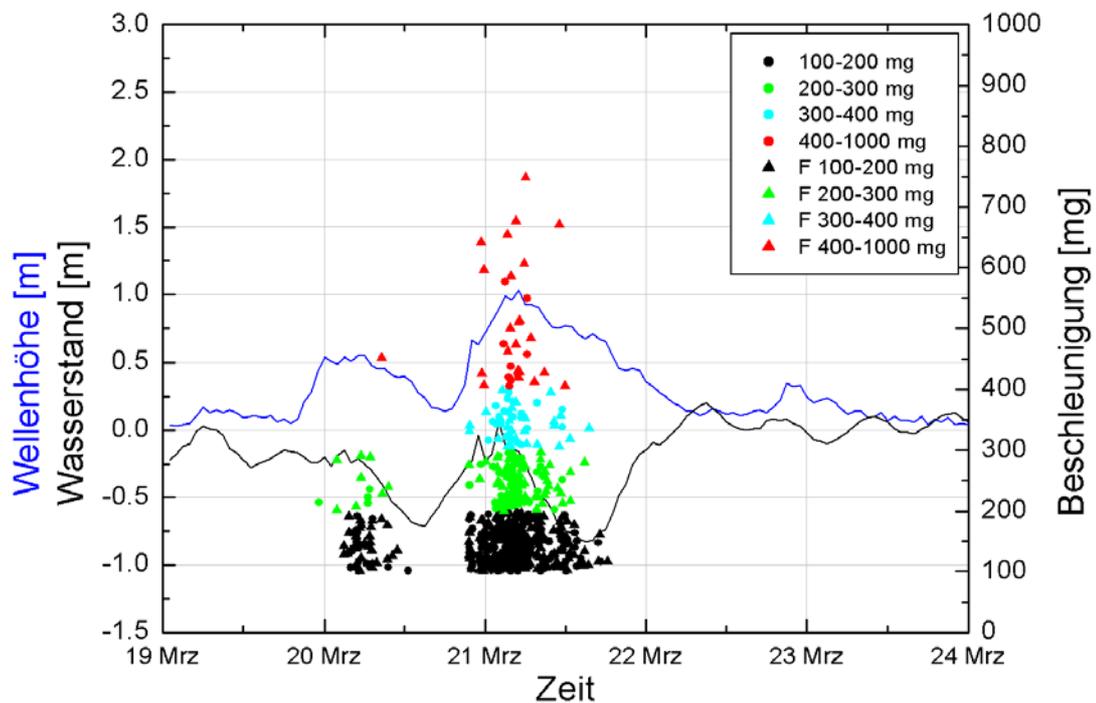


Abbildung 6: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 19 in Heiligendamm, März 2004

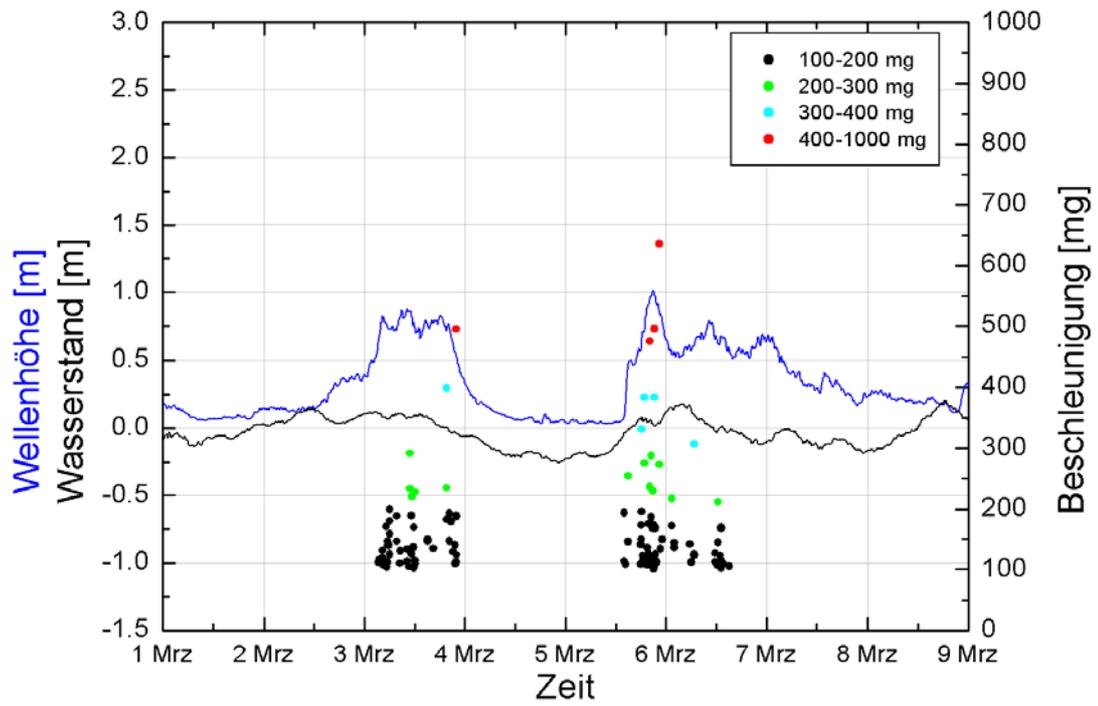


Abbildung 7: Pfahlbewegungen, Wellenhöhen und Wasserstand an der Buhne 64 in Zingst, März 2005

# Universität Rostock

Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau  
Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase



---

## **Buhnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holz- pfählen im Küstenwasserbau**

**Förderkennzeichen: 03KIS023**

**Schlussbericht**

**nach BNBest-BMBF 98**

**Teil III: Erfolgskontrollbericht**

**Rostock, Dezember 2005**

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Sören Kohlhase  
Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Dede  
Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt  
Dipl.-Ing. Jörg Radomski

