

FE-Prognose der Setzung von Flachgründungen auf Sand unter zyklischer Belastung

Dieser Beitrag thematisiert die FE-Prognose der Setzungen zyklisch belasteter Flachgründungen auf Sand. Zunächst wird die Nachrechnung eines Zentrifugenmodellversuches aus der Literatur präsentiert. Anschließend werden einige Parameterstudien vorgestellt. Der Einfluss der Zustandsgrößen des Bodens (Lagerungsdichte, Seitendruckbeiwert, zyklische Vorbelastung), der Fundamentbelastung (mittlere Last, Lastamplitude) und der Fundamentgeometrie (Abmessungen, Einbindetiefe, Form) auf die bleibenden Setzungen wird diskutiert. Die Ergebnisse der FE-Berechnungen werden mit Modellversuchen in der Literatur verglichen.

FE prediction of the settlement of shallow foundations on sand under cyclic loading. *This paper deals with the FE prediction of settlements of shallow foundations under cyclic loading. First the recalculation of a centrifuge model test from the literature is presented. After that several parametric studies are shown. The influence of the state variables of the soil (density, lateral earth pressure coefficient, cyclic preloading), of the loading (average load, load amplitude) and the geometry of the foundation (dimensions, embedding, shape) is discussed. The results of the FE calculations are compared with model tests in the literature.*

1 Einführung

Werden über eine Flachgründung zyklische Lasten in den Baugrund eingeleitet, kommt es zu einer mit der Zyklanzahl zunehmenden bleibenden Setzung. Von Bauwerkssetzungen infolge zyklischer Belastung und hieraus resultierenden Schäden bzw. Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit wurde in der Literatur mehrfach berichtet [1],[2],[3],[4]. Eine Vorab-Prognose (engl.: class A prediction) der Setzungen unter zyklischer Belastung ist erstrebenswert.

In der Literatur wurden vielfach einfache, Setzungsgesetze $s(N, \dots)$ auf der Basis von klein-

maßstäblichen 1g-Modellversuchen [5],[6],[7] oder Zentrifugenmodellversuchen [8] vorgeschlagen. Beispiele für die Setzungsentwicklung in 1g-Modellversuchen an einem kreisförmigen Einzel Fundament bzw. einem Streifenfundament zeigen die Bilder 1 und 2. Eine ausführliche Zusammenfassung von Modellversuchen in der Literatur findet sich in [9]. Die Anwendung der Setzungsgesetze ist auf einfache Gründungsgeometrien und bestimmte Randbedingungen (z.B. Einbindetiefe $t = 0$ oder eine bestimmte Lagerungsdichte) beschränkt. Zudem sind die Setzungsgesetze in den meisten Fällen inkonsistent formuliert [10]. Auch Ingenieurmodelle zur Abschätzung der Fundamentsetzungen mit Hilfe von zyklischen Laborversuchen wurden in der Literatur vorgeschlagen [11],[12],[13].

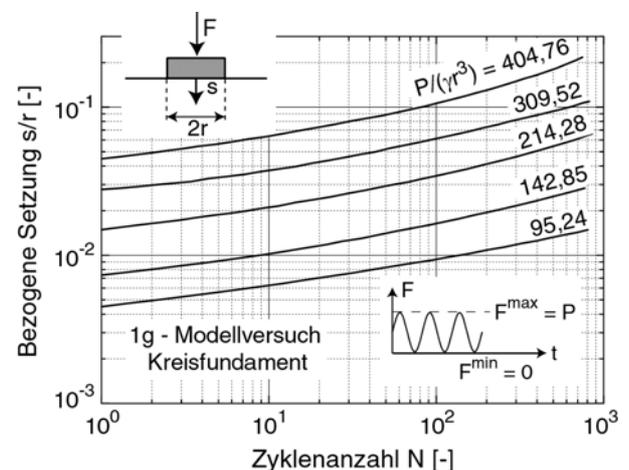


Bild 1. Entwicklung der Setzung eines kreisrunden Fundamentes unter zyklischer Belastung nach [6]
Fig. 1. Settlement of a circular footing under cyclic loading after [6]

Für komplexere Randwertprobleme ist die Anwendung numerischer Methoden (z.B. der Finite Elemente Methode) unerlässlich. Die Anwendung der sog. impliziten Methode, bei der jeder Zyklus mit einem σ - ϵ -Stoffmodell und vielen Dehnungsincrementen berechnet wird, ist auf-

grund der Akkumulation numerischer Fehler und des Rechenaufwandes auf wenige Zyklen ($N < 50$) beschränkt. Für *hochzyklische* Belastungen (Zyklusanzahl $N > 10^3$) ist generell die sog. *explizite* Methode besser geeignet, bei der die Akkumulation der Verformungen unter zyklischer Belastung analog zum Problem des Kriechens unter konstanten Lasten behandelt wird. Explizite Modelle sind den viskoplastischen Modellen ähnlich, wobei die Zyklusanzahl N an die Stelle der Zeit t tritt. FE-Simulationen hochzyklisch belasteter Gründungen wurden bisher jedoch mangels geeigneter expliziter Modelle kaum durchgeführt [14],[15],[16].

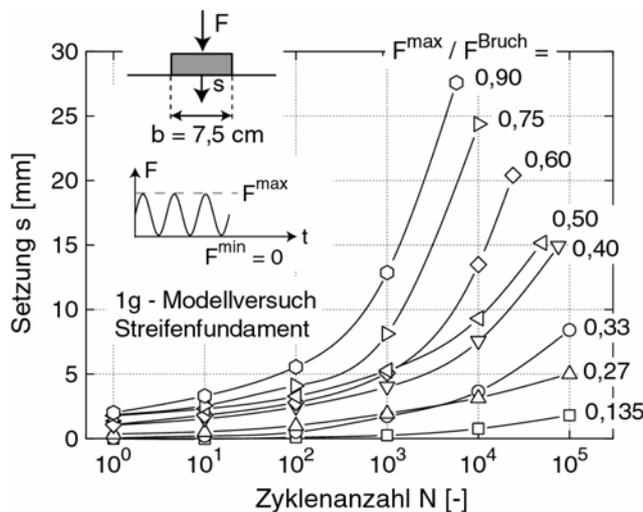


Bild 2. Entwicklung der Setzung eines Streifenfundamentes unter zyklischer Belastung nach [7]

Fig. 2. Settlement of a strip foundation under cyclic loading after [7]

Die im folgenden präsentierten FE-Ergebnisse wurden unter Verwendung des kürzlich in Bochum entwickelten expliziten Akkumulationsmodells (Abschnitt 2, [15],[16]) erhalten. Dieser Beitrag beschäftigt sich ausschließlich mit *Flachgründungen* unter zyklischer Belastung. Im Abschnitt 3 wird die Nachrechnung eines Zentrifugenmodellversuches von Helm et al. [17] (Streifenfundament unter zyklischer Belastung) präsentiert. Anschließend wurden mit demselben Satz von Materialkonstanten Parameterstudien durchgeführt, deren Ergebnisse im Abschnitt 4 vorgestellt werden. Der Einfluss der Zustandsgrößen des Bodens (Lagerungsdichte, Seitendruckbeiwert, zyklische Vorbelastung), der Fundamentbelastung (mittlere Last, Lastamplitude) sowie der Fundamentgeometrie (Abmessungen, Einbindetiefe, Form) auf die Setzungsakkumulation wird diskutiert. Die FE-

Setzungsprognosen werden mit den Ergebnissen von Modellversuchen in der Literatur verglichen.

2 Rechenablauf, Akkumulationsmodell und Implementierung

Das Bild 3 zeigt den Ablauf einer expliziten FE-Berechnung der Setzungen unter zyklischer Belastung. Zunächst werden zwei Zyklen mit einem σ - ϵ -Stoffmodell und Dehnungszinkrementen berechnet. Hierzu wurde das hypoplastische Stoffmodell [18],[19] in der Version nach von Wolffersdorff [20] mit der Erweiterung um die intergranulare Dehnung nach Niemunis & Herle [21] verwendet. Im *zweiten* Zyklus wird die Dehnungsschleife in jedem Integrationspunkt aufgezeichnet, aus der anschließend die Dehnungsamplitude ϵ^{ampl} ermittelt wird [22],[15]. Der erste, sog. irreguläre Zyklus ist hierfür aufgrund der größeren Deformationen nicht geeignet. Die Akkumulation infolge der weiteren Zyklen wird direkt mit Hilfe der konstitutiven Gleichung des Akkumulationsmodells

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{E} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{\text{acc}} - \mathbf{D}^{\text{pl}}) \quad (1)$$

berechnet. Darin ist $\dot{\mathbf{T}}$ die Jaumann'sche Spannungsrate (Rate = pro Zyklus), \mathbf{E} eine spannungsabhängige elastische Steifigkeit, \mathbf{D} die Dehnungsrate, \mathbf{D}^{acc} die vorgegebene Akkumulationsrate und \mathbf{D}^{pl} die Rate der plastischen Dehnung [15].

