

Einfluß der Fundamentsteifigkeit auf die Deformationsmechanismen bei Gruppen von Schottersäulen

Beitrag für das Pfahlsymposium 2001 an der TU Braunschweig

Dr.-Ing., M.Sc. W. Wehr
Keller Grundbau GmbH, Auslandsbereich, Offenbach

KURZFASSUNG:

Bei einer Schottersäulengruppe im Ton hängen die Säulenverformungen u.a. von der Steifigkeit des Fundaments ab. Um die unterschiedlichen Verformungen aufzuzeigen, werden Modellversuche von Hu (1995) mit einem starren und einem flexiblen Fundament verglichen.

Eine Nachrechnung der Modellversuche mit FEM und einem elasto-plastischen Stoffgesetz verdeutlicht den Deformationsmechanismus einer Säulengruppe unter einem flexiblen Fundament. Es ergab sich ein Ausbauchen aller Schottersäulen mit einem Scherfugenmuster im oberen Teil. Im Gegensatz dazu kam es bei einem starren Fundament zu einem klar sichtbaren Scherzonenkeil mit Abscheren der Säulen.

Abschließend wird das Last-Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Fundamentsteifigkeit analysiert und eine Empfehlung zur Wahl der Steifigkeit für die Praxis gegeben.

ABSTRACT:

Deformations of stone columns inside a group of stone columns in clay depend on the rigidity of the footing. In order to demonstrate the different deformations, model tests of Hu (1995) with a rigid and a flexible footing are compared.

A re-calculation of the model tests by means of the finite element method and an elasto-plastic constitutive law detects the deformation mechanism of a group of columns below a flexible footing. Bulging of all columns is observed with a pattern of shear zones in the upper part. However, buckling with one wedge shaped shear zone is observed in the case of a rigid footing.

Finally the load displacement behaviour is analysed depending on the stiffness of the footing and a recommendation is given to choose the stiffness for practical applications.

1 EINFÜHRUNG

Zur Modellierung von Kräften und Verschiebungen bei Schottersäulen ist es notwendig, die Breite von Scherzonen in den Säulen korrekt zu berücksichtigen, und zwar sowohl bei Einzelsäulen als auch bei Säulengruppen (Wehr 1999a). Die Einflüsse von verschiedenen Parametern auf die Scherzonenbreite, wie Anfangsdichte, Spannung und mittlerer Korndurchmesser wurden bereits durch Modellversuche gezeigt (Tejchman 1989, Hammad 1991, Hassan 1995) und konnten mit FE-Berechnungen modelliert werden (Tejchman 1997, Tejchman et al. 1999).

Von Hu 1995 und Wood/Hu 1997 wurde bei Modellversuchen mit einer Schottersäulengruppe im Ton beobachtet, daß der Deformationsmechanismus auch von der Steifigkeit des Fundaments abhängt.

In diesem Artikel sollen Modellversuche an einer Gruppe von Schottersäulen unter einem starren

und einem flexiblen Fundament verglichen werden, bevor auf Nachrechnungen der Modellversuche mit FEM eingegangen wird. Das Ziel ist, die verschiedenen Mechanismen zu verdeutlichen, jedoch ausdrücklich nicht die Kraft-Verschiebungskurven möglichst exakt nachzurechnen. Letzteres sollte einer 3D-Berechnung vorenthalten bleiben.

2 MODELLVERSUCHE

Modellversuche mit Gruppen von Sandsäulen im Ton wurden von Hu (1995) und Wood/Hu (1997) durchgeführt, um einen besseren Einblick in die Deformationsmechanismen einer Gruppe von Schottersäulen unter Fundamenten zu erhalten

Die Modellböden der Versuche waren Speswhite Kaolinton, der ausgehend von einem flüssigen Zustand konsolidiert wurde, mit einer Plastizitätszahl von 27 und einer undrnierten Kohäsion zwischen $8 \text{ kPa} < c_u < 23 \text{ kPa}$, und ein enggestuftes Loch Aline Mittelsand ($d_{50} = 0,32 \text{ mm}$,

$e_{max} = 0,80$, $e_{min} = 0,56$). Die Anfangsporenzahl bewegte sich zwischen $0,67 < e < 0,74$ und entspricht einer lockeren bis mitteldichten Lagerung.

