

Modeling the Torsional Behaviour of Segmented Concrete Towers based on Warping Theory

DISSERTATION

Vorgelegt an der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

von
Fabian Johannes Klein, M. Sc.
2023

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx Institute of Concrete Structures <i>Technische Universität Dresden</i>
Korreferent:	Prof. Aurelio Muttoni, PhD Structural Concrete Laboratory <i>École Polytechnique Fédérale de Lausanne</i>
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Löhnert Institute of Mechanics and Shell Structures <i>Technische Universität Dresden</i>
Kommissionsmitglied:	Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann Institute for Steel and Timber Constructions <i>Technische Universität Dresden</i>
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske Institute for Structural Analysis <i>Technische Universität Dresden</i>
Einreichung:	27.02.2023
Disputation:	15.12.2023

Abstract

English

The development of renewable energies and the desired independence from fossil energy sources are essential for security of supply. Wind energy turbines already account for the largest share of electricity generation in Germany. As part of modular precast concepts for wind turbine towers, vertical joints now divide the segments into even smaller components. This significantly reduces transport costs and installation time. The load-bearing behaviour of these segmented concrete towers is very complex due to the horizontal and vertical joints and the resulting restrained cross-sectional deformations. In the case of thin-walled half-shell segments now used in modern wind turbine towers, cross-sectional distortion and warping can significantly reduce the load-bearing capacity. Even under pure torsional loading, there is a decrease in the horizontal joint load capacity compared to conventional thin-walled circular rings. However, there are currently no design approaches for this new construction, as the structural behaviour is neither fully understood nor reliably modeled. This cumulative dissertation deals with the modeling of the torsional behaviour of segmented concrete towers for wind turbines based on the warping theory of thin-walled bars. Transferring the complex mechanical relationships into an understandable and comprehensible bar model allows differentiated evaluation approaches. In the case of segmented concrete towers, this leads to the long-term realization of even more innovative, higher and safer tower concepts. With this calculation approach, the practical engineer always remains in control of his or her own actions. Accordingly, the results can be used as a basis for evaluation without much need for interpretation, e.g. to assess the effect of restrained sectional warping on the distribution of normal stresses. The successive derivation of an engineering approach is presented using mechanical modeling concepts and non-linear numerical investigations as well as further (experimental) investigations. This provides the basis for future validation with carefully conducted tests on actual concrete segments.

The core of the dissertation consists of four peer-reviewed papers that have already been published in scientifically proven journals (*Structural Concrete* and *Engineering Structures*). The framework story begins by explaining the scientific classification and relevance of the topic. The current state of the art is the basis for deriving research gaps and objectives, as well as a framework of hypotheses to be evaluated. Subsequently, the four papers are placed in the overall context of modeling the torsional behaviour of segmented concrete towers. Paper [A] deals with experimental investigations, analysis and evaluation of the joint behaviour of modular towers in large-scale tests. The gain of knowledge about the uneven distribution of forces in the horizontal joints also has a significant influence on the design models of the half-shell structure. Papers [B] and [C] present an engineering approach to determine the torsional behaviour of segmented concrete towers based on the warping theory of thin-walled bars. This calculation approach includes two methods for evaluating the internal forces of a half-shell pair and the associated stress calculation. A practical analysis method using an analogy to higher order beam theory is introduced to

overcome the difficulties of numerical calculation by the finite element method. In this way, the load-bearing behaviour can be described as accurately as possible and the decisive influencing parameters can be isolated. Paper [D] presents the further development and the numerical and analytical validation of the engineering model for the entire tower structure. The influence of the adjacent segments on the torsional behaviour of the assembled half-shell tower is implemented in the model approach. This is based on analytical modeling using spring systems and extensive numerical investigations. Additional studies relate to the surface condition of ground concrete segments, the preliminary investigations on aluminium segments, the initial preliminary considerations on a coherent test design and the effects of multiple vertically divided segments. Finally, the findings are summarized and the overall result of the research is described by evaluating the hypotheses. In addition, the most important perspectives for future research and transfer achievements are pointed out.

