



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

**Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik
der Technischen Universität Darmstadt**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach und Prof. Dr.-Ing. Ulvi Arslan

**Vorträge zum 7. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium
am 23. März 2000**

Zusammengestellt von Dipl.-Ing. Jens Turek

Heft 51 · Darmstadt · März 2000



Entwurf und Analyse von Aggregat-Pfählen zur Stabilisierung des Baugrunds für Gründungen

Dr.-Ing. Kord-Joachim Wissmann

Dr.-Ing. Nathaniel S. Fox

Geopier Foundation Company Inc., Scottsdale, Arizona, USA

1 Einleitung

In den USA werden zur Stabilisierung des Untergrunds Aggregat-Pfähle für die Stützung von Flächengründungen benutzt. Dieses System findet seine Anwendung in der Stabilisierung von Erdreich, das die folgenden Bodenarten einschließt: von weichen organische Tönen und Torfen über weiche Schluffe, lockeren Sand und unverdichtete Auffüllungen bis zu festen bis sehr festen Tönen sowie mitteldichte bis dichte Sande. Nach ihrer Installation dienen die Aggregat-Pfähle der Stützung von Bauten, wie etwa einstöckigen Warenlagern bis hin zu einem 16-stöckigen Bürogebäude (Bild 1). Typische Anwendungsbereiche schließen ein: eine Verbesserung des Erdreichs zur Stützung der Gründung für Bürogebäude, Parkhäuser, Krankenhäuser, Schulen, Flüssigkeitsbehälter, Warenlager, Fabriken sowie eine ganze Reihe anderer kommerzieller und industrieller Bauten; eine Verbesserung des Erdreichs zur Stützung von Flächengründungen und Straßenunterbauten; eine Stabilisierung des Erdreichs zur Erhöhung der Scherfestigkeit für Dämme und Hänge; sowie eine Stabilisierung des Erdreichs zur Kontrolle der Bodenverflüssigung.

Der Entwurf von Aggregat-Pfahl-Systemen basiert auf den klassischen Prinzipien der Bodenmechanik sowie auf Methoden zur geotechnischen Analyse. Die zulässigen Fundamentsohlldrücke sind von den Setzungsfaktoren abhängig. Die Setzung in der Oberen Zone des mit Pfählen stabilisierten Erdreichs hängt von lediglich drei Faktoren ab: (a) der Steifigkeit der Aggregat-Pfähle, (b) der Steifigkeit des Bodengefüges und (c) der von den Aggregat-Pfählen eingenommenen Fläche unterhalb der Gründungselemente. Die Setzung des Erdreichs in der Unteren Zone (d. h. der Bereich unterhalb der Aggregat-Pfähle)

errechnet sich mittels klassischer Methoden der Bodenmechanik, die eine Vorherbestimmung der Komprimierbarkeit des unteren Erdreichs sowie das Konzept der Druckverteilung unterhalb des Fundaments gemäß der herkömmlichen Elastizitätstheorie einschließen.



Bild 1 16-stöckiger Büroturm der von Aggregat-Pfählen gestützt wird

Diese Studie beschreibt Techniken zur Analyse des Entwurfs von Aggregat-Pfahl-Systemen, wie man sie für die Stützung von Gründungen verwendet. Das Entwurfsverfahren wird mittels Meßinstrumenten und Setzungsbeobachtungen an fertiggestellten Bauten überprüft. Desweiteren wird die Relevanz der Entstehung von lateralen Bodendrücken während der Konstruktion von Aggregat-Pfählen diskutiert. Diese Studie ist von besonderer Bedeutung, weil sie theoretische Methoden vorstellt, die sowohl für den Entwurf von Aggregat-Pfahl-Systemen als auch für die Instrumentenmessungen verwendet werden, und die bei der Planung des Entwurfs helfen. Eine kurze Beschreibung des Konstruktionsprozesses wird ebenfalls gegeben.

2 Hintergrundinformationen

In den USA sind seit 1989 Aggregat-Pfähle zur Stützung von mehr als 250 Projekten eingesetzt worden. Die Aggregat-Pfähle werden konstruiert, indem man unterhalb der geplanten Fundamentsohle Löcher in das Bodengefüge bohrt, das Aggregat in dünnen Schichten in die Löcher gibt und es daraufhin durch einen Rammvorgang zusammenpreßt. Der Gebrauch eines abgeschrägten Stampfers erhöht den lateralen Druck im Bodengefüge, das die Aggregat-Pfähle umgibt. Der Einsatz der steifen Pfähle im weniger steifen Bodengefüge dient dazu, das Erdreich direkt unterhalb der darüberliegenden

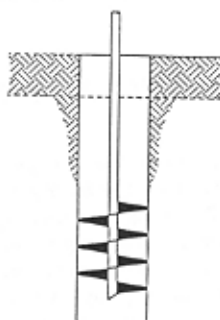
Flächengründung durch die Eigenschaften des Aggregats zu verstärken und zu versteifen. Aggregat-Pfähle sind vor allem dazu konzipiert, die Fundamentsetzung auf 25 mm oder weniger zu beschränken, wenn die Aggregat-Pfähle den Druckkräften des darüberliegenden Fundaments ausgesetzt werden. Die Stärke und Steifigkeit der Aggregat-Pfähle haben ihre Ursache in den hohen lateralen Bodendrücken, die während der Aggregat-Pfahl-Konstruktion auf das Bodengefüge ausgeübt werden, in dem daraus resultierenden großen Widerstand gegen Ausbauchungen im Bodengefüge sowie in der Stärke und Steifigkeit des gutverdichteten und weitgestuften Schotters, der auch im Straßenbau verwendet wird.