Die Versuchsanordnung und der Versuchsablauf wurden von Hu (1995) detailliert beschrieben.

2.1 starres Fundament

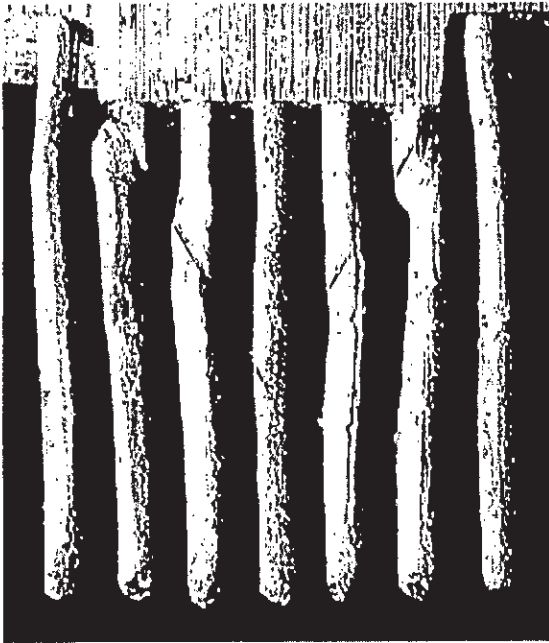


Abb.1: Verformte Säulengruppe mit langen Säulen, Versuch TS17 (Hu 1995)

Alle 16 Versuche mit Säulen unter einem starrem Fundament wurden verschiebungsgesteuert mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,061 \text{ mm/min}$ durchgeführt. Im Vergleich zu den Einzelsäulenversuchen von Witt (1978) mit einer Geschwindigkeit von $v = 0,5 \text{ mm/min}$ und einer Versuchsdauer von nur 40 min, spielt bei der hier gewählten achtfach kleineren Geschwindigkeit die Konsolidierung vermutlich eine nicht zu vernachlässigende Rolle und somit dürfte sich die Steifigkeit des Tons mit der Versuchszeit vergrößern. Die Bedeutung der Belastungsgeschwindigkeit auf die Kräfte und Setzungen bei Pfählen wurde von Krieg et al. (1998) verdeutlicht.

Das Hauptergebnis von Hu (1995) bezüglich der Verformungen unter dem Fundament ist, daß ein Bodenkeil vertikal nach unten verschoben wird, und zwar in Verbindung mit Ausbauchen oder Abscheren der Säulen, Abb.1. Ein Abscheren wurde am Fundamentrand in der Nähe der Geländeoberkante und ein Ausbauchen in der Mitte des Fundaments in größerer Tiefe beobachtet. Die Säulen außerhalb des Fundaments zeigten lediglich eine leichte Biegung.

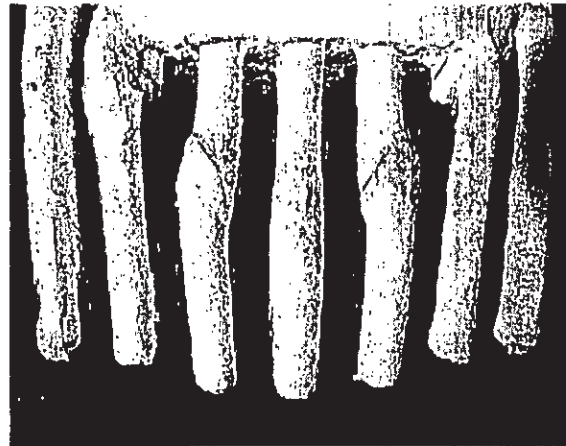


Abb.2: Verformte Säulengruppe mit kurzen Säulen, Versuch TS08 (Hu 1995)

