

Torsionstragverhalten eines Segmentturms mit alternativer Fugenausbildung

Torsionstragverhalten eines Segmentturms mit alternativer Fugenausbildung

Eine Weiterentwicklung der zurzeit gängigsten Herstellungsart von Segmenttürmen für Windenergieanlagen stellt die veränderte Ausbildung der entstehenden Fugen dar. Die seit vielen Jahren für die Horizontalfugen verwendete Trockenfuge, welche ohne eine Ausgleichsschicht durch Epoxid- oder Zementmörtel auskommt, soll auch für die senkrechten Fugen verwendet werden. Die Ebenheit in den Fugen wird über eine hochpräzise CNC-Fräse hergestellt und dadurch die Dichtigkeit der Konstruktion sowie die flächige Kraftübertragung sichergestellt. Die in diesem Artikel durchgeführten numerischen Untersuchungen zeigen die durch die neuartige Konstruktion entstehenden Veränderungen in der Lastabtragung und der Tragfähigkeit. Für diese Konstruktionsart existieren derzeit keine allgemeingültigen Bemessungsansätze, welche die Veränderung des Querschnitts vom geschlossenen Kreisringsegment zu zwei „offenen“ Halbkreisringsegmenten berücksichtigen.

1 Einleitung

Der stetig wachsende Bestand von Windenergieanlagen (WEA) führt dazu, dass neue Aufstellflächen für die Anlagen ergründet werden müssen. Um auch im Landesinneren, also entfernt von küstennahen Regionen, mit hohen Windstärken die Leistungsfähigkeit der Turbinen nutzen zu können, sind große Turmhöhen erforderlich. Nur so können auch in Schwachwindgebieten Windgeschwindigkeiten erreicht werden, die eine wirtschaftliche Stromerzeugung ermöglichen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass durch die Erhöhung des Turms um einen Meter der Jahresstromertrag um $\sim 1\%$ erhöht werden kann [1]. Die steigenden Turm- und Rotorblattgrößen erfordern eine Anpassung der Turmkonstruktionen. Wie wichtig die nähere Betrachtung der Tragstruktur ist, zeigt auch der Anteil der Kosten, die für den Bau entstehen. Während der Turm in den anfänglichen Phasen der Windenergienutzung lediglich als Verbindung der Anlage zum Fundament angesehen wurde, haben die Türme von aktuellen WEA einen Kostenanteil von bis zu 45% des gesamten Bauwerks [2]. Aus diesem Grund werden für den WEA-Bau immer neue, wirtschaftlichere Lösungen gesucht. Als die zurzeit am häufigsten verwendete Bauweise hat sich die sogenannte hybride Bauweise von Türmen etabliert. Der Hybridturm verbindet die positiven Eigenschaften von Stahl- und Betonrohrtürmen. Dazu werden die ersten 60–70% des Turms als Spannbetonturm hergestellt, auf den im oberen Bereich eine Stahl-

Torsional behavior of a segment tower with an alternative joint design

Based on the most commonly constructed segment wind turbine towers at present, a further developed design of joints is described in this article. The dry joint which works without balancing layer of epoxy or cement mortar has been applied to wind turbine towers in the horizontal direction for many years. It should also be applied in the vertical direction. The evenness in the joint will be assured with the help of a high-precision milling machine. Therefore, the compactness and force transmission of the construction can be guaranteed. However, a decrease of structural resistance is still observed through numerical simulation. By changing the integral cross section to an open half-ring segment, the weak part can be easily pointed out in the structure design itself and also by current design approaches. There are currently no suitable theories or regulations for this kind of structural design.

sektion aufgesetzt wird [3]. Diese Bauweise stellt für Türme mit besonders großen Nabenhöhen eine wirtschaftliche Bauweise dar. Die Segmente für den unteren Spannbetonbereich des Turms können durch deren senkrechte Teilung in Halbschalensegmente mit großen Gesamtdurchmessern auf die Baustelle geliefert werden [4]. Die geteilten Segmente des Turms werden durch verschiedene herstellerepezifische Methoden kraftschlüssig verbunden, was einen entsprechenden Aufwand auf der Baustelle bedeutet. Nachfolgend soll diese Verbindung der senkrechten Fugen weiter betrachtet, die aktuellen Verbindungen dargestellt und die Ausbildung einer trockenen Fuge in diesem Bereich angedacht werden. Der Gedanke zur Herstellung eines Turms mit nicht kraftschlüssig verbundenen senkrechten Fugen kommt aus der Überlegung, dass die Fugen durch die angrenzenden Segmente und die vorherrschende Vorspannung in Längsrichtung des Turms gehalten werden. Eine horizontale Verformung wird ebenfalls durch die Reibung in den Fugen unterbunden. Zur Betrachtung dieser Konstruktionsart wird der im Bild 1 dargestellte Turmausschnitt numerisch untersucht und die Tragfähigkeiten in Bezug auf die Biege- und Torsionsbeanspruchungen bestimmt. Die untersuchten Biegemomente entstehen durch die regulären Windbelastungen auf die Turbine und den Turm der WEA. Infolge einer schrägen Anströmung oder durch ungleichmäßig gepitchte Flügel kommt es zusätzlich zu bemessungsrelevanten Torsionsmomenten [4].

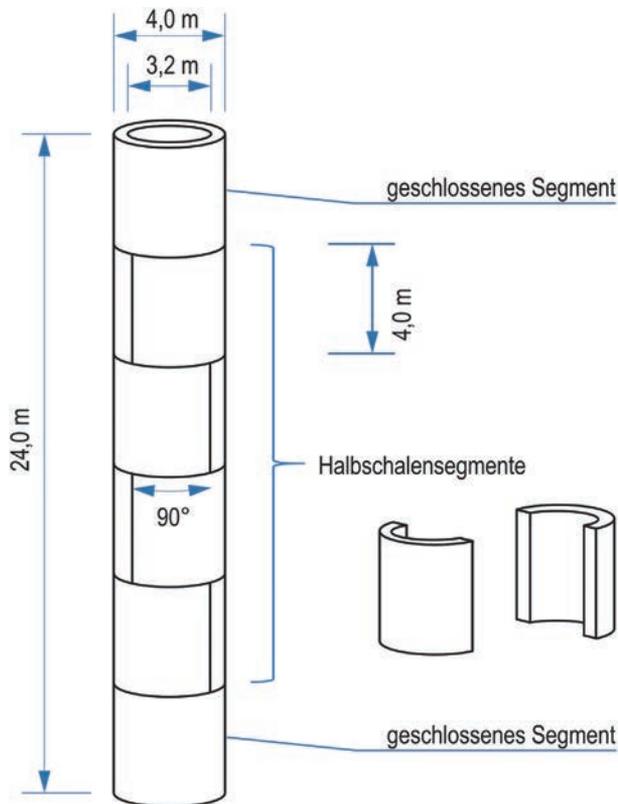


Bild 1 Betrachteter Turmausschnitt der numerischen Untersuchungen
 Considered tower details of the numerical investigations

