

## Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

Dipl.-Ing. Markus Plank

Dr.-Ing. Björn Frettlöhr

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek



**Universität Stuttgart**

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD



Kurztitel:	UHFFB - Windenergietürme
Antragsteller:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h.c. Werner Sobek Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) Pfaffenwaldring 7 + 14 70569 Stuttgart
Projektleiter:	Dipl.-Ing. Markus Plank (ILEK) – ab 01.06.2011 Dr.-Ing. Björn Frettlöhr (ILEK) – bis 31.05.2011
Projektbearbeitung:	Dipl.-Ing. Markus Plank (ILEK) Dr.-Ing. Björn Frettlöhr (ILEK) Dipl.-Ing. Jan Quappen (SWE)
Gesamtkosten:	394.846,00 €
Anteil Bundeszuschuss:	240.688,50 €
Projektlaufzeit:	45 Monate
Projektbeteiligte:	Forschungspartner Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) Pfaffenwaldring 7 + 14 70569 Stuttgart Stiftungslehrstuhl Windenergie (SWE) Allmandring 5b 70569 Stuttgart  Industriepartner Ed. Züblin AG Lafarge

**Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.**

**Aktenzeichen: SF - 10.08.18.7-09.25 / II2 – F20-09-43**

**Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.**



## 1 Motivation

Bei den Gründungs- und Turmtragwerken bisher installierter Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) handelt es sich überwiegend um Konstruktionen aus Stahl. Der wesentliche Vorteil von Stahlkonstruktionen ist das relativ geringe Eigengewicht bei gleichzeitig hoher Steifigkeit. Nachteilig sind allerdings die hohen Herstellungskosten der Stahlsegmente, der aufwendige und kostspielige Korrosionsschutz sowie die hohe Kosten verursachende Erneuerung der Korrosionsschutzbeschichtung, welche bei Tragwerken aus Stahl innerhalb der Nutzungsdauer einer OWEA, die üblicherweise bei 20 Jahren liegt, mindestens einmal von Nöten ist.

Eine wirtschaftlich vielversprechende Alternative zu Turmtragwerken aus Stahl stellen extern vorgespannte Turmtragwerke aus dem Hochleistungswerkstoff ultrahochfester Faserfeinkornbeton (UHFFB) in Segmentbauweise dar. Das Ziel des im Folgenden beschriebenen Forschungsprojekts war es, die Machbarkeit dieses innovativen Turmkonzeptes nachzuweisen. Das Forschungsprojekt wurde federführend vom Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart in Zusammenarbeit mit dem Stiftungslehrstuhl Windenergie der Universität Stuttgart sowie den Industriepartnern Ed. Züblin AG und Lafarge durchgeführt.

## 2 Gegenstand des Forschungsprojekts

### 2.1 Entwurfsgrundlagen und Logistikkonzept

#### 2.1.1 *Design Basis*

In der *Design Basis* wurden Angaben zum Standort und den Kenndaten der OWEA, zu den Baugrundeigenschaften sowie den maritimen Bedingungen und Windverhältnissen festgehalten.

Als repräsentativer Standort wurde ein Standort in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) der Nordsee mit einer Wassertiefe von 39,50 m LAT (niedrigste astronomische Tide, engl. *lowest astronomical tide*) gewählt. Die Kenndaten der OWEA wurden auf der Grundlage von öffentlich zugänglichen Angaben für Anlagen mit einer Nennleistung von 5 Megawatt festgelegt. Die Baugrundeigenschaften sowie die maritimen Bedingungen und Windverhältnisse wurden von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG zusammengestellt.

Ergänzend wurden die hydrologischen und meteorologischen Daten in der AWZ der Nordsee, welche am Standort der Nordseeboje II (NSB II) und der Forschungsplattform FINO1 gemessen wurden, ausgewertet und daraus Wellenverteilungsdiagramme, sogenannte Scatter-Diagramme, zur Beschreibung des Langzeitverhaltens des Seegangs abgeleitet. Eine Beurteilung hinsichtlich deren Brauchbarkeit für den gewählten Standort der OWEA ergab, dass die Scatter-Diagramme für den Standort der NSB II in die *Design Basis* übernommen und für die gesamt-dynamische Berechnung der OWEA verwendet wurden.

