

# Chancen und Grenzen von Monitoring und Assistenzsystemen im Spezialtiefbau am Beispiel von Vollverdrängungspfählen

Lars Vavrina; Ulrich Plohmann; Peter Wardinghus  
Aarsleff Grundbau, Hamburg, Deutschland

Franz-Werner Gerressen  
Bauer Maschinen, Schrobenhausen, Deutschland

## Zusammenfassung

Im folgenden Beitrag werden nach einer Beschreibung der Pfahlssysteme Fertigrammpfahl aus Stahlbeton und Vollverdrängungsbohrpfahl mit verlorener Spitze (System FDP „full displacement pile“) die mit der Nutzung von Assistenz- und Monitoringsystemen verbundenen Möglichkeiten bei der Herstellung vorgestellt. Durch das Aufzeichnen von Produktionsdaten können sowohl Rückschlüsse für statische Nachweise als auch für die Massenermittlung sowie eine exakte und tagesgenaue Leistungskontrolle erfolgen, womit eine außergewöhnliche Transparenz im Sinne einer kooperativen Zusammenarbeit geschaffen wird. Außerdem sollen sowohl mögliche Chancen als auch die Grenzen dieser Assistenz- und Monitoringsysteme insbesondere für das zukünftige digitale Planen und Bauen aufgezeigt und diskutiert werden.

## 1. Motivation

Vollverdrängungspfähle bieten neben verschiedenen technischen Vorteilen gegenüber Bohrpfählen mit Aushub auch wirtschaftliche Vorteile. Die tatsächliche Wirtschaftlichkeit hängt dabei von einem störungsfreien und planmäßigen Verlauf des Ausführungsprozesses ab. Je nach Umfang der Sondierungen und Heterogenität des Baugrundes ist ein gewisses Risiko von Baugrundabweichungen meist nicht vermeidbar, da die Ausführungsplanung in der Regel auf punktuellen Baugrunderkundungen beruht.

Unabhängig davon, ob der Vollverdrängungspfahl dynamisch durch Rammung oder statisch durch Drehen und Drücken eingebaut wird, bietet die Bodenverdrängung eine zusätzliche Baugrunderkundung, da automatisch während des Einbaus gemessene Einbringwiderstände eine Kontrolle der Lagerung des anstehenden Baugrundes direkt am Pfahl bieten. Assistenzsysteme sorgen darüber hinaus für eine optimale Einbringung des Pfahls, was sowohl die Qualität als auch die Maßhaltigkeit erhöht und unplanmäßige Materialkosten minimiert. Alle relevanten Herstelldaten werden direkt am Gerät vollautomatisch aufgezeichnet und liegen durch die digitale Vernetzung der Baumaschinen mit der örtlichen Bauleitung für eine unmittelbare Beurteilung vor, so dass der gesamte Ausführungsprozess für alle beteiligten Fachplaner nachvollziehbar wird und eine außergewöhnliche Transparenz bietet.

Die dokumentierten Produktionsdaten können für statische Nachweise, zur Leistungskontrolle sowie für die spätere Abrechnung genutzt werden.

## 2. Beschreibung der Vollverdrängungspfähle

Nach DIN EN 12699 „Verdrängungspfähle“ ist das Hauptmerkmal von Vollverdrängungspfahlssystemen, dass bei der Herstellung keine relevante Bodenförderung entsteht. Die verschiedenen Pfahlssysteme werden nach Herstellmethode und Werkstoff unterschieden (Abbildung 1).

Die Herstellung von Verdrängungspfählen kann dynamisch durch Rammung als Fertigteil- oder als Ortbetonpfahl erfolgen. Bei den Fertigpfählen gibt es verschiedene Werkstoffe, die für bestimmte Einsatzbereiche ausgelegt sind. Bei Ortbetonrammpfählen wird ein Stahlrohr gerammt, das während des Betoniervorganges wieder gezogen wird. Die Rammung dieses Stahlrohrs kann dabei mittels Innenrohr- oder Kopframmung erfolgen. Neben dem dynamischen Einbau gibt es auch die Möglichkeit den Pfahl durch Drehen und Drücken, also statisch, in den Boden herzustellen, was im direkten Vergleich zur Pfahlrammung erschütterungsärmer ist. Bei den sogenannten Vollverdrängungspfählen gibt es verschiedene Herstellmethoden, die sich zum Teil nur in Ausführungsdetails unterscheiden.