### III Erfolgskontrollbericht

III.1 Beitrag des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen.....	3
III.2 Wissenschaftlich - technisches Ergebnis des Vorhabens.....	3
Lastfall Seegang.....	4
Lastfall Eis.....	4
Haltekräfte.....	6
III.3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	7
III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	8
Auswertung von Rammdaten.....	8
Tachymetrische Vermessung von Kolken.....	9
Tachymetrische Vermessung zur Erfassung von Eishub in der Natur.....	10
Digitale Baugrundkarte.....	11
III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	13
III.6 Einhaltung der Zeit- und Ausgabenplanung.....	14

### **III.1 Beitrag des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen**

Ziel des mit dem vorliegenden Bericht abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die Bestimmung der notwendigen Einspannlänge von Bühnenpfählen auf natur- und ingenieurwissenschaftlicher Grundlage abhängig von der wirkenden Belastung, vom Standort, den Baugrundeigenschaften, der Wassertiefe und der Position des Pfahls in der Pfahlreihe. Dazu war es notwendig, alle am System Holzpfahl - Baugrund auftretenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen und zu bewerten.

Das Vorhaben wurde über das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) beantragt und unter dem Förderkennzeichen 03KIS023 am 14.05.2001 bewilligt.

Die förderpolitischen Ziele des KFKI sind im „Forschungskonzept für das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen 2001“ niedergelegt. Darin heißt es im Abschnitt „Bauwerksbemessung und –optimierung“:

Die Bemessung von Schutzbauwerken hängt maßgeblich von der Belastung, ihrer Form und den Eigenschaften des Baustoffs ... ab. Eine unter Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsaspekten vorzunehmende Optimierung erfordert bessere Kenntnisse über die Belastung im Nahbereich und die Reaktion des Materials. Eine Optimierung ist im Hinblick auf den wirtschaftlichen Einsatz öffentlicher Mittel ... dringend erforderlich.

Das Vorhaben "Bühnenbau: Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau" erfüllt die genannten förderpolitischen Ziele des KFKI unter allen genannten Gesichtspunkten, d.h. sowohl hinsichtlich der Untersuchungsschwerpunkte (äußere Einwirkungen und Bauwerksreaktion), als auch hinsichtlich der mit den Untersuchungen verbundenen Zielsetzung (Optimierung im Hinblick auf den wirtschaftlichen Einsatz öffentlicher Mittel).

### **III.2 Wissenschaftlich - technisches Ergebnis des Vorhabens**

Zum Erreichen der o.g. Zielsetzung war es erforderlich, alle am System Holzpfahl – Boden angreifenden treibenden und haltenden, statischen und dynamischen Kräfte zu erfassen, zu bewerten und in ihrer Wirkung zu quantifizieren.

Die Pfähle werden im Wesentlichen durch Seegang, Strömungen und Eiskräfte beansprucht (treibende Kräfte). Die Haltekräfte sind von den Eigenschaften des Bodens, der Art der Beanspruchung (horizontal, vertikal, statisch, dynamisch), den Pfahleigenschaften und der Einspannlänge im Boden abhängig. Die wirksamen Beanspruchungen (Lastfall Seegang, Lastfall Eis) und Haltekräfte wurden im Forschungsvorhaben theoretisch und experimentell untersucht.

Die einzelnen Untersuchungsschwerpunkte des Vorhabens sowie die darin erzielten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst. Für eine ausführliche Darstellung wird auf den Schlussbericht (Teil II, Kapitel 1) verwiesen.

### **Lastfall Seegang**

Im Untersuchungsprogramm zum Lastfall Seegang wurden Seegang, seegangsinduzierte Pfahlbewegungen von Bühnenpfählen und die Randbedingungen an den Versuchspfählen erfasst. Es wurden Vorversuche im Labor und in der Natur zur Auswahl einer geeigneten Mess- und Installationstechnik durchgeführt. An 4 Standorten mit unterschiedlichen Baugrundeigenschaften an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns wurden Seegangparameter, Pfahlbeschleunigungen und Randbedingungen kontinuierlich erfasst. Die Einbindelänge, Wassertiefe und Position der Versuchspfähle in der Bühnenreihe wurde variiert. Durch die zeitgleiche Messung von Belastung (Seegang) und Pfahlreaktion (Beschleunigung) konnte auf den Zusammenhang zwischen Belastung und Pfahlreaktion geschlossen werden. Die wichtigsten Erkenntnisse werden im Folgenden stichpunktartig dargelegt:

- Pfahlschwingungen treten nur bei Belastung durch brechende Wellen auf
- Relevante Pfahlschwingungen  $a > 100$  mg treten nur bei bestimmten Kombinationen von Wellenhöhe und Wasserstand auf (Für ihre Abschätzung wurde ein Diagramm entwickelt)
- Schwingungsfrequenzen liegen in einem Bereich, in dem Bodenverflüssigungseffekte infolge dynamischer Belastung des Baugrunds auftreten können
- in sandigem Baugrund wurden die Pfahlschwingungen bis in den Boden hinein nachgewiesen
- die Schwingungsdauer kann sich durch Übertragung der Schwingungen der Nachbarpfähle auf den betrachteten Pfahl deutlich verlängern
- die max. gemessenen Beschleunigungswerte liegen für Pfähle innerhalb der Bühnenreihe bei  $a = 850$  und für Kopfpfähle bei  $a = 1060$
- die ermittelten Bewegungsamplituden betragen am Pfahlkopf einige Millimeter und im Boden einige Zehntelmmillimeter

Nach Abschluss der Untersuchungen im Vorhaben zum Lastfall Seegang stehen Seegangparameter sowie Schwingfrequenz, -dauer und Bewegungsamplitude von Bühnenpfählen als Eingangsdaten für die Bemessung, insbesondere zur Abschätzung von Bodenverflüssigungseffekten zur Verfügung.

