

Entwicklung eines monitoringbasierten Life-Cycle-Engineerings für die Boden-Fluid-Bauwerk-Wechselwirkungen bei Kaianlagen

U. Berndt, J. Gattermann, J. Stahlmann

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

N. Horstmann

Forschungszentrum Küste, Hannover

Zusammenfassung

Neben der Grundlagenuntersuchung zum tatsächlichen Spannungs-Verformungsverhalten von Kaianlagen infolge der Interaktionen Boden-Fluid-Bauwerk und deren zeitlicher Veränderung über einen Lebenszyklus, steht bei diesem Forschungsvorhaben die Entwicklung eines geotechnischen Monitoringkonzeptes im Vordergrund. Ziel hierbei ist es, bisher eingesetzte Messtechnik im Kaianlagenbau vor allem hinsichtlich ihrer Haltbarkeitsdauer zu optimieren. Zudem soll nach einer vorangegangenen Schwachstellenanalyse ein gesamtheitliches Messkonzept entwickelt werden, mit dem es möglich ist, gezielt an kritischen Punkten des Bauwerks über den gesamten Lebenszyklus hinweg Daten für eine Zustandsbewertung zu ermitteln und diese als Grundlage für ein Life-Cycle-Management zu verwenden.

1. Einleitung

Das Forschungsvorhaben „Entwicklung eines monitoringbasierten Life-Cycle-Engineerings für die Boden-Fluid-Bauwerk-Wechselwirkungen bei Kaianlagen“ des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) ist ein Arbeitsgebiet eines Teilprojektes aus dem Forschungsverbund „Strategien und Methoden des Life-Cycle-Engineerings für Ingenieurbauwerke und Gebäude“, welches unter dem Dach der Niedersächsischen Technischen Hochschule (NTH) im Verbund zwischen der Leibniz Universität Hannover (LUH) und der Technischen Universität Braunschweig (TUBS) angesiedelt ist.

Das IGB-TUBS ist mit seinem Forschungsthema in das Teilprojekt 4 integriert. In diesem arbeitet das Forschungszentrum Küste und seine vier Trägerinstitute, das Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen (LUH), das Institut für Geotechnik (LUH), das Institut für Grundbau und Bodenmechanik (TUBS) sowie das Leichtweiß-Institut für Wasserbau (TUBS) zusammen. Das Ziel dieser Forschungsgruppe ist es, eine risikobasierte Strategie für Monitoring, Inspektion und Unterhaltung (MIU) von Küstenschutzbauwerken als integralen Bestandteil von Life-Cycle Bemessungs- und Optimierungsverfahren zu entwickeln.

2. Life-Cycle-Engineering (LCE) im Bauwesen

Aufgrund der immer knapper werdenden öffentlichen Haushaltsmittel aber auch der stetigen Abnahme natürlicher Ressourcen, ist es zwingend erforderlich, die Nutzungsdauer und die Betriebskosten von Bauwerken zu optimieren. Nicht nur die Investitionskosten eines Bauwerkes allein sind, wie bisher, während der Planungsphase in den Vordergrund zu stellen, auch die Kosten des gesamten Lebenszyklus sind in die Planung mit einzubeziehen. So ist z.B. in der stationären Industrie der Gedanke des Produktlebenszyklus bereits seit längerer Zeit fester Bestandteil der Entwicklungs- und Produktionsprozesse. Ausschlaggebende Kaufkriterien sind z. B. in der Automobilindustrie, neben den anfänglichen Investitionskosten, auch die Betriebs- und Unterhaltungskosten eines Fahrzeuges. [GIRMSCHIED u. LUNZE, 2008]

Die Schwierigkeit bei der Entwicklung eines geeigneten LCE-Konzeptes in der Bauwirtschaft liegt vor allem in der Einzigartigkeit eines jeden Bauwerks selbst. So sind die Baustoffe, Bauweisen und Tragkonstruktionen aber auch die Beanspruchungen und Einwirkungen auf ein Bauwerk sehr individuell und die Erfahrungen von bestehenden Bauten nur teilweise auf neue übertragbar. Mittels eines prädiktiven Lebensdauermanagements soll die Bauwerksqualität und Zuverlässigkeit kontrolliert und sichergestellt werden. Aber auch betriebswirtschaftliche Aspekte, wie die Analyse der einmaligen und laufenden Investitionen und der Unter-

haltungskosten (Life-Cycle-Costing – LCC) sowie gesellschaftspolitische Aspekte sind in einem ganzheitlichen LCE-Konzept zu berücksichtigen.

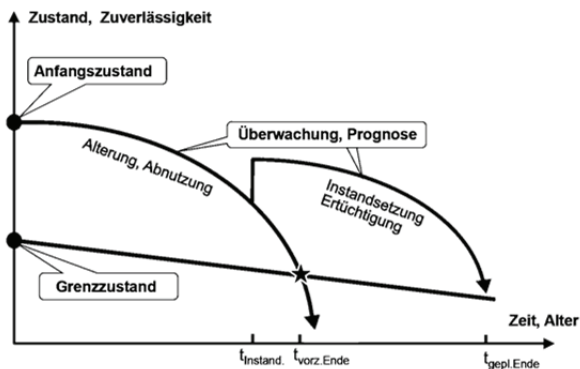


Abb. 1: Verdeutlichung des Konzepts für das Lebensdauermanagement [BUDELMANN, 2010]

Das Grundkonzept des Lebensdauermanagements für Bauwerke wird in Abbildung 1 veranschaulicht. Ausgedrückt werden der Zustand bzw. die Zuverlässigkeit eines Bauwerkes über die Zeit. Ausgehend vom Grenzzustand zum Zeitpunkt $t=0$ darf der Mindestwert mit der Zeit kontinuierlich abnehmen, da dieser von der Restnutzungsdauer des Bauwerkes abhängig ist. Der IST-Zustand des Bauwerkes wird nach der Errichtung als Anfangszustand dokumentiert. Der Bauwerkszustand verschlechtert sich mit der Zeit durch Alterung und Abnutzung. Wird diese Alterung nicht überwacht und prognostiziert und werden keine Instandhaltungsmaßnahmen eingeleitet, wird der Bauwerkzustand den Grenzzustand unterschreiten und das Bauwerk versagt. Mit geeigneten Ertüchtigung- und Instandhaltungsarbeiten kann dem Versagen rechtzeitig vorgegriffen werden. Der optimale Zeitpunkt dieser Maßnahmen wird durch stetige Überwachung und Prognose des Zustands bestimmt. Die Lebensdauer des Bauwerkes kann somit durch geeignete Eingriffe bis auf die geforderte Nutzungsdauer verlängert werden. [BUDELMANN et al., 2009]