Der Vollständigkeit halber sind an dieser Stelle noch die Verpressverdrängungspfähle genannt, auf die in diesem Beitrag allerdings nicht weiter eingegangen wird.

Im folgenden Abschnitt werden die beiden Pfahlsysteme „Fertigrammpfahl aus Stahlbeton“ und das Vollverdrängungsbohrpfahlsystem „FDP“ hinsichtlich der Herstellung, der Dokumentation sowie der Pfahltragfähigkeit in Detail beschrieben.

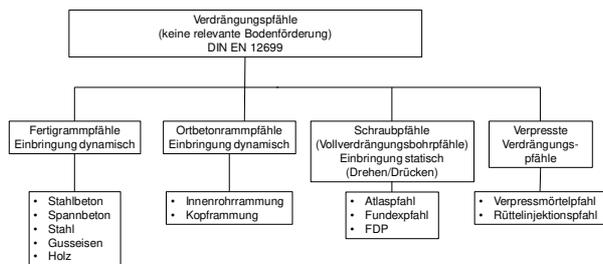


Abbildung 1.: Verdrängungspfählsysteme nach DIN EN 12699

## 2.1 Fertigrammpfähle aus Stahlbeton

Die aktuell in Deutschland verwendeten Fertigrammpfähle aus Stahlbeton haben in der Regel quadratische Querschnitte von 25 cm x 25 cm bis 45 cm x 45 cm (in 5cm Schritten) und eine durchgehende Längs- und Wendelbewehrung. Die Herstellung erfolgt im Werk vollautomatisch unter höchsten Qualitätsanforderungen und externen Herstellkontrollen zum typengeprüften Pfahlquerschnitt. Die werkseitige Herstellung gewährleistet einheitliche Betonquerschnitte und –

Eigenschaften sowie eine planmäßige Bewehrungslage mit Toleranzen von +/- 3mm. Wichtige Systemvorteile liegen außerdem in den kurzen Einbauzeiten, der sofortigen Prüf- und Überbaubarkeit, der vollständigen Witterungsunabhängigkeit beim Einbau und der Längenflexibilität durch Pfahlkupplungen. In Bereichen mit kritischen Anforderungen an Erschütterungsimmissionen kann die Anwendung von Rammpfähle allerdings eingeschränkt sein.

Der Einbau der Pfähle erfolgt durch impulsartige Einwirkungen infolge von Schlägen mit einem Rammgewicht. Bei modernen hydraulischen Hämmern erfolgt der Schlagimpuls durch Beschleunigung des Hammes, so dass die kinetische Energie am Pfahlkopf effektiver eingeleitet wird.

Nach Vesic (Witzel, 2004) gibt es die Modellvorstellung, dass sich während des Eindringens in den Boden unter dem Pfahlfuß ein Bodenkeil (I) ausbildet (vgl. Abbildung 2), der während der Rammung in die Tiefe mitgeführt wird. Der verdichtete Bodenkeil (I) verdrängt die entstehende Scherzone (II) seitlich in die plastische Zone (III). In nicht bindigen Böden wird der Boden in der plastischen Zone verdichtet, während es

z. B. in bindigen Böden zu Porenwasserüberdrücken kommen kann, die sich nach dem Einbau mit der Zeit wieder abbauen.

In der Regel hat der Fertigpfahl keine Spitze, sodass die Mechanik gemäß Abbildung 2 stattfindet. In Fällen, wo eine Verschleppung von Bodenschichten vermieden werden sollte, kann auch eine Spitze aus Beton werkseitig berücksichtigt werden.

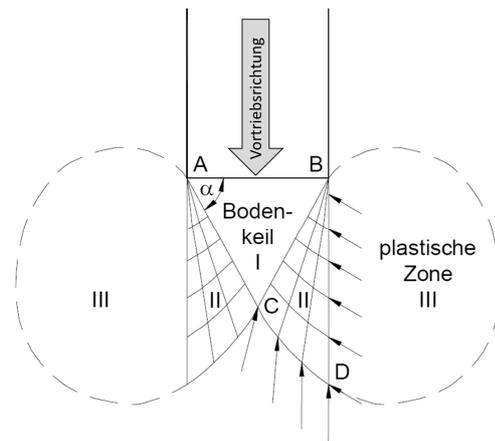


Abbildung 2: Modellvorstellung der Bruchmechanik beim Einbau von Fertigrammpfählen (Witzel, 2004)

