

Simulation von Herstellungseinflüssen auf Baugruben mittels der Finite-Elemente-Methode

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe, Dipl.-Ing. Sascha Henke, Dipl.-Ing. Björn Schümann
Institut für Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg-Harburg

ABSTRACT: Baubegleitende Messungen an Baugruben zeigen, dass in der Herstellung, z.B. bei der Rammung von Auftriebspfählen für die Baugrubensohle, erhebliche Verformungen des Baugrubenverbaus eintreten. Diese herstellungsbedingten Zusatzbeanspruchungen lassen sich derzeit kaum zutreffend erfassen und führen in der Ausführung oft zu Erstaunen. Ziel des Beitrags ist es, ein erstes Simulationsmodell der herstellungsbedingten Beanspruchung des Baugrunds und der Baugrube im Nahfeld zu Rammarbeiten vorzustellen. Am Beispiel der am Potsdamer Platz gemessenen Zusatzverformung infolge der RI-Pfahl-Herstellung wird die Nützlichkeit der numerischen Untersuchungen erläutert. Allerdings sind zukünftig noch erhebliche Anstrengungen erforderlich, um daraus Empfehlungen für die Herstellung von Baugruben abzuleiten.

1 EINLEITUNG

TRIANAFYLLIDIS (1998) berichtet über Messungen an Baugruben am Potsdamer Platz in Berlin. Die Baugrube zeichnet sich durch eine große Baugrubentiefe aus. Als Abdichtung gegenüber Grundwasser wird eine Unterwasserbetonsohle mit einvibrierten Rüttelinjektions-(RI)-Pfählen realisiert. Die Messungen zeigen, dass die maßgebenden Verformungen der Baugrubenwände nicht wie erwartet aus dem Lenzen der Baugrube, sondern aus dem Einvibrieren der RI-Pfähle resultieren. TRIANAFYLLIDIS vermutet eine Bodenverflüssigung als Ursache der unvorhergesehenen Zusatzverformungen.

QUAST UND ZANDER (2006) erklären die gemessenen Zusatzverformungen des Verbaus bei den von ihnen untersuchten Baugruben durch eine Auflockerung des Bodens infolge Lufteinsatz beim Düsenstrahlverfahren. Die tatsächliche Ursache ist ungeklärt.

Weitere Beispiele für Zusatzbeanspruchungen, die aus Herstellungseffekten resultieren, sind im Hafenausbau zu finden. So werden im norddeutschen Raum die Kaianlagen häufig auf Pfahlrosten gegründet, die sich durch eine Vielzahl kreuzender Pfähle auszeichnen. Im Laufe der Herstellung werden kreuzend zu den bereits installierten Schrägpfählen die Kaiplattenpfähle gerammt, die die bestehenden Schrägpfähle insofern beeinflussen, dass diese eine zusätzliche Durchbiegung erfahren. Dies konnte messtechnisch zum Beispiel am Europakai von GATTERMANN ET AL. (2005) festgestellt werden, siehe hierzu auch Bild 1. Hierbei treten im Schrägpfahl Zusatzdurchbiegungen von über 20 cm infolge der Ortbetonpfahlrammung auf, so dass sogar als Folge das Einbringverfahren umgestellt werden musste.

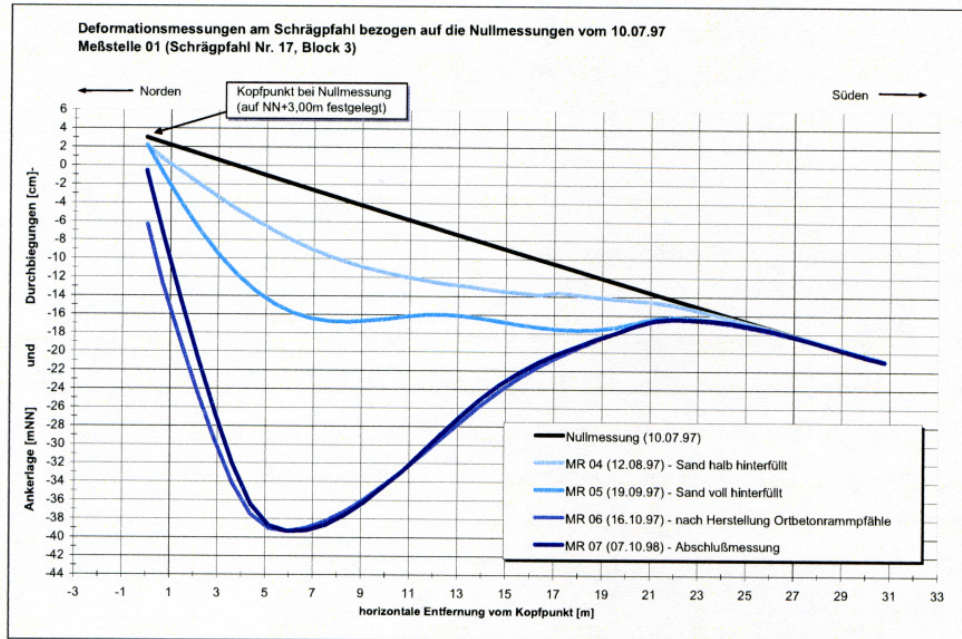


Bild 1. Verformung eines Schrägpfahls am Europakai in Hamburg während verschiedener Bauphasen, siehe GATTERMANN ET AL. (2005)

Es ließen sich bestimmt noch weitere Beispiele aufführen, bei denen herstellungsbedingte Zusatzbeanspruchungen im Bauwerk infolge der Herstellung anderer Bauteile auftreten. In diesem Beitrag soll ein numerisches Modell vorgestellt werden, mit Hilfe dessen die zusätzlichen Beanspruchungen, die aus der Pfahlrammung für die bestehende Bebauung resultieren, simuliert werden. Es wird hierzu eine näherungsweise Nachrechnung der RI-Pfahl-Rammung am Potsdamer Platz durchgeführt.