### **Lastfall Eis**

Vertikale Eiskräfte auf Pfähle entstehen durch Festfrieren einer geschlossenen Eiskecke am Pfahl und nachfolgender Änderung des Wasserstandes. Bei steigenden Wasserständen entstehen aufwärts gerichtete Vertikalkräfte. Da zur Bestimmung der Einspannlänge

von Bühnenpfählen die Bestimmung vertikaler Eislasten auf Bühnenpfähle als Belastungsgröße notwendig ist, wurde ein Untersuchungsprogramm zur Ermittlung vertikaler Eislasten auf Holzpfähle entwickelt. Eiswinter treten an der deutschen Ostseeküste nicht jedes Jahr auf und sind nicht vorhersagbar. Deshalb wurde die Belastung von Holzpfählen durch vertikale Eiskräfte im Labor untersucht.

Die im Labor gemessenen Vertikalkräfte, die von einer geschlossenen Eisdecke auf einen Versuchspfahl übertragen wurden, sind insbesondere bei größerer Eisdicke höher als die nach den Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU) ermittelten Eiskräfte. Die den Berechnungen der EAU 2004 zu Grunde liegende physikalische Annahme, dass der Auftrieb einer festgefrorenen Eisplatte die Ursache der auftretenden Zugkräfte am Pfahl darstellt, kann lediglich als Grundlage für die Berechnung von Eiskräften aus einer gebrochenen Eisdecke, von der Teile an Pfählen festgefroren sind, verwendet werden. Derartige Belastungen sind jedoch für eine Bemessung von Holzpfählen in Küstenabschnitten, in denen geschlossene Eisdecken auftreten können, nicht maßgebend.

Ein Versagen des Systems Holzpfehl-Eisdecke trat bei den durchgeführten Laborversuchen unter Einwirkung des hydraulischen Potentials des ansteigenden Wasserspiegels durch Überschreitung der Biegezugfestigkeit des Eises außerhalb der Kontaktfläche Pfahl – Eis auf.

Die im Labor ermittelten vertikale Eislasten auf einen Holzpfehl wurden mit den Berechnungsansätzen nach EAU, nach russischen Normen (Ministerium Russlands 1995) und dem empirischen Ansatz nach Kusnezow verglichen. Der theoretische Ansatz nach russischen Normen verwendet als Eingangsgröße die Biegezugfestigkeit, die sich näherungsweise aus der Druckfestigkeit bestimmen lässt. Die Ergebnisse der Laborversuche lassen sich bei Verwendung der entsprechenden Biegezugfestigkeit mit dem Ansatz nach russischen Normen abbilden. Für geringere Druckfestigkeits- / Biegezugfestigkeitswerte ergibt der Berechnungsansatz der russischen Normen ähnliche Ergebnisse wie der empirische Ansatz nach Kusnezow. Ergebnisse, die der Berechnungsansatz nach EAU liefert, konnten durch die Laborversuche nicht bestätigt werden.

Für praktische Anwendungen wird der Berechnungsansatz nach russischen Normen empfohlen. Zu verwenden sind in der Natur vorkommende Eisfestigkeiten, die aus dem Schrifttum (z.B. EAU) entnommen werden können. Der Berechnungsansatz wird detailliert in den Empfehlungen zur Bemessung von Bühnenpfählen dargestellt.

Nach statistischer Auswertung von Eisdaten aus dem BSH können regional differenzierte Bemessungseisdicken für die mecklenburgische Küste angegeben werden. Die Kombination von regionalen Bemessungseisdicken einerseits und vertikalen Eiskräften als Funktion der Eisdicke andererseits erlaubt die Berechnung von örtlichen Eishubkräften als Eingangsgröße für die Bemessung von Holzpfählen gegen Eishub.

Der Versuch der Extrapolation der Laboruntersuchungen auf Natur-Eisdicken mit Hilfe eines numerischen Modells ergab keine befriedigenden Ergebnisse.

### **Haltekräfte**

Um ein Versagen des Systems Pfahl-Boden zu vermeiden, müssen die Belastungen infolge Seegang, Eis und Strömung durch die haltenden Kräfte kompensiert werden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, die in ihrem Zusammenwirken Pfahl-Haltekräfte in Abhängigkeit vom lokalen Baugrundaufbau am Pfahlstandort, der Einbindetiefe und dem Durchmesser des Pfahls liefern. Die durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse sind im Folgenden zusammengestellt:

In einem ersten Schritt wurde die im Archiv des StAUN vorliegende Baugrundinformation digitalisiert. Die dann folgende Erstellung eines Computerprogramms zur halbautomatischen Auswertung der erfassten Daten ermöglicht die Analyse der lokal anstehenden Schichtenfolge sowie deren räumlicher Verteilung.

Eine Entnahme von ungestörten Proben zur Durchführung bodenmechanischer Laborversuche erwies sich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln als technisch nicht machbar. Entgegen der ursprünglichen Planung wurden regionale bodenmechanische Kennwerte deshalb durch Drucksondierungen (CPT) in situ erfasst. Diese Feldversuche erlauben die Zuordnung von Bodenart und bodenmechanischem Verhalten und liefern so die Grundlage für bodenmechanische Berechnungen.

Durch Zugversuche wurden die unter bekanntem Baugrundaufbau und Einbindetiefe durch den Pfahl aufnehmbaren vertikalen Kräfte ermittelt. Die Ergebnisse dienen der Bewertung der zur Verfügung stehenden Berechnungsansätze. Die Ergebnisse der Zugversuche wurden mit den Ergebnissen von 14 bekannten Berechnungsansätzen verglichen. Für Sandböden aller Lagerungsdichten erweisen sich die erdstatischen Verfahren nach BENABENQ und PREGL bis 4,5 m Einbindetiefe des Pfahls und die empirischen Ansätze nach SCHENCK und HERZOG als geeignet, die Tragfähigkeiten von Bühnenpfählen abzuschätzen. Für Böden mit stärkeren bindigen Anteilen können nur die Verfahren nach SCHENCK und HERZOG herangezogen werden.

Versuche, Integritätstests zur Bestimmung der Einbindelänge von bestehenden Pfählen hinsichtlich der als Berechnungsgrundlage dienenden Pfahllänge zu nutzen, erbrachten vielversprechende Ergebnisse. Vor einer regelmäßigen Nutzung dieses Verfahrens ist jedoch eine Weiterentwicklung der eingesetzten Messtechnik erforderlich.