## 2.2 Vollverdrängungsbohrpfahl System FDP

Während die Prozesse bei der Rammung von Fertigteilrammpfählen weitgehend erforscht und geklärt sind, gibt es mit dem Vollverdrängungsbohrpfahl System FDP nur wenige Erfahrungen in Deutschland. So wurde im Auftrag der Fa. Bauer Maschinen GmbH im Jahre 2009 ein Forschungsvorhaben der TUHH durchgeführt um die Herstellung von Vollverdrängungsbohrpfählen System FDP zu untersuchen (Grabe et al., 2012, Grabe & Pucker, 2012). Dabei wurden viele neue Erkenntnisse gesammelt und dokumentiert.

Bei der Herstellung von Vollverdrängungsbohrpfählen werden zwei Varianten unterschieden; das Standardverfahren FDP (full displacement pile) und eine Weiterentwicklung mit verlorener Spitze (FDP lost bit). Die Hauptunterschiede liegen im Bohrwerkzeug und beim Betoniervorgang.

In diesem Beitrag soll nur auf das System mit verlorener Spitze eingegangen werden. Ausführliche Informationen zum Standardverfahren System FDP können u.a. Boeck und Gerressen (2011) entnommen werden. Der Herstellvorgang eines Vollverdrängungspfahls FDP Lost Bit ist in Abbildung 3 dargestellt.

Zunächst wird das Bohrgerät am Ansatzpunkt des geplanten Pfahles eingerichtet (1.). Nach dem Einrichten wird das Verdrängungswerkzeug durch Vertikalkraft und Drehmoment in den Boden gebohrt (2.), wobei der

Boden durch den Anfänger (Bohrschnecke) gelöst und durch die Schneckenwendel nach oben transportiert wird. Oberhalb des Schneckenanfängers wird der gelöste Boden durch den Verdrängungskörper in das umliegende Erdreich gedrückt. Voraussetzung für dieses Prinzip ist, dass ein verdrängbarer Boden vorliegt ( $q_c \leq 10 \text{ MN/m}^2$ ;  $N_{30} \leq 30$ ).

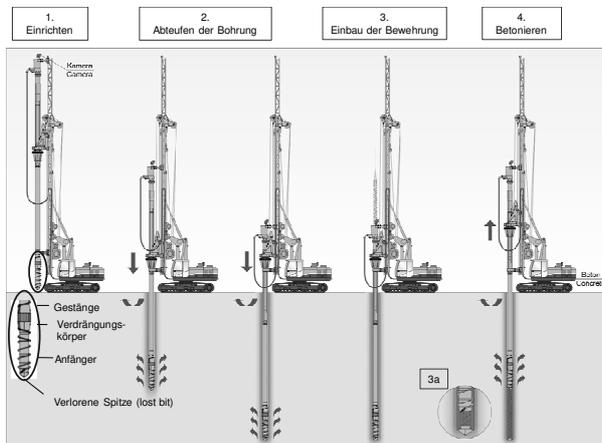


Abbildung 3.: Herstellvorgang FDP Lost Bit

Nach Erreichen der Endtiefe wird die Bewehrung in das innen hohle Gestänge des Bohrwerkzeugs eingestellt und die verlorene Spitze gelöst (3a.). Das Einstellen des Bewehrungskorbes in das Gestänge bietet den Vorteil, dass der Korb zentrisch in der Pfahlachse sitzt und die Mindestabstände der Betondeckung gewährleistet sind.

Nach dem Lösen der Spitze wird das Bohrwerkzeug mit gleicher Drehrichtung wie beim Vortrieb gezogen, während die Betonage unter statischen Betondruck mittels Trichter (Hopper) erfolgt (4.).

Das Lösen der verlorenen Spitze (3a.) kann in trockenen Böden durch das Abschlagen mittels des Bewehrungskorbes oder im Grundwasser durch das Gewicht des Betons und anschließend, langsamen Ziehen erfolgen. Bei dieser Methode wird das Eindringen von Grundwasser in das Seelenrohr vermieden. Im Bedarfsfall kann durch zusätzliche, geeignete Maßnahmen eine Abdichtung gegen Eindringen von Grundwasser vorgenommen werden.

