

**GEOTECHNISCHE ASPEKTE BEIM BAU  
VON TIEFWASSERHÄFEN IN NORDDEUTSCHLAND**

von

Joachim Stahlmann<sup>1</sup>  
Jörg Gattermann<sup>2</sup>  
Christian Missal<sup>3</sup>  
Jürgen Schmitt<sup>4</sup>

**ABSTRACT**

The consistently growing container handling leads to an increase in demand of mooring areas. The movement of ships, the foundation soil and changing tide cause different kinds of loading for the quay wall construction. In addition to geotechnical measuring, numerical calculations are made to figure the load bearing behaviour of different quay wall designs. In the evaluation of numerical calculations differences to common approaches show up.

**1. EINLEITUNG**

Die Anforderungen an Kajenkonstruktionen sind in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegen. Dies wird insbesondere den immer größer werdenden Containerschiffen und dem Hochwasserschutz geschuldet. Die aktuelle Containerschiffgeneration fasst inzwischen 11.000 TEU und hat bei einer Länge von 360 m einen Tiefgang von bis zu 16 m. Aus Gründen des Küstenschutzes vor Sturmfluten wird eine Höhe der Kajenkonstruktion von +7,50 mNN angestrebt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit von Geländesprüngen von bis zu 30 m.

Aufgrund des langfristig anzunehmenden steigenden Containerumschlags wurden zuletzt in den Häfen von Bremerhaven und Hamburg und zurzeit in Hamburg und Wilhelmshaven neue Schiffsliegeplätze gebaut.

---

<sup>1</sup> Prof. Dr.-Ing., Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Gaußstraße 2, 38106 Braunschweig

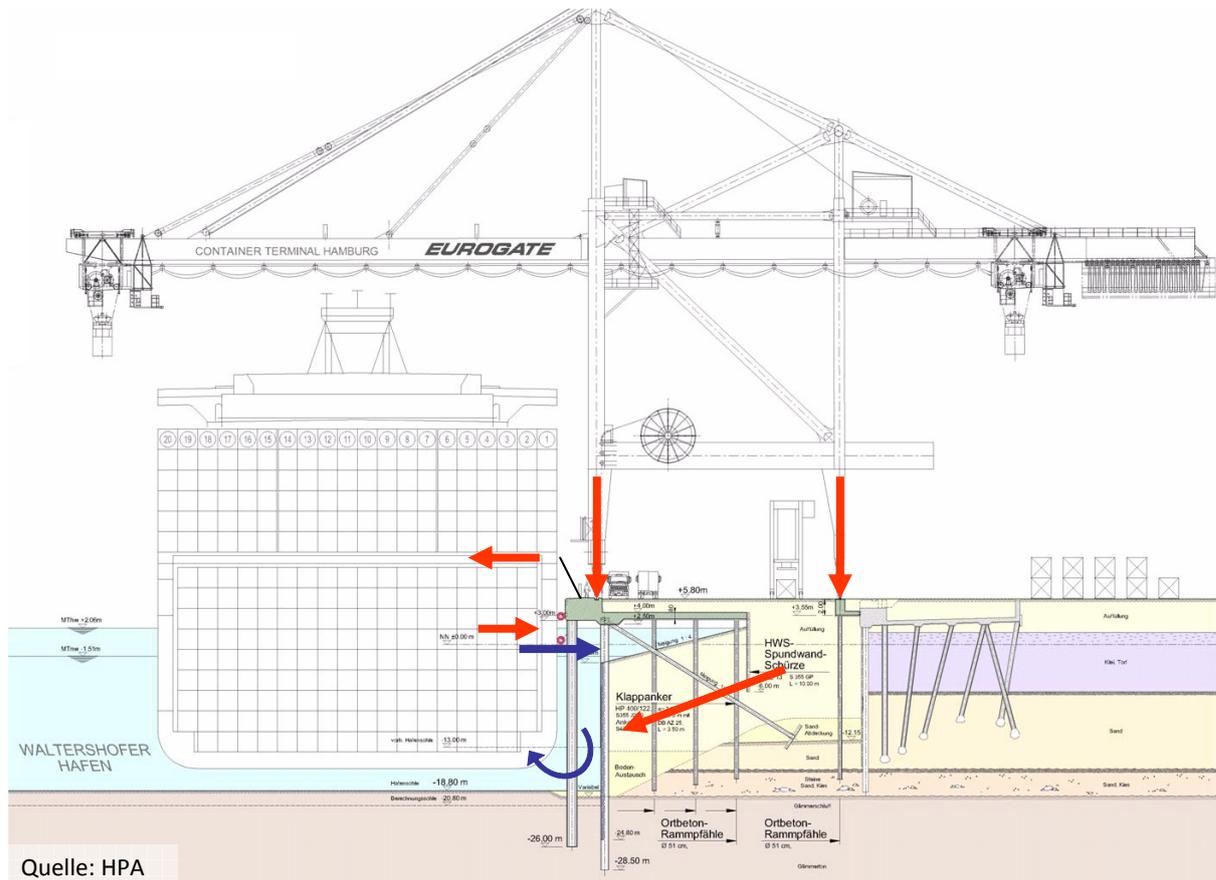
<sup>2</sup> AOR Dr.-Ing., Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Gaußstraße 2, 38106 Braunschweig

<sup>3</sup> Dipl.-Ing., Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Gaußstraße 2, 38106 Braunschweig

<sup>4</sup> Dipl.-Ing., Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Gaußstraße 2, 38106 Braunschweig

## 2. GEOTECHNISCHES ANFORDERUNGSPROFIL

In der Abbildung 1 werden die wesentlichen Einwirkungen auf die Kajenkonstruktion gezeigt. Zu den Schiffslasten (Anlegedruck und Pollerzug) kommen die Verkehrslasten aus den Containerbrücken und mögliche Stapellasten. Außerdem sind Erd- und Wasserdruck zu berücksichtigen. Falls eine besondere Exposition des Bauwerks vorliegt sind auch Wellenschlag oder Eisgang als Belastung für das Kajenbauwerk anzusetzen [EAU].