Für die Berechnung horizontaler Haltekräfte wird, wie im Antrag vorgesehen, auf vorhandene Berechnungsansätze aus der Geotechnik zurückgegriffen.

Zur Abschätzung des Einflusses seegangsbedingter Pfahlschwingungen auf die Standsicherheit der Pfähle (Bodenverflüssigungseffekte) wurden Messungen des Porenwasserdrucks durchgeführt. Die Klärung des Zusammenhangs zwischen der durch die See-

gangsbeanspruchung des Pfahls hervorgerufenen dynamischen Anregung des Baugrunds und dem dadurch hervorgerufenen Anstieg des Porenwasserdrucks erlaubt Aussagen über die Herabsetzung der effektiven Spannungen. Diese Herabsetzung bewirkt eine Reduzierung der Scherfestigkeit des Bodens, die im Extremfall bis zur vollständigen Verflüssigung des Bodens führt. Für den untersuchten Standort Zingst konnte bei Anregung des Versuchspfahls durch die in der Natur gemessenen Pfahlschwingungen eine vollständige Aufhebung der effektiven Spannungen bis in eine Tiefe von ca. 0,5 m unter Geländeoberkante nachgewiesen werden.

### ***III.3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse***

Im Projekt wurden direkt Fragestellungen aus der küstenwasserbaulichen Praxis aufgegriffen. Ziel des Vorhabens war es, die Dimensionierung von Holzpfählen im Küstenwasserbau von der Anwendung rein empirischer Faustformeln auf eine natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlage zu stellen. Dies war insbesondere deswegen erforderlich, um eine unwirtschaftliche Bemessung von Pfählen zu vermeiden. Als Ergebnis liegt ein ingenieurpraktisch anwendbarer Bemessungsansatz für die konstruktive Bemessung von Holzpfählen vor. Handlungsempfehlungen werden dem Staatlichen Amt Rostock, auf dessen Anregung die Untersuchungen durchgeführt wurden, unmittelbar gegeben. Der Ansatz soll auch in das entsprechende Schrifttum mit empfehlendem Charakter eingeführt werden.

Darüber hinaus liefern die Untersuchungen grundsätzliche Ergebnisse hinsichtlich der konstruktiven Bemessung von Pfählen und Pfahlreihen. Diese sind in allen Bereichen des Küstenwasserbaus, in denen Holzpfähle angewendet werden, nutzbar und umfassen beispielsweise hafengebäude Fragestellungen ebenso wie Fragen des Küsten- und Hochwasserschutzes.

Das Interesse der für den Küstenschutz zuständigen Verwaltung an den durchgeführten Untersuchungen wurde durch eine erhebliche finanzielle und logistische Unterstützung belegt. Das Land MV erhält aus dem Vorhaben direkte Antworten auf konkrete Fragestellungen, in Form eines ingenieurpraktischen Bemessungsansatzes insbesondere bezüglich der konstruktiven Bemessung von Pfahlreihen und Buhnen.

Die Ergebnisse des Vorhabens werden einer breiten Fachöffentlichkeit durch ein ergänzendes Dokument zum Generalplan Küsten- und Hochwasserschutz bekannt gemacht. Daneben werden die Ergebnisse auch in die Arbeit der für die Bemessung von Bauwerken im Küstenwasserbau zuständigen Arbeitskreise wie z.B. dem Ausschuss für Küstenschutzwerke oder dem Arbeitsausschuss "Ufereinfassungen" der Hafenbautechnischen Gesellschaft (HTG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) einfließen, in denen Mitglieder der projektbearbeitenden Gruppe direkt bzw. beratend mitarbeiten. Die entsprechende praktische Verwertung der gewonnenen Ergebnisse ist somit gesichert.

Wirtschaftliche Effekte des Vorhabens ergeben sich aus der Möglichkeit, auf Basis der gewonnenen Ergebnisse zu einer im Vergleich mit der bisherige Vorgehensweise effizienteren Bemessung zu gelangen. Insbesondere im strandfernen Bereich kommt es nach den vorliegenden Ergebnissen zu einer Verkürzung der Pfähle, so dass durch Einsparungen bei Material- und Installationskosten Einsparungen von Geldern möglich werden.

Eine direkte Beurteilung der wirtschaftlichen Effekte wird z.Zt. exemplarisch bei einer Vergleichsbemessung des Bühnenbauprojekts Wustrow (Fischland) nach herkömmlichem und neu entwickeltem Verfahren durchgeführt. Nach Abschluss dieser Arbeiten im Frühjahr 2006 sind konkrete Aussagen zu der durch das Verhaben bewirkten Effizienzsteigerung zu erwarten.

Von besonderem Interesse sind die in Abschnitt 5.5 beschriebenen Untersuchungen zu schwingungsinduzierten Erhöhungen des Porenwasserdrucks. Es wurden hier erstmals quantitative Beziehungen zwischen seegangserzeugten Bewegungen der untersuchten Struktur und dem Porenwasserdruck erarbeitet, die Aussagen über das schwingungsbedingte Risiko von Bodenverflüssigung ermöglichen. Hier eröffnet sich nach Auffassung der Bearbeiter ein vielversprechendes Feld für weitergehende Untersuchungen, da nach einer erfolgreichen Vertiefung der vorläufig nur ansatzweisen Erkenntnisse ein kostengünstiges Instrument zur Abschätzung des Risikos von Bodenverflüssigung vorläge.

### ***III.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben***

#### **Auswertung von Rammdaten**

Beim Bau von Bühnen werden die erforderlichen Rammtiefen durch das StAUN vorgegeben. Tatsächlich ist es, insbesondere bei schwer rammbaren Bodenarten, oft nicht möglich, die geforderte Einbindetiefe auch zu erreichen, da bereits vorher der Pfahl durch den Rammvorgang überbeansprucht wurde oder der Rammfortschritt praktisch zum Erliegen kommt. Solche Abweichungen vom geplanten Bauablauf werden in Rammprotokollen dokumentiert und sind damit ein wichtiges Indiz für die in Abhängigkeit vom Baugrund erreichbare Rammtiefe.