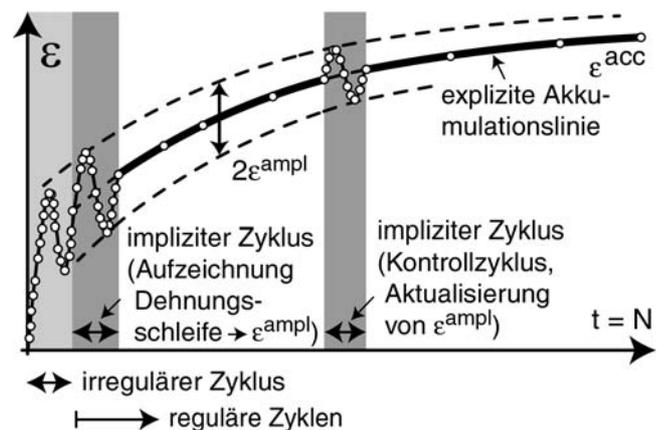


Bild 3. Ablauf einer FE-Berechnung mit einem expliziten Akkumulationsmodell

Figure 3. Procedure of an FE calculation with an explicit accumulation model

Die Akkumulationsrate \mathbf{D}^{acc} setzt sich aus der Akkumulationsrichtung \mathbf{m} (Einheitstensor) und

der skalaren Intensität der Akkumulation D^{acc} zusammen:

$$\mathbf{D}^{\text{acc}} = D^{\text{acc}} \mathbf{m} = f_{\text{ampl}} \dot{f}_N f_p f_Y f_e f_\pi \mathbf{m} \quad (2)$$

In Abhängigkeit vom mittleren Spannungszustand führt eine zyklische Belastung zu einer Volumenänderung des Materials (i.d.R. Verdichtung, z.T. aber auch Auflockerung) und zu bleibenden Scherverformungen [16]. Dies wird durch die „zyklische Fließrichtung“ \mathbf{m} beschrieben, welche im Bild 4 schematisch in der p - q -Ebene dargestellt ist. Für \mathbf{m} wurde die Fließrichtung des modifizierten Cam-Clay-Modells verwendet [16].

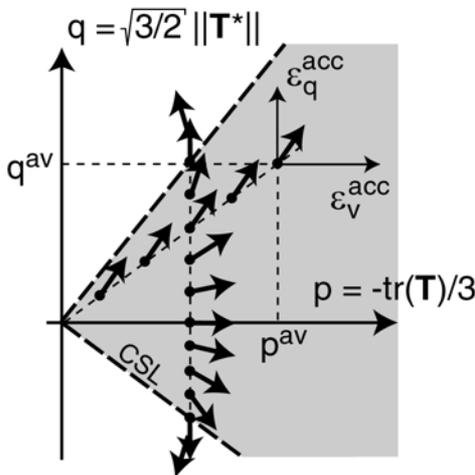


Bild 4. Schematische Darstellung der Akkumulationsrichtung \mathbf{m} in der p - q -Ebene

Fig. 4. Scheme of the direction of accumulation \mathbf{m} in the p - q -plane

Für die Akkumulationsintensität D^{acc} wird ein multiplikativer Ansatz (Gleichung (2)) mit sechs skalaren Funktionen gewählt. Diese berücksichtigen den Einfluss der Dehnungsamplitude $\varepsilon^{\text{ampl}}$ (Funktion f_{ampl}), der Zyklenanzahl N bzw. der zyklischen Vorbelastung (Funktion \dot{f}_N), des mittleren Druckes p^{av} (Funktion f_p), des mittleren Spannungsverhältnisses $\eta^{\text{av}} = q^{\text{av}}/p^{\text{av}}$ (Funktion f_Y) sowie der Porenzahl e (Funktion f_e). Der Effekt von Veränderungen der zyklischen Scherrichtung wird durch die Funktion f_π beschrieben. Die mathematische Formulierung dieser Funktionen ist [15],[16],[9] zu entnehmen. Das Bild 5 zeigt eine graphische Darstellung der Funktionen für den Konstantensatz eines Mittelbis Grobsandes. Da im folgenden Randwertprobleme ohne eine Änderung der zyklischen Scherrichtung betrachtet werden, gilt $f_\pi \approx 1$. Weiterhin ist die Amplitude der zyklischen Fundamentbelastung in

den Rechnungen konstant. Für wechselnde Amplituden (Zykluspakete) wurde eine spezielle Zustandsvariable g^A eingeführt [15],[16], welche die Anzahl der Zyklen in der Vergangenheit mit ihrer Amplitude wichtet.

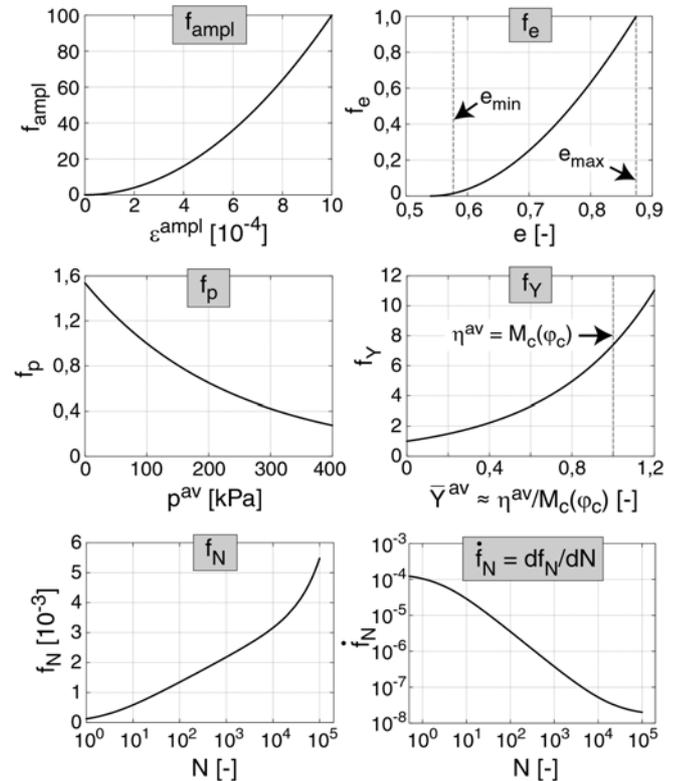


Bild 5. Graphische Darstellung der Funktionen des Akkumulationsmodells

Fig. 5. Illustration of the functions of the accumulation model

Das Akkumulationsmodell wurde vom zweiten Autor dieses Beitrags in Form der Subroutine UMAT für benutzerdefinierte Materialien in das FE-Programm ABAQUS implementiert. Die UMAT unterscheidet drei Operationsmoden:

1. Impliziter Modus:

Die Programmkontrolle wird an eine Subroutine weitergeleitet, in der das hypoplastische Stoffmodell mit der Erweiterung um die intergranulare Dehnung implementiert ist. Dieser Modus wird zur Berechnung des Anfangsgleichgewichtes und der irregulären Zyklen verwendet.

2. Aufzeichnungsmodus:

Auch im Aufzeichnungsmodus wird die Subroutine mit dem hypoplastischen Stoffmodell aufgerufen. Allerdings werden während der Berechnung charakteristische durchlaufene

Dehnungszustände nach ausgewählten Kriterien (Änderung der Richtung des Dehnungspfades um einen bestimmten Mindestwinkel β_{\min} , Mindestabstand r_{\min} zum letzten aufgezeichneten Punkt) abgespeichert, um daraus zu Beginn des Pseudo-Kriechmodus die Dehnungsamplitude $\varepsilon^{\text{ampl}}$ zu ermitteln. Dieser Modus wird für die Berechnung des zweiten (d.h. des ersten regulären) Zyklus und für Kontrollzyklen verwendet.

3. *Pseudo-Kriechmodus:*

In diesem Modus erfolgt die explizite Berechnung der Akkumulation nach den Gleichungen (1) und (2). Vor dem ersten Inkrement in diesem Modus ist die Dehnungsamplitude $\varepsilon^{\text{ampl}}$ zu ermitteln. Die Pseudo-Kriechrate \mathbf{D}^{acc} wird nach Gleichung (2) berechnet, mit Gleichung (1) in

die Spannungsrate $\dot{\mathbf{T}}$ umgewandelt und während der Gleichgewichtsiteration räumlich verteilt.

Durch die in der Eingabedatei spezifizierte Schrittnummer identifiziert die Routine, welcher Modus im jeweiligen Schritt zu verwenden ist. Die Zuordnung von Berechnungsschritten und Programmmoden wird im Bild 6 beispielhaft für die Berechnung eines zyklisch belasteten Fundamentes gezeigt.