#### 2.1.2 **STRABAG Serial System**

Das STRABAG Serial System ist eine von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelte Systemlösung, die die Herstellung, die Montage, den Transport und die Errichtung bzw. Installation einer OWEA umfasst [1]. Das Besondere der Systemlösung ist, dass die komplette Windenergieanlage an Land hergestellt und montiert wird und mit einem Spezialschiff als Ganzes zum Aufstellort transportiert und auf einem im Vorfeld vorbereiteten Planum auf dem Meeresboden installiert wird. Mit dem der Systemlösung zugrundeliegenden Logistikkonzept wird primär das Ziel verfolgt, die kostenintensiven Arbeiten und die damit einhergehenden Risiken auf See zu minimieren. Damit wird das enge Zeitfenster, in dem die notwendigen Wetter- und Seebedingungen für die Durchführung von Arbeiten auf See gegeben sind, optimal ausgenutzt.

Das Logistikkonzept ist auf die von der Zentralen Technik der Ed. Züblin AG entwickelte Tragwerkslösung für OWEA abgestimmt. Diese besteht aus einem Schwerkraftfundament [2, 3] und einem darauf aufgesetzten Stahlrohrturm.

### 2.2 Entwurf eines Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise

Unter Berücksichtigung der vielfältigen Anforderungen wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts eine Alternative zum Stahlrohrturm entwickelt. Dabei handelt es sich um ein zentrisch vorgespanntes Turmtragwerk aus UHFFB in Segmentbauweise.

UHFFB ist aufgrund seiner herausragenden Materialeigenschaften ein idealer Werkstoff für den Einsatz bei Tragwerken von OWEA. Bezüglich seiner mechanischen Eigenschaften besitzt UHFFB eine höhere Druckfestigkeit und eine höhere Ermüdungsfestigkeit als normal- oder hochfester Beton, was die Ausführung von schlankeren und leichteren Tragstrukturen ermöglicht. Die daraus resultierende Reduktion des Eigengewichts ist unmittelbar mit der Einsparung von Rohstoffen und Energie verbunden, was in Zeiten knapper werdender Ressourcen immer mehr an Bedeutung gewinnt. Darüber hinaus ist UHFFB aufgrund seines

