



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Massivbau

Verbundmodellierung von Beton- und Spannstahl unter Querzug

Modeling of the bond behavior of reinforcing
and prestressing steel under transverse tension

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

DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Robert Zobel
geboren am 10. September 1987 in Gera

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach
Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

eingereicht am: 15. August 2017
verteidigt am: 05. Dezember 2017

Kurzfassung

Containments aus Stahl- und Spannbeton nehmen in der Sicherheitsausrüstung bestehender Kernkraftwerke eine wichtige Stellung ein, wo sie im Allgemeinen als äußerer Schutz um den Reaktordruckbehälter angeordnet sind. Im Falle eines Störfalles, bei dem es beispielsweise zu extrem hohen Innentemperaturen kommen kann, werden die gekrümmten Wände des Containments einer zweiachsen Zugbeanspruchung ausgesetzt, die beim Überschreiten einer kritischen Grenze eine Rissbildung bewirken kann. Ein vollständiger Schutz des Stahl- bzw. Spannbetoncontainments vor radioaktiver Kontamination ist dann u. U. nicht mehr gegeben. Daher ist es von großer Bedeutung, die Leckrate infolge Rissbildung auf ein festgelegtes Höchstmaß zu begrenzen. Dafür werden Analysemodelle aufgestellt, die mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode abgebildet und berechnet werden. Für eine hohe Qualität dieser Analysemodelle ist neben der realitätsnahen Erfassung der Einzelkomponenten Stahl und Beton auch die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung des Zusammenwirkens beider Materialien von großer Bedeutung. Die Annahme eines starren Verbundes, wie es bisher der Fall ist, führt zwangsläufig in den Analysemodellen zu geringeren Rissabständen und somit zu kleineren Rissbreiten. Eine Unterschätzung der Rissbreiten in den Simulationen der Containments ist die Folge. Im Mittelpunkt der Arbeit stand daher die numerischen Untersuchungen des Verbundverhaltens zwischen Betonstahl und Beton sowie Spanngliedern im nachträglichen Verbund und Beton. Besonderes Augenmerk lag auf der durch eine zweiachsiale Zugbeanspruchung hervorgerufene Querschnittbelastung der Bewehrungsstäbe. Ausgehend von den Versuchsergebnissen von L. RITTER [87] und TROST ET AL. [108] wurde zunächst eine detaillierte Modellierung des Verbundes (Berücksichtigung der Oberflächengeometrie) vorgenommen. Neben verschiedenen Modellierungsvarianten und der Betrachtung des Querschnitts einfluss erfolgte zudem eine numerische Untersuchung zur Eignung des Ausziehversuchs zum Nachweis der Verbundeigenschaften. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen wurden anschließend Verbundmodelle zur Anwendung in der Finiten-Elemente-Software ANSYS entwickelt, um das Verbundverhalten zwischen Stahl- und Betonelementen bei großen Bauteilsimulationen berücksichtigen zu können. Mit den implementierten Verbundmodellen erfolgten abschließend Simulationen von Stahl- und Spannbetonbauteilen unter einer zweiachsialen Zugbelastung, um die Verhältnisse in einer Containmentwand abzubilden. Durch die zukünftige Verwendung der Verbundmodelle in ANSYS kann der signifikante Einfluss des Verbundes auf die Rissbildung berücksichtigt sowie das Tragverhalten von Stahl- und Spannbetoncontainments realistischer abgebildet werden. Rissabstände und Rissbreiten, die bei Stahl- und Spannbetoncontainments eine entscheidende Rolle einnehmen, können realitätsnaher bestimmt werden.

Abstract

Containments made of reinforced concrete are crucial to guarantee the safe operation of the equipment in nuclear power plants. They are used as an outer protection for the reactor pressure vessels. In the case of an accidental hazard, which could lead to higher inner temperatures, the containment walls are being exposed to a biaxial tensile load state. Beyond certain critical boundary limits, those stresses can lead to crack initiation. Once concrete cracks, the protection provided by the outer containment against nuclear contamination and radioactivity no longer exist. Therefore, it is of high importance to minimize leakage due to cracks in the containment structure to a pre-set limit. For such a purpose, analysis models are being developed with the help of the finite element method. To gain a high-quality insight into those models, a realistic simulation of the individual components, steel, and concrete, as well as a realistic formulation of the interaction between the two materials are of great importance. The assumption of a rigid bond between concrete and steel inevitably leads to a smaller crack spacing, and therefore to smaller crack widths in the analysis models. As a result, the crack widths in the simulations of containment structures would be underestimated. The focus of the work was, therefore, the numerical investigation of the bond behavior between reinforcing steel and concrete, as well as between post-tensioned tendons and concrete. Special attention was paid to the effect of the transverse tensile load on the bond behavior of reinforcing steel and post-tensioned tendons. Based on the experimental results of L. RITTER [49] and TROST ET AL. [108] a detailed model of the bond (considering the exact surface geometry of the reinforcing steel and post-tensioned tendons) was created. In addition to various modeling variants and the consideration of transverse tension, a numerical investigation of the pull-out test suitability to determine the bond properties was also carried out. Based on the information gained, bond models were developed using the finite element software ANSYS which considered the bond behavior of reinforcing steel and post-tensioned tendons in large structural simulations. Finally, with the help of the implemented bond models, simulations of reinforced and prestressed structures were carried out to model the conditions in a containment wall. Based on the implemented bond models, the effect of the bond on the cracking behavior could be analyzed in ANSYS. Also, the load bearing behavior of reinforced and prestressed concrete could be simulated more realistically.