Aggregat-Pfähle, die Auftriebskräften standhalten müssen, sind mit einem stählernen, im unteren Teil der Aggregat-Pfähle angebrachten Rückhalteanker ausgestattet. Zulässige Auftriebskräfte werden von der Scherfestigkeit entlang der Schnittfläche zwischen den Pfählen und dem Bodengefüge reguliert.

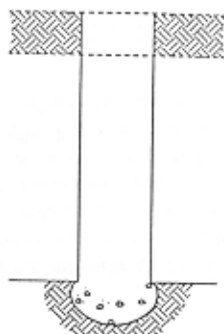
3 Die Konstruktion der Aggregat-Pfähle

Wie in Bild 2 gezeigt, werden die Aggregat-Pfähle installiert, indem man Löcher mit einem Durchmesser von 600 mm bis 900 mm in Tiefen von 3 m bis 7 m bohrt (diese Tiefen sind von der Erdoberfläche aus gemessen). Mißt man ab der Fundamentsohle oder den Gründungsplatten, dann beträgt die zu bohrende Tiefe 2 m bis 6 m (Lawton und Fox 1994, Lawton et al. 1994). Bei instabilem Erdreich wird eine Ummantelung verwendet. Schichten gleicher Dicke weitgestuften Aggregats werden in den geschaffenen Hohlraum gegeben und durch die Rammstöße einer patentierten, speziell dafür konstruierten Hochleistungsrammvorrichtung verdichtet. Die erste Schicht besteht aus enggestuftem Schotter ohne Feinstanteile und wird dergestalt ins Erdreich gerammt, daß sie sich am unteren Ende der Aushöhlung birnenförmig ausbaucht. Die birnenförmige Ausbauchung verlängert die ursprüngliche Tiefe des Aggregat-Pfahls um den Durchmesser eines Pfahls und bewirkt eine Vorbelastung des Erdreichs unterhalb des Aggregat-Pfahls. Die Aggregat-Pfähle werden vervollständigt, indem man weitere 30 cm dicke Schichten weitgestuften Schotters (wie er auch im Straßenbau verwendet wird) auf die birnenförmige Ausbauchung gibt und das Aggregat mit dem abgeschrägten Stampfer verdichtet. Während des Preßvorgangs zwingen die abgeschrägten Seiten des Stampfers das Aggregat lateral in die Seitenwand des Bohrlochs, was die Entstehung lateraler Drücke im benachbarten Bodengefüge auslöst und das Erdreich in der Nähe der Aggregat-Pfähle verdichtet. Die fertiggestellte Stabilisierungseinheit besteht aus wellenförmigen, sehr dichten und steifen Aggregat-Elementen und wird umgeben von einem Bodengefüge, das hohe laterale Spannungen aufweist. Der gesamte Prozeß sowie die Rammvorrichtung sind patentiert.

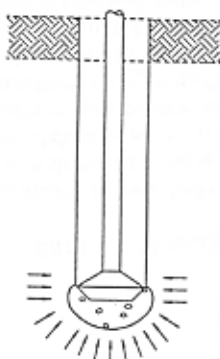
Normalerweise werden Aggregat-Pfähle konzipiert und installiert, um zirka 30% bis 40% der Gesamtfläche abzudecken, auf der das Fundament entstehen soll. Hochbelastete Flachgründungen mit zulässigen Tragfähigkeiten von 200 kN/m² bis 450 kN/m² werden direkt über dem mit Aggregat-Pfählen verstärkten Erdreich angelegt. Die zulässige



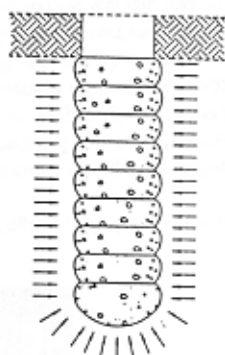
1. Bohrlochaushub



2. Einfüllen des Schotters



3. Verdichten des Schotters
am Pfahlende

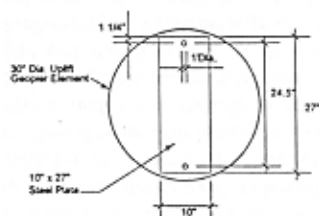


4. Einfüllen und Verdichten
einzelner Schichten

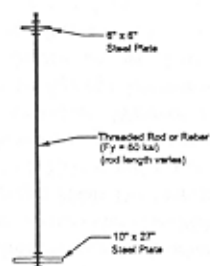
Bild 2 Aggregat-Pfahl Herstellung

Tragfähigkeit hängt im wesentlichen von der Konsistenz des unverstärkten Bodengefüges und dem prozentualen Flächenanteil der installierten Aggregat-Pfähle ab. Da Aggregat-Pfähle das Erdreich direkt unterhalb des Fundaments versteifen, ist es nicht notwendig, sie auf tragfähige Schichten zu stützen.

Sofern eine Auftriebskontrolle notwendig ist, wird eine Stahlplatte am unteren Ende des Aggregat-Pfahls installiert (Bild 3). Die Auftriebskräfte werden von dem darüberliegenden Fundament auf die Stahlplatte im unteren Teil des Pfahls über Stahlstäbe geleitet, die entlang der Pfahlwandung angebracht sind. Auf diese Weise werden die Auftriebskräfte durch den zwischen den installierten Aggregat-Pfählen und dem Bodengefüge entstehenden Scherwiderstand wirksam kontrolliert.



Grundriß



Seitenansicht des Ankers

Bild 3 Details eines Rückhalteankers

4 Entwurfsmethoden für Druckkräfte

Aggregat-Pfähle erhöhen die Steifigkeit des verstärkten Bodengefüges erheblich und reduzieren somit die Fundamentsetzung in bedeutendem Maße. Setzungsberechnungen werden angestellt, um sowohl die Verdichtung des mit Aggregat-Pfählen verstärkten Bodengefüges (Obere Zone) vorherzubestimmen, als auch die Verdichtung des Erdreichs zu erreichen, das sich unterhalb der Aggregat-Pfähle befindet und deshalb beträchtlichen Fundamentsohlldrücken (Untere Zone) ausgesetzt ist.