Seit Dezember 2001 wurde daher mit der Auswertung von Rammprotokollen aus dem Archiv des StAUN Rostock begonnen. Die Abweichungen von der geplanten Einbindetiefe sollten statistisch ausgewertet werden. In einem weiteren Arbeitsschritt sollten die Abweichungen in ihrer flächenhaften Verteilung in das GIS integriert werden. Durch Überlagerung mit den Informationen der ingenieurgeologischen Karte sollten Beziehungen zwischen Baugrundverhältnissen und Rammpbarkeit hergestellt werden, die in Konsequenz eine Prognose maximaler Rammtiefen erlauben.

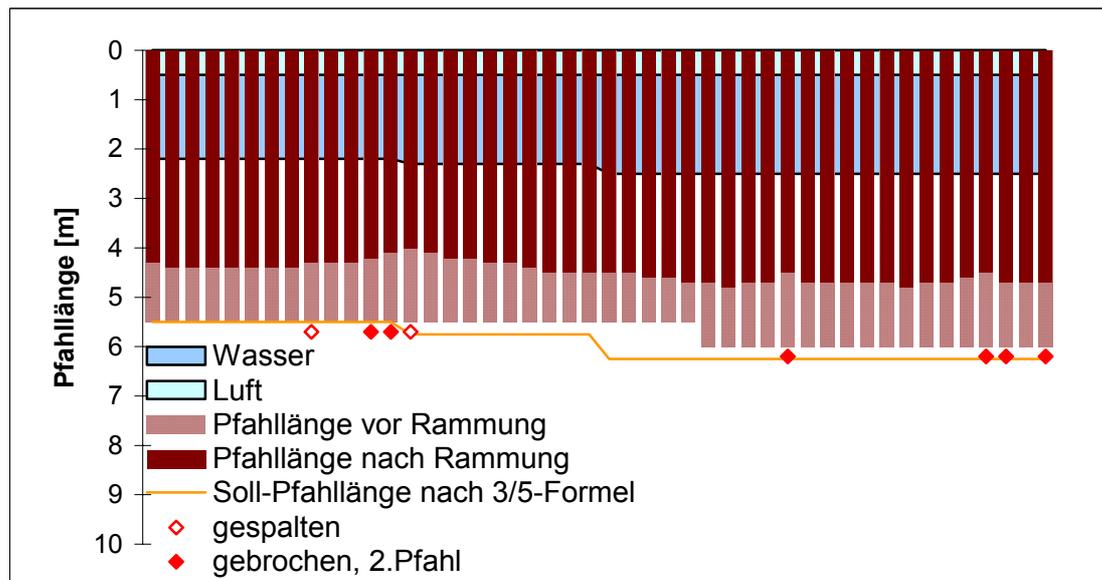


Abb. 1: Auswertung der Rammprotokolle am Beispiel der Buhne 4 in Nienhagen

Die Daten wurden für 11 Buhnen am Standort Heiligendamm erfasst. Abb. 1 zeigt exemplarisch ein graphisch aufbereitetes Rammprotokoll, aus dem die z.T. erheblichen Abweichungen der tatsächlichen von der geforderten Rammtiefe ersichtlich werden.

Bei Sichtung der Unterlagen weiterer Standorte wurde jedoch offenbar, dass die Datenqualität der Rammprotokolle von Heiligendamm nicht auf andere Standorte zu übertragen war. In vielen Fällen wurden Rammprotokolle nicht oder nur sehr summarisch geführt. Der Ansatz, Rammprotokolle zur Gewinnung von Eingangsdaten für die Bemessung von Buhnenpfählen auszuwerten wurde daher aufgegeben.

### Tachymetrische Vermessung von Kolken

Die wirksame Einspannlänge und das Schwingungsverhalten des Pfahls wird erheblich durch die Höhenlage der Schorre beeinflusst. Während der Installationsarbeiten war an einigen Messstandorten aufgefallen, dass die Schorre innerhalb kurzer Zeit zum Teil starke, oft aber reversible Höhenveränderungen aufwies.

Verschiedene Systeme zur Beobachtung und Erfassung dieser Veränderungen wurden untersucht und bewertet. Eine Aufnahme der Veränderung der Höhenlage des anstehenden Baugrundes mit einem Echlot oder ähnlich arbeitenden Messsystemen wurde als zu kompliziert und finanziell aufwendig verworfen.

Im Bereich Zingst wurde versuchsweise ein Bühnenfeld tachymetrisch vermessen (Abb. 2). Dabei stellte sich heraus, dass zum Zeitpunkt der Vermessung, zu dem (aus technischen Gründen notwendig) ruhiges Wetter herrschte, keine nennenswerten Veränderungen der Schorre nachweisbar waren. Aufgrund der oben erwähnten Kurzfristigkeit der Veränderungen ist zur Erfassung von Extremzuständen offensichtlich ein kontinuierlich beobachtendes System notwendig. Als Konsequenz wurde eine optische Erfassung der Kolkbildung über Unterwasser-Videokamera als günstigstes Verfahren ausgewählt (vgl. Endbericht Abschnitt 3.2).