Der Verformungsmechanismus wird signifikant von der Säulenlänge l im Verhältnis zum Fundamentdurchmesser D beeinflusst. Wenn die $l \leq D$ ist, überträgt der Säulenfuß einen großen Anteil der Kraft in den darunterliegenden Ton, wodurch die Säule merklich in den Ton eindringt, Abb.2. Wenn aber die Säulenlänge größer ist als ca. $1,5D$, ist das Eindringen der Säulen in den Ton ohne Bedeutung.

Dieser Mechanismus konnte von Wehr (1999a) durch Berechnungen bestätigt werden. Außerdem wurden Scherfugen im Ton nachgewiesen, die in den Versuchen, bedingt durch ihre geringe Dicke, nicht beobachtet werden konnten.

2.2 flexibles Fundament

Zusätzlich wurde ein Versuch mit einem flexiblen Fundament durchgeführt, Hu (1995). Die Belastung wurde mittels eines unter Druck stehenden Zylinders, dessen Unterseite aus einer Gummimembran bestand, aufgebracht. Der Säuleneinbau erfolgte wie unter dem starren Fundament, jedoch wurde hier auf die Säulen noch eine 4 mm dicke Sandschicht zur Lastverteilung aufgebracht.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit einem starren Fundament wurde dieser Versuch lastgesteuert gefahren. Nach einer Erhöhung der Auflast von $p = 120 \text{ kPa}$ auf $p = 140 \text{ kPa}$ und 8 Tagen Belastungszeit verformte sich der Boden innerhalb weniger Sekunden schnell, und der Versuch mußte abgebrochen werden.

In Abb.3 sieht man, daß sich die Säulen unsymmetrisch verformt haben. Es ist kein eindeutiger Scherfugenkeil unter dem Fundament zu erkennen. Ob dieser bei langsamen Verformungen aufgetreten wäre, soll durch die folgenden Berechnungen geklärt werden.

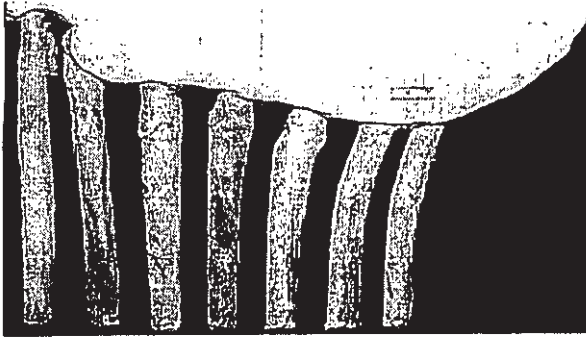


Abb.3: Verformte Säulengruppe unter flexiblem Fundament (Hu 1995)

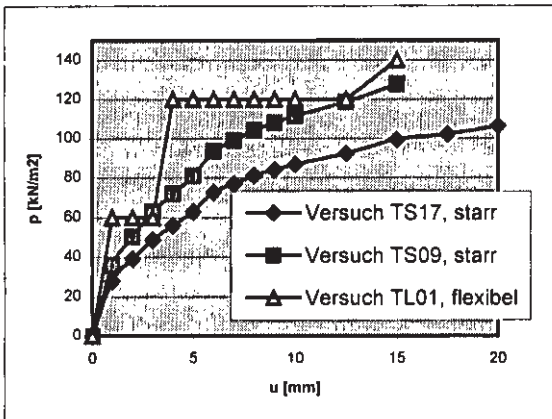


Abb.4: Last-Verschiebungskurven unter starrem und flexiblem Fundament (nach Hu 1995)

In Abb. 4 sind die Last-Verschiebungskurven von verschiedenen Versuchen mit starren und einem flexiblen Fundament dargestellt.