**Abbildung 1: Beispielhafter Gesamtquerschnitt einer Kajenkonstruktion mit den wesentlichen Belastungen**

Des Weiteren beruhen die geotechnischen Anforderungen auf eiszeitlich geprägten Baugrund. So sind die tragfähigen Schichten durch Schichten aus fluvialen Ablagerungen unterschiedlicher Mächtigkeit überlagert. In Hamburg steht als tragfähige Schicht der Glimmerton an. Weiter im Westen ist der sogenannte Lauenburger Ton zu durchörtern, um in die pleistozänen Sande mit den Tragelementen einbinden zu können. Die oberhalb der Tonschichten abgelagerten Sande sind geröllhaltig. Um das Einbringen der Pfähle zu erleichtern, ist ein Bodenaustausch möglich, der entweder großflächig oder mit verrohrten Bohrungen lediglich in der Rammtrasse durchgeführt werden kann.

Allen Kajen gemein ist der Einfluss der Tide und die Gefahr von Sturmfluten. Die aus diesen Ereignissen resultierenden Wasserüberdrücke gilt es zu verringern oder zu vermeiden. Hierzu wird weitverbreitet eine Kaje mit geöffneter Hauptwand und überbauter Böschung verwendet.

Eine weitere besondere Fragestellung ergibt sich aus der Tatsache, dass vor allem in Hamburg die neuen Hafenanlagen in Bereichen der Stadt errichtet werden, die auch schon zuvor für den Seehandel genutzt wurden. In diesen Fällen ist beim Neubau der Umgang mit der bestehenden Hafenanlage zu klären. Neben der Ertüchtigung oder dem Abriss und Neubau an selber Stelle kann der Neubau auch – sofern die Hafengebiete Größe dies erlaubt – vor dem Bestand errichtet werden.

### 3. TYPISCHE KAJENBAUWEISEN UND DEREN BESONDERHEITEN

Grundsätzlich können beim Bau von Kajen die Wasser- und Landbauweise unterschieden werden. Während bei der Landbauweise sämtliche Tragelemente auf dem Festland hergestellt werden und erst nach Fertigstellung der Kaje das Hafenbecken ausgehoben wird, werden bei der Wasserbauweise zunächst die kombinierte Spundwand und die Schräganker von einer Hubinsel aus hergestellt. Anschließend werden die landseitigen Auffüllungen aufgespült und der Kajenüberbau und die hintere Kranbahn erstellt.

#### 3.1 Hamburg, CT Altenwerder (Landbauweise)

Die Landbauweise kam beim Bau des Container Terminals Altenwerder in Hamburg zum Einsatz. Für den heutigen Ballinkai wurden die Tragbohlen in einen Schlitz eingestellt und nur wenige Meter zur besseren Vertikallastaufnahme gerammt. Der auf Mantelreibung tragende Schräganker wird in den gewachsenen Boden gerammt. Erst mit der Abaggerung zur Herstellung der Hafensohle wird die Konstruktion durch den Erd- und Wasserdruck belastet. Dies wird auch in der EAU 2004 für die Bestimmung der Erddruckumlagerung berücksichtigt.

