

Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau

Sascha Henke

Die Arbeit mit dem Titel „Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau“ entstand im Rahmen meiner Promotion am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg. Sie wurde im Zeitraum von Juni 2005 bis Mai 2008 von mir als Stipendiat im Graduiertenkolleg „Seehäfen für Containerschiffe zukünftiger Generationen“ angefertigt, sodass ich im August 2008 meine Promotionsprüfung mit Auszeichnung bestehen konnte.

Kurzfassung:

Die Rammung von Pfählen beeinflusst den umgebenden Boden teilweise signifikant. Zusätzlich erfahren benachbarte oder gekreuzte Bauteile im Baugrund infolge der Pfahlrammung eine zusätzliche Beanspruchung oder Deformationen. Messungen am Europakai im Hamburger Hafen von *Gattermann et al.* (2005) haben beispielsweise ergeben, dass infolge der Rammung der Kaiplattenpfähle des Pfahlrostes die zuvor hergestellten Schrägpfähle, die durch die Kaiplattenpfähle gekreuzt wurden, derart große Verformungen erfahren haben, dass die Tragfähigkeit der Gesamtstruktur gefährdet war. Ein weiteres Messprogramm kann bei *Triantafyllidis* (1998) gefunden werden. Hierin werden Messungen an einer tiefen Baugrube am Potsdamer Platz in Berlin beschrieben. Diese Messungen zeigen, dass die maßgebende Verformung der Baugrubenwand aus der Rammung benachbarter Rüttelinjektionspfähle zur Auftriebssicherung der Unterwasserbetonsohle und nicht wie erwartet aus dem Lenzen der Baugrube resultierte.

Aufgrund dieser Erfahrungen werden in der Dissertation „Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau“ sowohl numerische Analysen zur Pfahlrammung mit Hilfe der Finite Elemente Methode als auch ein in-situ Messprogramm am Container-Terminal CT4 in Bremerhaven durchgeführt und ausgewertet. Insbesondere die numerische Simulation der Pfahlpenetration in den Baugrund ist notwendig, da bislang sowohl in der Forschung als auch in der Praxis kein belastbares Prognoseverfahren vorhanden ist, mit dem es möglich ist, den Einfluss einer Pfahlrammung auf den umgebenden Boden und angrenzende Bauwerke zu prognostizieren. In der Regel werden hierzu Messungen durchgeführt, die jedoch immer mit einem hohen Kostenaufwand verbunden sind und zudem nicht im Vorfeld einer Baumaßnahme, sondern erst im eigentlichen Baufortschritt durchgeführt werden können.

Zunächst wird in der oben genannten Dissertation auf die Grundlagen plastodynamischer Simulationen unter Verwendung eines hypoplastischen Stoffgesetzes unter Berücksichtigung intergranularer Dehnungen für trockene granulare Böden eingegangen. Für eine genaue Beschreibung des verwendeten hypoplastischen Stoffgesetzes sei auf *von Wolffersdorff* (1996), *Herle* (1996) und *Niemunis und Herle* (1997) verwiesen. Anhand diverser Berechnungsbeispiele wird die Notwendigkeit einer anelastischen Simulation der Pfahlrammung mittels FEM aufgezeigt.

Nachfolgend werden räumliche Analysen zur Pfahlrammung mit Profilen unterschiedlichen Querschnitts durchgeführt. Hieraus lassen sich vielfältige Erkenntnisse gewinnen. So lässt sich eine Aussage zur Veränderung der wesentlichen Bodenkennwerte, wie Porenzahlen und Spannungen um den penetrierten Pfahl in Abhängigkeit des Einbringverfahrens (Eindrücken und Vibrationsrammung) und der Profilform (kreisrunde Vollquerschnitte und offene Stahlprofile) treffen. Die Ergebnisse hierzu sind zudem in verschiedenen Publikationen dargestellt, siehe *Henke und Grabe* (2006, 2007a, 2007b). Allgemein kann ausgesagt werden, dass der Einfluss auf die Porenzahlen wesentlich von dem Einbringverfahren abhängt: Wird der Pfahl eingedrückt, so entstehen starke Scherungen am Pfahlmantel, sodass direkt am Pfahlmantel Dilatanz wirksam wird. Das heißt es wird dort mit steigender Lagerungsdichte eine verstärkte Auflockerung erkennbar. Erst in größerem Abstand zum eindringenden Pfahl (größer als zweifacher Pfahldurchmesser) wird die erwartete Verdichtung des Bodens deutlich. Insgesamt ist der Einflussradius auf die Porenzahlen infolge des Eindrückens mit etwa dem 5 bis 10-fachen des Pfahldurchmessers zu quantifizieren. Ganz andere Ergebnisse werden infolge einer Vibrationsrammung erzielt. In diesem Fall wird der Boden um den gesamten Pfahl bis hin zur maximalen Verdichtung verdichtet. Zonen mit einer Bodenauflockerung sind nicht erkennbar, siehe Abbildung 1. Zudem ist der Einflussradius auf lediglich den zweifachen Pfahldurchmesser beschränkt.