2 BAUVORHABEN POTSDAMER PLATZ

2.1 Kurzbeschreibung

Für viele der Bauvorhaben am Potsdamer Platz in Berlin Mitte werden tiefe Baugruben in der sogenannten Trogbauweise erstellt. Für eine dieser Baugruben mit einer hochliegenden, durch Sohlverankerungspfähle gesicherten Unterwasserbetonsohle (UWBS) wurden von TRIANTAFYLIDIS (1998, 2000) die Ergebnisse baubegleitender Messungen veröffentlicht.

Das Bodenprofil entspricht den typischen, im Berliner Zentrum anzutreffenden geologischen Verhältnissen und ist zusammen mit dem Querschnitt der Baugrube in Bild 2 dargestellt. Das Grundwasser steht zwischen 3 und 4 m unterhalb der Geländeoberkante (GOK) an. Da aufgrund des Bodenprofils kein natürlicher Stauer für die untere Abdichtung der Baugrube zur Verfügung steht, wurde eine dichtende Baugrubensohle hergestellt, die dann zusammen mit den Verbauwänden einen wasserdichten Trog bildet. Die Erstellung einer solchen Baugrube umfasst die folgenden Bauphasen: Herstellung der Schlitzwand, Teilaushub und Rückverankerung der Schlitzwand, Unterwasseraushub bis zur Unterkante der späteren UWBS, Einvibrieren der Sohlverankerungspfähle zur Auftriebssicherung, Erstellen der UWBS und schließlich das Lenzen der Baugrube.

Bei der untersuchten Baugrube wurde die Verbauwand als Schlitzwand mit einer Schlitzbreite von 1,2 m und einer Einbindetiefe von 6,3 m ausgeführt, die 1,0 m unterhalb ihrer Oberkante einfach rückverankert ist. Die Anker wurden vor Beginn des Aushubs mit 1 MN vorgespannt. Die Aushubtiefe beträgt im untersuchten Bereich der Baugrube 18,2 m.

Während für den Unterwasseraushub und das Einbringen der RI-Pfähle das untere Auflager der Verbauwand vom Erdwiderstand im Einbindungsbereich des Wandfußes gebildet wurde, stellte während des Lenzens der Baugrube die UWBS das zweite Auflager dar.

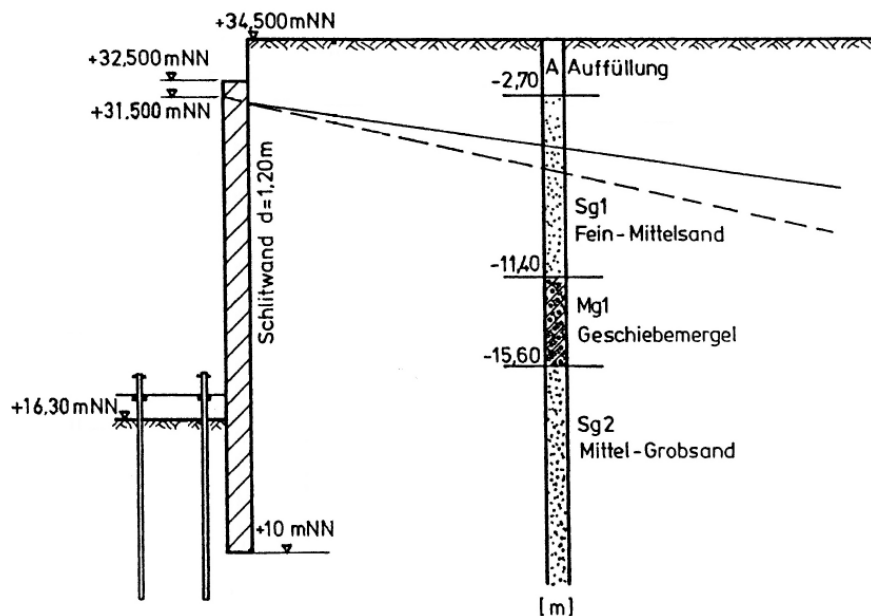


Bild 2. Baugrubenquerschnitt mit Bodenprofil, siehe TRIANTAFYLLIDIS (2000)

Die 1,2 m dicke UWBS wurde aus Stahlfaserbeton hergestellt. Zur Auftriebsicherung wurden RI-Pfähle in einem Raster von $3,0 \times 3,0$ m ausgeführt. Die äußere Pfahlreihe hat einen Abstand von ca. 1,5 m zur Schlitzwand. Als Verankerungspfähle wurden 19 bis 25 m lange HEM-200 Profile verwendet, die mit einer Rüttelfrequenz von $f = 34$ Hz einvibriert wurden.

2.2 Messergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen von TRIANTAFYLLIDIS (1998, 2000) wurden u.a. zwei Messquerschnitte (MV1 und MV2) eingerichtet, um die Verformung der Schlitzwand für die einzelnen Bauphasen zu ermitteln.

In Bild 3 sind die Ergebnisse der Wandverformungen in den beiden Messquerschnitten nach dem Spannen der Anker, dem Unterwasseraushub, dem Einbringen der RI-Pfähle und dem Lenzen der Baugrube dargestellt. Es wird deutlich, dass die während des Einbringens der RI-Pfähle auftretenden Verformungen der Schlitzwand größer sind, als die Verformungen durch den Unterwasseraushub und das Lenzen der Baugrube.

Zudem sind Differenzen zwischen den Verformungen der Schlitzwand in den beiden Messquerschnitten zu beobachten. Da die geologischen Verhältnisse im Bereich beider Querschnitte identisch sind, sind die Abweichungen vermutlich auf die unterschiedliche Reihenfolge bei der Pfahlherstellung vor der Wand zurück zu führen. Während im Bereich des Querschnitts MV1 parallel zur Wand gearbeitet wurde, verlief vor dem Querschnitt MV2 die Arbeitsrichtung vertikal zur Wand. Die Zusatzverformung durch das Einbringen der RI-Pfähle im Messquerschnitt MV1 beträgt 4,5 cm. Für den Querschnitt MV2 ergibt sich lediglich eine zusätzliche Verschiebung der Schlitzwand um 2,5 cm. Durch die unterschiedliche Reihenfolge bei der Pfahlherstellung kommt es also zu einer Differenz von 2,0 cm.