Vorteile der Ausführungsvariante dieses Pfahlsystems sind neben der zentrischen Installation des Bewehrungskorbes, das drucklose Betonieren und dem damit einhergehenden Verhindern des Ausbetonierens des Bodens.

Im Gegensatz zu den Erfahrungen mit Schneckenbohrpfählen, wo nach Schäfer (2016) sogar Auflockerungen des Bodens beobachtet wurden, zeigten Messungen der CPT Widerstände vor und nach der Herstellung der

Pfähle, dass eine Verdichtung des umgebenden Bodens stattfindet (Grabe et al., 2012).

### 2.3 Vergleich des Tragverhaltens

Vollverdrängungspfähle haben im Verhältnis zu den relativ geringen Querschnittsabmessungen meist hohe Pfahlwiderstände.

In Abbildung 4 sind Widerstandsetzungslinien eines Fertigrammpfahls aus Stahlbeton mit einem Querschnitt von  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  ( $L = 12 \text{ m}$ ) und ein Vollverdrängungsbohrpfahl (FDP) mit einem Durchmesser  $44 \text{ cm}$  und einer Länge von  $8,4 \text{ m}$  dargestellt. Beide Pfähle binden ca.  $2,5 \text{ m}$  in mitteldicht gelagerte Sande ein.

Der Vollverdrängungsbohrpfahl erreicht eine Grenztragfähigkeit von ca.  $2200 \text{ kN}$ , während der Fertigrammpfahl eine geringere Grenztragfähigkeit von ca.  $1600 \text{ kN}$  aufweist. Das Tragverhalten der Fertigrammpfähle ist im Bereich der geringeren Lasten steifer als bei FDP Pfählen, da die Setzungen geringer sind.

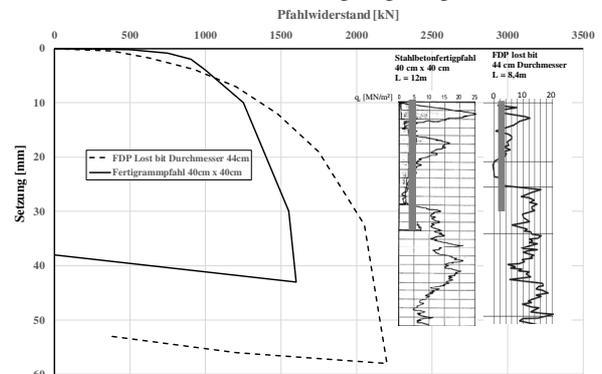


Abbildung 4: Vergleich des Tragverhaltens

### 3. Monitoring und Assistenzsysteme

Unabhängig davon, ob der Vollverdrängungspfahl gebohrt oder gerammt wird, kommt es durch den Verdrängungsprozess zu einer Boden-Pfahl Interaktion durch die der Geräteführer ein unmittelbares Feedback über den Baugrund bekommt. Durch den Einbringwiderstand kann das Erreichen eines tragfähigen Baugrundhorizontes erkundet und die Einbindung in diese Schicht nachvollzogen werden. Somit bietet jeder Vollverdrängungspfahl einen indirekten Aufschluss über den Boden. Die dabei erfassten Parameter unterscheiden sich dabei beim Bohren und Rammen.

Beim Rammvorgang erfolgt die Bestimmung des Rammwiderstandes über die vollautomatische Erfassung der Auftreffgeschwindigkeit (bei beschleunigten Hämmern) oder der Fallhöhe, der Schlagzahlen und der dabei zurückgelegten Eindringung des Pfahls in den Boden. Aus diesen Messwerten errechnet sich die Rammenergie, die benötigt wird um den Pfahl in den Boden zutreiben. Im direkten Vergleich, z.B. einer Drucksondierung mit dem Energieverlauf der Rammung über die Tiefe, lassen sich bereits qualitative

Aussagen zur Tragfähigkeit treffen. Ferner ist es möglich eine eventuelle Schädigung des Pfahls bereits beim Einbau zu identifizieren.