2 Stand des Wissens

2.1 Unterscheidung von Fugen

Den Fugenbereichen im Segmentbau von WEA ist ein besonderes Augenmerk zuzuweisen. Je nach Lage der Fuge sowie deren Beanspruchung können sie unterschiedlich ausgeführt werden. Während Horizontalfugen bei der Ausführung mit Fertigteilen grundsätzlich entstehen, kommen Vertikalfugen nur dann zur Anwendung, wenn eine senkrechte Teilung der Segmente transportbedingt erforderlich ist [5].

2.2 Fugenausbildung horizontal

In der Regel werden die Horizontalfugen aufgrund des besseren Trag- und Verformungsverhaltens gegenüber Fugen mit Konsolen [6, 7] mit ebenen Kontaktflächen hergestellt. Es kann zwischen nassen und trockenen Fugen unterschieden werden. Bei den Nassfugen wird in der Regel eine bis zu 3 mm dicke Schicht aus Feinmörtel auf Epoxidharz- oder Zementmörtelbasis aufgebracht, bevor der Turm vorgespannt wird. Dies hat den Vorteil, dass Imperfektionen durch das Herauspressen des Verfüllmaterials ausgeglichen werden können und es vor der Aktivierung der Reibung zu einem adhäsiven Traganteil in der Fuge kommt. Aufgrund der steigenden Produktionsgenauigkeit der Fertigteilsegmente, zum Beispiel durch den Einsatz von hochpräzisen CNC-Fräsen, werden aktuell Trockenfugen bevorzugt eingesetzt. Hierbei wird auf ein Verfüllmaterial zwischen den Segmenten komplett

verzichtet, was eine nahezu witterungsunabhängige schnelle Montage auf der Baustelle gewährleistet. Die Vorspannung wird in der Regel verbundlos geführt. Die Lasten aus Torsion und Querkraft werden über die Reibung in der Fugenfläche übertragen. Diese entsteht in Abhängigkeit von der Rauigkeit der Kontaktfläche durch die Normalspannungen senkrecht zur Fuge infolge Vorspannung und Eigengewicht. Zur Kostenreduktion sowie aufgrund des mittelspannungsabhängigen Ermüdungsverhaltens des Betons wird die Vorspannung möglichst gering gehalten [5, 8]. Dadurch kann es im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) zum Aufklaffen der Fugen kommen.

2.3 Fugenausbildung vertikal

Für den Fall, dass transportbedingt die Verwendung von Halb- oder Drittelkreisringsegmenten erforderlich wird, entstehen zusätzliche Vertikalfugen. Die bautechnische Ausführung beruht in der Regel auf kraftschlüssigen Verbindungen. Diese können mithilfe von Schrauben hergestellt werden. Hierzu werden spezielle Anschlusskonsolen bereits bei der Herstellung in die Fertigteile einbetoniert und auf der Baustelle miteinander verschraubt. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von bewehrten Vergussfugen. Dabei wird im Werk eine Schlaufenbewehrung in die Stirnseite der Segmente einbetoniert. Der entstehende Freiraum beim Zusammensetzen der Segmente wird auf der Baustelle ausbetoniert. So entsteht ein annähernd monolithisches Bauteil. Die Wahl der Konstruktion ist an dieser Stelle größtenteils herstellerabhängig [9].

2.4 Torsionstragverhalten von trockenen Fugen

Für die derzeit übliche Fugenausbildung an Kreissegmenten wurden in [10] die Unterschiede der derzeit verwendeten Theorien und einer numerischen Simulation in Bezug auf das Torsionstragverhalten dargestellt. Weiter wurden die Schwächen an den bestehenden Bemessungsmodellen in Bezug auf reibbehaftete Fugen erläutert. Zu den dort betrachteten Theorien von BREDT und SAINT-VENANT ist für die nachfolgenden Untersuchungen auch die Theorie der Wölbkrafttorsion zu beachten. Bei den betrachteten Halbschalen handelt es sich nicht um wölbfreie Querschnitte. Somit ist mit einer Verwölbung und einer damit einhergehenden Axialverschiebung u_x zu rechnen. Diese Verschiebungen erzeugen zusätzliche Normalspannungen in der Fuge und müssen zwingend berücksichtigt werden (Bild 2).

3 Numerische Simulation

3.1 Modellbeschreibung

Das Berechnungsmodell für den Turmausschnitt wurde im Programmsystem ANSYS als Volumenmodell erstellt. Lediglich am Turmkopf kamen vereinfacht Schalenelemente zur Lasteinleitung zum Einsatz. Die Volumenele-

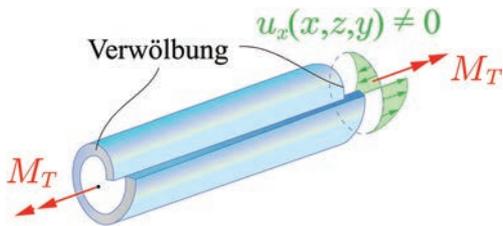


Bild 2 Verwölbung eines offenen Stabquerschnitts nach [11]
Warping of an open cross-section according to [11]

mente zur Generierung der Segmente wurden über SOLID185 Elemente mit acht Knoten beschrieben. Über die Wandstärke der Segmente wurden je vier Elemente als trapezförmige Prismen modelliert, um den Kreisring möglichst gleichmäßig generieren zu können. Über die Höhe eines Segments wurden 20 Elemente angeordnet und über den Umfang eine Teilung von 144 Elementen vorgenommen. Der für die Untersuchungen gewählte Beton C70/85 wurde vereinfachend als linear-elastisches Material angenommen, da das Hauptaugenmerk auf dem Tragverhalten der Fugen lag. Die Spannungsauslastung des Betons wurde in dieser Untersuchung nicht weiter betrachtet.