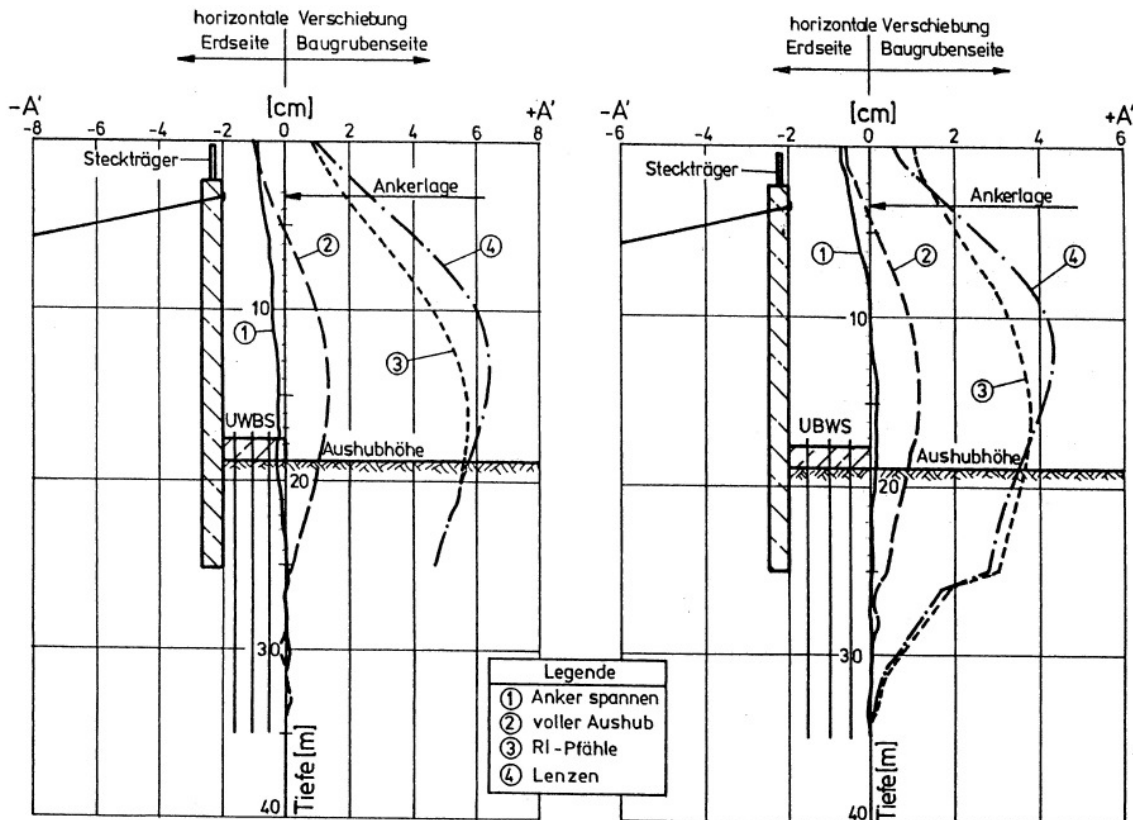


Bild 3. Verformung der Schlitzwand in den Messquerschnitten MV1 (links) und MV2 (rechts) während der einzelnen Bauphasen, siehe TRIANTAFYLLIDIS (2000)

Porenwasserdruckmessungen zeigen einen temporären Anstieg des Porenwasserdrucks während der Installation der Pfähle. Aufgrund der damit verbundenen Reduzierung der Grenzscherdehnung kann es zu Kornumlagerungen und somit zu einer Verflüssigung des Bodens kommen.

Um dieser Tatsache bei der Bemessung der Verbauwand Rechnung zu tragen, schlägt TRIANTAFYLLIDIS (1998) eine Reduzierung des Bettungsmoduls auf der passiven Erddruckseite im Einbindungsbereich der Wand vor. Die Größenordnung der Abminderung soll sich dabei nach den zu erwartenden Porenwasserüberdrücken richten.

3 SIMULATIONSMODELL FÜR VEREINFACHTE RANDBEDINGUNGEN

An einem vereinfachten zweidimensionalen Baugrundmodell soll nachfolgend das Einvibrieren der RI-Pfähle numerisch simuliert werden. Ziel ist es zu untersuchen, ob die von TRIANTAFYLLIDIS gemessenen Zusatzverformungen numerisch mittels Plastodynamik, siehe KELM (2004) simuliert werden können. Einschränkend ist dabei allerdings anzumerken, dass das verwendete Simulationsmodell bisher nicht in der Lage ist, den von TRIANTAFYLLIDIS als Ursache vermuteten Effekt einer Bodenverflüssigung zu berücksichtigen. Hierfür sind zukünftig noch erhebliche Anstrengungen im Bereich der Grundlagenforschung erforderlich. HOLLER (2006) zeigt beispielsweise hierfür neue Wege auf, die zukünftig weiter verfolgt werden.

3.1 Modellbildung

Die Berechnungen erfolgen mit dem Finite-Elemente-Programm ABAQUS an einem zweidimensionalen Modell und unter Annahme eines ebenen Dehnungszustands. Für die Modellierung der Auftriebspfähle wird nur die äußerste Pfahlreihe vor der Schlitzwand berücksichtigt.