Der in Abb.1 und 4 dargestellte Versuch TS17 (starr) mit $c_u=14\text{kPa}$, Säulendurchmesser $d_s=11\text{mm}$ und Säulenlänge $l_s=160\text{mm}$ unterscheidet sich von Versuch TS09 (starr) durch einen größeren Säulendurchmesser $d_s=17,5\text{mm}$. Dadurch können, wie in Abb.4 ersichtlich, etwas höhere Lasten aufgenommen werden.

Versuch TL01 (flexibel) entspricht Versuch TS09 (starr) bis auf ein höheres $c_u=18\text{kPa}$, wodurch wiederum mehr Last aufgenommen werden kann, Abb. 4. Die sehr groß gewählten Lastsprünge bei diesem Versuch führten letztendlich zum Versagen, was sich beinahe schon optisch vermuten läßt.

3 ELASTO-PLASTISCHES STOFFGESETZ

Das verwendete elasto-plastische Stoffgesetz innerhalb eines Cosserat-Kontinuums berücksichtigt eine isotrope Verfestigung und eine Entfestigung des Bodens. Es wurde von Mühlhaus (1987) vorgeschlagen und von Tejchman (1989,1997), Tejchman/Wu (1993) und Wehr(1999) detailliert beschrieben. Unterschiede zu einem herkömmlichen Kontinuum im Rahmen der Plastizitätstheo-

rie sind zusätzliche Rotationen (Cosserat-Rotationen) und Momentenspannungen, die nur in Scherfugen auftreten. Der mittlere Korndurchmesser wird dabei als charakteristische Länge benutzt.

Zwölf Materialparameter werden benötigt um einen Boden zu charakterisieren:

- Kohäsion c ,
- Reibungswinkel am Peak φ_p und im kritischen Zustand φ_c ,
- Dilatanzwinkel $\beta = \beta_1 (\sin \varphi - \sin \varphi_c)$
- E-modul E und die Poissonzahl ν
- Scherdehnungen am Peak γ_p und am Anfang der Scherung γ_0 ,
- mittlerer Korndurchmesser d_{50}
- Cosserat-Konstanten a_1 bis a_3

	c	φ_p	φ_c	β_1
	[kPa]	[Grad]	[Grad]	[--]
Sand	0	37	35	3
Ton	14	0	0	0
	E	ν	γ_p	γ_0
	[MPa]	[--]	[--]	[--]
Sand	15	0,3	0,05	0,03
Ton	1,4	0,45	0,05	0,03
	d_{50}	a_1	a_2	a_3
	[mm]	[--]	[--]	[--]
Sand	0,32	0,375	0,125	1,00
Ton	0,002	0,375	0,125	0,25

Tabelle 1: Parameter des elasto-plastischen Stoffgesetzes (Loch Aline Sand, Speswhite Ton)

In Tabelle 1 werden die Parameter des elasto-plastischen Stoffgesetzes für die zwei in den Berechnungen verwendeten Materialien zusammengefaßt. Die Parameter von Loch Aline Sand wurden ähnlich gewählt wie bei Karlsruher Sand (Wehr 1999a). Änderungen ergaben sich wegen der lockereren Lagerung nur bei dem Reibungswinkel am Peak und beim E-modul in Anlehnung an Werte von Tejchman (1997). Die Parameter für Speswhite Kaolinton wurden aus den Materialkennwerten für Versuch TS17 von Hu (1995) abgeschätzt. Von Bedeutung sind vor allem die Kohäsion, die aus Flügelsondierungen ermittelt wurde und der E-Modul, der mit Hilfe einer Grafik von Ladd et al. (1977) zu $E/c_u \sim 100$ ermittelt wurde. Eingangsgrößen sind die undrained Kohäsion, die Höhe der Scherspannungen und der Vorbelastung, die Fließgrenze und die Plastizitätszahl des Tons.

Die Cosserat-Konstanten wurden gegenüber der Veröffentlichung von Wehr (1999a) nicht verändert. Ihr Einfluß wurde von Tejchman/Wu (1993) gezeigt.