4.1 Setzungsberechnungen für die Obere Zone

Wenn Druckkräfte auf mit Aggregat-Pfählen verstärkte Fundamente wirken, werden die steifen Aggregat-Pfähle einem weitaus größeren Fundamentsohlldruck ausgesetzt als das vergleichsweise weiche Bodengefüge. Die Verteilung dieses Drucks hängt einerseits vom

Verhältnis der Steifigkeit der Aggregat-Pfahl-Elemente zur Steifigkeit des Bodengefüges ab, andererseits vom Verhältnis der Querschnittsfläche der Aggregat-Pfahl-Elemente zur Gesamtfundamentfläche. Die Verfahrensweise für die Berechnung der Oberen Zone basiert auf einem Federmodell (Lawton und Fox 1994 und Lawton et al. 1994), das im folgenden beschrieben ist:

1. Voraussetzung ist, daß das Fundament hinsichtlich der Materialien in der Gründung absolut fest ist. Die Drücke, die auf die Aggregat-Pfähle und das Bodengefüge wirken, hängen folglich von deren relativen Steifigkeiten (R_s) sowie von der eingenommenen Gesamtfläche ab. Nach dem Gesetz des statischen Gleichgewichts wirkt der Summe der auf das Fundament wirkenden Kraft (Q) -- die sich aus dem Gesamtdruck (q) und der Fundamentfläche (A) zusammensetzt -- die Summe jener aufwärtsgerichteten Kraft in den Aggregat-Pfählen (Q_s) und den Bodenmaterialien (Q_a) entgegen.

$$Q = q A = Q_s + Q_a = q_s A_s + q_a A_a \quad (1)$$

Dabei repräsentiert q_s die Belastung an der Oberkante der Aggregat-Pfahl-Elemente, A_s die Fläche der Pfahl-Elemente unterhalb des Fundaments, q_a die vertikale Belastung auf das Bodengefüge unterhalb des Fundaments und A_a die Fläche des Bodengefüges, die sich in direktem Kontakt mit der Fundamentsohle befindet.

2. Weil das Fundament im Vergleich zum Untergrund ausgesprochen steif ist, ist die Setzung des Aggregat-Pfahls dieselbe wie die des Bodengefüges. Die Setzung des Fundaments (s) kann entweder mit der Belastung des Aggregat-Pfahls und dem Steifemodul des Aggregats (k_s) oder mit der Belastung des Bodengefüges und dem Steifemodul des Bodengefüges (k_a) bestimmt werden:

$$s = q_s / k_s = q_a / k_a \quad (2)$$

3. Gleichung 2 kann umgeschrieben werden, um die Belastung des Bodengefüges anhand der Belastung der Aggregat-Pfähle und dem Verhältnis der Modulwerte von Aggregat-Pfählen und Bodengefüge zueinander (R_s) zu errechnen, wobei $R_s = k_s / k_a$:

$$q_a = q_s (k_a / k_s) = q_s / (k_s / k_a) = q_s / R_s \quad (3)$$

4. Kombiniert man die Gleichungen 1 und 3, läßt sich das Flächenverhältnis (R_s) als das Verhältnis von A_s zu A definieren:

$$q = \{q_s \{A_s / A + q_a A_a / (A R_s)\} = [q_s R_s + q_s (1 - R_s) / R_s] = \\ \{q_s [R_s + 1/R_s - R_s/R_s]\} = \{q_s [R_s + 1 - R_s] / R_s\} \quad (4)$$

5. Daraufhin schreibt man q_g als Bedingung von q :

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

6. Die Setzung in der Oberen Zone errechnet sich mit Hilfe der beiden Gleichungen 2 und 5, die vom aufgetragenen Fundamentdruck, der relativen Steifigkeit der Aggregat-Pfähle und den Materialien im Erdreich, dem Flächenverhältnis der Aggregat-Pfahl-Elemente sowie dem Steifemodul der Aggregat-Pfähle abhängig sind. Die Werte für den Steifemodul der Aggregat-Pfähle werden in der Praxis gemessen, indem man umfassende Belastungsversuche anstellt.

Ein einfaches Beispiel, das die Wirksamkeit einer Verstärkung des Untergrunds mit Aggregat-Pfählen beschreibt, ist das folgende: Man stelle sich ein Fundament vor, das einen Bodendruck von 250 kN/m^2 ausübt, und das von einer ausreichenden Anzahl von Aggregat-Pfählen dergestalt gestützt wird, daß sich ein Flächenverhältnis (R_s) von 0,35 ergibt. Man stelle sich weiterhin einen Aggregat-Pfahl-Modulwert (k_g) von 50 MN/m^3 sowie einen Bodengefüge-Modulwert von 4 MN/m^3 vor. Der sich daraus ergebende Wert für den Steifigkeitsfaktor (R_s) beträgt 12,5. Benutzt man diese Werte in Verbindung mit Gleichung 5, so erhält man eine Belastung für das obere Ende der Aggregat-Pfähle von 622 kN/m^2 . Aus Gleichung 2 ergibt sich eine Setzung der Oberen Zone von 1,2 cm. Wenn man *keine* Aggregat-Pfähle zur Verstärkung des Bodengefüges verwendete, dann müßte man die Setzung als das Verhältnis der Belastung des Fundaments zum Modul des Bodengefüges errechnen; das ergäbe 6,3 cm, ein Wert der weit über einer allgemein akzeptierten Setzung von 2 cm liegt. Die Konstruktion der Pfähle bewirkt eine Reduktion der Setzung um 5,1 cm oder 20% gegenüber der Setzung des unverstärkten Bodengefüges.

4.2 Belastungstests

Um die angenommenen Modulwerte zu verifizieren, die man für die Aggregat-Pfähle benutzt, werden vor der Installation umfassende Belastungstests an den Aggregat-Pfählen vorgenommen. Diese Tests werden durchgeführt, indem man runde Stahlplatten über der gesamten Querschnittsfläche eines installierten Aggregat-Pfahl-Elements anbringt und alsdann gleichmäßig ansteigenden Druck darauf ausübt. Die maximale Belastung während des Tests entspricht zu mindestens 150% dem vorherbestimmten Druck, der für die Oberkante der Aggregat-Pfahl-Elemente errechnet wurde. Bild 4 präsentiert das Ergebnis typischer Belastungstests für gegebene Bodenprofile sowie Aggregat-Pfahl-Geometrien.

Die Ergebnisse von an über 100 Baustellen durchgeführten Tests wurden gesammelt (Geopier Foundation Company, Inc. 1998). Die Testergebnisse lassen vermuten, daß zulässige Fundamentsohlrücke und die Kapazitäten der Aggregat-Pfahl-Elemente der Klassifikation des Bodengefüges und dem Eindringwiderstand entsprechen.

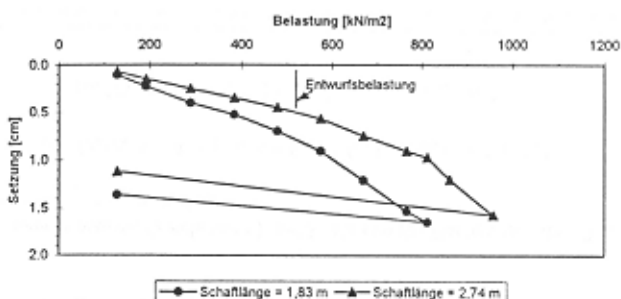


Bild 4 Typische Ergebnisse von Belastungstests

4.3 Die Verifizierung der Druckverteilung in der Oberen Zone

Umfassende Belastungstests, die vor Ort an mit Meßgeräten ausgerüsteten und mit Aggregat-Pfählen verstärkten Fundamenten durchgeführt wurden, bestätigen die Vorstellung von einer Belastungskonzentration auf das obere Ende der vergleichsweise steifen Aggregat-Pfähle während der Druckbelastungen (Lawton 1999). Die mit Meßgeräten ausgerüsteten Fundamente stützten einen Reaktionsturm, wie er von Forschern an der Universität von Utah eingesetzt wird, um dynamische laterale Kräfte auf einen Brückenbogen (Bild 5) einwirken zu lassen und somit das Verhalten der Brücke auf die durch Erdbeben freiwerdenden Kräfte zu simulieren. Während der periodischen Belastungen ließ man Druck- und Zuglasten von bis zu 112 kN auf die inneren und äußeren Fundamente (2,5 m auf 7,5 m) einwirken. Jedes Fundament war von 10 Aggregat-Pfählen mit jeweils einem Durchmesser von 914 mm gestützt, welche man in dem weichen, von niedriger Plastizität charakterisierten Lake Bonneville Schluff und in Tonablagerungen in einer Tiefe von 4,6 m angelegt hatte. Beim Kegeleindringungsversuch (Cone Penetration Test) zeigte das Bodengefüge Spitzenwiderstandswerte von $0,5 \text{ MN/m}^2$ bis $3,8 \text{ MN/m}^2$ (Lawton 1999).

Bild 6 präsentiert die Ergebnisse von Druckmessungen, die während der Hauptphase des Druckbelastungsvorgangs mit Hilfe von Druckzellen gemacht wurden, welche man zwischen der Fundamentsohle und dem oberen Ende der Aggregat-Pfähle angebracht hatte. Die gemessenen Belastungen werden durch die Belastungen normalisiert, die von einer Druckzelle gemessen werden, welche zwischen der Fundamentsohle und dem oberen Bodengefüge installiert ist. Geht man von der Annahme aus, daß das Fundament während der aufgetragenen Belastungen gleichmäßig nach unten gedrückt wird, dann entspricht das Verhältnis der Drücke von Aggregat-Pfahl und Bodengefüge dem Verhältnis der Modulwerte von Aggregat-Pfahl und Bodengefüge, die durch den Parameter R_s in

Gleichung 3 vertreten sind. Die Ergebnisse der in Bild 6 angeführten Messungen belegen, daß sich das Verhältnis der getesteten Drücke von Aggregat-Pfahl zu Bodengefüge zwischen 30 und 45 bewegt. Benutzt man diese Ergebnisse in Gleichung 5, dann bewegt sich das Verhältnis der Aggregat-Pfähle zu dem Druck der Fundamentsohle zwischen 2 und 3,5 für das getestete Fundament. Diese Werte sind eine wünschenswerte Annäherung an das theoretische Druckverhältnis von 2,5 bis 3 von Aggregat-Pfahl zu Fundamentsohle (Fox und Cowell 1998).

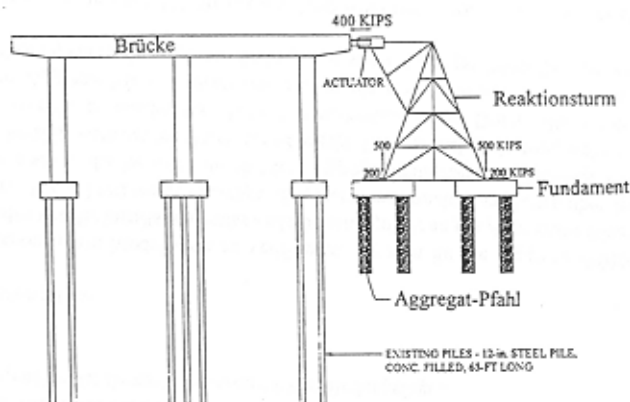


Bild 5 Schema eines Reaktionsturms auf einem maßinstrumentierten Fundament (nach Lawton 1999)

4.4 Berechnungen für die Setzung der Unteren Zone

In Kombination mit Elastizitätsmodulwerten des Erdreichs, die man entweder anhand von in der Praxis gewonnenen und ausgewerteten Testdaten ermittelt, oder die man aus den Ergebnissen von Testmessungen mit einem Ödometer im Labor gewinnt, berechnen sich die Schätzungen für die Setzung der Unteren Zone, welche sich unterhalb der birnenförmigen Ausbauchung des Aggregat-Pfahls befindet, unter Verwendung von konventionellen Methoden zur Analyse der geotechnischen Setzung (wie sie in der Literatur [Terzaghi und Peck 1967] ausführlich behandelt sind). Diese Analyse schließt die Vermutung ein, daß der vom Fundament ausgehende Druck in der Unteren Zone unter Zuhilfenahme der Elastizitätstheorie geschätzt werden kann. Diese Annahme wird durch das Gesamtverhalten des verformbaren Aggregat-Pfahls und des ihn umgebenden Erdreichs durch Setzungsmessungen an Hunderten von Fundamenten, die mit Aggregat-Pfählen verstärkt sind, bestätigt.

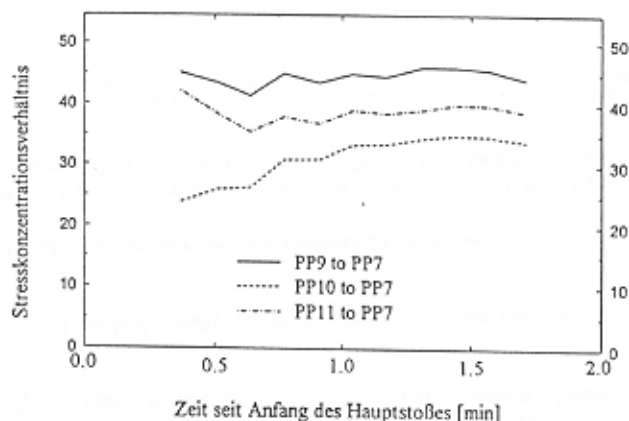


Bild 6 Konzentration des Drucks auf die Oberkante der Aggregat-Pfähle (nach Lawton 1999)

4.5 Setzungsbeobachtungen

Die Methode zur kombinierten Analyse von Setzungen in der Oberen und Unteren Zone basiert auf klassischen Ansätzen zur Lösung von Problemen in der Bodenmechanik. Die Ergebnisse der Analysen hängen größtenteils von den Modulwerten der Materialien in der Oberen und Unteren Zone ab. Die Modulwerte in der Oberen Zone sind sehr vielversprechend, weil die angenommenen Entwurfsparameter von Modulwerten bestätigt werden, die aus Belastungstests entwickelt wurden, und weil der Prozeß eine systematische Aufbereitung des Baugrunds in Tiefen miteinbezieht, in denen die einwirkenden Drücke des Fundaments am größten sind. Annahmen hinsichtlich des Entwurfs zur Komprimierbarkeit der Unteren Zone lassen sich am besten durch Beobachtungen des Verhaltens fertiggestellter Bauten bestätigen. In Bild 7 wird am Beispiel eines fünfstöckigen Parkhauses in Hillsboro, Oregon, die beobachtete Setzung des Fundaments gezeigt, das von Aggregat-Pfählen gestützt ist. Die Beobachtungen lassen eine maximale Setzung von weniger als 1,2 cm erkennen und liegen somit weitaus niedriger als der Entwurfswert von 2,5 cm. Diese Ergebnisse sind typisch für Bauten, die von Aggregat-Pfählen gestützt werden (Fox 1999).

5 Laterale Vorbelastung während der Pfahlkonstruktion

Während der Konstruktion von Aggregat-Pfahl-Elementen zwingt der Rammvorgang mit

dem abgeschrägten Stampfer das Aggregat lateral in die Seitenwände des Bohrlochs, wobei der laterale Erddruck im Bodengefüge zunimmt. Die Zunahme des lateralen Erddrucks mit wurde mit in-situ-Testinstrumenten gemessen; sie spielt eine wichtige Rolle für das Verformungsverhalten der Aggregat-Pfähle während der Druckeinwirkung.

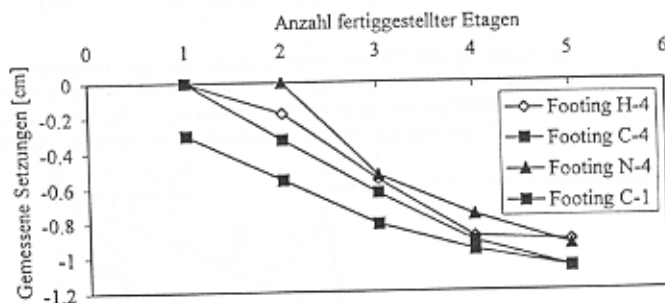


Bild 7 Setzungsbeobachtungen

5.1 Messungen des lateralen Erddrucks im Bodengefüge

Das Ausmaß der Zunahme des lateralen Erddrucks innerhalb des Bodengefüges nach der Installation von Aggregat-Pfählen wurde an zwei Bauprojekten in-situ mit einem abgestuften Blatt nach der K_0 Testmethode gemessen (Ferguson et al. 1993, Handy 1998). Die in-situ durchgeführte K_0 Testmethode mit einem abgestuften Blatt wurde von Professor Handy an der Iowa State Universität entwickelt. Die Versuche werden mittels einer Bodenbohrung bis zur Testtiefe vorgenommen, woraufhin ein mit Meßgeräten ausgerüstetes und sich stufenweise verdickendes Testblatt in vier aufeinanderfolgenden Arbeitsgängen in das darunterliegende Erdreich gestoßen wird. Am unteren Ende ist das Blatt am dünnsten, und der erste Stoßvorgang mißt die lateralen Erddrücke auf diesen dünnsten Abschnitt. Nachfolgende Stöße messen die lateralen Erddrücke auf die sich stufenweise verdickenden Abschnitte des Blatts. Die Ergebnisse werden dazu herangezogen, um den lateralen Erddruck auf ein Blatt zu extrapolieren, das eine hypothetische Dicke von Null hat. Die solchermaßen extrapolierten Drücke geben Aufschlüsse über die lateralen Erddrücke im Bodengefüge vor Ort.

Die Ergebnisse der vor Ort extrapolierten Horizontaldrücke, die mit Hilfe eines abgestuften Blatts nach der K_0 Testmethode an zwei Bauprojekten gemessen wurden, sind in Bild 8 dargestellt. Die Bodenverhältnisse an der Baustelle in Winterset, Iowa, zeigen einen weichen mageren Ton, der bis in eine Tiefe von zirka 3 m reicht. Lake Bonneville Schluff und Tonablagerungen, wie sie in Kapitel 4.3 beschrieben sind, charakterisieren die Baustelle in Salt Lake City, Utah. Das Testverfahren mit dem abgestuften Blatt wurde in verschiedenen

Tiefen und Entfernungen von den eingebrachten Aggregat-Pfählen nach deren Installation durchgeführt. Den in Bild 8 dargebrachten Testergebnissen liegen Daten zugrunde, die sowohl im "weiteren Umfeld" gesammelt wurden, d.h. in horizontalen Entfernungen von mehr als 15 m vom Rand des Aggregat-Pfahls, als auch solche, die man im "näheren Umfeld" gesammelt hat, d.h. in horizontalen Entfernungen von weniger als 3 m vom Rand des Aggregat-Pfahls. Die Testergebnisse deuten darauf hin, daß die lateralen Erddrücke im Bodengefüge des "näheren Umfelds" durch die Anlegung der Aggregat-Pfähle bedeutend erhöht wurden. Verglichen mit den Bedingungen, die für das "weitere Umfeld" gelten, stiegen die durchschnittlichen lateralen Erddrücke im "näheren Umfeld" in der gesamten Tiefe der installierten Aggregat-Pfähle um einen Faktor von etwa 2 und um mehr als das Doppelte in der Nähe der oberen Abschnitte der Aggregat-Pfähle an. Obwohl es beträchtliche Abweichungen in den Daten gibt, deuten die Testergebnisse darauf hin, daß der laterale Erddruck im Bodengefüge, das sich in unmittelbarer Nähe der Aggregat-Pfähle befindet, durch Erdwiderstandsbedingungen verringert wird (Ferguson et al. 1993, Handy 1998). Zu ähnlichen Schlußfolgerungen ist man durch die Ergebnisse von Pressuremeter-Tests gekommen, die in der Nähe der installierten Aggregat-Pfähle durchgeführt wurden (Handy 1999).

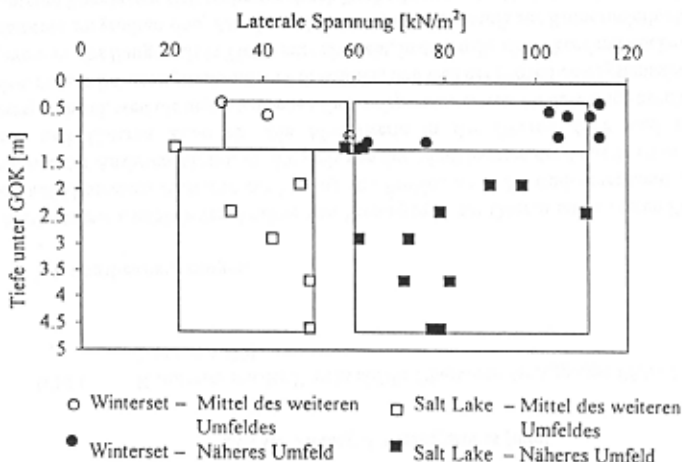
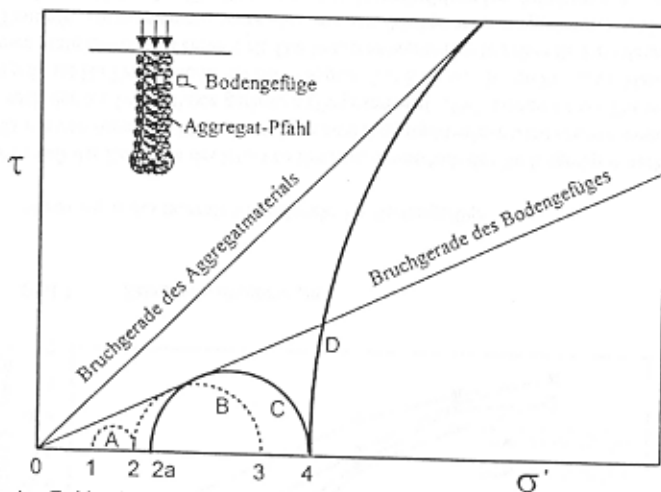


Bild 8 Laterale Erddrücke nach der Konstruktion von Aggregat-Pfählen

5.2 Die Relevanz von Vorbelastung und Vordehnung des Bodengefüges

Das Entstehen von erhöhten lateralen Erddrücken im Bodengefüge als Ergebnis einer Aggregat-Pfahl-Konstruktion spielt eine wichtige Rolle für die Minimalisierung der

wellenartigen Verformungen der Aggregat-Pfähle während der Druckeinwirkung (Handy 2000). In Bild 9 werden die Mohr'schen Kreise vorgestellt, die den Druckzustand innerhalb der Aggregat-Pfähle sowie den Druckzustand im Bodengefüge beschreiben, welches in unmittelbarer Nähe der Aggregat-Pfähle gelegen ist. Vor der Konstruktion der Pfähle wird der Druckzustand im Bodengefüge durch Kreis A dargestellt. Der vor Ort gemessene effektive vertikale Druck (Punkt 2) ist normalerweise größer als der vor Ort gemessene effektive horizontale Druck (Punkt 1). Während der Aggregat-Pfahl-Installation bleibt der effektive vertikale Druck annähernd gleich, und der effektive horizontale Druck erhöht sich um einen Wert, der sich dem Grenzzustand für passiven Erddruck annähert (Punkt 3). Dieser Druckzustand wird dargestellt durch Kreis B. Wird der Aggregat-Pfahl dann einer Belastung ausgesetzt, die der Ausbauchung des Aggregat-Pfahls in das Bodengefüge entspricht, dann erhöht sich der effektive vertikale Druck im Bodengefüge analog den Auswirkungen der Poisson'schen Querdehnzahl leicht (Punkt 2a), und der effektive horizontale Druck erhöht sich soweit (Punkt 4), bis der Kreis die passiven Druckbedingungen erreicht und zu einem Druckzustand gelangt, wie er durch Kreis C beschrieben ist. Auf diesem Druckniveau ist der effektive horizontale Druck im Aggregat-Pfahl der gleiche wie der im Bodengefüge, und der vertikale Druck im Aggregat-Pfahl wird kontrolliert von den Druckbedingungen für das Aggregat-Material, wobei Kreis D die Bruchbedingung für den Aggregat-Pfahl darstellt.



- Kreis A = Erddruck des Bodengefüges vor der Pfahlherstellung
 Kreis B = Anstieg des lateralen Erddrucks im Bodengefüge während der Pfahlherstellung
 Kreis C = Anstieg des Erddrucks im Bodengefüge infolge von Pfahlausbauchung
 Kreis D = Potentieller maximaler Erddruck des Aggregat-Pfahlmaterials

Bild 9 Druckzustände als Resultat der Aggregat-Pfahl-Installation

Die Relevanz für das Vorbelasten des Bodengefüges, die durch die Veränderung für die Druckbedingungen von Kreis A bis Kreis B dargestellt wird, ist die folgende: Durch das Vorbelasten des Erdreichs während der Konstruktion der Aggregat-Pfähle braucht sich der Druckzustand bei der Druckeinwirkung auf den Aggregat-Pfahl nicht wesentlich zu verändern. Das zeigt sich anhand einer nur geringfügigen Druckveränderung von Kreis B auf Kreis C. Dies ist bedeutsam, weil Veränderungen in den Druckbedingungen von Ausdehnung begleitet werden. Mit dem Vorbelasten des Bodengefüges führt die Konstruktion der Pfähle auch ein Vordehnen herbei und bewirkt dadurch deutlich geringere laterale Verformungen des Bodengefüges, weil die Pfähle dazu neigen, sich während der Druckeinwirkung nach Außen auszubauchen. Wechselt der Druckzustand während der Druckeinwirkung von Kreis A auf Kreis C, dann entstehen bedeutend größere laterale Verformungen im Bodengefüge sowie entsprechende vertikale Verformungen der Aggregat-Pfähle.

6 Entwurfsmethoden für Zuglasten

Das Entwurfsverfahren, das man zur Vorherbestimmung der Zuglastenkapazität von mit Rückhalteankern ausgestatteten Aggregat-Pfählen benutzt, ist bei Lawton et al. (1994) detailliert beschrieben und hier kurz zusammengefaßt. Wirken die Zuglasten auf die in den Boden des Aggregat-Pfahls eingelassene Stahlplatte ein, so treten Scherkräfte auf. Der Widerstand des Stabilisierungselements gegen die vertikale Bewegung (f_t) läßt sich bestimmen als das Resultat des effektiven horizontalen Erddrucks (σ_h') und dem Tangens des Reibungswinkels des unbehandelten Bodengefüges (ϕ_s):

$$f_t = \sigma_h' \tan(\phi_s) \quad (6)$$

Es wird vermutet, daß der horizontale Erddruck derselbe ist wie das Ergebnis aus dem effektiven vertikalen Druck und dem Koeffizienten für passiven Erddruck von Rankine. Die maximale Kapazität der Auftriebskraft (T_{max}) errechnet sich anhand der Integration des Aufwärtswiderstands des Stabilisierungselements (f_t) über der Fläche, die vom Umkreis des Aggregat-Pfahl-Elements (A_s) eingenommen wird:

$$T_{max} = f_t A_s \quad (7)$$

Die mit den Gleichungen 6 und 7 errechnete Kapazität für den Auftrieb von Aggregat-Pfahl-Elementen sollte auf projektspezifischer Grundlage durch Zugkrafttests an installierten Pfählen überprüft werden. Ein Sicherheitsfaktor von 2,0 wird in der Regel veranschlagt.