Während des Bohrens werden wiederum neben der Zeit, Tiefe und Umdrehungen sowohl die Hydraulikdrücke am Kraftdrehkopf als auch die Vorschubkraft gemessen. Der daraus ableitbare Eindringwiderstand lässt sich dabei als Quotient aus Drehmoment und Eindringrate errechnen. Die Eindringrate ergibt sich aus der Vorschubgeschwindigkeit und der Umdrehungsrate. Aus der Betonmenge lässt sich das Betonprofil ermitteln und ein möglicher Betonmengenverbrauch identifizieren.

Die Maschinen sind für den Einsatz mit elektronischen Programmen ausgerüstet („Bohrassistent“), die während des Abbohrvorganges eine optimale Vorschubgeschwindigkeit und Vorschubkraft bei einer optimalen Umdrehungszahl des Werkzeuges regeln. Die gewünschten Ausgangsparameter können vom Gerätefahrer über einfache Menüs eingegeben werden. Durch die Verwendung eines programmierbaren „Ziehassistenten“ können die Ziehgeschwindigkeit und die Betonmenge aufeinander abgestimmt werden. Dabei wird während des Betoniervorganges die Betonmenge kontinuierlich ermittelt und anhand des Betondurchflusses wird die Ziehgeschwindigkeit automatisch reguliert. Die „Assistenten“ sind im Allgemeinen elektronischen Kontroll- und Steuersystem integriert und gewährleisten so eine hohe und konstante Pfahlqualität (Bauer, 2014).

Durch das Monitoring der Produktionsdaten lassen sich unter anderem die Tragfähigkeiten qualitativ abschätzen. Die verwendeten Mengen sind transparent und für die spätere Abrechnung sofort nachvollziehbar.

#### 4. Nutzen der Monitoringdaten

Nicht erst seit der Vorstellung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ des Bundesverkehrsministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur ist das sogenannte Building Information Modeling (BIM) ein häufig diskutiertes Thema in der Fachwelt. Im allgemeinen Hochbau ist BIM bereits seit Jahren als digitales Planungsmittel etabliert, während das Thema im Spezialtiefbau bislang nur vereinzelt Pilotprojekten, wie zum Beispiel König et al. (2017) oder den Forschungsinteressen größeren Planungsbüros sowie Unternehmen wie z.B. Rackwitz et al. (2015) oder Beckhaus et al. (2016) vorbehalten ist.

Building Information Modeling (BIM) steht dabei grundsätzlich für eine kooperative Arbeitsweise auf Grundlage digitaler Modelle, die alle relevanten Daten und Informationen eines Bauwerkes über den gesamten Planungs- und Lebenszyklus abbilden.

Dabei geht die Modellierung weit über bereits selbstverständliche 3D Modellierung hinaus und soll sowohl

eine für alle Projektbeteiligten transparente Leistungsbeschreibung sowie Baufortschrittskontrolle mittels eines 5D Modells als auch ein Qualitätsmanagement während der Bewirtschaftung des fertigen Bauwerkes bis zum eventuellen Rückbau (7D) erlauben.

Abbildung 5 veranschaulicht den Umfang des Modells am Beispiel einer Brücke.

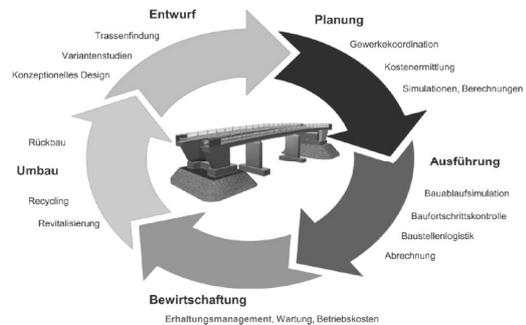


Abbildung 5: Building Information Modelling über den gesamten Lebenszyklus einer Brücke nach Borrmann (aus Singer und Borrmann, 2016)

Eine exakte und tagesgenaue Ausführungskontrolle setzt neben einer technischen Vernetzung der ausführenden Maschinen und Personalkräfte eine interdisziplinäre Schnittstelle voraus. Wie in Abbildung 6 veranschaulicht, werden zurzeit die Produktionsdaten automatisch am Gerät aufgezeichnet, drahtlos an einen Server übermittelt und automatisch gespeichert. Die örtliche Bauleitung prüft die Produktionsdaten und verteilt die Daten an die Projektbeteiligten. Ein direkter Zugriff der Projektbeteiligten erfolgt nicht. Zum einen fehlt die gemeinsame Datenschnittstelle und zum anderen ist eine vorhergehende Überprüfung der Daten durch die Bauleitung unumgänglich, da trotz technischer Optimierung Fehler aufgrund äußerer Störungen auftreten können.