Zur Untersuchung des Verhaltens ohne senkrechte Fugen wurden sechs aufeinandergesetzte Stahlbetonringsegmente mit einem Außendurchmesser von 4,0 m, einer Wandstärke von 0,4 m und der Höhe eines Segments von 4,0 m in Anlehnung an Bild 1 simuliert. Die Unterseite des ersten Segments ist im Berechnungssystem durch direkte Lagerungen starr gehalten. An der Oberseite des Turmausschnitts wurde eine starre Scheibe mit SHELL181-Elementen (Schalenelemente) zur Einleitung der Belastungen generiert. Diese wurde über Kopplungsbedingungen gelenkig an der Mittellinie des oberen Ringsegments angeschlossen. Der Kontakt zwischen den Segmenten wurde über sogenannte Master- (TARGE170) und Slave-Elemente (CONTA173) generiert. Die Kontaktbedingungen zwischen den Segmenten wurden als „surface-to-surface“-Kontakte definiert und beschreiben das Tragverhalten senkrecht zur Fuge als Druckkontakt und in Fugenebene über das Coulombsche Reibgesetz (Bild 3).

Das erweiterte Modell mit alternativer Fugenausbildung wurde aus dem bestehenden Modell weiterentwickelt. Zusätzlich zu den vorhandenen horizontalen Fugen wurden die mittleren vier Segmente durch senkrechte Fugen ergänzt (vgl. Bild 1).

Die Teilung der Segmente erfolgte je Abschnitt um 90° versetzt, sodass die Fugenhöhe jeweils oberhalb und unterhalb durch die angrenzenden Segmente begrenzt wurde. Zur Modellerstellung kamen somit keine Kreisringsegmente, sondern je zwei Halbschalen pro Segmentabschnitt zum Einsatz. Die Kontaktbedingungen zwischen den Halbschalen wurden analog zu den horizontalen Fugen ebenfalls über Master- und Slave-Elemente implementiert.

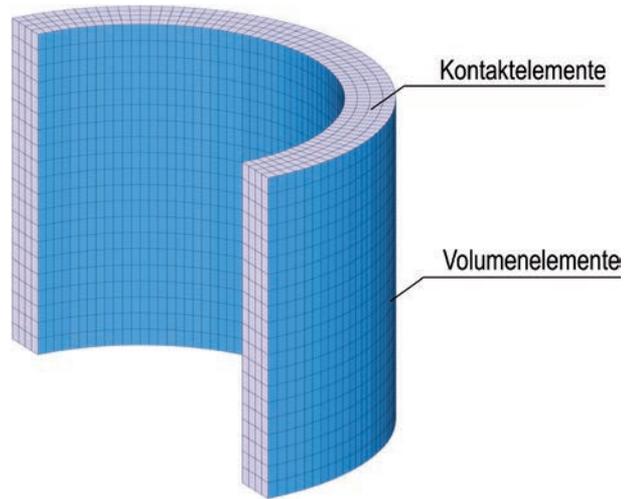


Bild 3 Teilsegment des numerischen Berechnungsmodells
Part of the 3D FE model with solid elements

Durch die hier erforderliche Anwendung von Kontaktelementen erfolgte die Simulation als nichtlineare Berechnung. Jedes einzelne Element erfährt durch eine veränderte Beanspruchungssituation eine Veränderung des Kontaktstatus, was eine große Anzahl von Iterationen erforderlich und die Berechnung entsprechend aufwendig macht. In den Kontakten wurde der Reibbeiwert als signifikante Größe zu 0,5 nach dem Eurocode 2 [12] definiert. Die Berechnungen wurden zusätzlich unter der Berücksichtigung großer Verformungen geometrisch nichtlinear durchgeführt. Die Lasten wurden als äußere Lasten aufgebracht und wirkten im Zentrum der steifen Scheibe am Turmkopf auf das System ein. Die Reihenfolge der aufzubringenden Beanspruchungen ergibt sich aus der Konstruktion. So wurde im ersten Lastschritt die Vorspannung als signifikante Last erzeugt, was das Aufbringen weiterer Lasten erst ermöglicht. Die Vorspannung wurde in Anlehnung an das übliche Verfahren bei Windenergieanlagen zu 25 % der Betondruckfestigkeit gewählt. Bei der gegebenen Segmentgröße, Betonfestigkeit und Schalendicke ergaben sich für das System 80 MN Vorspannkraft. Im zweiten Schritt folgte das Biegemoment als Einzelmoment und im letzten Schritt das Torsionsmoment, ebenfalls als Einzelmoment im Zentrum der Scheibe am Turmkopf. Das Torsionsmoment wurde so weit gesteigert, bis es zu einem Abgleiten der Fuge kam und die Berechnung somit nicht mehr konvergierte.

3.2 Tragverhalten unter Biegung und Längskraft

In einer ersten Untersuchung wurde das Biegeverhalten der Turmkonstruktion mit und ohne Vertikalfugen betrachtet. Dazu wurde zunächst die Vorspannkraft aufgebracht und anschließend das Biegemoment sukzessive bis zu einem Biegemoment von 100 MNm gesteigert. Bei dieser Biegebelastung öffnet sich die Horizontalfuge auf 50 % der Fugenfläche. Für den Turm mit senkrechten Fugen bedeutet das im ungünstigsten Fall, dass ein Teil der Segmente alle horizontalen Lagerpunkte beziehungsweise den

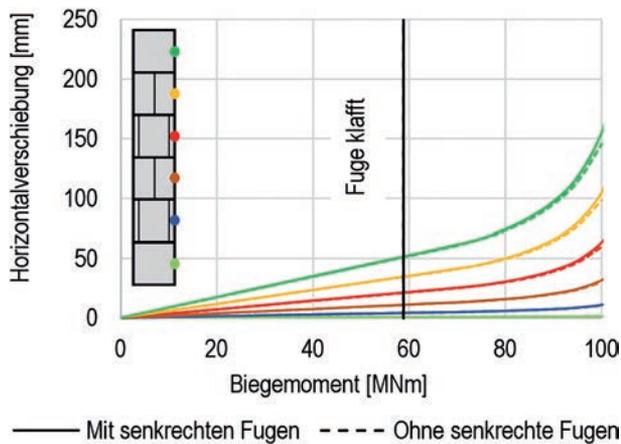


Bild 4 Vergleich der Biegesteifigkeiten der Türme mit und ohne senkrechte Fugen
Comparison of bending stiffnesses of towers with and without vertical joints

Reibkontakt verliert. Da das System ohne Eigengewicht berechnet wurde, kommt es zu Starrkörperverschiebungen und die Berechnung bricht bei einem Biegemoment von 104 MNm ab. In der Realität sollte es trotz alternativer Fugenausbildung also möglich sein, ein größeres Biegemoment als die festgestellten 104 MNm aufzunehmen, wobei die Klaffung der Fuge im Grenzzustand der Tragfähigkeit auf 50% beschränkt ist. Das Bild 4 stellt die Horizontalverschiebungen der Segmente bei steigendem Biegemoment dar. Im Verformungsverhalten infolge eines angreifenden Biegemoments kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Türmen mit und ohne offene Vertikalfugen festgestellt werden. Wie bereits in [10] gezeigt wurde, steigen die Verformungen bis zum Klaffen der Fugen linear an. Durch das Öffnen der Kontaktzonen kommt es zu einer überproportionalen Verformungszunahme.

