

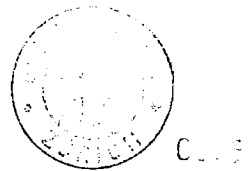
Diss. ETH ex. B

Diss. ETH No. 11863

**Finite Element-based Elasto-Plastic Optimum  
Reinforcement Dimensioning of  
Spatial Concrete Panel Structures**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by  
Seyed Mohammad Reza TABATABAI  
B.Sc. (SUT Tehran)  
M.Sc. (IC London)  
NDS dipl. (ETH Zurich)  
born on 28 August 1966  
citizen of Iran



Accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. E. Anderheggen, ETH Zurich, examiner  
Prof. Dr. C. T. Morley, University of Cambridge, co-examiner

1996

## Abstract

A new method is proposed for the ultimate load reinforcement dimensioning of spatial concrete panel structures. It aims at providing civil engineers with a system which exploits the advantages of today's established approaches while alleviating some of their deficiencies (chapter 1). The finite element method, plasticity theory and linear programming are integrated in a unified manner so as to obtain a rational reinforcement distribution (chapter 2). The approach can be used for both the dimensioning and the evaluation of the load-carrying capacity of a structure with given reinforcement. The method is based on two basic concepts.

The first new idea is finite element-based reinforcement dimensioning. In the conventional approach, yield conditions are applied to the stresses at some points of the structure as obtained e.g. from a linear elastic finite element analysis (chapter 3). The method proposed here, unlike the conventional one, regards each finite element as a dimensioning unit which must withstand its element nodal forces. These are statically equivalent to the stresses within the element and are in perfect equilibrium both with one another and with the external loads. The idea is therefore not to investigate the stress distribution but to find an equilibrium system of nodal forces which can carry the external loads. Thus, the proposed method can also be viewed as a generalization of the truss model approach. The concepts of generalized strains and stresses are employed for deriving yield conditions for quadrilateral and triangular finite elements in membrane, bending and combined membrane-bending actions. The idea of finite element discretization is extended from analysis to design in a natural way (chapter 4).

The second new idea concerns stress optimization and rationalization. Based on the shakedown and lower bound theorems of plasticity theory, self-equilibrating homogeneous stress states are superimposed on the linear elastic solution. These fictitious redistribution cases are not determined by a nonlinear incremental analysis but are chosen at will. Their distributions and intensities are found by linear programming techniques and various optimization criteria. For the task of dimensioning, these superimposed self-equilibrating stress states result in a more rational steel distribution with a lower weight (chapter 5).

Program ORCHID (Optimum Reinforced Concrete Highly Interactive Dimensioning) was developed for the dimensioning of spatial concrete panel structures. The structures handled by ORCHID are general three-dimensional structures consisting of flat panels that can be arbitrarily oriented in space. Each panel can act in pure membrane or in combined membrane-bending action. ORCHID is designed to provide practicing engineers with an effective tool for reinforcement dimensioning. The interactive program performs all necessary calculations and provides the engineer with all required information, while the major decisions are left to him (chapter 6). As the complexity of the structural system grows, the method becomes more effective and useful. For greater clarity, however, simple examples are presented (chapter 7).

## Zusammenfassung

Eine neue Methode für die Bemessung der Bewehrung von räumlichen, aus ebenen Teilen bestehenden Stahlbetontragwerken aufgrund von Tragsicherheitsanforderungen wird vorgeschlagen. Ziel der Arbeit ist die Schaffung eines Werkzeuges, das die Vorteile der heutigen Methoden berücksichtigt und ihre Nachteile möglichst vermeidet (Kapitel 1). Die Methode der Finiten Elemente, Plastizitätstheorie und lineare Programmierung werden dafür eingesetzt (Kapitel 2). Das vorgeschlagene Verfahren, das sowohl für die Bemessung als auch für die Traglastermittlung anwendbar ist, basiert auf zwei Grundkonzepten.

Das erste neue Konzept ist die Bewehrungsbemessung auf der Stufe des Finiten Elementes. Bei den konventionellen Bemessungsverfahren werden Fließbedingungen für die Spannungen formuliert, die in bestimmten Punkten des Tragwerkes z.B. durch eine linear elastische Finite Element Analyse bestimmt werden (Kapitel 3). Dagegen wird hier jedes Finite Element als eine Bemessungseinheit betrachtet, die ihre Elementknotenkräfte aufnehmen muss. Diese sind mit den elementinternen Spannungen statisch äquivalent und erfüllen das Gleichgewicht sowohl untereinander als auch mit den externen Lasten exakt. Nicht die Spannungsverteilung ist gesucht, sondern ein Gleichgewichtssystem von Elementknotenkräften, das die Lasten abtragen kann. Somit kann das Verfahren auch als eine Verallgemeinerung der Fachwerkmodellierung betrachtet werden. Aufgrund von geeigneten verallgemeinerten Verzerrungen und Spannungen werden Fließbedingungen für vier- und dreieckige Finite Elemente in Membran-, Biege und kombinierte Membran-Biegewirkung hergeleitet. Die Idee der Finiten Element Diskretisierung wird somit von der Analyse zur Bemessung erweitert (Kapitel 4).

Das zweite neue Konzept betrifft die Bewehrungsoptimierung. Basierend auf dem Einspielsatz und dem unteren Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie werden homogene Eigenspannungszustände mit der linear elastischen Lösung einer Finiten Element Berechnung überlagert. Diese fiktiven Umlagerungslastfälle werden nicht etwa aus einer nichtlinearen inkrementellen Analyse bestimmt sondern frei, d.h. aufgrund von Optimierungskriterien gewählt. Ihre Verteilung und Intensität werden mittels linearer Programmierung ermittelt, was zu einer rationelleren Bewehrungsverteilung mit weniger Gewicht führt (Kapitel 5).

Das Programm ORCHID (Optimum Reinforced Concrete Highly Interactive Dimensioning) ist für die Dimensionierung von räumlichen Flächentragwerken aus Stahlbeton entwickelt worden, welche aus ebenen Teilen bestehen und im Raum beliebig orientiert sind. Jede ebene Teilfläche kann reine Membran- oder kombinierte Membran-Biegewirkung aufweisen. Das interaktive Programm soll für Ingenieure aus der Praxis ein brauchbares Werkzeug darstellen. Es führt alle nötigen Berechnungen aus und liefert sämtliche Informationen, mit denen der Ingenieur Entscheidungen trifft (Kapitel 6). Je komplizierter die Struktur, desto hilfreicher ist die Methode. Zur besseren Übersicht werden noch einfache Beispiele präsentiert (Kapitel 7).