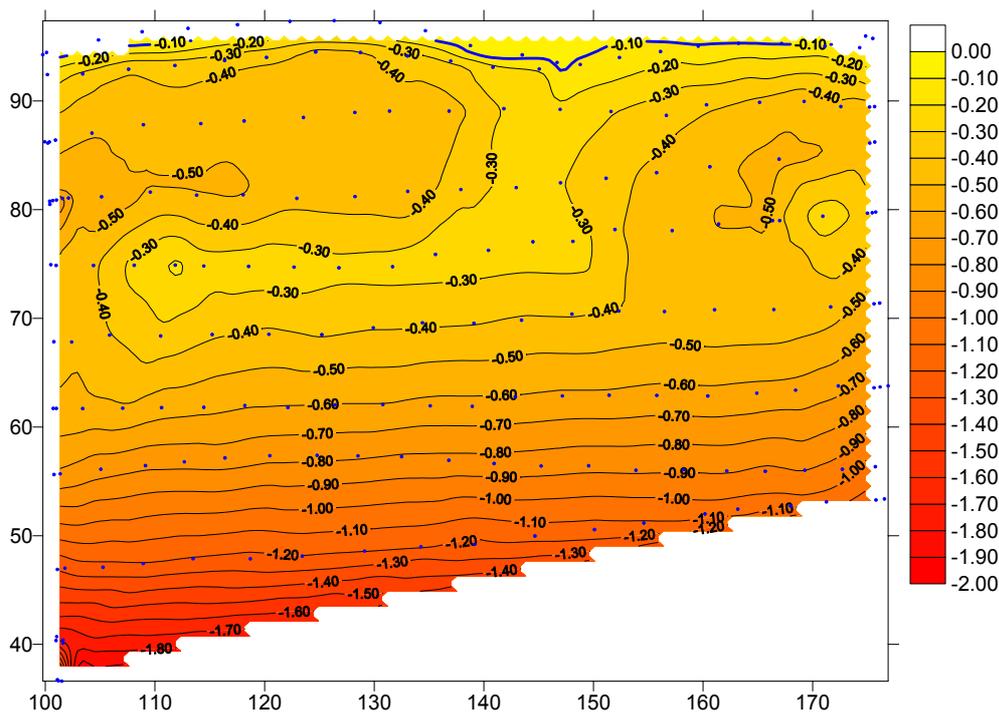


Abb. 2: Ergebnisse der tachymetrischen Vermessung eines Bühnenfeldes vor Zingst (Strandlinie oben)

### Tachymetrische Vermessung zur Erfassung von Eishub in der Natur

Die Durchführung von Feldversuchen oder –messungen zum Lastfall Eis ist praktisch unmöglich, da Eiswinter an der mecklenburgischen Ostseeküste selten auftreten. Während der Planungsphase des Vorhabens wurde vorgesehen, durch Eishub verursachte Pfahlbewegungen direkt zu beobachten. Zur Erfassung von Pfahlhebungen durch anhaftendes Eis wurden an ausgewählten Bühnen Vermessungen der Pfahlköpfe vorgenommen (tachymetrisch), so dass nach einem Eiswinter durch Kontrollmessungen eventuelle Bewegungen quantifiziert werden könnten.

Die Vermessungen erfolgten an Bühnenpfählen, von denen ein vollständiger und zuverlässiger Datensatz über Baugrund, Holzart, Pfahllänge und -durchmesser sowie Einbindetiefe vorliegen. So wurden z.B. die mit Metallkanälen zur Aufnahme der Sensoren versehenen Pfähle eingemessen.

Da während des Vorhabenszeitraums von Sommer 2001 bis Sommer 2005 an der mecklenburgischen Ostseeküste keine geschlossenen Eisdecken in wirksamer Mächtigkeit auftraten, konnten durch den beschriebenen Ansatz keine verwertbaren Ergebnisse gewonnen werden.

### **Digitale Baugrundkarte**

Die verfügbare Baugrundinformation, die in einer großen Zahl von Baugrundgutachten im Archiv des StAUN vorliegt, sollte als Eingangsdaten zur Bemessung von Bühnenpfählen zugänglich gemacht werden. Dazu wurden die Daten zunächst digital erfasst (vgl. Endbericht, Abschnitt 5.2).

Ein im ersten Bearbeitungszeitraum bis etwa Mitte 2003 verfolgter Ansatz bestand danach in der Schaffung einer dreidimensionalen Baugrundkarte, in der die vorhandene Information durch eine geeignete Kombination von Datenbankstrukturen und Visualisierung nutzbar gemacht werden sollten.

Dieser Ansatz wird im folgenden erläutert:

Gewöhnliche geologische Karten lassen keinen Rückschluss auf die Schichtenverteilung in der Tiefe zu, da sie nur die anstehende oberste Schicht darstellen. Erst eine neuere Methode, die durch die GFE<sup>1</sup> im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz entwickelt wurde, bietet eine Lösung für dieses Problem. Dabei wird die Verteilung der Schichten und ihrer Mächtigkeit ähnlich der Grundrissprojektion einer Treppe innerhalb der Karte angezeigt (Abb. 3). Die Bodenart bestimmt dabei den Farbgrundton, während die Mächtigkeit durch die Farbintensität repräsentiert wird.

Nach Studium der vorliegenden Baugrundberichte ist der Baugrundaufbau entlang der Mecklenburgischen Ostseeküste mehrheitlich folgenden drei Bodenarten zuzuordnen, die in der Baugrundkarte durch unterschiedliche Farben dargestellt werden:

- Nichtbindige Sedimente (mit unterschiedlichen Korngrößen)
- Organische Sedimente (Torf bzw. Mudde)
- Bindige Sedimente (Geschiebemergel / Geschiebelehm).

Die geringste darstellbare Schichtmächtigkeit liegt bei 0,5 m, gefolgt von weiteren 6 Stufen bis zu 5,0 m Mächtigkeit. Die letzte und tiefste Schicht kann die dargestellte Gesamtmächtigkeit erreichen oder überschreiten, da die Bohrungen in ihr enden und keine Aus-

---

<sup>1</sup> Geologische Forschung und Erkundung GmbH (1994)

künfte über die Liegendgrenze geben. Optional ist eine genauere Spezifizierung des Bodentyps durch Schraffuren möglich. Dieses Verfahren ist vorrangig in nichtbindigen Sedimenten hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung sinnvoll, die in den ausgewerteten Bohrprotokollen relativ gut dokumentiert und außerdem von erheblichem Einfluss auf das bodenmechanische Verhalten ist. Analoge Unterteilungen sind auch für andere Bodenarten denkbar.



Abb. 3: Darstellungsbeispiel der ingenieurgeologischen Karte

Zur Vereinheitlichung der Darstellungsweise wurde Kontakt mit dem Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung, dem Geologischen Landesamt Nordrhein-Westfalen sowie dem Geologischen Dienst des Landesamtes für Umwelt, Natur und Geologie Mecklenburg-Vorpommern aufgenommen.

