

DISS. ETH Nr. 19516

**TRAGVERHALTEN VON NICHT STARREN FLACHFUNDATIONEN UNTER
BERÜCKSICHTIGUNG DER LOKALEN STEIFIGKEITSVERHÄLTNISSE**

A B H A N D L U N G
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

ANDRE ARNOLD

dipl. Bau-Ing. ETH

geboren am 21. April 1980

von

Feuerthalen ZH

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Sarah M. Springman

Prof. Dr. Jürgen Grabe

Dr. Jan Laue

2011

Kurzfassung

Flachfundationen werden in der Baupraxis häufig für die Abtragung von Lasten aus den Hochbau-Strukturen auf den anstehenden Boden eingesetzt. Diese Art der Fundation hat sich für normale Baugrundbedingungen praktisch ausnahmslos durchgesetzt. Nur bei komplexen Gründungssituationen mit weichen, feinkörnigen Böden werden Pfahlfundationen oder kombinierte Pfahl-Platten-Gründungen eingesetzt.

Flachfundationen waren in den letzten Jahrzehnten einem Wandel unterworfen. Früher wurden vor allem Einzel- und Streifenfundamente erstellt. Die Kellergeschosse verfügten aufgrund der Lagerungsfähigkeit von Lebensmitteln über keine durchgehende Bodenplatte, sondern über einen Naturboden, der die Feuchtigkeit und Temperatur besser auszugleichen vermag. Dies hat sich mit der Umnutzung der Kellergeschosse verändert. Heute werden vor allem durchgehende Bodenplatten erstellt, welche wasserdicht ausgebildet sein müssen. Damit verändert sich auch die Bemessung solcher Fundationen, da die Grundfläche zur möglichen Lastabtragung aufgrund der durchgehenden Bodenplatte grösser ist. Ein Blick in die Praxis zeigt jedoch, dass meistens immer noch auf der Basis von Einzel- und Streifenfundamenten Bodenplatten anhand des Spannungstrapezverfahrens bemessen werden. Finite-Element Programme, mit welchen die gesamte Gebäudestatik berechnet werden kann, bieten oft nur rudimentäre Möglichkeiten zur Bemessung von Bodenplatten an. Die Steifigkeit der Fundation und der Struktur des Untergeschosses wird ebenfalls meistens vernachlässigt; auch hier, weil sinnvoll arbeitende FE-Programme weitgehend fehlen. Das heisst, dass sich zwar die Bauweise von Flachfundationen seither geändert hat, nicht aber deren Bemessung.

Die entscheidende Grösse zur Bemessung von Flachfundationen ist die Sohlspannungsverteilung, da diese die Grösse der Beanspruchung der Platte bestimmt. Um aufzuzeigen, wie diese Sohlspannungsverteilung zwischen Fundation und Boden aussieht und wie diese sich mit ändernden Fundations- und Bodenstrukturen verändert, wurden im Rahmen dieser Arbeit vor allem Versuche im kleinen Massstab mit einer Trommelzentrifuge durchgeführt. Die Spannungsverteilung konnte mit einer dünnen, druckempfindlichen Folie an 1936 Punkten bei einer Fläche von 11.2 cm x 11.2 cm gemessen werden. Die Modellfundationen wiesen dabei unterschiedliche Strukturen wie verschiedene Plattendicken, unbelastete- und belastete Wände, Frostriegel und Fundamentvertiefungen auf. Der Boden wurde mit Perth-Sand oder Birmensdorfer Ton modelliert. Es wurden verschiedene Lagerungsdichten und Bodenaufbauten mit Felshorizonten untersucht. Die so erhaltenen Last-Setzungskurven geben Aufschluss darüber, dass mit steigender Steifigkeit der Fundation oder des Bodens die Setzung kleiner wird. Die Messungen der Spannungsverteilungen ergaben, dass je nach Steifigkeit die Fundationen starres oder schlaffes Verhalten zeigen, was anhand der Systemsteifigkeit K_s nach DIN quantifiziert werden kann. Werden die Resultate anhand K_s ausgewertet, so erhält man folgendes Resultat: Für $K_s \leq 0.05$ verhält sich die Platte schlaff; für $K_s \geq 0.1$ verhält sich die Fundation starr. Dieser Verhaltenswechsel konnte in den Modellversuchen deutlich gezeigt und mit Messungen der Plattendeformationen auch physikalisch nachgewiesen werden.

Werden diese Resultate mit der analytischen und numerischen Modellierung verglichen, fällt auf, dass das vielfach verwendete Spannungstrapezverfahren für die Bemessung von nicht starren Flachfundationen völlig ungeeignet ist. Es ergibt eine

meist realitätsfremde Sohlspannungsverteilung und anhand dieser eine zu hohe Biegebeanspruchung der Platte. Die Berechnung der Setzung auf Grundlage dieser uniformen Spannungsverteilung ist zwar zulässig, es muss jedoch zwischen dem Zusammendrückungsmodul für Ödometerversuche (eindimensionale Steifigkeit) und dem Zusammendrückungsmodul (Verformungsmodul) für Plattendruckversuche (dreidimensionale Steifigkeit) unterschieden werden. Der im Allgemeinen etwas höhere Wert aus dem Ödometerversuch unterschätzt die Setzung der untersuchten Foundationen, da die dreidimensionale Steifigkeit, welche das Last-Setzungsverhalten der Foundation besser beschreibt, einen kleineren Wert hat. Das Verfahren von Kany liefert zutreffende Resultate für die untersuchten Foundationen. Die Spannungsverteilungen entsprechen in etwa denen aus den Versuchen und die Beanspruchung kann mit guter Übereinstimmung modelliert werden. Die Modellierung mit PLAXIS, wobei das Hardening-Soil Modell verwendet wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Modell, was die Last-Setzungs Kurven und die Sohlspannungsverteilungen anbelangt. Die Beanspruchung der Bodenplatte hingegen wird ungenügend modelliert. Das Biegemoment fällt ähnlich hoch aus wie dasjenige aufgrund des Spannungstrapezverfahrens.

Nebst den Untersuchungen in der Zentrifuge wurden Messungen an entstehenden Gebäuden in Alpnach (Kanton Obwalden) und Merenschwand (Kanton Aargau) durchgeführt. Diese Messungen umfassten die diskrete Bestimmung der Sohldruckverteilung an zwei Punkten pro untersuchtem Einzelfundament/Fundamentvertiefung mit Druckkissen der Firma Glözl, die Bestimmung der Stützenstauchungen und damit der Stützenlasten, die Bestimmung der Fundationssetzungen mit geodätischer Höhenaufnahme und die Klassifizierung der anstehenden Böden. In Alpnach wurden innerhalb einer durchgehenden Bodenplatte Fundamentvertiefungen zur Abtragung hoher Stützenlasten ausgeführt. Die Messungen ergaben, dass sowohl die Stütze als auch die Foundation eine Biegebeanspruchung aufgrund der darüberliegenden Abfangdecke erhalten. Diese Biegebeanspruchung beeinflusst die Sohldruckverteilung erheblich.

In Merenschwand wurden Einzelfundamente ohne durchgehende Bodenplatte ausgeführt. Die darüberliegende Stahlbetondecke erfährt eine gleichmässige Belastung aufgrund einer Erdaufschüttung. Die Decke dient also nicht als Abfangkonstruktion. Dadurch erfahren weder Stütze noch Foundation Biegung. Die aufgezeichnete Sohldruckverteilung ergibt eine schlaaffe Abtragung der Last. Dieses Verhalten entspricht anhand der ermittelten Systemsteifigkeit dem Verhalten, wie es in den Zentrifugenmodellversuchen beobachtet wurde. Die Unterscheidung zwischen starrem und schlaffem Verhalten konnte demnach auch durch Messungen an bestehenden Gebäuden nachvollzogen werden. Bei der Bemessung von Foundationen von Abfangdecken muss die übertragene Biegung in die Foundation bei der Bemessung berücksichtigt werden.

Zur Bemessung von Flachfoundationen muss die Systemsteifigkeit erörtert werden, damit zwischen starrer und schlaffer Lastabtragung unterschieden werden kann. Bei starrer Lastabtragung darf weiterhin das Spannungstrapezverfahren als Grundlage verwendet werden, da die Sohlspannungsverteilung im Allgemeinen in den Versuchen ausgeglichen war. Liegt hingegen eine schlaaffe Lastabtragung vor, so wird empfohlen, das Verfahren von Kany heranzuziehen. Obwohl es von linear-elastischem Bodenverhalten ausgeht, vermag es bei schlaffem Verhalten die Sohl-

spannungsverteilung sehr gut abzubilden und ergibt deshalb sinnvolle Biegebeanspruchungs-Werte.

Bei der Verwendung von Finite-Element Programmen, welche im Rahmen dieser Arbeit zum Vergleich herangezogen wurden, ist hinsichtlich zwei Aspekten Vorsicht geboten: Die Wahl des Stoffmodells ist von grosser Bedeutung. Für Abschätzungen der Setzungen reicht das linear-elastische – starr-plastische Mohr-Coulomb Modell aus. Soll hingegen das Last-Setzungs-Verhalten der Foundation korrekt beschrieben werden, muss ein höherwertiges Modell wie beispielsweise das Hardening-Soil Modell, welches die relevanten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen im Boden modellieren kann, angewandt werden. Hier werden aber zusätzliche Parameter benötigt, die vertiefte Laborversuche notwendig machen. Weiter ist darauf zu achten, dass die Foundationsstruktur sinnvoll modelliert werden kann. In PLAXIS beispielsweise können Wände und Decken als Strukturelemente modelliert werden; Vergleiche zu den Versuchen haben jedoch gezeigt, dass schon bei Systemen mit nicht belasteten Wänden die Resultate sich weiter von den Versuchsergebnissen entfernen. Das heisst, dass der Einbezug der Struktursteifigkeit bei solchen Finite-Element-Modellen Resultate fragwürdiger Genauigkeit liefert.

Die Beanspruchung von Flachfundationen hängt direkt von der Sohlspannungsverteilung ab, welche von den Steifigkeiten der Foundations- und Gebäudestruktur und von der Bodensteifigkeit abhängt. Dieses Verhalten wird durch die Systemsteifigkeit nach DIN beschrieben. Für die realitätsnahe Dimensionierung einer Flachfundation ist die Kenntnis der Steifigkeiten daher erforderlich.

Abstract

Rafts are foundations that distribute loads from buildings to the soil. This type of construction is commonly adopted for stiff, dense soils with adequate bearing capacity, provided the serviceability requirements are also met. Piled foundations are used for more complex situations particularly to limit settlements, which may arise through loading softer, more compressive soils.

The usage of raft foundations has changed over recent years. Single- and strip foundations were used mostly in the past. Cellars did not have a raft throughout the whole floor area so that the humidity in the basement would conserve groceries better. Nowadays, cellars are mostly used for leisure activities, office space, storage or parking and therefore need a concrete floor to guarantee dry conditions. The dimensioning of raft foundations should have changed accordingly by taking the increase in available ground surface, which can be used to distribute the loads, into account. This is often not done in practice. Engineers tend to apply simple approaches of dimensioning rafts based on design methods for single- and strip foundations, while assuming a uniform stress distribution between structure and soil. Continuous rafts are mostly not taken into account. This means, that the usage of foundations has changed to mostly continuous raft foundations, while the dimensioning methods have not advanced too. Several Finite-Element codes can be used for design; but these codes usually have only rudimentary options for dimensioning the foundation. The stiffness of the foundation-structure and of the building-structure is also not considered.

The most important parameter for the design of raft foundations is the stress distribution between raft and soil because its distribution defines the loading behaviour of the foundation. Small model tests in the drum centrifuge have been conducted to make this stress distribution visible in terms of changing foundations and soil conditions. The stress distribution could be visualised with a very thin, pressure-sensitive pad on 1936 points on an area of 11.2 cm x 11.2 cm. The structure of the model foundations varied with different raft-thicknesses, loaded- and unloaded walls, frost-impact structures and thicker areas of foundations. The soil was modelled either with Perth sand or Birmensdorf clay. Different relative densities of the sandy soil and a range of layered structures with rock horizons have been tested also. The resulting load-settlement curves show that the increase of stiffness of either the foundation or the soil leads to less settlement. With changing stiffness of the foundation, the raft behaves either stiffly or flexibly, which could be shown with the measurements of the stress distributions. This stiff or flexible behaviour can be quantified with the „System-stiffness“ K_s given in the DIN-code. The interpretation of the test results show that the raft behaviour is flexible for $K_s \leq 0.05$, whereas the raft will behave stiffly for $K_s \geq 0.1$. The change from stiff to flexible behaviour on the given values for K_s could be shown in the centrifuge tests and verified physically with measurements of the deformations of the raft.

The comparison between the centrifuge test results compared to results from analytical and numerical modelling processes proves that the common approach with uniform stress distributions is not suitable for the design of flexible rafts. It leads to an unrealistic stress distribution between raft and soil, and therefore to an overestimation of the bending moment in the foundation plate in most cases. The calculation of

the settlement, on the basis of the uniform stress distribution, is suitable but the soil stiffness determined from Oedometer-tests (one-dimensional stiffness) must be differentiated from the soil stiffness obtained from plate-loading tests (three-dimensional stiffness). The value taken from the Oedometer test reflects purely one dimensional settlement and underestimates the actual settlement of the foundation. The value taken from the plate-loading test gives better values for the estimation of the settlement. The application of Kany's approach gives good results for flexible raft foundations in terms of stress distribution and loading behaviour. The numerical modelling with PLAXIS shows a good agreement between test results and the numerical approach based on the load-settlement curves and stress distributions. The Hardening-Soil-Model has been used to describe the soil behaviour within the numerical simulations, although the loading behaviour of the raft cannot be modelled sufficiently well. The bending moment obtained from the numerical model is larger than it was obtained in the physical model tests and is similar to the approach with the uniform stress distribution.

Field investigations on two different buildings, which were under construction, have been conducted at Alpnach (district of Obwalden) and at Merenschwand (district of Aargau) in addition to the small scale tests in the centrifuge. The stress distribution between the single foundation/thicker area of the foundation and the adjacent soil has been measured with two pressure cells each. The deformation of the columns has been measured in order to obtain the column load as well as the deformation of the ground using geodetic equipment. Thicker areas of the foundation have been built to absorb the high column loads at Alpnach. The measurements led to the conclusion that the bending moment, which is generated in the concrete supporting roof, influences the loading behaviour of the column and the foundation. Therefore the stress distribution is strongly affected by the bending moment arising from the growing structure. This influence must be incorporated into the design of such foundations.

The foundation structure at Merenschwand consists of single footings, which are not supplemented by an extra raft in between. The concrete roof supports only an earth fill and therefore generates no bending moment leading to a stress distribution that implies a flexible response of the single footing. This behaviour, in terms of the calculated system-stiffness, has also been estimated in the centrifuge tests. The distinction between flexible and stiff behaviour could also be confirmed with measurements on the new buildings.

The system-stiffness must be known to be able to distinguish between flexible and stiff behaviour for a suitable design of raft foundations. It is appropriate to use the approach of a uniform stress distribution for the predicted stiff behaviour because the measured stress distributions in the tests showed a more or less uniform stress distribution. It is recommended to use Kany's approach for flexible behaviour. Even though this approach models linear elastic soil behaviour, it predicts stress distributions that are consistent with the physical data and therefore appropriate bending moments. When using FE-codes, two things must be kept in mind: The choice of the soil model is very important. The Mohr-Coulomb model (ideal elastic – plastic) is sufficient for precalculation purposes. The Hardening-Soil model or another similar more advanced soil model, that can represent relevant features of the expected stress strain response in the ground, should be used for a realistic calculation of the

load-settlement behaviour. These models require additional soil parameters, which can usually only be derived from advanced laboratory tests. The modelling of the concrete structures is also an important part. Calculations with PLAXIS showed that structural elements, such as unloaded walls, increase the discrepancy between numerical predictions and the results obtained from physical-model-tests.

The response of raft foundations to loading is strongly dependent on the stress distribution between foundation and soil, which itself is dependent on the stiffnesses of the foundation and the growing structure, and the stiffness of the soil. This behaviour is described by the system stiffness, as defined in the DIN-code. Clearly the stiffnesses must be known for a realistic design of raft foundations.