4 BERECHNUNGEN

Das Ziel der nächsten Abschnitte ist aufzuzeigen, daß die Verformungsmechanismen eines Bodens mit Säulen unter einem starren und einem flexiblen Fundament unterschiedlich sind. Um beide vergleichen zu können, wurden bei dem flexiblen Fundament die Dimensionen und die Bodenparameter des starren Fundaments verwendet.

Unter Ausnutzung der Symmetrie des Systems wurden nur 3,5 von 22 Säulen modelliert.

4.1 starres Fundament

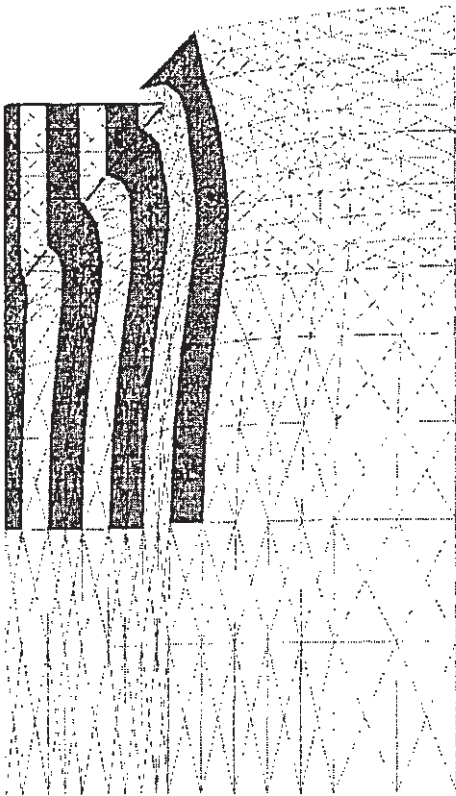


Abb.5: Verformte Säulengruppe unter starrem Fundament, oberer Teil, $u=20\text{mm}$, Ton (weiß) und Säule (grau)

In Abb.5 ist der obere Teil der verformten Säulengruppe unter dem starren Fundament nach einer Verschiebung von $u=20\text{mm}$ dargestellt. Wenn diese Ergebnisse mit denjenigen in Abb.1 verglichen werden, sieht man bei beiden einen Bodenkeil unter dem Fundament, der nahezu keine Verformungen zeigt. Der Rand dieses Keils besteht aus einer Scherzone, die teilweise in den Sandsäulen und teilweise im Ton verläuft. Sie hat bei den Versuchen und den Berechnungen die gleiche Neigung. Verschiedene Säulenverformungen können in der Zentrumssäule, die ausbaucht, und in der Mittel- und Randsäule, die abscheren,

beobachtet werden. Dieses entspricht den Beobachtungen von Hu 1995 in den Modellversuchen.

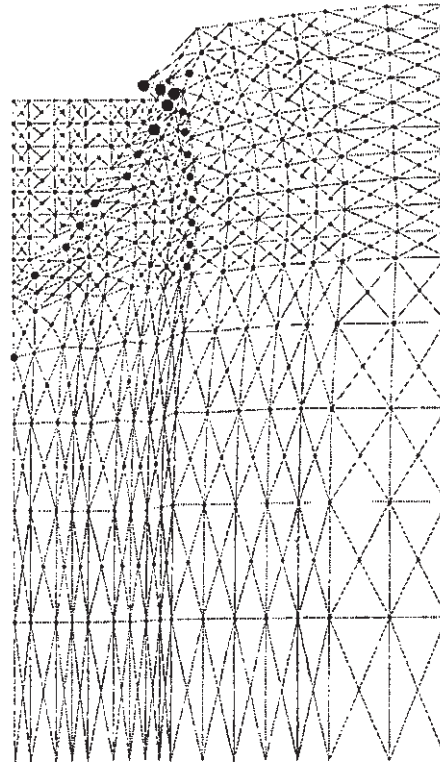


Abb.6: Verformte Säulengruppe unter starrem Fundament, oberer Teil, $u=20\text{mm}$, Cosserat Rotationen: kleiner Kreis $\omega_c = 0.0$, großer Kreis $\omega_c = 3.4$