Der Geländesprung wird von vornherein abgebildet, indem der später ausgehobene Bereich der Baugrube nicht vernetzt wird. Der beim Aushub der Baugrube entnommene Boden wird durch entsprechende Flächenlasten auf die Verbauwand und die Baugrubensohle ersetzt, die im Laufe der Berechnung nach und nach reduziert werden und schließlich komplett entfallen. Die Auffüllung wird durch eine Oberflächenlast berücksichtigt und der Grundwasserspiegel wird vereinfachend auf Höhe der Oberkante der Schlitzwand angenommen. Der Einfluss des Grundwassers wird durch die Erzeugung eines effektiven Spannungszustands auf Basis der Auftriebswichte des Bodens berücksichtigt. Die Rückverankerung der Schlitzwand wird vereinfachend als horizontales Festlager abgebildet.

Der Pfahl wird als Starrkörper modelliert. Der Bodenkörper wird als verformbares und homogenes Kontinuum definiert. Auf die Berücksichtigung der Schichtung des Bodens wird aus Gründen der Vereinfachung verzichtet. Da die Eigenschaften des Bodens unterhalb der Baugrubensohle für das dynamische Einbringen der Pfähle maßgebend sind, werden diese dem gesamten Berechnungsausschnitt zugewiesen. Dabei wird von einer mitteldichten Lagerung ausgegangen.

Durch die Reduzierung des Problems auf ein 2D-Modell entspricht der Pfahl praktisch einer Wand, die vor der Schlitzwand in den Boden eingebracht wird. Für das Einbringen des Pfahls in den Boden wird die in GRABE UND MAHUTKA (2005), MAHUTKA ET AL. (2006), HENKE UND GRABE (2006) und HENKE UND GRABE (2007) für den rotationssymmetrischen und den dreidimensionalen Fall ausführlich beschriebene Modellierungstechnik auf den 2D-Fall übertragen. Dabei wird durch einen weiteren Starrkörper ein Schlitz in der Baugrubensohle angeordnet, der es dem Pfahl beim Eindringen ermöglicht, den Boden zur Seite zu verdrängen und diesen nach dem Prinzip eines Reißverschlusses zu öffnen.

Nach der Generierung eines unverformten K_0 -Anfangsspannungszustandes wird in einem ersten Schritt vereinfachend die Herstellung der Schlitzwand (inklusive des Ankers) modelliert. Die lamellenweise Nachrechnung einer Schlitzwandherstellung wie von MAYER (2001) durchgeführt ist für die vorliegende Fragestellung nicht erforderlich. Danach wird durch Anpassung der Ersatzlasten der phasenweise Unterwasseraushub der Baugrube simuliert.

Während alle bisher beschriebenen Schritte mit ABAQUS/Standard berechnet werden, wird das anschließende dynamische Einbringen des Pfahls mit ABAQUS/Explizit modelliert. Als Rüttelfrequenz wird $f = 34$ Hz angenommen.

Neben dem Gewicht des Pfahls von ca. 2 t wird auch die statische Last des Vibrators mit $F_{st} = 29$ kN berücksichtigt. Da Untersuchungen von GRABE UND MAHUTKA (2005) ergaben, dass bei der Vibrationsrammung die Größenordnung der Zentrifugalkraft F_d im Gegensatz zur Erregerfrequenz keinen Einfluss auf die Verdichtung des Bodens und die damit verbundenen Sackungen an der Geländeoberfläche hat, wird die Zentrifugalkraft mit 150 kN angesetzt.

Das Materialverhalten des Betons der Schlitzwand wird linear-elastisch modelliert. Für den Boden wird ein hypoplastisches Stoffgesetz nach VON WOLFFERSDORFF (1996) mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen nach NIEMUNIS UND HERLE (1997) verwendet. Dieses Stoffgesetz beschreibt das Verhalten granularer Materialien druck- und dichteabhängig, also in Abhängigkeit von Spannungs- und Lagerungszustand. Die Stoffparameter für den *Berliner Sand* werden aus MAYER (2001) entnommen.

Der Kontakt zwischen dem eindringenden Pfahl und dem Boden wird durch die Verwendung einer kinematischen Kontaktformulierung berücksichtigt, die sich auch für große Verzerrungen eignet. Es werden sowohl Normalkräfte als auch Tangentialkräfte nach dem Reibungsgesetz von MOHR-COULOMB übertragen.

Sowohl der Boden als auch die Schlitzwand werden mit Kontinuumselementen vernetzt und um den seitlichen bzw. unteren Rand des Modells werden infinite Elemente angeordnet. Um zu großen Elementverzerrungen beim Eindringen des reibungsbehafteten Pfahls in den Boden vorzubeugen, wird für den Bereich um den Pfahl auf die Technik der adaptiven Vernetzung zurückgegriffen. Ein Ausschnitt des FE-Modells ist in Bild 4 dargestellt.