Für offene Querschnitte sind zudem Aussagen bezüglich einer Verspannung im Inneren des Querschnitts möglich. Ein Eindrücken der Profile lässt die Neigung zur Ausbildung eines festen Bodenpfropfens erkennen, bei einer Vibrationsrammung dagegen ist dies nicht erkennbar, siehe *Henke und Hügel* (2007).

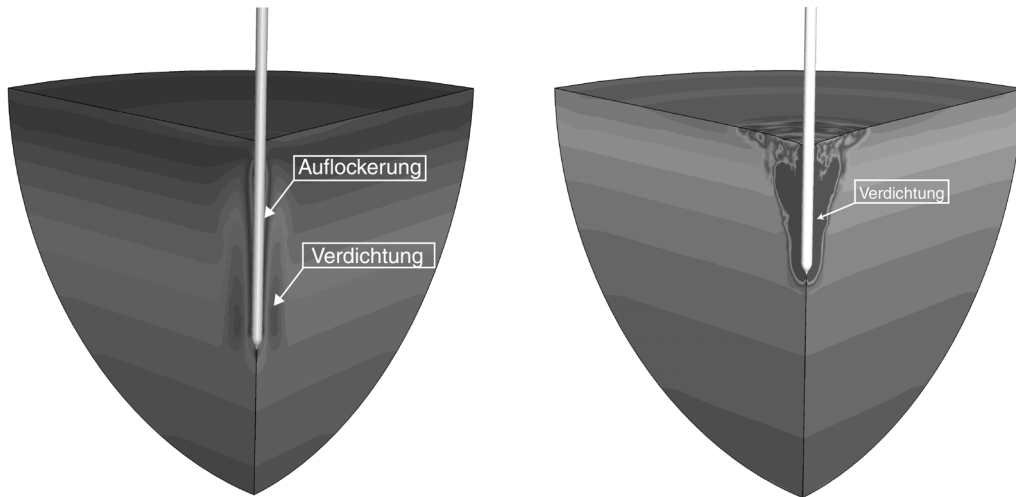


Abbildung 1: Konturplot der Porezahlverteilung um einen eingedrückten (links) bzw. einvibrierten (rechts) Pfahl

Die numerischen Untersuchungen werden anhand des am CT4 Bremerhaven während des Baubetriebs durchgeführten Messprogramms validiert. Im Rahmen dieses Messprogramms wurde ein Schrägpfahl mit drei über der Länge verteilten Beschleunigungsaufnehmern und Dehnungsmessstreifen (DMS) instrumentiert, die als verlorene Aufnehmer mit dem Schrägpfahl in den Boden gerammt wurden, siehe Abbildung 2.

