

DISSERTATION ETH Nr. 18486

Ebener Spannungszustand im Betonbau: Grundlagen und Anwendungen

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der
ETH ZÜRICH

vorgelegt von

HANS SEELHOFER

Dipl. Bauingenieur ETH

geboren am 19. August 1977

Bürger von Ennenda (GL) und Konolfingen (BE)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Peter Marti, Referent

Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, Korreferent

2009

Kurzfassung

Diese Abhandlung leistet einen Beitrag zur Modellierung des Tragverhaltens von Stahlbeton im ebenen Spannungszustand und deren Anwendung auf Elemente ebener Stahlbeton-Flächentragwerke. Die zur Erfassung der verschiedenen Aspekte des Tragverhaltens diskutierten und (weiter-)entwickelten Modelle beruhen auf klaren baustatischen Grundlagen und weisen im Hinblick auf die praktische Anwendung verschiedene Detaillierungsgrade auf. Die betrachteten Modelle dienen als Grundlage für die Bemessung bzw. Beurteilung des Tragwiderstands sowie die Bestimmung der Verformungen von (hinsichtlich Geometrie und Einwirkungen) kontinuierlichen Bereichen ebener Stahlbeton-Flächentragwerke.

Der erste Teil der Abhandlung umfasst die wichtigsten Grundlagen und Konzepte der Baustatik, relevante Aspekte des Werkstoff- und Verbundverhaltens einschliesslich deren Modellierung sowie einige generelle Überlegungen zur Modellbildung im Betonbau. Bei der Darstellung der baustatischen Zusammenhänge wird die Dualität der mit statischen bzw. kinematischen Grössen formulierten Beziehungen sowohl in der Elastizitätstheorie als auch in der Plastizitätstheorie ins Zentrum der Betrachtungen gerückt, um darauf gestützt insbesondere Vereinfachungen und Näherungsverfahren zu diskutieren.

Im zweiten Teil der Abhandlung werden Modelle zur Beschreibung des Tragverhaltens von Stahlbeton im homogenen ebenen Spannungszustand behandelt. Im Rahmen der Behandlung plastischer Modelle werden Fliessbedingungen für zwei (und drei) schiefwinklige Bewehrungslagen formuliert und die entsprechenden Fliessflächen eingehend diskutiert. Unter der Prämisse, dass alle Bewehrungslagen beim Erreichen der Traglast auf Zug fließen, werden darauf basierend Bemessungsbeziehungen für zwei (und drei) schiefwinklige Bewehrungslagen abgeleitet. Zur Beschreibung der gesamten Last-Verformungscharakteristiken werden das klassische Druckfeldmodell und das Gerissene Scheibenmodell herangezogen, wobei beide Modelle zur Behandlung von beliebigen schiefwinkligen Bewehrungslagen weiterentwickelt werden. Ferner wird das Gerissene Scheibenmodell angepasst, um in der ursprünglichen Fassung auftretende Inkonsistenzen zu beseitigen. Basierend auf den beiden Modellen wird anschliessend das Festlegen der für die plastischen Modelle erforderlichen effektiven Betondruckfestigkeit erörtert. Ausserdem wird eine Beschreibung der schwind- und kriechebedingten Umlagerungen der inneren Kräfte vorgestellt.

Im dritten Teil der Abhandlung werden Modelle zur Beschreibung des Tragverhaltens von Elementen ebener Stahlbeton-Flächentragwerke behandelt. Dabei wird in jeder zur Mittelebene parallelen Schicht von einem ebenen Spannungszustand ausgegangen, womit sich die Modelle des zweiten Teils direkt übertragen lassen; Querkräfte werden als verallgemeinerte Reaktionen behandelt. Bei einer plastischen Modellierung gelingt es nicht, auf allen sechs betrachteten verallgemeinerten Verzerrungen beruhende, allgemein gültige Fliessbedingungen zu formulieren. Dementsprechend werden auf Fliessgelenklinien und verallgemeinerten Fliessgelenklinien mit reduzierten kinematischen Freiheitsgraden beruhende Fliessbedingungen behandelt. Zur Bemessung von allgemein beanspruchten Elementen ebener Flächentragwerke wird eine Weiterentwicklung des Sandwichmodells vorgelegt. Für die Fälle einer reinen Drillmomentenbeanspruchung sowie einer Beanspruchung durch Membranschubkräfte und Biegemomente (jeweils bezüglich der Richtungen einer orthogonalen Bewehrung) werden darauf basierend Bemessungsbeziehungen und Beziehungen zur Ermittlung eines unteren Grenzwerts der Traglast angegeben. Auf der Grundlage des klassischen Druckfeldmodells bzw. des (angepassten) Gerissenen Scheibenmodells wird ein Modell zur Beschreibung der gesamten Last-Verformungsbeziehungen vorgestellt, bei welchem die Elementdicke in Schichten mit konstanten Betonspannungszuständen unterteilt wird. Anhand eines Vergleichs mit Versuchsergebnissen werden die verschiedenen im dritten Teil behandelten Modellvorstellungen abschliessend eingehend diskutiert.

Der vierte Teil umfasst eine Zusammenfassung der Abhandlung, einige Folgerungen sowie Anregungen für weiterführende Arbeiten.

Abstract

This thesis contributes towards the modelling of the structural response of reinforced concrete in the plane stress state and its application to reinforced concrete plate elements. The new and extended models, used to discuss the various aspects of the structural behaviour, are based on the basic principles of mechanics and feature levels of detail corresponding to the practical application. These models provide the basis for the design, evaluation and deformation prediction within continuous regions (with respect to geometry and loading) of reinforced concrete plates.

The first part of the thesis includes the basic principles and concepts of structural analysis, the relevant aspects and modelling of the material and bond behaviour as well as some considerations concerning the modelling of structural concrete in general. The duality of the basic equations of the theory of elasticity and plasticity formulated with static and kinematic variables, respectively, dominates the discussion of the general context of structural analysis and gives the basis for the subsequently mentioned simplifications and approximation methods.

In the second part of the thesis, models for describing the structural behaviour of reinforced concrete subjected to a uniform plane stress state are presented. Within the scope of the discussion concerning plastic modelling, the yield conditions for two (and three) skew reinforcement layers are formulated and the corresponding yield surfaces are discussed in detail. The dimensioning relations for two (and three) skew reinforcement layers are deduced on the assumption that all reinforcement layers have reached tensile yielding at ultimate load. The global load-deformation behaviour is described using the traditional Compression Field Model and the Cracked Membrane Model that are both extended to account for skew reinforcement layers. The Cracked Membrane Model is additionally adapted in order to eliminate inconsistencies present in the original version. Both models are used to determine the effective concrete compressive strength required for plastic modelling. In addition, a description of shrinkage and creep related internal load redistribution is given.

The third part of the thesis deals with models for describing the structural behaviour of reinforced concrete plate elements. Plane stress states are assumed in all layers parallel to the mid-plane, allowing the application of the models discussed in the second part of the thesis. Shear forces are treated as generalised reactions. Using the theory of plasticity it is not possible to formulate general yield conditions that consider all six general strains. Therefore, yield conditions derived from yield-lines and generalised yield-lines with a reduced degree of freedom are treated. An extension of the sandwich model is presented for the dimensioning of elements subjected to general loading. Resulting equations for design and a lower-bound value of the ultimate load are given for the cases of pure torsion as well as combined bending and membrane shear (both with respect to the axes of an orthogonal reinforcement). A model for the description of the complete load-deformation relationship, which is based on the traditional Compression Field Model and the (extended) Cracked Membrane Model, is presented, whereby the element thickness is divided into layers with uniform concrete stress states. Subsequently, test data is used to thoroughly discuss the models presented in this part of the thesis.

The fourth part summarises the thesis and includes some conclusions and suggestions for further work.