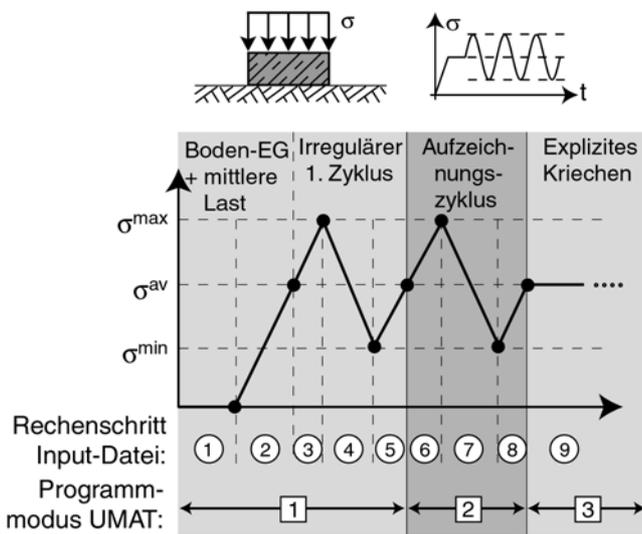


Bild 6. Zuordnung von Rechenschritten und Programmmoden am Beispiel einer zyklisch belasteten Flachgründung
 Fig. 6. Correlation of calculation steps and program modes for the example of a shallow foundation under cyclic loading

3 FE-Nachrechnung eines Zentrifugenmodellversuches von Helm et al.

Im Zentrifugenmodellversuch von Helm et al. [17] wurde die Setzung eines Streifenfundamentes unter zyklischer Belastung gemessen. Der Versuch wurde mit einem enggestuften Feinsand (mittlerer Korndurchmesser $d_{50} = 0,21$ mm, Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10} = 2,0$, Korndichte $\rho_s = 2,66$ g/cm³) durchgeführt. Für die FE-Nachrechnung des Modellversuches waren die Materialkonstanten des Sandes für die verwendeten Stoffmodelle zu bestimmen.

Die Konstanten des hypoplastischen Stoffmodells wurden für diesen Feinsand zunächst nach [23] (Schüttkegelversuche, Ödometerversuche, dränierte Triaxialversuche) bestimmt. Die FE-Berechnungen wurden mit einer modifizierten Version des hypoplastischen Stoffmodells mit einer realistischeren, erhöhten Schubsteifigkeit im Bereich isotroper Spannungszustände (Einführung einer Querkontraktionszahl ν , [22]) durchgeführt. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Materialkonstanten nach [23] ist auf diese Version nicht ohne weiteres übertragbar, so dass die Konstanten h_s und n anhand der Ergebnisse der dränierten Triaxialversuche an die modifizierte Materialformulierung angepasst werden mussten. Die hypoplastischen Materialkonstanten fasst die Tabelle 1 zusammen.

φ_c [°]	h_s [MPa]	n [-]	e_{d0} [-]	e_{c0} [-]	e_{i0} [-]	α [-]	β [-]	ν [-]
32,8	150	0,40	0,575	0,908	1,044	0,12	1,0	0,2

Tabelle 1. Materialkonstanten des hypoplastischen Stoffmodells für den Feinsand
 Table 1. Material constants of the hypoplastic model for the fine sand

Die Materialkonstanten der intergranularen Dehnung wurden abweichend von [21] aus einer Anpassung an die in zyklischen Triaxialversuchen am Feinsand gemessenen Dehnungsamplituden bestimmt [9]. Die Konstanten m_R und m_T mussten leicht korrigiert werden, um die im Zentrifugenmodellversuch gemessene Setzungsamplitude zu reproduzieren [9]. Tabelle 2 gibt den Konstantensatz für die intergranulare Dehnung wieder.

R	m _R	m _T	χ	β _R
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10 ⁻⁴	5,5	2,0	6,0	0,2

Tabelle 2. Materialkonstanten der intergranularen Dehnung für den Feinsand

Table 2. Material constants of the intergranular strain for the fine sand

In [24] wurde gezeigt, dass die Geschwindigkeit der Akkumulation von Verformungen unter zyklischer Belastung stark von der Kornverteilungskurve abhängt. Feinkörnige Böden lassen sich durch eine zyklische Belastung leichter verdichten als grobkörnige. Weiterhin steigt die Akkumulationsrate signifikant mit der Ungleichförmigkeitszahl $U = d_{60}/d_{10}$. Für die Setzungsprognose können daher (anders als noch in [16] angenommen) nicht die Konstanten des in [16] getesteten Mittel- bis Grobsandes verwendet werden. Die Konstanten des Bochumer Akkumulationsmodells wurden in zyklischen Triaxialversuchen am Feinsand bestimmt. Hierbei wurde die Spannungsabhängigkeit (Konstanten C_p und C_Y der Funktionen f_p und f_Y) aus [16] übernommen. Die Konstanten C_e , C_{N1} , C_{N2} und C_{N3} der Funktionen f_e und f_N konnten aus sechs Versuchen mit unterschiedlichen Spannungsamplituden und Anfangslagerungsdichten gewonnen werden [9]. Den ermittelten Konstantensatz fasst Tabelle 3 zusammen.

C _{N1}	C _{N2}	C _{N3}	C _p	C _Y	C _e	e _{ref}
[10 ⁻³]	[-]	[10 ⁻⁵]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,1	0,38	5,3	0,43	2,0	0,51	0,908

Tabelle 3. Materialkonstanten des Bochumer Akkumulationsmodells für den Feinsand

Table 3. Material constants of the Bochum accumulation model for the fine sand

Der Zentrifugenmodellversuch wurde mit folgenden Rand- und Anfangsbedingungen nachgerechnet (Bild 7):

1. Streifenfundament, daher Rechnung als ebenes Problem (ebener Dehnungszustand)
2. Abmessungen des Randwertproblems aus der Geometrie des Versuchsbehälters: Breite 18,1 m, Höhe 7,3 m (Prototyp), diskretisiert wurde unter Ausnutzung der Symmetrie nur eine Hälfte (9,05 m x 7,3 m, Bild 7)
3. Fundamentgeometrie: Breite $b = 1,0$ m, Höhe $h = 0,6$ m

4. Einbindetiefe $t = 0$
5. Material des Fundamentes: Aluminium mit $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$, $E = 25.000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,3$
6. Reibungsbeiwert in der Kontaktfuge Fundament - Boden: $\mu = \tan(2/3\varphi_p) = \tan(2/3 * 38^\circ) = 0,47$
7. Mittlere Fundamentbelastung $\sigma^{av} = 89 \text{ kPa}$, Amplitude $\sigma^{ampl} = 75 \text{ kPa}$
8. frisch gerieselter Sand, d.h. keine zyklische Vorbelastung ($g_0^A = 0$)
9. Anfangslagerungsdichte $I_{D0} = 0,9$ unabhängig von der Tiefe
10. Seitendruckbeiwert $K_0 = 1 - \sin(\varphi_p) = 1 - \sin(38^\circ) = 0,38$
11. Anfangswert der intergranularen Dehnung wird durch die Verformung während des Rieselvorgangs diktiert
12. Annahme einer vertikalen Anfangspolarisation [15]

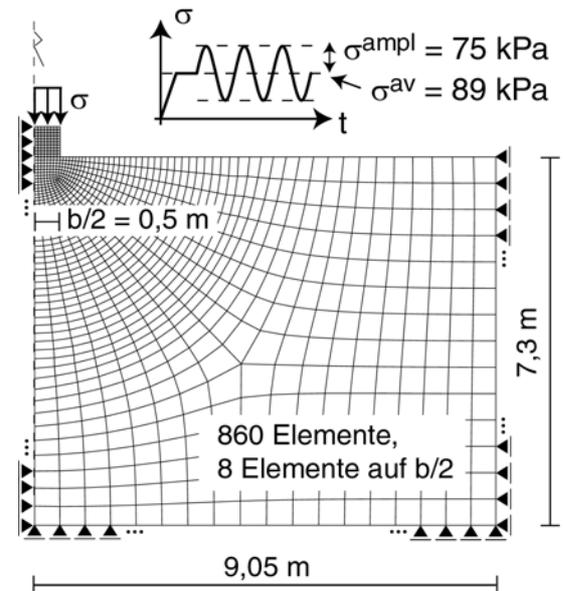


Bild 7. FE-Diskretisierung

Fig. 7. FE discretisation

Die FE-Diskretisierung mit CPE4-Elementen ist im Bild 7 dargestellt. Die Verwendung der vierknotigen Elemente mit linearen Ansatzfunktionen und voller Integration erscheint für das betrachtete Randwertproblem vor dem Hintergrund von Vergleichsstudien mit höherwertigen Elementen [9] ausreichend. Weitere technische Fragestellungen (z.B. Kontrollzyklen, Aufzeichnungskriterien β_{min} , r_{min} , Netzfeinheit) werden ebenfalls in [9] diskutiert.

Das Bild 8 zeigt die gute Übereinstimmung der Setzungsverläufe $s(N)$ des Zentrifugenmodellversuches und der FE-Nachrechnung. Das implizite (hypoplastische) Modell prognostizierte am Ende des irregulären Zyklus eine leicht größere Setzung ($s = 2,8$ cm) als die im Modellversuch gemessene ($s = 2,4$ cm). Die Setzungsamplitude in der Nachrechnung betrug $s^{\text{ampl}} = 0,86$ mm und war damit etwas größer als der experimentell ermittelte Wert ($s^{\text{ampl}} \approx 0,8$ mm). Die berechnete, nach 10^5 Zyklen verbleibende Setzung ($s = 6,8$ cm) lag leicht unterhalb der Endsetzung im Modellversuch ($s = 7,3$ cm).

