

Rissbildung in fugenlosen Kaianlagen

Ein Berechnungsmodell für massige Bauteile aus Stahlbeton

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Jens Wasner

aus
Rostock

2014

1. Gutachter: Prof. Dr. Viktor Sigrist
2. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Grabe
3. Gutachter: Prof. Dr. Uwe Starossek

Datum der mündlichen Prüfung: 05.11.2014

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH

Heft 12

Jens Wasner

Rissbildung in fugenlosen Kaianlagen

Ein Berechnungsmodell für massige Bauteile aus Stahlbeton

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3376-2

ISSN 1865-8407

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Herr Wasner war Kollegiat des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs „Seehäfen für Containerschiffe zukünftiger Generationen“ und Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TUHH. Einige Projekte innerhalb des Kollegs beziehen sich auf den konstruktiven Ingenieurbau, wobei der wissenschaftliche Fokus auf Fragen des Verhaltens großer fugenloser Stahlbetonstrukturen und deren Zusammenwirken mit den Gründungselementen und dem Baugrund (Boden-Bauwerk-Interaktion) liegt.

Im Zentrum der Arbeit von Herrn Wasner steht die rechnerische Behandlung von massigen Stahlbetonkonstruktionen unter Last- und Zwangbeanspruchungen. Trotz erheblicher Anstrengungen in der Forschung ist es nach wie vor nicht möglich, für diese Art von Tragwerken zuverlässige Berechnungsergebnisse zu erzielen, was auf folgende Defizite zurückzuführen ist: Einerseits fehlen repräsentative Ansätze für die Einwirkungen (Hydratation, Temperatur, Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung), und andererseits mangelt es an physikalisch abgesicherten Modellen zur rechnerischen Erfassung der Rissbildung für die Anwendung auf massive Konstruktionen großer Ausdehnung.

Mit seiner Dissertation leistet Herr Wasner insbesondere zum Thema der Rissmodellierung einen Beitrag. Er greift für seine Untersuchungen auf ein kommerzielles Finite Elemente Programm (Abaqus) zurück, das er mit Blick auf die Erfassung der Rissbildung speziell konfiguriert, indem er die Werkstoffbeziehungen an das von ihm entwickelte *Zuggurtmodell für massive Bauteile (ZGMmB)* anpasst. Dieses baut auf dem Zuggurtmodell auf, berücksichtigt zusätzlich aber den Wirkungsbereich der Bewehrung und ein phänomenologisch abgesichertes Modell für die Kraftausbreitung in den Kernbereich des Bauteils. Diese Definitionen ermöglichen es, Einrisse und Trennrisse rechnerisch (trotz des verschmierten FE-Ansatzes) zu unterscheiden und damit auch bei Anwendung von Schalenelementen deutlich höherwertigere Berechnungen durchführen zu können. Die Wahl der Art der FE-Modellierung ist insofern bedeutsam, als damit große Strukturen mit komplexen Lager- und Randbedingungen problemlos erfasst werden können.

Die Anwendbarkeit des Modells wird anhand einiger Versuchsnachrechnungen belegt. Darüber hinaus wird das Berechnungsmodell auf ein konkretes Beispiel angewendet, wobei die Zwangbeanspruchungen infolge Abkühlung sowie die Mindestbewehrung und der Einfluss der Bettung durch den Baugrund betrachtet werden. Die gezeigten Ergebnisse belegen die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Art der Modellierung und dürften deshalb insbesondere auch für die Praxis von Interesse sein.

Hamburg, 2014

Prof. Dr. Viktor Sigrist

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Ermittlung der wirksamen Zwangbeanspruchung in langen fugenlosen Kaianlagen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der besonderen Rissbildung in den massigen Stahlbetonüberbauten. Hierfür werden spezielle Rechenmodelle entwickelt, mit denen das nichtlineare Baustoff- und Verbundverhalten wirklichkeitsnah abgebildet wird.

Nach einer Einführung in die Entwicklung der Containerschifffahrt werden unterschiedliche Konstruktionsweisen für Kaianlagen mit fugenlosen Überbauten vorgestellt. Als Grundlage für die Entwicklung mechanischer Berechnungsmodelle werden anschließend die baustofflichen Eigenschaften von Beton und Stahl beschrieben sowie deren Zusammenwirken im Verbundbaustoff Stahlbeton erläutert. Es wird weiter auf die maßgebenden Einwirkungen eingegangen, die während der Herstellung und der Nutzung einer fugenlosen Kaianlage aus Stahlbeton zu berücksichtigen sind.

Aus dem *Zuggurtmodell* von Marti et al. (1999), einem anerkannten Modell zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens von schlanken Stahlbetontragwerken, wird eine analytische *Tension-Stiffening-Formulierung* abgeleitet. Diese kann als Baustoffbeziehung in Finite-Elemente-Modelle mit verschmiertem Rissansatz implementiert werden.

Da bei Kaianlagen die Bauteilabmessungen wesentlich größer sind als im üblichen Hochbau, stellt sich hier ein abweichendes Rissverhalten ein. Bei solchen als „massig“ bezeichneten Bauteilen treten neben den Trennrissen auch so genannte Einrisse auf (Sekundärrissbildung), deren Ausbreitung sich auf die bewehrten Randbereiche (wirksame Zugzone) beschränkt, so dass sie den Gesamtquerschnitt nicht durchtrennen. Hierfür wird in dieser Arbeit das auf physikalischen Zusammenhängen basierende *Zuggurtmodell für massige Bauteile* (ZGMmB) entwickelt, das diese Besonderheiten im Rissverhalten abbilden kann. Aufbauend auf den Erkenntnissen für schlanke Stahlbetonbauteile, wird aus dem ZGMmB eine *Tension-Stiffening-Formulierung für massige Bauteile* abgeleitet. Diese ermöglicht Finite-Elemente-Berechnungen langer fugenloser Kaianlagen im Gesamtmodell, ohne dabei den Verbund zwischen der Bewehrung und dem Beton explizit erfassen zu müssen.

In einer umfangreichen Beispielrechnung werden schließlich die zuvor entwickelten Modelle exemplarisch angewendet und die Zwangbeanspruchung im fugenlosen Kai-mauerüberbau unter Berücksichtigung der Interaktion mit der Gründung eingehend untersucht.

Abstract

The thesis contributes to the determination of the effective restraint action in large jointless quays. The focus is on the particular cracking behaviour of the voluminous reinforced concrete superstructures. For this purpose special mechanical models are developed. With those the non-linear material behaviour and bond relation are mapped to reality.

After an introduction about the development of container shipping different types of quays with jointless superstructure are presented. Then the material properties of concrete and steel are described, and their interaction in composite building material is explained in detail. Further, the relevant impacts during casting and use of jointless quays made of reinforced concrete are discussed. From the *Tension Chord Model* of Marti (1999), a recognized model for the description of the load-bearing and deformation behaviour of slender reinforced concrete structures, an analytical *Tension Stiffening Formulation* is derived. This can be implemented as a material relationship in finite element models with smeared crack approach.

Since the component dimensions in quays are much larger than in normal building construction, here a different cracking behavior is observable. While the crack pattern of slender concrete members subjected to tension comprises several through-cracks with moderate crack spacing and widths, the cracking behaviour of massive concrete members is characterized by the development of only few through-cracks accompanied by an assembly of shallow cracks. The propagation of these secondary cracks is limited to the reinforced edge areas (effective tensile zone), so they do not disrupt the total cross section. To account for this special cracking behaviour the *Tension Chord Model for Massive Concrete Members (ZGMmB)* is developed which explains the origin of primary and secondary cracks using mechanical relations. Based on the findings of slender reinforced concrete members a tension stiffening formulation for massive components is derived from the ZGMmB. This allows for finite element calculations of long jointless quays without modelling the bond between concrete and reinforcement explicitly.

Finally, the previously developed models are applied in a comprehensive sample calculation to examine the restraint action in the jointless concrete superstructure of a piled quay taking into account the interaction with the foundation.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vi
Symbolverzeichnis	xi
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2 Kaikonstruktionen	7
2.1 Kaianlagen für Containerterminals	7
2.1.1 Einleitung	7
2.1.2 Schwergewichtskonstruktionen	9
2.1.3 Spundwandbauweise	11
2.1.4 Pfahlrostkonstruktionen	13
2.1.5 Ortbetonbauweise	16
2.2 Fugenlose Kaianlagen aus Stahlbeton	19
2.2.1 Konventionelle Bauweise mit Dehnfugen	19
2.2.2 Fugenlose Kaianlagen in norddeutschen Seehäfen	20
2.2.3 Internationale Beispiele für fugenlose Kaianlagen	25
3 Baustoffe und Einwirkungen	27
3.1 Einleitung	27
3.2 Beton	28
3.2.1 Beton unter einachsiger Zugbeanspruchung	28
3.2.2 Beton unter einachsiger Druckbeanspruchung	30
3.2.3 Beton unter mehrachsiger Beanspruchung	33
3.3 Bewehrungsstahl	34
3.4 Verbund	36
3.5 Rissbildung im Stahlbeton	38

3.6	Einwirkungen auf Kaikonstruktionen	45
3.6.1	Eigenspannungen, innerer und äußerer Zwang	45
3.6.2	Beanspruchung aus der Herstellung des Betons	47
3.6.3	Klimatisch bedingte Temperatureinwirkungen	50
3.6.4	Einwirkungen aus dem Hafenbetrieb	50
4	Numerische Berechnung von Stahlbetontragwerken	53
4.1	Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode	53
4.1.1	Allgemeines	53
4.1.2	Nichtlineare Modelle zur Berechnung von Stahlbeton	56
4.1.3	Analytische Tension-Stiffening-Formulierung	60
4.1.4	Modifizierte Tension-Stiffening-Formulierung	64
4.1.5	Validierung der MTST-Formulierung	67
4.1.6	Zusammenfassung	71
4.2	Rissbildung in massigen Stahlbetonbauteilen	71
4.2.1	Besonderheiten massiger Bauteile	71
4.2.2	Wirksame Betonzugfestigkeit im Bauwerk	79
4.2.3	Mindestbewehrung und Rissbreitenbegrenzung	88
4.3	Zuggurtmodell für massige Bauteile	90
4.4	Mittleres Bauteilverhalten im ZGMmB	103
4.5	Schlussfolgerungen	109
5	Tragverhalten und Rissbildung bei fugenlosen Kaianlagen	113
5.1	Anwendungsbeispiel: Predöhlkai Hamburg	113
5.2	Modellbildung	116
5.2.1	FE-Modell des Kaimauerüberbaues	116
5.2.2	Boden-Bauwerk-Interaktion	118
5.2.3	Einwirkungen auf die Kaianlage	123
5.3	Auswertung der Ergebnisse	126
5.3.1	Rissbreiten	126
5.3.2	Einfluss der Bettung auf das globale Tragverhalten	128
5.3.3	Schlussfolgerungen	130
5.4	Parameteruntersuchungen	132
5.4.1	Einfluss der wirksamen Betonzugfestigkeit	132
5.4.2	Mittlerer Einrissabstand	134
6	Zusammenfassung und Ausblick	137
6.1	Zusammenfassung	137

6.2 Diskussion und Ausblick	140
A Klimatisch bedingte Temperaturprofile	143
B Übersicht der Modellparameter	145
Literaturverzeichnis	149