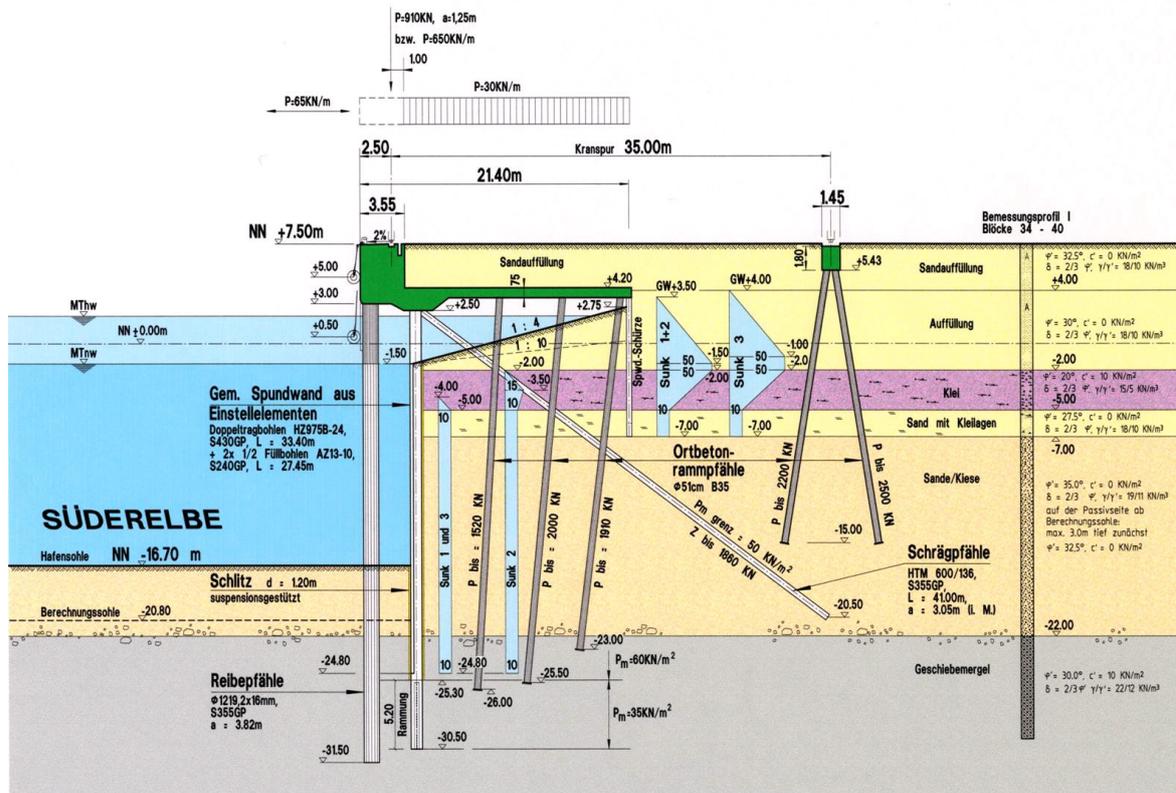


Abbildung 2: Querschnitt CT Altenwerder [Strom- und Hafenanbau, 1999]

### 3.2 Wilhelmshaven, JadeWeserPort (Wasserbauweise)

Der JadeWeserPort wird zurzeit in der Wasserbauweise erstellt. Hierbei wird die Tragkonstruktion bereits mit dem Beginn der Aufspülung durch den Erddruck belastet. Im Gegensatz zur Landbauweise entsteht so ein anderes Tragverhalten. Der JadeWeserPort entspricht im Wesentlichen der ‚Hamburger Bauweise‘ mit einer geöffneten Hauptwand. Die Böschung unter der Kaiplatte ist jedoch flach ausgebildet, so dass eventuelle Nachbaggerarbeiten vermieden werden können. Das Gewicht des massiven Kaikopfs wird durch den Versorgungskanal deutlich reduziert.