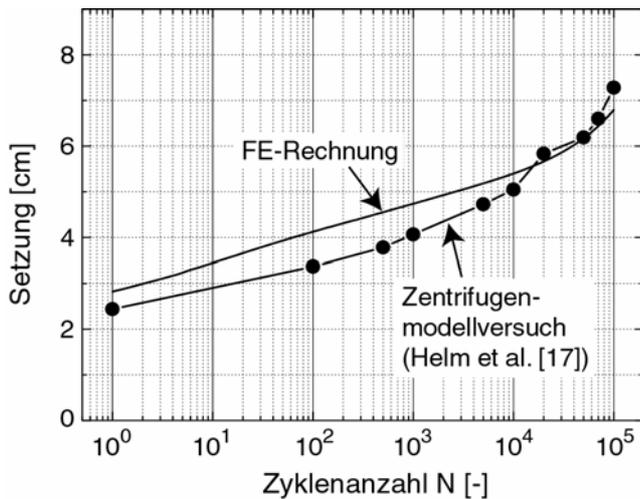


Bild 8. Vergleich der Setzungsverläufe $s(N)$ des Modellversuches und der FE-Nachrechnung
 Fig. 8. Comparison of the settlement curves $s(N)$ in the centrifuge model test and in the FE calculation

4 Parameterstudien

4.1 Einfluss der Zustandsgrößen des Bodens

4.1.1 Einfluss der Anfangslagerungsdichte

In fünf Rechnungen wurde die Anfangslagerungsdichte im Bereich $0,5 \leq I_{D0} \leq 0,9$ variiert. Entsprechend reduzierten sich auch die Wichte des Bodens und damit die vertikalen Anfangsspannungen. Der Seitendruckbeiwert wurde hier mit $K_0 = 0,38$ konstant gehalten (und nicht entsprechend $K_0 = 1 - \sin(\varphi_p)$ variiert), um allein den Einfluss der Lagerungsdichte zu studieren. Dem Bild 9 ist erwartungsgemäß die Zunahme der Setzungen im ersten Zyklus und der Setzungsakkumulation während der weiteren Zyklen mit abnehmender Anfangslagerungsdichte zu entnehmen. Letzteres ist zum einen auf die Porenzahlabhängigkeit der Verdichtungsrate (\rightarrow Zunahme der Funktion f_e des Akkumulationsmodells mit steigender Porenzahl e), zum anderen

aber auch auf die mit fallendem I_{D0} ansteigenden Dehnungs- bzw. Setzungsamplituden (Bild 9, \rightarrow größeres f_{ampl}) zurückzuführen.

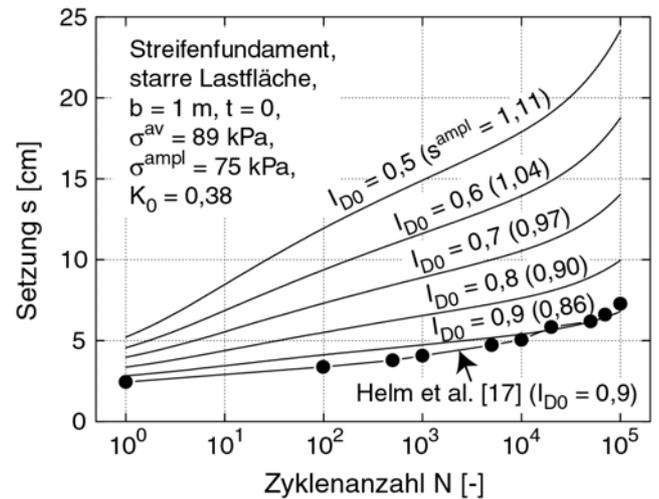


Bild 9. Einfluss der Anfangslagerungsdichte I_{D0} auf die Setzungsakkumulation
 Fig 9. Influence of the initial density I_{D0} on the accumulation of settlements

4.1.2 Einfluss des Seitendruckbeiwertes

In fünf Rechnungen wurden Seitendruckbeiwerte $0,2 \leq K_0 \leq 1,0$ getestet. Das Bild 10 zeigt die Abnahme der statischen Setzungen und der Setzungsrate während der zyklischen Belastung mit zunehmendem K_0 . Dies ist bei gleichbleibenden vertikalen Spannungen aus Bodeneigengewicht zum einen auf die Zunahme des mittleren Druckes p (\rightarrow kleineres f_p), zum anderen auf die Reduktion der Deviatorspannung q und damit des Spannungsverhältnisses $\eta = q/p$ (\rightarrow kleineres f_y) zurückzuführen. Auch die kleineren Setzungs- bzw. Dehnungsamplituden bei größeren Seitendruckbeiwerten K_0 (\rightarrow kleineres f_{ampl}) spielen hierbei eine Rolle. Allerdings steigt mit abnehmendem Spannungsverhältnis η auch der volumetrische Anteil der Akkumulationsrate (Rate der Verdichtung $\dot{\epsilon}$) und die Rate der Scherverformung nimmt ab. Setzt man die Gültigkeit der Jaky-Formel $K_0 = 1 - \sin(\varphi_p)$ voraus, so führt die Abnahme des Reibungswinkels φ_p mit abnehmendem I_D und der damit verbundenen Zunahme von K_0 zu einer Reduktion der Akkumulationsrate. Dies wirkt der Zunahme der Setzungsakkumulation mit abnehmender Anfangslagerungsdichte (Bild 9) moderat entgegen.

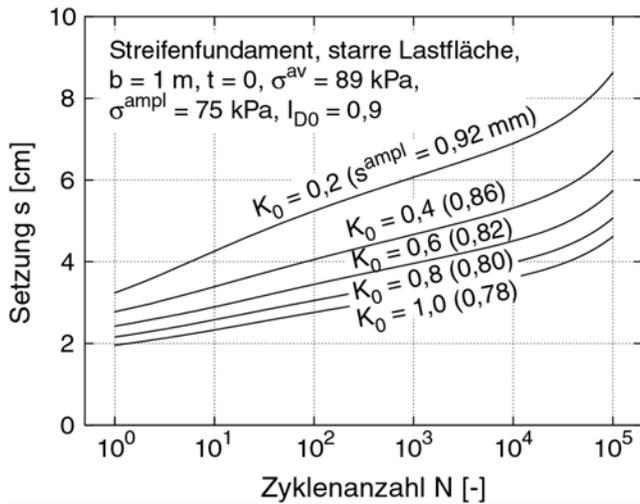


Bild 10. Einfluss des Seitendruckbeiwertes K_0 auf die Setzungsakkumulation

Fig 10. Influence of the lateral earth pressure coefficient K_0 on the accumulation of settlements

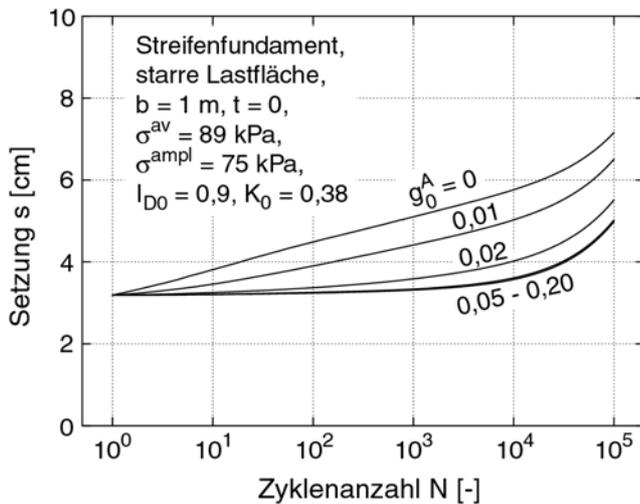


Bild 11. Einfluss der zyklischen Vorbelastung g_0^A auf die Setzungsakkumulation

Fig. 11. Influence of cyclic preloading g_0^A on the accumulation of settlements

4.1.3 Einfluss der zyklischen Vorbelastung

Das Bild 11 macht deutlich, dass der Anfangswert der zyklischen Vorbelastung g_0^A den Setzungsverlauf signifikant beeinflusst. Bei hohen Anfangswerten von g_0^A wird der von der zyklischen Vorbelastung abhängige Anteil der Funktion \dot{f}_N^A (Anteil \dot{f}_N^A nach [15],[16]) vernachlässigbar klein und der von N unabhängige Anteil (Grundrate \dot{f}_N^B nach [15],[16]) dominiert. Die Setzung s steigt dann na-

hezu linear mit N , in der halblogarithmischen Darstellung (Bild 11) ergeben sich gekrümmte Kurven.

4.2 Einfluss der Belastung

Das Bild 12 präsentiert Berechnungen, in denen die Fundamentbelastung analog zu den Modellversuchen in den Bildern 1 und 2 zwischen $\sigma^{\min} = 0$ und unterschiedlichen Maximalwerten σ^{\max} variiert wurde. Die Zunahme der Setzung nach dem ersten Zyklus, der Setzungsamplitude s^{ampl} und der Setzungsrate in den weiteren Zyklen mit steigenden Werten von σ^{\max} ist aus Bild 12a offensichtlich.