Dieses Verhalten konnte sowohl beim Turm ohne als auch mit senkrechten Fugen beobachtet werden. Im klaffenden Bereich der Horizontalfugen kommt es bei dem System mit senkrechten Fugen lediglich zu einer minimalen Zunahme der Horizontalverformungen, welche jedoch im Verhältnis zur Gesamtverformung nicht relevant sind.

3.3 Tragverhalten unter zusätzlicher Torsionsbeanspruchung

Zum Vergleich der beiden Konstruktionsarten wurden die Berechnungen unter Torsionsbeanspruchung bei ansteigendem Biegemoment und der daraus resultierenden Spannungumlagerung in den Segmentfugen sowie dem anschließenden Klaffen der Fugen durchgeführt. Die Berechnungen wurden, wie in Abschn. 3.1 beschrieben, durch das Abgleiten der Fugen und das Erreichen der Grenztragfähigkeit beendet. Das Bild 5 stellt einen Vergleich der in [10] festgestellten Tragfähigkeiten der Konstruktionsart ohne senkrechte Fugen mit der Konstruktionsart mit senkrechten Fugen dar. Zwischen den Unter-

suchungen in [10] und den hier durchgeführten Berechnungen ohne senkrechte Fugen ist kein signifikanter Unterschied zu erkennen. Lediglich im Endbereich der Kurve sind geringfügige Unterschiede vorhanden. Diese sind auf die Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung in den hier getätigten Berechnungen zurückzuführen. Aus den entstehenden Verformungen resultieren Exzentrizitäten, die zusammen mit der aufgetragenen Vorspannung zu einer erhöhten Biegebelastung der Horizontalfugen führen. Daher kommt es infolgedessen zu einem früheren Abgleiten der beteiligten Segmente. Das in Bild 5 angegebene Biegemoment bezieht sich auf das aufgetragene Biegemoment am Turmkopf.

Ein anderes Verhalten ist bei der Betrachtung der Grenztragfähigkeit für die Turmkonstruktion mit senkrechten Fugen festzustellen. Durch die Vertikalfugen kommt es bereits bei reiner Torsionsbelastung zu einem Abfall der Tragfähigkeit. Der qualitative Kurvenverlauf bei steigendem Biegemoment ist vergleichbar mit der Turmkonstruktion ohne Vertikalfugen und verläuft zu dieser Betrachtung nahezu parallel. Durch die Zunahme des Biegemoments fällt die maximal aufnehmbare Torsionsbelastung stetig ab. Generell kann aufgrund der Segmentteilung kein geschlossener Querschnitt und somit kein konstanter Schubfluss, wie er in der Theorie nach BREDT angewendet wird, angesetzt werden. Die Grenzlasten nach [4] können aus diesem Grund nicht erreicht werden. Neben den numerisch bestimmten Grenzlasten der beiden Turmkonstruktionen ist auch dieser theoretische Ansatz in Bild 5 dargestellt. Dabei wird für den überdrückten Fugenzustand ein BREDT'scher Schubfluss angesetzt. Mit Beginn der Fugenklaffung fällt die theoretische Grenzlast ab. Durch das Öffnen der Fugen kann nach [4] lediglich von einer Schubabtragung nach SAINT VENANT ausgegangen werden. Wie schon in [10] beschrieben, entsteht im überdrückten Zustand ein Unsicherheitsbereich. Dieser wird durch die Ergänzung der senkrechten Fugen vergrößert. Im klaffenden Zustand bleibt für den Turm ohne senkrechte Fugen eine Tragreserve vorhanden. Für die Turmkonstruktion mit vertikalen Trockenfugen fällt die Grenzlast stärker ab und erreicht bei einer Fugenklaffung von rund 50% die Grenzlast des theoretischen Ansatzes nach [4].

3.4 Steifigkeitsuntersuchung

Um das Tragverhalten der Turmkonstruktion mit senkrechten Fugen näher zu betrachten sowie die Ursachen des Versagens zu verifizieren, wurden die Verdrehungen in Abhängigkeit von der Biege-Torsionsbelastung untersucht. Dazu wurde das Turmmodell nach der Aufbringung der Vorspannung sowie des Biegemoments bis zum Berechnungsabbruch mit einem stetig wachsenden Torsionsmoment belastet. Die Ergebnisse sind in Form einer Last-Verdrehungskurve in Bild 6 dargestellt. Die Kurven stellen dabei das Verformungsverhalten bei steigendem Torsionsmoment und konstant wirkender Biegebelastung dar. Bis zu einer bestimmten Verdrehung ist die Verdrehsteifigkeit linear, wenn auch mit unterschiedlicher Stei-