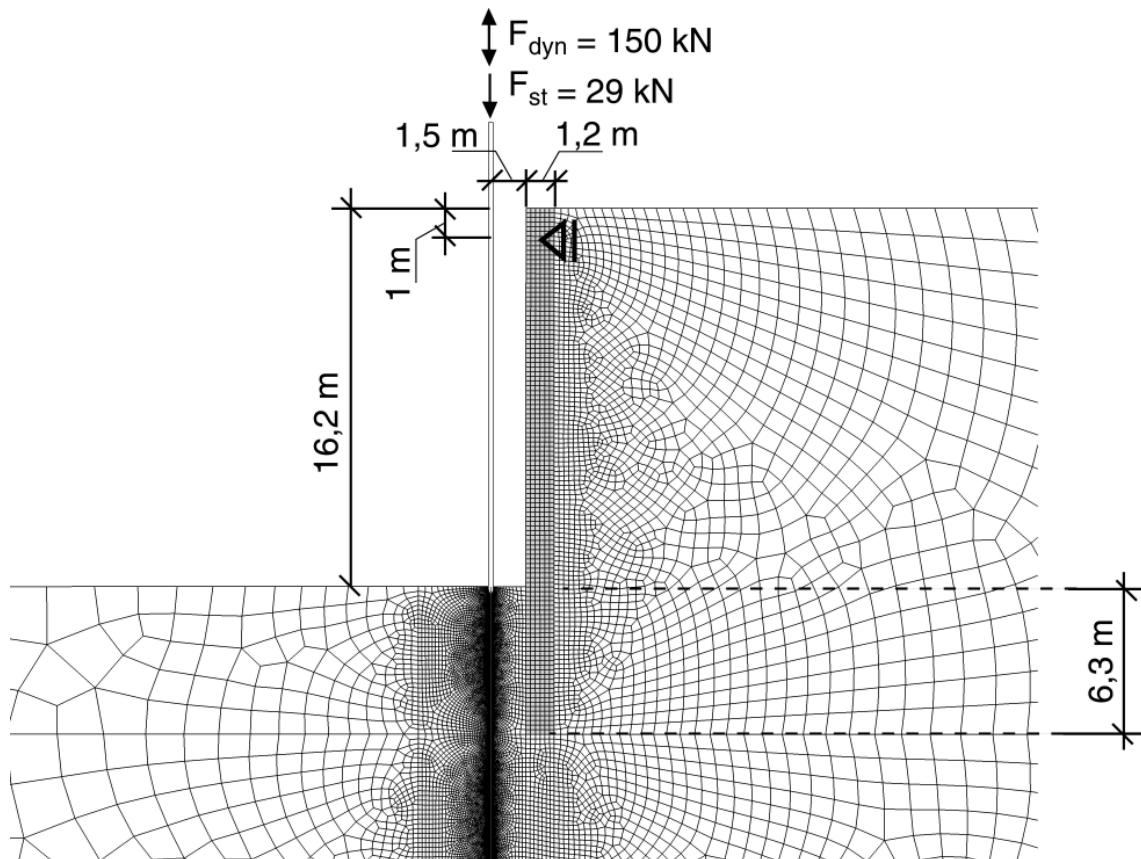


Bild 4. Ausschnitt des ebenen FE-Modells für vereinfachte Randbedingungen mit Angabe der maßgebenden Größen

3.2 Ergebnisse

Im Folgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen vorgestellt werden. Die maximal erreichte Einbringtiefe des Pfahls beträgt dabei 8,0 m.

3.2.1 Porenzahlverteilung

Bild 5 zeigt die Verteilung der Porenzahlen um den Pfahl für eine Eindringtiefe von ca. 3,0 m. Die Verdichtung des Bodens in der Umgebung des Pfahls und die damit verbundenen Sackungen der Baugrubensohle resultieren aus der seitlichen Verdrängung des Bodens durch den eindringenden Pfahl in Verbindung mit einer zyklischen Scherung. Oberflächennah wird der Boden auch in einem größeren Abstand vom Pfahl infolge von Oberflächenwellen verdichtet, siehe z.B. auch GRABE UND MAHUTKA (2005).

Im Einbindungsbereich vor der Wand ist die Verdichtungswirkung besonders groß und reicht in Tiefen bis unterhalb der aktuellen Position des Pfahlfußes. Der Grund hierfür sind vermutlich Reflexionen der Wellen an der Wand.

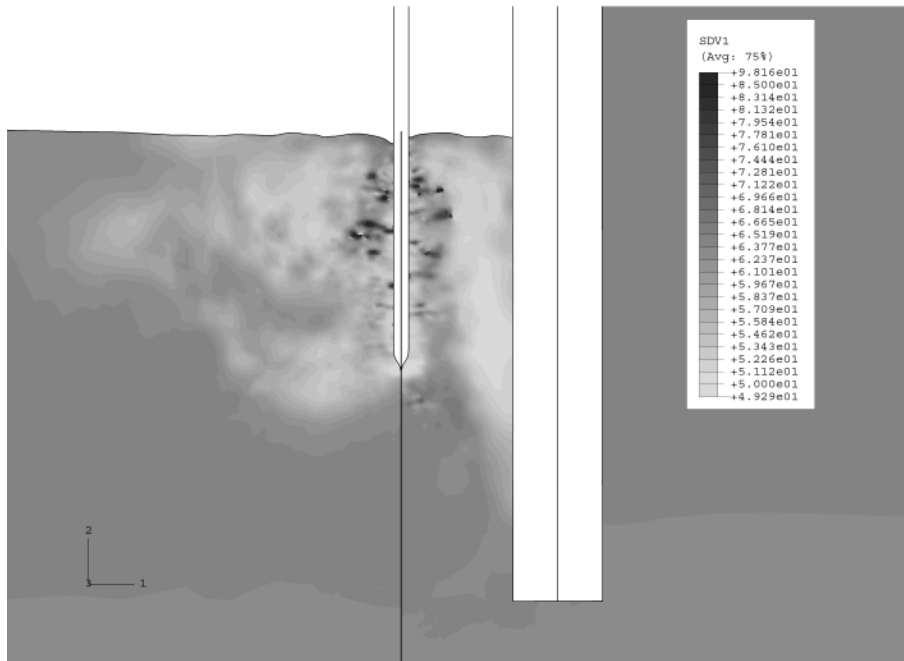


Bild 5. Berechnete Verteilung der Porenzahl e für eine Einbringtiefe des Pfahls von ca. 3,0 m

3.2.2 Erddruck auf die Baugrubenwand

In Bild 6 sind die berechneten Erdrücke auf die Schlitzwand vor und nach dem Einbringen der RI-Pfähle dargestellt und den Verläufen des aktiven Erddrucks e_{ah} und des passiven Erddrucks e_{ph} sowie des Erdruhedrucks e_0 gegenübergestellt.