Die berechnete Scherzonenbreite des Keils in Abb.6 erstreckt sich über eine Breite von $d_s = 4\text{mm}$ ($10d_{50}$). Eine Scherzone im Ton, die bei den Modellversuchen nicht beobachtet werden konnte, zeigt Abb.6 nahe der Randsäule. Bemerkenswert ist, daß sich diese Scherzone nur bis in eine bestimmte Tiefe reicht, die von der Bewegung der Säule relativ zum Ton abhängig ist.

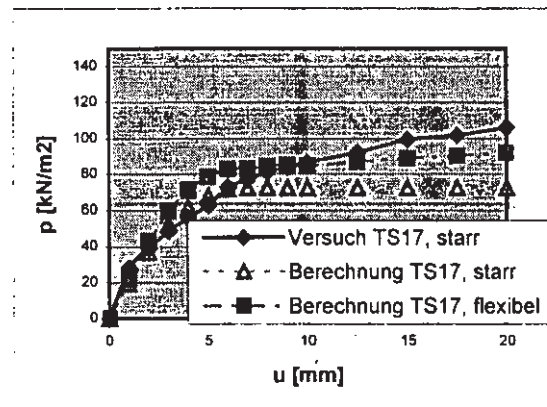


Abb.7: Last-Verschiebungskurven mit starrer und flexibler Fundamentplatte

Abbildung 7 zeigt die Last-Verschiebungskurven des Versuchs TS17 und der Nachrechnung für eine starre Fundamentplatte. Bis zu einer Verschiebung von ca. 6 mm stimmen beide hinreichend überein, jedoch bei größeren Verformungen kommt es zu einem merklichen Einfluss der Konsolidierung des Tons, welche z.B. durch eine Anpassung des Steifemoduls über die Verformung erreicht werden könnte.

4.2 flexibles Fundament

Die vorgegebenen Verschiebungen werden hier so gewählt, dass sie im kennzeichnenden Punkt gleich groß sind und bei $u=10\text{mm}$ in Fundamentmitte maximal $S_{\text{flex}} = S_{\text{starr}} / 0,75$ betragen. Der Ausgangszustand für das flexible Fundament ist eine horizontale Fläche, welche sich mit zunehmender Verschiebung immer mehr durchbiegt.

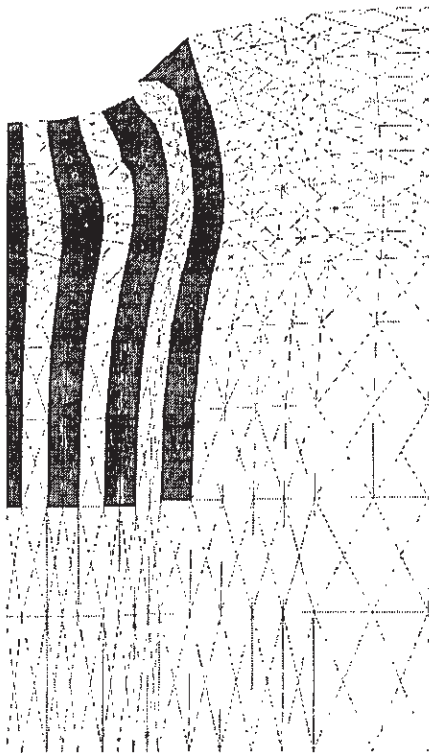


Abb.8: Verformte Säulengruppe unter flexiblem Fundament, oberer Teil, $u=20\text{mm}$, Ton (weiß) und Säule (grau)

In Abb.8 ist der obere Teil der verformten Säulengruppe unter dem flexiblen Fundament nach einer Verschiebung von $u=20\text{mm}$ dargestellt. Man erkennt im Gegensatz zu Abb. 5 keinen Scherzonenkeil und abgescherten Säulen, sondern ein merkliches Ausbauchen aller Säulen.