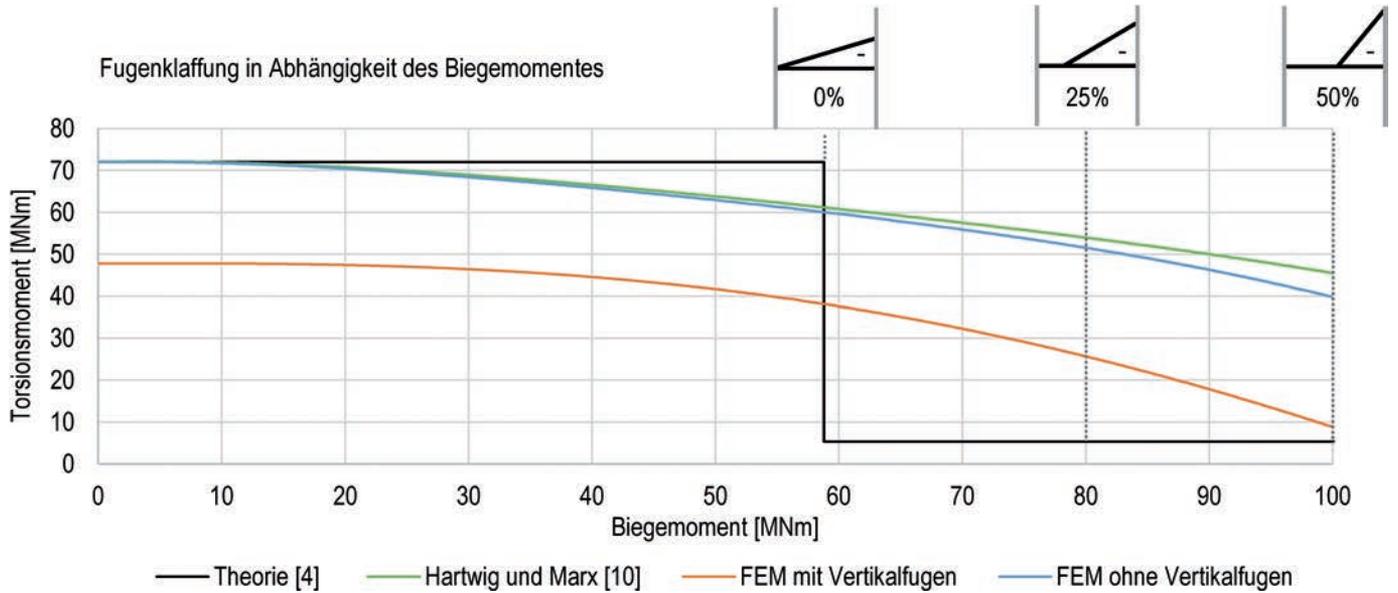


Bild 5 Vergleich der Grenztragfähigkeiten aufgrund einer Torsionseinwirkung bei steigendem Biegemoment
Comparison of load capacities due to a torsion moment with increasing bending moment

gung. Bei größeren Biegemomenten ist die Verdrehsteifigkeit tendenziell durch die Spannungumlagerung in der Fuge sowie die entstehenden Fugenklaftungen geringer. Ab einer Grenzverdrehung, welche durch einen starken Abfall in der Verdrehsteifigkeit definiert ist, nehmen die Verformungen aller Belastungskonfigurationen überproportional zu. Schon vor dem eigentlichen Versagen beziehungsweise dem Abbruch der numerischen Berechnung nehmen die Systemsteifigkeiten so stark ab, dass das Tragwerk instabil wird. Um die Gründe für den plötzlichen Steifigkeitsverlust identifizieren zu können, wurde der Kontaktstatus des Turms näher untersucht.

Der Zustand der Fugen im Belastungsschritt der Steifigkeitsabnahme für einen Turm unter reiner Torsion ist in Bild 7 a) dargestellt. Obwohl der Turm in diesem Fall neben der Normalkraft aus der Vorspannung lediglich durch ein Torsionsmoment belastet wird, kommt es durch die Verkantung der Kreisringsegmente zu klaffenden Bereichen. Insgesamt kann ein symmetrisches Öffnen und Abgleiten der Horizontalfugen beobachtet werden. Jeweils unterhalb einer Vertikalfuge verläuft der Bereich der Fugenöffnung links herum (je nach Drehrichtung des Torsionsmoments). Entgegengesetzt dazu stellt sich auch eine Fugenöffnung oberhalb jeder Vertikalfuge ein. Somit öffnen sich jeweils zwei Viertel der Horizontalfuge. Der Bereich, der sich in der Horizontalfuge öffnet, ist dabei durch die Vertikalfugen ober- und unterhalb dieser Horizontalfuge begrenzt. Das Bild 7 b) macht deutlich, dass die Fugenklaftung stufenartig über die Turmhöhe vonstatten geht. Dazu wurden die Bereiche, in denen kein Kontakt oder ein Gleiten vorhanden waren, in einem zusammenhängenden Verlauf eingefärbt.

Es bilden sich zwei stufenförmige Abtreppungen in Drehrichtung des angreifenden Torsionsmoments aus. Die Gründe für dieses Tragverhalten liegen im Verformungsverhalten der einzelnen Segmente unter einer Torsionsbe-

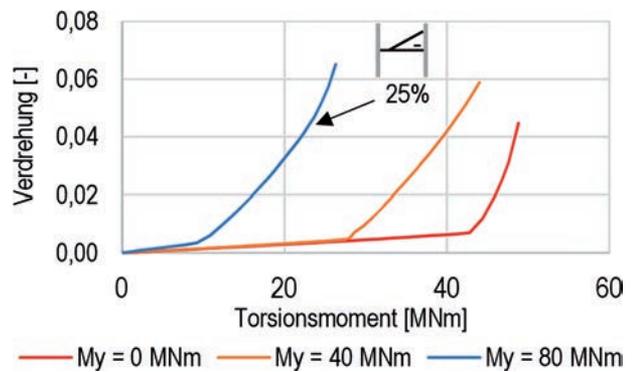


Bild 6 Verdrehsteifigkeit unter kombinierter Biege- und Torsionsbelastung
Torsional stiffness under combined bending and torsional load

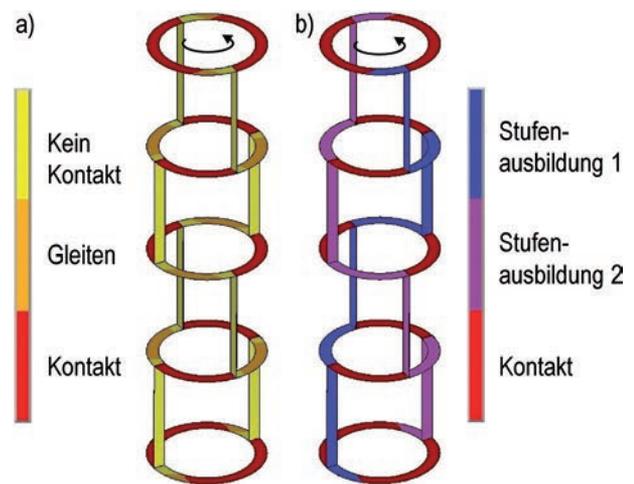


Bild 7 Kontaktstatus zum Zeitpunkt des Steifigkeitsverlustes unter reiner Torsion
Contact status when the structure fails under pure torsion moment

lastung. Bei der Konstruktion mit senkrechten Fugen liegt aufgrund der Teilung der Kreisringsegmente kein wölbfreier Querschnitt mehr vor. Wie in Abschn. 2.4 beschrieben, kommt es aufgrund der Torsion zu Axialverschie-

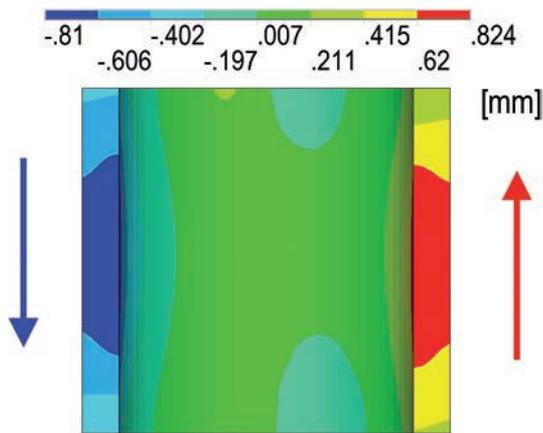


Bild 8 Verformungsverhalten in Axialrichtung unter reiner Torsion zum Zeitpunkt der Steifigkeitsabnahme [mm]
Deformation behavior in the axial direction under pure torsion when the structure fails

bungen und damit zu einer Verkantung der Elemente. In Bild 8 ist das Verformungsverhalten von einem Segment zum Zeitpunkt der Steifigkeitsabnahme dargestellt. Dabei sind die Verschiebungen in Axialrichtung abgebildet. Die Verschiebungen, die aus der Vorspannung resultieren, wurden nach dem Superpositionsprinzip für diese Darstellung von den Gesamtverschiebungen abgezogen. Es ist zu erkennen, dass sich das Segment aufgrund der Torsion in den vertikalen Fugen entgegengesetzt zueinander mit rund 0,8 mm verschiebt.

Das Verhalten im Gesamtbauwerk ist schematisch in Bild 9 dargestellt. Infolge der Torsion verformt sich ein einzelnes Segment in der Vertikalfuge so, dass eine Segmentecke eine Axialverschiebung nach oben erfährt, während die andere Segmentecke eine Verschiebung nach unten aufweist. Bei den angrenzenden Segmenten ist die Verformung jeweils genau entgegengesetzt. Aus diesem Grund kommt es dazu, dass jeweils zwei Bereiche der übereinanderliegenden Segmente einen Kontakt beziehungsweise infolge der Verformung eine Pressung besitzen (rot eingefärbt), während die anderen Fugenbereiche aufgrund der Axialverschiebung einen klaffenden Bereich (dunkelgrau eingefärbt) darstellen. Über die gesamte Turmhöhe bilden sich diese Pressungs- und Öffnungsbereiche im Wechsel aus. Dadurch kommt es zu einer stufenförmigen Öffnung der Fugen.

Der Abfall der Steifigkeiten für den Fall, dass zu dem Torsionsmoment auch eine Biegebelastung aufgebracht wird, ist im Vergleich zur reinen Torsionsbelastung vor allem im überdrückten Zustand geringer. Dies liegt an der Behinderung der Verwölbung im Bereich der Biegedruckzone. Umgekehrt führt die Biegezugzone dazu, dass sich die Axialverschiebungen leichter einstellen können. Der Abfall der Steifigkeit beginnt aus diesem Grund früher, ist jedoch nicht so stark ausgeprägt. Die numerischen Berechnungen weisen somit darauf hin, dass der zuvor stets vernachlässigte Anteil der Wölbkrafttorsion einen gravierenden Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Stahlbetonsegmentturms mit trockenen Vertikalfugen besitzt.

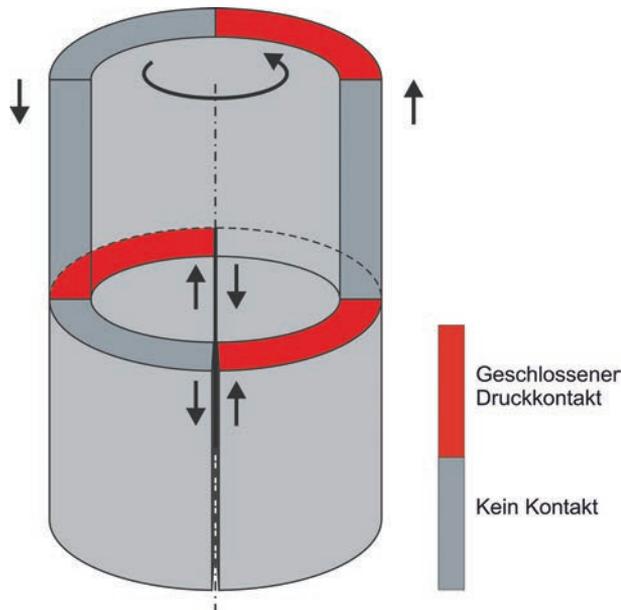


Bild 9 Schematische Verformungsfigur von drei Segmenten eines Turmabschnitts unter reiner Torsion und Normalkraft
Schematic deformation figure of three segments of a tower section under pure torsion and normal force

3.5 Grenztragverhalten ohne irreversible Verformungen

Neben der Funktion, die Einwirkungen der WEA abzutragen, muss der Turm auch die benötigte Technik zur Stromerzeugung und Weiterverarbeitung sowie die Spannglieder vor Witterungseinflüssen schützen. Dauerhafte Verformungen beziehungsweise klaffende Fugen beeinträchtigen die Dauerhaftigkeit und können somit auch zu einem Verlust der Funktionalität führen. Da bereits vor dem Abbrechen der numerischen Berechnung überproportionale Verformungen auftreten, wurde das Verformungsverhalten unter einer zyklischen Beanspruchung überprüft. Dazu wurde nach dem Aufbringen der Vorspannung und des Biegemoments die Torsionsbelastung zuerst im linearen Verformungsbereich sukzessive gesteigert und anschließend auf null zurück entlastet. Wie dem Bild 10 zu entnehmen ist, konnten dabei keine irreversiblen Verformungen beobachtet werden. Die Verdrehung geht nach der Entlastung wieder auf null zurück. Für den Fall, dass das Torsionsmoment über den kritischen Punkt – der Grenzverdrehung – hinaus belastet wird, bleiben auch nach der vollständigen Torsionsentlastung Verdrehungen im System bestehen. Die Grenzverdrehung ist durch das Ende des linearen Verformungsbereichs markiert. Ein Überschreiten dieses Punkts führt daher zu Undichtigkeiten in der Konstruktion, da die klaffenden, senkrechten Fugen nicht in den geschlossenen Zustand zurückgeführt werden können.

Die Betrachtung der Be- und Entlastungskurven führt zu dem Gedanken, die maximal aufnehmbaren Lasten auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) neu zu definieren. Durch die Erkenntnis, dass beim Erreichen der Grenzverdrehung in der numerischen Berechnung bereits die Grenze der Dauerhaftigkeit erreicht ist, sollen

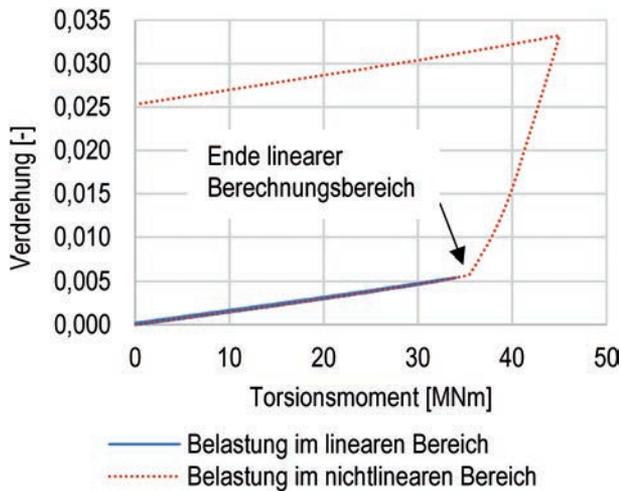


Bild 10 Verdrehung des Turmkopfs bei zyklischer Torsionsbelastung und einem Biegemoment von $M_y = 20$ MNm
Rotation of the tower head with cyclic torsional load and a constant bending moment of $M_y = 20$ MNm

als Voraussetzung für die Grenzlast aus den genannten Gründen ein vollständiger Rückgang der Verformungen sowie generell gering gehaltene Deformationen sein. Aus diesem Grund wurde für eine weitere Betrachtung die kritische Last, bis zu der die Verformungen im Last-Verformungsdiagramm linear verlaufen, als Grenzlast im GZG für die Turmkonstruktion mit trockenen Vertikalfugen angesetzt. Die neu definierte Grenzlast ist in Bild 11 ergänzend aufgeführt.

Es ergibt sich eine mit der Biegebelastung linear abnehmende Grenzlast des Torsionsmoments. Diese wird zusätzlich durch die Voraussetzung begrenzt, dass es im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu keinen klaffenden Fugen aufgrund einer Biegebeanspruchung kommen darf. So entstehen im Vergleich zur aktuellen Theorie Unsicherheiten im Bereich der überdrückten Fugen sowohl im GZT als auch im GZG. Mit dem Öffnen der

Horizontalfuge aufgrund eines Biegemoments ergibt sich der im Bild 11 grün markierte Bereich. Hier ist zu erkennen, dass auch bei einem Turm mit senkrechten Fugen Tragreserven im GZT im Vergleich zur Theorie nach [4] vorhanden sind.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind als ideale Kurven zu verstehen, da das Tragverhalten und das Erreichen der Grenztragfähigkeit lediglich durch die Kontakte in den Berechnungen beschrieben wurden. Am realen Bauwerk würden Rissbildung und der Übergang des Stahlbetons in den Zustand II weitere Tragfähigkeitseinbußen mit sich bringen. Ein weiterer zu betrachtender Punkt wären mögliche Imperfektionen in den Fugen [13] wie Unebenheiten oder Verunreinigungen beim Einbau der Segmente. Diese Verunreinigungen hätten nicht nur einen Einfluss auf die Spannungsverteilung in den Fugen, sondern auch einen erheblichen Einfluss auf den Reibbeiwert in den Segmentfugen. Ebenso wird der Reibbeiwert durch dynamische Beanspruchungen in den Fugen beeinflusst [14], was in die hier vorliegenden Ergebnisse nicht eingeflossen ist. Auch Kriech- und Schwindeffekte sowie Temperaturlasten wurde nicht weiter betrachtet.

4 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass es bei allgemeiner Betrachtung der Biege- und Torsionsmomente möglich ist, einen Segmentturm ohne eine kraftschlüssige Verbindung der Halbschalen auszuführen. Weiter zeigen die Berechnungen jedoch auch, dass sich ein erheblicher Verlust an Steifigkeit bzw. Tragfähigkeiten in Bezug auf die Torsion einstellt. Die derzeit angewandte Bemessung von horizontalen Kreisringsegmentfugen trifft nicht zu, wie auch schon in [8] dargestellt. Bei einer zusätzlichen Ergänzung der Konstruktion mit vertikalen Fugen wird deutlich, dass für eine solche Konstruktion neue Bemessungsregeln entwickelt werden müssen. Die derzei-

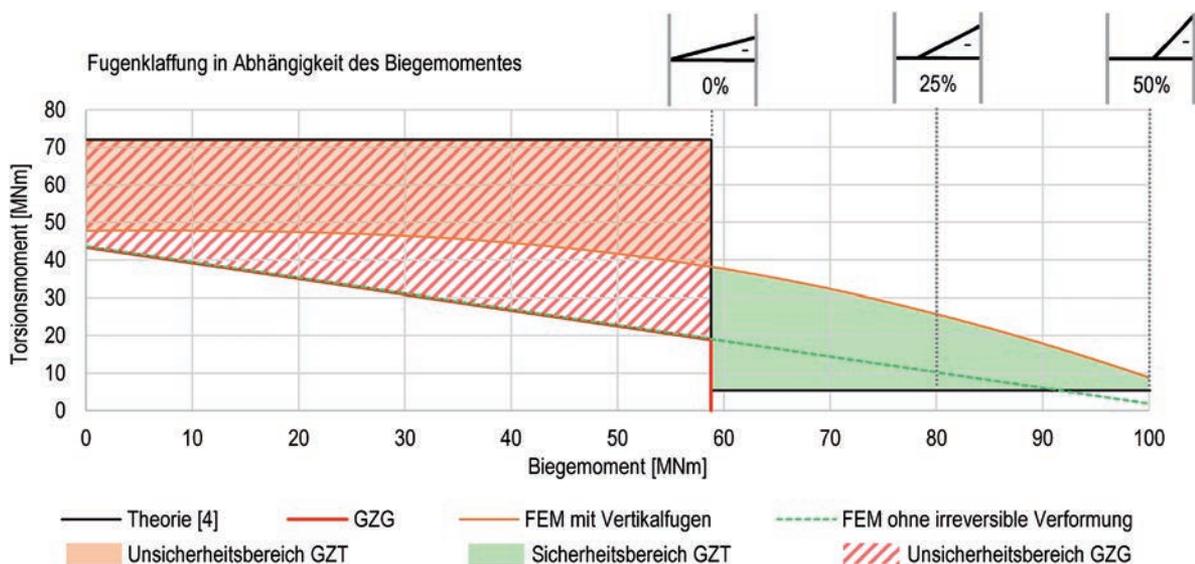


Bild 11 Grenztragfähigkeiten aufgrund einer Torsionseinwirkung bei steigendem Biegemoment im GZT und GZG
Load capacities due to torsion moment with increasing bending moment of serviceability limit state and ultimate limit state