3. Konzept der MIU-Strategie

Innerhalb der „Risikobasierten Strategie für Monitoring, Inspektion und Unterhaltung von Küstenschutzbauwerken (MIU-Strategie)“, welche im Forschungszentrum Küste entwickelt wird, sollen auf Basis der Daten aus Monitoring, Inspektion und Unterhaltung Prognosemöglichkeiten entwickelt werden, um gezielt Restlebensdauern von Bauwerken abschätzen zu können sowie Instandhaltungsstrategien zu erarbeiten. Nach HORSTMANN (2011) ist geplant, die MIU-Strategie vorwiegend präventiv und für die Bemessung neuer sowie zur Sicherheitsüberprüfung bestehender Bauwerke einzusetzen. Des Weiteren ist diese Strategie in ein Life-Cycle-Management-System zu integrieren, welches in Abbildung 2 dargestellt ist. In diesem Beispiel besteht das Life-Cycle-Management-System aus einer Planungs- und Bemessungsphase, einer Ausführungs- und Abnahmephase, der Nutzungsphase sowie einer Umnutzungs- und Abrissphase. Es wird deutlich, dass die Integration der MIU-Strategie innerhalb der Nutzungsphase des Bauwerkes erfolgt, wobei die Bauwerksdaten aus der Ausführungs- und Abnahmephase, wie z. B. Qualitätskontrollen von Materialien, Prüfungsergebnissen etc. in die MIU-Strategie mit einfließen.

In Abbildung 3 ist der Gesamttablauf der MIU-Strategie dargestellt, welcher sich in vier Schritte unterteilt und in den folgenden Abschnitten erläutert wird:

- Systemanalyse
- Risikoanalyse
- Risikobewertung
- Unterhaltungsplanung

Bei der Strategie handelt es sich dabei um einen iterativen Prozess, d. h. nach Durchlaufen des letzten Schrittes werden die Eingangsdaten mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Strategie heraus aktualisiert.

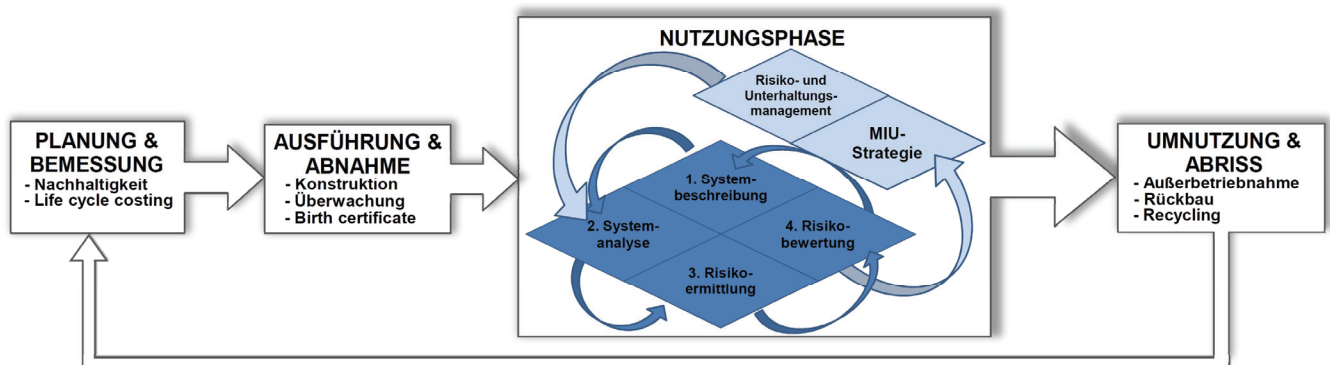


Abb. 2: Beispiel zur Integration der MIU-Strategie in ein Life-Cycle-Management-System als iterativer Prozess [HORSTMANN, 2011]

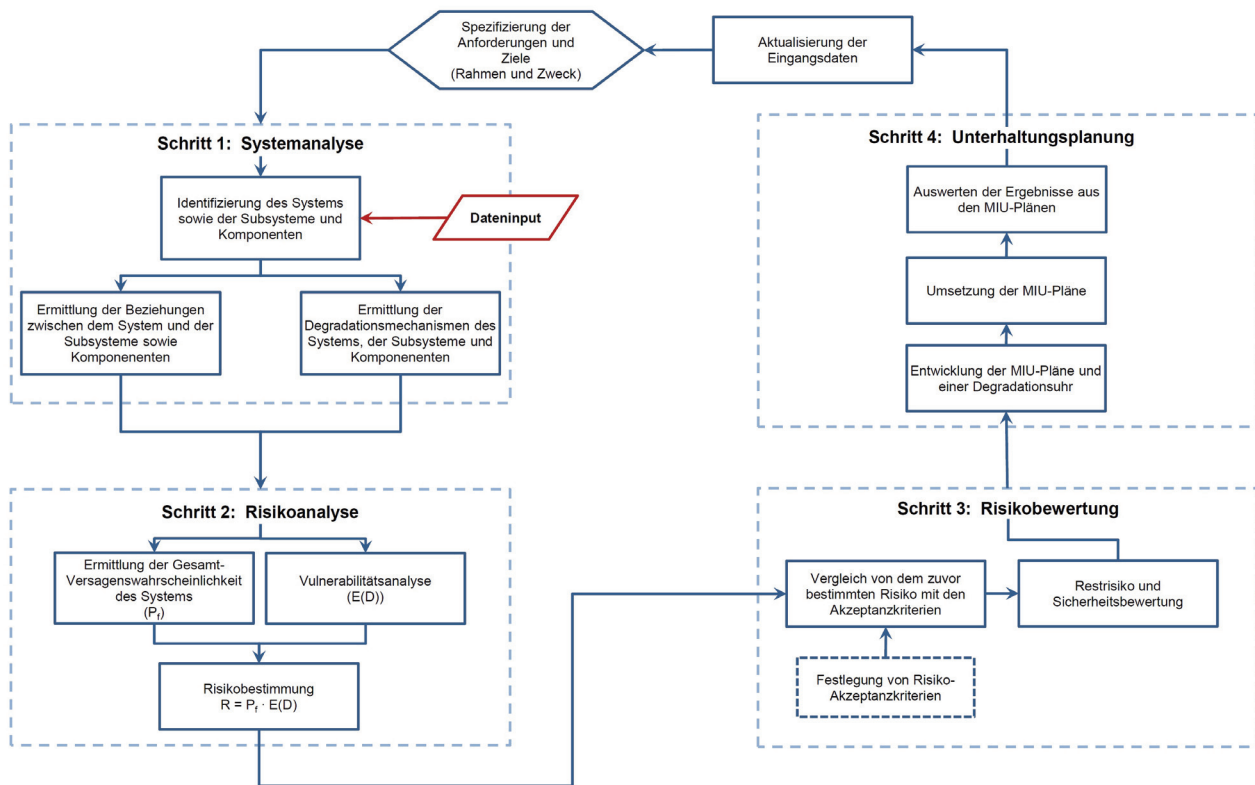


Abb. 3: Gesamtablauf der MIU-Strategie [HORSTMANN, 2011]