In Abb. 4 ist der erarbeitete Prototyp einer solchen ingenieurgeologischen Karte dargestellt, die für den Strandabschnitt Markgrafenheide erarbeitet wurde. Die Erstellung dieser Beispielkarte erfolgte durch eine Kombination von EDV-implementierten Algorithmen und begleitender manueller Anpassung.

Diese Vorgehensweise war für die prototypische Erarbeitung im Versuchsstadium akzeptabel, praxistauglich war sie nicht. Die Versuche, den Vorgang der Kartenerstellung vollständig zu automatisieren, scheiterten an einem anfänglich nicht vorhergesehenen Aufwand, der mit den vorhandenen Kräften (i.w. studentische Hilfskräfte) nicht zu bewältigen war.

Der Ansatz der automatisierten Kartenerstellung wurde deshalb im Herbst 2004 zugunsten der automatischen Visualisierung der Bohrdaten in Form von Profilen und Schnitten (vgl. Endbericht, Abschnitt 5.2) aufgegeben.

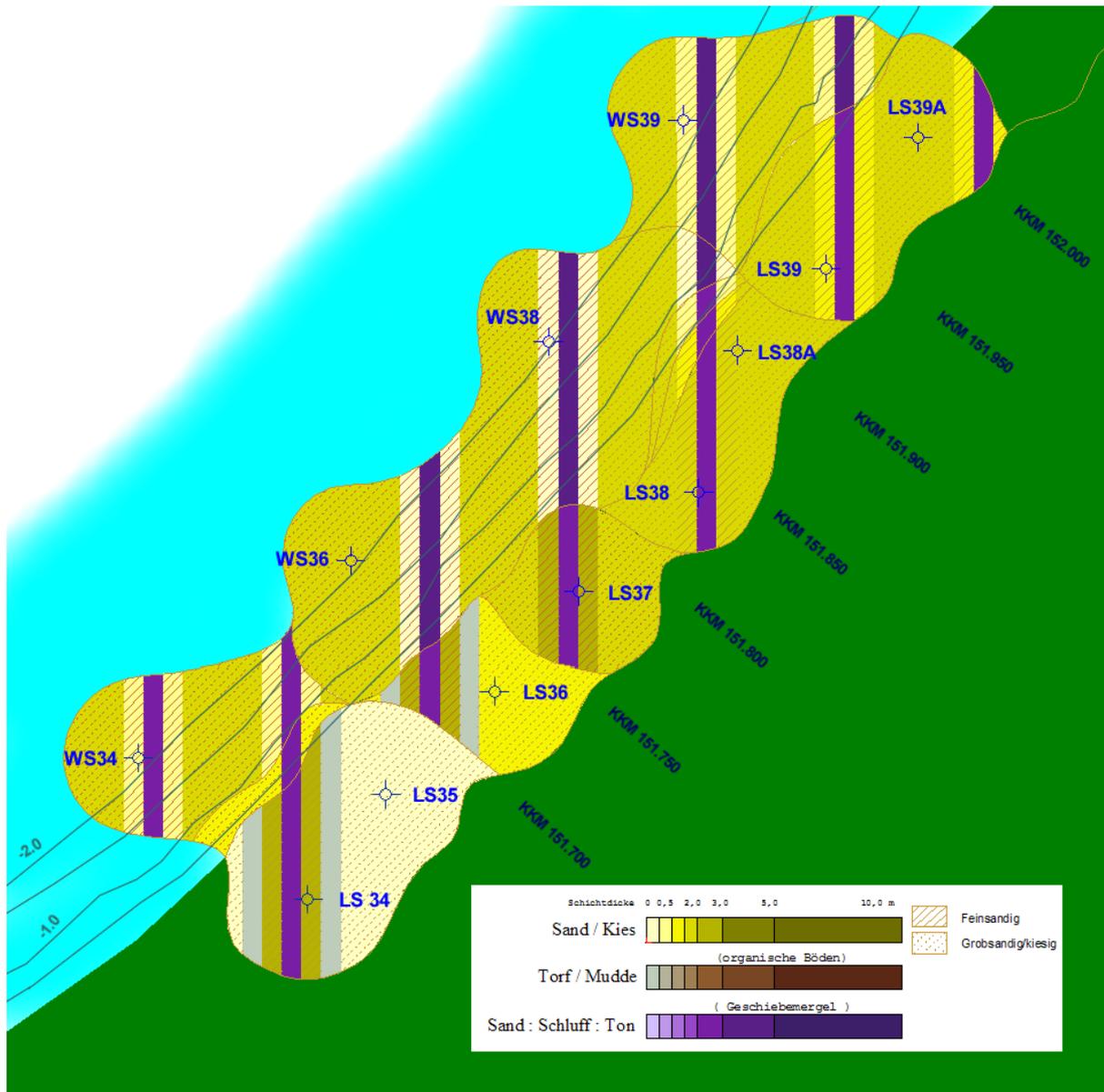


Abb. 4 : Beispielkarte für den Küstenabschnitt Markgrafeneheide

### III.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Das vorliegende Vorhaben erzeugte antragsgemäß keine Ergebnisse, die für eine Präsentation (z.B. auf Anwenderkonferenzen) vorgesehen sind. Eine Präsentation in der Fachöffentlichkeit erfolgte im Rahmen der in Abschnitt II.4 genannten Veröffentlichungen sowie auf den ebenfalls in Abschnitt II.4 aufgeführten Konferenzen.

## III.6 Einhaltung der Zeit- und Ausgabenplanung

### Zeitplanung und Ablauf

Die Projektlaufzeit des Forschungsvorhabens "Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau" war bei Antragstellung für 3 Jahre, von Juli 2001 bis Juni 2004, vorgesehen. Aufgrund von Verzögerungen im Zeitplan der Messungen in der Natur und Veränderungen im Projektablauf wurde vom IWR mit Unterstützung der KFKI-Beratergruppe eine Projektlaufzeitverlängerung um 1 Jahr beantragt. Der Antrag wurde im Juli 2004 vom BMBF bewilligt.