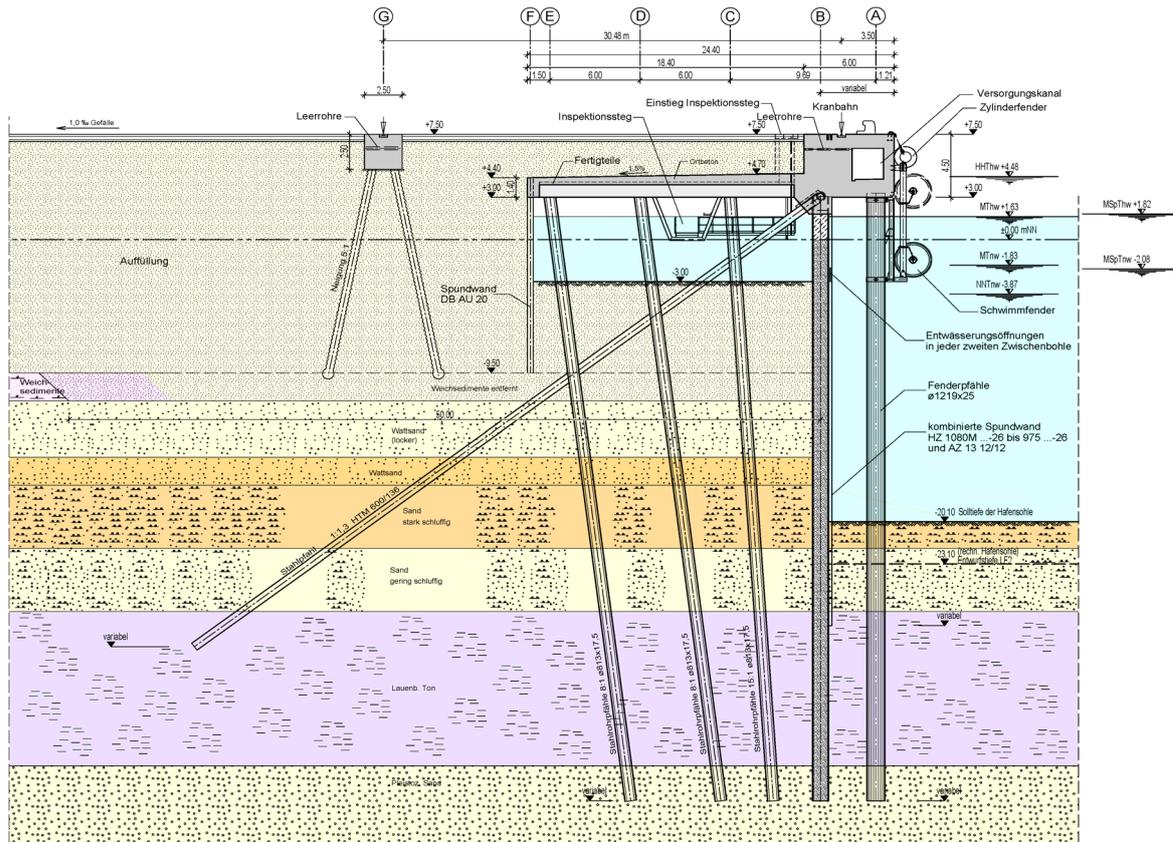


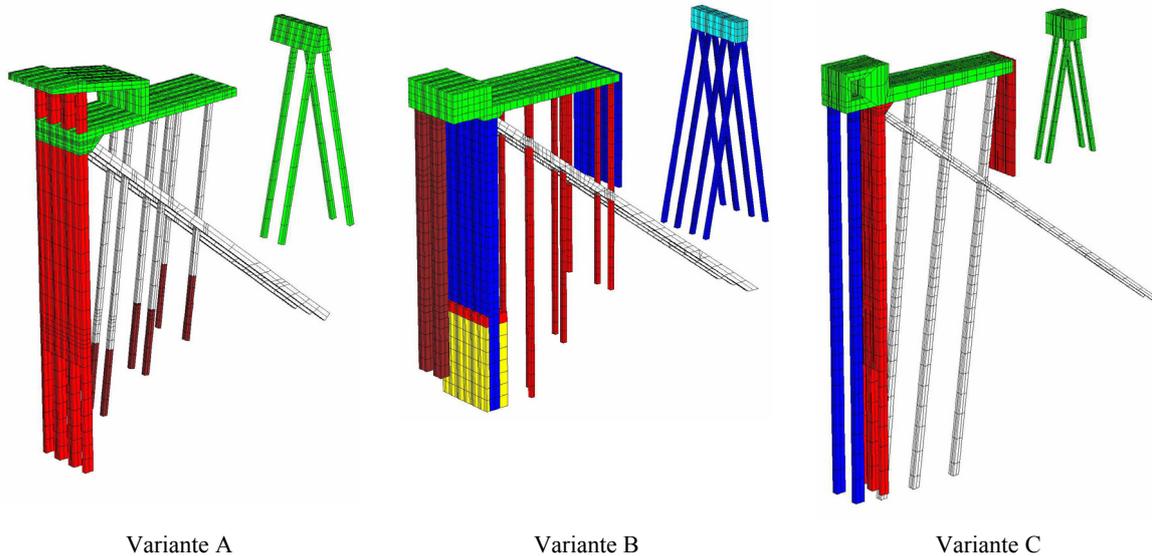
Abbildung 3: Regelquerschnitt JadeWeserPort [JWP, 2009]

## 4. NUMERISCHE BETRACHTUNGEN

### 4.1 Numerisches Modell

Um das Tragverhalten dieser statisch hochgradig unbestimmten Systeme besser zu verstehen, sind für die in Abbildung 4 dargestellten Varianten numerische Untersuchungen durchgeführt worden. Für die Berechnung der Modelle wurde das Programm FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) der Firma Itasca eingesetzt. Die Variante A zeigt eine Kajenkonstruktion mit offener Wellenkammer. Der Geländesprung zwischen Kaikopf und Hafensohle beträgt 27,0 m. In der Variante B wird eine Kajenkonstruktion mit einer vorgelagerten Reihe Reibepfähle dargestellt. Die wasserseitige Spundwand ist unterhalb der Kaiplatte bis -2,0 mNN geöffnet, der Boden ist

unterhalb der Kaiplatte mit einem Böschungswinkel von 1:4 ausgeräumt. Zwischen Kaikopf und Hafensohle beträgt der Geländesprung 24,2 m. Variante C weist ebenfalls eine vorgelagerte Reihe von Reibepfählen auf. Der Boden unterhalb der Kaiplatte ist bis -3,0 mNN ausgeräumt. Der Geländesprung beträgt 27,3 m zwischen Kaikopf und Hafensohle.



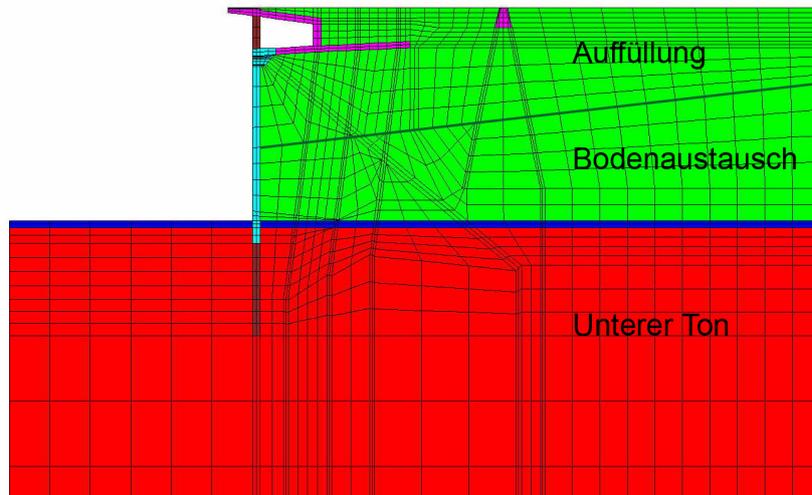
**Abbildung 4: Dreidimensionale Modelle der Tragkonstruktion der betrachteten Varianten**

Die unterschiedlichen Varianten können sowohl in Land- als auch in Wasserbauweise errichtet werden. Zur möglichst realitätsnahen Abbildung ergibt sich die Notwendigkeit, dass in den numerischen Simulationen nach dem Primärspannungszustand die entsprechenden Bauzustände berücksichtigt werden (Tabelle 1).