Die Form der Scherzonen für ein flexibles Fundament in Abb.9 ist anders als bei einem starren Fundament in Abb.6. Zuerst bildet sich eine breite vertikale Scherzone im Ton unter dem Funda-

mentrand. Dann entstehen mehrere etwa keilförmige und parallele Scherzonen. Die erste bildet sich ausgehend vom Fundamentrand im Ton, schneidet eine Sandsäule und endet dann im Ton zwischen den Säulen. Die zweite beginnt etwas entfernt vom Fundamentrand in Richtung Mitte im Sand und läuft dann etwa keilförmig, ähnlich wie bei einem starren Fundament. Die dritte ist in Abb. 9 nur ansatzweise zu sehen. Sie beginnt wieder weiter vom Fundamentrand entfernt und läuft bei Verformungen von mehr als 20mm parallel zur vorherigen. Zusammengefasst entstehen also Scherfugenmuster mit etwa parallelen Scherzonen. Es bilden sich umso mehr Scherzonen, je größer die Fundamentdurchbiegung ist.

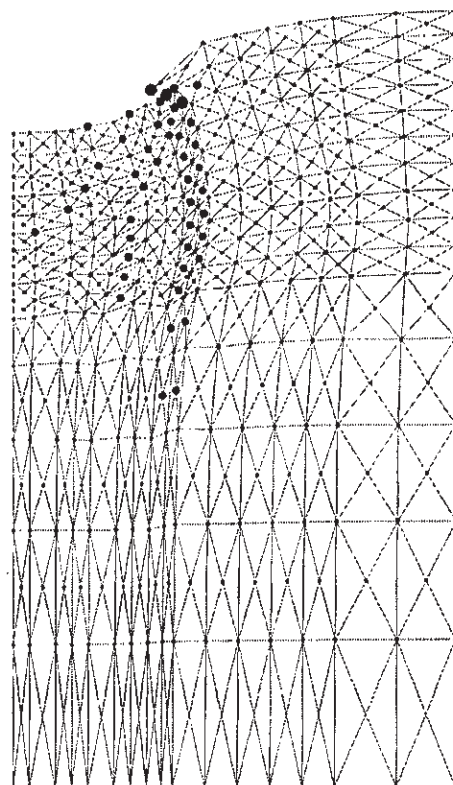


Abb.9: Verformte Säulengruppe unter flexiblem Fundament, oberer Teil, $u=20\text{mm}$, Cosserat Rotationen: kleiner Kreis $\omega_c = 0.0$, großer Kreis $\omega_c = 2.6$

Abbildung 7 zeigt u.a. die berechneten Last-Verschiebungskurven eines flexiblen und eines starren Fundaments. Da außer der Fundamentsteifigkeit kein anderer Parameter geändert wurde, können die Ergebnisse direkt verglichen werden. Die Gesamtlast, die ein flexibles Fundament aufnehmen kann, ist bei allen Verschiebungen höher als diejenige eines starren Fundaments. Das liegt im wesentlichen an der höheren Kraftaufnahme des Tons, welche durch die größere Scherzonenbreiten unter dem Fundamentrand und in einer zusätzlichen Scherzone zwischen zwei Säulen verursacht wird.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Modellversuche zum Deformationsmechanismus von Schottersäulengruppen im Ton haben gezeigt, daß sich die Verformungen einer Schottersäulengruppe unter einem starren und einem flexiblen Fundament unterscheiden. Durch plötzliche große Verformungen beim Versuch mit dem flexiblen Fundament konnten jedoch keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden.