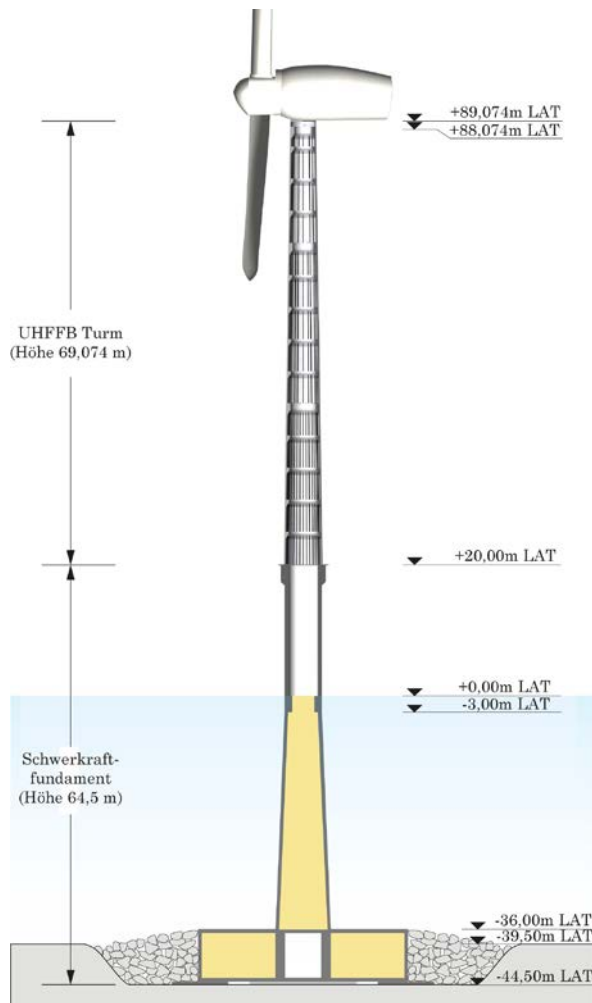


Bild 1: Längsschnitt durch das Tragwerk bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm

zwischen den Verankerungspunkten mit Hilfe von Konsolen, ausgebildet als Druckring am oberen Rand der Segmente, geführt. Damit werden am verformten System die Einflüsse aus der Exzentrizität der Spannglieder in Bezug auf die Systemachse vermieden.

Die Fügechnik soll nicht nur den Kraftübertrag zwischen den Segmenten sicherstellen, sondern auch eine einfache Montage und Demontage des Turms ermöglichen. Beide Anforderungen werden durch das Zusammenspannen der Segmente mittels Trockenfuge erreicht.

### 2.3 Versuche zum Materialverhalten von UHFFB

Grundlage einer jeden Bemessung sind genaue Kenntnisse über das Materialverhalten des verwendeten Werkstoffs. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde der von der Firma Lafarge mit der Bezeichnung Ductal® entwickelte UHFFB auf seine mechanischen Eigenschaften hin untersucht. Der verwendete UHFFB war mit Stahlfasern (2,0 Vol.-%) vom Typ Redaelli ( $l_f / d_f = 14 \text{ mm} / 0,185 \text{ mm}$ ) versehen und wurde einer Wärmebehandlung unterzogen.

Unter anderem wurden die folgenden Materialkennwerte ermittelt:

- Druckfestigkeit an 18 Zylindern mit einem Durchmesser von  $\varnothing = 100 \text{ mm}$  und einer Höhe von  $h = 200 \text{ mm}$ :  $f_c = -211,3 \text{ MPa}$  mit einem Variationskoeffizienten von  $v = 5,70 \%$ ;
- E-Modul unter Druckbeanspruchung an 9 Zylindern mit einem Durchmesser von  $\varnothing = 100 \text{ mm}$  und einer Höhe von  $h = 200 \text{ mm}$ :  $E_c = 59364 \text{ MPa}$  mit  $v = 1,14 \%$ ;
- Biegezugfestigkeit an 9 Prismen ohne Kerbe mit einer Querschnittsbreite von  $b = 75 \text{ mm}$  und einer Querschnittshöhe von  $h = 75 \text{ mm}$ :  $f_{ctff} = 39,57 \text{ MPa}$  mit  $v = 8,76 \%$ ;
- Biegezugfestigkeit und Rissbreite an 6 Prismen mit Kerbe mit einer Querschnittsbreite von  $b = 75 \text{ mm}$  und einer Querschnittshöhe von  $h = 75 \text{ mm}$  abzüglich einer Kerbtiefe von  $h_k = 25 \text{ mm}$ :  $f_{ctff} = 29,38 \text{ MPa}$  mit  $v = 6,08 \%$  und  $w_r(f_{ctff}) = 0,55 \text{ mm}$  mit  $v = 13,59 \%$ ;

sehr dichten Gefüges ein Werkstoff mit hoher Dauerhaftigkeit. Der Instandhaltungsaufwand, vor allem hinsichtlich des Korrosionsschutzes, ist bei Tragwerken aus UHFFB im Vergleich zu Tragwerken aus Stahl deutlich niedriger. Dies lässt auf geringere Lebenszykluskosten und damit auf eine höhere Wirtschaftlichkeit der Windenergieanlage schließen. Für die Segmentbauweise, und damit die serielle Vorfertigung von Turmsegmenten im Werk, spricht zum einen die Sicherstellung einer gleich bleibend hohen materialtechnologischen Qualität und Maßhaltigkeit der Segmente und zum anderen die Reduzierung der Herstellungskosten durch effizienten Materialeinsatz und Verringerung des Arbeitsaufwands.