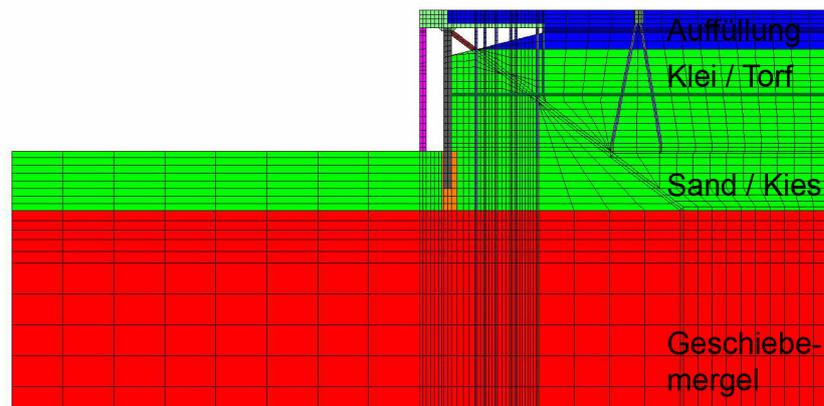
**Tabelle 1: Bauzustände der betrachteten Varianten**

Bauzustand	Variante A	Variante B	Variante C
0	Primärspannungszustand		
1	Herstellung Tragbohlen, Füllbohlen und Schrägpfähle	Herstellung Reibepfähle	Herstellung kombinierte Spundwand
2	Auffüllung bis UK Kaiplatte	Herstellung kombinierte Spundwand	Aushub
3	Herstellung Kaiplattenpfähle	Herstellung Schrägpfähle	Herstellung Schrägpfähle
4	Aufschüttung Kranbahn	Herstellung Kaiplattenpfähle, Spundwandschürze und Kranbahnpfähle	Auffüllung bis UK Kaiplatte
5	Herstellung Kranbahnpfähle	Herstellung Kaiplatte	Herstellung Kaiplattenpfähle und Spundwandschürze
6	Herstellung Wellenkammerfundament	Aufschüttung landseitig	Herstellung Reibepfähle
7	Herstellung Kranbahnbalken und Wellenkammerüberbau	Abbaggerung wasserseitig, Aushub Raum unter Kaiplatte	Herstellung Kaikopf und Kaiplatte
8	Auffüllung landseitig	Abbaggerung wasserseitig	Aushub Raum unter Kaiplatte
9			Kranbahnpfähle, -balken
10	Abbaggerung wasserseitig (-19,5 mNN - Hafensohle)	Abbaggerung wasserseitig (-16,7 mNN - Hafensohle)	Abbaggerung wasserseitig (-19,8 mNN - Hafensohle)

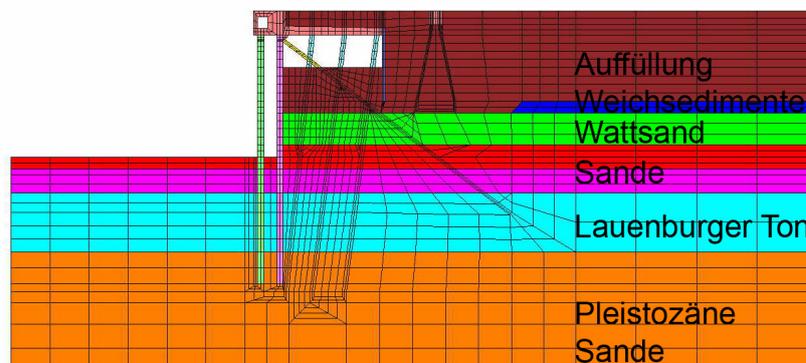
Das Materialverhalten der Bauteile der Kaikonstruktion wird mit dem linear-elastischen Stoffgesetz nach HOOKE abgebildet. Die Umrechnung der Steifigkeiten der einzelnen Tragelemente erfolgt in Anlehnung an die Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 ‚Numerik in der Geotechnik‘ der DGGT in äquivalente Rechteckquerschnitte. Die Bauteilgeometrien sind vereinfacht abgebildet worden.



Variante A



Variante B



Variante C

**Abbildung 5: Baugrundaufbau der betrachteten Varianten**

Zur Abbildung des Materialverhaltens des Bodens wird das linear-elastische – idealplastische Stoffgesetz von Mohr-Coulomb verwendet, da hierfür aus den vorliegenden Baugrundaufschlüssen die Eingangsparameter vollständig abgeleitet werden können. Der Baugrundaufbau ist aus der Abbildung 5 ersichtlich.

#### 4.2 Ergebnisse der numerischen Berechnungen

Die Abbildung 6 zeigt den Normalkraftverlauf in der Tragbohle für den Bauzustand 10 – Herstellung der Hafensohle. Der prinzipielle Normalkraftverlauf in der Tragbohle steigt vom Kaikopf beginnend zunächst durch das Eigengewicht der Konstruktion, dann zusätzlich durch die Reibung des landseitig anstehenden Bodens an. In Abhängigkeit vom Boden können unterhalb der Hafensohle die Normalkräfte durch Mantelreibung abgetragen werden. Ein wesentlicher Anteil der Normalkraft wird als Spitzendruck der Doppelbohle in den Baugrund abgetragen. Die am IGB · TUBS durchgeführten dynamischen Probelastungen zeigen jedoch das bis zu 70 % der Normalkraft über Mantelreibung abgetragen werden, so dass die numerischen Modelle hier weiter zu kalibrieren sind. Die in der Variante B im oberen Bereich der Tragbohle auftretende Zugkraft lässt sich durch die numerische Auswertung und das Verformungsverhalten der Tragbohle im Bereich der Spundwandfenster erklären.