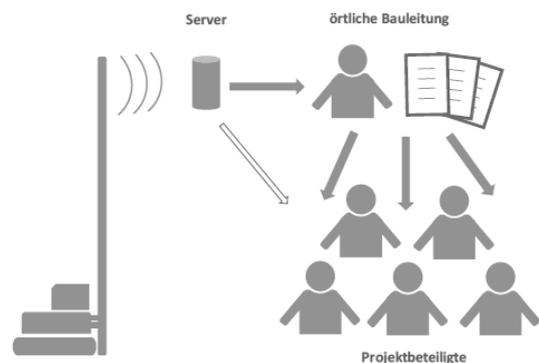


Abbildung 6: Umgang mit den Monitoringdaten

Neben diesen technischen Herausforderungen setzt diese transparente Kooperation eine partnerschaftliche Projektentwicklung auf Basis einer Vertrauenskultur

voraus, die, insbesondere in Großprojekten, wo viele Subunternehmer tätig werden, meist ausbaufähig ist.

## 5. Fazit

Vollverdrängungspfähle bieten unabhängig von ihrer Herstellungsart den Vorteil, dass durch die Verdrängung des Bodens ein direktes Feedback über die qualitative Tragfähigkeit sowie über die verbauten Mengen und den Leistungsfortschritt erfolgt. Durch die Ausstattung der Ramm- und Bohrgeräte mit Monitoring und Assistenzsystemen können die Produktionsdaten direkt aufgezeichnet und weiterverwendet werden. Die Daten können für:

- qualitative Bewertung der Tragfähigkeit
- Nachweis der Pfahlintegrität
- nachvollziehbare Mengendokumentation
- exakte und tagesgenaue Leistungskontrolle

genutzt werden.

Ein Nutzen der Produktionsdaten im Sinne von digitalen Planungsmodellen, wie zum Beispiel BIM, ist zurzeit noch nicht gegeben. Grundsätzlich könnten die Daten dafür genutzt werden, sofern die technische Schnittstelle vereinheitlicht und ein vertrauensvoller Umgang mit den Daten gewährleistet ist.

Nichtsdestotrotz machen die Produktionsdaten den gesamten Ausführungsprozess für alle Projektbeteiligten nachvollziehbar und bieten eine außergewöhnliche Transparenz.

## Literatur

Bauer, S. (2014): Qualitätssicherung bei der Herstellung von Pfählen durch Assistenzsysteme und elektronische Kommunikation, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität, Darmstadt, Heft 93, S. 17- 22

Beckhaus K., Bauer F. Hoyme, C. (2017): Herausforderungen an das Management von Mess- und Produktionsdaten im Spezialtiefbau, 11. Österreichische Geotechniktagung Vienna – Terzaghi Lecture, Baugrund Risiko & Chance, Tagungsbeiträge 2.+3. Februar 2017, S. 317 -326

Grabe J., Pucker T., Busch P. und Gerressen F.-W. (2012): Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Herstellung von Vollverdrängungsbohrpfählen. Tagungsband zur 32. Baugrundtagung 2012 in Mainz, S. 75-81, Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V.

Grabe J. und Pucker T. (2012): Zur numerischen Modellierung von Vollverdrängungsbohrpfählen. Geotechnik, 35(2):109-118

König M., Rahm T., Nagel F., Speier L (2017): Bim Anwendungen im Tunnelbau Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten, Bautechnik 94. Heft 4, DOI 10.1102/ bate 20170005

Rackwitz F., Stahlhut O., Rickriem, J.: Ausführung einer komplexen innerstädtischen Baugrube unter Verwendung einer BIM basierten Monitoringplattform für den Spezialtiefbau, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität, Darmstadt

Schäfer, R. (2016) Auswirkung der Herstellung von Schneckenbohrpfählen auf die Lagerungsdichte des Bodens, 34. Baugrundtagung, Bielefeld, 14.- 17.09. 2016

Singer D.; Borrmann, A. (2016) Machbarkeitsstudie BIM für Bestandsbrücken Schlussbericht Technische Universität München Leonard Obermeyer Center Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation