

Anwendung konventioneller und faseroptischer Sensorik am Beispiel eines Pfahltestes in Dubai

Thomas Wolff¹, Karl Josef Witt², Aidroos Hassan³

Zusammenfassung: Im Rahmen eines Hochhausprojektes in den Vereinigten Arabischen Emiraten wurde von der Bauhaus Universität Weimar in Zusammenarbeit mit der Middle East Foundations Group L.L.C. Messungen an Bohrpfählen zum Zweck der wissenschaftlichen Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Pfahlgründungen unter den speziellen Standortbedingungen von Dubai durchgeführt. Dabei wurden zur Erfassung der für das Trag- und Verformungsverhalten relevanten Parameter zwei unterschiedliche Messmethoden eingesetzt. Ergebnisse aus interferometrischer Längenmessung sollen den Messungen der mit konventionellen Schwingsaitenaufnehmern ermittelten Längenänderungen gegenübergestellt werden. Mit den daraus rekursiv ermittelbaren Eingangsparametern für die Berechnungsverfahren von Pfahlgründungen, ist es ein Ziel der Untersuchungen, die Berechnungsannahmen zu überprüfen und die Bemessung zu optimieren. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die eingesetzte Sensorik im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten und die Handhabbarkeit unter Feldbedingungen. Da die Auswertungen noch nicht abgeschlossen sind, wird hier nur die grundlegende Messtechnik vorgestellt. Über die im Vergleich ermittelten Parameter wird später berichtet.

¹ wissenschaftl. Mitarbeiter am Lehrstuhl Grundbau, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus Universität Weimar

² Prof. Dr.-Ing., Lehrstuhl für Grundbau, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus Universität Weimar

³ General Manager „Middle East Foundation Group L.L.C.“ V.A.E.

Summary: Within the scope of a high-rise building project in the United Arab Emirates readings and measurements were carried out from the Bauhaus University in Weimar in cooperation with the Middle East Foundation Group L.L.C. These measurements were taken on bored piles for the purpose of researching the load bearing behaviour and the deformation behaviour of foundation piles under the special conditions in Dubai. Two different measurement methods were used to survey the relevant parameters for the load bearing and the deformation behaviour. Results from interferometrical measurements of strain should be compared with the measurements determined with the conventional vibrating wire strain gages. With the recursive determined input parameters for the calculation of the pile foundations, it is one of the goals of the research, to inspect the design assumptions and to optimise the calculation. The present report gives an overview of the deployed sensors with regards to the fields of application and the handling under field conditions. Since the analyses are not completed, only the basic technique of measurements will be presented here. Over the parameters determined in comparison will be discussed at a later point

1 Einleitung

Im Rahmen eines Hochhausprojektes in Downtown von Dubai wurde von der Bauhaus Universität Weimar in Zusammenarbeit mit der lokalen Tiefbaufirma „Middle East Foundations Group L.L.C.“ Feldversuche an Bohrpfählen zum Zwecke der wissenschaftlichen Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Pfahlgründungen unter den speziellen Standortbedingungen von Dubai durchgeführt (siehe Bild 1).

Gebäude mit Höhen zwischen 70 und 250 m zählen zu den üblichen Wohn- und Geschäftshäusern des expandierenden Emirates und stellen für das dortige Verständnis keine Besonderheiten dar. Nur für außerordentliche bautechnische bzw. geotechnische Konstruktionen werden derzeit in dem Emirat Dubai detaillierte Baugrunduntersuchen und experimentelle Messungen angestellt. Im Allgemeinen stützt man sich auf die Erfahrungswerte aus verschiedenen internationalen Standards.



Bild 1 Überblick mit geplantem Projekt

Fig. 1 Overview with planned project

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Baugrundes und den damit verbundenen Grenzen der exakten Vorausberechnung des Verformungsverhaltens unter Belastung, kommen Messungen und Versuchen in der Geotechnik große Bedeutung zu. Die Ergebnisse der Messungen bilden die Grundlage für den bautechnischen Entwurf, liefern die Eingangsparameter für Berechnungsverfahren und dienen der Überprüfung getroffener Berechnungsannahmen [8]. Stößt man mit der Anwendung von konventionellen, z.B. elektronischen Sensoren unter extremen Bedingungen oft an deren Grenzen, können faseroptische Messverfahren eine gute Ergänzung bzw. Alternative sein. Der vorliegende Beitrag zeigt anhand eines Beispiels die Anwendungsmöglichkeiten innovativer faseroptischer Messmethoden im Vergleich zu bewährten konventionellen Methoden auf.

2 Geotechnische Messungen

2.1 Allgemeines

Geotechnische Messungen als Grundlage für Baugrund- und Berechnungsmodelle sowie deren Interaktion, werden in den Emiraten nur in besonderen Fällen entsprechend umfangreich durchgeführt. Bei Unterteilung der geotechnische Messungen in

- Feldversuche zur Baugrunderkundung,
- Bodenmechanische Laborversuche zur Klassifizierung von Böden und Ermittlung von Bodenkennwerten und in
- geomechanische Messungen zur Bestimmung von Verformungen, Spannungen und Kräften

wird der Aufwand der Baugrunduntersuchungen auf die notwendige Ermittlung der für die Berechnung nach amerikanischem Standard erforderlichen bodenmechanischen Parameter begrenzt. Geomechanische Messungen zur Verifizierung der Erfahrungswerte bzw. Berechnungsannahmen stellen derzeit in den Emiraten die Ausnahme dar. Die im vorliegenden Fall interessierenden physikalischen Größen, die mit geomechanischen Messungen unterschiedlicher Methoden erfasst werden sollen, sind die axialen Stauchungen des Bohrpfahlquerschnittes.