In HORSTMANN (2011) werden die vier Schritte wie folgt beschrieben:

Schritt 1 – Systemanalyse

Zu Beginn erfolgt die Identifizierung des Systems, wofür entsprechende Systemdaten erforderlich sind, um das System in Subsysteme und Komponenten zu untergliedern. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen und Komponenten im Gesamtsystem werden analysiert und parallel dazu aus Bauwerksaufzeichnungen die möglichen Degradationsmechanismen des Gesamtsystems sowie einzelner Subsysteme und Komponenten ermittelt.

Schritt 2 – Risikoanalyse

Mit den Ergebnissen aus dem 1. Schritt erfolgt die weitere Bearbeitung, in dem für alle auftretenden Versagensformen die Versagenswahrscheinlichkeit für Komponenten und Subsystemen sowie die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f,S}$ des Systems ermittelt wird. Außerdem erfolgt eine Vulnerabilitätsanalyse, in der die Konsequenzen des Versagens $E(D)$ bewertet werden. Das Risiko R für das Versagen des Gesamtsystems ergibt sich somit aus:

$$R = P_{f,S} \cdot E(D). \quad (\text{Gl. 1})$$

Schritt 3 – Risikobewertung

Das ermittelte Risiko R aus Schritt 2 wird mit Risiko-Akzeptanzkriterien R_{acc} verglichen, die für jedes Bauwerk individuell festzulegen sind. Diese Akzeptanzkriterien können z. B. die persönliche und gesellschaftli-

che Akzeptanz gegenüber einem gewissen Risiko sowie ökologische und ökonomische Kriterien berücksichtigen. Subsysteme und Komponenten, welche die Risiko-Akzeptanz überschreiten und entsprechend ein zu hohes Risiko aufweisen, werden im Weiteren behandelt.

Schritt 4 – Unterhaltungsplanung

Zu Beginn wird ein Zielrisiko R_t oder eine Ziel-Versagenswahrscheinlichkeit $P_{f,S}^t$ für das Gesamtsystem festgelegt. Mit der Durchführung einer inversen Fehlerbaumberechnung können anschließend Rückschlüsse auf die Ziel-Versagenswahrscheinlichkeit P_f^t für jeden einzelnen Versagensmechanismus gezogen werden. Über Rückrechnungen lassen sich somit für jeden einzelnen Versagensmechanismus die Degradationsschwellenwerte für die Widerstandsseite bestimmen. Mit diesen Ergebnissen erfolgt eine Prognose der Alterung des Bauwerks und infolgedessen kann auf die Intervallzeiten für die Unterhaltungen und Inspektionen zurückgeschlossen werden.

4. Entwicklung eines monitoringbasierten LCEs für Kaikonstruktionen

4.1 Systemanalyse von Kaianlagen

Die Entwicklung eines LCE-Konzeptes für Kaianlagen erwies sich in der Vergangenheit als kaum umsetzbar, da vor allem im Lastabtragungsverhalten der Kaikonstruktionen diverse Phänomene bisher nicht hinreichend geklärt werden konnten. Eine Vielzahl komple-

ter Mechanismen in den Interaktionen zwischen Boden-Fluid-Bauwerk sind nicht ausreichend erforscht und bedürfen weiterer Forschungsarbeiten. Der Fokus der bislang durchgeführten geotechnischen Messungen lag auf dem Verständnis der Prozesse während des Bauablaufes und auch hier stehen Messergebnisse oftmals im Widerspruch zu den vorher getroffenen theoretischen Annahmen. Messungen über die Bauzeit hinaus wurden bisher nur vereinzelt vorgenommen und decken auch nicht das gesamtzeitliche Verhalten der Konstruktion ab. Auf Grundlage dieses Wissensstandes ist es derzeit nicht möglich, weder ein belastbares LCE noch ein Konzept zum Risikomanagement von Kaikonstruktionen zu entwickeln.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die fehlenden wissenschaftlichen Grundlagen bezüglich des Tragverhaltens aber auch der Degradationsmechanismen sowie deren Auswirkungen auf den Bauwerkszustand aufzuarbeiten, die benötigten Modelle und Verfahren zu entwickeln und bereit zu stellen. Gewonnene Erkenntnisse werden dann in die im Kapitel 3 beschriebene MIU-Strategie integriert, um diese zu komplettieren. [BUDELMANN et al., 2009]

4.2 Versagensformen

Neben den bereits recht umfassend erforschten Degradationsmechanismen der Materialien der Konstruktionselemente, wie z. B. der Stahlkorrosion oder der chlorinduzierten Bewehrungskorrosion, wird in diesem Forschungsvorhaben vor allem auf bodenmechanische Mechanismen eingegangen, welche das Versagen oder die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion beeinflussen.

Im Folgenden werden die Versagensmechanismen bezogen auf deren Auswirkung auf die statisch relevan-

ten Tragstrukturen untergliedert. Es wird unterschieden zwischen dem Versagen der Hauptwand, des Ankers, der Pierplattenpfähle und des Erdauflegers.

Versagen der Hauptwand

Schon während der Bauphase erfährt die Hauptwand einen Großteil ihrer Verformungen. So werden durch das Hinterfüllen der Wand, hauptsächlich bei Wasserbaustellen, und durch die Abbaggerung der Hafensohle auf die geplante Endtiefe, die Einwirkungen und Widerstände resultierend aus dem aktiven und passiven Erddrucks erheblich beeinflusst. Aber auch während des Hafenerbetriebes wirken auf die Kaikonstruktion und dementsprechend auch auf die Hauptwand große Belastungen. Vor allem durch die stetig wachsenden Schiffsgrößen und der sich dadurch anpassenden Kranleistungen zum wirtschaftlichen Beladen und Löschen, vergrößern sich die Einwirkungen auf die Konstruktion zusehends. Auch Umstrukturierungen von Hafenanlagen, auf z. B. das Verladen von Konstruktionselementen für Offshore-Windenergieanlagen, beeinflussen die Einwirkungen maßgebend.

Kommt es dadurch zu unplanmäßigen großen Verformungen, für welche die Spundwand und deren Schlösser nicht konzipiert wurden, kann es zur Überbelastung der Wand und u. a. zur Sprengung der Spundwandschlösser kommen. Dieses hat zur Folge, dass zum einen die Stabilität der Wand nicht mehr gewährleistet ist, aber auch, dass der Boden hinter der Wand durch die Öffnungen ausfließen kann. Durch den Verlust des Bodens hinter der Wand, kann es zu Setzungen der Konstruktion kommen, da z. B. die erforderliche Mantelreibung der Pierplattenpfähle oder, bei Konstruktionen ohne Wellenkammer, die erforderliche Auflagerfläche der Pierplatte nicht mehr im vollem Umfang vorhanden ist.

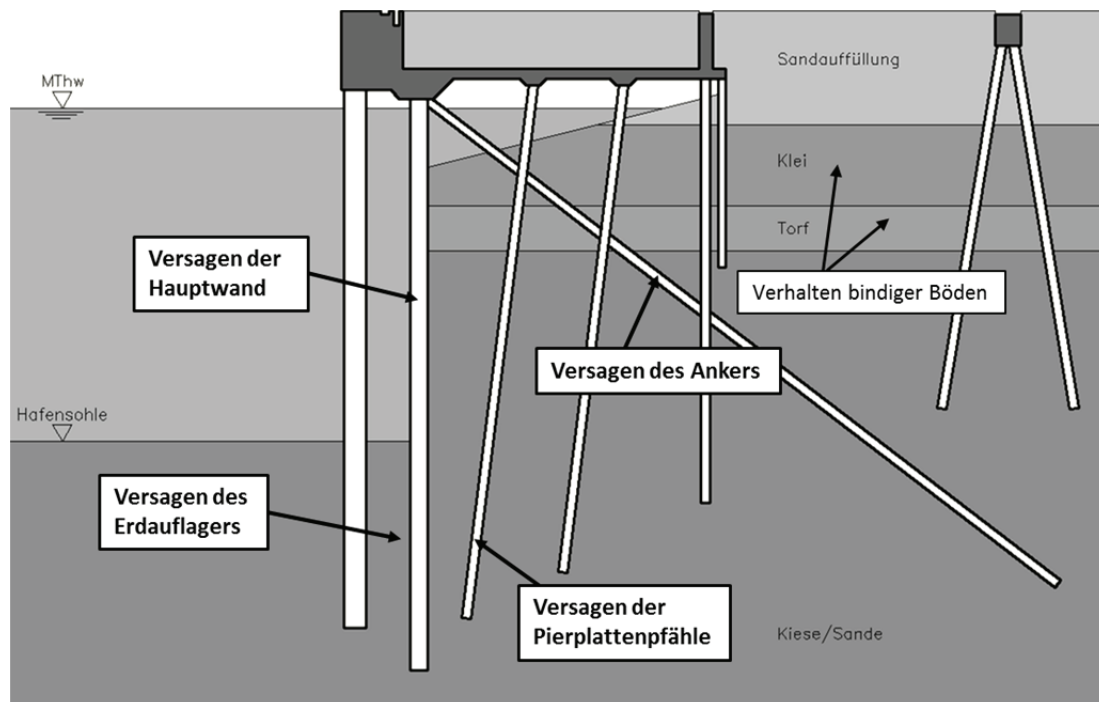


Abb. 4: exemplarischer Querschnitt einer Kaianlage und bodenmechanisch relevante Versagensformen

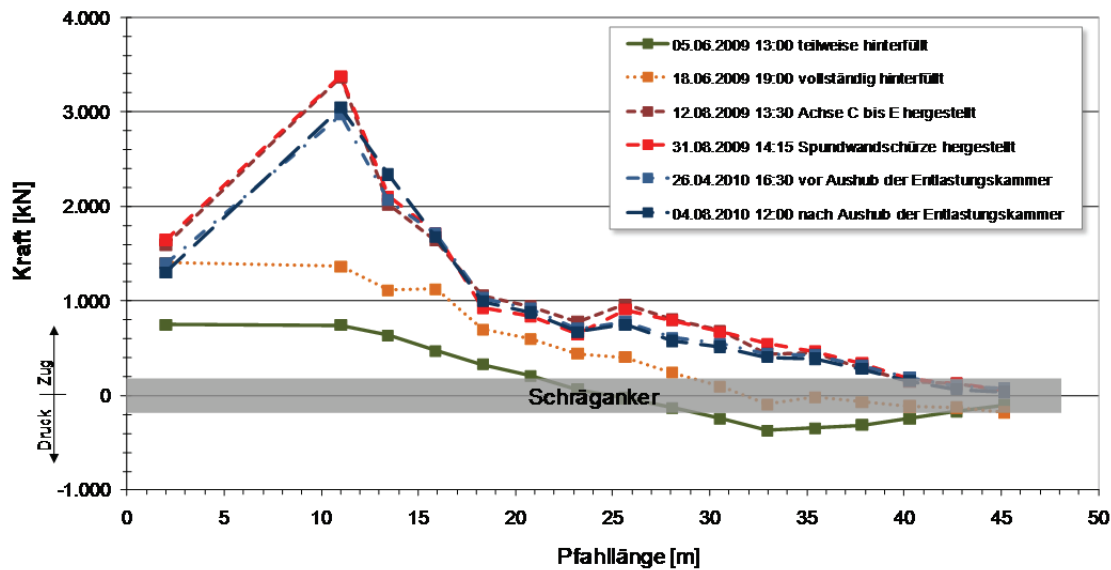


Abb. 5: Normalkraftverlauf im Schräganker S32 während des Baus des JadeWeserPorts [STAHLMANN u. BRUNS, 2011]

Versagen der Anker

Auch die Anker werden bereits während des Baus durch die Bodenauffüllung und das Rammen der Pierplattenpfähle verformt. Zudem erfahren sie während des Hafenbetriebes auch die bereits beschriebenen Einwirkungen. Ausschlaggebend für die Bemessung und die Konzeption des Anschlusses des Ankers, ist die Verteilung bzw. der Abbau der Normalkräfte über die Länge des Ankers. Messungen am IGB-TUBS haben ergeben, dass die Normalkraftverteilung im Schrägpfahl nicht den bisherigen Annahmen entspricht. So konnte z. B. die bisherige Annahme, dass sich die maximale Normalkraft im Anschlusspunkt des Ankers einstellt, bei Messungen am CT Altenwerder (Hamburg) aber auch bei aktuellen Messungen am JadeWeserPort (Wilhelmshaven) widerlegt werden. Weitere Ausführungen zu den Messergebnissen sind u. a. STAHLMANN u. BRUNS (2011) zu entnehmen. Erhöhte Verformungen und somit erhöhte Normalkräfte im Bauteil, können zum Versagen des Schrägpfahls selbst oder der Gurtung führen. Daher sind weitergehende Untersuchungen des Tragverhaltens der Anker zwingend erforderlich.

