



Doctoral Thesis

## **Belastungs- und Verformungsverhalten von geschichteten Bodensystemen unter starren Kreisfundationen**

**Author(s):**

Nater, Philippe

**Publication Date:**

2006

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005166336> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH-Nr.: 16'319

# **Belastungs- und Verformungsverhalten von geschichteten Bodensystemen unter starren Kreisfundationen**

Abhandlung  
zur Erlangung des Titels  
Doktor der technischen Wissenschaften

der  
Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

vorgelegt von  
Philippe Nater  
Dipl. Bauing. ETH  
Geboren am 23. Februar 1973  
von Hugelshofen

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. S.M. Springman  
Prof. Dr. J.-G. Sieffert  
Dr. J. Laue

Zürich, 2005

## Kurzfassung

Jedes erstellte Bauwerk hat eine direkte Anbindung oder Schnittstelle zum Untergrund. Sein Gewicht, die Nutzlast, Einwirkungen auf das Gebäude, wie z.B. Wind oder Temperatur, müssen über eine Foundation in den Untergrund eingeleitet werden. Umgekehrt werden Einwirkungen aus dem Untergrund, wie z.B. Kriechen, Erdbeben und Rutschungen, Temperatureffekte und Wasserdrücke über die Foundation an das Bauwerk weitergegeben.

Eine der Foundationstypen, die als Schnittstelle zwischen Bauwerk und Untergrund dienen, ist die Flachfoundation. Sie ist eine gebräuchliche und billige geotechnische Struktur, die vor allem auf gutem Baugrund, i.d.R. auf grobkörnigen Böden eingesetzt wird. Es kann aber durchaus Sinn machen, Flachfoundationen auch auf bautechnisch problematischem Untergrund, wie z.B. feinkörnigen oder auch geschichteten Böden einzusetzen. Dazu müssen aber die Wirkungsbeziehungen zwischen der Foundation und dem Untergrund bekannt sein und realitätsnah interpretiert und modelliert werden können.

Das geotechnische Verhalten von Flachfoundationen auf homogenen Böden wurde bereits eingehend untersucht. Für die Bestimmung der Bruchlast einer Foundation kann z.B. die Tragfähigkeitsformel nach Terzaghi & Jellinek (1959) angewendet werden. Mit diesem Ansatz können auch Zweischichtsysteme behandelt werden, sofern eine der zwei Bodenschichten in der Tiefe unendlich ausgedehnt ist. Damit ist der Anlass gegeben, das geotechnische Verhalten von Flachfoundationen auch auf geschichteten Böden zu untersuchen, bei denen die Schichtdicken allgemein begrenzt sind.

Das Belastungs- Deformationsverhalten von geschichteten Böden, wie sie für sedimentäre Lockergesteine typisch sind, unterscheidet sich stark von dem homogener Bodensysteme, wie sie in der Natur kaum vorkommen. In dieser Arbeit wird der Einfluss von kleinen Einschlüssen nicht berücksichtigt. Das Augenmerk ist auf die Grobanisotropie gerichtet, die durch die wechselseitige Ablagerung von unterschiedlichen makroskopischen Schichten entsteht. Die zu belastenden Bodenmodelle weisen eine horizontale Schichtung von abwechselnd grob- und feinkörnigen Böden auf (in der Folge Sand und Ton genannt), wie sie auch durch natürliche Ablagerungsprozesse als heterolitische Wechschichtungen (z.B. Turbidite, Überschwemmungsablagerungen u.s.w.) entstehen können. Dabei wird die Annahme getroffen, dass sich der grobkörnige Boden unter der Belastung drainiert und der feinkörnige Boden undrainiert verhält. Die Inhomogenität wird im Verhältnis der Schichtdicken ( $d_{Sand}$ ,  $d_{Ton}$ ) zueinander und zum Fundationsdurchmesser  $D_F$  dargestellt.

Die experimentellen Daten zu dieser Arbeit wurden mit einer geotechnischen Zentrifuge erhoben, welche erlaubte, das Verhalten von Bodenmodellen unter Belastung im kleinen Massstab zu beobachten. Die mechanische Beanspruchung des Baugrundes er-

---

folgte immer durch eine starre und zentrisch belastete Kreisfundation, eine Verdrehung der Fundation wurde nicht zugelassen. Die Deformationsgeschwindigkeit wurde vorgegeben, das heisst, es wurde eine Verschiebung erzeugt und die daraus resultierende Reaktionskraft gemessen. Diese klare Versuchsanordnung liess auch den direkten Vergleich mit einer numerischen Modellierung zu. Die Kombination von physikalischer und numerischer Modellierung bietet jetzt die Möglichkeit, unter bekannten Randbedingungen generierte Ergebnisse gegenseitig zu validieren.

Sowohl die Zentrifugenmodellversuche als auch die numerische Modellierung haben gezeigt, dass die Bruchlast einer Fundation auf einem geschichteten System stark von den geometrischen Randbedingungen, also vom Verhältnis des Fundationsradius  $D_F$  zu den Schichtdicken  $d_{Sand}$  oder  $d_{Ton}$  abhängig ist. Steigt die Dicke der Sandschicht an, so vergrössert sich auch die Bruchlast. Steigt hingegen die Dicke der Tonschicht an, so vermindert sich die Bruchlast.

Auf der Basis der Ergebnisse der Modellierungen konnte ein einfacher analytischer Ansatz entwickelt werden, mit dem sich die Bruchlast gemäss den geometrischen Randbedingungen berechnen lässt. Dabei findet der Lasttransport vertikal durch die Sandschicht statt. Die darunter liegende Tonschicht weicht seitwärts aus, sie extrudiert. Der Ansatz besteht aus der Superposition der Lastanteile aus der Sandschicht und aus der Tonschicht und benötigt sieben Parametern. Es sind dies die geometrischen Grössen  $D_F$ ,  $d_{Sand}$  und  $d_{Ton}$ , das Raumgewicht  $\gamma_{Sand}$  und die Scherfestigkeiten  $c'$  und  $\phi'$  für die Sandschicht und die undrainierte Scherfestigkeit  $s_u$  für die Tonschicht.

Für die Anwendung des analytischen Ansatzes sind die Schichten ( $d_{Sand}$ ,  $d_{Ton}$ ) im Verhältnis zur Fundation ( $D_F$ ) idealerweise dünn. Das heisst, eine dünne Tonschicht wird oberflächennah belastet. Dadurch ergeben sich Randbedingungen, innerhalb derer der analytische Ansatz sinnvolle Ergebnisse liefern kann. Ausserhalb der Randbedingungen bietet sich nach wie vor der Gebrauch der Tragfähigkeitsformel (Terzaghi & Jellinek, 1959) an.

## Abstract

Each building has its direct connection to the subsoil. Its weight, surcharge loads and other influences e.g. wind or temperature have to be transferred to the subsoil by a foundation. Vice versa, influences from the subsoil e.g. due to creep, earthquake loads or other earth movements, temperature effects and water pressure, are transferred to the building by a foundation.

One type of foundation, which serves as a connection between building and subsoil, is the shallow foundation. It is a common and cheap geotechnical structure mostly used on so-called good subsoil, which means densely packed granular materials such as sands or gravels. In certain cases, it could be useful to apply shallow foundation systems on subsoils with more problematic properties e.g. clays or layered soil systems. On this subject, the formulation of the interaction mechanisms between foundation and subsoil has to be clear.

The geotechnical behaviour of shallow foundations on homogeneous soils is covered by a large number of investigations. To define the ultimate limit state of a foundation, the bearing capacity formula given by Terzaghi & Jelinek (1959) gives quite adequate results and is widely used. Solutions for two layered subsoil systems based on the bearing capacity formula are given for the case that one of the two layers has an infinite depth. Therefore, the subject of shallow foundations on layered subsoil systems with finite layer thicknesses has been chosen for further research.

The load settlement behaviour of layered subsoil systems - as typical representatives for sedimentary deposits - is different from the behaviour of homogeneous subsoils. The influence of micro-intrusions will not be discussed here. The focus is set on macro-intrusions, which are given in the form of different soils with a horizontal layering. The layers consist of either fine grained soils (clay) or coarse grained soils (sand). Under the loading conditions applied, drained behaviour is assumed for sand and undrained behaviour for clay. The inhomogeneity is described as the ratio of the soil layer thicknesses ( $d_{Sand}$  and  $d_{Clay}$ ) to the diameter of the Footing  $D_F$ .

The experimental data was produced using centrifuge model tests. These tests were carried out in order to investigate the soil structure interaction on small scale models. The rigid circular footing was loaded centrally and under deformation-controlled measurement of the vertical reaction force for a given vertical displacement. Rotation was not allowed. These boundary conditions were used to achieve comparability and counter-validation of the centrifuge model tests to a numerical model.

Both, centrifuge model tests and numerical models have shown the ultimate bearing capacity of a layered subsystem  $\sigma_f$  to be strongly dependent on the geometrical boundary conditions, in this context as ratios of the footing diameter  $D_F$  to the layer thicknesses

---

$d_{Sand}$  and  $d_{Clay}$ . The bearing capacity of a shallow foundation on a layered subsystem  $\sigma_f$  rises with increasing thickness of the top sand layer and sinks with increasing thickness of the intermediate clay layer.

Based on the results of centrifuge and numerical modelling, an analytical approach was developed to calculate the bearing capacity of a shallow circular footing on a layered subsoil. The result of the analytical approach is a single bearing capacity value predicted according to the ratio of the layer thickness and the footing diameter. The top layer acts as a vertical load propagator towards the extruding clay layer, where the total bearing capacity consists of the superposition of the load taken by the sand and the clay section. The bearing capacity can be described with a set of seven parameters: the geometrical values  $D_F$ ,  $d_{Sand}$  and  $d_{Clay}$ , the unit weight  $\gamma_{Sand}$  and the shear strength parameters  $c'$  and  $\phi'$  for the sand layer and  $s_u$  for the clay layer.

The application of the analytical approach is limited to small soil layer thicknesses ( $d_{Sand}$ ,  $d_{Clay}$ ) compared to the footing diameter ( $D_F$ ), that is a relatively thin clay layer with a small overburden pressure. Therefore boundary conditions limit the use of the analytical approach. Beyond those boundary conditions the bearing capacity formula (Terzaghi & Jelinek, 1959) still gives adequate results.