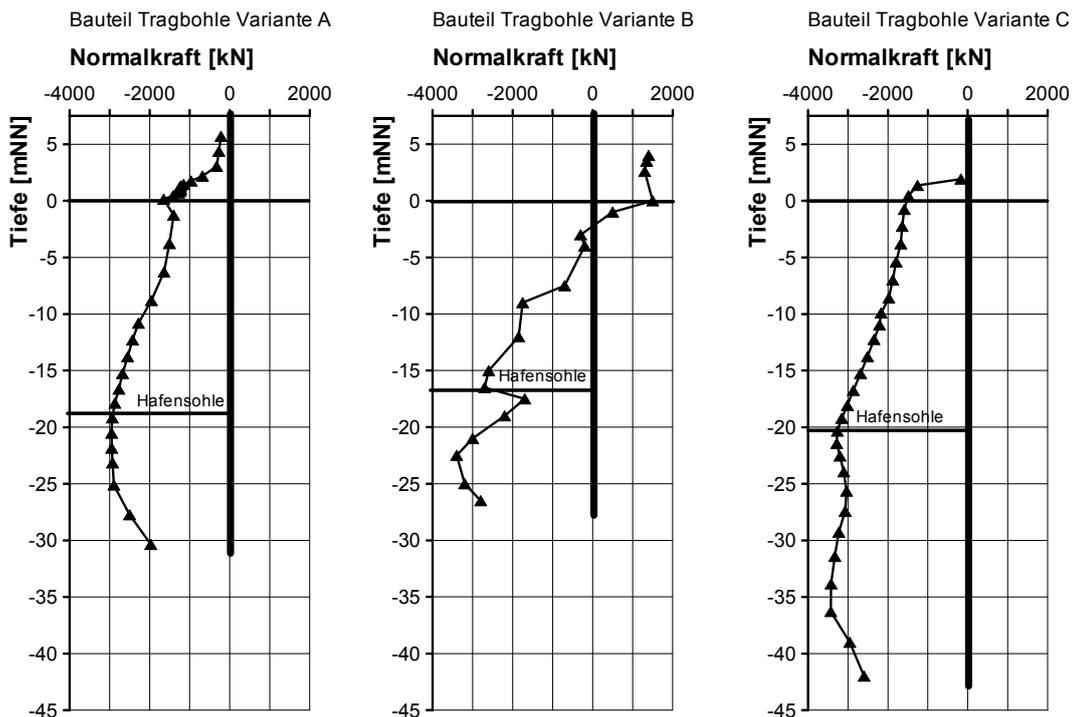
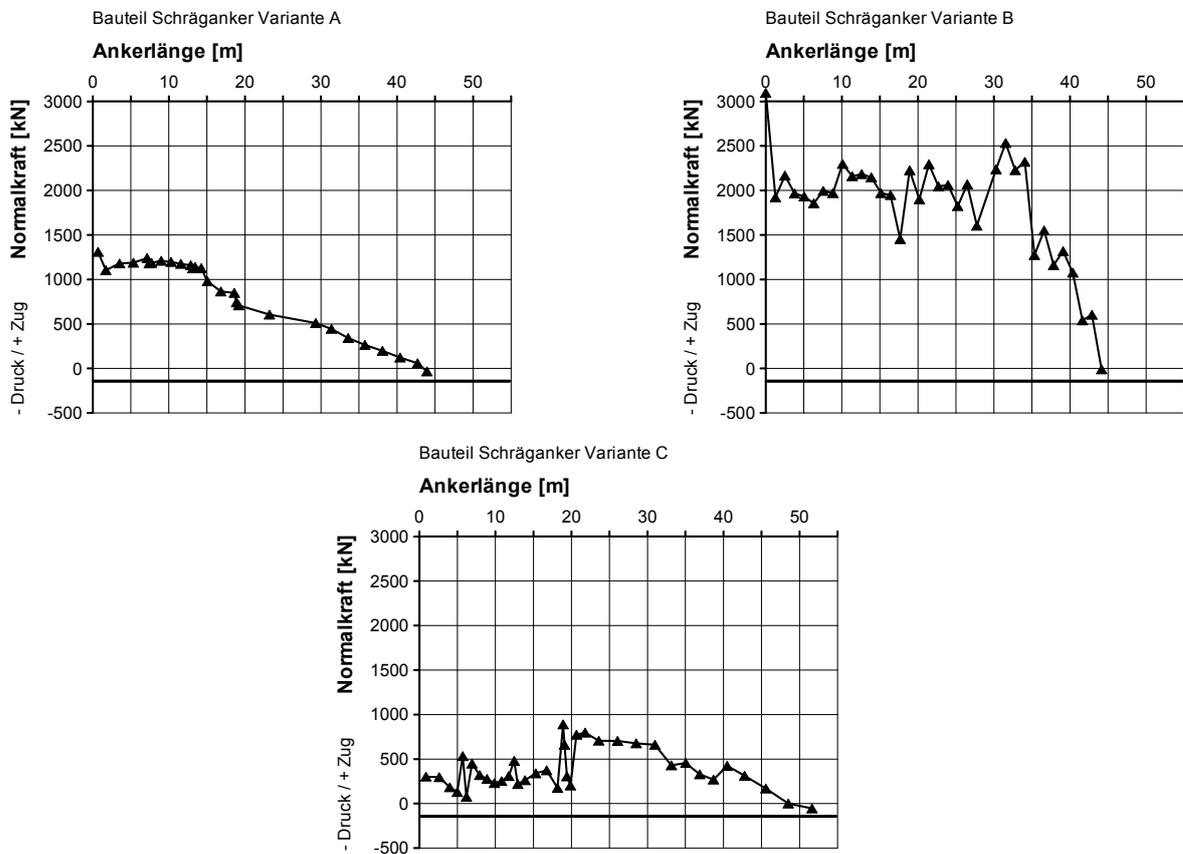