Versagen des Erdaufwärters

Die Größe des Erdaufwärters wird hauptsächlich von der Einbindetiefe der Hauptwand sowie der Lagerungsdichte des anstehenden Bodens beeinflusst. Kommt es zu einer Reduzierung der Einbindetiefe, wird das Erdaufwärters geschwächt. Dieses kann z. B. durch die Entstehung eines Kolkes in diesem Bereich hervorgerufen werden. Neben der Kolkbildung aus z. B. tidebedingten Strömungen, werden auch durch die Schiffspropeller Kolke induziert. Zudem kann eine Verringerung der Einbindetiefe durch Ausbaggerungsarbeiten erfolgen, wenn z. B. aufgrund des immer größer werdenden Tiefgangs der Schiffe, größere Wassertiefen erforderlich werden.

Eine Änderung der Lagerungsdichte im Bereich des Erdaufwärters kann u. a. durch die Entstehung eines hydraulischen Grundbruchs oder eines Erosionsgrundbruchs (Piping) verursacht werden.

Verhalten bindiger Böden

Einen großen Einfluss auf das Gesamttragverhalten der Konstruktion haben zudem anstehende Weichschichten im Baugrund. Da z. B. Schichten aus Klei oder Schlack im norddeutschen Raum oftmals vorhanden sind, muss auch das zeitliche Verhalten dieser berücksichtigt werden.

Durch die Bodenauffüllungen, die Bauwerkslasten sowie die Einwirkungen aus dem Hafenbetrieb, erfahren die weichen Bodenschichten eine neue Belastung, welche eine Konsolidation dieser Schichten hervorruft. Diese führt wiederum zu Setzungen des Bauwerkes, da z. B. durch die Konsolidation eine negative Mantelreibung an den Pfahlschäften entstehen kann und somit auf die Pfähle eine zusätzliche Belastung wirkt. Zudem kann auch durch waagerechte Bodenbewegungen ein horizontaler Fließdruck auf die Konstruktion einwirken.

Alle bodenmechanischen Phänomene wirken sich auf das Tragverhalten oder zumindest auf die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion aus. So werden z. B. Setzungen des Kaikopfes oder auch des hinteren Kranbahnbalkens hervorgerufen. Diese wiederum verursachen eine Schiefstellung oder eine Distanzänderung zwischen den Kranbahnschienen und somit eine Beeinträchtigung der Spurführung der Containerbrücken. Infolgedessen müsste der Betrieb der Containerbrücken und dementsprechend auch der Umschlag dieses Kaiabschnittes eingestellt werden.

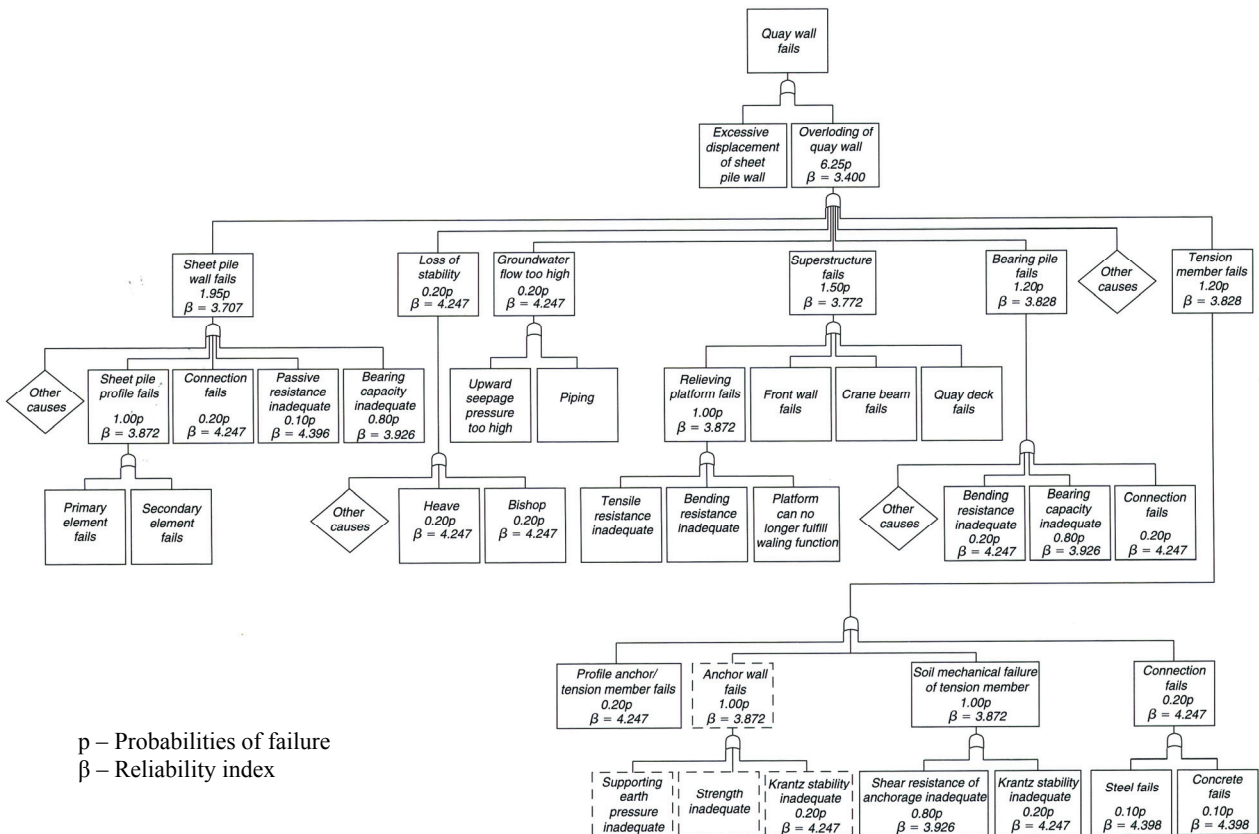


Abb. 6: exemplarischer Fehlerbaum einer Kaianlage [CUR, 2005]

Wie die Versagensmechanismen im Zusammenhang stehen und mit welchen Wahrscheinlichkeiten sie eintreten, kann durch die Darstellung eines Fehlerbaumes verdeutlicht werden.