Der UHFFB Turm hat eine Höhe von 69,074 m (Bild 1). Der Turm weist über seine Höhe einen konischen Verlauf auf, wobei der Außendurchmesser am Turmfuß 6,00 m und am Turmkopf 4,006 m beträgt. Der Turm ist in 14 Segmente unterteilt, davon haben die unteren 13 Segmente eine Höhe von 5,00 m und das oberste Segment hat eine Höhe von 4,074 m. Das oberste Segment ist mit einem Stahladapter ausgestattet, der für den Übergang vom UHFFB Turm zum Azimut-lager der Gondel erforderlich ist.

Der UHFFB Turm wird mit Hilfe einer zentrischen externen Vorspannung, die innen im Turm verläuft, vorgespannt. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Wandungsstärke der einzelnen Segmente auf das Minimum zu reduzieren. Des Weiteren sind die Spannglieder entsprechend dem Momentenverlauf über die Höhe des Turms abgestuft. Zudem werden die Spannglieder



- axiale Zugfestigkeit an 9 Versuchskörpern ohne Kerbe mit einer Querschnittsbreite von  $b = 75$  mm und einer Querschnittshöhe von  $h = 75$  mm:  $f_{ct} = 14,54$  MPa mit  $v = 4,19$  %;
- axiale Zugfestigkeit und Rissbreite an 9 Versuchskörpern mit Kerbe mit einer Querschnittsbreite von  $b = 50$  und einer Querschnittshöhe von  $h = 50$  mm:  $f_{ct} = 16,42$  MPa mit  $v = 9,36$  % und  $w_r(f_{ct}) = 0,306$  mm mit  $v = 34,77$  %.

Im Anschluss an die Zugversuche wurde an den Versuchskörpern mit Kerbe durch Messung der Faserorientierung im Bereich der Kerbe die Zugfestigkeit bei eindimensionaler Faserausrichtung (1D) ermittelt. Die hierzu verwendete Messeinrichtung und die mathematische Beschreibung der nichtlinearen Korrelation zwischen der Faserorientierung und der 1D Zugfestigkeit sind in [4] dargestellt. Die 1D Zugfestigkeit ergab sich zu  $f_{ct,1D} = 25,96$  MPa. Die Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Ableitung der charakteristischen Werte (5 % - Fraktilewerte). Die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit ergab sich zu  $f_{ck} = -183,8$  MPa, die charakteristische 1D Zugfestigkeit ergab sich zu  $f_{ctk,1D} = 22,74$  MPa.

## 2.4 Auslegung des Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise

Die Eigenfrequenzanalyse der Tragstruktur bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm zeigte, dass bei einem UHFFB Turm mit einer Wandungsstärke von  $t = 200$  mm ein ausreichender Abstand zwischen der Eigenfrequenz der Tragstruktur und den Erregerfrequenzen gewährleistet ist und gemäß Resonanzdiagramm eine „soft-stiff“-Auslegung erreicht wird.

Ausgehend von einem UHFFB Turm mit einer Wandungsstärke von  $t = 200$  mm wurden mehrere Turmvarianten untersucht, mit dem Ziel, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit des UHFFB Turms prinzipiell nachzuweisen sowie durch eine Minimierung der Wandungsstärke der Turmsegmente den Materialverbrauch zu reduzieren.

Die Beanspruchungen der OWEA aus Eigengewicht, den Umweltbedingungen Wind und Wellen sowie aus den Betriebsbedingungen wurden durch eine dynamische Berechnung des Gesamtsystems mit dem Simulationsprogramm Flex 5 ermittelt. Da mit diesem Programm die Vorspannung des UHFFB Turms nicht berücksichtigt werden konnte, mussten die Belastungen infolge Vorspannung separat ermittelt werden, ebenso wie die Belastungen infolge Temperatur und Imperfektion.

