

Verwendung von Schottersäulen bei Setzungen und für Verflüssigung anfälligen Böden

Das neue Urlaubsresort „Paradisus Coco Beach Resort“ in Rio Grande (Puerto Rico) liegt in einem alten Sumpfgebiet, das mit relativ reinem bis schluffigem Sand aufgefüllt wurde. Die sumpfige Ablagerung besteht aus organischen Schluffen, Torf, lockerem Fein- bis Mittelsand bis schluffigem Sand. Das Projekt erforderte eine Aufschüttung von 1,0 bis 1,5 m zusammen mit der Erstellung der Bauwerke in Leichtbauweise. Durch die Aufschüttung wurden Setzungen in den darunterliegenden weichen und kompressiblen Schichten erzeugt. Zusätzlich war die Anfälligkeit des lockeren Sandes zur Verflüssigung bei Erdbeben zu berücksichtigen.

Dieser Artikel beschreibt die Bodenverbesserung durch Rüttelstopfverdichtung, die drei Zwecken diente: Reduktion der absoluten Setzungen und Setzungsdifferenzen, Beschleunigung der Setzungen während der Aufbringung der Auflast und Verdichtung des lockeren Sandes, und das Potential zur Verflüssigung bei Erdbeben zu reduzieren. Der Entwurf wird zusammen mit relevanten Konstruktionsdetails der vorab erstellten Versuchsgebiete vorgestellt, aus denen die endgültigen Säulendurchmesser und Rasterabstände entwickelt wurden. Weiterhin wird der Einbau der Schottersäulen zusammen mit den Setzungsmessungen während der Belastungszeit vorgestellt und mit den ursprünglichen Voraussagen verglichen. Abschließend erfolgte eine Nachrechnung der Ergebnisse mit dem Programm DC-Vibro (DC-Software GmbH) zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse nach dem Verfahren von Priebe.

The use of stone columns on settlement and liquefaction susceptible soils. *The new Paradisus Coco Beach Resort in Rio Grande (Puerto Rico) is located on an old swamp area which has been filled with relatively clean to silty sands. The swampy deposits consist of organic silts, peat and loose fine to medium sand and silty sand. The project required the placement of 1.0 to 1.5 meters of additional fill together with the construction of light structures. The need for the fill triggers the development of settlements in the underlying weak and compressible stratum. Furthermore, the susceptibility of the loose sand to liquefaction during an earthquake was considered.*

This paper describes the soil improvement by means of vibro-replacement, the purpose of which was threefold: reduction in total and differential settlement, acceleration of settlements during the surcharge period and densification of the loose sand to reduce its liquefaction potential. The predesign is presented together with relevant construction details of the preliminary trial areas from which the final column diameter and grid spacing were derived. Instrumentation together with settlement observations during the surcharge period are presented as well and compared with the initial predictions. Finally an analysis of the results was done with the program DC-Vibro (DC-Software GmbH) for the verification of the results following the approach of Priebe.

1 Einführung

Sol Melia's „Paradisus Coco Beach Resort“ liegt bei der Stadt Rio Grande, an der Nordostküste der Insel Puerto Rico. Das Urlaubszentrum mit 490 Zimmern wird auf 18 ha im Miquillo Point-Gebiet errichtet, einem Landabschnitt, dessen Untergrund aus Sumpfablage-

rungen und Sandlinsen besteht. Das Urlaubszentrum wird aus dreißig Villen und Bungalows (eingeschossig), Clubhäusern, Restaurants und einem Hauptgebäude für Service und Unterhaltung (S/U-Gebäude) bestehen, wo das Casino, die Verwaltung, der Ballsaal und ähnliche Einrichtungen un-

tergebracht sind. Bild 1 zeigt ein Luftbild von Miquillo Point.

In Miquillo Point ist die natürliche Topographie relativ eben. Zum Schutz vor Überflutungen soll das Gelände allerdings um 1,0 bis 1,5 m über die existierende Geländeoberkante angehoben werden. Die Notwendigkeit dieser Auffüllung stellte ein Hauptproblem für die Erschließung des Geländes dar, da die großflächige Auflast große Setzungen in dem als weich und kompressibel bekannten Untergrund erzeugen würde.

Die Sumpfablagerungen und Sandlinsen bestehen aus lockerem Sand, organischem Schluff und Torf, die auf Korallenfelsen gelagert sind. Im allgemeinen besteht die Bodenstratigraphie aus einem relativ reinen Strandsandhorizont über weichem organischem Schluff und lockerem schluffigen Sanden über verkittetem Korallenfels. Im Zentrum des Gebietes sind Linsen von faserigem Torf und organischen Schluffen in den lockeren Sandschichten eingeschlossen.

Typischerweise ist die oberste Sandschicht ungefähr 1,2 m dick und zeigt durchschnittliche SPT-Schlagzahlen von 10 bis 20 Schlägen pro 30 cm. Der lockere Sand und weiche sandige Schluff unterhalb der relativ reinen Sande liegt bis in einer Tiefe von 9 m vor. Die meisten Schlagzahlen in diesen Böden liegen zwischen 0 (reines Hammergewicht) und 4 Schlägen pro 30 cm Eindringung. Der natürliche Wassergehalt liegt zwischen 22 und 78 %.

Im Mittelbereich des Gebiets liegt unter dem lockeren Sand und weichen sandigen Schluff ein Horizont von faserigem Torf zwischen 1,2 und 3,9 m Dicke vor. Der natürliche Wassergehalt in diesem Torfhorizont variiert zwischen 95 und 280 %, die Schlag-



Bild 1. Luftbild des Baugeländes
Fig. 1. Aerial view of the site

zahlen zwischen 1 und 2 Schlägen pro 30 cm. Der darunterliegende Boden besteht aus Korallenfels und/oder verkittetem Sand mit durchschnittlichen Schlagzahlen von 60 pro 30 cm. Diese Zone, typischerweise unterhalb von 9 bis 10,7 m, besitzt eine gute Tragfähigkeit und niedrige Kompressibilitätseigenschaften.

Beobachtungen der Wasserstände während der Erkundungsphase deuten auf einen Grundwasserspiegel hin, der zwischen 0,6 und 1,2 m Tiefe schwankt, gemessen von der ursprünglichen Geländeoberfläche.

Betrachtung der Verflüssigung

Durch die lockere Lagerung der sandigen und schluffigen Ablagerungen und den hohen Wasserspiegel muß die Anfälligkeit des Untergrunds zur Verflüssigung untersucht werden. Verflüssigung ist ein Phänomen, bei dem die Festigkeit und Steifigkeit eines gesättigten Bodens durch Erdbewegung oder andere schnelle Belastung reduziert wird. Die Anfälligkeit zur Verflüssigung wurde durch die Charakteristik der Bodenzusammensetzung (Korngrößen und Kornverteilung) sowie durch die Aufbringung zyklischer Schubspannungen beurteilt. Diese Faktoren wurden in der Vergangenheit ausführlich durch *Seed*, *Idriss* und *Arango* (1975) [3], *Lee* und *Fitton* (1969) [12] und *Tsuchida* (1970) [11] untersucht sowie Auswertungsmethoden entwickelt.

Es wurden physikalische Eigenschaften wie Kornverteilung und Plastizität beurteilt. Die meisten der repräsentativen Bodenproben zeigten eine Tonfraktion unter 15 %, einen D_{50} zwischen 0,02 und 2,0 mm, Fließgrenze unter 35 % und einen natürli-

chen Wassergehalt > 90 % der Fließgrenze. Nach diesen Kriterien der Bodenzusammensetzung zeigen die lockeren Sande und Schluffschichten eine Tendenz zur Verflüssigung.

Für die Beurteilung der Verflüssigung aus der Sicht der zyklischen Schubspannungen wurde ein Vergleich des Verhältnisses der Erdbenenlast (CSR) und dem Widerstand gegen zyklische Belastung (CRR) durchgeführt. Aus dem Verhältnis $F.S = CRR/CSR$ wurde darauf geschlossen, daß das sandige Material, das bis 9 m Tiefe vorliegt, anfällig für Verflüssigung ist. Es wurden Sicherheitsfaktoren gegen Verflüssigung von 0,65 bis 0,93 bestimmt für eine Beschleunigung der Geländeoberfläche von 0,15 g, was in etwa einem Erdbeben der Stärke 7,5 auf der *Richterskala* entspricht.

Die wahrscheinliche Setzung der gesättigten Sandablagerungen, verursacht durch Erdbewegungen, wurden abgeschätzt, indem eine Beziehung zwischen dem zyklischen Spannungsverhältnis, den Schlagzahlen und der Volumenausdehnung (*Tokimatsu* und *Seed*, 1988) [6] verwendet wurde. Basierend auf diesem vereinfachten Berechnungsverfahren wäre die erwartete Setzung durch Erdbenenlast in den gesättigten Sandablagerungen in der Größenordnung von 19 cm.

Betrachtung der Setzung

Ein anderer Aspekt, der eine Untersuchung erforderte, war das Setzungsverhalten des organischen Schluffs und Torfs unter Lasten aus der Auffüllung im Bau- und Endzustand. Basierend auf Lastwerten aus der Bodenverbesserung durch Auffüllung (ca. 30 kN/m²) und Fundamentrost (28,7 kN/m²) wurden die Primärsetzungen aus Kon-

solidierung zwischen 25 und 71 cm geschätzt. Diese Größenordnung einer Bewegung in der vorgeschlagenen Konstruktion würde zu signifikanten Beschädigungen und Funktionsverlust führen, ohne zusätzlich die Effekte der durch Verflüssigung erzeugten Setzungen zu berücksichtigen, die auf 23 cm geschätzt wurden.

Schlußfolgerungen für den Entwurf

Basierend auf den Ergebnissen der Berechnungen von Verflüssigung und Setzungen wurde entschieden, daß eine Tiefgründung oder eine Bodenverbesserung für die Erschließung des Geländes erforderlich war. Diese Anforderungen führten zu zwei Hauptalternativen:

1. Pfahlgründungen oder
2. Bodenverbesserung unter Verwendung der Rüttelstopfverdichtung (Schottersäulen).

Rütteldruckverdichtung und dynamische Verdichtung wurden ebenso untersucht, aber das Vorkommen von Schluffen und Torf im Bodenaufbau ließ diese Methoden ungeeignet erscheinen.

Wegen der Auflast aus der 1,0 bis 1,5 m dicken Aufschüttung mußten beide oben genannten Alternativen durch die Methode der Bodenstabilisierung durch Auflast unterstützt werden. Andernfalls wären auf dem Baugelände signifikante Probleme durch Hebungen zwischen behandelten und nicht behandelten Flächen aufgetreten. Durch das Erfordernis, das Verflüssigungspotential zu vermindern, und einen engen Zeitplan, der keine langen Stabilisierungszeiten durch Auflast erlaubt hätte, wurde die Alternative der Verwendung von Schottersäulen gewählt. In der Summe brachten die Schottersäulen drei Vorteile: Reduktion der gesamten Setzung und der Setzungsdifferenzen, Beschleunigung der Setzungen während der Auflastperiode und Verdichtung des lockeren Sandes zur Reduzierung seines Verflüssigungspotentials.

2 Verminderung der Verflüssigung

Schottersäulen vermindern die Verflüssigung auf zwei hauptsächliche Arten:

1. durch Erhöhung der Dränierung, die durch Erdbenenlast verursachte Porenwasserdrücke abbaut

2. durch Erhöhung der SPT-Werte, die den CSR-Wert (Cyclic Stress Ratio) beeinflussen.

Die Berechnung der Dränierung durch Schottersäulen wurde mit Hilfe der Finite-Element-Methode durchgeführt, indem das Ausmaß der entstehenden Porenwasserüberdrücke in Abhängigkeit von der ursprünglichen effektiven Spannung bestimmt wurde, die durch das Porenwasserdruckverhältnis r_u als Funktion von Drängeometrie und -abstand angegeben wird. Durch das Rütteln im Boden nimmt das Porenwasserdruckverhältnis r_u bis zu einem Punkt ab, wo signifikante Setzungen entstehen können. Nach diesem Punkt würde durch eine weitere Abnahme von r_u der Boden seine Scherspannungen verlieren und sich verflüssigen lassen.

Die Berechnungsmethode ist sehr empfindlich gegenüber den Dränagecharakteristiken der Böden vor Ort und den Dränagefähigkeiten der Schottersäulen. Deshalb wurden im Feld Durchlässigkeitsversuche durchgeführt, um diese Werte zu erhalten. Die Feldversuche ergaben Durchlässigkeitsbeiwerte von $1,6 \cdot 10^{-6}$ m/s für die schluffigen Böden und $8,2 \cdot 10^{-4}$ m/s für die Schottersäulen. Durch den erforderlichen Einbauprozess der Schottersäulen ergab sich die Durchlässigkeit innerhalb der Schottersäulen 60mal geringer als die typische Durchlässigkeit reinen Kieses von 3,8 cm Korngröße.

Die Finite-Element-Berechnung zeigte, daß Schottersäulen mit 0,9 m Durchmesser und 3 m Säulenabstand den maximalen Porenwasserdruck in akzeptablen Größen halten können. Daraus wurde geschlossen, daß diese Säulengeometrie und -anordnung geeignet wäre, das Verflüssigungspotential für eine Bodenbeschleunigung von 0,15 g zu vermindern.

Die Reduktion der gesamten Überlagerungsspannung, die sich aus der Bodenverbesserung und der günstigen Lastverteilung durch die eingebauten Schottersäulen ergibt, wurde ebenfalls untersucht um festzustellen, wie diese das zyklische Spannungsverhältnis beeinflussen würde. Ein vereinfachtes, von H. J. Priebe [4], [5] eingeführtes Verfahren schlägt eine Reduktion des CSR in Abhängigkeit vom Flächenverhältnis der verwendeten Schottersäulen vor. Für den Fall des theoretischen 3-m-Säulenrasters

entspricht dann der Reduktionsfaktor des herbeigeführten CSR-Verhältnisses 50 %. Durch Anwendung dieser Reduktion stieg der Sicherheitsfaktor gegen Verflüssigung auf über 1,3.

3 Setzungs- und Grundbruchberechnung

Die Setzungsberechnungen berücksichtigten 1,5 m dauerhafte Aufschüttung und ca. 28,7 kN/m² Flächenlast aus der Konstruktion unter den Bungalows und Villen. Für ein Auflastverhältnis von 1 (zusätzliche Auflast zur Setzungsbeschleunigung = ständige Auflast) und die Unterstützung durch ein Säulenraster mit 3 m Säulenabstand mit Säulendurchmessern von 0,90 m läge die Zeit für die Stabilisierung in der Größenordnung von 2 bis 3 Monaten. Die durchschnittliche Setzung, die in den Bereichen mit Torf erwartet wurde, betrug ca. 70 cm. Bereiche ohne Einlagerungen von Torf würden theoretische Setzungen von ca. 25 cm erleiden.

Nichtsdestoweniger sollten die tatsächlichen Setzungen im Feld durch den Verdrängungseffekt der Schottersäulen geringer sein als die theoretischen Werte. Es wurde eine empirische Methode vorgeschlagen, um die Setzungen unter Berücksichtigung des Bodenersetzungsfaktors abzuschätzen. Basierend auf dieser Methode wurden die tatsächlichen Setzungen zu 50 % geringer als die theoretischen Werte geschätzt, d. h. von 13 bis 35 cm.

Die Grundbruchsicherheit wurde auf der Basis einer Formel von Hughes u. a. (1975) [13] bestimmt. Da die erstellten Schottersäulen durchaus mehr als 10fach steifer als der umgebende weiche Boden sein können, wurde berücksichtigt, daß die Fundamentlasten durch die Schottersäulen mit wenig oder keinem Beitrag durch den dazwischenliegenden Boden getragen würden. Für Flächenlasten in Bereichen ohne Torf ergab sich, daß das 3-m-Säulenraster eingeschossige Bungalows und Villen (28,7 kN/m²) sicher ohne Grundbruch- oder tiefergehende Setzungsprobleme tragen könnte.

Im Bereich mit Torfschichten wurde ein dichteres Raster mit 2 bis 4 Schottersäulen in einem 1,7-m-Raster unter Flächengründungen mit einer zulässigen Bodenpressung von 96 kN/m² als erforderlich bestimmt. Für Streifenfundamente in diesen kritischen Bereichen wurde der Schot-

tersäulenabstand auf 2,75 m in einer Reihe festgelegt. Leichtbelastete Bodenplatten ergaben keine Grundbruchprobleme, so daß ein Schottersäulenraster von 3,35 m Abstand vor allem für die Verminderung der Verflüssigung und Setzungsbeschleunigung gewählt wurde.

4 Feldversuche

Am Anfang des Projekts wurden verschiedene Testbereiche ausgewählt, um den Grad der Verdichtung durch unterschiedliche Schottersäulenraster zu bestimmen. Drei Testflächen mit 2,75; 3,0 und 3,3 m Säulenabstand im Dreiecksraster wurden vorbereitet. Nach einer Wartezeit von 72 Stunden wurde in der Mitte jedes Rasters eine Probebohrung vorgenommen.

Die Ergebnisse des Testprogramms zeigten, daß der Dichtezuwachs in reinem bis schluffigem Sand bis zu dem für die Verminderung der Verflüssigung notwendigen Wert in den drei Dreiecksrastern erreicht wurde. Typische Bohrungen nach dem Säuleneinbau ergaben Schlagzahlen zwischen 11 und 30 pro 30 cm, im Unterschied zu 3 bis 17 Schlägen vor dem Einbau. Alle Testsäulen wurden mit einer minimalen durchschnittlichen Stromstärke von 150 A eingebracht. Mit diesem Wert ergab sich ein mittlerer Säulendurchmesser von 1 m.

Mit diesen Ergebnissen und der Berechnung der Grundbruchsicherheit und der Setzungen wurde entschieden, das 3-m-Dreiecksraster für die Bungalows und Villen und das 3,3-m-Dreiecksraster unter der Bodenplatte des S/U-Gebäudes zu verwenden. In Abhängigkeit von der Größe der Bodenpressungen wurden stellenweise spezielle Raster, bestehend aus 2 bis 4 Schottersäulen mit 1,7 m Abstand, für die Flachgründungen des S/U-Gebäudes gewählt.

5 Bauphase

Insgesamt 8033 Schottersäulen wurden durch drei freihängende Rüttler mit 360 mm Durchmesser eingebaut. Wie in Bild 2 dargestellt, wurde die Methode im Naßeinbau mit Einfüllung von der Geländeoberfläche verwendet.

Der Rüttler wurde durch einen elektrischen Motor mit 130 kW und Wasserdüsen an der Spitze in den Boden versenkt. Mit dieser Methode



Bild 2. Einbau der Schotterssäulen
Fig. 2. Installation of the stone columns

wird der Rüttler in die erforderliche Tiefe vorgetrieben und dann in 0,5-m-Schritten zurückgezogen, während Kies mit 2,5 bis 5 cm Korngröße in das Loch gefüllt wird. Während dieses Vorgangs verdichtet der Rüttler den Kies vertikal und radial in den umgebenden weichen Boden.

Einbau der Schotterssäulen

Eine der wichtigsten Messungen zur Qualitätskontrolle während des Einbaus der Schotterssäulen waren die Überwachung der Stromstärke während des Verdichtungsprozesses und die Messung der Schottermengen, die für jede Säule eingebracht wurden. Die Qualitätskontrolle erforderte, daß der Rüttler wiederholt eingebracht wurde, bis die festgelegte Stromstärke von 150 A erreicht wurde. Die Geräteeinheiten wurden mit elektronischen Meßgeräten ausgestattet, die ständig die vom elektrischen Motor der Rüttler aufgenommene Energie aufzeichneten. Ein Techniker an jeder Anlage stellte sicher, daß der erforderliche Strom in jeder Säule erreicht wurde und notierte die Menge des für jede Säule eingesetzten Schotters.

Die Menge des in die Säulen eingefüllten Schotters wurde durch Messung der vollen Laderschaufeln bestimmt. Diese Messungen wurden verwendet, um den durchschnittlichen Säulendurchmesser und die Gesamtmenge des Schotters in jeder Säule zum Zweck der Abrechnung zu bestimmen. Jede 9 m tiefe Säule benötigte durchschnittlich 9 m^3 unter Berücksichtigung von 15 % Verlust und Verdichtung.

Überwachung der Setzungen

Mehrere Meßstationen waren auf dem Projektgelände installiert, um die Setzungen zu messen und die benötigte Zeit für die Stabilisierung aufzuzeich-

nen. Setzungsmessungen im Gebiet der Bungalows und Villen ergaben maximale Bewegungen nach unten von 9,1 cm über einen Zeitraum von zwei Monaten. Diese maximale Setzung ergab sich zu 30 % geringer als die vorausgesagten 13 cm, aber die Gesamtzeit für die Stabilisierung entsprach den Erwartungen.

In einem speziellen Bereich des S/U-Gebäudes, wo die Torfschicht vorlag, erreichten die Setzungen 19 cm in einem Zeitraum von zwei Monaten. Für die torfigen Böden wurden 50 % weniger Setzungen als vorhergesagt gemessen. Wie geplant war die Stabilisierung in einem Zeitraum von drei Monaten abgeschlossen.

6 Kontrollberechnungen

Nach Abschluß des Projekts wurden Kontrollberechnungen mit dem Programm DC-Vibro (DC-Software GmbH) vorgenommen.

Das Programm DC-Vibro berechnet die Setzung unter Fundamenten

mit Bodenverbesserung durch Schotterssäulen nach dem Verfahren von *Priebe* [5]. Neben den Schichtparametern des ursprünglichen Geländes werden Reibungswinkel, Wichte und Steifemodul des Säulenmaterials vorgegeben.

Für jedes Fundament wird die Säulenordnung (Rechteck- oder Dreiecksraster sowie Abstand der Säulen) getrennt eingestellt. Der Säulendurchmesser kann schichtweise abhängig von der Steifigkeit der einzelnen Schichten unterschiedlich vorgegeben werden (Bild 3).

Auf der Basis der Bezugsfläche (Fundamentfläche pro Säule) und des Verhältnisses der Steifemoduli werden die verschiedenen Verbesserungsfaktoren unter Berücksichtigung von Säulenkompression und Überlagerungsdruck berechnet. Bezogen auf eine unendlich ausgedehnte Lastfläche wird die Steifigkeit des Bodens um den resultierenden Verbesserungsfaktor erhöht und die zu erwartende Setzung entsprechend vermindert. Für Einzel- oder Streifenfundamente werden dann Fundamentfaktoren aus den Kurven nach *Priebe* eingerechnet, die von der Anzahl Säulen pro Fundament abhängig sind.

Die Setzungen ohne und mit Verbesserung werden gegenübergestellt. Zusätzlich werden die Spannungen aus Bodenüberlagerung und aus Auflast über die Tiefe sowie der Verlauf der Setzungen ohne und mit Bodenverbesserung grafisch dargestellt, hier am Beispiel einer unbegrenzten Lastfläche (Bild 4).

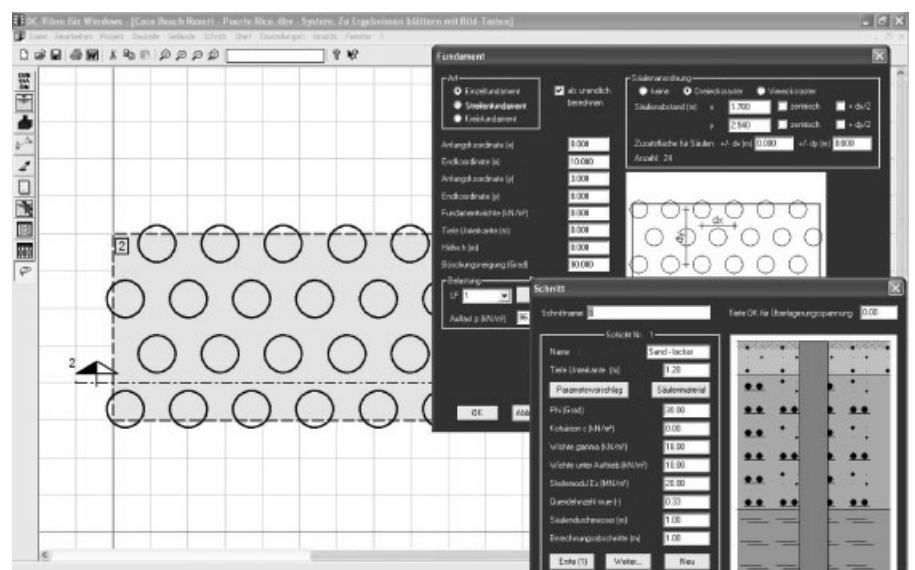


Bild 3. Programm DC-Vibro
Fig. 3. Program DC-Vibro

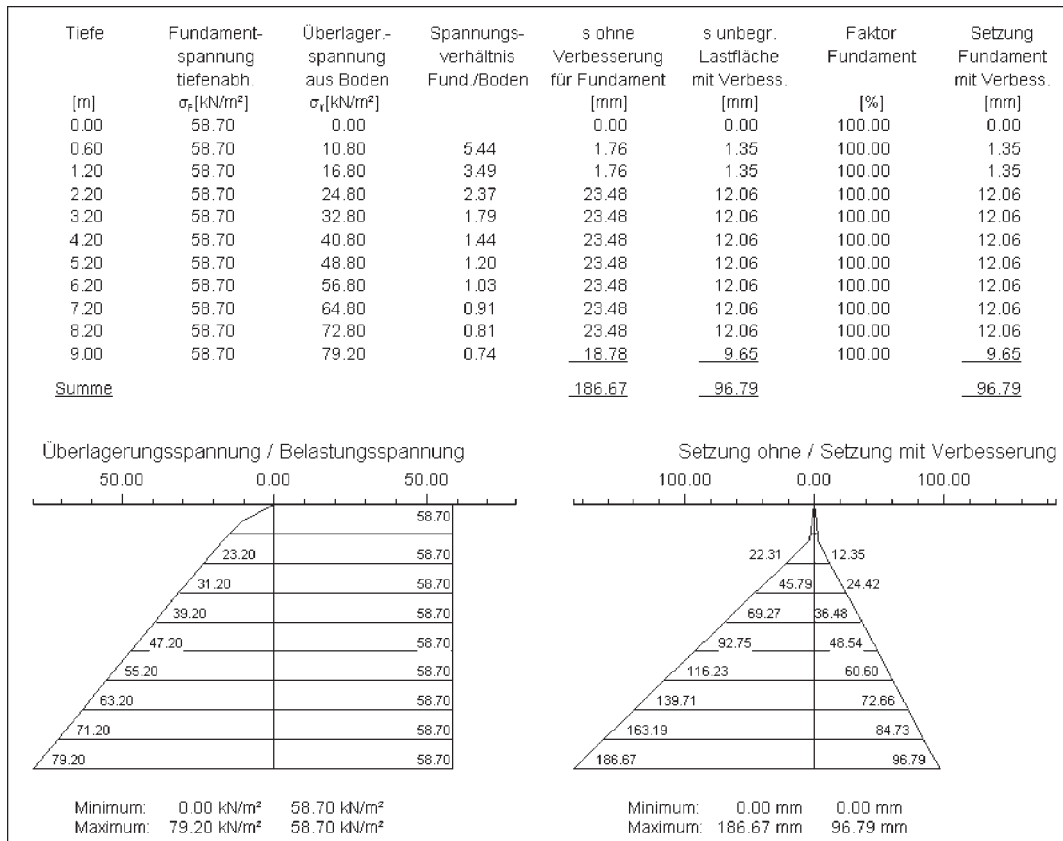


Bild 4. Setzungsberechnung und Darstellung
Fig. 4. Analysis of settlement and display

Es zeigten sich sehr gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Setzungswerten. Die erwarteten Verbesserungen für das Setzungsverhalten wurden sowohl durch die Messungen als auch durch die Vergleichsrechnungen mit dem Programm DC-Vibro exakt bestätigt.

7 Schlußfolgerungen

Der Einbau von 8033 Schottersäulen unter den Fundamentrosten, Gründungsplatten und Flachgründungen war sowohl vom technischen als auch vom terminlichen Gesichtspunkt her erfolgreich. Aus technischer Sicht werden die Säulen eine sichere Belastbarkeit und Setzungskontrolle gewährleisten, wie durch das SPT-Testprogramm am Ende der Rüttelstopfverdichtung bestätigt wurde. Zusätzlich werden die erhöhte Dichte und die Dränierungseigenschaften des verbesserten Bodens das Auftreten von Verflüssigungen während eines Erdbebens vermindern.

Unter dem Gesichtspunkt des Zeitrahmens erlaubte die Reduktion der Setzungen und die Beschleunigung der Stabilisierungsdauer, für das Projekt einen engen Zeitplan einzu-

halten, der durch die Auflastmethode nicht realisierbar gewesen wäre.

Die Kontrollrechnungen mit dem Programm DC-Vibro ergaben eine sehr gute Übereinstimmung mit den tatsächlich gemessenen Setzungswerten.

Literatur

- [1] Bowles, J. E.: Foundation Analysis and Design. Fifth Edition, pp. 358–361, 1996.
- [2] Kramer, S. L.: Geotechnical Earthquake Engineering. pp. 348–411, 1996.
- [3] Seed et al.: Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 111, No. 12, 1975.
- [4] Priebe, H. J.: The Prevention of Liquefaction By Vibro Replacement. 1990.
- [5] Priebe, H. J.: Die Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen. Bautechnik 72 (1995), H. 3, S. 183–191.
- [6] Tokimatsu, K., Seed, H. B.: Evaluation of Settlement in Sands Due to Earthquake Shaking. JGED, Vol. 113, No. 8, 861–878, 1988.
- [7] Pak, R., Yamamura, J.: Soil Dynamics and Liquefaction 2000. ASCE/GEO Institute No. 107, 2000.
- [8] Boulanger, R., Idriss, M., Stewart, D., Hashash, Y., Schmidt, B.: Drainage Capacity of Stone Columns or Gravel Drains for Mitigating Liquefaction. 2nd Geotechnical Earthquake Engineering

and Soil Dynamics Conference, Vol. I, pp. 678–690.

- [9] Pestana, J., Hunt, C., Goughnour, R., Kammerer, A.: Effect of Storage Capacity on Vertical Drain Performance in Liquefiable Sand Deposits. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Techniques, 1998.
- [10] Goughnour, R., Pestana, J.: Mechanical Behavior of Stone Columns Under Seismic Loading. 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Techniques, 1998.
- [11] Tshuchida, H.: Prediction and Countermeasure against the Liquefaction in Sand Deposit, Abstract of the seminar, Port and Harbour Research Institute, Yokusuka, Japan.
- [12] Lee, K. L., Fitton, J. A.: Factors Affecting the Cyclic Loading Strength of Soil. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication STP 450 (Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations).
- [13] Hughes, J. M. O., Withers, N. J., Greenwood, D. A.: A Field Trial of Reinforcing Effects of Stone Columns in Soil. Geotechnique, Vol. 25, No. 1 (1975).

Autoren dieses Beitrages:

Ivan Jackson Maduro, P.E., Carlos Rodriguez Molina, P.E., Luis Vazquez Castillo, P.E., M.S.C.E., Suelos, Inc., Puerto Rico, San Juan, Dipl.-Ing. Axel Christmann, Axel Christmann Ingenieurtechnik, D – 80997 München, Dr.-Ing. Armin Doster, DC-Software GmbH, Hannah-Arendt-Weg 3, D – 80997 München