The presentation of the overall results of this dissertation impressively shows that the successive extension of the model approach leads to a more precise and differentiated isolation of the influencing variables. This improves the realistic representation of the torsional behaviour of assembled half-shells based on the warping theory of thin-walled bars, taking the application limits into account. However, the simplicity and applicability of the engineering model are not compromised by the continuous development. The analytically proven and numerically validated dependence on the slenderness ratio of the segments results in a better understanding of the load transfer in the modular precast structure. A much simplified internal force calculation can be used as the basis for the reinforced concrete design by applying the analogy to the tension rod under bending stress. The division of the load components provides a better understanding of the force flow of the modular structure. Accordingly, the combination of the tension rod analogy, the load redistribution principle and the modified deformation approach, taking the adjacent segments into account, allow the user to isolate and evaluate the influencing parameters of the torsional behaviour with little effort. Finally, in addition to model approaches and detailed numerical simulations, accompanying experimental investigations are required, and this dissertation provides the basis for a coherent and well-conceived experimental program.

Keywords: Warping torsion analysis, torsional bar model, concrete segment towers, vertical dry joint, modular design concepts, wind energy.

Deutsch

Der Ausbau der erneuerbaren Energien und die angestrebte Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern sind für die Versorgungssicherheit unerlässlich. Den größten Anteil an der Stromerzeugung haben in Deutschland schon heute die Windenergieanlagen. Im Rahmen modularer Fertigteilkonzepte für Türme von Windenergieanlagen teilen mittlerweile Vertikalfugen die Segmente in immer kleinere Komponenten. Auf diese Weise können die Transportkosten und der Montageaufwand erheblich reduziert werden. Das Tragverhalten dieser segmentierten Betontürme ist aufgrund der horizontalen und vertikalen Fugen sowie der daraus resultierenden behinderten Querschnittsverformungen sehr komplex. Bei dünnwandigen Halbschalensegmenten, die inzwischen im modernen Turmbau für Windenergieanlagen eingesetzt werden, können Querschnittsverzerrungen und -verwölbungen die Tragfähigkeit erheblich beeinträchtigen. Bereits bei einer reinen Torsionsbelastung ist im Vergleich zu konventionellen dünnwandigen Kreisringen eine Abnahme der horizontalen Fugentragfähigkeit zu erkennen. Es existieren zurzeit jedoch noch keine Bemessungsansätze für die neuartige Konstruktion, da weder das Strukturverhalten vollständig verstanden ist, noch verlässlich modelliert werden kann. Diese kumulative Dissertation befasst sich daher mit der Modellierung des Torsionstragverhaltens von segmentierten Betontürmen für Windenergieanlagen auf Basis der Wölbtheorie dünnwandiger Stäbe. Ziel ist die realitätsnahe Abbildung des Torsionstragverhaltens der hybriden Turmkonstruktion durch die sukzessive Entwicklung eines Ingenieurmodells. Die Übertragung der komplexen mechanischen Zusammenhänge in ein verständliches Stabmodell ermöglicht differenzierte Bewertungsansätze. Dies führt im Anwendungsfall der segmentierten Betontürme langfristig zur Realisierung noch innovativerer, höherer und sicherer Turmkonzepte. Mit diesem Berechnungsansatz behalten die in der Praxis tätigen Ingenieur:innen stets die Kontrolle über das eigene Handeln. Die Ergebnisse können ohne besonderen Interpretationsbedarf als Bewertungsgrundlage verwendet werden, um z. B. die Auswirkungen des Phänomens der behinderten Querschnittsverwölbung auf die Verteilung der Normalspannungen zu beurteilen. Ausgehend von mechanischen Modellvorstellungen und nichtlinearen numerischen Untersuchungen sowie weiteren (experimentellen) Untersuchungen wird daher die sukzessive Herleitung eines ingenieurmäßigen Ansatzes vorgestellt. Dieser dient als Grundlage für die zukünftige Validierung im Zuge sorgfältig durchzuführender Versuche an Betonsegmenten.