Für die Nachweise in den Grenzzuständen war eine nichtlineare Berechnung der Schnittgrößen notwendig. Für die nichtlineare Berechnung ist die Biegemomenten-Krümmungs-Beziehung von entscheidender Bedeutung. Die Krümmung ist unter anderem auch vom Grad der Vorspannung abhängig, d.h. ob im Grenzzustand der Tragfähigkeit die Fugen zwischen den Segmenten überdrückt sind oder ob ein Klaffen der Fugen zugelassen wird. Eine überschlägige Bemessung der Tragstruktur ergab, dass der Vorspanngrad für die Optimierung der Wandstärke der Segmente ausschlaggebend ist. Der Grund hierfür ist, dass das Ermüdungsverhalten von druckbeanspruchtem Beton eine deutliche Abhängigkeit von der Mittelspannung zeigt, also mit wachsender Mittelspannung bei gleichen Schwingbreiten die Bruchschwingzahl abnimmt. Ein niedrigerer Vorspanngrad führt demzufolge zu einer wirtschaftlicheren Turmstruktur. Dies setzt jedoch voraus, dass die Kraftübertragung in den Fugen durch eine geeignete Fugenausbildung sichergestellt werden kann, und zwar insbesondere die Kraftübertragung über teilweise geöffnete Fugen - auch bei Torsion - und die Kraftweiterleitung in die anschließenden Segmente. Aus diesem Grund wurden im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer und zyklischer Belastung durchgeführt.

## 2.5 Versuche an Fugen

### 2.5.1 Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung wurden Druck- und Schub-Druck-Versuche nach Bild 2 durchgeführt.

Es wurden insgesamt 53 Versuchskörper geprüft. Dabei handelte es sich um:

- Druckversuche an 5 Versuchskörpern ohne Fuge (Referenzprismen);
- Schub-Druck-Versuche an:
  - 9 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel  $\alpha$  von  $0^\circ$ ,  $25^\circ$  und  $35^\circ$ );
  - 9 Versuchskörpern mit gestrahlter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel  $\alpha$  von  $0^\circ$ ,  $25^\circ$  und  $35^\circ$ );
  - 15 Versuchskörpern mit rauer Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel  $\alpha$  von  $0^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $55^\circ$ );
  - 15 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 3 Versuchskörper mit einem Fugenneigungswinkel  $\alpha$  von  $0^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $55^\circ$ ).

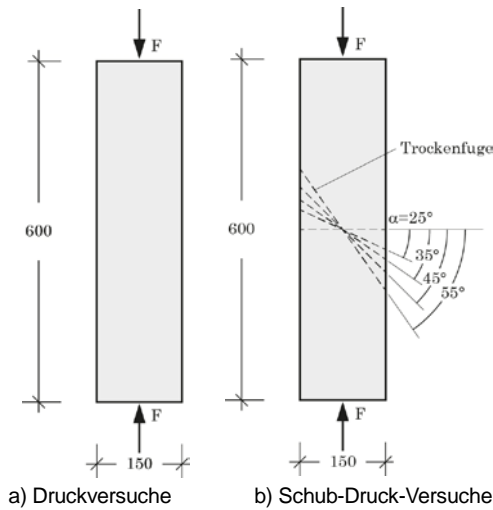


Bild 2: Versuchskörper zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung (Abmessungen in mm)

Die Durchführung der Schub-Druck-Versuche hatte zum Ziel, die Grenzbeziehung zwischen der Schub- und Normalspannung  $\tau_j$  und  $\sigma_j$  in der Fuge zu ermitteln, um so den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktfläche bzw. der Fugegeometrie (Bild 3) auf die Tragfähigkeit von Trockenfugen beurteilen zu können.

Die Ergebnisse der Schub-Druck-Versuche können zweckmäßig in einem Schub-Druck-Diagramm dargestellt werden, das aus theoretischen Überlegungen von [5] hervorging. Dabei wird derjenige Punkt in das Schub-Druck-Diagramm eingetragen, der die in der Fuge wirkende Schub- und Normalspannung  $\tau_j$  und  $\sigma_j$  bei Versagen des Versuchskörpers beschreibt (Bild 4).

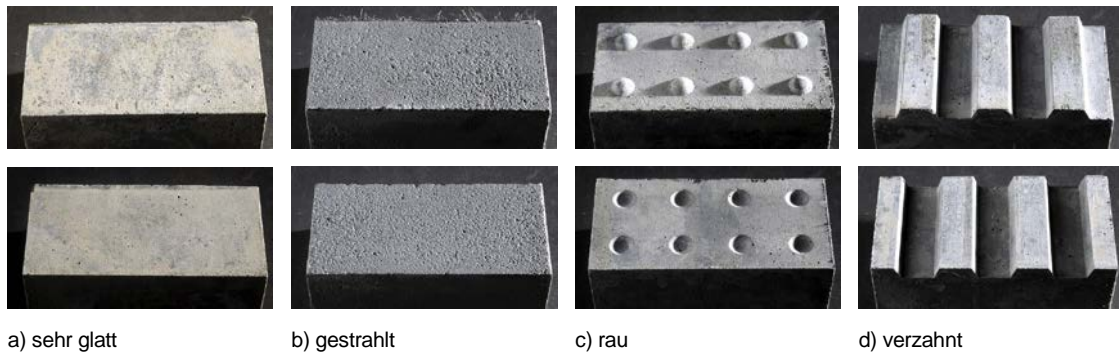


Bild 3: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugegeometrien der oberen (jeweils oberes Bild) und der unteren Versuchskörperhälften (jeweils unteres Bild)