Abbildung 6: Normalkraftverlauf in der kombinierten Spundwand (Bauzustand 10)

Die Abbildung 7 zeigt den Normalkraftverlauf in den Schrägankern. Es ist auffällig, dass die Normalkraft nicht unbedingt am Ankerkopf am größten ist und dass der effektive Abbau der Ankerkräfte erst nach 15 m (Variante A) bis 30 m (Variante B) Ankerlänge erfolgt. Der Abfall der Normalkraft erfolgt unter Berücksichtigung der Bauteilgeometrien erst hinter dem, durch die Kaiplattenpfähle und die hintere Spundwandschürze

verdübelten, Bodenbereichs über Mantelreibung bis zum Ankerende. Das heißt, dass durch die Verdübelung des Bodens und die mögliche Verschiebung dieses Bodenpakets nach links weitere Zugkräfte in den Schrägpfahl eingetragen werden.



**Abbildung 7: Normalkraftverlauf im Schrägpfahl (Bauzustand 10)**

In der Abbildung 8 wird die horizontale Erddruckverteilung auf die kombinierte Spundwand nach Herstellung der Hafensohle betrachtet. Während sich in den Varianten A und C wasser- und landseitig ein nahezu gleichgroßer Erddruck einstellt, ist in der Variante B eine klassische Erddruckverteilung zu erkennen, so dass hier anzunehmen ist, dass die Auflagerbedingung für die Tragbohle eine unverschiebliche Einspannung ist. Für die Varianten A und C kann jedoch nicht von einer unverschieblichen Einspannung als Auflagerbedingung ausgegangen werden. Eine mögliche Erklärung wäre, dass in diesen Varianten das gesamte Bodenpaket mit der kombinierten Spundwand und dem Kranbahnbalken nach links verschoben wird.

Am Beispiel der Variante A werden in Abbildung 9 die horizontalen Verschiebungen nach Herstellung der Hafensohle (Bauzustand 10) dargestellt. Es ist darin zu erkennen, dass sich das gesamte Bodenpaket, das durch die Kaiplattenpfähle verdübelt wird, einschließlich der Tragbohle nach links verschiebt. Die größten Verschiebungen treten unterhalb der Grenze zwischen Auffüllung und Bodenaustausch auf. Bei einer – hier nicht dargestellten – Laststeigerung wird dieses Verhalten noch deutlicher. Die Vermutung, dass die Auflagerbedingung der Tragbohle verschieblich ist, wird durch dieses Verhalten gestärkt.

Die numerischen Modelle sind durch geotechnische Messungen weiter zu kalibrieren, um das Tragverhalten genauer abbilden zu können.

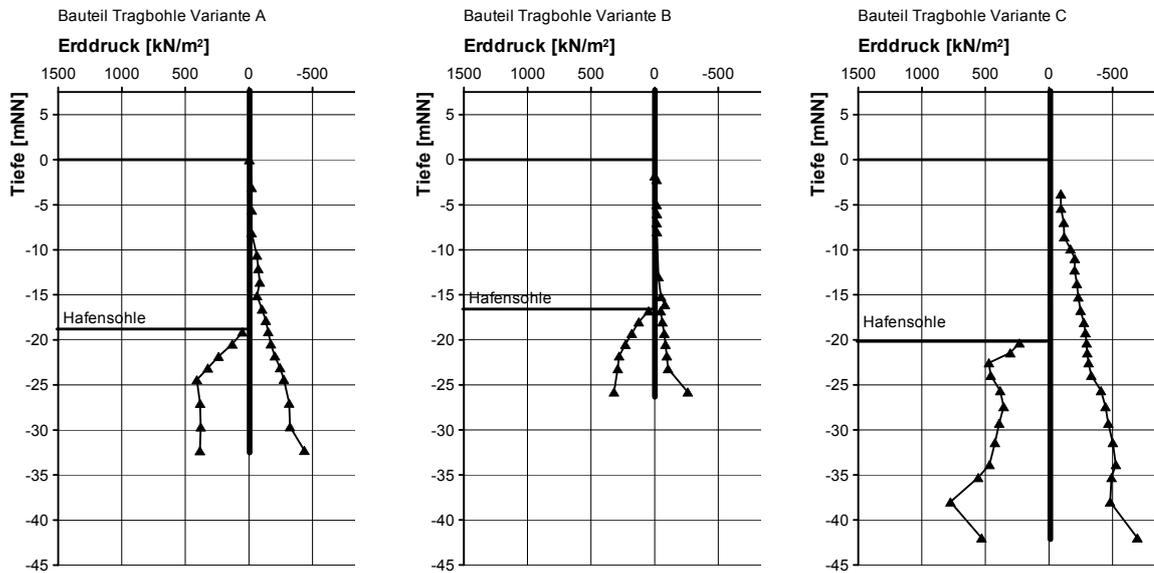


Abbildung 8: Erddruckverteilung der betrachteten Varianten (Bauzustand 10)