Der Fehlerbaum bildet die logischen Verknüpfungen von Komponenten- oder Teilsystemausfällen ab, die zu einem unerwünschten Ereignis (Top Event) führen [DIN 25424]. Bezogen auf eine Kaikonstruktion wäre ein Top Event der Verlust der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit. Ausfallkombinationen und Zuverlässigkeitskenngrößen, wie z. B. die Eintrittshäufigkeit des unerwünschten Ereignisses, können identifiziert bzw. ermittelt werden.

Voraussetzung für die Erstellung eines Fehlerbaumes ist ein vollständiges Systemverständnis, welches im Kaianlagenbau bisher nicht vorliegt und weiterer Forschungen bedarf.

4.3 Geotechnisches Monitoring

Um die Boden-Bauwerk-Interaktionen über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes näher zu verstehen, ist es erforderlich, geeignete geotechnische Monitoringkonzepte zu entwickeln. Mit den Messergebnissen ist es möglich, eine umfassendere Beurteilung des Zustandes der Konstruktion zu erhalten. Bisherige Bauwerksprüfungen beschränken sich lediglich auf den sichtbaren bzw. zugänglichen Bereich der Konstruktion und geben somit keine komplette Zustandsbewertung wieder.

Um ein geeignetes Messsystem zu konzipieren, ist es notwendig, die bereits beschriebene Systemanalyse durchzuführen. Mögliche Schwachstellen des Systems sind auf diesem Weg zu identifizieren, um das Messsystem darauf auszurichten. Zudem ist es Teil dieser Forschungsarbeit, die bisherige Messtechnik so weiter zu entwickeln, dass diese über einen gesamten Lebenszyklus einsatzfähig ist.

Einen Überblick von bisher eingesetzter Geomesstechnik im Hafenaufbau wird im Folgenden gegeben.

Erddruck- und Porenwasserdruckmessungen

Für die Ermittlung des Erddruckes an Kaikonstruktionen in Schlitzwandbauweise wurden am IGB-TUBS großflächige Erddruckkissen entwickelt. Diese kamen bei dem Neubau des O'Swaldkais im Hamburger Hafen zum Einsatz. Der große Durchmesser der Kissen (80 cm) sollte Einzelspannungsspitzen, verursacht durch kleinere Steine, kompensieren. Für den Einbau der Kissen wurden diese am Bewehrungskorb der Schlitzwand befestigt. Nach dem Einstellen des Bewehrungskorbes in den Schlitz wurden die Erddruckkissen mit Hilfe eines Klappmechanismus an das anstehende Erdreich angedrückt. Weitere Details der Ausführung sowie zur Auswertung der Messungen sind in MAYBAUM (1996) ausführlich beschrieben.



Abb. 7: Ansicht des großen Totalspannungsgebers (\varnothing 80 cm) [GATTERMANN et al., 2010]

Für das gleichzeitige Messen von Erd- und Porenwasserdruck wurden u. a. beim Neubau des Container Terminals Altenwerder kombinierte, spatenförmige Spannungsgeber der Firma GLÖTZL (Rheinstetten) eingesetzt. Diese wurden durch eine Bohrung auf die gewünschte Tiefe abgeteuft und unterhalb des Bohrrohres ca. 50 cm in den ungestörten Boden eingepresst. [GATTERMANN et al., 2010]



Abb. 8: Einpressbarer kombinierter Spannungsgeber [GATTERMANN et al., 2010]

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Bestimmung der Boden-Fluid-Bauwerk-Interaktionen bei Offshore-Windenergieanlagen wurde für die Offshore-Plattform FINO3 (weitere Informationen auf www.fino3.de) eine geotechnische Messstation für Offshore-Gründungsstrukturen (GEMSOGS) entwickelt, mit welcher u. a. Erd- und Porenwasserdrücke direkt am Bauwerk gemessen werden können. Der Aufbau sowie die Funktionsweise der GEMSOGS sind eingehend in BERNDT et al. (2008) dargestellt. Eine Einsatzmöglichkeit der GEMSOGS im Hafenbau zeigt

die Abbildung 10, bei welcher die Messstationen beidseitig in eine Doppeltragbohle integriert sind.



Abb. 9: Aufbau eines GEMSOGS

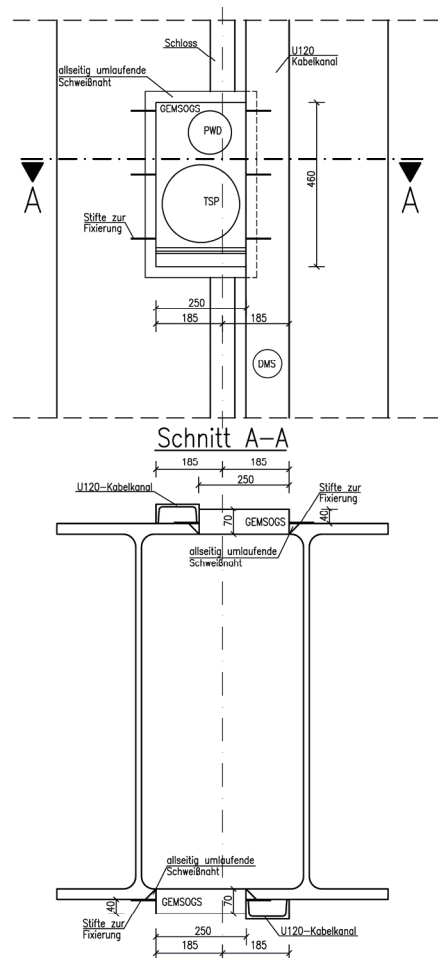


Abb. 10: Aufbau und Einsatzmöglichkeit eines GEMSOGS zur Bestimmung der Erddruckentwicklung vor und hinter einer Tragbohle [GATTERMANN et al., 2010]