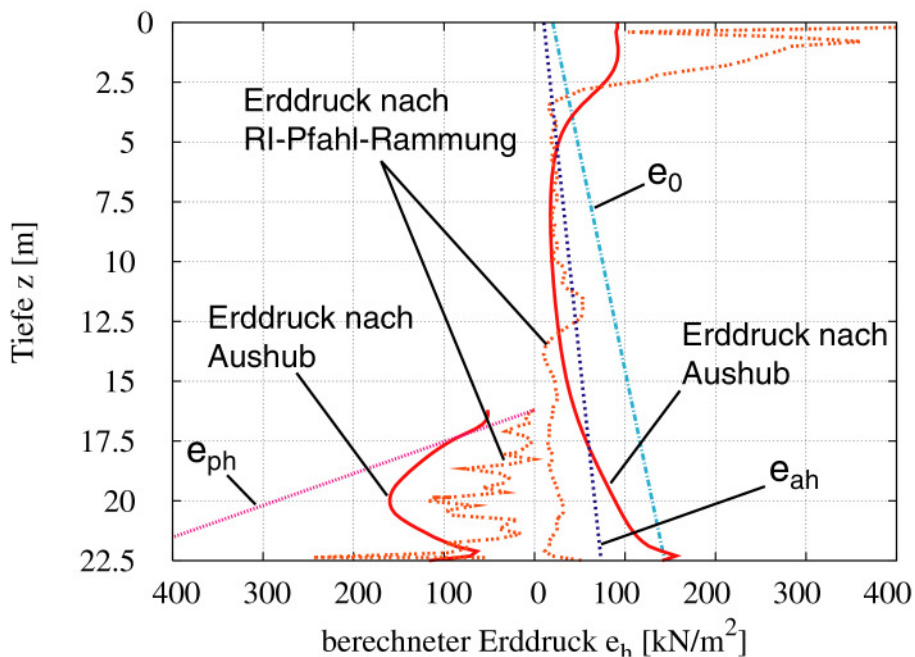


Bild 6. Verteilungen des berechneten Erddrucks und Erdwiderstands nach dem Aushub und nach Einbringen des Pfahls sowie zum Vergleich der Ruhedruck und der Erddruck nach COULOMB

Im Aushubzustand ist eine Erddruckumlagerung zum Angriffspunkt der Stützung und ein Abfall des Erddrucks im Feldbereich auf Werte kleiner als der aktive Erddruck e_{ah} zu erkennen. Weiterhin wird deutlich, dass der Erdwiderstand im Einbindungsbereich der Wand nur teilweise mobilisiert ist.

Auf der Grundlage des Simulationsmodells ist festzustellen, dass der Erdwiderstand im Einbindungsbereich des Wandfußes durch das Einvibrieren des Pfahls reduziert wird. Auch der Erddruck auf die Wand nimmt ab. Besonders groß ist die Abnahme, die im Einbindungsbereich der Wand zu verzeichnen ist. Während der Erddruck nach dem Aushub der Baugrube in diesem Bereich Werte zwischen dem aktiven Erddruck und dem Erdruchdruck annimmt, fällt er durch das Einbringen der Pfähle und die Verschiebung der Verbauwand unter den aktiven Erddruck.

Weiterhin ist eine deutliche Zunahme des Erddrucks im Bereich der Verankerungslage zu erkennen. Es bleibt zu klären, ob die Verteilung des Erddrucks physikalisch begründet ist, oder ob auch numerische Einflüsse eine Rolle spielen.