Den Kern der Dissertation bilden vier begutachtete Fachartikel, die bereits in wissenschaftlich anerkannten Fachzeitschriften (*Structural Concrete* und *Engineering Structures*) veröffentlicht wurden. Die Rahmenhandlung erläutert zu Beginn die wissenschaftliche Einordnung und Relevanz der Thematik. Der aktuelle Stand der Technik ist die Grundlage für die Ableitung von Forschungslücken und Zielsetzungen sowie eines zu evaluierenden Hypothesengerüsts. Darauf aufbauend erfolgt die Einordnung der vier Fachbeiträge in den Gesamtkontext der Modellierung des Torsionsverhaltens segmentierter Betontürme. Der Artikel [A] befasst sich mit experimentellen Untersuchungen und der Analyse und Bewertung des Fugentragverhaltens modularer Türme in Großversuchen. Die gewonnenen Erkenntnisse über die ungleichmäßige Kraftverteilung in den Horizontalfugen haben auch einen erheblichen Einfluss auf die Bemessungsmodelle der Halbschalenkonstruktion. In den Artikeln [B] und [C] wird ein ingenieurmäßiger Ansatz zur Ermittlung des Torsionsverhaltens von segmentierten Betontürmen vorgestellt, der auf der Wölbtheorie dünnwandiger Stäbe basiert. Dieser Berechnungsansatz beinhaltet zwei Methoden zur Ermittlung der inneren Schnittgrößen eines Halbschalenpaares und der zugehörigen Spannungsberechnung. Es wird eine praktikable Analysemethode in Analogie zur Balkentheorie höherer Ordnung eingeführt, um die Schwierigkeiten bei der numerischen Berechnung mit der Finiten Elemente Methode zu bewältigen. Damit kann das Tragverhalten möglichst genau beschrieben und die maßgeblichen Einflussparameter isoliert werden. In Artikel [D] wird die Weiter-

entwicklung sowie die numerische und analytische Validierung des Ingenieurmodells für die gesamte Turmstruktur vorgestellt. Der Einfluss der Nachbarsegmente auf das Torsionsverhalten des zusammengesetzten Halbschalenturms wird in den Modellansatz implementiert. Dies erfolgt auf der Grundlage analytischer Modellvorstellungen unter der Verwendung von Federsystemen und umfangreicher numerischer Untersuchungen. Ergänzende Betrachtungen umfassen die Oberflächenbeschaffenheit der geschliffenen Betonsegmente, die Voruntersuchungen an Aluminiumsegmenten, die ersten Vorüberlegungen zu einem kohärenten Versuchskonzept und die Auswirkungen von mehrfach vertikal geteilten Segmenten. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und das übergreifende Gesamtergebnis der Forschung wird über die Bewertung der Hypothesen beschrieben. Darüber hinaus werden die wichtigsten Perspektiven für zukünftige Forschungs- und Transferleistungen aufgezeigt.

Die Darstellung des Gesamtergebnisses dieser Dissertation zeigt eindrucksvoll, dass die sukzessive Erweiterung des Modellansatzes zu einer genaueren und differenzierteren Isolierung der Einflussgrößen führt. Dies verbessert unter Berücksichtigung der Anwendungsgrenzen die realitätsnahe Abbildung des Torsionsverhaltens zusammengesetzter Halbschalen auf Basis der Wölbtheorie dünnwandiger Stäbe. Die kontinuierliche Weiterentwicklung geht nicht zulasten der Einfachheit und Anwendbarkeit des Ingenieurmodells. Dementsprechend führt die analytisch nachgewiesene und numerisch validierte Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad der Segmente zu einem besseren Verständnis der Lastabtragung in der modularen Fertigteilstruktur. Die Anwendung der Analogie zum biegebeanspruchten Zugstab ermöglicht eine wesentlich vereinfachte Schnittgrößenermittlung als Grundlage für die Stahlbetonbemessung. Ein besseres Verständnis des Kraftflusses in der modularen Konstruktion wird durch die Aufteilung der Lastkomponenten erreicht. Die Zusammenführung der Ansätze aus Zugstabanalogie, Lastumverteilungsprinzip und modifiziertem Verformungsansatz unter Berücksichtigung der Nachbarsegmente ermöglichen es den Anwender:innen, die Einflussparameter des Torsionsverhaltens ohne großen Aufwand zu isolieren und zu bewerten. Schließlich sind neben den Modellansätzen und detaillierten numerischen Betrachtungen auch begleitende experimentelle Untersuchungen erforderlich, wobei diese Dissertation die Grundlage für ein schlüssiges und durchdachtes Versuchsprogramm darstellt.

Schlagworte: Wölbkrafttorsion, Torsionstragmodell, Betonsegmentturm, vertikale Trockenfuge, modulare Bauweise, Windenergie.