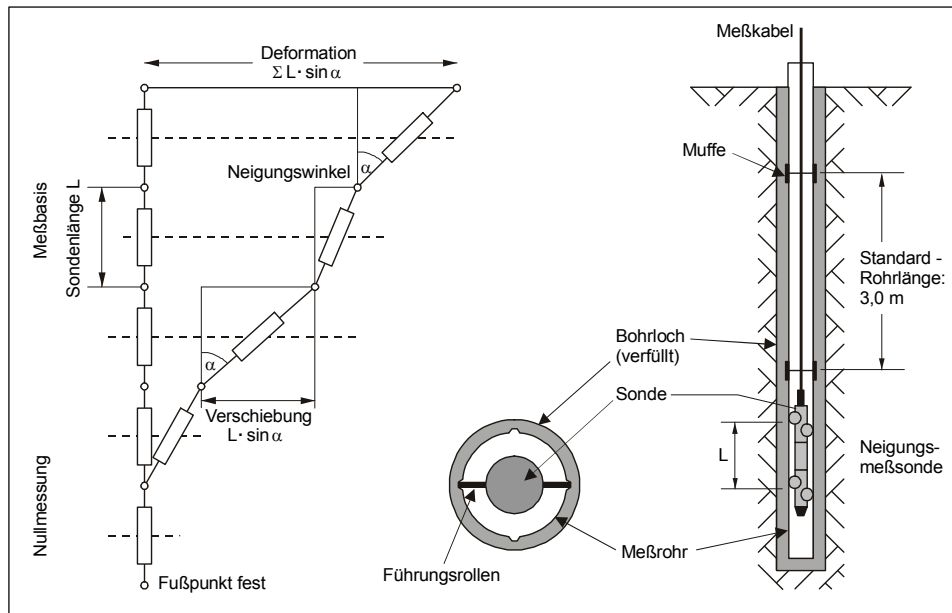


Abb. 11: Verfahren der Inklinometermessung [GLÖTZL, 1994]

Neigungsmessungen

Die Neigungen von einzelnen Elementen der Kaikonstruktion, wie z. B. der Tragbohlen oder Schräganker, können mit Hilfe von Inklinometermessungen ermittelt werden. Hierzu ist es notwendig, an den zu untersuchenden Elementen quadratische Stahlprofile anzubringen, welche als Führungskanal der Inklinometermesssonde dienen. Frühere Versuche mit handelsüblichen Kunststoff-Messrohren waren im Hafenanbau nicht von Erfolg, da diese nicht die nötige Robustheit aufwiesen.

Zur Erfassung der Neigung wird mit der Inklinometer-sonde das Messrohr befahren und in definierten Abständen der Neigungswinkel gemessen. Verbunden zu einem Polygonzug stellen diese Messwerte den Neigungsverlauf des Messrohres am Bauteil dar. Weiterführende Informationen zum Messverfahren sowie zum Auswerteverfahren sind GATTERMANN (1998) zu entnehmen.

Spannungsmessungen

Über die Längenänderung eines Bauteils kann unter Einbeziehung der Querschnittswerte und des E-Moduls die Normalkraft berechnet werden. Dehnungen und Stauchungen können im Kaianlagenbau mit Hilfe des Gleitmikrometers gemessen werden. Hierbei wird mit der Gleitmikrometersonde ein am Bauteil kraftschlüssig angebrachter Führungskanal befahren, welcher im Ausgangszustand in Abständen von einem Meter mit Messmarken ausgestattet ist. Der sich über die Zeit ändernde Abstand zwischen zwei Messmarken wird mit der Sonde durch einen eingebauten Wegaufnehmer gemessen. Pro Meter kann eine Messgenauigkeit von 0,001 mm erzielt werden. [GATTERMANN et al., 2010]

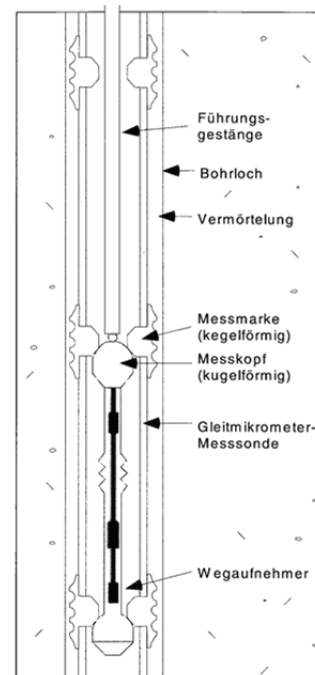


Abb. 12: Funktionsweise Gleitmikrometer [THUT et al., 1999]

Bisher konnte dieses Verfahren nur bei Ortbetonpfählen, durch die Befestigung des Messrohres am Bewehrungskorb, sowie bei Klappankern erfolgreich eingesetzt werden. Versuche dieses Verfahren auch bei geramten Strukturen einzusetzen, scheiterten bisher an der Herstellung eines kraftschlüssigen Verbundes zwischen Messmarke und Bauteil. Dieser muss entsprechend weiterentwickelt werden, so dass auch trotz des hohen Energieeintrags während des Rammvorganges die Kraftschlüssigkeit gewährleistet bleibt.

Eine Alternative zum Gleitmikrometerverfahren bietet die Applizierung von Dehnungsmessstreifen (DMS) am Bauteil selbst. Vorteil hierbei ist, dass die Messungen kontinuierlich ausgeführt werden können und keine händischen Messungen mehr notwendig sind. Nachteil beim Einsatz von DMS war bisher die Empfindlichkeit der Geber gegenüber äußeren Einflüssen. So konnten die DMS nur nach dem Rammvorgang am noch zugänglichen Teil des Bauteils appliziert werden. Seit der Weiterentwicklung des Verfahrens der Applizierung und Einhausung der DMS am IGB-TUBS im Zuge der Erweiterung des Europakais (LP5) in Hamburg sowie des Neubaus des JadeWeserPorts in Wilhelmshaven ist es möglich, die DMS über die gesamte Bauteillänge verteilt so anzubringen, dass diese vor dem Energieeintrag des Rammes und langfristig vor dem Wasserdruck geschützt sind. Im Gegensatz zum Gleitmikrometerverfahren sind allerdings nur Dehnungsmessungen an den Applikationspunkten möglich. Das Materialverhalten zwischen den Punkten wird nicht betrachtet.

Näheres zu diesem Verfahren sowie zur Auswertung bereits durchgeführter Messungen sind u. a. BRUNS et al. (2011) zu entnehmen.