Der geplante zeitliche Ablauf und Abweichungen innerhalb der Bearbeitungszeit des Forschungsvorhabens sind in Teil I, Abschnitt 3.2 anhand der Projektablaufpläne, die in den Anträgen enthalten waren, erläutert.

### Ausgaben

Das Forschungsvorhaben wurde durch das BMBF auf Ausgabenbasis über den Projektträger Jülich gefördert. Die Mittelanforderungen beim Projektträger und die Mittelbewirtschaftung wurden in Zusammenarbeit mit der Zentralen Verwaltung der Universität Rostock durchgeführt. Alle Ausgaben wurden im IWR zusätzlich in einer "Haushaltsliste" festgehalten. Die vom Projektträger vorgesehenen Finanzierungsnachweise (Jahresabschluss) wurden erbracht.

Abweichend vom ursprünglichen Finanzplan wurden in Abstimmung mit der KFKI-Beratergruppe und dem Projektträger eine Unterwasser-Videokamera und ein Arbeitsboot kostenneutral aus Projektmitteln beschafft. Im Folgenden werden die Gründe für die o.g. Beschaffungen kurz erläutert.

Im Vorhaben wurden seeganginduzierte Pfahlschwingungen an Bühnenpfählen in der Natur gemessen. Um eine qualifizierte Bewertung der gemessenen Pfahlschwingungen zu ermöglichen, war es notwendig, die frei schwingende Länge der Versuchspfähle, d.h. die Lage der Schorre zu bestimmen. Zunächst wurde die Lage der Schorre regelmäßig tachymetrisch vermessen. Eine Vermessung bei Seegang war nicht möglich. Es wurde festgestellt, dass sich die Höhenlage der Schorre sich abhängig von der Belastung schnell und reversibel ändern kann. Daher wurde nach Abstimmung mit der KFKI-Beratergruppe die kostenneutrale Beschaffung einer Unterwasser-Videokamera beim Projektträger beantragt. Nach Zustimmung des Projektträgers wurde die Kamera beschafft und an den Versuchsstandorten eingesetzt. Weitere Informationen zur Kamera und Ergebnisse sind im Teil II, Abschnitt 3.2.2 gegeben.

Der Einbau der Beschleunigungssensoren in die Versuchspfähle (vgl. Teil II, Abschnitt 3.2.3) musste am Kopf der Bühne erfolgen. Für den Einbau wurden z.T. schwere Geräte und Werkzeuge benötigt (z.B. Pumpe + Generator zum Entfernen von Sand aus den Installationskanälen). Die Geräte, Werkzeuge und Personen konnten auf der Bühne transportiert werden. Da ein zur Verfügung stehendes Schlauchboot für diese Belastungen

nicht geeignet war, wurde nach Zustimmung des Projektträgers ein Aluminium-Arbeitsboot beschafft. Ein Antriebsmotor für dieses Boot wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Rostock finanziert.

Detaillierte Begründungen der Notwendigkeit der o.g. Geräte sind in den Anträgen zur kostenneutralen Beschaffung, die dem Projektträger vorliegen, enthalten.

Die Videokamera und das Arbeitsboot wurden aus nicht genutzten Mitteln des Titels 846 (Dienstreisen Inland) finanziert. Die entsprechenden Mittel wurden frei, da durch die Nutzung von Fahrzeugen aus der Fahrbereitschaft der Universität Rostock die bei Antragstellung vorgesehene Miete von Fahrzeugen entfiel. Die Möglichkeit einer so umfassenden Nutzung von Dienst-KFZ der Universität Rostock wurde zum Zeitpunkt der Antragstellung nicht vorhergesehen.

In der folgenden Übersicht sind die im Forschungsvorhaben geplanten und tatsächlich benötigten Mittel differenziert nach Kostengruppen gegenübergestellt.

Alle Angaben in €								
	Bewilligung	Ist	Ist	Ist	Ist	Ist	Gesamt	Rest
	07/01- 06/05	2001	2002	2003	2004	2005		
812	276,417.92	31,795.42	66,402.48	69,571.74	74,933.54	37,063.16	279,766.34	-3,348.42
817	85,353.76	10,125.02	20,966.51	21,751.93	22,975.08	10,965.42	86,783.96	-1,430.20
820								
822	37,341.76	3,492.49	10,217.26	7,645.27	7,764.70	7,075.39	36,195.11	1,146.65
831								
834								
835	1,204.59		782.60	347.86		226.20	1,356.66	-152.07
843	23,691.17	3,981.03	7,098.49	7,033.66	3,530.31	1,433.75	23,077.24	613.93
846	23,842.89	1,390.58	2,773.78	4,827.48	6,134.01	1,901.84	17,027.69	6,815.20
850	104,104.76	86,518.94	12,070.05	5,250.93	443.35		104,283.27	-178.51
<b>GESAMT</b>	<b>551,956.85</b>	<b>137,303.48</b>	<b>120,311.17</b>	<b>116,428.87</b>	<b>115,780.99</b>	<b>58,665.76</b>	<b>548,490.27</b>	<b>3,466.58</b>
Geldeingang	551,956.85	133,161.88	129,156.93	105,206.23	130,990.41	53,441.40	551,956.85	0.00
Kassenrest		-4,141.60	4,704.16	-6,518.48	8,690.94	3,466.58	3,466.58	

Tab. 1: Übersicht zur Mittelbewirtschaftung 2001 – 2005

Die Kosten für das wissenschaftliche und technische Personal (812, 817) erhöhten sich aufgrund von Gehaltserhöhungen und Änderungen im Familienstatus einzelner Mitarbeiter. In den anderen Titeln wurden die bei Antragstellung geplanten Kosten nur unwesentlich überschritten bzw. unterschritten. Nach Ende der Projektlaufzeit wurden 3.466,58 € an den Zuwendungsgeber zurück überwiesen.