Eine Nachrechnung der Modellversuche wurde mit FEM und einem elasto-plastischen Stoffgesetz durchgeführt. Durch die Berücksichtigung des mittleren Korndurchmessers wird die Scherzonendicke, welche einen entscheidenden Einfluß auf die Ergebnisse hat, reproduziert und eine Netzunabhängigkeit der Lösung erreicht.

Wie auch bei den Modellversuchen mit einem starren Fundament wurde bei der Nachrechnung ein Verformungsmechanismus mit einem Scherzonenkeil direkt unter dem Fundament beobachtet. Die Ränder des Keils bilden Flächen, welche die Säulen schneiden.

Bei einem flexiblen Fundament ergab sich dagegen ein Ausbauchen aller Schottersäulen im oberen Teil ohne daß es zu einem Abscheren der Säulen kam. Die Cosserat Rotationen zeigen mehrere etwa parallele Scherzonen, die ein Scherzonenmuster ergeben. Je größer die Fundamentflexibilität, desto mehr Scherzonen treten auf.

Die aufbringbare Last ist bei einem flexiblen Fundament größer als bei einem starren, wenn man die Verschiebungen im kennzeichnenden Punkt gleich groß wählt. Es wird daher empfohlen, Fundamente auf Schottersäulen nur so steif wie nötig auszubilden, so dass die zulässigen Differenzsetzungen gerade eben nicht überschritten werden.

LITERATUR

Hammad, W. (1991): *Modelisation non lineaire et etude experimentale des bandes de cisaillement dans les sables*. PhD. Thesis, Universite de Grenoble, IMG, Labo 3S

Hassan, A.H. (1995): *Etude experimentale et numerique du comportement local et global d'une interface sol granulaire-structure*. PhD. Thesis, Universite de Grenoble, IMG, Labo 3S

Hu, W. (1995): *Physical modelling of group behaviour of stone column foundations*. PhD thesis, University of Glasgow

Krieg S., Goldscheider M. (1988): *Bodenviskosität und ihr Einfluß auf das Tragverhalten von Pfählen*. Bautechnik, Heft 10, 806-820

Ladd C.C., Foott R., Ishihara K., Schlosser F., Poulos H.G. (1977) *Stress-deformation and strength characteristics*. State of the art report. Proceedings of the 9th. Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, 2, 421-494

Mühlhaus H.B. (1987): *Berücksichtigung der Inhomogenitäten im Gebirge im Rahmen einer Kontinuumstheorie*. Veröff. des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 106.

Tejchman J. (1989): *Scherzonenbildung und Verspannungseffekte in Granulaten unter Berücksichtigung von Korndrehungen*. Veröff. des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 117.

Tejchman J. (1997): *Modelling of shear localisation and autogeneous dynamic effects in granular bodies*. Veröff. des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 140.

Tejchman J. (1998): *Numerical modelling of shear localisation with a polar hypoplastic approach*. 4th Int. Workshop on Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Gifu, Japan, 323-332

Tejchman J., Wu W. (1993): *Numerical study on patterning of shear bands in a Cosserat continuum*. Acta Mechanica, Springer Verlag, Vol.99, 61-74

Tejchman J., Herle I., Wehr W. (1999): *FE-studies on the influence of initial void ratio, pressure level and mean grain diameter on shear localisation*. Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 23, 2045-2074

Wehr, W. (1999): *Granulatumhülle Anker und Nägel --Sandanker--*. Veröff. des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 146.

Wehr, W. (1999a): *Schottersäulen; Das Verhalten von einzelnen Säulen und Säulengruppen*. Geotechnik, Heft 1/1999, S. 40-47

Witt, K.J. (1978): *Versagensmechanismus einzeln belasteter Schottersäulen im bindigen Untergrund bei plötzlicher Belastung*. Vertiefungsarbeit am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe

Wood D.M., Hu. W. (1997): *Mechanisms of load transfer deduced from failure modes of model stone column foundations*. Int. Symposium on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, 5-7.Oct. 1997, Nagoya, Japan, 799-804.