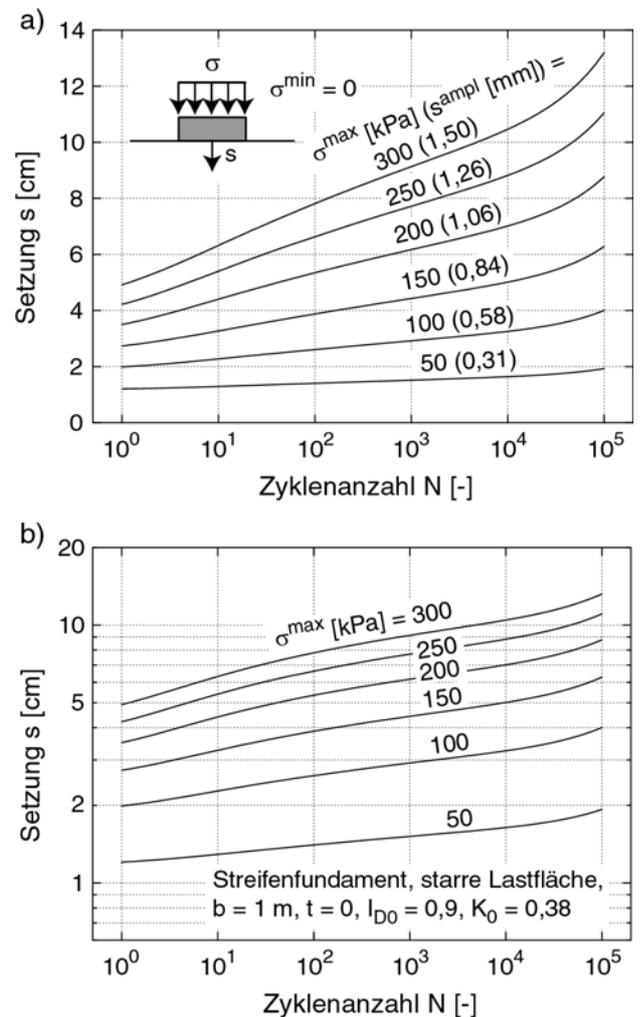


Bild 12. Setzungsverläufe für Belastungen mit $\sigma^{\min} = 0$ und unterschiedlichen Werten von σ^{\max} : Darstellung mit a) halb- und b) doppeltlogarithmischem Maßstab

Fig. 12. Settlement curves for a cyclic loading with $\sigma^{\min} = 0$ and different values of σ^{\max} : illustration with a) semi- and b) double-logarithmic scale

Der Verlauf der Kurven $s(N)$ im Bild 12a unterscheidet sich von den in Bild 2 dargestellten Setzungsverläufen. Allerdings wurde in [24] gezeigt, dass abhängig von der Kornverteilungskurve unterschiedliche Verläufe der bleibenden Dehnung mit der Zyklenanzahl zu beobachten sind. Die Unterschiede der Setzungsverläufe in den Bildern 2 und 12a könnten daher sowohl auf Defizite der kleinmaßstäblichen 1g-Modelltechnik als auch auf den verwendeten Sand zurückzuführen sein. Das Bild 12b bestätigt (zumindest näherungsweise) die von Hettler beobachtete Parallelität der Verläufe $s(N)$ im doppeltlogarithmischen Maßstab (vergleiche Bild 1).

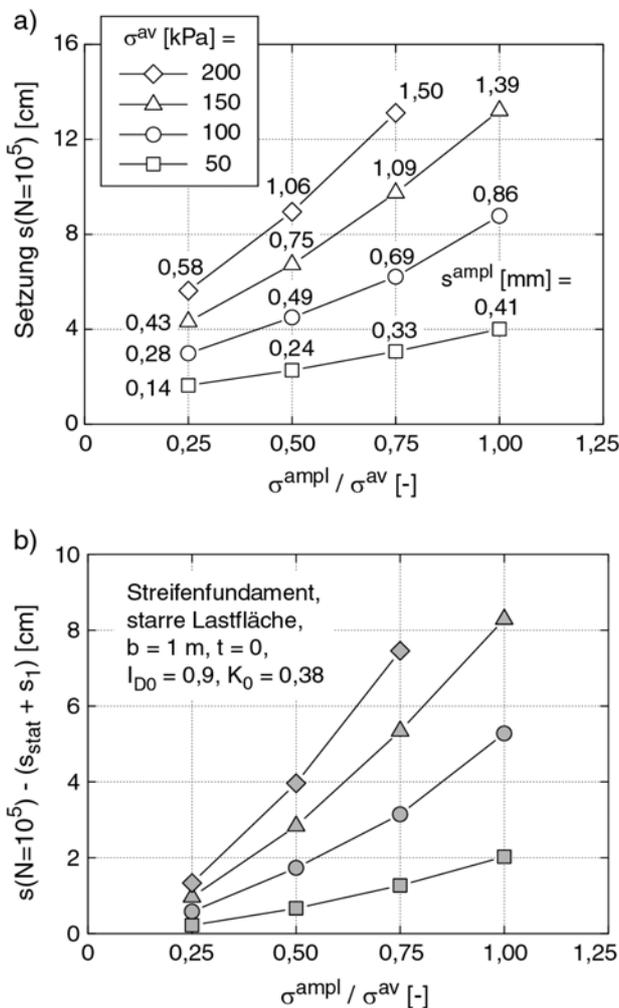


Bild 13. Setzungen für zyklische Belastungen mit unterschiedlichen Mittelwerten σ^{av} und Amplitudenverhältnissen $\sigma^{ampl} / \sigma^{av}$: a) gesamte Setzung zum Zeitpunkt $N = 10^5$, b) akkumulierte Setzung während der regulären Zyklen

Fig. 13. Settlements for a cyclic loading with different average values σ^{av} and amplitude ratios $\sigma^{ampl} / \sigma^{av}$: a) total settlement at $N = 10^5$, b) accumulated settlement during the regular cycles

Das Bild 13 zeigt FE-Berechnungen mit unterschiedlichen Mittelwerten $50 \text{ kPa} \leq \sigma^{av} \leq 200 \text{ kPa}$ und Amplitudenverhältnissen $0,25 \leq \sigma^{ampl} / \sigma^{av} \leq 1,0$. Im Bild 13a ist die gesamte bleibende Setzung nach 10^5 Zyklen dargestellt, Bild 13b zeigt die Setzungen während der regulären Zyklen ($N \geq 1$). Die bereits von Holzlöhner [5] beschriebene und aus den Versuchen von Laue [8] ableitbare quadratische Zunahme der Setzungsakkumulation mit dem Amplitudenverhältnis $\sigma^{ampl} / \sigma^{av}$ für $\sigma^{av} = \text{konstant}$ wird durch Bild 13 bestätigt. Dies ist vor allem auf die nahezu lineare Zunahme der Dehnungsamplituden (vgl. s^{ampl}) mit σ^{ampl} und die quadratische Amplitudenabhängigkeit der Akkumulationsrate (\rightarrow Funktion f_{ampl}) zurückzuführen.

Weiterhin zeigt das Bild 13, dass die Akkumulationsrate bei einem konstanten Amplitudenverhältnis $\sigma^{ampl} / \sigma^{av}$ mit der mittleren Belastung σ^{av} steigt. Auch dies stimmt mit den Beobachtungen in [5] und [8] überein. Zu begründen ist dies mit größeren Dehnungsamplituden (vgl. $s^{ampl} \rightarrow$ größeres f_{ampl}) und größeren Spannungsverhältnissen $\eta = q/p$ (\rightarrow größeres γ_V , aber auch kleinere volumetrische Komponente von \mathbf{m}). Dem wirkt die Zunahme des mittleren Druckes (\rightarrow kleineres f_p) entgegen.

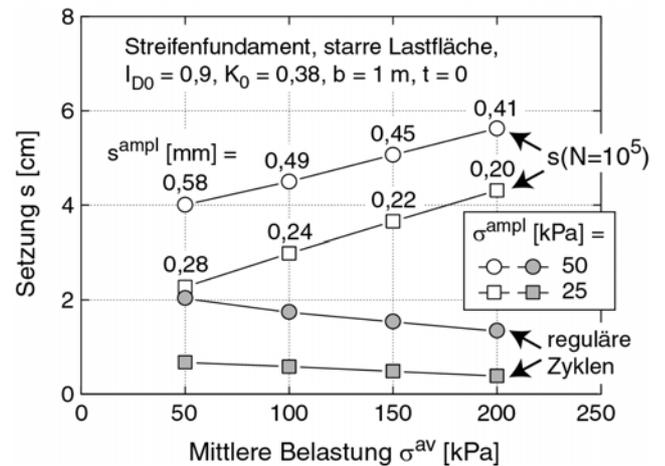


Bild 14. Setzungen für zyklische Belastungen mit unterschiedlichen Mittelwerten σ^{av} und Amplituden $\sigma^{ampl} = \text{konstant}$

Fig. 14. Settlements for a cyclic loading with different average values σ^{av} and amplitudes $\sigma^{ampl} = \text{konstant}$

Im Bild 14 werden Berechnungen mit identischer Amplitude σ^{ampl} (und nicht $\sigma^{ampl} / \sigma^{av} = \text{konstant}$) bei unterschiedlichen mittleren Belastungen $50 \text{ kPa} \leq \sigma^{av} \leq 200 \text{ kPa}$ miteinander ver-

glichen. Für $\sigma^{ampl} = \text{konstant}$ steigt die nach 10^5 Zyklen verbleibende Setzung mit σ^{av} , was jedoch auf die größeren Verformungen während der monotonen Belastung bis zur Maximallast zurückzuführen ist. Die Rate der Setzungsakkumulation während der regulären Zyklen nimmt infolge einer Reduktion der Dehnungsamplitude aufgrund der Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit (Bild 14, vgl. $s^{ampl} \rightarrow \text{kleineres } f_{ampl}$) mit σ^{av} ab.