Abb. 13: applizierter DMS, wasserdichter Verschluss [BRUNS et al., 2011] und Einhausung

Bei der Weiterentwicklung der Messtechnik, vor allem im Hinblick auf einen Einsatz als Monitoringsystem eines LCEs, muss auf die Langlebigkeit der einzelnen Komponenten geachtet werden. Nicht nur die hohen Energieeinträge während der Bauphase muss die Messtechnik schadlos überstehen, sondern auch die zeitlichen Degradationsprozesse über die Lebensdauer des zu untersuchenden Bauwerks. Verbesserungen in der Applizierung und somit dem dauerhaften Erreichen von kraftschlüssigen Verbindungen zwischen Messgebern und Bauteil sind anzustreben. Zudem ist auf die Anordnung der Messtechnik vermehrt zu achten. Messgeber sollten an den zuvor ermittelten Schwachpunkten der Konstruktion angebracht werden, um aussagekräftige Ergebnisse über den Zustand des Bauwerkes zu erhalten.

Weiterhin muss bereits in der Planungsphase darauf geachtet werden, dass die Messdatenerfassung über den gesamten Lebenszyklus uneingeschränkt möglich ist. So müssen z. B. die Führungskanäle der Inklinometer- oder Gleitmikrometersonden so in die Gesamtkonstruktion integriert werden, dass auch nach Baufertigstellung die Zugänglichkeit und Befahrbarkeit mit den Sonden gewährleistet ist.

5. Zusammenfassung

Das Verständnis des Gesamtsystems Bauwerk-Boden-Fluid muss durch weitere Forschungsarbeit vervollständigt werden, um dieses Wissen in der MIU-Strategie bzw. einem gesamten LCE-Konzept zu integrieren. Hierzu ist es wichtig, neue Hafeninfrastukturanlagen mit geeigneten Monitoringsystemen auszustatten, Messwerte über den gesamten Lebenszyklus zu sammeln und den Forschungseinrichtungen zur Verfügung zu stellen. Über die Auswertung neuer Daten, Daten aus bisherigen Bauwerksinspektionen und baubegleitenden Messungen kann das Systemverständnis verstärkt werden und Instandhaltungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen können rechtzeitig eingeplant und durchgeführt werden.

Literatur

Berndt, U.; Gattermann, J.; Stahlmann, J.; 2008, *Erfolgreicher Einsatz der GEMSOGS bei der Rammung des Monopiles von FINO3*, in ‚Messen in der Geotechnik 2008‘, Fachseminar am 23.-24. Oktober 2008 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 87, S. 273-292

Bruns, B.; Gattermann, J.; Stahlmann, J.; 2011, *Einfluss der Verformung auf die messtechnisch erfassbare Lastabtragung von Schrägankern*, in ‚Pfahl-Symposium 2011‘, Fachseminar am 17.-18. Februar 2011 in Braunschweig, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 94, S. 95-115

Budelmann, H.; Dinkler, D.; Rolfes, R.; Schaumann, P.; 2009, *Strategien und Methoden des Life-Cycle-Engineerings für Ingenieurbauwerke und Gebäude*, Forschungsverbundantrag zum NTH-Projekt-Bauingenieurwesen, Braunschweig-Hannover

Budelmann, H.; 2010, *NTH-Bau: Strategien und Methoden des Life-Cycle-Engineering für Ingenieurbauwerke und Gebäude*, Vortrag auf der Eröffnungsveranstaltung des Forschungsprojektes „Life-Cycle Engineering - NTH-Bau LCE“ am 06.09.2010, Braunschweig

CUR-Publication 211E ‚*Handbook Quay Walls*‘; 2005, Center for Civil Engineering Research and Codes (CUR), Gouda, the Netherlands

DIN 25424, Teil 1, *Fehlerbaumanalyse – Methode und Bildzeichen*, Deutsche Norm, 1981

Gattermann, J.; 1998, *Interpretation von geotechnischen Messungen an Kaimauern in einem Tidehafen*, Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 59

Gattermann, J.; Bruns, B.; Stahlmann, J.; 2010, *Der Weg zum optimalen Messkonzept zur Bestimmung des Spannungs-Verformungsverhaltens von Tiefwasserka- jen*, in ‚Messen in der Geotechnik 2010‘, Fachseminar am 18.-19. Februar 2010 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 92, S. 179-195

Girmscheid, G.; Lunze, D.; 2008, *Paradigmenwechsel in der Bauwirtschaft – Lebenszyklusleistungen*, im Bauingenieur, Februar 2008, S.87-97

Glötzl, F.; 1994, *Digital-Inklinometer - Funktion und Anwendung*, in ‚Messen in der Geotechnik‘, Fachseminar am 26.-27. Mai 1994 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 44, S. 47-64

Horstmann, N.; 2011, *Zuverlässigkeits- und risikobasierte Monitoring-, Inspektions- und Unterhaltungsstrategie als integraler Bestandteil von Life-Cycle-Bemessungs- und Optimierungsverfahren*, State of the Art-Report zum Forschungsvorhaben NTH-Bau Life-Cycle-Engineering, Arbeitsprogramm 3 – MIU-Strategie, Forschungszentrum Küste, Hannover (unveröffentlicht)

Maybaum, G.; 1996, *Erddruckentwicklung auf eine in Schlitzwandbauweise hergestellte Kaimauer*, Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 52

Stahlmann, J.; Bruns, B.; 2011, *Anschluss von Schrägpfählen an Kaianlagen – Messergebnisse vom JadeWeserPort*, in ‚Stahl im Wasserbau‘, Fachseminar am 29.-30. September 2011 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 95, S. 205-220

Stahlmann, J.; Gattermann, J.; Kluge, K.; 2007, *FINO3-Forschungsansätze für Offshore Windenergieanlagen*, in ‚Pfahl-Symposium 2007‘, Fachseminar am 22.-23. Februar 2007 in Braunschweig, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 84, S. 207-233

Thut, A.; Alonso, E.; Lloret, A.; Amstad, Ch.; Kovari, K.; Lunardi, P.; 1999, *Weltweite Erfahrungen mit dem Gleitmikrometer in der Geotechnik*, in ‚Beiträge zum 14. Christian Veder Kolloquium – Die Beobachtungsmethode in der Geotechnik‘, Mitteilungen der Gruppe Geotechnik, Technische Universität Graz, Heft 4, S. 107-132

Anschriften der Autoren:

Dipl.-Ing. U. Berndt, u.berndt@tu-bs.de
AD Dr.-Ing. J. Gattermann, j.gattermann@tu-bs.de
Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann, j.stahlmann@tu-bs.de
Institut für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 51b
38106 Braunschweig
www.igb-tubs.de

Dipl.-Ing. N. Horstmann, horstmann@fzk-nth.de
Forschungszentrum Küste
Merkurstraße 11
30419 Hannover
www.fzk-nth.de