2.2 Anforderungen an die Messtechnik

Schallert gibt in [17] einen Leitfaden zur Auswahl geeigneter Sensorprinzipien für die jeweilige geotechnische Fragestellung. Danach werden die Anforderungen in die Kategorien allgemein-messtechnisch, mechanisch-ökonomisch und Umgebungsbedingt eingeteilt.

Unter allgemeinen und messtechnischen Anforderungen werden z.B. Merkmale wie Messbereich, Genauigkeit und Messbasis sowie Empfindlichkeit und Auflösung der Sensoren, Zuverlässigkeit und Langzeitstabilität verstanden. In [15] werden Empfehlungen für die Messgeber zur Messung der axialen Verzerrung an Pfählen mit

- einer Genauigkeit $<1 \text{ mm/m}$
- einem Messbereich $300 \text{ } \mu\text{m/m}$ bei Dehnung
 $600 \text{ } \mu\text{m/m}$ bei Stauchung

gegeben.

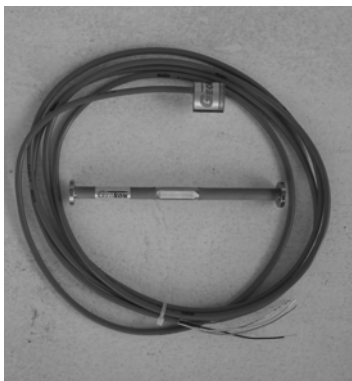
Mechanischen Anforderungen ergeben sich z.B. bei der Integration der Sensoren in einen Werkstoff. Es ist auf einen guten mechanischen Verbund zwischen Sensor und Werkstoffmatrix zu achten.

Beanspruchungen denen die Messtechnik beim Einbau, unter Belastung, und unter Umwelteinwirkungen ausgesetzt ist werden als Umgebungsanforderungen verstanden.

Ökonomische Aspekte können bei vergleichbarer Ergebnisqualität der unterschiedlichen Messsysteme die Wahl beeinflussen.

2.3 Auswahl der Sensoren

Beeinflusst durch die auf dem amerikanischen und europäischen Markt gesammelten guten Erfahrungen bei der Anwendung von Verzerrungsgebern mit schwingender Saite, wird dieses Prinzip in dem arabischen Raum vorwiegend für Verformungs-, Verzerrungs- und Druckmessung an unterschiedlichen Konstruktionen eingesetzt. Die Bild 2a und b zeigen exemplarisch zwei auf dem Prinzip der schwingenden Saite ausgewählten Sensoren.



(a) Schwingsaitenaufnehmer, 4200
(a) Vibrating Wire Strain Gages, 4200



(b) Pfahlfuß-Druckzelle, 4855
(b) Pile-Tip Pressure Cell, 4855

Bild 2 Sensoren basierend auf dem Prinzip der schwingenden Saite

Fig. 2 sensors based on principle of vibrating wire

Der Messbereich der von der Firma Strainstall • GB und Geokon • USA verwendeten Verzerrungsgeber liegt bei $3000 \mu\text{m}/\text{m}$ und die Auflösung bei $1,0 \mu\text{m}/\text{m}$. Weitere eingesetzte Sensoren die hier nicht näher aufgezeigt werden, sind Wegaufnehmer zur Messung der vertikalen und horizontalen Pfahlkopfverschiebung, ein Mehrfachextensometer zur Bestimmung der relativen Pfahldehnungen, Temperaturfühler und Kraftmessdosen zur Aufnahme der aufgetragenen Belastung.

Als zweites Messsystem zur Aufnahme der Pfahlstauchungen kamen faseroptische Sensoren der Firma SMARTEC • Schweiz, die auf dem Prinzip der Interferometrie basieren, zum Einsatz.

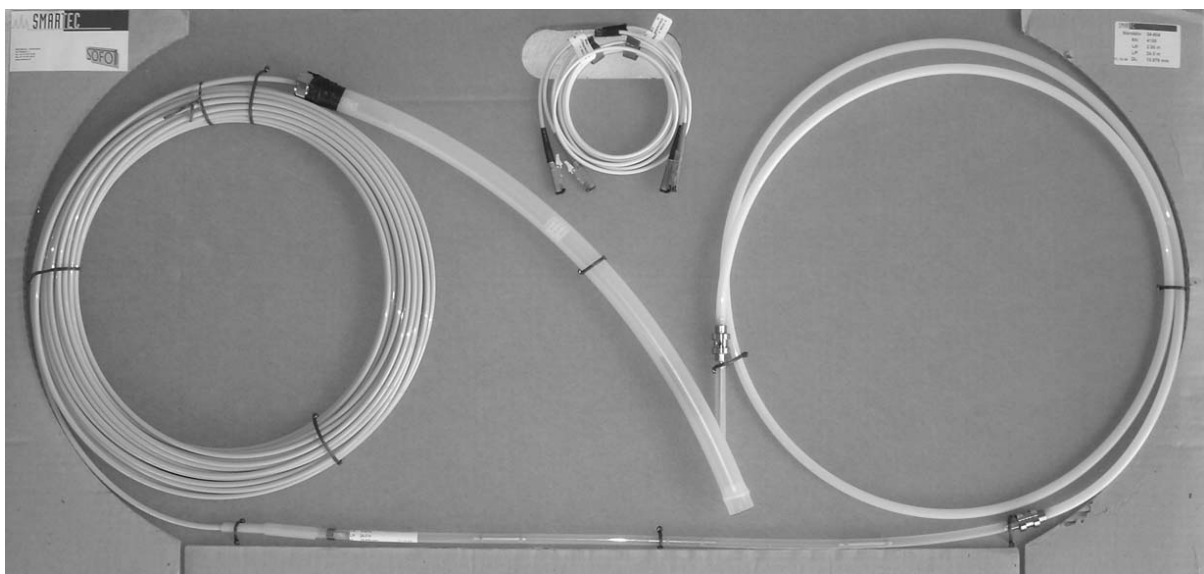


Bild 3 SOFO Standardsensor der Firma Smartec

Fig. 3 SOFO Standard Deformation Sensor

Die Vor- und Nachteile verschiedener faseroptischen Sensoren werden in [17] detailliert aufgeführt. Die aus ersten Anwendungen von SOFO Sensoren bei der Verformungsmessung von axialbelasteten Gründungspfählen in [10] und [11] berichteten guten Ergebnissen, die bekannten Vorteile unter extremen Bedingungen, auch im Hinblick auf eine Langzeitstabilität, führten zur Wahl der in Bild 3 dargestellten faseroptischen Sensoren der Firma „SMARTEC“ • Schweiz. Die 0,25 m bis 10 m langen Sensoren erreichen bei einem Messbereich von 1% Dehnung und 0,5% Stauchung eine Auflösung von $<2/1000 \text{ mm}$.

Die physikalischen Grundlagen der beiden unterschiedlichen Messsysteme kann den Herstellerunterlagen entnommen werden.

3 Feldversuch

Neben der Kenntnis der bodenmechanischen Kennwerte des Baugrundes ist für die Berechnung von Pfahlgründungen als geotechnische Konstruktionen auch die Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk von ausschlaggebender Bedeutung. Zum Zweck der Verifizierung der bisherigen in den Emiraten verwendeten Berechnungsannahmen bei den unterschiedlichen Eigenschaften der regional typischen Baugrundsichten wurden geomechanische Messungen an Großfeldversuche durchgeführt. Zeitgleich wird bei den Versuchen der Vergleich zweier unterschiedlicher Messsysteme bezüglich Messunsicherheit, Applikation und Wirtschaftlichkeit angestellt.

Aus dem gesamten im Frühjahr 2005 durchgeführten Untersuchungsprogramm wird hier beispielhaft ein Versuch an einem Einzelpfahl vorgestellt. Mit diesem Einzelpfahlversuch, einem Ort betonbohrpfahl mit einem Durchmesser von $D = 75$ cm und einer Gesamtlänge von $L = 11,0$ m soll das genaue Last-Verformungsverhalten von derartigen Gründungskonstruktionen in den repräsentativen Baugrundsichten untersucht und die unterschiedlichen Messmethoden getestet werden. Dabei war beabsichtigt, den mit 10 % des Pfahlschaftdurchmessers festgelegten Grenzwert der Pfahlkopfsetzung während der schrittweisen Belastung zu erreichen bzw. zu überschreiten. Der Versuchsaufbau und die applizierte Messtechnik sind in Bild 5 und Bild 6 skizziert.

3.1 Pfahlbemessung

Auf der Grundlage der im Rahmen des Projektes vorhanden Baugrund- und Laboruntersuchen wurde die äußere Tragfähigkeit des Bohrpfahles ermittelt. Die aufgeführte Geometrie wurde so gewählt, dass mit der zur Verfügung stehenden max. Belastung von 23 MN die gewünschten Verformungen sicher erreicht werden. Wie Bild 4 dargestellt, durchfährt der Pfahl die obererste 5,50 m dicke mitteldicht bis dichtgelagerte feine Sandschicht und bindet 5,50 m in die verwitterte Sandsteinschicht ein. Für die Bemessung der äußeren Tragfähigkeit von Ort betonbohrpfählen wird bei den für die Emirate typischen granularen kohäsionslosen sandigen Böden den Empfehlungen von Tomlinson [18] und dem Criteria Report 143 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gefolgt.

Der Gesamtpfahlwiderstand Q_u berechnet sich aus der Summe der Einzelwiderstände Pfahlmantelreibung Q_s und Pfahlspitzenruck Q_b .

$$Q_u = Q_s + Q_b \quad (1)$$

Die Mantelreibung wird aus Erfahrungswerten ermittelt, die an den Eindringwiderstand N_{30} der Standard Penetration Tests gekoppelt ist, der Pfahlspitzenruck wird über eine empirische Korrelation zur einaxialen Druckfestigkeit berechnet.

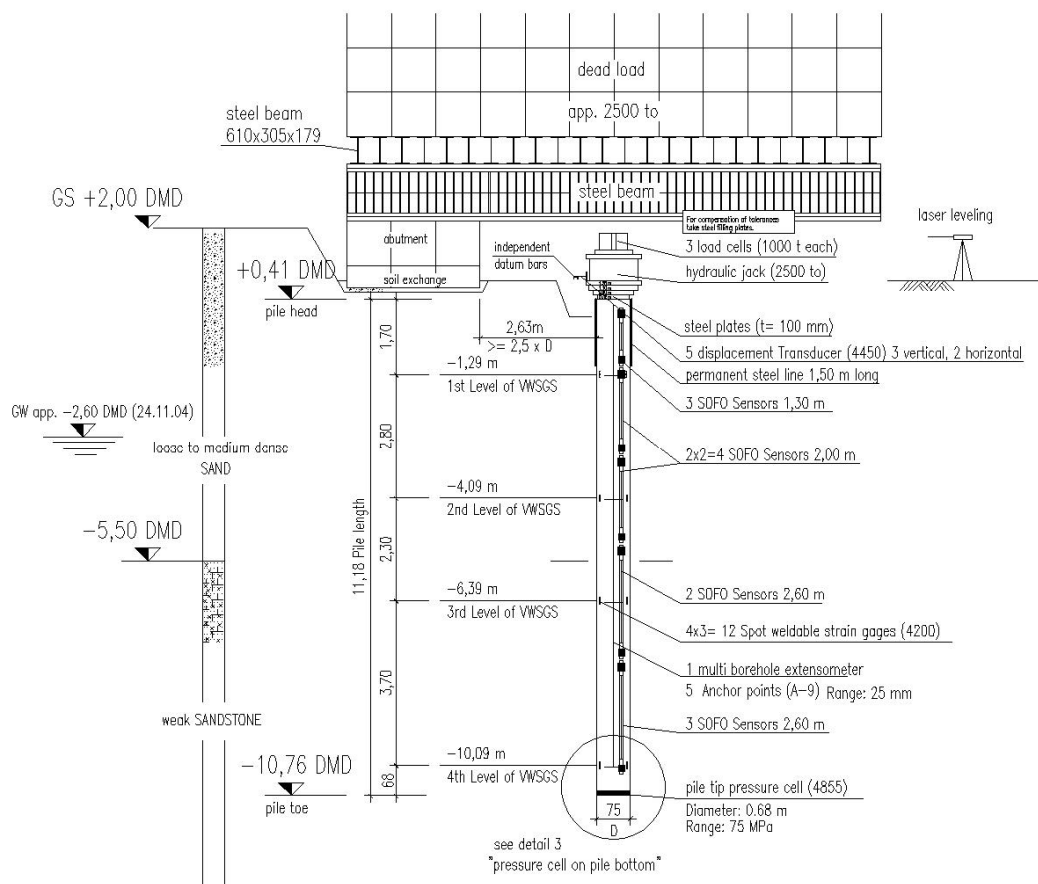


Bild 4 Einzelpfahltest

Fig. 4 single pile test

Für den speziellen Fall ergaben sich die Einzelkomponenten der Vorbemessung der äußeren Tragfähigkeit auf der Grundlage der derzeit verfügbaren Kenntnis zum Baugrund

- der Mantelwiderstand im Sand zu 1166 kN, der
- der Mantelreibung im verwitterten Sandstein zu 7127 kN und der
- Spitzendruck in verwitterten Sandstein zu 5301 kN

Die Grenztragfähigkeit des Pfahles ergibt sich somit zu $Q_u=13.594$ kN. Die Differenz zwischen der errechneten Grenztragfähigkeit und der max. möglichen Last der hydraulischen Presse von 23.000 kN soll Unsicherheiten bei der Bestimmung der bodenmechanischen Parameter und bei der Rechenannahme kompensieren

3.2 Instrumentierung des Pfahles

Bei der gewählte Pfahlänge von $L = 11,0$ m konnten die Pfahlfußdose, die Schwingsaitengeber und die faseroptischen Sensoren komplett an dem einen vorgefertigten Bewehrungskorb appliziert werden. Bild 5 gibt einen Überblick der eingesetzten Sensorik.

Die eingeleiteten Pfahlkopfkräfte werden durch 3 Kraftmessdosen der Firma Strainstall • UK ermittelt (Bild 6a). Die Messung des hydraulischen Öldruckes der Presse allein birgt grobe Fehler in sich, die nach [9] bis zu 20 % betragen können.

Für die wirklichkeitsnahe Bestimmung und zur Überprüfung der berechneten einzelnen Pfahlwiderstandsgrößen wurde der Pfahl mit einer Kraftmessdose am Pfahlfuß ausgestattet. Die mit Abstand an die Bewehrung befestigte Druckmessdose ($\varnothing 68$ cm) besteht aus mit Hydrauliköl gefülltem Druckkissen mit einer Dicke von 2,9 cm. Der Flüssigkeitsdruck als Messgröße erlaubt Rückschlüsse auf die senkrecht zur Messebene wirkende Spannung. Um eventuelle infolge Betonschwindens auftretende Spalten zwischen Messdose und Pfahlfuß zu kompensieren, wurde die Zelle mit einem zusätzlichen Ventil versehen, durch das gegebenenfalls der Druck entsprechend angepasst werden kann (Bild 6b).

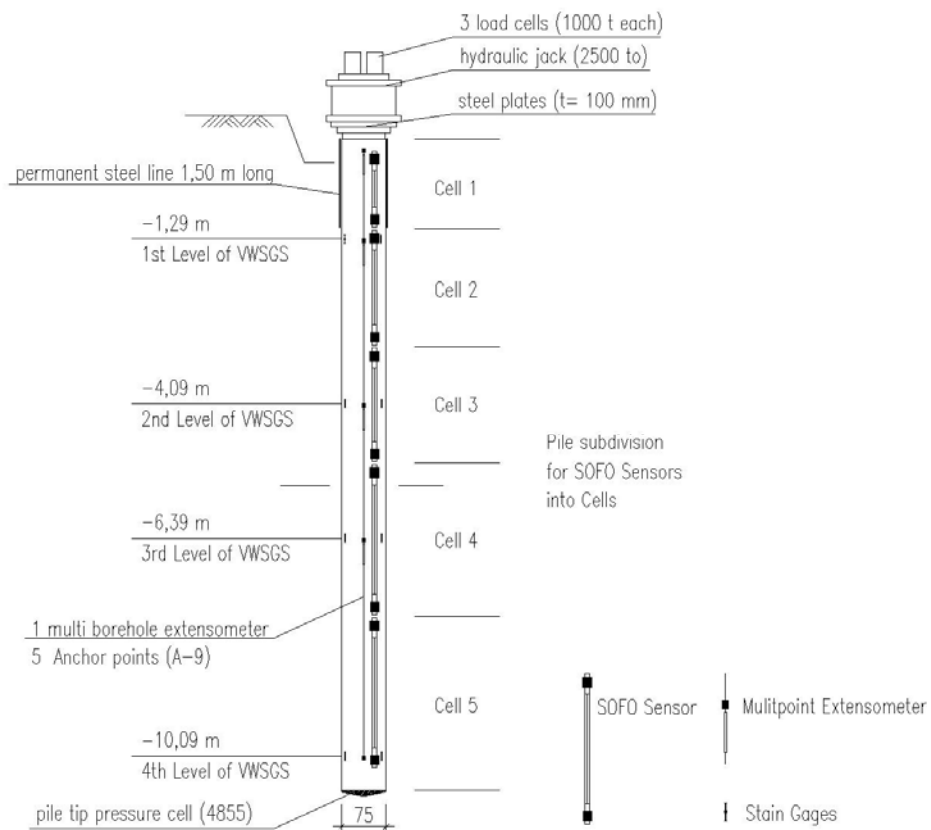
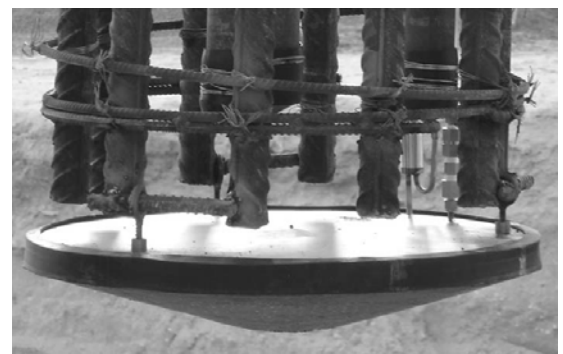


Bild 5 Geotechnische Messinstrumentierung

Fig.5 Geotechnical Instrumentation



(a) Anordnung der Lastzellen auf der hydraulischen Presse
(a) load cell arrangement on the hydraulic jack



(b) Druckmessdose am Pfahlfuß
(b) Pressurecell on pile toe level

Bild 6

Fig. 6

Die Verteilung der Pfahlkräfte respektive der Pfahlmantelreibung über die Pfahllänge bei unterschiedlichen Belastungen kann im Gegensatz zur direkten Kraftmessung nur indirekt über die Messung der axialen Verzerrung des Pfahlquerschnittes ermittelt werden. Die zu den Belastungen gehörende Pfahlnormalkraft kann bei Annahme bzw. Kenntnis der tatsächlichen Stoffkennwerte und Werkstoffeigenschaften des Verbundwerkstoffs Stahlbeton nach Messung der Verzerrung rückgerechnet werden.

Für die Messung der axialen Verzerrungen wurden zum einen die in Bild 2a dargestellten Schwingsaitenaufnehmer der Firma „Geokon“ und zum anderen die in Bild 3 gezeigten faser-optischen Standard Sensoren der Firma „SMARTEC“ eingesetzt. Jeweils 3 Schwingsaitengeber wurden an 4 über die Pfahllänge festgelegten Querschnitten appliziert.

Die faseroptischen Sensoren unterteilen den Pfahl entsprechend ihrer Länge in 5 imaginäre Zellen. Um Exzentrizitäten infolge Lasteinleitung am Pfahlkopf und -fuß erfassen zu können, wurden in der obersten und untersten Zelle jeweils 3 Sensorstränge und in den übrigen Zellen nur zwei sich gegen überliegenden Sensoren angeordnet. Bild 7 verdeutlicht die Sensoranordnung über den Querschnitt und zeigt den Übergangsbereich zweier SOFO Sensoren einschließlich der Spiegelzone am Ende des einen Sensors.

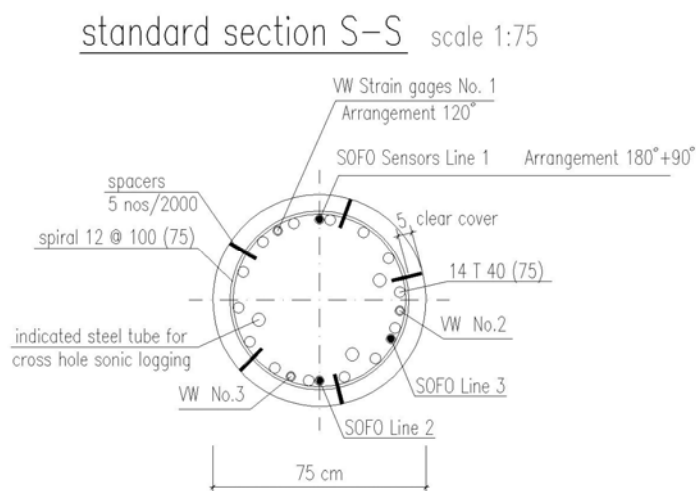


Bild 7 Pfahlquerschnitt mit Sensoranordnung

Fig. 7 cross section and sensor arrangement

Bild 8 SOFO Sensoren

Fig. 8 SOFO Sensors

4 Versuchsdurchführung

Nach Erreichen der 7 Tage Betonfestigkeit von 66 N/mm^2 wurden zu Überprüfung der Integrität die Hammerschlagmethode (low strain methode) und Ultraschalluntersuchungen (sonic logging) angestellt. Die Auswertung der Ergebnisse ergab keine Diskontinuitäten des Pfahlquerschnittes über die Länge (Bild 9).

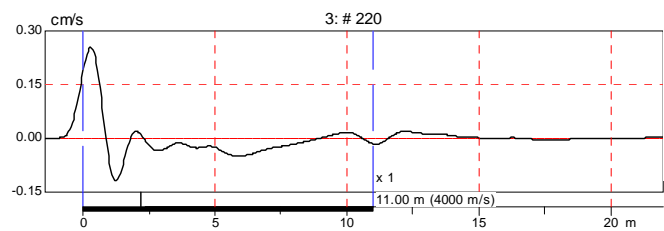


Bild 9 Ergebnis der Hammerschlagmethode

Fig. 9 result from low strain integrity test

Nach Erreichen der erforderlichen Betonfestigkeit von 100 N/mm^2 wurde die Belastung, zentrisch und axial angreifend, mittels hydraulischer Presse aufgebracht. Als Widerlager für die Pressenlast (Bild 10) dient eine entsprechend ermittelte Totlast aus Betonwürfeln.



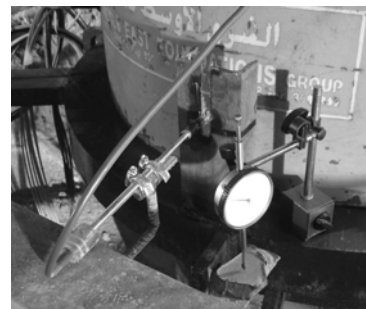
Bild 10 Testaufbau

Fig. 10 Test setup

Zur Erfassung der vertikalen und horizontalen Pfahlkopfverschiebung während der Belastung wurden entsprechend 3 vertikale und 2 horizontale elektrische Wegaufnehmer am Pfahlkopf appliziert. Analoge Messuhren zur Ermittlung der Pfahlkopfverschiebung wurden zur Absicherung eingesetzt.



(a) vertikaler Wegaufnehmer & Messuhr
(a) vertical displacement transducer & dial gauge



(b) horizontaler Wegaufnehmer & Messuhr
(b) horizontal displacement transducer & dial gauge

Bild 11 Wegaufnehmer

Fig. 11 displacement transducers

Entsprechend den Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprobelastungen des Arbeitskreises 2.1 der DGGT [2], dem ASTM D1143 [1] und den Empfehlungen von Tomlinson [18] wurde der Pfahl durch 4 Lastzyklen bis zum Versagen der äußeren Tragfähigkeit belastet (siehe Bild 12). Während der einzelnen Lastungsstufen wurde die Belastung so lang aufrechterhalten bis die Setzungsgeschwindigkeit auf 0,1 mm pro 5 Minuten abgeklungen ist. Alle während des Versuches anfallenden Messwerte wurden mit den zugehörigen Ausleseeinheiten aufgezeichnet.

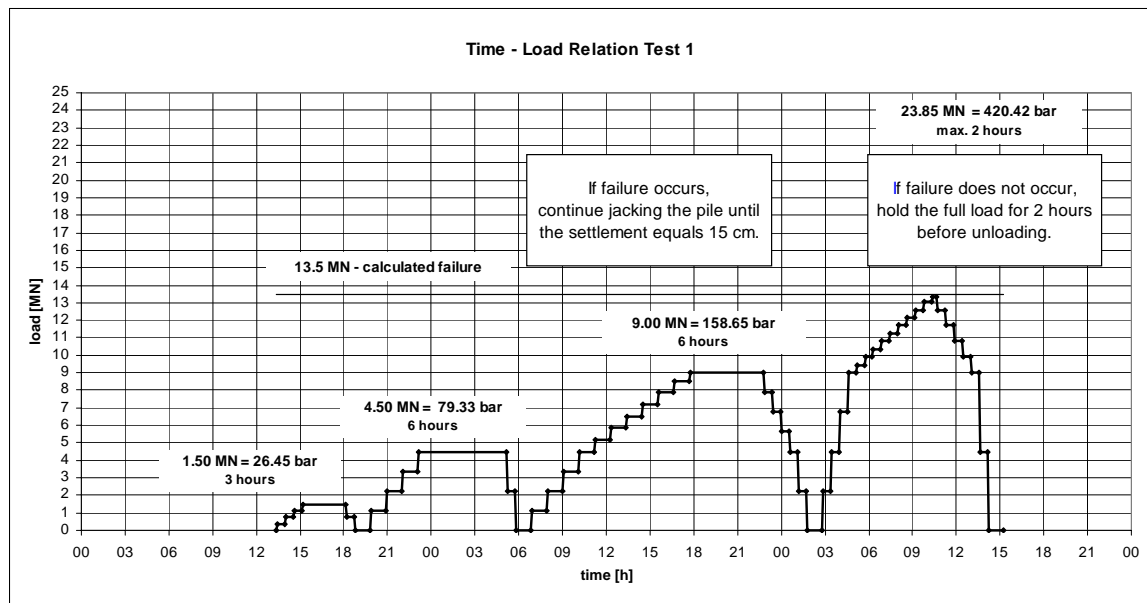


Bild 12 Belastungsstufen und Lastzyklen

Fig. 12 Load Steps and load cycles

5 Ergebnisse

Erste Ergebnisse der Auswertung der analogen Messuhren (Bild 13) am Pfahlkopf zeigen den Verlauf der Pfahlkopfsetzungen als Antwort der aufgebracht axialen Belastung. Die als Grenzwert der Gebrauchstauglichkeit mit 7,5 cm festgelegte Pfahlkopfsetzung wurde bereits bei einer Belastung von 10,80 MN erreicht.

Die hier noch nicht explizit dargestellten ersten Gegenüberstellungen der mit den unterschiedlichen Messmethoden aufgezeichneten Ergebnisse zeigen tendenziell ähnliche Verläufe der Pfahllängsdehnung über die Tiefe. Kennzeichnend für die Interpretation ist, dass mit den Schwingsaiten Sensoren nahezu punktuell Stauchungen gemessen werden, während bei den angewendeten faseroptischen Sensoren die Dehnungen über die applizierte Länge, also über die Messbasis von 1,3 m bis 2,60 m, gemittelt werden. Ein Unterschied ergibt sich bei der Zuordnung der Mantelreibung zu den einzelnen Tiefenhorizonten. Die Schwingsaitengeber täuschen wegen der nahezu punktuellen Messung eine höhere Präzision bei der rekursiven Ermittlung der Pfahlmantelreibung vor als die integralen Werte der faseroptischen Sensorik. Tatsächlich ergibt sich die am Punkt gemessene Dehnung aber ebenfalls als Resultat des gemittelten Kraftverlaufes zwischen den Stützstellen, so dass auch damit Sprünge oder Änderungen der Mantelreibung an Grenzschichten nicht lokalisiert werden können. Die Präzision der beiden Methoden ist vergleichbar. Der Vorteil der hier

verwendeten faseroptischen Sensoren liegt in der geringeren Fehleranfälligkeit bei lokalen Störungen, da solche Einflüsse, die bei Schwingsaitengebern zu Fehlinterpretationen führen, durch die große Messstrecke kompensiert werden. Die Stabilität beider Messverfahren hat sich über den Messzeitraum betrachtet sehr gut bestätigt.