3.2.3 Verformung der Schlitzwand

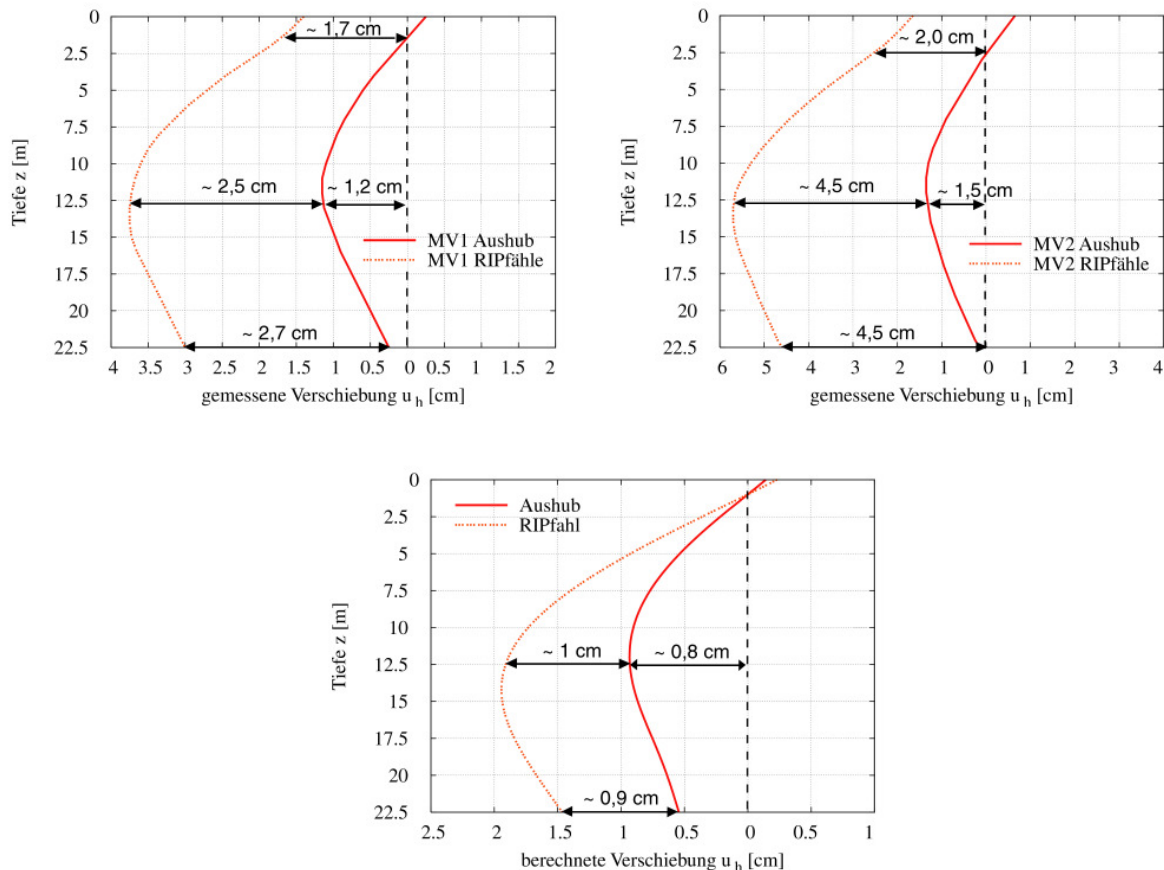


Bild 7. Gemessene Wandverformungen vor und nach Einbringen der Pfähle in den Querschnitten MV1 (links) und MV2 (rechts) und Ergebnis der Berechnung für eine Pfahleindringtiefe von 8 m (unten)

Bild 7 zeigt die gemessenen Wandverformungen vor und nach dem Einbringen der Pfähle in den Querschnitten MV1 und MV2 sowie das Ergebnis der Berechnung für eine Pfahleindringtiefe von 8,0 m. Die berechneten Wanddurchbiegungen nach dem Aushub liegen in vergleichbarer Größenordnung wie bei der Messung.

Gemäß den Messdaten gibt die obere Verankerung durch das Einvibrieren der RI-Pfähle deutlich im Messquerschnitt 1 um 1,7 cm und im Messquerschnitt 2 um 2,0 cm nach. In der Simulation ist bedingt durch die gewählte Lagerung der Wand der Verankerungspunkt unverrückbar.

Die Durchbiegung der Wand in Feldmitte wächst, reduziert um das Maß der Ankerkopfverschiebung, näherungsweise um den Faktor 0,7 im Querschnitt 1 und 1,7 im Querschnitt 2 an. In der Simulation beträgt dieser Faktor etwa 1,2. Die gemessenen zusätzlichen Fußverschiebungen infolge RI-Pfahl-Herstellung reduziert um das Maß der Ankerkopfverschiebung liegen mit ca.

1 cm im Messquerschnitt 1 und 2,5 cm im Messquerschnitt 2 in der Größenordnung der berechneten Fußpunktverschiebung von ca. 0,9 cm.

Für dieses Beispiel ergeben sich demnach recht plausible Ergebnisse, obwohl die von TRIANTAFYLLIDIS vermutete Bodenverflüssigung im Simulationsmodell noch nicht berücksichtigt ist.

Der größte Unterschied zwischen den Messungen und den Berechnungen ergibt sich aus der vereinfachten Berücksichtigung der Verankerung. Während sich die Modellierung der Verankerung als Festlager für die Aushubberechnung als hinreichend genau erwies, stellen sich bei der Modellierung des Einbringvorgangs vor allem im Bereich der Verankerung erhebliche Unterschiede zwischen den gemessenen und den errechneten Verschiebungsverläufen ein. Eine Berücksichtigung der Verankerung als nachgiebige Stützung durch eine konstante Stützkraft A , deren Wert sich an der Größe der Ankervorspannkräfte orientieren könnte, würde vermutlich zu besseren Ergebnissen führen. Denkbar ist auch eine elastische Lagerung der Wand in der Verankerungsebene durch eine Feder.

Zusätzlich ist damit zu rechnen, dass ein tieferes Eindringen des Pfahls zu weiteren Verformungszunahmen führt, so dass sich die Ergebnisse der Berechnung den Messergebnissen auch quantitativ noch annähern könnten.

Zuletzt kann und soll nicht ausgeschlossen werden, dass wie von TRIANTAFYLLIDIS (1998) beschrieben auch eine Bodenverflüssigung, die durch die dynamischen Einwirkungen aus dem Einvibrieren der Pfähle verursacht wird, einen Beitrag zu den Verformungen der Schlitzwand liefert. Die Bodenverflüssigung kann durch das verwendete Modell noch nicht erfasst werden, da das Grundwasser in der Berechnung lediglich durch die Erzeugung des Anfangsspannungszustands auf Basis der Auftriebswichte und nicht über den Porenwasserdruck berücksichtigt wird.

3.2.4 Momentenverlauf der Schlitzwand

Bild 8 zeigt den Momentenverlauf der Schlitzwand nach dem Aushub der Baugrube und nach dem Einbringen des Pfahls für eine Eindringtiefe von 8,0 m. Es zeigt sich, dass die Schlitzwand unter den gegebenen Randbedingungen nach dem Aushub als teilweise eingespannt einzustufen ist.

Weiterhin wird ersichtlich, dass sich das Tragverhalten der Verbauwand durch das Einbringen des Pfahls verändert, und dass die Teileinspannung der Wand verloren geht. Außerdem zeigt sich, dass sowohl das Feld- als auch das Stützmoment zunehmen. Diese Zuwächse müssen bei der Bemessung der Schlitzwand berücksichtigt werden.

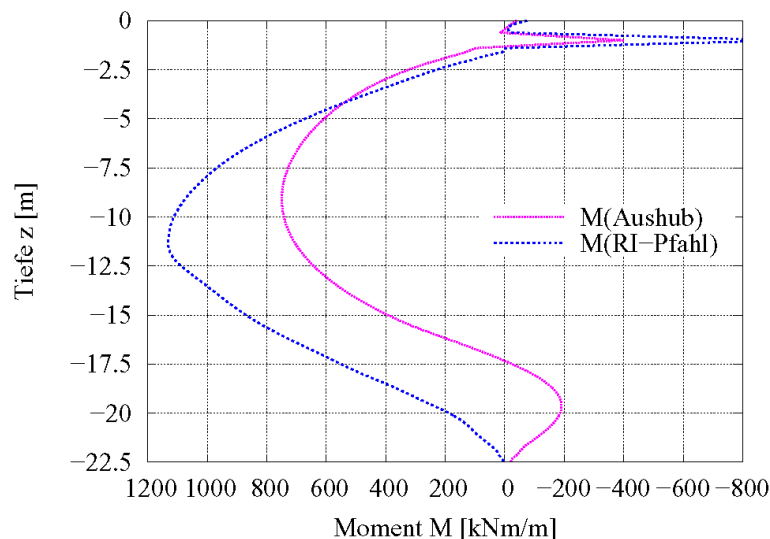


Bild 8. Berechneter Momentenverlauf der Schlitzwand vor und nach Einbringen des Pfahls

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorgestellten Beispiele und Berechnungen verdeutlichen, dass Herstellungseinflüsse, beispielsweise aus der Pfahlrammung im Einzelfall zu berücksichtigen sind.