tigen Konstruktionen mit einer kraftschlüssigen Verbindung der senkrechten Fugen müssen in der Lage sein, kleinste Verformungen in vertikaler Richtung unterbinden zu können. Minimale Verformungen (kleiner 1,0 mm) reduzieren die Torsionstragfähigkeit eines Segmentturms bereits deutlich.

Bei den Ergebnissen dieser Untersuchung gilt es zu berücksichtigen, dass lediglich die Grenztragfähigkeiten in Bezug auf das Versagen der Kontakte betrachtet wurden. Zur endgültigen Abschätzung der Tragfähigkeiten für einen Turm mit vertikalen Fugen müssen die Grenzen der Betontragfähigkeit mit einbezogen werden. Dieses Problem entsteht insbesondere in den horizontalen Fugen im Bereich der vertikalen Segmentteilung aufgrund der zusätzlich entstehenden Spannungen aus Wölbkrafttorsion.

Literatur

- [1] BÖGL, S.: *Hybride Windkrafttürme – Neue Generation von Windkraftanlagen*. BauPortal 123 (2011), S. 2–4.
- [2] LANGE, H.; ELBERG, C.: *Entwicklung von weichen Türmen für Windenergieanlagen – Softtower*. Stahlbau 86 (2017), S. 351–356.
- [3] GLÄSER, C.; PUTTENDÖRFER, N.; BROCKMANN, S.; HARTWIG, T.: *Vorspannung bei Onshore-Windenergieanlagen*. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 5, S. 355–364.
- [4] GRÜNBERG, J.; GÖHLMANN, J.: *Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise*. In: BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J. D. (Hg.): *Betonkalender 2011*. Kraftwerke, Faserbeton. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, S. 19–168.
- [5] SEIDEL, M.: *Entwicklung der Turmbauwerke für die Multi-MW-Klasse*. Tagungsband Deutsche Windenergie-Konferenz (DEWEK). Wilhelmshaven 2002.
- [6] PUTKE, T.; BOHUN, R.; MARK, P.: *Experimental analyses of an optimized shear load transfer in the circumferential joints of concrete segmental linings*. Structural Concrete 16 (2015), S. 572–582.
- [7] PLANK M.; REINECK K.H.; SOBEK W.: *Dry joints between precast elements made of UHPFRC – Experimental investigation on their load-bearing capacity under static loading*. 4th International Symposium HiPerMat. Kassel 2016.
- [8] SCHNEIDER, S.; HÜMME, J.; MARX, S.; LOHAUS, L.: *Untersuchungen zum Einfluss der Probekörpergröße auf den Ermüdungswiderstand von hochfestem Beton*. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), Heft 1, S. 58–67.
- [9] VON DER HAAR, C.; MARX, S.: *Design aspects of concrete towers for wind turbines*. Journal of the South African Institution of Civil Engineering 57 (2015), S. 30–37.
- [10] HARTWIG, S.; MARX, S.: *Zum Torsionstragverhalten extern vorgespannter Kreissegmente mit trockenen Fugen*. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 11, S. 740–746.
- [11] MAHNKEN, R.: *Lehrbuch der technischen Mechanik – Elastostatik*. Mit einer Einführung in Hybridstrukturen. Berlin: Springer Vieweg 2015.
- [12] Eurocode 2. *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*. Berlin: Beuth, 01/2011.
- [13] THEILER, W.; REICHT, O.; TUE, N. V.: *Auswirkungen von Unebenheiten bei trockenen Druckverbindungen von Betonbauteilen*. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 10, S. 687–698.

5 Ausblick

Die Ausführung des hier dargestellten Systems könnte den Aufwand auf der Baustelle beim Errichten einer WEA deutlich reduzieren. Um die Tragfähigkeiten von Turmschäften mit Vertikalfugen realitätsnah erfassen zu können, sind weitere numerische Untersuchungen sowie Versuche zur Verifizierung des Tragverhaltens erforderlich. Am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover sind hierfür Großversuche an einer solchen Struktur sowie einer identischen Turmstruktur ohne Vertikalfugen geplant. Das Ziel dieser Untersuchungen ist es, ein neues Bemessungsmodell für die Tragfähigkeit von Kreisringsegmenten ohne und mit zusätzlichen senkrechten Segmentteilungen zu entwickeln.

- [14] HARTWIG, S.; BETZ, T.; MARX, S.: *Statische und dynamische Reibwertermittlung an geschliffenen Segmentfugen*. Bautechnik 96 (2019), Heft 2 zur Veröffentlichung angenommen.

Autoren



M.Eng. Steffen Hartwig
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
Appelstraße 9a
30167 Hannover
hartwig@ifma.uni-hannover.de



Hendrik Bock, M. Sc.
grbv Ingenieure im Bauwesen
GmbH & Co. KG
Expo Plaza 10
30539 Hannover
h.bock@grbv.de



Dr.-Ing. Joachim Göhlmann
grbv Ingenieure im Bauwesen
GmbH & Co. KG
Expo Plaza 10
30539 Hannover
j.goehlmann@grbv.de



Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Leibniz Universität Hannover
Institut für Massivbau
Appelstraße 9a
30167 Hannover
marx@ifma.uni-hannover.de



INGENIEURE IM BAUWESEN

Hauptsitz Hannover

Expo Plaza 10
30539 Hannover
Telefon +49 511 98494-0
Telefax +49 511 98494-20
info@grbv.de
www.grbv.de

Niederlassung Berlin

Wichmannstraße 6
10787 Berlin
Telefon +49 30 3001316-0
Telefax +49 30 3001316-20
berlin@grbv.de

Wasserbau

Hochbau

Ingenieurbau

Industriebau

Windenergie