4.3 Einfluss der Fundamentgeometrie

4.3.1 Einfluss der Einbindetiefe

Das Bild 15 präsentiert FE-Ergebnisse für Streifenfundamente mit unterschiedlichen Einbindetiefen $0 \text{ m} \leq t \leq 4 \text{ m}$. Der Boden wurde in diesen Berechnungen bis zu einer Tiefe von 15 m unterhalb der Oberfläche diskretisiert, um eine Beeinflussung der Setzungen durch einen zu geringen Abstand zwischen Fundamentsohle und unterem Modellrand bei den größeren Einbindetiefen zu vermeiden.

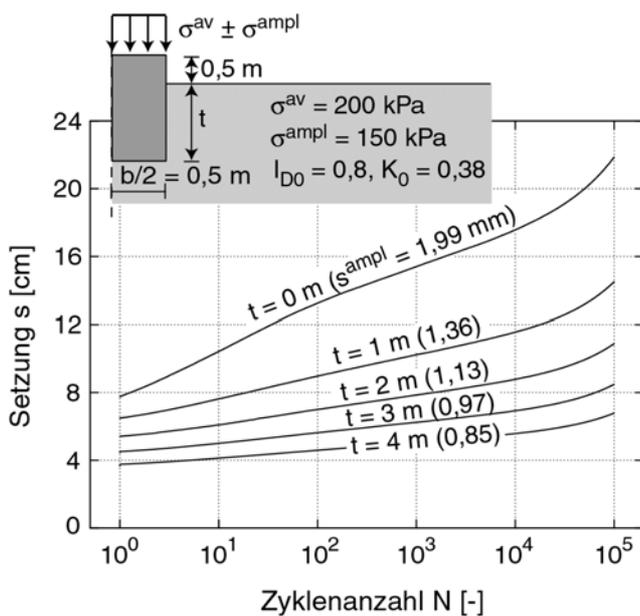


Bild 15. Einfluss der Einbindetiefe t des Streifenfundamentes bei $\sigma^{av} = \text{konstant}$ und $\sigma^{ampl} = \text{konstant}$
 Fig. 15. Influence of the depth of embedding t of the strip foundation for $\sigma^{av} = \text{constant}$ and $\sigma^{ampl} = \text{constant}$

Bei einer identischen Belastung ($\sigma^{av} = 200 \text{ kPa}$, $\sigma^{ampl} = 150 \text{ kPa}$) nehmen die Setzung nach dem ersten Zyklus sowie die Setzungsamplitude s^{ampl} mit zunehmender Einbindetiefe ab. Aufgrund der kleineren Dehnungsamplituden (vgl. $s^{ampl} \rightarrow \text{kleineres } f_{ampl}$) und der höheren Spannungen im

Boden unterhalb der Fundamentsohle aufgrund des Eigengewichtes des Fundamentes und des Bodens neben dem Fundament (\rightarrow kleineres f_p) verläuft die Setzungsakkumulation mit zunehmender Einbindetiefe langsamer (Bild 15).

In den Rechnungen im Bild 16 wurde das Verhältnis der Sohlflächenbelastung (inklusive Fundamenteigengewicht) $\sigma^{EG} + \sigma^{av}$ zur Grundbruchspannung σ^{Bruch} sowie das Amplitudenverhältnis $\sigma^{ampl} / (\sigma^{EG} + \sigma^{av})$ konstant gehalten. Für σ^{Bruch} wurden Rechenwerte entsprechend DIN 4017 angesetzt (siehe Tabelle 4). Unter dieser Belastung verläuft die Setzungsakkumulation mit zunehmender Einbindetiefe etwas schneller (Bild 15), da der Effekt der größeren Dehnungsamplituden (vgl. $s^{ampl} \rightarrow \text{größeres } f_{ampl}$) und des größeren Spannungsverhältnisses $\eta = q/p$ (aufgrund der Zunahme von $\sigma^{av} \rightarrow \text{größeres } f_Y$, aber kleinere volumetrische Komponente von \mathbf{m}) gegenüber dem Effekt des höheren mittleren Druckes (\rightarrow kleineres f_p) überwiegt. Die Setzungen nach dem ersten Zyklus steigen aufgrund der Zunahme von $\sigma^{max} = \sigma^{av} + \sigma^{ampl}$ ohnehin mit t (Bild 16). Die von Laue [8] berichtete Abnahme der Setzungsakkumulation mit der Einbindetiefe bei konstanten Werten von $\sigma^{av} / \sigma^{Bruch}$ und $\sigma^{ampl} / \sigma^{av}$ wird durch die FE-Simulationen nicht gestützt.

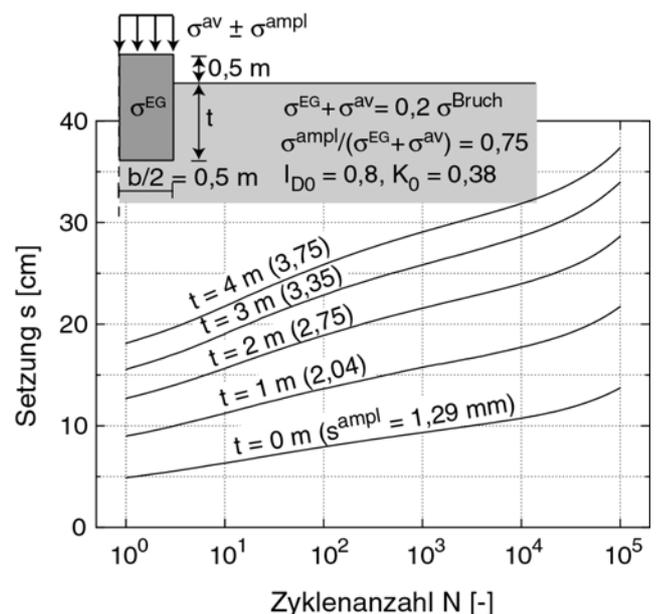


Bild 16. Einfluss der Einbindetiefe t des Streifenfundamentes bei $(\sigma^{EG} + \sigma^{av}) / \sigma^{Bruch} = \text{konstant}$ und $\sigma^{ampl} / (\sigma^{EG} + \sigma^{av}) = \text{konstant}$
 Fig. 16. Influence of the depth of embedding t of the strip foundation for $(\sigma^{EG} + \sigma^{av}) / \sigma^{Bruch} = \text{constant}$ and $\sigma^{ampl} / (\sigma^{EG} + \sigma^{av}) = \text{constant}$

t [m]	0	1	2	3	4
σ^{Bruch} [kPa]	625	1442	2258	3075	3891

Tabelle 4. Rechnerische Grundbruchspannungen für unterschiedliche Einbindetiefen t nach DIN 4017
 Table 4. Computed bearing capacities for different depths of embedding t according to DIN 4017

4.3.2 Einfluss der Fundamentbreite

Den Einfluss der Fundamentbreite bei einer identischen Sohlfächenspannung macht das Bild 17 deutlich. Die Fundamentbreite wurde in den FE-Berechnungen im Bereich $1 \text{ m} \leq b \leq 4 \text{ m}$ variiert.