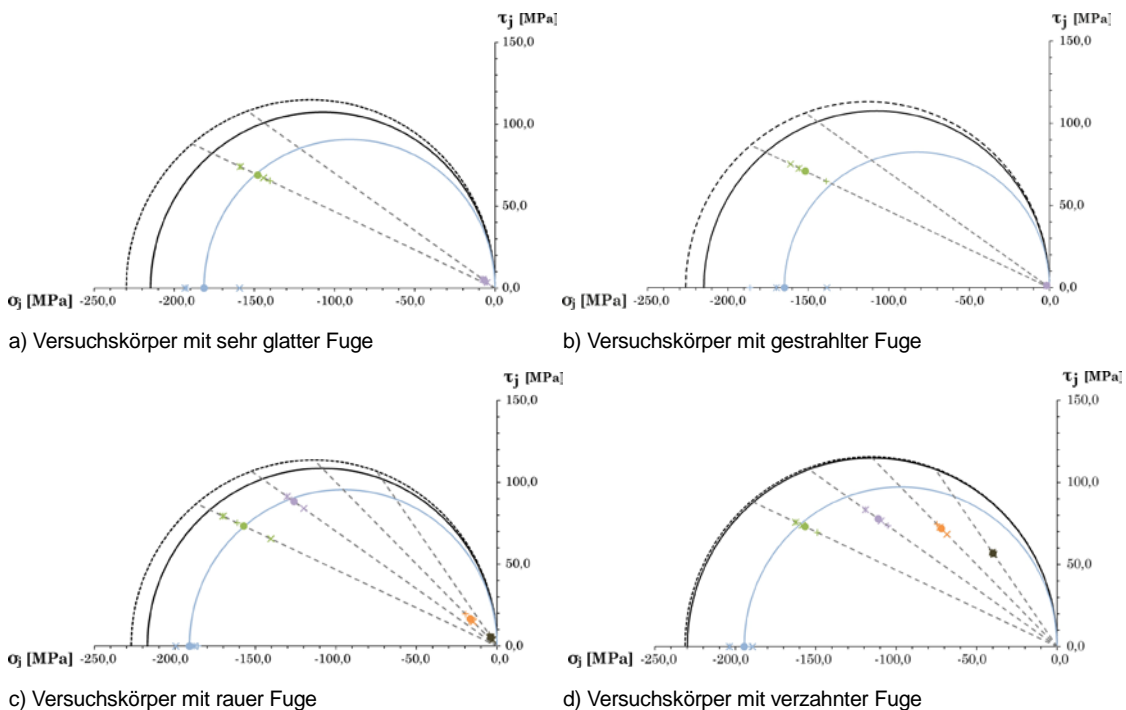


Bild 4: Schub-Druck-Diagramme

## 2.5.2 Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung

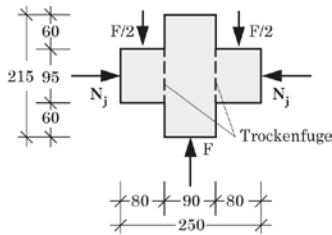


Bild 5: Versuchskörper zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung (Abmessungen in mm)

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung wurden zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung Abscherversuche nach Bild 5 durchgeführt.

Die Abscherversuche wurden zunächst unter statischer Belastung durchgeführt, um daraus die Absolutwerte der Ober- und Unterlasten für die Durchführung der Abscherversuche unter zyklischer Belastung abzuleiten.

Insgesamt wurden 78 Versuchskörper geprüft. Dabei handelte es sich um:

- Abscherversuche unter statischer Belastung an:
  - 15 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 5 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa);
  - 22 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 5 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa und 7 Versuchskörpern mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa);
- Abscherversuche unter zyklischer Belastung an:
  - 12 Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge (jeweils 1 oder 2 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,80, 0,85 oder 0,90);
  - 29 Versuchskörpern mit verzahnter Fuge (jeweils 1 oder 2 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa oder 90 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,80, 0,85 oder 0,90 sowie jeweils 3 oder 6 Versuchskörper mit einer Fugennormalspannung von 0 MPa und einer bezogenen Oberlast von 0,60, 0,65, 0,70, 0,75 oder 0,80).

Die Abscherversuche unter zyklischer Belastung hatten zum Ziel, das Ermüdungsverhalten der Fugen in Abhängigkeit der Fugennormalspannung zu untersuchen. Dabei wurden die Bruchlastspielzahlen und der Verlauf der Verschiebung parallel zu den Fugen infolge der zyklischen Belastung festgehalten. Bei Durchläufern wurde eine Prüfung der Resttragfähigkeit vorgenommen.

Hinsichtlich der Bruchlastspielzahl wurde festgestellt, dass bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa sowohl bei Versuchskörpern mit sehr glatter Fuge als auch bei Versuchskörpern mit verzahnter Fuge bei bezogenen Oberlasten von 0,80, 0,85 und 0,90 und einer bezogenen Unterlast von 0,05 mindestens ein Durchläufer auftrat. Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa versagten die Versuchskörper mit verzahnter Fuge bei bezogenen Oberlasten von 0,65, 0,70, 0,75 und 0,80 und einer bezogenen Unterlast von 0,05 frühzeitig. Lediglich bei einer bezogenen Oberlast von 0,60 und einer bezogenen Unterlast von 0,05 trat mindestens ein Durchläufer auf.

Während der zyklischen Belastung kam es sowohl bei den Versuchskörpern mit sehr glatter als auch mit verzahnter Fuge kaum oder nur zu einer geringfügigen Zunahme der Verschiebungen parallel zu den Fugen.

