

Zum Tragverhalten von leichten, geschichteten Betondecken

*The load-bearing behaviour of lightweight,
layered concrete slabs*

Von der
Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Frenzel
geboren am 9. März 1978 in Radebeul

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach
Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark

eingereicht am: 8. Juni 2021

verteidigt am: 19. Juli 2021

Kurzfassung

Betondecken sind materialintensive Biegetragwerke, wenn sie, wie derzeit üblich, eben und aus einer Betonsorte hergestellt werden. Die Materialien sind dadurch nur an wenigen Stellen maximal und effizient ausgenutzt. Die vorliegende Arbeit greift ein daraus resultierendes Optimierungspotential auf. Eine verbesserte Ausnutzung der Baustoffe Beton und Stahl gelingt durch einen dreischichtigen Querschnittsaufbau. Dabei nehmen die beiden äußeren Betonschichten mit der eingebrachten Stahlbewehrung vor allem die Beanspruchungen aus Biegung und die Kernschicht aus Schub auf. Als Kernschichtmaterial kommen dabei Leichtbetone zur Anwendung. Der Fokus liegt auf der Untersuchung von schlaff bewehrten, einachsig gespannten, einfeldrigen Flachdecken des gewöhnlichen Wohnungs- und Bürobaus.

In der Arbeit wird ein Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand und die bereits vorliegenden Forschungsarbeiten zu geschichteten, sandwichartigen Betondecken gegeben. Sie geht auf die Eigenschaften von Beton, Stahl und Stahlbeton und ausführlich auf den Verbund zwischen Betonschichten ein, der die Tragfähigkeit geschichteter Betondecken besonders beeinflusst. Anschließend werden verschiedene Bauteilzustände erläutert und die Versagensarten, die bei geschichteten Elementen auftreten können, vorgestellt. Dazu gehören maßgeblich das Biegezug- und Biegedruckversagen sowie das Biegeschub- und Fugenversagen. Es werden sowohl Formeln zur Berechnung von Durchbiegungen im Gebrauchszustand als auch von Bruchlasten in Abhängigkeit der Versagensart bereitgestellt. Auch sind Rechenansätze zur Beurteilung des Plattenzustandes infolge des unterschiedlichen Schwindens der Betone aufgeführt.

Die Eignung der zusammengestellten Formeln wird anhand der Nachrechnung von 36 Bauteilversuchen überprüft. Bei diesen kamen zwei Materialkombinationen zum Einsatz: konstruktiver Leichtbeton–Infraleichtbeton und Normalbeton–Porenleichtbeton. Bei den Bauteilprüfungen traten das Fugen- und Schubversagen sowie das Biegezug- und Endverankerungsversagen auf. Im Vorfeld und begleitend erfolgte die Fertigung und Belastung von mehr als 200 kleinformatigen, teils geschichteten Betonkörpern. Die dadurch gewonnenen Kennwerte bilden die Basis für die Berechnung von Verformungen und Bruchlasten geschichteter Elemente.

In der Dissertation wird gezeigt, dass das Tragverhalten kleinformatiger geschichteter Schubkörper und geschichteter Platten mit numerischen Modellen abgebildet werden kann. Die Versuche wurden dazu mit dem FE-Programm Atena Engineering 2D numerisch simuliert. Es zeigte sich, dass die experimentell beobachteten Rissbilder und Versagensarten mit den numerischen Modellen gut dargestellt und die experimentell erzielten Bruchlasten rechnerisch zufriedenstellend genau bestimmt werden können.

Die bereitgestellten analytischen Formelapparate sind besonders gut zur Ermittlung der Bruchlast bei Biegezugversagen geeignet. Aus den detaillierten Betrachtungen zu den Traganteilen, die beim Schub- und Fugenversagen wirken, ist erkennbar, dass die Berechnung der zugehörigen Versagenslast eine anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Auf die Eignung verschiedener Ansätze wird eingegangen.

Mit der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass die Materialien bei geschichteten Decken effizienter ausgenutzt werden können als bei herkömmlichen einschichtigen Ausführungen, wodurch sich Gewicht und Ressourcen sparen lassen.

Abstract

Concrete ceilings are material-intensive bending structures. The most common ceiling design is comprised of an even surface and one type of concrete. As a result the materials are maximally and efficiently utilised only in a few places. The present work addresses a resulting optimisation potential. Improved utilisation of the construction materials concrete and steel is achieved by a three-layer cross-sectional structure. The two outer concrete layers, which include the steel reinforcement, primarily carry the stresses from bending; the core layer, the shear forces acting on it. Lightweight concretes are used as core layer material. The scope of this investigation focuses on conventionally reinforced non-hollow cross-sections, which are implemented in one way, single-span slabs without joists of ordinary residential and office buildings.

In the dissertation is given an overview of the current state-of-the-art on layered, sandwich-like concrete slabs. It also discusses the properties of concrete, steel and reinforced concrete, along with detailed studies on the bond between concrete layers, which particularly affects the load-bearing capacity of layered concrete ceilings. Subsequently, different component layout and boundary conditions are explained and the possible failure modes that can occur in layered elements are presented. These include bending tensile and bending compressive failure as well as flexural shear and interface failure. The thesis provides formulas for calculating both deflections under service state and ultimate loads with a correlation to the various failure modes. Calculation approaches for the assessment of the slab's stress state due to the shrinkage properties of different concrete mixes are included in the design methodology.

The suitability of the proposed formulas is verified by the recalculation of 36 structural component tests. Two material combinations were used, structural lightweight concrete and infra-lightweight concrete, and regular concrete and foam concrete. During the structural tests, interface and shear failure as well as bending tensile and end-anchorage failure occurred. Before and during these tests, more than 200 small-format, partly layered, concrete specimens were manufactured and loaded. The characteristic values thus obtained, form the basis for the calculation of deformations and failure loads of layered elements.

The work shows that the load-bearing behaviour of small-format layered shear specimens and layered slabs can be reproduced with numerical models. The tests were simulated with the FE program Atena Engineering 2D. It was shown that the experimentally observed crack patterns and failure modes can be well represented with the numerical models and that the experimentally achieved failure loads can be determined with satisfactory computational accuracy.

The analytical formulae provided are particularly well suited for determining the ultimate load in bending tensile failure. From the detailed considerations of the load-bearing components that act in shear and interface failure, it can be seen that the calculation of the associated failure load is a demanding task. The suitability of different approaches is discussed.

In this dissertation it is shown that materials can be utilised more efficiently in layered ceilings than in those that use a conventional cross-section throughout the length of the element. The proposed layered concept results in considerable weight reduction and resource savings.