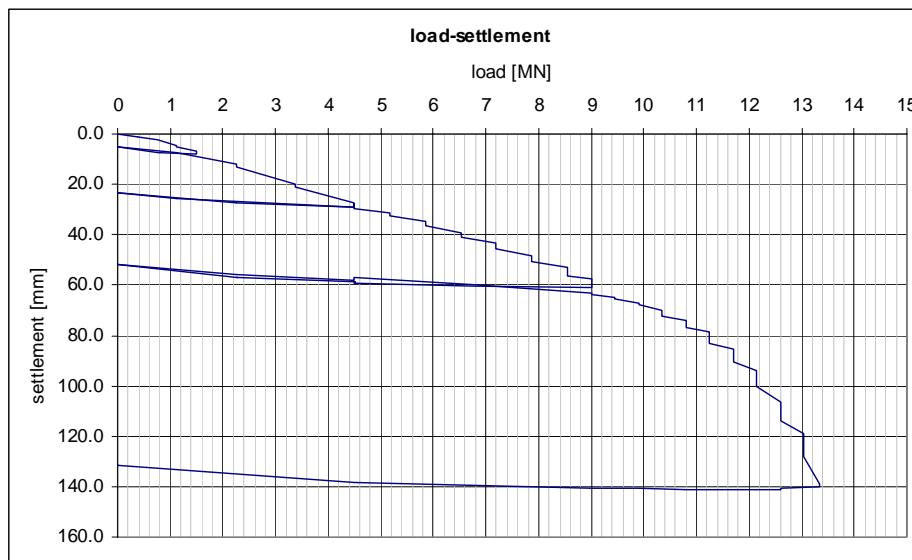


Bild 13 Last-Verformungsbeziehung am Pfahlkopf

Fig. 13 Load-Settlement relation on pile head

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es hinsichtlich der Applikation der verschiedenen Sensoren keine gravierenden Unterschiede gibt. Es wäre ein Irrtum aufgrund der robusteren Konstruktionsart der Schwingsaitengeber auf einen geringeren Aufwand für die Applikation zu schließen. Im direkten Vergleich der unterschiedlichen Messmethoden, ist bei ordentlicher Versuchsplanung und sorgfältiger Handhabung eher ein zeitlicher Vorteil bei den faseroptischen Sensoren zu sehen.

Die Vielfalt der erfassten Messgrößen durch Sensoren, die auf dem Prinzip der schwingenden Saite und elektrischer Verformungsmessung beruhen, kann derzeit durch faseroptische Sensorik nur zum Teil abgedeckt werden. Dennoch bieten auch diese Messsysteme Vorteile bei spezifischen Fragen des Spezialtiefbaus mit Schwerpunkt der Verformungs- und der Temperaturmessung. Für viele praktische Fragestellungen bietet sich nach sorgfältiger Analyse der benötigten Kenngrößen, deren Präzision und Messfrequenz an, Messsysteme entsprechend deren Vorteile zu kombinieren, um so technisch wie ökonomisch optimale Aussagen als Grundlagen für Berechnungen und Entscheidungen zu erhalten.

Literatur

- [1] ASTM D 1143: Test Method for piles Under Static Axial Compression Load. *Annual Book for ASTM Standards*, Vol. 04.08. (1981, reapproved 1994)
- [2] CRITERIA REPORT 143: Standard Penetration Test. *Construction industry Research and Information association*, (1995)
- [3] DGGT AK 2.1: Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen. *DGGT Arbeitskreis 2.1*, (1998)
- [4] DIN 1054.: Baugrund; Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, GmbH Berlin, Januar 2003
- [5] DIN 1319-01.: Grundlagen der Messtechnik: Grundbegriffe. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, GmbH Berlin, 1995
- [6] DIN 1319-02.: Grundlagen der Messtechnik: Begriffe für die Anwendung von Messgeräten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, GmbH Berlin, 1995
- [7] DIN 4020.: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, GmbH Berlin, September 2003
- [8] FECKE, E.: Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels. Ferdinand Enke: Verlag Stuttgart, 1997
- [9] FELLENIUS, B.H.: Test Loading of Piles and New Proof Testing Procedure. *Journal of Geotechnical Engineering Division GT 9* (1975), S. 855–869
- [10] GLISIC, B.; INAUDI, D.; NAN, C.: A method for pile monitoring using long-gage fibre optic sensors; First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Tokyo, November 13-15, 2003 , WWW.SMARTEC.CH
- [11] GLISIC, B.; INAUDI, D.; NAN, C.: Pile monitoring during axial compression, pullout and flexure test using fibre optical sensors; 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board, WWW.SMARTEC.CH
- [12] HABEL, W.R.: Faseroptische Sensoren für die Deformationsmessung- Kriterien für eine zuverlässige Nutzung: *GESA Symposium*. Braunschweig:, 2003

-
- [13] HABEL, W.R.; HOLST, A.: Vergleichende Verformungsmessungen an einem Stahlbetonpfahl mit Gleitmikrometer, DMS und Fasersensoren. *Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. (IEMB), Berlin*
- [14] KATZENBACH, R.; MOORMANN, CH.: Instrumentation and monitoring of combined piled rafts (CPRF): State-of-the-art-report. *FMGM Symposium 2003*. Oslo
- [15] KATZENBACH, R.; MOORMANN, CH.: Messtechnische Überwachung von Baugrube und Gründung des Hochhauses Main Tower in Frankfurt am Main. In *Messen in der Geotechnik 1998*. Braunschweig: Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig, Heft 55, Seiten 87-121, 2004
- [16] OH, J.-L.; LEE, S.B.; LEE, W.-J.: Analysis of pile load transfer using optical fibre sensor. *6th International Conference of Application of stress – Wave Theory to piles*. San Paulo, Brasilien, 2000, S. 99–106
- [17] SCHALLER, M.; KREBBER, K.; HOFMANN, D.; HABEL, W.R.; STAHLMANN, J.: Auswahl Geeigneter Fasersensorprinzipien für Anwendungen in der Geotechnik. In *Messen in der Geotechnik 2004*. Braunschweig: Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig Heft 77, Seiten 309-328, 2004
- [18] TOMLINSON, M.J.: *Pile Design and Construction Practice*, Fourth Edition: publisher E & FN Spon New York, 2004, ISBN 0 419 18450 3
- [19] WYLLIE, D.C.: *Foundation on Rock*, second Edition: publisher E & FN Spon New York, 1999, ISBN 0 419 23210 9