Die Prüfung der Resttragfähigkeit ergab, dass bei einer Fugennormalspannung von 6 MPa, 40 MPa und 90 MPa die erreichten Schubspannungen  $\tau_j$  nach vorhergehender zyklischer Belastung bei bezogenen Oberlasten von 0,80, 0,85 und 0,90 und einer bezogenen Unterlast von 0,05 sowohl bei den Versuchskörpern mit sehr glatter als auch mit verzahnter Fuge durchwegs deutlich über dem Mittelwert der Schubspannungen  $\tau_j$  lagen, der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab. Bei einer Fugennormalspannung von 0 MPa lag die erreichte Schubspannung  $\tau_j$  nach vorhergehender zyklischer Belastung bei einer bezogenen Oberlast von 0,60 und einer bezogenen Unterlast von 0,05 geringfügig unterhalb dem Mittelwert der Schubspannungen  $\tau_j$ , der sich aus den Abscherversuchen unter statischer Belastung ohne vorhergehende zyklische Belastung ergab.

## 3 Fazit

Mit dem Forschungsprojekt wurde ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung von Türmen für OWEA aus UHFFB in Segmentbauweise geleistet. Es wurde gezeigt, dass die Verwendung des Hochleistungswerkstoffes UHFFB in Kombination mit der Segmentbauweise eine vielversprechende Alternative zu Stahlrohtürmen darstellt.



Um über das Stadium der Machbarkeitsstudie hinauszukommen und den Bau eines ersten Prototyps voranzutreiben, gilt es, die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Fragestellungen zu vertiefen und weitere, über dieses Forschungsprojekt hinausgehende Fragestellungen zu klären. Dies betrifft unter anderem die Erarbeitung einer Norm für den Hochleistungswerkstoff UHFFB sowie Bemessungsgrundlagen und -regeln speziell für Turmtragwerke aus UHFFB in Segmentbauweise. Diesbezüglich soll auf Grundlage der im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer und zyklischer Belastung und auf Grundlage theoretischer und empirischer Ansätze ein Bemessungsmodell für Trockenfugen entwickelt werden. Des Weiteren sind herstellungstechnische Fragestellungen zu klären. Zum einen betrifft dies die unter praktischen Gesichtspunkten erreichbare Passgenauigkeit in der Fuge sowie die Auswirkungen von Passungenauigkeiten oder sonstigen Imperfektionen auf die Kraftübertragung in der Fuge. Zum anderen gilt es, ein geeignetes Betonageverfahren bzw. eine geeignete Befüllmethode festzulegen, mit der im Hinblick auf die spätere Beanspruchung der Segmente eine optimale Verteilung und Orientierung der Fasern erzielt werden kann.

## Schrifttum

- [1] Hartwig, U.; Mayer, T. (2012): Entwurfsaspekte bei Gründungen für Offshore-Windenergieanlagen. Bautechnik 89 (2012), Heft 3, S.153-161
- [2] Urban, S.; Strauss, A.; Wagner, R.; Reiterer, M.; Dehlinger, Ch. (2012): Experimentelle Untersuchungen von ermüdungsbeanspruchten Betonstrukturen zur Feststellung des realen Schädigungsgrades. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 7, S. 463-475. Ernst & Sohn, Berlin, 2012
- [3] Urban, S.; Strauss, A.; Macho, W.; Bergmeister, K.; Dehlinger, Ch.; Reiterer, M. (2012): Zyklisch belastete Betonstrukturen. Bautechnik 89 (2012), Heft 11, S. 737-753. Ernst & Sohn, Berlin, 2012
- [4] Frettlöhr, B. (2011): Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB). Dissertation, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart, 2011
- [5] Zelger, C.; Rüschi, H. (1961): Der Einfluß von Fugen auf die Festigkeit von Fertigteilschalen. Beton- und Stahlbetonbau 56 (1961), Heft 10, S. 234-237. Ernst & Sohn, Berlin, 1961

## Bilder

- Bild 1: Längsschnitt durch das Tragwerk bestehend aus Schwerkraftfundament und UHFFB Turm
- Bild 2: Versuchskörper zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung (Abmessungen in mm)
- Bild 3: Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktflächen bzw. Fugengeometrien der oberen (jeweils oberes Bild) und der unteren Versuchskörperhälften (jeweils unteres Bild)
- Bild 4: Schub-Druck-Diagramme
- Bild 5: Versuchskörper zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung (Abmessungen in mm)