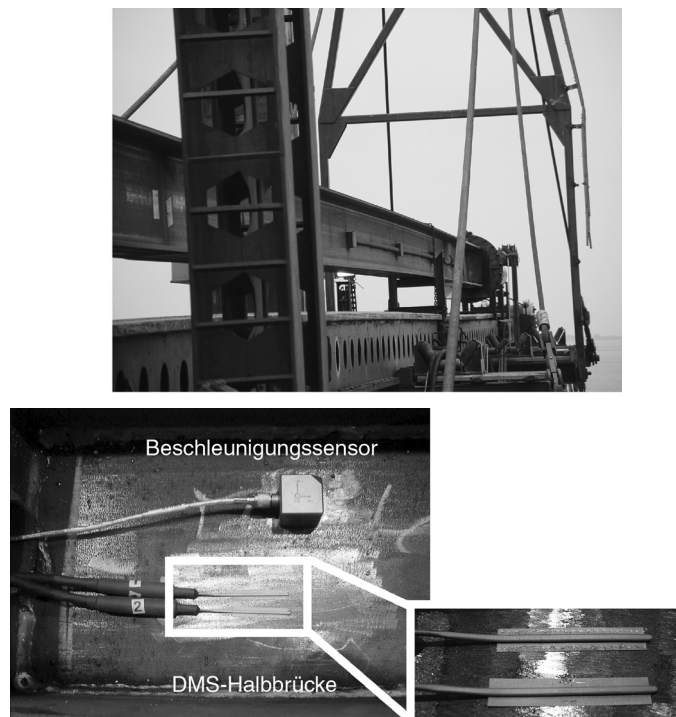


Abbildung 2: Messprogramm am Containerterminal CT4 Bremerhaven: links: instrumentierter Schrägpfahl; rechts: Detail der am Schrägpfahl applizierten Sensoren

Diese Aufnehmer dienten dazu, den Einfluss der Rammung der benachbarten Kaiplattenpfähle auf den bestehenden Schrägpfahl zu zeigen. Es kann anhand der Messergebnisse gezeigt werden, dass der Schrägpfahl sowohl durch das Vibrationsrammen als auch das Nachschlagen der Kaiplattenpfähle zu messbaren Schwingungen angeregt wird, siehe Abbildung 3.

Anhand der Messdaten lässt sich erkennen, dass die Schlagrammung einen etwa zehnfach größeren Einfluss auf den bestehenden Schrägpfahl hat als die Vibrationsrammung. Zudem wurde ein Kaiplattenpfahl mit drei gleichmäßig verteilten triaxialen Beschleunigungsaufnehmern und DMS instrumentiert, um zum einen das Eindringverhalten des Pfahls genauer zu charakterisieren und zum anderen eine Aussage bezüglich einer Übertragung der Beschleunigungen am Kaiplattenpfahl auf den benachbarten Schrägpfahl treffen zu können. Hiermit kann beispielsweise gezeigt werden, dass anhand der Dehnungs- und Beschleunigungssignale direkt auf die vorliegende Bodenschichtung geschlossen werden kann. Dies kann zukünftig unter bestimmten Bedingungen dazu genutzt werden, bereits direkt während der Rammung ein Werkzeug zu haben, mit dem es möglich ist, etwaige Hindernisse im Untergrund oder ähnliches zu erkennen. Dies würde es ermöglichen, daraufhin regelnd eingreifen zu können, damit ein möglichst optimaler Einbringprozess gewährleistet werden kann. Letztlich wurden ergänzende Messungen der Erschütterungen mit Hilfe von mehreren Geophonen in verschiedenen Abständen zum Pfahl sowohl während der Vibrationsrammung als auch während der anschließenden Schlagrammung durchgeführt. Eine ausführliche Darstellung des Messprogramms ist zum Beispiel in *Henke und Grabe (2007c)* oder *Henke (2008a, 2008b)* publiziert und kann dort nachgelesen werden.

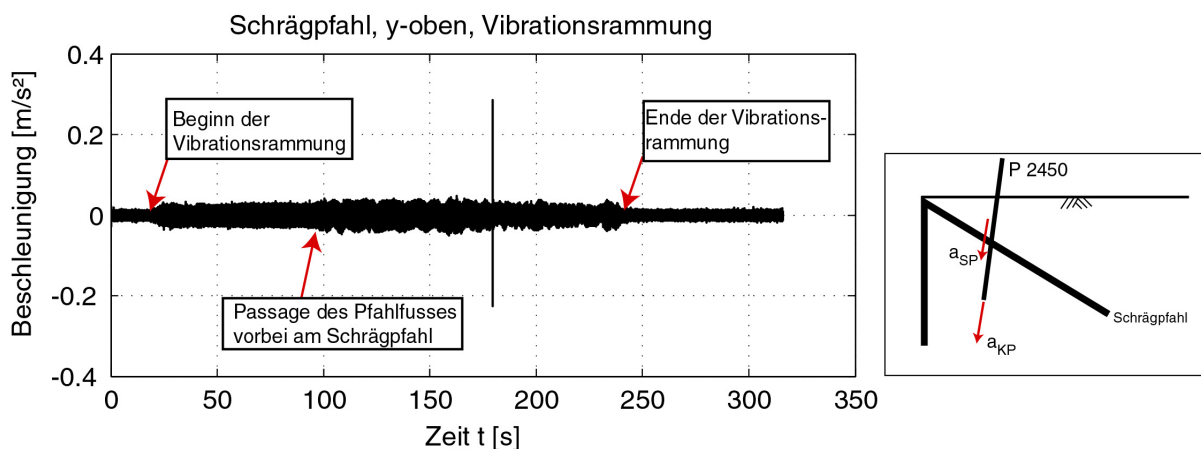


Abbildung 3: Beschleunigungen am Schrägpfahl infolge der Rammung eines kreuzenden Kaiplattenpfahls am CT4 Bremerhaven

Die aus den Messungen gewonnenen Daten dienen als Grundlage der Validierung der zuvor entwickelten numerischen Modelle. Es wird zunächst das Einvibrieren eines Peiner Stahlpfahls PSt 500/158, wie er am CT4 Bremerhaven als Kaiplattenpfahl verwendet wird, simuliert. Aus dieser Simulation werden die Schwingungen an der Geländeoberkante extrahiert und mit den Messdaten verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen. In einer weiteren Analyse wird die Passage des PSt 500/158 Profils vorbei an einem bereits im Boden befindlichen Querpfehl simuliert. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen FEM und Messergebnissen, sodass gezeigt werden kann, dass sich die numerischen Modelle dazu eignen, den Einfluss einer Pfahlrammung auf die Umgebung und angrenzende Bauteile zu prognostizieren.

Mit den nunmehr validierten Finite Elemente Modellen werden verschiedene Fallbeispiele betrachtet. So wird die Pfropfenbildung in geschlossenen Rohrquerschnitten in Abhängigkeit des Einbringverfahrens untersucht. Eingedrückte Pfähle neigen zur Pfropfenbildung, dynamisch eingebrachte Pfähle eher nicht, siehe *Henke und Grabe (2008a, 2008b)*. Diese Problematik wird zurzeit weitergehend untersucht und es werden Parametervariationen durchgeführt, um Aussagen über den Einfluss weiterer Parameter, wie Lagerungsdichte und Rohrdurchmesser auf die Neigung zur Pfropfenbildung zu treffen, siehe *Henke und Grabe (2009)*. In einer weiteren Untersuchung wird die Effizienz des von *Kleibl (2005)* entwickelte Einbringverfahren „gerichtetes Vibrationsrammen“ untersucht. Es kann gezeigt werden, dass durch dieses Verfahren im Vergleich zum herkömmlichen Vibrationsrammen zum einen die Erschütterungen um den Pfahl reduziert werden und zum anderen ein beschleunigter Eindringvorgang ermöglicht wird. In weiteren Fallbeispielen wird die Zusatzbeanspruchung benachbarter bzw. gekreuzter Pfähle infolge einer Pfahlrammung untersucht. Zunächst wird die Nachgründung im Zentrum einer bestehenden Pfahlgruppe simuliert. Hierbei zeigt sich, dass das Einbringverfahren und der Abstand zwischen bestehenden und neu gerammten Pfählen einen wesentlichen Einfluss auf die zusätzlichen Beanspruchungen, die die bestehende Gründung erfährt, haben. Weiterhin wird die Rammung kreuzender Pfähle betrachtet. In diesem Fallbeispiel wird ein Pfahl benachbart zu einem quer im Boden liegenden Pfahl installiert. Als Resultat dieser Untersuchung kann geschlossen werden, dass auch die Profilform und die Lagerungsdichte die zusätzliche Deformation des Querpfehls wesentlich beeinflussen. Es kann gezeigt werden, dass ein Vollprofil aufgrund seiner großen Pfahlfußfläche einen wesentlich stärkeren Einfluss auf das bestehende Bauteil ausübt als ein Peiner Stahlpfahl mit vergleichsweise kleiner Spitzendruckfläche, siehe *Henke (2008a, 2008b)* oder *Henke und Grabe (2008c)*.

Somit ist ersichtlich, dass der Abstand zum bestehenden Bauteil, die Lagerungsdichte des Bodens, das Einbringverfahren und die Profilform einen maßgeblichen Einfluss auf die Zusatzbeanspruchungen infolge einer Pfahlrammung haben. Dies wird abschließend in der Arbeit im Rahmen einer Parameterstudie weitergehend untersucht. Im Zuge dieser Parameterstudie wird die Erddruckerhöhung auf eine Wand infolge einer benachbarten Rammung untersucht. Es werden verschiedene Profile (HEM 200, PST 600/159, Rohrprofil mit Außendurchmesser $d_a = 61$ cm und zwei kreisrunde Vollprofile unterschiedlichen Durchmessers) in unterschiedlichen Abständen zur Wand in Böden unterschiedlicher Lagerungsdichte gerammt (Eindrücken und Vibrationsrammung). Aus diesen Analysen werden Bemessungshilfen gewonnen, die dem praktisch tätigen Ingenieur zukünftig ein hilfreiches Werkzeug zur Vorbemessung liefern, siehe zum Beispiel Abbildung 4.

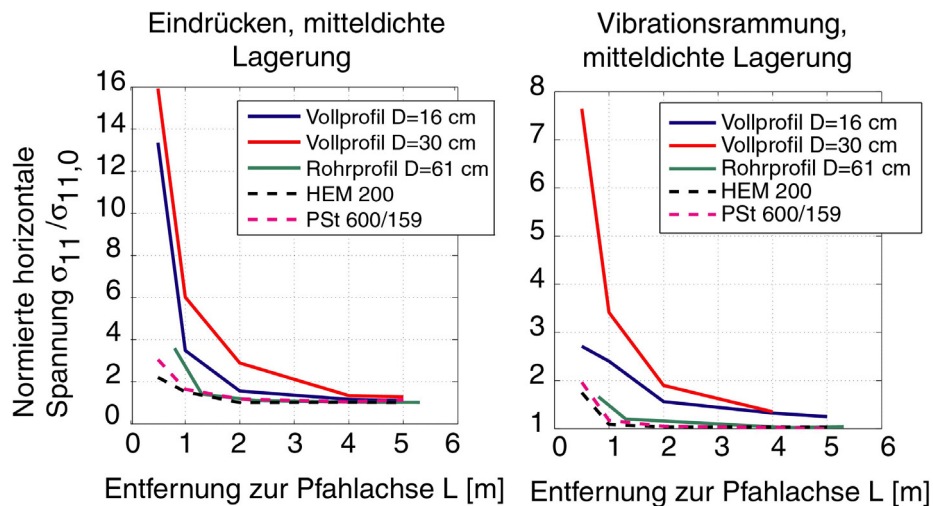


Abbildung 4: Bemessungshilfen aus der Parameterstudie bezüglich der Erddruckerhöhung auf eine Wand infolge einer benachbarten Pfahlrammung in mitteldicht gelagerten Sand, links: Eindrücken; rechts: Vibrationsrammung

Hiermit ist es möglich, bereits in der Planungsphase einer Baumaßnahme die zu erwartenden Zusatzbeanspruchungen auf bestehende Bauteile infolge einer benachbarten Rammung abzuschätzen und somit Aussagen dahingehend zu treffen, ob die Pfahlrammung einen schädigenden oder beeinträchtigenden Einfluss auf diese Bauteile ausübt, siehe Henke (2008b).

Somit kann resümierend gesagt werden, dass im Rahmen der Dissertation „Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau“ ein hilfreiches Werkzeug entwickelt wurde, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Penetration von Bauteilen unterschiedlichen Querschnitts in den Untergrund numerische zu simulieren und hieraus

Aussagen über den Einfluss der Rammung auf den umgebenden Untergrund und in der Nähe befindliche Bauteile zu treffen. Zudem ist es möglich, die numerischen Analysen anhand eines Vergleichs mit Messdaten zu validieren. Abschließend kann anhand verschiedener Fallbeispiele die Wirksamkeit dieses numerischen Tools gezeigt werden und hilfreiche Bemessungshilfen zur Abschätzung der Zusatzbeanspruchungen infolge einer Pfahlrammung können zur Verfügung gestellt werden.