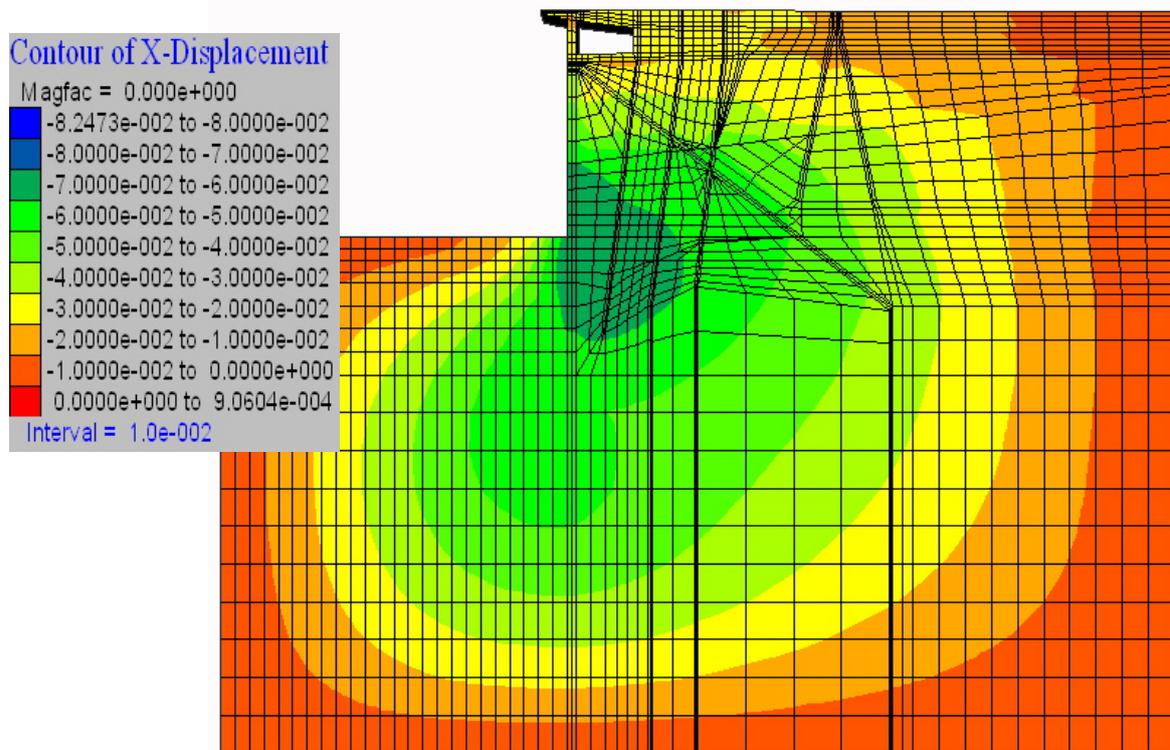


Abbildung 9: Horizontalverschiebungen der Variante A (Bauzustand 10)

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Der langfristig zunehmende Containerumschlag führt zu einem größer werdenden Bedarf an Schiffsliegeplätzen. Die Kaikonstruktionen unterliegen durch Schiffsverkehr, Baugrund und Tide unterschiedlichen Belastungen. Zur Abbildung des Tragverhaltens der verschiedenen Bauweisen werden neben geotechnischen Messungen auch numerische Berechnungen durchgeführt. Die numerischen Ergebnisse weisen daraufhin, dass die Normalkraft der Schräganker erst außerhalb des verdübelten Bodenbereichs abgebaut wird. Außerdem kann die Auflagerbedingung der Tragbohle nicht unbedingt als unverschiebliche Einspannung angesehen werden.

## 6. SCHRIFTTUM

- AMT FÜR STROM- UND HAFENBAU, Hamburg Container Terminal Altenwerder, Neubau Kaimauer 1. Bauabschnitt, Firmenprospekt, 1999
- BERGS, T., Untersuchungen zum Verformungs- und Lastabtragungsverhalten einer Kaikonstruktion, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, 78, Dissertation, 2005
- BOLEY, C., MORGEN, M., FRITSCH, M., PIEPENBREIER, O., STAHLMANN, J., Numerische Untersuchungen zum Einfluss der Erddruckabschirmung durch Pfähle bei Kaimauern, Kaimauern - Messungen und Numerik -, Gemeinsamer Sprechtag der Hafentechnischen Gesellschaft und der TU Hamburg-Harburg am 01. Juni 2004 in Hamburg, 7, S. 131-150, 2004
- EAU, Empfehlungen des Arbeitskreises 'Ufereinfassungen' Häfen und Wasserstraßen, Herausgegeben vom Arbeitsausschuss 'Ufereinfassungen' der Hafentechnischen Gesellschaft e.V. und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V., 10. Auflage, Verlag Ernst & Sohn Berlin, ISBN: 3-433-02852-4, 2005
- FRITSCH, M., GATTERMANN, J., STAHLMANN, J., Nachweis des vertikalen Gleichgewichts von Kaimauern aus dynamischen Probelastungen im Endzustand, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Pfahlsymposium 2005, 24.-25.02.2005 in Braunschweig, 80, S. 71-86, 2005
- JADEWESERPORT, JadeWeserPort Realisierungs GmbH & Co. KG, [www.jadeweserport.de](http://www.jadeweserport.de), 2009
- STAHLHUT, O., Belastung einer Kaimauer durch wechselnde Wasserstände infolge Tide, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, 64, Dissertation, 2000
- STAHLMANN, J., FRITSCH, M., GATTERMANN, J., Besonderheiten bei der Lastabtragung moderner Kaianlagen, Kaimauern - Messungen und Numerik -, Gemeinsamer Sprechtag der Hafentechnischen Gesellschaft und der TU Hamburg-Harburg am 01. Juni 2004 in Hamburg, 7, S. 115-130, 2004
- STAHLMANN, J., GATTERMANN, J., MISSAL, C., SCHMITT, J., Moderne Kaimauerkonstruktionen im Anforderungsprofil norddeutscher Häfen, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Pfahlsymposium 2009, 19.-20.02.2009 in Braunschweig, 88, S. 43-67, 2009