

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 65



IGB-TUBS

Pfahl-Symposium 2001

Fachseminar: 22./23. Februar 2001

Zusammengestellt von:

T. Huch
F. Kirsch
M. Schallert

Braunschweig 2001

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz

GEOPIER® SCHOTTER VERDICHTUNGSSÄULEN – EINE SICHERE ALTERNATIVE ZU RAMMPFÄHLEN

Dr.-Ing. N. S. Fox
Dr.-Ing. K.J. Wissmann
Dipl.-Ing. J.P. Martin
Dipl.-Ing. L.R. Weppler

1 EINLEITUNG

Das neue, sechs-geschossige Justice Center Parkhaus in Washington County, Oregon, sollte auf 23 m langen, durch lockeren Schluff und schluffigen Sand getriebenen, Stahlbeton Rammpfählen, gestützt werden. Stattdessen wurde die Struktur für Flächenfundamente mit einer sehr hohen Tragfähigkeit entworfen, die durch einen mit 2,1 m bis 2,7 m langen Geopier® Schotter Verdichtungssäulen bewehrten Boden gestützt wurde. Die Implementierung dieses Systems sparte dem Bauherrn DM 390.000.- Dies bedeutete eine Kostenersparnis von über 50% gegenüber dem vorher geplanten Rammpfahlsystem. Die Leistung des Fundamentsystems erscheint erstaunlich – Gemessene Fundamentsetzungen betragen weniger als 1,3 cm. Dieser Beitrag beschreibt:

- Wie ein solch dramatischer Wechsel des Fundament Konzeptes möglich ist,
- die Mechanik welche das Verhalten der Schotter Verdichtungssäulen bestimmt,
- die Ergebnisse des Pfahlbelastungstests der für das Projekt durchgeführt wurde,

- das Setzungsverhalten der fertiggestellten Struktur.

2 HINTERGRUND

Das sechs-geschossige Parkhaus, gebaut durch Generalbauunternehmen Hoffmann, ist eine bewehrte Ortbetonstruktur mit einem dehnbaren Rahmenentwurf (Bild 1). Stützlasten lagen, laut dem Projektstatiker, der Firma KPFF, zwischen 180 kN bis 8.000 kN.

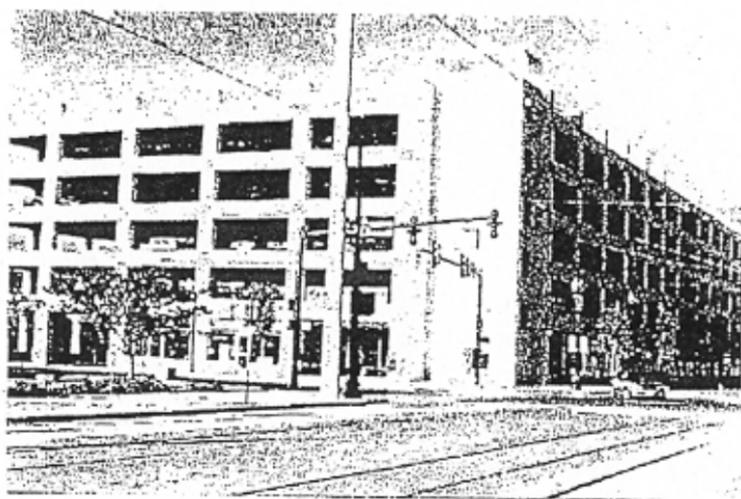
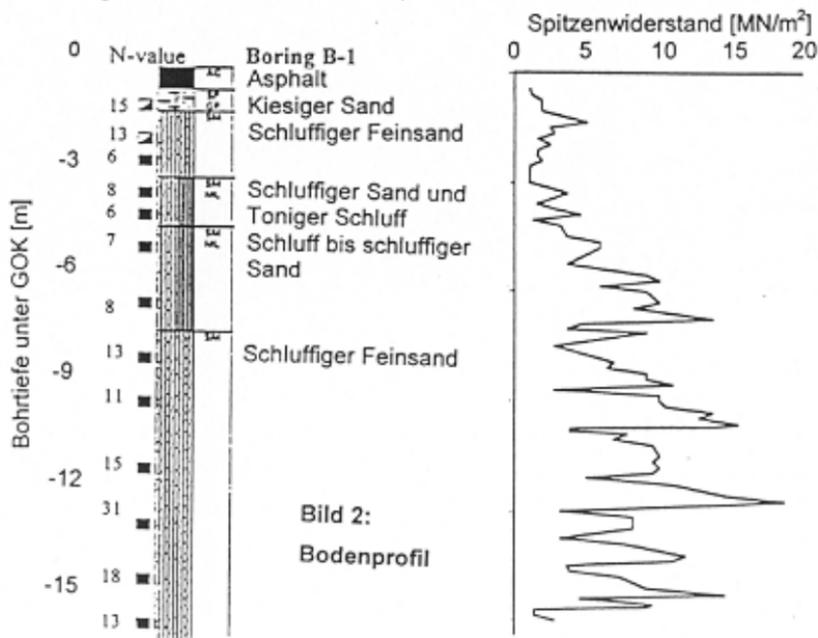