Referenzen

Gattermann J., Fritsch M., Stahlmann J. (2005): Auswahl- und Einbaukriterien geotechnischer Messgeber zur Bestimmung des Normalkraftverlaufs der Wand/Verankerung bei Kaimauerkonstruktionen und deren Ergebnisse. Mitteilungen des Instituts für Geotechnik und Bodenmechanik der IGB-TUBS, Heft 80, 21-41.

Henke S., Grabe J. (2006): Simulation of pile driving by 3-dimensional Finite-Element analysis. Proceedings of 17th European Young Geotechnical Engineers' Conference, Zagreb, Croatia, ed. by V.Szavits-Nossan, Croatian Geotechnical Society, S. 215-233.

Henke S., Grabe J. (2007a): Simulation der Pfahleinbringung mittels dreidimensionaler Finite-Elemente Analysen. Vorträge zum 14. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 76, S. 155-166.

Henke S., Grabe J. (2007b): Simulation of pile installation by three-dimensional Finite Element analyses. Darmstadt Geotechnics, No. 15, Ed.: Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach. S. 179-192.

Henke S., Grabe J. (2007c): Messtechnische Untersuchung zur Pfahlherstellung während der Rammarbeiten am Container-Terminal CT IV Bremerhaven. Tagungsband zum HTG-Kongreß 2007 in Dresden, Hrsg. Hafenbautechnische Gesellschaft, S. 221-231.

Henke S., Hügel H.M. (2007): Räumliche Analysen zur quasi-statischen und dynamischen Penetration von Bauteilen in den Untergrund. Tagungsband zur 19. Deutsche Abaqus-Benutzerkonferenz in Baden-Baden. Artikel 2.13.

Henke S. (2008a): Numerische und messtechnische Untersuchungen zur Pfahlrammung. Tagungsband zum Workshop Seehäfen für Containerschiffe zukünftiger Generationen, Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 16, S. 133-172.

Henke S. (2008b): Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 18.

Henke S. und Grabe J. (2008a): Numerische Untersuchungen zur Ppropfenbildung in offenen Profilen in Abhängigkeit des Einbringverfahrens. Bautechnik, 85(8):521-529

Henke S. and Grabe J. (2008b): Numerical Investigation of Soil Plugging Inside Open-ended Piles With Respect to the Installation Method. Acta Geotechnica, 3(3):215-223

Henke S., Grabe J. (2008c): Numerical investigation of the interaction between inclined piles and newly driven piles in pile grillages. Proc. of 11th Baltic Sea Geotechnical Conference in Gdansk, S. 707-714, ed. by Z. Mlynarek, Z. Sikora and E. Dembicki, Polish Committee on Geotechnics & Gdansk University of Technology.

Henke S., Grabe J. (2009): Numerical simulations concerning the tendency of soil plugging in open-ended steel-piles. 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2009, Honolulu, Hawaii. Zur Veröffentlichung akzeptiert.

Herle, I. (1997): Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 142.

Kleibl A. (2005): Theoretische und experimentelle Untersuchungen des Wirkprinzips Gerichtetes Rütteln. Freiburger Forschungshefte, A881 Maschinenbau/Automation. Technische Universität Bergakademie Freiberg.

Niemunis A., Herle I. (1997): Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. Mechanics of cohesive-frictional materials. Vol. 2, S. 279-299.

Triantafyllidis T. (1998): Neue Erkenntnisse aus Messungen an tiefen Baugruben am Potsdamer Platz in Berlin. Bautechnik 75(3):133-154.

Von Wolffersdorff P.-A. (1996): A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. Mechanics of cohesive-frictional materials. Vol. 1, S. 251-271.

Dr.-Ing. Sascha Henke
Technische Universität Hamburg-Harburg
Institut für Geotechnik und Baubetrieb
Harburger Schloßstraße 20
21073 Hamburg
Email: sascha.henke@tu-harburg.de
Telefon: ++49/40/428783816