7 Anwendungsbereiche

In den Boden gerammte Aggregat-Pfähle dienen der Verstärkung des Untergrunds und

wurden während der letzten 10 Jahre zur Stützung von mehr als 250 größeren Bauten in den USA eingesetzt. Das System wird zur Stabilisierung und Verstärkung des Bodens verwendet, wie beispielsweise bei weichen organischen Tonen, Torf, weichen Schluffen und lockeren Sanden, unverdichteten Auffüllungen oder festen bis sehr festen Tonen sowie mitteldichten bis dichten Sanden. Mit Aggregat-Pfählen gestützte Bauten reichen von einstöckigen Warenhäusern, die auf Grundstücken stehen, die weiche Torfschichten enthalten, bis hin zu einem 16-stöckigen Bürogebäude, das man auf einem Gelände errichtet hat, welches mittelfeste Schluffe und Tone enthält. Aggregat-Pfähle wurden bislang zur Stützung von Krankenhäusern, Schulen, kommerziellen Bürogebäuden, Parkhäusern, mehrstöckigen Wohnhäusern, Flüssigkeitsbehältern und Industrieanlagen eingesetzt. Bei typischen Anwendungen bewegen sich die Fundamentdrücke zwischen 400 kN und 7.000 kN und können zur Stützung von Fundamenten mit Stützlasten bis zu 13.000 kN eingesetzt werden (GeoStructures 1999). Typische Anwendungen sind:

- Bodenstabilisierung für die Unterstützung von Flachgründungen und zur Setzungskontrolle
- Kontrolle von Auftriebskräften für mit Rückhalteankern ausgerüstete Aggregat-Pfähle
- Bodenstabilisierung für die Stützung von Flächengründungen und Straßenunterbau
- Verbesserungen der Bodenschersfestigkeit für Dämme, Abhänge und Stützmauern
- Erhöhung der Bodenschersfestigkeit für die Kontrolle von Boderverflüssigungen

Der Einsatz von Aggregat-Pfählen zur Unterstützung von Flachgründungen wird von verschiedenen Faktoren begrenzt. Aggregat-Pfähle werden normalerweise zur Stabilisierung von Böden bis zu Tiefen von 2 m und 6 m unterhalb der Fundamentsohle installiert. Ist die Kombination von struktureller Belastung und Gründungsbedingung dergestalt, daß eine wirksame Setzungskontrolle die Installation von Aggregat-Pfählen in Tiefen von mehr als 7 m erforderlich macht, dann mögen andere Gründungssysteme für die Bauausführung geeigneter sein. Die Bodenverstärkung mit Aggregat-Pfählen bietet wenige ökonomische Vorteile für Bauten in Bereichen, wo die Tiefe zum felsigen Untergrund gering ist, oder für Bauten in Gebieten mit enggestuften Sanden in Verbindung mit einem hohen Grundwasserspiegel, weil dann eine Ummantelung während der Installation notwendig wird. Das System der Bodenverstärkung mit Aggregat-Pfählen wurde hauptsächlich deshalb entwickelt, um eine ökonomische Alternative zu Tiefgründung und überproportionalem Bodenaushub einschliesslich Wiederverfüllung und -verdichtung für Flachgründungen zu bieten, die eine höhere Leistung erforderlich machen, als mit herkömmlichen Gründungen erzielt werden kann.

8 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Der Entwurf von Aggregat-Pfahl-Systemen, die der Stützung von Drucklasten dienen, basiert auf klassischen Prinzipien der Bodenmechanik und wird bestätigt durch die Ergebnisse von Versuchen an mit Meßgeräten ausgestatteten Fundamenten sowie durch Belastungstests, wie man sie an den meisten Bauprojekten durchführt. Durch die Installation der Aggregat-Pfähle wird der Koeffizient für den lateralen Erddruck im Bodengefüge auf den Rankine-Koeffizienten für passiven Erddruck erhöht. Diese Zunahme an lateralem Druck ist für den wirkungsvollen Einsatz von Aggregat-Pfählen grundlegend insofern, als diese dadurch sowohl den Druck- als auch den Zugkräften widerstehen können. Desweiteren ist die Zunahme an lateralem Druck ein Charakteristikum für die wirkungsvolle Leistung der Aggregat-Pfähle in Relation zur Aggregat-Pfahl-Ausbauchung. Setzungsbeobachtungen an fertiggestellten Bauten bestätigen die Eignung der Entwurfstechniken. Bis heute sind mehr als 250 größere Bauten mit Aggregat-Pfählen gestützt worden (*Geopier Foundation Company, Inc. 1999*).

Literaturnachweise

- Ferguson, E.G., R.L. Handy, and S. Mackiewicz (1993). "In Situ Test Device to Determine Lateral Earth Pressure." Iowa State University progress report No. 2 prepared for the U.S. Army Corps of Engineers. Project No. DACA39-92-C-0024. June 8, 1993.
- Fox, N.S. and M. J. Cowell (1998). *Geopier™ Foundation and Soil Reinforcement Manual*, Geopier Foundation Company, Inc., 11421 East Aster Drive, Scottsdale, AZ.
- Fox, N.S. (1999). Personal communication, Geopier Foundation Company, Inc. project summary list.
- Geopier Foundation Company, Inc. (1999). List of completed projects.
- GeoStructures (1999). Design submittal for Tyson's Garage project, Tyson's Corner, Virginia.
- Handy, R.L. (1998). "Salt Lake City Ko Stepped Blade tests." Report prepared for Geopier Foundation Company, Inc. by Distinguished Professor R.L. Handy, 1502 270th Street, Madrid, Iowa, 50156, USA.
- Handy, R.L. (1999). Personal communication.
- Handy, R.L. (2000). "Does lateral stress really influence settlement?" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. Paper submitted for publication.

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., 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.

Lawton E.C. (1999). "Performance of Geopier Foundations during simulated seismic tests at South Temple Bridge on Interstate 15, Salt Lake City, Utah." Interim Report No. UUCVEEN 99-05, University of Utah Department of Civil and Environmental Engineering, Salt Lake City, Utah.

Terzaghi, K., and R.B. Peck (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, New York, New York.