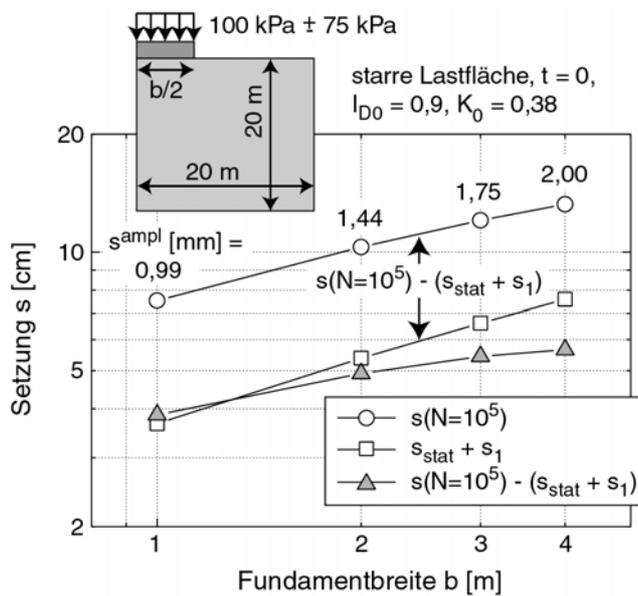


Bild 17. Einfluss der Breite b des Streifenfundamentes bei identischen Sohlsparnungen
 Fig. 17. Influence of the width b of the strip foundation for identical base pressures

Bei einer identischen Belastung $\sigma^{\text{av}} \pm \sigma^{\text{ampl}}$ steigt sowohl die Setzung am Ende des ersten Zyklus als auch die Setzungsamplitude s^{ampl} und die Setzungsrate während der weiteren Zyklen mit zunehmender Fundamentbreite b . Die Beobachtungen von Raymond & El Komos [7] einer Abnahme der Setzungsakkumulation mit steigender Fundamentbreite bei gleichen Sohlsparnungen konnten demnach erwartungsgemäß nicht bestätigt werden. In einer doppeltlogarithmischen Darstellung der Setzungen über der Fundamentbreite (Bild 17) erhält man für die Setzung am Ende des ersten Zyklus $s_{\text{stat}} + s_1$ und (näherungsweise) für die Endsetzung $s(N=10^5)$ Geraden, d.h. es gilt $s \sim b^n$. Für $s_{\text{stat}} + s_1$ ergibt sich der Exponent zu $n = 0,53$, was gut mit Beobachtungen

$s \sim \sqrt{b}$ in der Literatur [25],[26] übereinstimmt. Für $s(N=10^5)$ wurde ein geringerer Exponent $n = 0,41$ erhalten, da die Setzungsrate während der regulären Zyklen weniger stark mit der Fundamentbreite zunimmt als die Setzung $s_{\text{stat}} + s_1$ (Bild 17).

Dem Bild 17 ist zu entnehmen, dass die Verdoppelung der Setzungsamplitude s^{ampl} infolge einer Erhöhung der Fundamentbreite b von 1 m auf 4 m nicht zu einer Vervierfachung (quadratische Funktion f_{ampl}) der akkumulierten Setzung führt. Dies ist mit der Verteilung der Dehnungsamplitude ϵ^{ampl} im Halbraum zu erklären. Die Dehnungsamplituden direkt unterhalb des Fundamentes sind für $b = 1 \text{ m}$ und $b = 4 \text{ m}$ in etwa identisch. ϵ^{ampl} klingt jedoch aufgrund der größeren Tiefenwirkung der Belastung mit zunehmender Fundamentbreite langsamer mit der Tiefe ab. Dies führt zwar zu größeren Setzungsamplituden, wirkt sich aber aufgrund von $\dot{\epsilon}^{\text{acc}} \sim (\epsilon^{\text{ampl}})^2$ (Funktion f_{ampl}) weniger stark auf die Akkumulationsrate aus. Statische Fundamentbelastungen weisen im Hinblick auf die resultierenden Setzungen eine größere Reichweite auf als zyklische Belastungen, wie bereits von Niemunis et al. [27] gezeigt wurde.

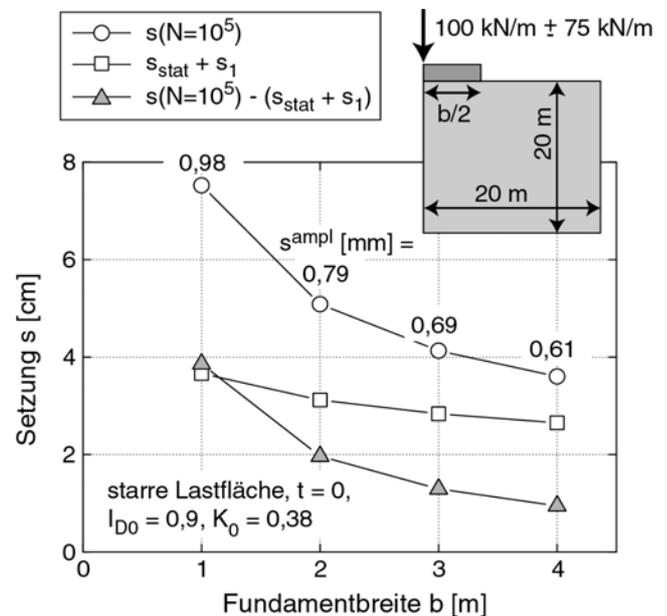


Bild 18. Einfluss der Breite b des Streifenfundamentes bei einer konstanten Streckenlast
 Fig. 18. Influence of the width b of the strip foundation for a constant uniform load

Soll eine Streckenlast bestimmter Größe mit einem statischen (F^{av}) und einem zyklischen

Anteil (F^{ampl}) über das Streifenfundament abgetragen werden (Bild 18), reduziert eine Verbreiterung des Fundamentes die Setzungen infolge der zyklischen Belastung wesentlich effektiver als die statischen Setzungen. Die Setzungen während der regulären Zyklen klingen mit der Breite b wesentlich schneller ab als die Setzungen aus der statischen Belastung (Bild 18). Zwar ist bei den größeren Fundamentbreiten die mittlere Sohlspannung geringer (\rightarrow größeres f_p), die gleichzeitige Abnahme der Dehnungsamplituden infolge der kleineren Spannungsamplituden wirkt sich jedoch aufgrund der quadratischen Abhängigkeit $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}} \sim (\varepsilon^{\text{ampl}})^2$ wesentlich stärker auf die Setzungsrate aus.

4.3.3 Einfluss der Fundamentform und -geometrie

Neben den bisher diskutierten Streifenfundamenten wurden auch Einzelfundamente mit kreisförmigem und quadratischem Grundriss berechnet. Das Bild 19 zeigt die Setzungsverläufe aus FE-Berechnungen mit einer dreidimensionalen Diskretisierung der Randwertprobleme (Elementtyp C3D8). Die Form des Grundrisses spielt bei gleicher Grundrissfläche eine untergeordnete Rolle. Die leicht kleineren Setzungen des quadratischen Fundamentes (insbesondere während der impliziten Berechnung der ersten beiden Zyklen) erklären sich aus dem größeren Anteil der äußeren Belastung, der bereits im Bereich der Einbindetiefe über Schubspannungen an den Boden abgegeben wird (Abwicklung des Quadrates = $\sqrt{4/\pi} \cdot \text{Umfang des Kreises}$). Hieraus resultieren kleinere Sohlspannungen. Das kreisrunde Fundament kann auch als axialsymmetrisches Problem (Elementtyp CAX4) berechnet werden. Die Unterschiede der Setzungsverläufe der axialsymmetrischen und der 3D-Berechnung (Bild 19) sind vermutlich auf die etwas unterschiedliche Diskretisierung zurückzuführen.

5 Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt FE-Setzungsprognosen für zyklisch belastete Flachgründungen mit einem expliziten Akkumulationsmodell vor. Nach der Nachrechnung eines Zentrifugenmodellversuches werden die Ergebnisse von Parameterstudien präsentiert. Die Tabelle 5 fasst die Auswirkung einzelner Parameter auf die Setzung eines Streifenfundamentes nach dem ersten Zyklus $s_{\text{stat}} + s_1$, die Setzungsamplitude

s^{ampl} , die Setzung während der weiteren, regulären Zyklen $s(N=10^5) - (s_{\text{stat}} + s_1)$ sowie die gesamte bleibende Setzung $s(N=10^5)$ nach 10^5 Lastwechseln zusammen. Der Effekt einer Erhöhung (\uparrow) des jeweiligen Parameters auf die Setzungen bzw. Setzungsamplituden (\uparrow = Erhöhung, \downarrow = Reduktion) wird angegeben.

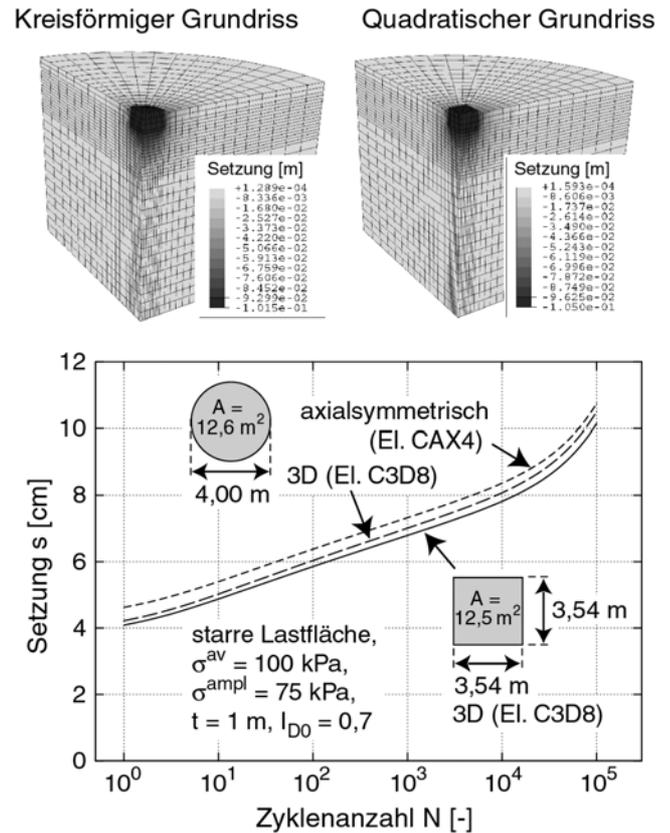


Bild 19. Vergleich der Setzungen von Fundamenten mit kreisförmigem und rechteckigem Grundriss bei gleicher Grundrissfläche