BILD 1: PHOTOGRAPHIE DES FERTIGGESTELLTEN PARKHAUSES

2.1 Geotechnisches Schichtenprofil

Bild 2 zeigt die Profile für eine der Rammsondierungen und Drucksondierungen, die für das Projekt durchgeführt wurden. Die Baugrunduntersuchung indizierte die folgende generelle Stratigraphie:

- **Locker gelagerte, schluffige Sande und sandige Schluffe** mit einer Mächtigkeit von etwa 6,1 m unterhalb der Pflasterung. Standard Schlagzahlen (SPT) N-Werte lagen zwischen 6 und 8 (Durchschnitt = 7). Spitzenwiderstandswerte von der Drucksondierung lagen generell zwischen $1,4 \text{ MN/m}^2$ und $5,7 \text{ MN/m}^2$, mit einem geschätzten Mittelwert von $2,9 \text{ MN/m}^2$. Ergebnisse von Laborversuchen zeigen eine Trockenrohdichte von durchschnittlich 1.420 kg/m^3 und einen Wassergehalt von durchschnittlich 33% für diese Bodenschicht.
- **Mitteldichte, schluffige Feinsande** mit einer Mächtigkeit von mehr als 15,2 m unterhalb der Geländeoberkante (GOK). Standard Schlagzahlen lagen zwischen 11 und 31 (Durchschnitt = 17). Spitzenwiderstandswerte von der Drucksondierung lagen generell zwischen $3,8 \text{ MN/m}^2$ und $15,2 \text{ MN/m}^2$, mit einem geschätzten Mittelwert von $9,5 \text{ MN/m}^2$.



2.2 Aufgabenstellung Gründung

Der Entwurf für das Parkhaus stellte eine besondere Herausforderung dar, weil sehr hohe Stützlasten mit weichen und kompressiblen Böden kombiniert werden mußten. Konventionelle Flachgründungen waren ungeeignet, da zu hohe Setzungen auftreten würden und damit das Setzungskriterium von 3,8 cm überschritten würde. Daraufhin wurden 23 m lange Stahlbeton Ramppfähle mit einem Durchmesser von 30,5 cm spezifiziert. Das kostengünstigste Angebot für diese Art von Gründung lag bei etwa DM 760.000.-

2.3 Ein innovatives Angebot

Als eine vergleichswertige Alternative zu Tiefgründungen, wurden Geopier® Schotter Verdichtungssäulen als Baumaßnahme durch die Geopier® Foundation Company – Northwest vorgestellt. Das patentierte System ist konzipiert worden, um Bodenschichten unterhalb der Oberfläche zu verbessern und damit die Anwendung von hochbelasteten Flachgründungen zur Stützung zu gewährleisten. Das Angebot enthielt die Durchführung der Entwurfskalkulationen, die Ausführung zweier Modul Belastungstests um die angenommenen Entwurfparameter zu verifizieren, die Installation von 521 Schotter Verdichtungssäulen, und die Beratung für die Messung von Setzungen nach der Konstruktion. Die Gesamtkosten für das Schotter Verdichtungssystem betragen DM 370.000.- Der Bauherr akzeptierte das Angebot aufgrund des technischen Wertes des Systems und der Kostenersparnisse von über 50% gegenüber den vorgesehenen Stahlbeton Ramppfählen.

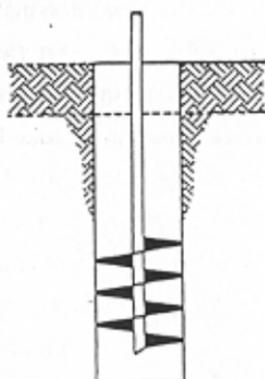
3 KONSTRUKTION

Zur Zeit sind Geopier® Schotter Verdichtungssäulen zur Stützung von Strukturen auf etwa 350 Projekt Baustellen in über 30 Staaten angewandt worden. Generelle Methoden zur Konstruktion werden durch Lawton und Fox (1994) und Lawton et al. (1994) beschrieben.

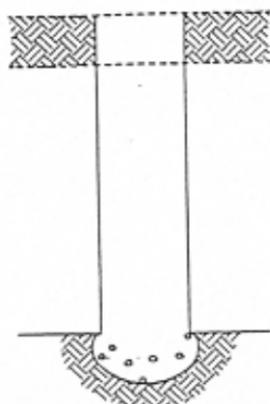
Die Schotter Verdichtungssäulen für das Justice Center Parkhaus wurden installiert, indem Löcher mit einem Durchmesser von 84 cm gebohrt wurden. Die Tiefe der Löcher lag zwischen 2,1 m und 2,7 m unterhalb der geplanten Fundamentsohlen. Kontrollierte Schichten, bestehend aus Schottermaterial, wurden in die Löcher gegeben und mit einem speziell für diesen Verfahren entworfenen Rammer hochverdichtet (Bild 3). Die erste Schicht besteht aus einem enggestuften Schotter ohne Feinstanteile und bildet sich durch die hohe Verdichtung zu einer Bodenkugel unterhalb der Bohrung aus. Die Bodenkugel verlängert effektiv die Entwurfslänge der Schottersäulen um einen Säulendurchmesser. Die Säulen werden dann fertiggestellt, indem einzelne, 30 cm dicke Schichten eines weitgestuften Schotters mit Feinstanteilen in das Bohrloch gegeben, und mit dem abgescrägten Rammer verdichtet werden.

Die einzelnen Säulen werden so konzipiert und installiert, daß etwa 35% der Gesamtfundamentfläche abgedeckt wird. Hochbelastete Flächenfundamente mit einem zulässigen Belastungsdruck von 270 kN/m^2 wurden für dieses Projekt direkt oberhalb der Schottersäulen konstruiert. Die kleinsten Einzelfundamente maßen 2,3 m in Länge und Breite und wurden von drei Schottersäulen gestützt. Die größten Einzelfundamente maßen 6,7 m in Länge und Breite und wurden von 25 Schottersäulen gestützt.

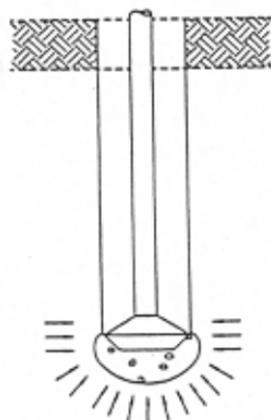
Bild 2 zeigt, daß die 2,1 m bis 2,7 m langen Schottersäulen die Schluffe in Bodenschicht 1 nicht komplett durchdringen und damit ebenfalls nicht als Elemente anzusehen sind, die auftretende Lasten in Spitzenwiderstand abtragen. Stattdessen sind die Säulen konzipiert, um die Gesamtsteifigkeit der Bodenschichten bis hin in jene Schichten zu verbessern, in denen die Spannungen, die durch das Fundament entstehen, am größten sind, um damit langzeitige Fundamentsetzungen, entsprechend den Entwurfskriterien, zu limitieren.



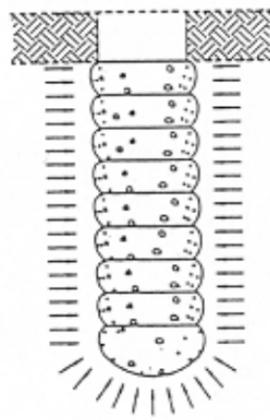
1. Bohrung des Loches



2. Einfüllen des Schotters



3. Herstellung der Bodenkugel.
Verdichtung und vertikale
Vorspannung des Bodens
Unterhalb der Bodenkugel



4. Herstellen des Schaftes durch
Einfüllen und verdichten von
30cm dicken Schotterschichten.
Aufbau von lateralem Druck
während der Herstellung.

BILD 3: KONSTRUKTION DER SCHOTTER VERDICHTUNGSSÄULEN

Während der Verdichtung zwingt der abgeschrägte Rammer das Schottermaterial lateral in die umliegenden Seitenwände der Bohrung. Diese Aktion erhöht die laterale Spannung im Bodengefüge und trägt damit zur weiteren Versteifung bei.

4 MECHANIK

Die Schotter Verdichtungssäulen erhöhen erheblich die Tragfähigkeit des verbesserten Baugrundes und reduzieren bedeutsam die Fundamentsetzungen. Berechnungen zur Setzung werden durchgeführt, um einerseits die Kompression des mit Säulen verdichteten Bodengefüges (Obere Zone) abzuschätzen, sowie die Kompression der Zone des Bodens abzuschätzen, die durch die Fundamentdrücke beeinträchtigt wird und unterhalb der Spitze der Säulen liegt (Untere Zone).

Berechnungsverfahren der Oberen Zone basieren auf einem klassischen Federmodell [Lawton und Fox 1994 und Lawton et al. 1994] und werden wie folgt beschrieben:

1. Es wird angenommen, daß das Fundament relativ zu den Fundamentmaterialien absolut fest ist. Die Drücke, die auf die Schottersäulen und das Bodengefüge wirken, hängen folglich von deren relativen Steifigkeiten (R_s) sowie von der eingenommenen Fundamentfläche ab. Der Summe der auf das Fundament wirkenden Kraft (Q), die als Produkt des Gesamtdrucks (q) und der Fundamentfläche (A) zusammensetzt ist, wirkt die Summe jener aufwärtsgerichteten Kraft in der Schottersäule (Q_g) und den Bodenmaterialien (Q_s) entgegen:

$$Q = q A = Q_g + Q_s = q_g A_g + q_s A_s \quad (1)$$

Dabei repräsentiert q_g die Belastung an der Oberkante der Schotter Verdichtungssäulen, A_g die Fläche der Säulenelemente unterhalb des

1. Fundaments, q_s die vertikale Belastung auf das Bodengefüge unterhalb der Fundamentsohle und A_s die Fläche des Bodengefüges, die sich in Kontakt mit der Fundamentsohle befindet.

2. Weil das Fundament im Vergleich zu den tragfähigen Materialien ausgesprochen fest ist, gleicht die Setzung der Säule der Setzung des Bodengefüges. Die Setzung des Fundaments (der Fundamente) kann entweder mit der Belastung der Schottersäulen und dem Steifemodul des Schotters (k_g), oder mit der Belastung des Bodengefüges und dem Steifemodul des Bodengefüges (k_s) bestimmt werden:

$$s = q_g / k_g = q_s / k_s \quad (2)$$

3. Gleichung 2 kann umgeschrieben werden, um die Belastung des Bodengefüges anhand der Belastung der Schottersäulen und dem Verhältnis der Modulwerte von Schottersäulen und Bodengefüge zueinander (R_s) zu errechnen:

$$q_s = q_g (k_s / k_g) = q_g / (k_g / k_s) = q_g / R_s \quad (3)$$

4. Kombiniert man Gleichungen 1 und 3, und definiert man das Flächenverhältnis (R_s) als das Verhältnis von A_g zu A :

$$\begin{aligned} q &= \{q_g A_g / A + q_s A_s / (A R_s)\} = \{q_g R_s + q_s (1 - R_s) / R_s\} = \\ &= \{q_g [R_s + 1/R_s - R_s / R_s]\} = \{q_g [R_s R_s + 1 - R_s] / R_s\} \end{aligned} \quad (4)$$

5. Schreibt man q_g als Bedingung von q :

$$q_g = \{q R_s / [R_s R_s + 1 - R_s]\} \quad (5)$$

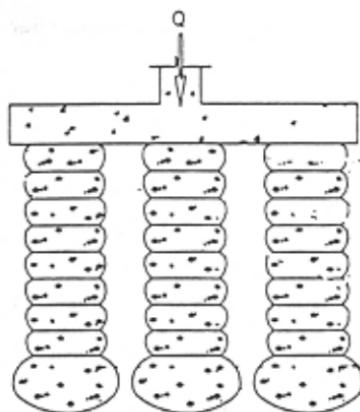
6. Die Setzungen der Oberen Zone errechnen sich mit Hilfe der Gleichungen 2 und 5, die vom aufgetragenen Fundamentdruck, der relativen Steifigkeit der Schottersäulen und des Erdreichs, dem Flächenverhältnis der Schottersäulen zu der Gesamtfundamentfläche, sowie dem Steifemodul der Säulen abhängig sind.

Schätzungen für die Setzungen der Unteren Zone, also unterhalb der Säulenspitze, werden anhand konventioneller geotechnischer Setzungsanalysen in Kombination mit Elastizitätsmodulwerten des Erdreichs bestimmt. Die Modulwerte werden anhand der in der Praxis ermittelten und ausgewerteten Testdaten von Rammsondierungen und Drucksondierungen interpretiert. Geotechnische Setzungsberechnungen sind ausführlich in der Literatur beschrieben [Terzaghi und Peck 1967]. Diese Analyse schließt die Annahme ein, daß der vom Fundament ausgehende Druck in der Unteren Zone geschätzt werden kann, indem man Lösungen für ein von einem elastischen Halbraum gestütztes Fundament anwendet. Man geht davon aus, daß diese Annahme konservativ ist, weil die Anwesenheit der Schottersäulen eine wirksamere Spannungsübertragung mit zunehmender Tiefe unterhalb der Fundamentsohle bewirken, als die Spannungsübertragung für gewöhnliche Flächengründungen. Beispiele zur Entwurfsberechnung werden in Bild 4 gezeigt.

5 VERIFIZIERUNG DER ENTWURFSPARAMETER: BELASTUNGSTESTS ZUR MODULWERTBESTIMMUNG

Um die im Entwurf angenommenen Modulwerte der Schottersäulen zu bestätigen, wurden vor der Säulenproduktion zwei gründliche Belastungstests ausgeführt. Die Tests wurden durchgeführt, indem eine runde Stahlplatte über die Gesamtquerschnittsfläche eines installierten Säulenelementes angebracht wurde, und dann die Säule mit einem stufenweise ansteigenden Druck belastet wurde. Die

maximale ausgeübte Belastung entsprach 150% des Entwurfsdruckes, der für die Oberkante der Säule berechnet wurde.



$$Q = 1.668 \text{ kN}$$

$$\text{Fundament Breite, } B = 2,89 \text{ m}$$

$$q = Q / B^2 = 200 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Anzahl der Säulen, } N = 5$$

$$\text{Säulendurchmesser, } d = 0.84 \text{ m}$$

$$R_s = A_g / A = 0.33$$

$$\text{Säulen Entwurfsmodul, } k_g = 65,1 \text{ MN/m}^3$$

$$\text{Steifheitsmodul-Boden, } k_s = 5,65 \text{ MN/m}^3$$

$$\text{Steifigkeitsverhältnis, } k_g / k_s = 11.5$$

5.1 Setzungsberechnungen

$$\text{Schottersäulenbelastung, } q_g = q R_s / [R_s R_s - R_s + 1] = 550,4 \text{ kN}$$

$$\text{Setzung, Obere Zone, } S_{UZ} = q_g / k_g = 550,4 \text{ kN} / 65,14 \text{ MN/m}^3 = 0,84 \text{ cm}$$

$$\text{Mächtigkeit, Obere Zone, } H_{UZ} = 2,13 \text{ m} + 0,84 \text{ m} = 2,97 \text{ m}$$

$$\text{Mächtigkeit, kompressible Untere Zone, } H_{LZ} = 2 B - 2,97 \text{ m} = 2,81 \text{ m}$$

$$\text{Verhältnis Zentrum Untere Zone zu Fundamentbreite, } z / B = 4,39 \text{ m} / 2,89 \text{ m} = 1,51$$

$$\text{Westergaard Einflußfaktor für } z / B, I_\sigma = 0.12$$

$$\text{Geschätzter Elastizitätsmodulwert, Untere Zone, } E_{LZ} = 7,18 \text{ MN/m}^2$$

$$\text{Setzung, Untere Zone, } S_{LZ} = (q I_\sigma H_{LZ} / E) = 0,94 \text{ cm}$$

$$\text{Gesamtsetzung, } S = S_{UZ} + S_{LZ} = 0,84 \text{ cm} + 0,94 \text{ cm} = 1,78 \text{ cm}$$

BILD 4: ENTWURFSBERECHNUNGEN

Testergebnisse deuten an, daß die Setzungen an der Oberkante der 2,7m und 1,8m langen Säulen bei 100% des Entwurfsdrucks 0,5cm und 0,8cm betragen (Bild 5). Diese Werte wurden benutzt um die Werte für den Modulwert der Schottersäulen zu berechnen. Der errechnete Modulwert lag zwischen $65,4 \text{ MN/m}^3$ und 104 MN/m^3 in Übereinstimmung mit Gleichung 2. Die gemessenen Werte bestätigten und übertrafen den in der Entwurfsphase angenommenen Modulwert von $65,1 \text{ MN/m}^3$.

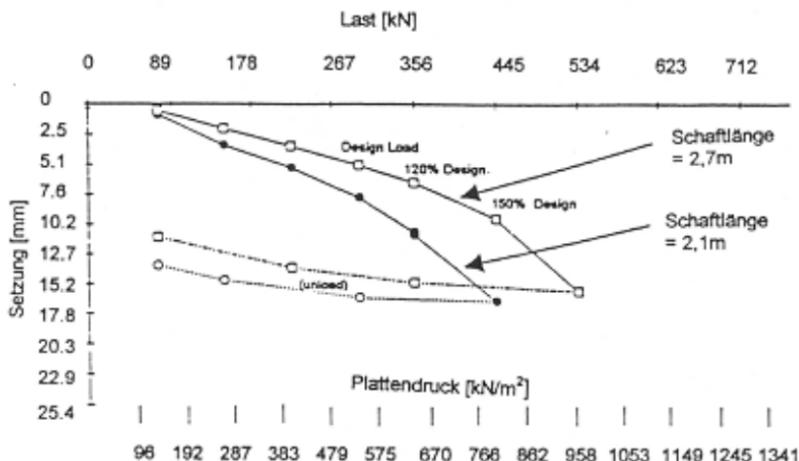
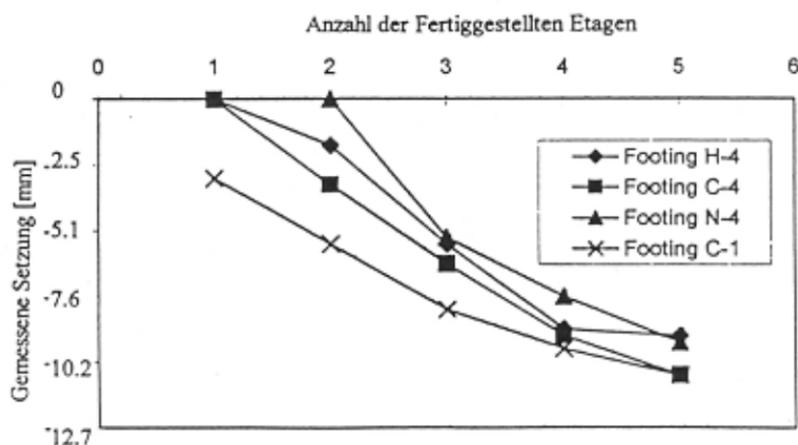


BILD 5: ERGEBNISSE DER MODULBELASTUNGSTESTS

6 FUNDAMENTSETZUNGEN

Die Ergebnisse der Setzungsmessungen werden in Figuren 6 und 7 gezeigt. Messungen wurden auf der Oberfläche der Fundamente, die oberhalb der Schottersäulen liegen, durchgeführt. Die Messungen zeigen, daß Setzungen von weniger als 0,25cm für jede fertiggestellte Etage auftraten. Messungen wurden für fünf Etagen durchgeführt, die sechste und letzte Etage wurde zu einem späteren Zeitpunkt hinzugefügt. Gesamtsetzungen werden auf etwa 1,27cm geschätzt, wenn man die Lasten aller sechs Etagen berücksichtigt, wobei die Stützlasten zwischen 2.700kN und 8.000kN liegen.

Die räumliche Verteilung von Setzungen nach Fertigstellung von fünf Etagen ist in Bild 6 dargestellt. Erwähnenswert ist, daß kleine, leichtbelastete Fundamente nur etwa 0,25cm Setzung zeigen, was etwa einem Viertel der Setzung der benachbarten, hochbelasteten Fundamente entspricht, trotz der Tatsache, daß Fundamentsohldrücke vergleichbar sind. Während diese Beobachtung wohl die Vorstellung bestätigt, daß die Größe der Fundamentsetzung proportional zur Fundamentbreite ist, stellt sie jedoch den gemeinschaftlichen Glauben, daß große, hochbelastete Fundamente einen Einfluß auf benachbarte Fundamente haben, in Frage. Eine Erklärung für diese Beobachtung ist, daß das Drucksystem unterhalb von Fundamenten, die von Schotter Verdichtungssäulen gestützt werden, einen markanten Wechsel vornimmt, so daß die konventionellen Konzepte für die Ausbreitung von Fundamentlasten nicht anwendbar sind.



Vermerk: Stützlasten an den Vermessungsstationen lagen zwischen 2.670 kN und 5.340 kN nach 5 fertiggestellten Etagen

BILD 7: SETZUNGSMESSUNGEN

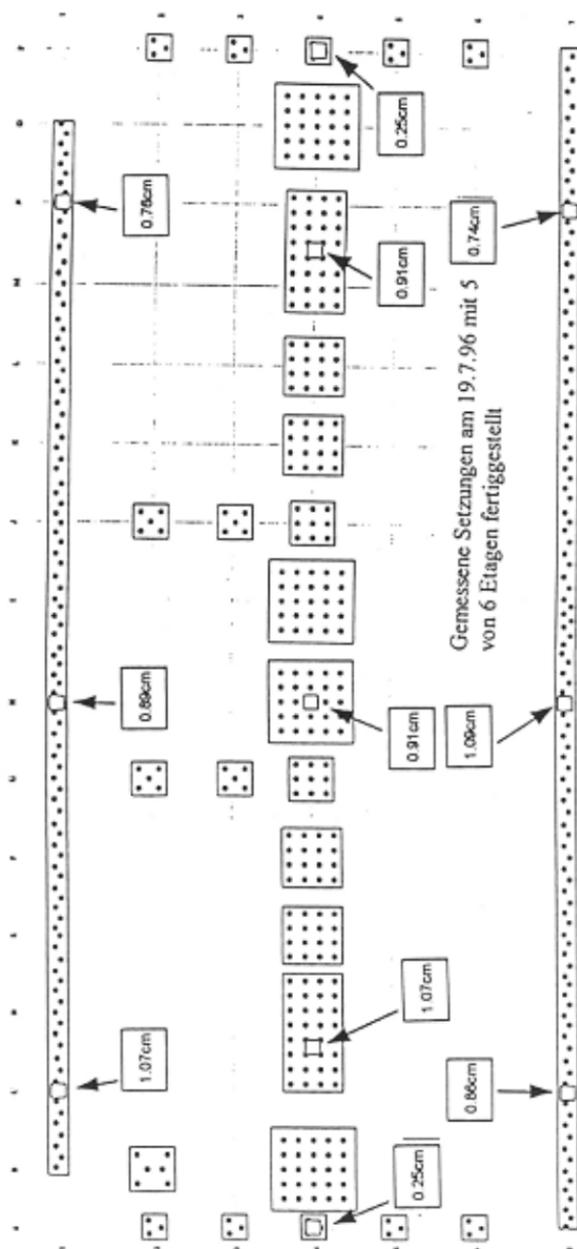


BILD 6: FUNDAMENTPLAN

7 ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN

Das Washington County Justice Center Parkhaus ist auf einer innovativen Zwischenbereichsgründung gestützt. Diese Gründung besteht aus Einzelfundamenten mit hohen Tragfähigkeiten, die durch Schotter Verdichtungssäulen gestützt werden. Dieses Fundamentsystem wurde ausgewählt, weil es gut fundierte Mechaniken des Ingenieurwesens zum Entwurf verwendet, und aufgrund der großen Kosten die dem Bauherrn gespart wurden. Die folgenden aufgezählten Feststellungen fassen die Baumaßnahme zusammen:

1. Die 2,1m bis 2,7m langen Schotter Verdichtungssäulen ersetzen 23m lange Stahlbetonrammpfähle.
2. Die Schotter Verdichtungssäulen dringen nicht in die unterhalb liegende, mitteldichte, schluffige Sandschicht ein, sie schließen im oberen Schluffstratum ab.
3. Einzel- und Streifenfundamente überhalb der Schotter Verdichtungssäulen wurden für einen zulässigen Belastungsdruck von 270 kN/m^2 entworfen.
4. Angenommene Entwurfparameter wurden durch vor Ort durchgeführte Modultests bestätigt.
5. Die gemessenen Setzungen der durch Schotter Verdichtungssäulen gestützten Fundamente betragen weniger als 2,5cm.
6. Die Anwendung von Schotter Verdichtungssäulen ermöglichten dem Bauherrn 50% Kostenersparnisse im Fundamentbereich.

Bis heute werden im Pazifischen Nordwesten der U.S.A. etwa 80 größere Strukturen durch Schotter Verdichtungssäulen gestützt; Schotter Verdichtungssäulen stützen über 350 Strukturen in Nordamerika.

QUELENNACHWEIS

- Dames and Moore (1995). Geotechnical investigation report for Washington County Justice Center.
- Fox, N.S. (1999). Personal communication, Geopier Foundation Company, Inc. project summary list.
- Lawton, E.C., and N.S. Fox (1994). "Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers." *Geotechnical Specialty Publication No. 40: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, ASCE, 2, 962-974.
- Lawton, E.C., and N.S. Fox, and R.L. Handy (1994). "Control of Settlement and uplift of structures using short aggregate piers." *In-situ Deep Soil Improvement*, Proc. ASCE National Convention, Atlanta, Georgia, 121 - 132.
- Terzaghi, K., and R.B. Peck (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, New York, New York.