Am Beispiel der Baugrube am Potsdamer Platz in Berlin wird die Vibrationsrammung von Rüttelinjektionspfählen zur Auftriebssicherung von Unterwasserbetonsohlen bei Baugruben numerisch an einem ebenen Modell nachvollzogen. Durch das Einvibrieren der RI-Pfähle kommt es demnach im Wesentlichen zu einer Spannungsumlagerung im Erdwiderstandsbereich mit der Folge, dass das Erdwiderlager nachgibt. Die Messdaten zeigen im Unterschied zu den Berechnungen, dass auch die obere Verankerung der Wand nachgegeben hat. Die von TRIANTAFYLIDIS vermutete Bodenverflüssigung und der messtechnisch nachgewiesene Porenwasserdruckanstieg ist offensichtlich nicht notwendigerweise eine zwingende Bedingung für das Eintreten der beobachteten Schlitzwandverformungen. Dennoch wird zukünftig angestrebt, diese Effekte der Bodenverflüssigung infolge dynamischer Beanspruchung im Simulationsmodell erfassen zu können.

Wenn es gelingt, die Simulationsmodelle weiterzuentwickeln und zu validieren, dann wird es vielleicht zukünftig möglich, Empfehlungen für den notwendigen Abstand von dynamischen Bauverfahren im Nahfeld von Baugruben zu erarbeiten.

Darüber hinaus ist zu prüfen, ob die herstellungsbedingte Veränderung der Bodenzustandsgrößen das Tragverhalten des Baugrubenverbaus hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Grenztragverhalten wesentlich beeinflusst, denn diese Effekte gehen bisher weder in die klassische noch in die Finite-Elemente-Berechnung ein. Zu erwarten ist, dass die veränderten Bodenzustandsgrößen insbesondere das Verhalten im Gebrauchszustand beeinflussen. Im Grenzzustand geht ja bekanntlich das Gedächtnis des Bodens im allgemeinen verloren.

Da es kaum Schadensfälle gibt, ist zu vermuten, dass der Herstellungseinfluss insgesamt eher klein ist. Zumindest kleiner als die sonstigen Unschärfen bei der Bemessung von Baugruben.

Literatur

- EAB, Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“. 2006. Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- EAU, Empfehlungen des Arbeitskreises „Ufereinfassungen“. 2004. Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- Gattermann, J., Fritsch, M., Stahlmann, J. 2005, Auswahl- und Einbaukriterien geotechnischer Messgeber zur Bestimmung des Normalkraftverlaufs der Wand/Verankerung bei Kaimauerkonstruktionen und deren Ergebnisse. *Pfahl-Symposium 2005, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik*, Technische Universität Braunschweig, Heft 80, pp. 21-44.
- Grabe, J. & Mahutka, K.-P. 2005, Finite-Elemente-Analyse zur Vibrationsrammung von Pfählen. *Bau-technik*, 82(9):632-640
- 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, pp. 215-233.
- Henke, S. & Grabe, J. 2007. 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.
- Herle, I. 1997. Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 142.
- Holler, S. 2006. Dynamisches Mehrphasenmodell mit hypoplastischer Materialformulierung der Feststoffphase. Dissertation am Lehrstuhl für Baudynamik und Baustatik der RWTH Aachen.
- Kelm, M. 2004. Numerische Simulation der Verdichtung rolliger Böden mittels Vibrationswalzen. *Veröffentlichungen des Arbeitsbereichs Geotechnik und Baubetrieb*, Heft 6. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Mahutka, K.-P., König, F., Grabe, J. 2006. Numerical modelling of pile jacking, driving and vibratory driving. *Proceedings of International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment (NSC06)*, Bochum, ed. T. Triantafyllidis, Balkema, Rotterdam, pp.~235—246.
- Mardfeldt, B.. 2005. Zum Tragverhalten von Kaikonstruktionen im Gebrauchszustand. Dissertation. *Ver-*

- öffentlichungen des Arbeitsbereiches Geotechnik und Baubetrieb*, Heft 11. Technische Universität Hamburg-Harburg.
- Mayer, P.-M. 2001. Verformungen und Spannungsänderungen im Boden durch Schlitzwandherstellung und Baugrubenaushub. *Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe*, Heft 151
- Niemunis, A. & Herle, I. 1997. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of cohesive-frictional materials*. Volume 2, pp. 279-299.
- Quast, P. & Zander, M. 2006. Auflockerungen von rolligen Böden durch den Lufteinsatz beim Düsenstrahlverfahren. *Vorträge der Baugrundtagung 2006 in Bremen*, pp157-163.
- Triantafyllidis, Th. 1998. Neue Erkenntnisse aus Messungen an tiefen Baugruben am Potsdamer Platz in Berlin. In: *Bautechnik* 75, Nr. 3, S. 133–154.
- Triantafyllidis, Th. 2000. Ein einfaches Modell zur Abschätzung von Setzungen bei der Herstellung von Rüttelinfektionspfählen. In: *Bautechnik* 77, Nr. 3, S. 161–168.
- Von Wolfersdorff, P.-A. 1996. A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. *Mechanics of cohesive-frictional materials*. Volume 1, pp. 251-271.