Fig. 19. Comparison of the settlements of circular and quadratic foundations with identical area

Ist eine festgelegte Streckenlast $F^{\text{av}} \pm F^{\text{ampl}}$ über ein Streifenfundament abzutragen, können bei einer vorgegebenen Geometrie (z.B. Typenstatik) die aus der zyklischen Belastung resultierenden Setzungen durch eine maschinelle Vorverdichtung des Bodens reduziert werden. Dies wirkt sich sowohl über die erhöhte Lagerungsdichte I_{D0} als auch über die induzierte zyklische Vorbelastung g_0^A und evtl. über eine Erhöhung des Seitendruckbeiwertes K_0 setzungsreduzierend aus. Ist die Geometrie der Gründung variabel, kann die Einbindetiefe oder die Fundamentbreite vergrößert werden. Eine Verbreiterung der Gründung ist hinsichtlich der Setzungen unter zyklischer Belas-

tung wesentlich effektiver als im Hinblick auf die Setzungen infolge statischer Lasten. Liegt nur der zyklische Anteil der Belastung F^{ampl} fest (z.B. aus einer Wind- oder Wellenbelastung) und ist die Geometrie der aufgehenden Konstruktion zu entwerfen, so ist zu beachten, dass bei $F^{\text{ampl}} = \text{konstant}$ ein höheres Eigengewicht des Bauwerks (größeres F^{av}) zwar zu größeren Setzungen aus der statischen Last führt, die Setzungen während der zyklischen Belastung jedoch langsamer verlaufen.

Bei Einzelfundamenten spielt die Form des Grundrisses bei gleicher Grundrissfläche eine untergeordnete Rolle

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojektes A8 "Einfluss der Strukturveränderung im Boden auf die Lebensdauer von Bauwerken" im Sonderforschungsbereich 398 "Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten". An dieser Stelle wird der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die Finanzierung gedankt.

Literatur

- [1] Sweeney, M., und Lambson, M.D.: Long term settlements of storage tanks on sand. In X. ECSMFE, Florence, 1991, 2, pp. 587-591.
- [2] Heller, H.-J.: Bauwerkssetzungen bei sandigem Untergrund infolge von Erschütterungen durch Bahnverkehr, Baumaschine und Bautechnik 35 (1981), Nr. 2, S. 56-61.
- [3] Heller, H.-J.: Setzungen von Kranbahnstützen infolge von Lastwechseln bei sandigem Untergrund. Bautechnik 72 (1995), S. 11-19.
- [4] von Wolffersdorff, P.-A., und Schwab, R.: Schleuse Uelzen I - Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen, Bautechnik 78 (2001), Nr. 11, S. 771-782.
- [5] Holzlöhner, U.: Bleibende Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last. Bautechnik 55 (1978), S. 150-154.
- [6] Hettler, A.: Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand bei monotoner und zyklischer Belastung. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Boden- und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft Nr. 90, 1981.
- [7] Raymond, G.P., und El Komos, F.: Repeated load testing of a model plane strain footing. Canadian Geotechnical Journal 15 (1978), S. 190-201.

Variierter Parameter	Konstante Parameter	$s_{\text{stat}} + s_1$	s^{ampl}	$s(N=10^5) - (s_{\text{stat}} + s_1)$	$s(N=10^5)$
$I_{D0} \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}, \sigma^{\text{ampl}}, b, t, K_0, g_0^A$	↓	↓	↓	↓
$\sigma_{\text{max}} \uparrow$	$\sigma_{\text{min}} = 0, b, t, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↑	↑	↑	↑
$\sigma^{\text{ampl}}/\sigma^{\text{av}} \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}, b, t, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↑	↑	↑	↑
$\sigma^{\text{av}} \uparrow$	$\sigma^{\text{ampl}}/\sigma^{\text{av}}, b, t, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↑	↑	↑	↑
$\sigma^{\text{av}} \uparrow$	$\sigma^{\text{ampl}}, b, t, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↑	↓	↓	↑
$b \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}, \sigma^{\text{ampl}}, t, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↑	↑	↑	↑
$b \uparrow$	$F^{\text{av}}, F^{\text{ampl}}, t, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↓	↓	↓	↓
$t \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}, \sigma^{\text{ampl}}, b, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↓	↓	↓	↓
$t \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}/\sigma^{\text{Bruch}}, \sigma^{\text{ampl}}/\sigma^{\text{av}}, b, I_{D0}, K_0, g_0^A$	↑	↑	↑	↑
$K_0 \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}, \sigma^{\text{ampl}}, b, t, I_{D0}, g_0^A$	↓	↓	↓	↓
$g_0^A \uparrow$	$\sigma^{\text{av}}, \sigma^{\text{ampl}}, b, t, I_{D0}, K_0$	-	-	↓	↓

Tabelle 5. Zusammenfassung der Ergebnisse der FE-Parameterstudien an Streifenfundamenten unter zyklischer Belastung: Einfluss diverser Parameter auf die Setzungenentwicklung

Table 5. Summary of the results of the FE parametric studies of strip foundations under cyclic loading: Influence of several parameters on the settlements

- [8] Laue, J.: Zur Setzung von Flachfundamenten auf Sand unter wiederholten Lastereignissen. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 25, 1996.
- [9] Wichtmann, T.: Explicit accumulation model for non-cohesive soils under cyclic loading, Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 38, 2005 (eingereicht).
- [10] Niemunis, A., Wichtmann, T.: Zuschrift zum Beitrag "Zyklisch viskoelastisch-viskoplastischer Stoffansatz nichtbindiger Böden und Schotter" von A. Gotschol und H.-G. Kempfert, Bautechnik 82 (2005), Nr. 1, S. 57-59.
- [11] Mallwitz, K., und Holzlöhner, U.: Verfahren zur Ermittlung der Setzung von Fundamenten infolge zyklischer Beanspruchung, Bautechnik 73 (1996), S.175-186.
- [12] Diyaljee, V.A., und Raymond, G.P.: Repetitive load deformation of cohesionless soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 108 (1982), pp. 1215-1229.
- [13] Sawicki, A., Swidzinski, W., und Zadroga, B.: Settlement of shallow foundations due to cyclic vertical force, Soils and Foundations 38 (1998), Nr. 1, pp. 35-43.
- [14] Stöcker, T., Kempfert, H.-G.: Numerische Modellierungen mit einem zyklisch-viskoplastischen Stoffansatz für granulare Böden. Bautechnik 82 (2005), Nr. 1, S. 11-17.
- [15] Niemunis, A., Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th.: A high-cycle accumulation model for sand. Computers and Geotechnics 32 (2005), No. 4, pp. 245-263.
- [16] Wichtmann, T., Niemunis, A., Triantafyllidis, Th.: Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden unter hochzyklischer Belastung. Bautechnik 82 (2005), Nr. 1, S. 18-27.
- [17] Helm, J., Laue, J., und Triantafyllidis, Th.: Untersuchungen an der RUB zur Verformungsentwicklung von Böden unter zyklischen Belastungen. Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse, Bochum, 2000, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 32, S. 201-222.
- [18] Kolymbas, D.: An outline of hypoplasticity. Archive of Applied Mechanics 61 (1991), S. 143-151.
- [19] Gudehus, G.: A comprehensive constitutive equation for granular materials. Soils and Foundations 36 (1996), pp. 1-12.
- [20] von Wolffersdorff, P.-A.: A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface, Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 1 (1996), pp. 251-271.
- [21] Niemunis, A., und Herle, I.: Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials 2 (1997), S. 279-299.
- [22] Niemunis, A.: Extended hypoplastic models for soils. Habilitation, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 34, 2003.
- [23] Herle, I.: Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste. Dissertation, Schriftenreihe des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft Nr. 142, 1997.
- [24] Wichtmann, T., Triantafyllidis, Th.: Einfluss der Kornverteilungskurve auf das dynamische und das kumulative Verhalten nichtbindiger Böden. Bautechnik 82 (2005), Nr. 6, S. 378-386.
- [25] Burland, J.B., Broms, B.B., de Mello, V.F.B. Behaviour of foundations and structures. Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 2, pp. 495-546, 1977.
- [26] Holzlöhner, U.: Settlement of shallow foundations on sand. Soils and Foundations 24 (1984), No. 4, S. 58-70.
- [27] Niemunis, A., Wichtmann, T., Petryna, Y., Triantafyllidis, Th: Stochastic modelling of settlements due to cyclic loading for soil-structure interaction, 9th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSAR 2005, Rom.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Torsten Wichtmann, Dr. Ing. habil. Andrzej Niemunis, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Theodor Triantafyllidis, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum.